

自动制孔接触式法向调平结构 应用试验研究

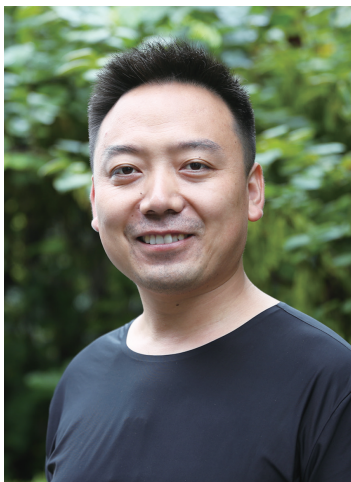
罗群,黄敏,杨超

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司机翼装配厂,西安 710089)

[摘要] 自动制孔技术已经广泛应用于航空产品装配当中,随着应用的逐渐深入,面对复杂曲面结构和密集型紧固件排列时,传统的激光法向调平方式出现了能力不足或者信号反馈失误的情况。针对这一难题,对接触式法向调平结构进行了试验设计和相关工艺试验与分析,验证了接触式法向调平结构在特殊条件下仍可有效保证最终质量要求。

关键词: 自动制孔;接触式法向调平;末端执行器;复杂曲面结构;法向测量

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.069



罗群

硕士、高级工程师,从事飞机装配研究,主要工作内容为飞机组部件数字化集成及自动化加工。

自动制孔技术在航空制造领域已经成熟应用,采用工业机器人或特型框架支撑加末端执行器的结构形式,已广泛应用于飞机机体的各类组部件生产^[1]。相比传统手工制孔,自动制孔技术具有高质高效的特

点,还可以节约成本,改善劳动环境^[2]。随着 ARJ21、C919 以及某些军机型号的研制生产,国内航空企业逐渐加大了自动制孔技术的应用范围,基本实现了全组部件的覆盖,国产数字化装备数量也逐年提升^[3]。

在自动制孔技术愈加深入、广泛的应用过程中,也出现了一些工程应用上的难题。目前,我国自行研制及进口的自动制孔装备大多采用激光测距的方式进行制孔前的非接触式法向调平,同时各种各样的非接触式法向测量算法也纷纷被提出。Gong 等^[4]的法向测量算法需先用特殊材料标记待制孔点,严重影响自动制孔效率,并不实用;Tian 等^[5]提出了基于小平面对称的四点激光测法向的方式,Yuan 等^[6]提出了基于小球面假设的四点激光测法向的方式,这些方式在面对复杂曲面结构表面(曲率较大或双曲率表面)或者密集型紧固件排列(紧固件排列间距小于 30mm)时,极易出现调平失误

现象,影响加工效率和制孔垂直度;Zhang^[7]和 Chang^[8]等提出的基于线激光的法向测量方式由于造价昂贵,在实际工业中很少应用。为应对传统非接触式法向调平^[9-19]的不足,国内外一些装备制造厂商提出了接触式法向调平结构,为验证这一结构的实际加工情况,本文设计了工艺试验加以验证,结合 ARJ21、C919 和某型运输机在实际生产中存在的问题,通过规划平板试验件、曲面试验件、典型产品试验件的方式,从制孔精度、制孔效率两方面考察接触式法向调平结构的应用效果。

接触式法向调平结构原理

1 接触式法向测量原理

法向测量的原理如图 1 所示,其中标准平面与压力脚端面平行。当压力脚压在工件表面上时,在自适应球铰的作用下,压力脚端面将自动与工件接触面对齐。这时,通过 3 个以上位移传感器测量标准平面的法向,

即为工件当前法向,完成法向测量。这种测量方式利用的是与压力脚接触的工件表面,测量面小,因而可以较准确地反映大曲率工件表面待钻铆点的真实法向。而标准平面起到了法向传递和精度放大的作用,有利于提高法向测量的精度。

这种法向测量方式的优点有:

(1)能够兼容各种曲率的工件表面法向测量。

(2)压力脚端面直径与标准平面直径比为1:3,由于标准平面的精度放大作用,法向测量精度高,稳定性好。

(3)激光传感器测量对象恒为内置标准平面,因此法向测量适应性好,对加工对象的颜色和材质不敏感。

(4)压力脚端面直径仅为25mm,即所需测量面直径为25mm,测量面小,能够覆盖更多的加工区域,提高自动制孔率。

2 法向测量及标定算法

2.1 法向测量算法

通过3个激光位移传感器测得标准平面的法向是法向测量的最后步骤,测量算法推导如下。

如图2所示,在法向测量坐标系(\$MEAS)下,激光传感器位置分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ,激光传感器激光投射向量分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 ,激光传感器测量数据分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 ,激光在标准平面上形成的投影点分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。则标准平面法向(Normal)计算公式为:

$$\text{Normal}=(Q_2-Q_1)\times(Q_3-Q_1) \quad (1)$$

式中, $Q_i=P_i+d_iV_i, i=1,2,3$ 。

2.2 法向标定算法

由于零件制造和安装误差,法向位移传感器实际安装“位置-方向”与理论安装“位置-方向”存在误差,因此有必要对位移传感器的实际安装位置 P 和方向 V 进行辨识,以保证法向测量的精度。

采用基准平面结合激光跟踪仪

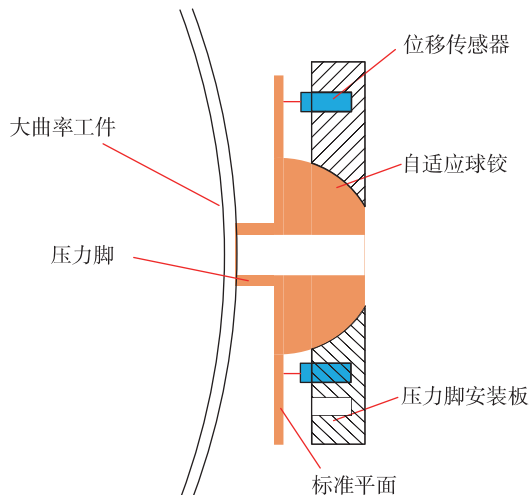


图1 接触式法向测量原理

Fig.1 Theory of contact normal measurement

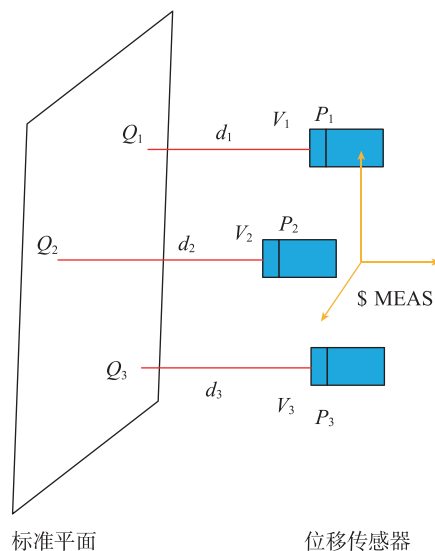


图2 法向测量算法符号定义

Fig.2 Symbolic definition of normal measurement algorithm

对法向测量装置的系统参数 P_i 和 V_i 进行辨识。利用法向测量装置对多组不同姿态下的基准平面法向进行测量,如图3所示,得到各位移传感器的读数 d_{ij} (i 表示传感器的编号, j 表示第 j 组数据),同时利用激光跟踪仪测得基准平面在法向测量坐标系下的方程参数 S_j 和 N_j (S_j 为平面内一点, N_j 为平面法向)。则由激光传感器测量原理,有式(2)方程成立。

$$N_j \cdot P_i + d_{ij} N_j \cdot V_i = N_j \cdot S_j \quad (2)$$

采用矩阵最小二乘的方式对方程组进行求解,得到系统参数 P_i 和 V_i ,完成法向测量装置的标定。

3 接触式法向调平

法向测量结束后,将得到当前刀具轴线与测得的孔位法向之间的空间轴线偏差信息,若该偏差超出设定阈值,则通过机器人的六轴运动将末端执行器轴线与该孔位法向偏差调整至许可范围内,完成调平过程,整个法向测量及调平的流程如图4所示。

4 试验台设计

试验台设计如图 5 所示,主要由 KUKA 机器人、制孔末端执行器和工装组成,接触式法向调平结构安装

于制孔末端执行器上。

工艺试验设计

为从制孔精度、制孔效率两方面

考察接触式法向调平结构在复杂曲面和密集型紧固件排列时的应用效果,规划的工艺试验共分 4 部分,表 1 为最终质量要求。

1 平板试件

平板试件加工,采用通用平板夹具夹持,验证平板状态下制孔的孔径、窝深的稳定性。平板试件分为 3mm、10mm 两个厚度,用于测试薄厚两个极限条件下的制孔能力,试件长 1m,宽 0.6m,最终测试孔的数量不少于 50 个。

2 曲面试件

曲面试件加工,采用特制曲面夹持夹具,验证曲面状态下制孔窝径、窝深的稳定性。试件厚度 3mm,长 1m,宽 0.6m,最终测试孔的数量不少于 50 个。

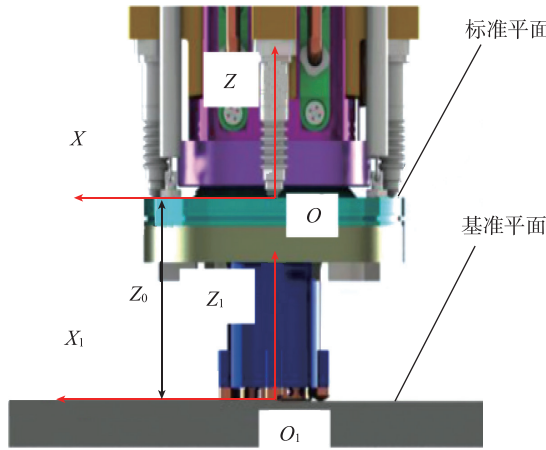


图3 法向测量装置标定方案

Fig.3 Calibration of the normal measurement device

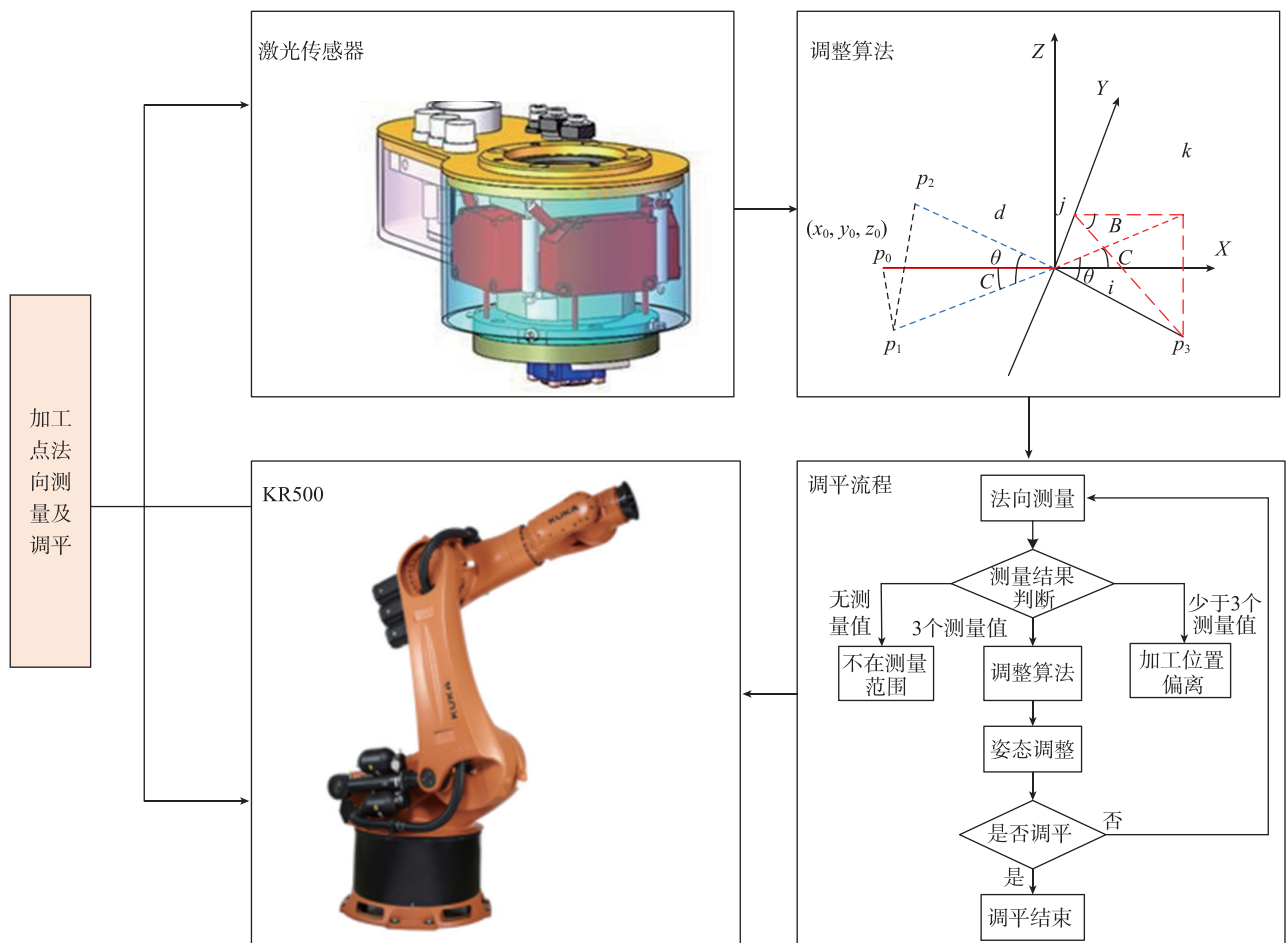


图4 法向测量及调平原理图

Fig.4 Flow chart of normal measurement and leveling

3 综合联调试验

综合联调试验,利用如图6所示的曲面结构夹持工装,验证曲面状态下制孔的窝径、窝深的稳定性,验证程序控制下法向调平情况。试件厚度3mm,长1m,宽0.6m,最终测试孔的数量不少于50个。

4 典型产品试件

设计制作典型产品试件,选取某型机外翼前缘局部结构,模拟实际产品装夹定位方式进行夹持,验证在实际状态下制孔的窝径(窝深)、孔径的稳定性,法向调平,基准孔自动识别找正,制孔效率等。分布示意图如图7所示。

试验结果

1 平板试件

1.1 3mm平面试板

3mm厚的平板试件先后加工450个孔,最终测量用的试件上有待检测孔150个。经测量,孔径范围为4.915~4.926mm,波动值为0.011mm,窝深范围0.951~0.991mm,波动值0.04mm,满足最终质量要求。

测量数据正态分布图和实物图片分别见图8、图9。

1.2 10mm平面试板

10mm厚的平板试件先后加工300个孔,最终测量用的试件上有待检测孔80个。经测量,孔径范围4.111~4.122mm,波动值0.011mm,窝深范围1.247~1.274mm,波动值0.027mm,满足最终质量要求。测量数据正态分布图和实物图片见图10、图11。

2 曲面试件

曲面试件先后加工300个孔,最终测量用的试件上有待检测孔80个。经测量,窝径范围7.175~7.203mm,波动值0.028mm,窝深范围1.107~1.135mm,波动值0.028mm,满足最终质量要求。测量数据正态分布图和实物图片见图12、图13。

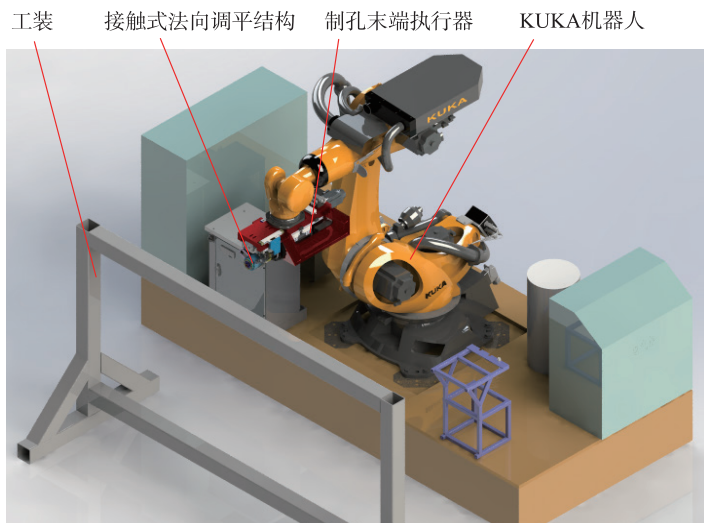


图5 制孔试验台
Fig.5 Drilling platform

表1 最终质量要求
Table 1 Final quality requirement

加工孔	镗窝深度/mm	孔径精度/mm	孔位精度/mm	孔垂直度/(°)
螺栓/铆钉	0~0.05	0~0.02	±0.5	90±0.5

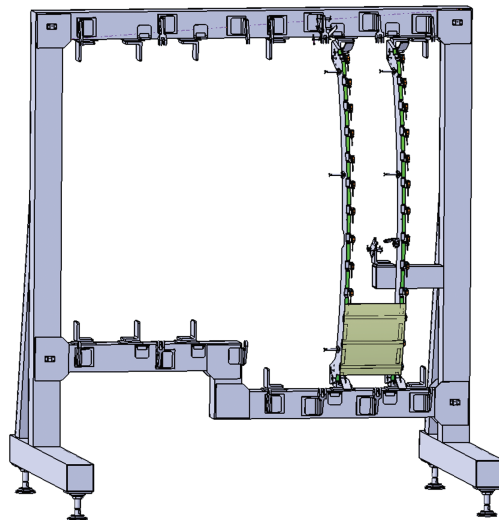


图6 综合联调试件夹具
Fig.6 Integrated debugging fixture

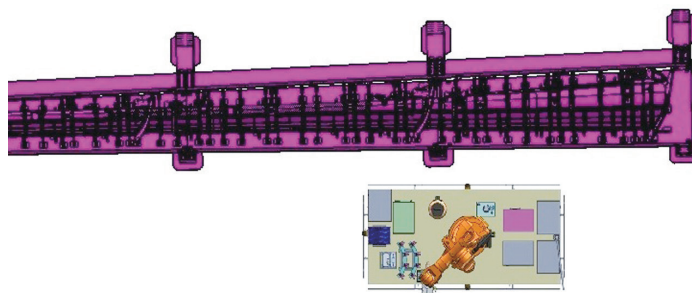
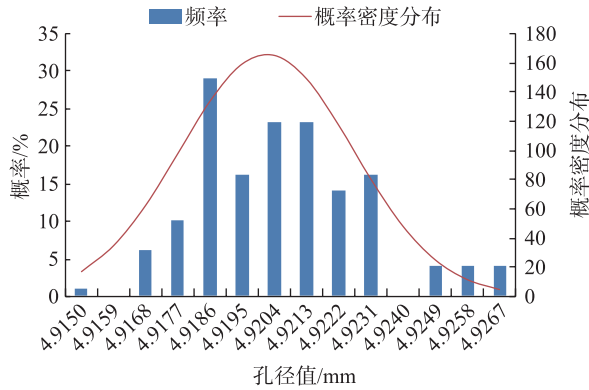
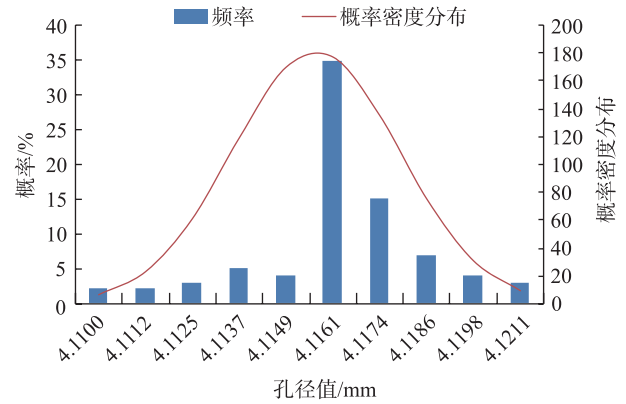


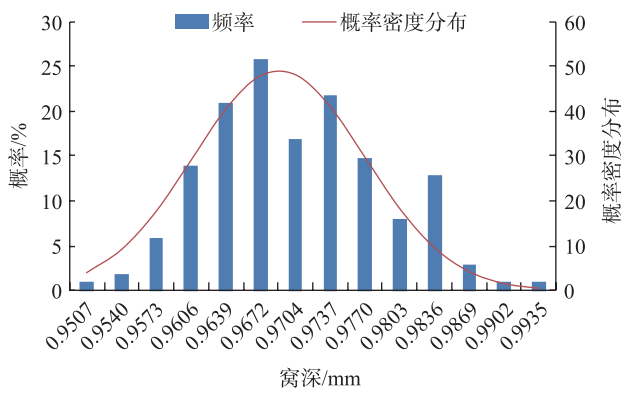
图7 分布示意图
Fig.7 Sketch map of distribution



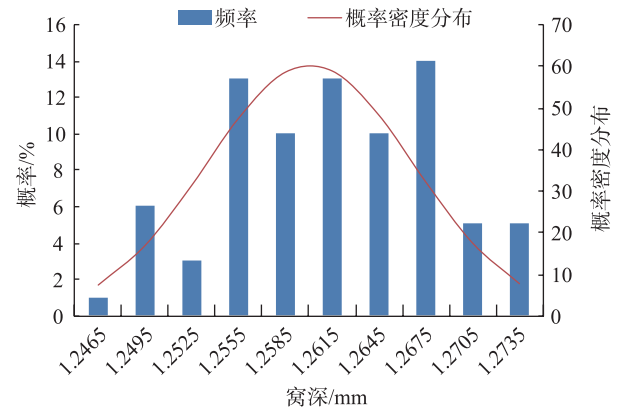
(a) 2A12T4-φ4.9mm 孔径分布图



(a) 7050-φ4.1mm 孔径分布图



(b) 2A12T4-φ4.9mm 窝深分布图



(b) 7050-φ4.1mm 窝深分布图

图8 3mm平板试件孔径、窝深测量值分布图

Fig.8 Distribution of hole diameter and countersink depth of 3mm flat specimen

图10 10mm平板试件孔径、窝深测量值分布图

Fig.10 Distribution of hole diameter and countersink depth of 10mm flat specimen

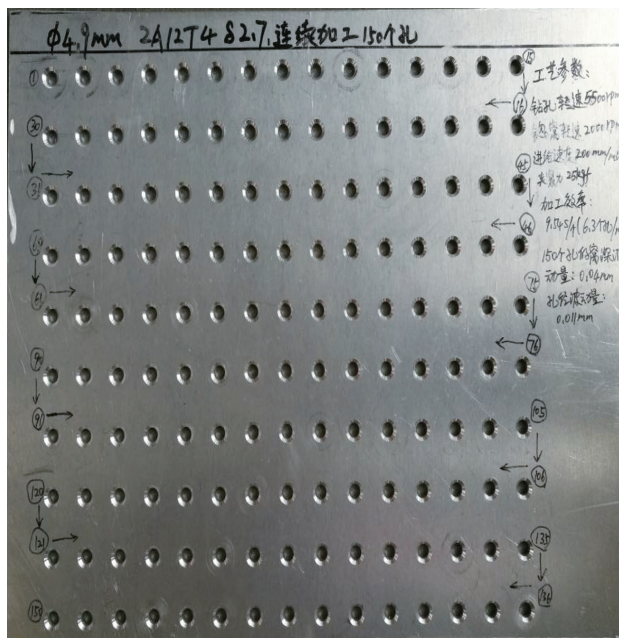


图9 3mm平板试件
Fig.9 3mm flat specimen

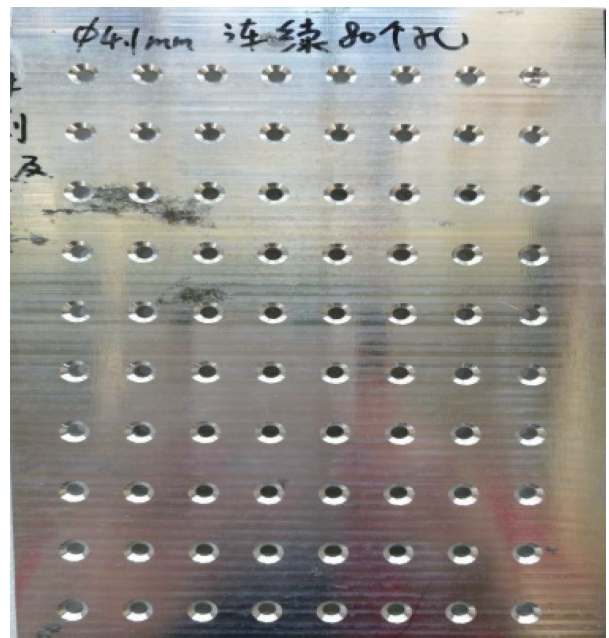
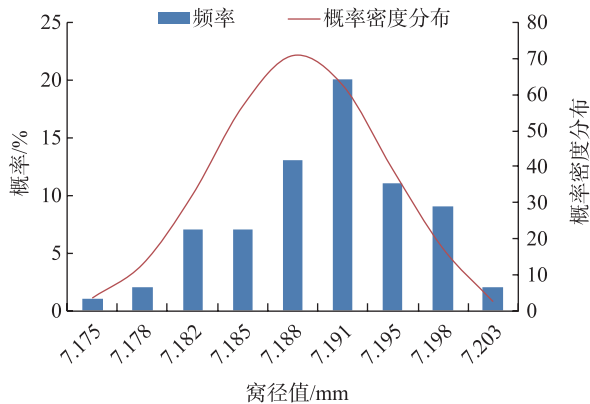
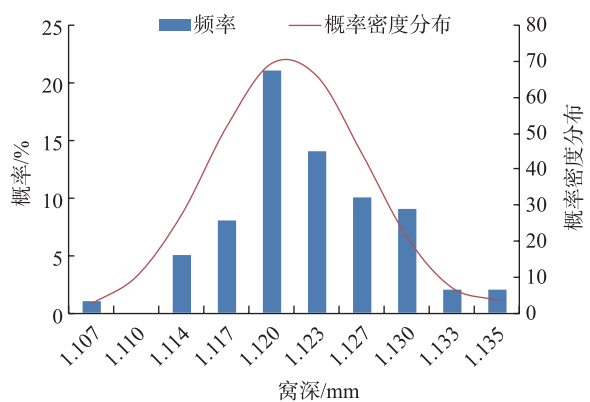


图11 10mm平板试件
Fig.11 10mm flat specimen



(a) $\Phi 4.9\text{mm}$ 窝径分布图



(b) $\Phi 4.1\text{mm}$ 窝深分布图

图12 曲面试件窝径、窝深测量值分布图

Fig.12 Surface specimen diameter and depth measurement range

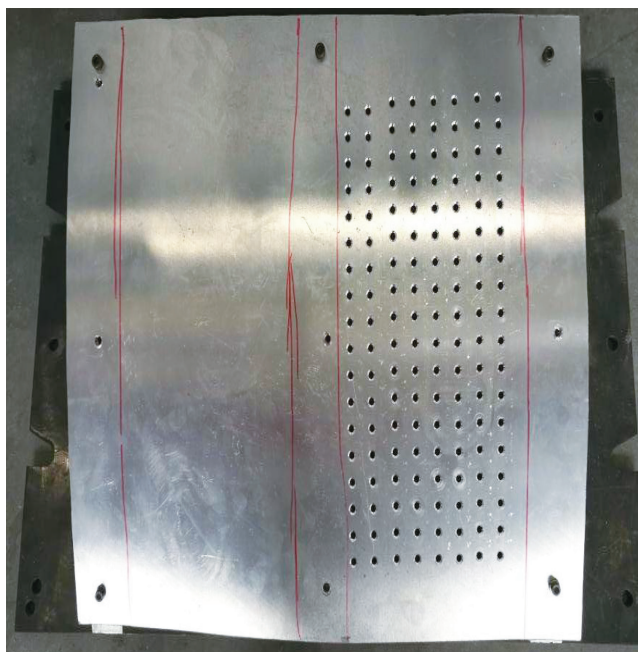


图13 曲面试件

Fig.13 Curved surface specimen

3 综合联调试件

模拟典型曲面产品,先后制孔154个,最终测量用的试件上有待检测孔80个,整个过程全部采用程序控制自动加工,工业机器人夹持末端执行器按程序自动识别基准孔,每次制孔前对待加工部位进行法向调平,80个孔连续加工累计耗时768s。经测量,窝径范围7.27~7.368mm,波动值0.098mm,窝深范围0.987~1.028mm,波动值0.041mm,满足最终质量要求,制孔效率6个/min。测量数据正态分布图和实物图片见图14、图15。

4 典型产品试件

选取某型机外翼前缘局部结构作为典型产品试件,整个过程全部采用程序控制自动加工,工业机器人夹持末端执行器按程序自动识别基准孔,每次制孔前对待加工部位进行法向调平。

合计制孔约300个,累计耗时2914s。经检测,直径4.1mm孔的窝径范围6.05~6.15mm,换算后窝深波动值约为0.035mm,孔径范围4.093~4.109mm,波动值0.016mm。直径4.9mm孔的窝径范围7.62~7.71mm,换算后的窝深波动值约为0.04mm,孔径范围4.891~4.91mm,波动值0.019mm。综合制孔效率为6个/min。测量数据正态分布图见图16、图17。

5 制孔垂直度

经过4种类型的验证测试,制孔质量全部符合最终质量要求,在制孔垂直度方面,在上文工艺试验过程中采用了终孔紧固件安装测试,紧固件安装后的表面齐平度也符合工程设计要求,但为了得到接触式法向调平结构在制孔垂直度方面能达到的具体数值,选取10mm厚度平板试件进行了法向测量。测量结果显示法向偏角最大值 0.323° ,平均值 0.126° ,其中92%的孔分布在 $0.059^\circ\sim 0.21^\circ$ 之间。测量数据正态分布图见图18。

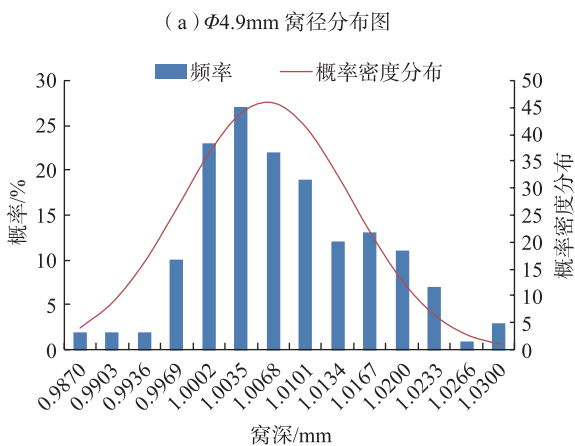
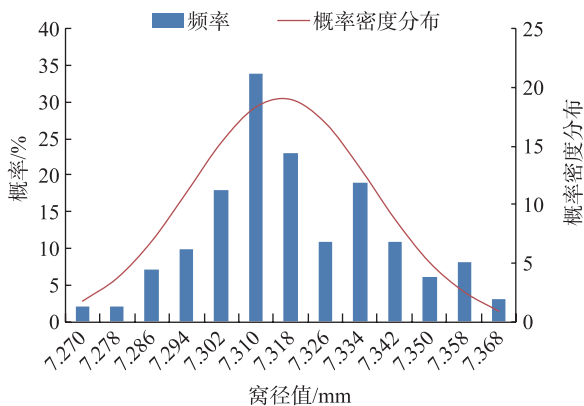


图14 综合联调试件窝径、窝深测量值分布图

Fig.14 Distribution of countersink diameter and depth of integrated debugging specimen-2# curved surface specimen

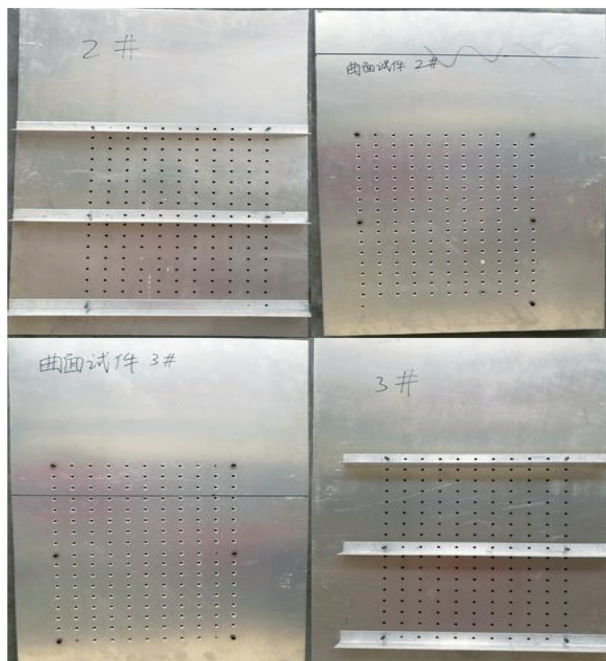


图15 综合联调试件

Fig.15 Integrated debugging specimen

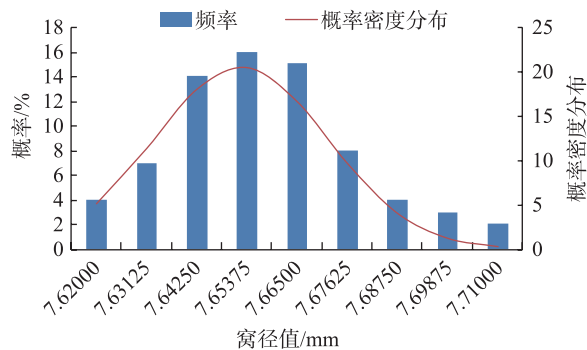
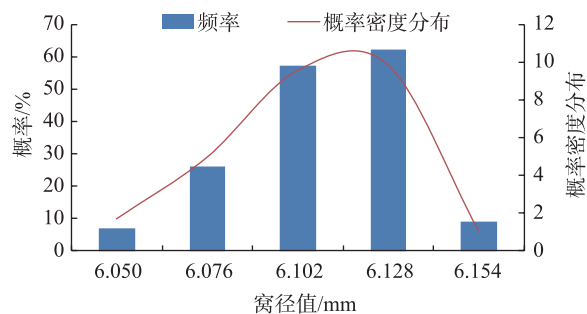


图16 典型产品试件窝径测量值分布图

Fig.16 Distribution of countersink diameter of typical product specimen

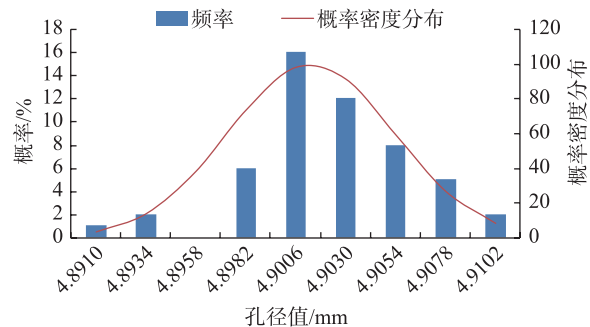
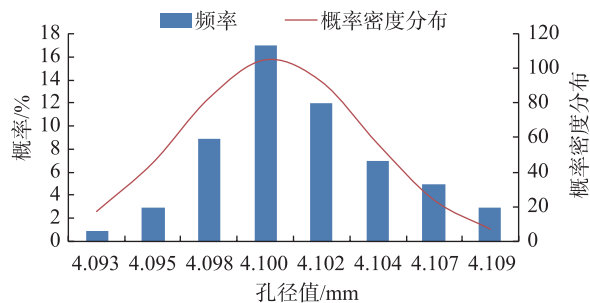


图17 典型产品试件孔径测量值分布图

Fig.17 Distribution of hole diameter of typical product specimen

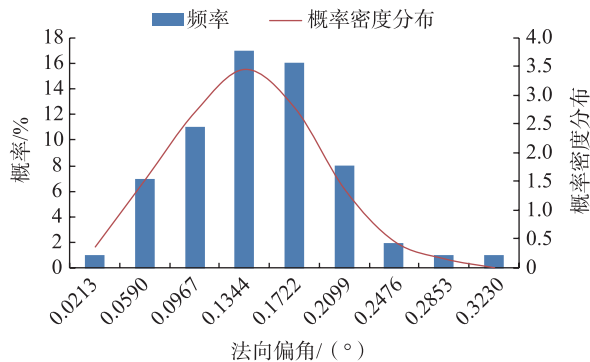


图18 $\phi 4.1$ 法向偏角测量分布图

Fig.18 Distribution of $\phi 4.1$ normal deflection

6 存在问题及改进方向

接触式法向调平结构在其压力脚模块上自带接触点,用于曲面加工时能有更精确、稳定的法向反馈。在实际试验验证过程中,这些接触点会在试件表面留下较为明显的无深度压痕。产生压痕的主要原因有两个:一是接触点结构本身材质,此次试验选用的接触点为钢结构,材料强度大于试件的铝合金结构,后续可以通过改进接触点材质,选用铝合金或者尼龙材料替换;二是接触点与产品结构之间接触面积小,后续可以考虑改进接触点结构形式,增大接触面积的方式减小局部压强。

结论

本文通过试验验证了自动制孔接触式法向调平结构在复杂曲面、密集型紧固件排列状态下可以正常执行加工命令,产品质量符合质量条款和工程设计要求。结合工业机器人构成的自动制孔装备,综合加工效率可保持在6个/min,已超过传统激光法向调平类制孔机器人装备,可以作为复杂条件下自动制孔法向调平问题的一个解决方向。

参考文献

[1] 许国康. 自动钻铆技术及其在数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 45-49.

XU Guokang. Automatic drilling and riveting technology and its application in digital

assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(6): 45-49.

[2] 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.

[3] 喻龙, 章易镰, 王宇晗, 等. 飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 16-25.

YU Long, ZHANG Yilian, WANG Yuhan, et al. Research status and key technologies of aircraft automatic drilling and riveting technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 16-25.

[4] GONG M Z, YUAN P J, WANG T M, et al. A novel method of surface-normal measurement in robotic drilling for aircraft fuselage using three laser range sensors[C]//2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. New York: IEEE, 2012: 450-455.

[5] TIAN W, ZHOU W X, ZHOU W, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 495-500.

[6] YUAN P J, WANG Q S, WANG T M, et al. Surface normal measurement in the end effector of a drilling robot for aviation[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2014: 4481-4486.

[7] ZHANG Y L, BI Q Z, YU L, et al. Online adaptive measurement and adjustment

for flexible part during high precision drilling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 3579-3599.

[8] CHANG W C, SHAO C K. Hybrid eye-to-hand and eye-in-hand visual servoing for autonomous robotic manipulation[C]//Proceedings of SICE Annual Conference 2010. New York: IEEE, 2010: 415-422.

[9] 黄大兴, 王珉, 陈文亮, 等. 飞机装配自主移动式自动制孔系统机构设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 23-26.

HUANG Daxing, WANG Min, CHEN Wenliang, et al. Mechanism design of autonomous mobile automatic drilling system for aircraft assembly[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(S1): 23-26.

[10] 董辉跃, 周华飞, 尹富成. 机器人自动制孔中绝对定位误差的分析与补偿[J]. 航空学报, 2015, 36(7): 2475-2484.

DONG Huiyue, ZHOU Huafei, YIN Fucheng. Analysis and compensation for absolute positioning error of robot in automatic drilling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(7): 2475-2484.

[11] 王增翠, 秦现生, 白晶, 等. 飞机壁板自动制孔法向测量算法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(6): 160-163.

WANG Zengcui, QIN Xiansheng, BAI Jing, et al. Research on normal measurement algorithm in auto-drilling of aircraft panel[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(6): 160-163.

[12] 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 automatic correction technology of aircraft wall panel robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[13] 武如静. 自动制孔机器人末端执行系统的设计研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2017.

WU Rujing. Design and research of automatic drilling robot[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2017.

[14] 王战玺, 李飞飞, 王宁, 等. 工业机器人精准制孔的四点法向调平方法: CN104816307A[P]. 2015-08-05.

WANG Zhanxi, LI Feifei, WANG Ning, et al. Four-point normal leveling method for precise drilling of industrial robots:

CN104816307A[P]. 2015-08-05.

[15] 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): 1-7.

YING Gaoming, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Study on normal vector measurement method in auto-drilling & riveting of aircraft panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(23): 1-7.

[16] 徐敦忠. 激光平台的仿真、调平、参数软测量及振动控制方法探讨[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

XU Dunzhong. Discussion on laser

platform simulation, leveling, parameter soft measurement and vibration control method[D]. Beijing: Beihang University, 2002.

[17] 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[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 47-50.

DU Baorui, FENG Ziming, YAO Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 47-50.

[18] 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, 54(22): 108-111.

DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(22): 108-111.

[19] 薛汉杰, 张敬佩. 蒙皮类部件钻孔法向的测量和调整[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23): 60-62, 66.

XUE Hanjie, ZHANG Jingpei. Normal measurement and adjustment for skin drilling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23): 60-62, 66.

通讯作者: 罗群, E-mail: lko821215@sina.com。

Experimental Study on Application of Automatic Hole Contacting Normal Leveling Structure

LUO Qun, HUANG Min, YANG Chao

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

[ABSTRACT] Automatic drilling technology has been widely used in the assembly of aerospace product. With the further application of automatic drilling, the problem of insufficient capacity or model feedback errors occur when the traditional laser normal-leveling methods were used in the complex curved surface structures and intensive fastener arrangements. Aiming at this problem, this paper proposed a contact leveling device and some related process tests and analysis experiments were also conducted. The experimental results indicate that the contact leveling device are still effective to meet the final quality requirements under special conditions.

Keywords: Automatic drilling; Contact leveling device; End effector; Complex surface structure; Normal measurement

(责编 逸飞)

(上接第48页)

Effect of Riveting Process Parameters on Mesoscopic Quality of Holes

WANG Zhongqi, XU Minheng, ZHAO Haitao, CHANG Zhengping, KANG Yonggang

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The fatigue life of the riveted structure greatly depends on the meso-cracks around the hole and the crack expansion. Furthermore, the riveting process parameters have significant effect on the initiation and growth of the meso-cracks. It is analyzed that how these parameters affect the mesoscopic quality of the areas around the hole in this paper. There are three parameters used to describe the mesoscopic structure around the hole. Here MR represents the fillet radius of the area where the panel touches the riveting head and rod. MD and Md are both the parameters for the plastic layer thickness around the hole. The effects of some riveting process parameters on the above three characterization parameters for the meso-structure around the hole are researched respectively, including riveting force, riveting process time and upper riveting cavity. This study helps to polish up the quality of the meso-structure through adjusting riveting process parameters, and get further improvements on the fatigue performance of the riveted structure.

Keywords: Riveting process parameter; Meso-structure; Characterization parameter; Experimental investigation; Fatigue life

(责编 逸飞)