

大飞机活动翼面机器人自动制孔应用研究

薛宏, 罗群, 刘博锋, 刘义明, 郑炜, 肖潇

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 结合大飞机活动翼面类部件的结构特点, 研究并设计了一套全流程机器人柔性制孔方案。根据机器人的加工方式, 提出了利用杯锥系统进行工装快速定位的方法, 实现了设备的高效率柔性化制孔。对自动制孔工艺流程及离线编程进行了研究, 形成了一套适用于活动翼面类部件的工艺方案及离线编程方法。针对不同材料的叠层制孔, 采用变参数加工方法及钻穿工艺, 提高了设备制孔的效率和质量。通过试验件的验证, 证明了该套柔性制孔方案可以满足产品的加工要求, 提高生产效率。

关键词: 活动翼面; 工业机器人; 自动制孔; 数字化装配; 离线编程

Research on Application of Robot Automatic Drilling in Large Aircraft Moveable Airfoil

XUE Hong, LUO Qun, LIU Bofeng, LIU Yiming, ZHENG Wei, XIAO Xiao

(AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Combined with the structural characteristics of large aircraft moveable airfoil, a set of whole process flexible automatic drilling scheme is designed. According to the machining way of the robot, a method of quick location by use the cup-and-cone system is proposed to realize the flexible drilling of robot. This paper also studied and built the process of automatic drilling and offline programming used for moveable airfoil. Changeable parameters drilling and breakout process are selected to drill the workpiece with different material, which improved the efficiency and quality of robotic drilling. It is proved that the flexible hole drilling scheme can meet the processing requirement of the product and improve the production efficiency.

Keywords: Moveable airfoil; Industrial robot; Automatic drilling; Digital assembly; Offline programming

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.19.086

目前飞机的装配过程主要采用机械连接方式, 而一架飞机大约有上百万个连接件^[1]。传统的飞机装配主要采用人工制孔。随着对飞机性能要求的不断提高, 新材料尤其是复合材料、钛合金等的应用不断增多。手工制孔加工过程因不稳定、效率低、技能依赖性强等因素, 难以满足对新型飞机装配的高精度、高质量的需求。自动化精密制孔由于加工过程稳定可控, 已经成为提高装配质量及飞机寿命的一个重要途径。相对于传统的五坐标自动钻铆机床, 机器人自动制孔系统具备占地面积小、灵活性强、柔性高的特点, 可以满足不同产品加工的同时大大提高制孔的效率和精度^[2]。目前国外 BROETJE、ELECTROIMPACT、KUKA 等公司研制的机器人制孔系统已经成功应用于空客 A350、波音 747 等飞机的装配^[3-4], 中国航空制造技术研究院、浙江大学等也开展了应用于飞机部件装配的自动制孔技术研究^[5-7]。同时, 国内对自动制孔设备在飞机装配中的

应用也进行了大量的研究。陈海峰等^[8]对自动制孔设备在某飞机尾翼装配中的应用进行了研究, 介绍了自动制孔中工艺参数的选择以及设备的加工方法。刘顺涛等^[9]针对飞机蒙皮自动制孔开发了一套飞机自动制孔工艺设计软件, 实现了制孔信息的分类、提取、规范存储等文本。刘军^[10]对自动制孔技术在飞机装配中的精度控制技术以及离线编程技术进行了分析。然而, 目前的研究缺乏针对于部件级的产品的全流程的自动制孔应用分析。本文结合多个型号的研制, 对大飞机活动翼面类部件自动制孔的柔性化布局建设、加工方法以及离线编程等加工全流程进行了研究, 提出了一套适用于翼面类部件自动制孔方案。

1 设备及产品分析

1.1 活动翼面部件结构

活动翼面包括内襟翼、外襟翼、副翼、升降舵以及方

向舵等类型,主要由上下翼面、梁、肋、接头等组成,典型结构如图1所示。传统的装配流程为先完成肋、梁以及接头等零件装配形成活动面骨架,再通过骨架定位的方式,完成壁板的装配。随着飞机的研制,活动面开始大面积采用了可以减轻飞机重量但是装配难度较大的复合材料,对整个装配过程提出了更高的要求。

1.2 机器人自动制孔系统

本文应用的机器人自动制孔系统由机器人移动轨道设备、KUKA 机器人臂、多功能末端执行器、自动换刀器、控制系统、离线编程软件、除屑/除尘装置、安全防护装置、试件及校准工作站等部分组成(图2)。末端执行器装有主轴、孔径探测器以及定位相机。主轴配备夹持 HSKA40 刀柄的自动夹头开关,可实现刀具夹持、自动换刀制孔铳窝功能。孔径探测器孔可以实现对孔径和窝径的在线测量。通过使用定位相机,找寻目标特点(工艺钉、孔、工装定位点)用来校正工装及产品的位置和姿态。设备加工能力见表1。通过对加工能力与活动面需求对比,可知该机器人自动制孔系统满足活动面装配需求。考虑到机器人制孔效率,应在活动翼面完成骨架装配完成后,对产品上下翼面的连接紧固件孔进行制孔。

2 自动制孔工艺流程规划

合理的工艺流程和方法是提高自动制孔效率和质量的关键。为实现对不同型号的活动面进行自动制孔,需要对自动制孔站位、预装配方案、工艺流程等进行规划。

2.1 自动制孔站位布局

结合地轨式自动制孔设备定位精度高、加工范围大的特点,采用移动式工装在自动制孔站位进行柔性定位以提高设备的制孔效率。活动面从预装配、自动制孔、架外使用同一套工装,以保证产品装配过程的稳定性。工装在自动制孔站位采用杯锥系统进行定位:在自动制孔站位地面上有一套定位接头(锥),在工装框架底部安装与定位接头匹配的接头(杯)。通过杯与锥的配合,完成工装的精确定位。活动面在预装站位完成安装后,通过托运小车将工装移动到自动制孔站位进行制孔。完成制孔后,再移回到预装站位进行架下补铆工作。活动翼面自动制孔站位布局如图3所示。

2.2 产品预安装

在自动制孔之前采用临时紧固钉完成蒙皮与骨架的预连接。临时紧固钉一方面用于蒙皮的预拉紧,另一方面用于机器人自动制孔过程中的找正。普通工艺螺栓连接需要在产品内侧进行螺母安装,无法满足上下翼面同时安装需求。因此采用单面连接埋头空心铆钉,既可以起到蒙皮拉紧作用,又可以通过空心铆钉中心孔进

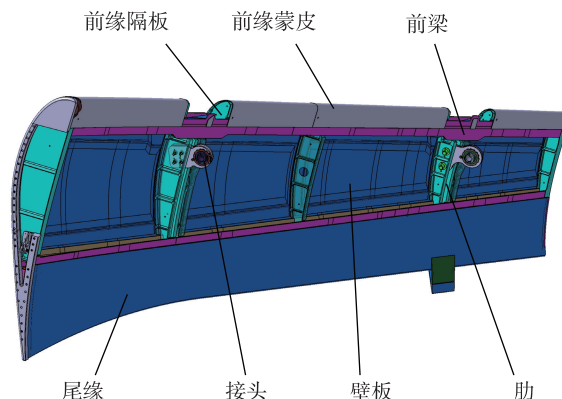


图1 活动翼面典型结构

Fig.1 Typical structure of moveable airfoil



图2 自动制孔系统

Fig.2 Automatic drilling system

表1 自动制孔系统加工能力

Table 1 Processing capacity of automatic drilling system

参数	性能	活动翼面需求
可加工材料	玻璃纤维、碳纤维、铝合金、钛合金	碳纤维、铝合金、钛合金
加工孔径	2.5~12mm	4~10mm
加工厚度	5~30mm	5~20mm
定位精度	±0.25mm	±0.5mm(孔位精度)
制孔精度	0.04mm	0.07mm
垂直度	±0.5°	±0.5°
重复定位精度	±0.05mm	—
制孔粗糙度	≤R _a 1.6(金属); ≤R _a 3.2(复材)	≤R _a 1.6(金属); ≤R _a 3.2(复材)
铳窝深度误差	0.05mm	-0.12~0.08mm
制孔速度	6个/min	—
系统轨道	24m	—
加工范围	21m×2.5m×2.5m	10m×2m×1.5m

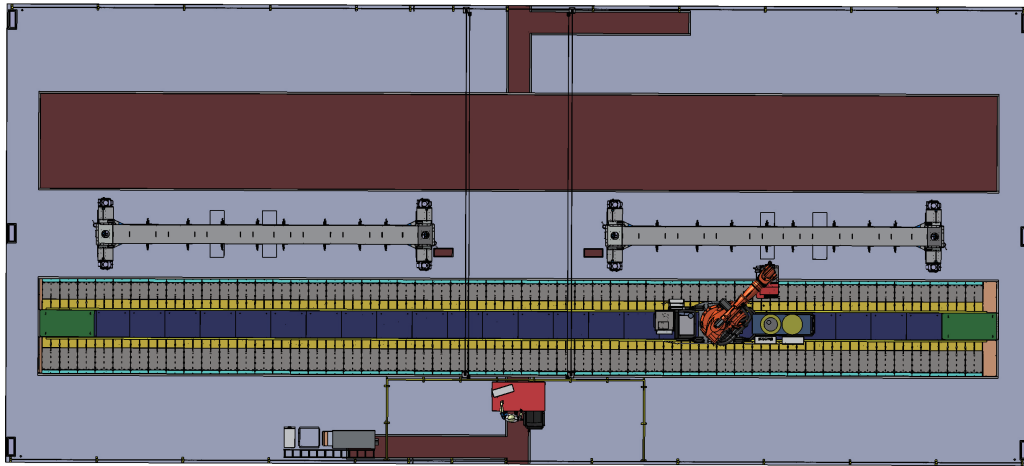


图3 活动翼面自动制孔站位布局
Fig.3 Station layout of moveable airfoil automatic drilling

行制孔找正。临时紧固钉直径应比终孔小2号,以避免最后钻掉临时紧固钉时刀具与紧固件不同心导致孔圆度偏差。预拉紧的顺序对于产品的最终装配质量至关重要。如果顺序制定不当,可能会造成壁板翘曲,无法关闭的间隙以及严重的不同心孔。临时紧固件应采用先肋后梁,先中间后两边的安装顺序。

2.3 自动制孔顺序

正确的制孔及找正顺序可以减少设备的空跑进而提高产品质量及加工效率。在设备制孔过程中,采用不重复换刀的原则进行设备制孔,即一把刀具制完活动翼面单面所有可钻制的紧固件孔。结合不换刀原则,对产品加工过程进行模拟及优化,得出采用从翼根到翼梢、从前梁到后梁的加工顺序可以提高制孔效率。

2.4 工艺流程

通过对自动制孔过程中各项因素的分析,得出活动翼面自动制孔工艺流程:

- (1) 在预装站位完成骨架装配及临时紧固钉安装;
- (2) 进入自动制孔站位,利用杯锥定位工装;
- (3) 制所有除了预紧孔位置的孔;
- (4) 在指定位置手动安装终孔临时紧固钉;
- (5) 制预紧孔位置的孔;
- (6) 旋转型架并定位工装,在下表面重复步骤(2)~(5);
- (7) 将工装移回预装站位,拆除终孔临时紧固钉并完成产品紧固件安装及补铆工作。

3 基于 Delmia 的离线编程与仿真

基于 Delmia 的离线编程是一种可视化的编程过程,利用 Delmia 仿真模块对机器人加工姿态、加工动作及路径进行设置,同时添加必要的设备信息,采用后置

处理模块对设备的姿态、动作及路径进行读取,生成设备可读的加工程序。整个编程过程不要需要与设备进行直接通信,设备运行和程序编制互不干涉。设备在生产一种类型产品时,程序员即可同时对下一种产品进行编程,提高了生产效率。基本的离线编程流程如图4所示。

3.1 设备产品位置匹配

将地面定位系统各个锥相对于机器人系统的坐标输入到设备的离线编程环境中,根据产品工装匹配的地面定位系统确定产品及工装在离线编程中的位置,如图5所示。通过测量飞机坐标系与机器人坐标系的相对位置关系,建立坐标转换关系,实现飞机坐标系与机器人坐标系快速转换。机器人将根据离线编程环境中机器人在地轨的位置及姿态进行加工。为进一步保证工装位置的准确度,可以在工装上设置找正点,在机器人制孔之前进行工装找正,通过计算实际找正点与理论找正点偏移对工装位置进行校正。

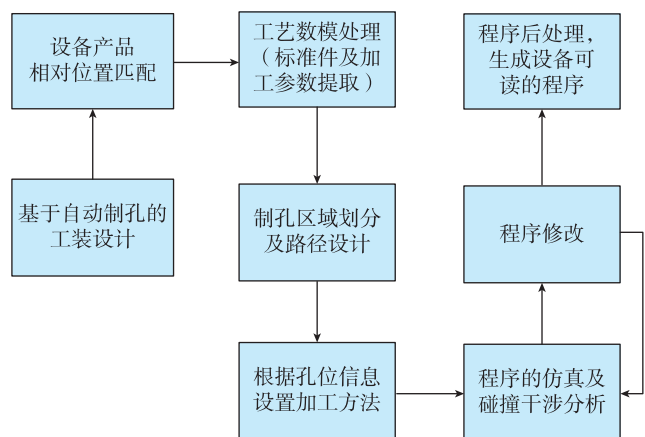


图4 离线编程流程
Fig.4 Process of offline programming

3.2 加工参数提取

由于离线编程规则以及不同产品三维模型结构建立方式的不同,需要对设计数模进行转化,形成可编程的数模。工艺数模的处理主要包括标准件、叠层材料、制孔工艺参数的提取。提取的各项信息存储到编程点中,离线编程通过对编程点的位置及参数进行读取和分析,生成制孔参数。

3.3 自动制孔程序编制及仿真

在规划自动制孔区域及加工路径之后,对自动制孔过程进行编程。首先需要对工装上的找正点设置找正程序,从而在机器人制孔过程中对工装位置进行修正。根据数模标准件孔位信息选择临时紧固钉及制孔孔位进行找正及钻孔程序的编制。根据孔径、叠层信息、加工信息设置刀具及加工参数,根据需要设置孔探的频率。程序编制完成后,使用 Delmia 自带的程序仿真及碰撞干涉分析功能对制孔程序进行验证。通过 Delmia 仿真分析,可以对机器人加工路径、加工姿态以及在加工过程中存在的碰撞和干涉进行分析和计算,并通过仿真结果对程序进行更改和优化。

3.4 自动制孔程序生成及加工

采用离线编程后置处理程序,生成设备可识别的自动制孔程序,将程序导入到设备控制系统中,进行产品加工。自动制孔流程如图 6 所示,整个流程完成制孔站位的转换、自动换刀、孔位及法向找正,自动制孔及在线测量等工作。

4 自动制孔参数方案

由于大量复合材料的引用,导致在自动制孔中存在复合材料、铝合金、钛合金等多种叠层组合工况。不同的叠层材料都有其最优的加工参数,传统的手工装配,加工参数无法进行实时调整,只能采用一种加工参数,导致加工效率以及产品质量的下降。采用高精度的钻铤一体式复合刀具以及研究变参数的加工方法是提高加工效率的一种解决方案。本文在采用钻铤一体式复合刀具的基础上对自动制孔刀具加工方法进行研究。

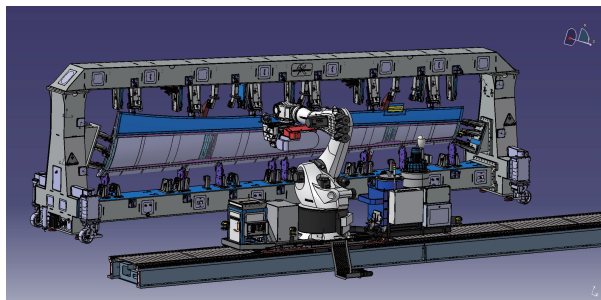


图 5 离线编程模型

Fig.5 Offline programming model

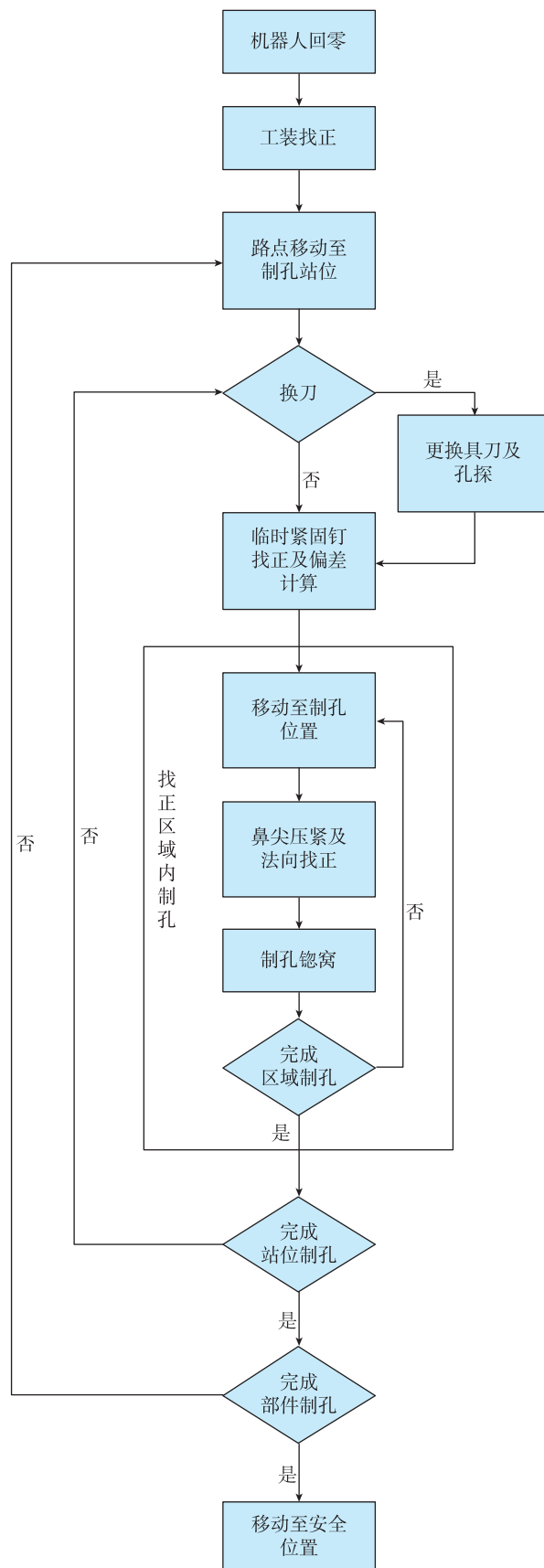


图 6 自动制孔流程

Fig.6 Automatic drill process

4.1 多叠层变参数加工

复合材料制孔出口分层和毛刺是造成复材钻孔缺陷的主要表现,影响复合材料出口缺陷的主要原因有刀尖结构、制孔转速、进给速度等^[11]。高的进给速度和低进给速度可以避免复合材料出口毛刺的产生^[12]。加工转速方面,钛合金小于铝合金,铝合金小于复合材料,进给量则相反。以复铝叠层产品为例,为保证产品质量,通常采用高转速、低进给完成整个叠层的加工,而高转速、低进给会增加刀具磨损及降低加工效率^[13]。为满足各种叠层制孔质量同时提高制孔效率,可采用与叠层匹配的变参数的加工方式。利用自动制孔设备加工参数可控的特点,在叠层制孔过程中,针对每一层加工的材料及厚度选择相应的加工参数,以保证每种叠层材料都使用最优加工参数。针对钛合金材料等难加工性,在变速参数加工中,应在刀尖接触钛合金叠层之前切换为钛合金加工参数以及刀具完全钻穿钛合金之后进行下一叠层加工参数切换,并根据材料厚度选择啄钻等加工方式,以防止高转速和高进给加工钛合金造成的刀具断裂。

4.2 复合材料钻穿工艺

复合材料叠层自动制孔过程中,为确保复合材料出口无分层和毛刺,需要采用 0.05mm/r 以内的低进给和较高转速。由于低进给、高转速会增大刀具磨损,通过试验发现,在提高进给到 0.1mm/r 以及设置转速为 6000r/min 情况下制孔,孔径及粗糙度都可以满足产品质量要求,只有出口质量不满足要求。因此针对复合材料,在自动制孔过程中添加钻穿工艺:在刀具开始加工到出口处采用高进给、低转速,出口处减小进给量增大转速,既可以满足制孔质量要求又可以提高刀具使用寿命。结合变参数加工与钻穿工艺结合的自动制孔过程如图 7 所示。

采用厚度 5mm 的 T300 复合材料试片进行钻穿工艺验证。图 8 第 1 排为转速 6000r/min、进给为 0.1mm/r 未采用钻穿工艺制孔出口情况;第 2 排为转速 6000r/min、进给为 0.1mm/r,采用钻穿工艺(转速 10000r/min、进给为 0.01mm/r)利用同一把刀具加工的复合材料孔。通过对比图 9 质量可看出,两种加工工艺孔径均满足要求,而采用钻穿工艺出口无毛刺和分层。

5 产品验证

以某型机外襟翼为试验对象,对自动制孔方案进行验证。该部件由前/后梁、上/下蒙皮、前/后缘、翼肋组合而成,全长 8000mm、翼根宽 1200mm、翼尖宽 600mm,单侧上下翼面共需制复材合材料孔大约 2500 个。其中前/后梁、上/下蒙皮、前/后缘均采用高强度碳纤维复合材料制造,翼肋为高强度铝合金,前缘与壁

板连接带板为纯复材结构,由于出口层无玻璃布织物铺层,手工制孔时极易出现制孔缺陷,造成零件报废。产品结构及加工如图 10 所示。

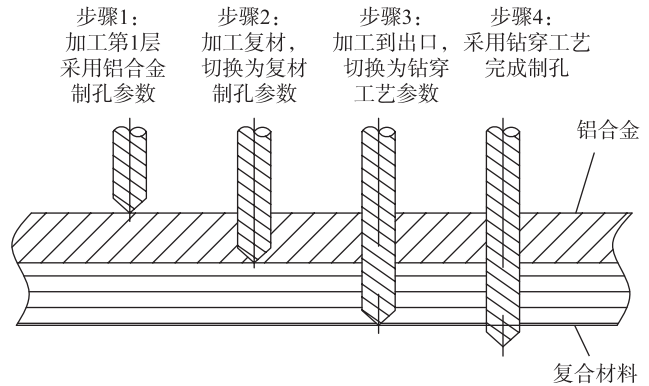


图7 自动制孔刀具加工过程
Fig.7 Automatic drilling process of tool

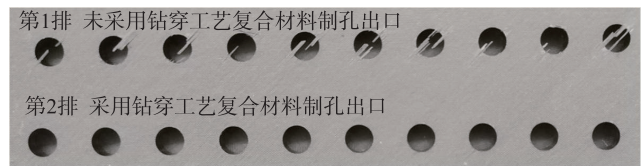


图8 制孔出口表面质量
Fig.8 Surface quality of drilling outlet

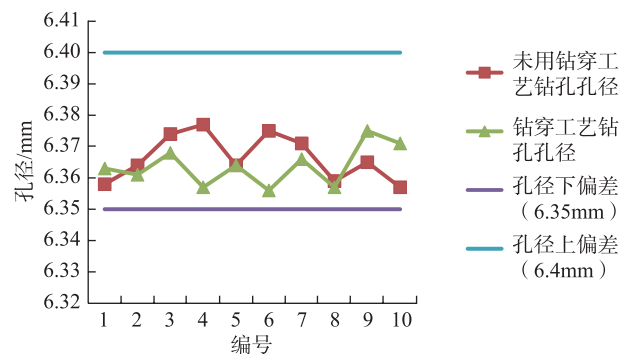


图9 孔径对比分析
Fig.9 Comparison of hole diameter



图10 外襟翼自动制孔试验
Fig.10 Automatic drilling experiment of out flap

完成翼面制孔后,对制孔孔径、窝深、垂直度、制孔位置度等进行了测量,所有精度都满足表1中活动面制孔精度要求。部分孔径测量结果如表2所示。

设备钻制紧固件孔如图11所示。

同时,通过制孔效率对比,采用机器人完成自动制孔耗时约10h,相比人工制孔所需的40h,加工效率提高了75%。试验证明,采用机器人进行活动翼面类部件自动制孔可保证产品的质量要求同时大大提高生产效率。

6 结论

本文针对活动翼面类部件的自动制孔,对柔性站位布局、工艺流程、制孔方案以及离线编程进行了设计和应用分析,形成了一套系统的全流程机器人柔性制孔方案。变参数加工方法以及钻穿工艺在自动制孔中的应用,为多叠层难加工材料的自动制孔提供了思路。某型机外襟翼的成功应用,证明了该自动制孔方法的可行性及高效性,为各类活动翼面的自动制孔奠定了坚实基础。

表2 孔径测量结果

Table 2 Result of the hole measurement

编号	叠层	孔径要求/mm	孔径结果/mm	总窝深度精度要求/mm	总窝深度精度结果/mm	垂直度误差/(°)	位置偏差/mm	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1	复材+铝	4.191~4.267	4.221	-0.12~0.08	-0.015	0.12	0.2	复材 2.46, 金属 0.60
2	复材+铝	4.191~4.267	4.229	-0.12~0.08	0.005	0.03	0.2	复材 2.67, 金属 0.66
3	复材+复材	4.191~4.267	4.236	0.12~0.08	-0.003	0.02	0.3	2.55
4	复材+复材	4.191~4.267	4.236	-0.12~0.08	-0.005	0.03	0.2	2.75
5	复材+复材+铝	4.191~4.267	4.233	-0.12~0.08	0	0	0.1	复材 2.12, 金属 0.35
6	复材+复材+铝	4.191~4.267	4.233	-0.12~0.08	-0.010	0.07	0.1	复材 2.42, 金属 0.48
7	复材+复材	4.826~4.902	4.874	-0.12~0.08	-0.020	0.13	0.2	2.30
8	复材+复材	4.826~4.902	4.863	-0.12~0.08	-0.015	0.11	0.2	2.21
9	复材+铝	4.826~4.902	4.859	-0.12~0.08	0	0	0.1	复材 2.63, 金属 0.75
10	复材+铝	4.826~4.902	4.866	-0.12~0.08	0.020	0.15	0.1	复材 2.38, 金属 0.56
11	复材+复材	5.055~5.131	5.111	-0.12~0.08	0.010	0.05	0.3	2.42
12	复材+复材	5.055~5.131	5.094	-0.12~0.08	0.005	0.02	0.3	2.27
13	复材+铝	6.350~6.420	6.377	-0.12~0.08	-0.010	0.06	0.2	复材 2.51, 金属 0.67
14	复材+铝	6.350~6.420	6.380	-0.12~0.08	-0.020	0.11	0.2	复材 2.66, 金属 0.58

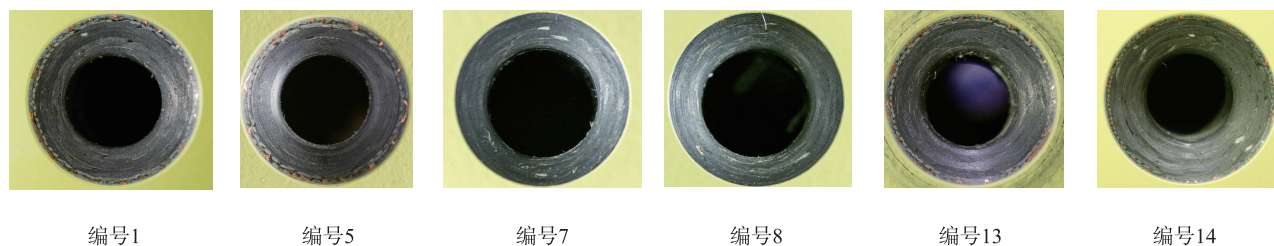


图11 自动制孔结果

Fig.11 Holes drilled by automatic robot

(下转第98页)

experimental analysis of process parameters to manufacture metallic micro-channels by micro-milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(9-12): 945-955.

[7] LEE Y M, LEE S J, LEE C Y, et al. The multiphysics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 227-232.

[8] XIA G D, JIANG J, WANG J, et al. Effects of different geometric structures on fluid flow and heat transfer performance in microchannel heat sinks[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 80: 439-447.

[9] 许业林, 江海东, 雷党刚. 搅拌摩擦焊在液冷流道制造中的应用[J]. 电子工艺技术, 2012(5): 300-302.

XU Yelin, JIANG Haidong, LEI Danggang. Application of FSW to liquid cooling channel manufacturing[J]. Electronics Process Technology, 2012(5): 300-302.

[10] 杨鑫鑫, 侯凯. 高效散热窄通道铝合金冷板扩散焊接及成型技术研究[J]. 制导与引信, 2016, 37(1): 49-52.

YANG Xinxin, HOU Kai. Research on diffusion welding and forming technology of high efficient heat dissipation aluminum alloy cooling plate with narrow passageway[J]. Guidance and Fuse, 2016, 37(1): 49-52.

[11] 李春林. 矩形槽道微通道冷板制造工艺技术[J]. 电子机械工程, 2009, 25(4): 38-40.

LI Chunlin. Microchannel cold-plate processing technology[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(4): 38-40.

[12] 王艳. 基于 MEMS 加工工艺的复杂结构微通道散热器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

WANG Yan. Investigation of microchannel heat sink with complicated channel structure based on MEMS technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[13] 赵仁祥. 高效散热微通道液冷冷板焊接技术及成形工艺研究[J]. 电子机械工程, 2008, 24(4): 33-36.

ZHAO Renxiang. Study on brazing technique and formation technology of cold plates with efficiently radiating liquid cooling microchannels system[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2008, 24(4): 33-36.

[14] 范建华, 邓永波, 宣明, 等. PC 微流控芯片黏接筋与溶剂的协同辅助键合[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 708-713.

FAN Jianhua, DENG Yongbo, XUAN Ming, et al. Synergistic bonding process of solvent and tendon for PC-based microfluidic chips[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 708-713.

[15] CEVIK P, KARACAM N, ERASLAN O, et al. Effects of different surface treatments on shear bond strength between ceramic systems and metal brackets[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017, 31(10): 1105-1115.

通讯作者: 杜立群, 博士、教授, 研究方向为微机电系统、微细加工, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第91页)

参考文献

[1] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 96-99.

YUAN Hongxuan. Manufacturing technology of connecting hole

in aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(1): 96-99.

[2] 何胜强. 大型飞机数字化装配技术与装备[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

HE Shengqiang. Digital assembly technology and equipment for large aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[3] DEVLIEG R. Robotic trailing edge flap drilling system[J/OL]. SAE Technical Papers, 2009, https://www.electroimpact.com/WhitePapers/2009-01-3244.pdf.

[4] ROOKS B. Automatic wing box assembly developments[J]. Industrial Robot, 2001, 28(4): 297-302.

[5] 王一军. 基于工业机器人的飞机壁板高速精确制孔系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

WANG Yijun. Study on high-speed accurate drilling system of aircraft panels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[6] 魏明哲. 机器人自动制孔控制系统软件开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

WEI Mingzhe. Control-software development of robot drilling system[D]. Hagnzhou: Zhejiang University, 2012.

[7] 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, 52(24): 61-64.

BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(24): 61-64.

[8] 陈海峰, 李海伟, 徐骥, 等. 自动制孔设备在某飞机尾翼装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 74-78.

CHEN Haifeng, LI Haiwei, XU Jian, et al. Research and application of automatic drilling equipment in empennage assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 74-78.

[9] 刘顺涛, 陈雪梅, 郭喜锋, 等. 飞机蒙皮自动制孔工艺设计研究[J]. 制造业自动化, 2017(4): 87-90.

LIU Shuntao, CHEN Xuemei, GUO Xifeng, et al. Research on the process of automatic holing for air-plane skin[J]. Manufacturing Automation, 2017(4): 87-90.

[10] 刘军. 机器人自动制孔技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 104-107.

LIU Jun. Application of robot automatic drilling technology in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 104-107.

[11] 徐银超, 陈浩, 曾滔, 等. 切削参数对碳纤维复合材料制孔质量的影响[J]. 硬质合金, 2016(5): 336-339.

XU Yinchao, CHEN Hao, ZENG Tao, et al. Influence of process parameters on drilling quality of CFRP materials[J]. Cemented Carbide, 2016(5): 336-339.

[12] MOHAN N S. Machining of fiber-reinforced thermoplastics: influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2005, 24(12): 1247-1257.

[13] DAVIM J P. 复合材料加工技术[M]. 安庆龙, 陈明, 宦海洋, 译. 北京: 国防工业出版社, 2016.

DAVIM J P. Machining composite material[M]. AN Qinglong, CHEN Ming, HUAN Haixiang, trans. Beijing: National Defence Industry Press, 2016.

通讯作者: 薛宏, 硕士、工程师, 研究方向为飞机数字化装配技术, E-mail: 490311912@qq.com.

(责编 大漠)