

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.007

一种适用于飞机壁板自动化制孔的法向修正技术

罗群¹, 李欢庆¹, 张一帆², 薛宏¹, 刘鹏¹

(1. 中航工业西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089; 2. 浙江大学机械工程学院, 杭州 310027)

摘要: 在飞机装配中制孔的位置和法向精度将直接影响飞机最终的装配质量。自动化制孔以飞机数模为基准, 但在实际装配过程中, 由于受多源耦合装配误差影响, 壁板等大型柔性结构件的实际外形不可避免地会与理论数模出现偏差, 因此需要对制孔位置和法向进行修正。为了减少制孔法向偏差和提高制孔效率, 本文结合大型飞机机翼壁板的结构特点, 提出一种基于基准孔插值的法向偏差修正技术。通过激光位移传感器的测量值计算得到各基准孔的实际法失方向, 结合视觉测量系统得到基准孔孔位偏差, 利用插值算法实现其余孔位的法向修正。试验结果表明, 该修正技术可实现法向误差不超过 0.3° , 制孔效率相比逐孔修正可提升约 25%。

关键词: 飞机装配; 飞机壁板; 自动制孔; 曲面插值; 法向修正

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)03-0373-08

A Normal Correction Technology Suitable for Automatic Drilling of Aircraft Panels

LUO Qun¹, LI Huanqing¹, ZHANG Yifan², XUE Hong¹, LIU Peng¹

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China; 2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The position and normal accuracy of the automatic drilling in aircraft assembly will directly affect the quality of the final product. The process of automatic drilling is designed based on the aircraft's digital model. However, in the assembly shop-floor, under the influence of superimposed multi-source assembly deviation, the physical shapes of large flexible structural parts like wing panels will inevitably deviate from the theoretical model. Therefore, the position and normal directions of connecting holes need to be corrected. In order to reduce the normal deviation and improve the drilling efficiency, we propose a normal correction technology based on interpolation of reference holes considering the structural characteristics of panel skins of large aircraft. The actual normal direction of each reference hole is calculated by the measurement values of laser displacement sensors, and the position deviations of the reference holes are obtained in conjunction with the visual measurement system. Based on the information of reference holes, the normal correction of the remaining holes is realized by using an interpolation algorithm. The test results show that the proposed correction technology can achieve normal accuracy within 0.3° , and the drilling efficiency can be improved by about 25% compared with the traditional correction technology.

Key words: aircraft assembly; aircraft panels; automatic drilling; surface interpolation; normal correction

在飞机装配领域, 结构件的连接是整机装配过程中较为关键的一个环节, 一架大型飞机上往往分布有数百万个连接件。根据相关数据, 飞机结构由于疲劳失效产生的事故中, 70% 出现在连接处, 其中

基金项目: 国家自然科学基金(51975520)资助项目; 国家重点研发计划专项(2019YFB1707501)资助项目。

收稿日期: 2020-11-13; **修订日期:** 2021-01-12

通信作者: 罗群, 男, 高级工程师, E-mail: lko821215@sina.com。

引用格式: 罗群, 李欢庆, 张一帆, 等. 一种适用于飞机壁板自动化制孔的法向修正技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 373-380. LUO Qun, LI Huanqing, ZHANG Yifan, et al. A normal correction technology suitable for automatic drilling of aircraft panels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 373-380.

绝大多数疲劳裂纹源产生在连接孔处^[1]。新机型对寿命、可靠性的要求越来越高,传统手工钻孔、铆接等工艺方法具有劳动强度高、劳动条件差等特点,已经不能满足现代飞机的装配需求,而自动化、柔性化钻铆系统可以有效克服相关缺点,并大幅提高装配效率,在飞机制造企业中得到了广泛的应用。

目前,自动化、柔性化制孔系统按载体主要分为机器人和专用机床两大类。由于工业机器人具有较高的柔性和可达性,且占用空间较小,采用机器人连接终端执行器的自动制孔系统逐渐被广泛应用于飞机零部件的装配。例如,为了实现机翼壁板与骨架的自动化装配,EI公司联合空客公司研发了一种机器人柔性装配系统;刘顺涛等^[2]根据飞机装配过程中自动制孔的特点和要求研究了飞机蒙皮的自动制孔工艺;航空工业成飞设计了飞机小曲率翼面部件机器人制孔系统^[3];Yuan等^[4]为了实现钻头姿态的调整,设计了一种微型姿态调整机构,有效保证了制孔垂直度。

此外,由于自动钻铆机具有优良的刚度特性,能够有效降低钻孔和铆接过程中的动态扰动,也被广泛运用于飞机壁板结构精准制孔和连接。在自动钻铆设备的研制中,美国和德国等国家占据市场主要份额^[5]。近年来,国内以浙江大学和南京航空航天大学等科研单位为代表,在自动钻铆机的研制方面也取得了显著的成果^[6-7]。

随着自动化制孔设备的广泛应用,相应地,基于自动化设备的制孔工艺也获得了越来越广泛的关注。由于飞机结构采用多级装配体系,受多源耦合装配误差影响,壁板等大型柔性结构件的实际外形不可避免地会与理论数模出现偏差。基于机器人或者钻铆机等专用机床的自动制孔设备在执行制孔任务时,为了确保制孔精度,需要对实际制孔孔位和法向等制孔工艺参数进行补偿或修正。

董跃辉等^[8]利用光栅尺的闭环反馈控制机器人的制孔孔位和垂直度精度,满足航空制造要求。Zhu等^[9]利用基准孔的孔位偏差,构建了待制孔区域双线性误差曲面,实现了对待制孔孔位的线性插值补偿。董跃辉等^[10]采用二项式曲线边界拟合了理想曲面,并构造了误差 Coons 曲面函数,相对于双线性插值方法,该方法的孔位补偿精度更高。进一步地,为了准确表达机身段对接面处的三次曲面,毕运波等^[11]在孔位误差补偿模型中引入了曲面法矢信息。石循磊等^[12]通过建立基准孔孔位偏差的 Kriging 模型,预测了待制孔的孔位偏差,为基准孔的增添和布置提供了依据。此外,王青等^[13]考虑了约束孔孔位与骨架沟槽等关键特征的边距,并利

用 Shepard 插值法对其余孔的孔位进行了修正,在保留原孔位的分布特征的同时满足了对制孔边距的要求。

除孔位精度补偿外,自动化制孔中的法向修正技术也是工艺优化的一个重要方面。薛汉杰等^[14]基于三点接触式位移传感器实现了末端执行器的法向调整。Zhang等^[15]提出四点拟合球面算法,将制孔点曲面法矢近似为球面上的法矢,该方法将制孔区域简化为球面,不适用于具有复杂形面的结构。近年来,非接触测量技术有了长足的发展,应用也越加广泛,邹冀华等^[16]通过安装四个高度一致的激光位移传感器调整法向,但该方法对传感器安装时的精度提出了较高的要求。进一步地,毕运波等^[17]提出通过标定获得激光位移传感器的零点位置和激光方向,从而计算出加工表面的实际法矢,但此方法需要对飞机壁板上每个待加工孔进行法向检测,若法向精度超差,则需调整末端执行器位姿,对制孔综合效率有一定的影响;并且,由于复杂飞机结构如机翼壁板具有双曲率、连接螺栓密集的结构特点,激光光束很容易射入已加工的孔内,造成法向修正错误制成斜孔的问题,同时,对于靠近边界的孔,部分激光位移传感器的位置将超出待加工曲面边界,无法进行测量。

因此,本文针对复杂曲率壁板自动化制孔中的法向精度控制问题,提出了一种基于基准孔信息插值的修正算法。采用激光位移传感器对各基准孔进行测量,计算得到各基准孔的实际法矢方向,并利用视觉测量系统对各基准孔孔位进行测量以获得孔位偏差,基于基准孔的孔位和法向信息,利用本文提出的插值算法即可实现其余孔位的法向修正。该方法能够避免密集点阵制孔中可能出现的法矢误测、边界孔测量不可达等问题。同时制孔对比实验表明,本文提出的法向修正方法能够在保证制孔法向精度的同时,有效提高制孔效率,这将进一步提升中国复杂曲率壁板的自动化制孔水平。

1 系统架构及加工工艺设计

1.1 系统组成

壁板自动化制孔系统主要由工装设备、测量仪器、相关软件系统组成,如图1所示。工装设备主要包括工装型架、工业机器人、移动平台和终端执行器;测量仪器主要指激光跟踪仪及其附属设备;软件系统由离线编程与仿真系统、机器人控制系统、自动化制孔控制系统以及激光跟踪仪测量系统组成。其中终端执行器主要由主轴模块、视觉找正模块、法

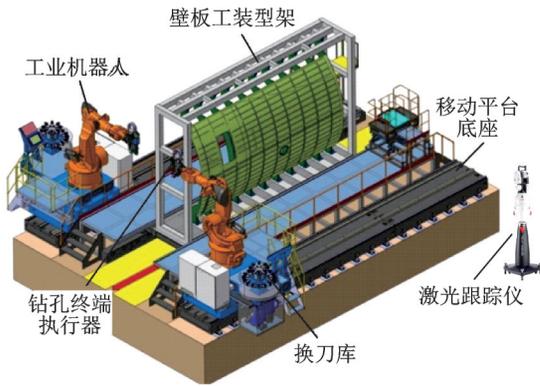


图1 飞机壁板自动化制孔系统

Fig.1 Automatic drilling system of aircraft panels

向检测模块和压力脚模块等组成,如图2所示。主轴模块主要完成轴向进给与旋转,以进行钻孔镗窝;视觉找正模块用于对预连接紧固件中心进行找正,以确定其实际位置;法向检测模块用于测量待制孔处蒙皮曲面的实际法向,若实际法向垂直度偏差过大,则需调整末端执行器姿态,使主轴轴线与待钻孔处壁板法线方向一致;压力脚模块用于在钻孔过程中稳定及压紧壁板,并保证壁板表面与主轴轴线垂直。

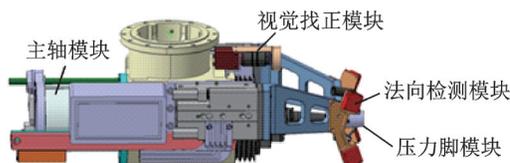


图2 制孔末端执行器

Fig.2 End effector with multifunction integrated

1.2 工艺流程设计

由于加工工艺对制孔质量起决定性的作用,因此,本文重新设计了自动化制孔设备实现制孔加工的整体工艺流程及单孔制孔镗窝加工时制孔设备工作模块的工艺顺序及动作。

1.2.1 自动化设备加工工艺过程设计

壁板自动制孔设备的整体加工工艺流程如图3所示。其中关键过程的功能如下所述。

离线编程:基于CATIA二次开发接口开发了自动化制孔离线编程系统,主要完成:从三维模型中实现孔位和法向信息的自动提取,结合由人工设置的孔几何信息,构建待制孔的基础信息数据集;人工确定参考孔和预连接孔的位置,并在三维模型上进行标注;以所需刀具的类型为依据,对待加工孔进行分类,并制定相关孔的切削工艺;辅助工艺动作编辑;调用机床仿真程序生成可执行的加工程序。

加工仿真:在仿真软件中导入壁板自动制孔设

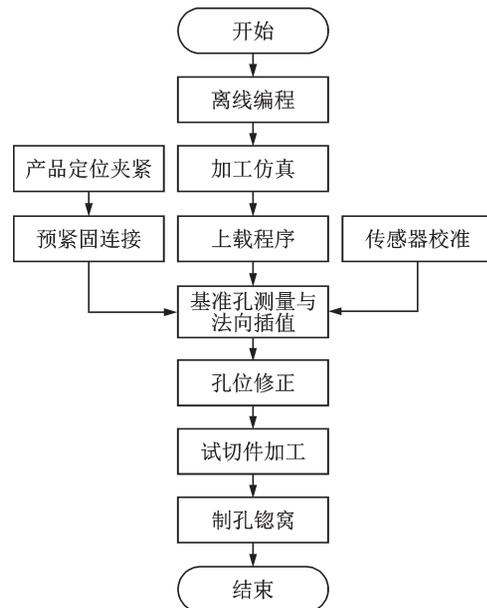


图3 总体加工工艺过程

Fig.3 Overall manufacturing process

备三维模型及离线编程系统生成的加工孔位置文件,构建特定的仿真环境,通过对已分类的加工程序进行制孔设备的运动路径仿真,确认各程序块执行时安全无碰撞的程序块输出至离线编程系统进行后置处理。

传感器校准:为确保加工质量,在制孔设备开始加工之前,需要对设备上传感器进行校准,校准工作在试切台上进行,主要包括法向测量传感器校准和视觉测量系统校准。

基准孔测量与法向插值:利用视觉测量系统对参考孔实际位置进行测量,计算获取参考孔实际位置与理论位置的偏差;同时,利用已校准的法向检测单元对参考孔的实际法向进行测量,获取参考孔实际法向;基于基准孔信息完成待制孔法向插值。

孔位修正:根据参考孔实际位置偏差,通过一定算法规则对参考孔覆盖的加工孔进行位置修正,匀化参考孔的误差,使得孔间距满足设计要求。

试切加工:以与加工对象同种材料的试切板为试加工对象,通过试切加工,验证刀具质量、镗窝角度和深度等加工参数。

制孔镗窝:在基准孔数据采集完成后,对壁板非基准孔进行制孔并镗窝。

1.2.2 单孔加工流程设计

执行单孔钻孔镗窝的加工流程如图4所示。制孔设备先进行加工程序的读取,并依次运动到每个制孔位置,继而调用孔位和法向修正程序对实际制孔位置和法向进行修正;然后将压脚伸出压紧壁板,以消除局部层间间隙并提高制孔过程中的稳定

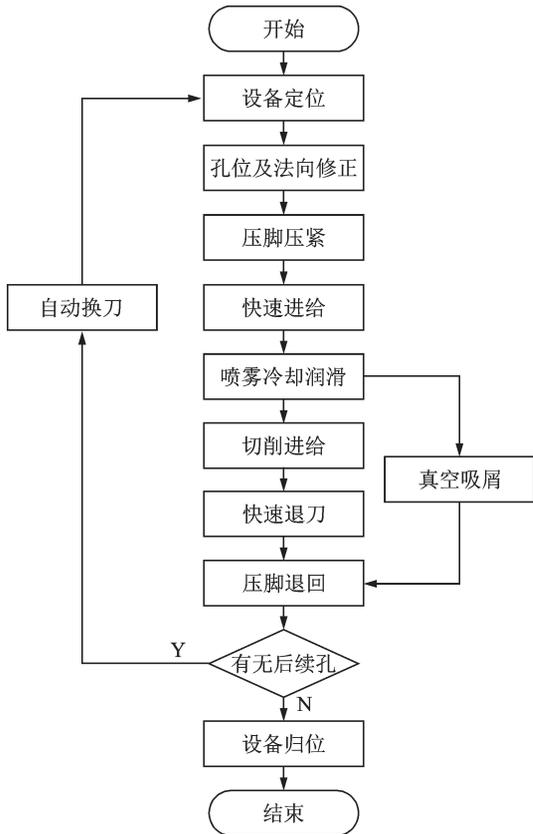


图4 单孔加工流程图

Fig.4 Drilling process of a single hole

性;之后刀具快速进给至加工表面一定距离,对刀具喷雾冷却润滑后进行刀具切削进给加工,进给速度和进给距离依据切削工艺设定,加工完成后快速退刀至安全平面。整个切削过程开启真空吸屑,保持孔表面清洁并避免切屑缠绕刀具。若还有孔未完成加工,首先检测刀具类型是否正确,然后执行下一个孔的定位工作,重复上述过程。当所有孔都完成加工,则将自动化制孔设备运行至安全位置,结束加工循环。

2 复杂曲面密集点阵法向修正

末端执行器搭载的法向检测单元由4个激光位移传感器组成,标定后的法向检测单元可以确定被测物体上的4个点的位置,通过这些点拟合待加工孔周围的局部平面,从而得到该加工孔实际的法向方向。若法向垂直度偏差超过给定的参考值,则按实际法向修正末端执行器姿态,然后进行制孔操作^[17]。

基于激光位移传感器的法向修正方法存在明显的局限,因此,制孔时首先需要对飞机壁板上每个待加工孔进行单独测量并修正,这严重影响制孔综合效率;其次,由于机翼壁板等具有双曲率、连接螺栓密集的结构特点,激光光束很容易射入已加工的孔内,造成法向修正错误制成斜孔的问题,同时,对于靠近边界的孔,激光位移传感器将超出曲面边

界,无法进行测量,如图5所示。

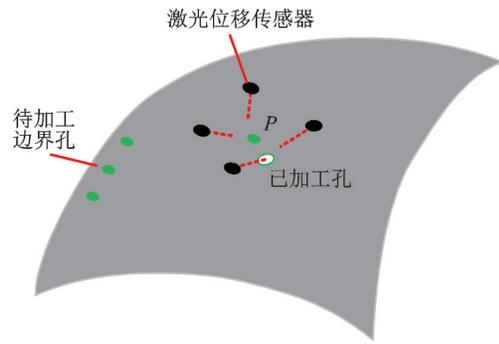


图5 法向修正问题描述

Fig.5 Description of normal correction problem

为了避免法向修正错误问题的发生并且提高法向修正效率,本文提出如下法向修正方法:预先选取4个基准孔,分别利用激光位移传感器和视觉测量系统进行法向和孔位测量,根据测得的基准孔实际法向和孔位,以三次曲线拟合边界,并基于拟合得到的边界曲线和基准点信息,构造双线性Coons曲面,从而计算得出孔位偏移后对应的曲面的法矢。

2.1 基准孔孔位找正

由于产品不可避免地存在制造误差,同时壁板定位工装会引起产品装配定位误差,并且末端执行器多功能结构存在误差累积效应,单独依靠理论模型不能达到要求的孔位精度,而孔位偏差将对法向精度产生影响,因此,在对待制孔进行法向修正之前,需要先确定基准孔的孔位误差。

本文采用基于视觉相机的二维图像处理技术进行基准孔孔位找正。通过视觉相机对制孔面进行视觉拍照测量,然后视觉找正系统对所拍摄的图像进行像素计算处理,计算出定位孔的几何中心,同时调用找正算法,计算出视觉相机当前所处位置与定位钉几何中心的偏差值,相应的数据将传送到集成控制系统中^[18]。该视觉找正系统的界面如图6所示。

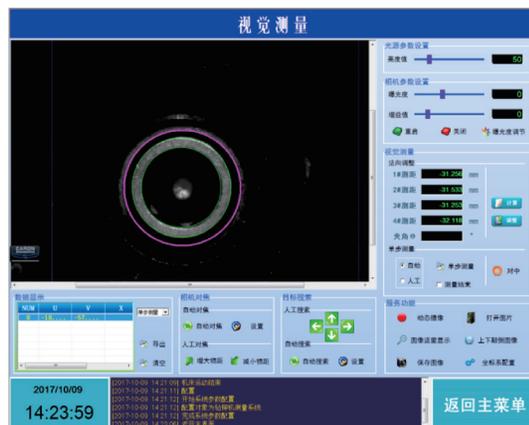


图6 视觉测量界面

Fig.6 Visual measurement interface

2.2 基于基准孔插值的法向修正

以如图7所示的曲面片表征壁板蒙皮的外形, 曲面上的点 (x, y, z) 可表示为双参数 u 和 ω 的函数

$$P(u, \omega) = [x(u, \omega) \quad y(u, \omega) \quad z(u, \omega)] \quad (1)$$

式中 $u, \omega \in [0, 1]$ 。

曲面片的4个角点, 即各基准孔的中心, 在直角坐标系下的坐标分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 在曲线坐标系下的坐标分别为 $P(0, 0)$ 、 $P(0, 1)$ 、 $P(1, 0)$ 、 $P(1, 1)$, 各角点与理论值之间的偏差记为 ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_3 、 ΔP_4 , 角点处的实际法矢由法向检测单元获得, 分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 。

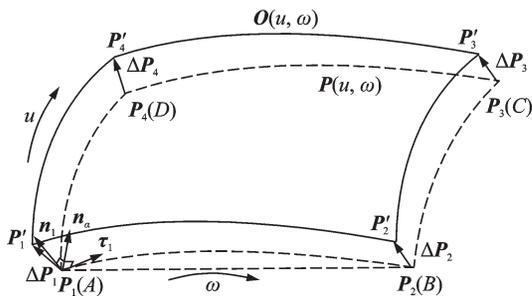


图7 法向修正原理图

Fig.7 Schematic diagram of normal correction

2.2.1 曲面边界切矢计算

拟合边界曲线需要知道各端点的切矢, 各切矢可由各角点坐标及法向计算得到, 记点A处的法矢 n_1 和AB张成的平面为 α , 其单位法向量为 n_α , 则曲线AB在端点A处的单位切矢为

$$\tau_1 = n_\alpha \times n_1 \quad (2)$$

同理, 曲线AB在端点B处的单位切矢为 τ_2 , 曲线CD在端点C和D处的单位切矢分别为 τ_3 、 τ_4 , 曲线AD和BC在端点处的单位切矢分别为 τ_1' 、 τ_4' 、 τ_2' 、 τ_3' 。

2.2.2 边界曲线拟合

考虑到机翼壁板具有双曲率的结构特征, 为确保该插值方法的适用性, 需要以参数三次曲线来表征边界曲线, 其表达式记为

$$P(\omega) = a_3\omega^3 + a_2\omega^2 + a_1\omega^1 + a_0 \quad (3)$$

切矢为

$$P'(\omega) = 3a_3\omega^2 + 2a_2\omega^1 + a_1 \quad (4)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为待定矢量。给定曲线的首末端点 P_1 、 P_2 及切矢 τ_1 、 τ_2 , 可以拟合曲线如下

$$P(0, \omega) = WMP_0 \quad (5)$$

式中

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = [\omega^3 \quad \omega^2 \quad \omega \quad -1]$$

$$P_0 = [P_1 \quad P_2 \quad \tau_1 \quad \tau_2]^T$$

同理, P_3 、 P_4 之间的曲线有 $P(u, \omega)$

$$P(1, \omega) = WMP'_0 \quad (6)$$

式中

$$P'_0 = [P_4 \quad P_3 \quad \tau_4 \quad \tau_3]^T$$

类似地, P_1P_2 、 P_2P_3 之间的曲线可以拟合为

$$P(u, 0) = UMQ_0 \quad (7)$$

$$P(u, 1) = UMQ'_0$$

式中

$$U = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad -1]$$

$$Q_0 = [P_1 \quad P_4 \quad \tau'_1 \quad \tau'_4]^T$$

$$Q'_0 = [P_2 \quad P_3 \quad \tau'_2 \quad \tau'_3]^T$$

2.2.3 曲面构造与法矢计算

对 $P(u, 0)$ 、 $P(u, 1)$ 、 $P(0, \omega)$ 、 $P(1, \omega)$ 4条边界进行插值, 获得双线性Coons曲面 $P(u, \omega)$ ^[19](图7)

$$P(u, \omega) = -F(u)PF(\omega) \quad (8)$$

式中

$$F(u) = [-1 \quad 1 - u \quad u]$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P(u, 0) & P(u, 1) \\ P(0, \omega) & P_1 & P_2 \\ P(1, \omega) & P_4 & P_3 \end{bmatrix}$$

$$F(\omega) = [-1 \quad 1 - \omega \quad \omega]^T$$

ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_3 、 ΔP_4 为各基准孔的实际位置与理论位置的偏差, 利用视觉测量系统获得, 代入式(8)可得到制孔区域误差曲面函数

$$\Delta P(u, \omega) = -F(u)\Delta PF(\omega) \quad (9)$$

式中

$$\Delta P = \begin{bmatrix} 0 & \Delta P(u, 0) & \Delta P(u, 1) \\ \Delta P(0, \omega) & \Delta P_1 & \Delta P_2 \\ \Delta P(1, \omega) & \Delta P_4 & \Delta P_3 \end{bmatrix}$$

$$\Delta P(0, \omega) = WM\Delta P_0$$

$$\Delta P_0 = [\Delta P_1 \quad \Delta P_2 \quad \tau_1 \quad \tau_2]^T$$

$$\Delta P(1, \omega) = WM\Delta P'_0$$

$$\Delta P'_0 = [\Delta P_4 \quad \Delta P_3 \quad \tau_4 \quad \tau_3]^T$$

$$\Delta P(u, 0) = UM\Delta Q_0$$

$$\Delta Q_0 = [\Delta P_1 \quad \Delta P_4 \quad \tau'_1 \quad \tau'_4]^T$$

$$\Delta P(u, 1) = UM\Delta Q'_0$$

$$\Delta Q'_0 = [\Delta P_2 \quad \Delta P_3 \quad \tau'_2 \quad \tau'_3]^T$$

将制孔点O坐标投影到 u 、 ω 方向, 可得该制孔点在 u 、 ω 方向的坐标 u_0 、 ω_0 , 则该点的误差向量为

$$\Delta P(u_0, \omega_0) = -F(u_0)\Delta P(u_0, \omega_0)F(\omega_0) \quad (10)$$

将 $\Delta P(u_0, \omega_0)$ 叠加到O的理论坐标即可得到修正后的坐标

$$O'(u'_0, \omega'_0) = P(u_0, \omega_0) + \Delta P(u_0, \omega_0) \quad (11)$$

式中 u'_0 、 ω'_0 为 O' 在 u 、 ω 方向的投影。

又由式(1)可得该曲面上参数曲线的 u 向和 ω 向切矢分别为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_u = \left(\frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \right) \\ \mathbf{r}_\omega = \left(\frac{\partial x}{\partial \omega} & \frac{\partial y}{\partial \omega} & \frac{\partial z}{\partial \omega} \right) \end{cases} \quad (12)$$

曲面在一点的切平面由参数曲线的 u 向和 ω 向切矢所张成, 曲面在该点的法矢就是该切平面的法矢, 其方向和大小由 $\mathbf{n} = \mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_\omega$ 求得。单位法矢则为

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_\omega}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_\omega|} \quad (13)$$

将 u'_0 、 ω'_0 代入式(13)即可得点 O' 处的法矢。

3 法向修正试验

为验证本文提出的法向修正算法的有效性, 分别采用逐孔检测和插补修正两种方法进行制孔试验。首先以法向偏差值 0.3° 设置阈值进行逐孔检测试验, 若由激光位移传感器测得的实际法向偏差值大于 0.3° , 则需调整终端执行器的姿态; 若测得的实际法向偏差值小于 0.3° , 则按理论姿态进行制孔。检测结果如表 1、2 中逐孔检测数据列所示。插补修

表 1 直径 6 mm 孔法向精度检测数据

Table 1 Normal detection data for holes of 6 mm diameter

编号	逐孔检测/°	插补修正/°	编号	逐孔检测/°	插补修正/°
1	90.19	90.11	16	90.13	90.12
2	90.17	90.13	17	90.14	90.15
3	90.24	90.13	18	90.22	90.06
4	90.15	90.15	19	90.13	90.20
5	90.10	90.18	20	90.13	90.24
6	90.13	90.11	21	90.16	90.10
7	90.08	90.12	22	90.17	90.14
8	90.16	90.10	23	90.15	90.06
9	90.20	90.27	24	90.13	90.11
10	90.08	90.11	25	90.29	90.10
11	90.11	90.15	26	90.19	90.06
12	90.24	90.16	27	90.16	90.22
13	90.15	90.13	28	90.18	90.11
14	90.09	90.08	29	90.22	90.16
15	90.14	90.10	30	90.13	90.06

表 2 直径 8 mm 孔法向精度检测数据

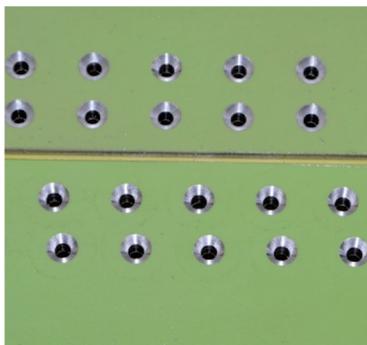
Table 2 Normal detection data for holes of 8 mm diameter

编号	逐孔检测/°	插补修正/°	编号	逐孔检测/°	插补修正/°
1	90.14	90.11	16	90.12	90.12
2	90.22	90.23	17	90.25	90.24
3	90.13	90.16	18	90.14	90.15
4	90.25	90.17	19	90.24	90.16
5	90.21	90.12	20	90.16	90.17
6	90.22	90.13	21	90.25	90.12
7	90.23	90.12	22	90.11	90.11
8	90.08	90.14	23	90.23	90.10
9	90.17	90.22	24	90.18	90.23
10	90.15	90.15	25	90.16	90.08
11	90.26	90.12	26	90.27	90.12
12	90.12	90.16	27	90.16	90.25
13	90.23	90.21	28	90.15	90.14
14	90.13	90.16	29	90.12	90.11
15	90.20	90.17	30	90.24	90.14

正时,制孔设备依据算法提供的法向数据,调整末端执行器的姿态,并采用激光位移传感器检测此时待制孔的法向精度,检测结果如表 1、2 中插补修正数据列所示,法向修正结果均小于 0.3° 。试验采用与某型机壁板相同牌号航空铝合金制成的 1:1 试切件,制孔孔径为壁板装配中的典型孔径:6 和 8 mm,试验件按直径分成两组,每组制孔 30 个。设备制孔时主轴转速 6 000 r/min,进给速度 400 mm/min,具体试验设备及局部加工孔如图 8 所示。



(a) Experimental setup



(b) Local drilling holes

图 8 试验设备和局部加工孔

Fig.8 Experimental setup and local drilling holes

如图 9、10 所示,本文提出的法向修正算法可以将孔垂直度误差控制在 0.3° 以内,满足产品 $\pm 0.5^\circ$ 的要求。同时,对两种方法所用制孔时间进行比较(逐孔法向检测用时 852 s,法向插补修正用时 611 s),可以发现法向插补的效率较逐孔检测提高了约 25%。

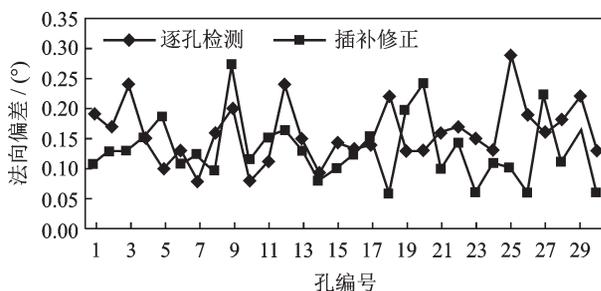


图 9 直径 6 mm 孔法向偏差对比

Fig.9 Normal deviation comparison for holes of 6 mm diameter

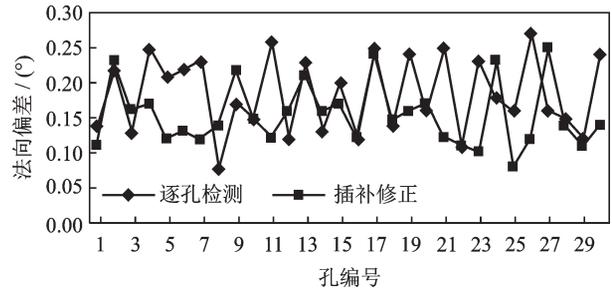


图 10 直径 8 mm 孔法向偏差对比

Fig.10 Normal deviation comparison for holes of 8 mm diameter

4 结 论

本文针对大型飞机复杂壁板自动化制孔中的法向修正技术进行了研究,提出了一种基于基准孔实际法矢和孔位的法向插值方法。

(1) 采用三次曲线拟合具有复杂形面的壁板的边界,通过对拟合的 4 条边界和 4 个角点进行插值,可构建表征实际产品外形的 Coons 曲面,从而获得各待制孔的法向。

(2) 该方法能够避免密集点阵制孔中可能出现的法矢误测、边界孔测量不可达等问题。

(3) 制孔对比试验表明本文提出的法向修正方法能够在保证制孔法向精度的同时,有效提高制孔效率,这将进一步提升中国复杂曲率壁板的自动化制孔水平。

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(6): 45-49.
 XU Guokang. Automatic drilling and riveting technology and its application in aircraft numerical assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005 (6): 45-49.

[2] 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, 39(4): 87-90.
 LIU Shuntao, CHEN Xuemei, GUO Xifeng, et al. Research on the process of automatic holing for airplane skin[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39 (4): 87-90.

[3] 孙海龙, 石章虎, 陈强. 飞机小曲率翼面部件机器人制孔系统设计[J]. 航空精密制造技术, 2018, 54 (6): 17-21.
 SUN Hailong, SHI Zhanghu, CHEN Qiang. Profile robot system design on aircraft wing part small hole curvature[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(6): 17-21.

[4] YUAN P, WANG Q, SHI Z, et al. A micro-adjusting attitude mechanism for autonomous drilling robot

- end-effector[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2014(12): 29-40.
- [5] 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 of aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(9): 16-25.
- [6] ZHAO D, BI Y B, KE Y L. A united kinematic calibration method for a dual-machine system[J]. *Assembly Automation*, 2017, 38(2): 226-238.
- [7] 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.
- [8] 董辉跃, 曹国顺, 曲巍崑, 等. 工业机器人自动钻孔及镗窝一体化加工[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(2): 201-208.
DONG Huiyue, CAO Guoshun, QU Weiwei, et al. Processing research of industry robots drilling and countersinking automatically[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(2): 201-208.
- [9] ZHU W D, QU W W, CAO L. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(9/10/11/12): 2535-2545.
- [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): 2474-2485.
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): 2474-2485.
- [11] 毕运波, 涂国娇, 方伟, 等. 环形轨自动化制孔系统孔位修正方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(10): 1863-1869.
BI Yunbo, TU Guojiao, FANG Wei, et al. Correcting method of hole position for flexible track automatic drilling system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(10): 1863-1869.
- [12] 石循磊, 张继文, 刘顺涛, 等. 基于Kriging模型插值的孔位修正策略[J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 320-328.
SHI Xunlei, ZHANG Jiwen, LIU Shuntao, et al. Correction strategy for hole positions based on Kriging interpolation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 320-328.
- [13] 王青, 郑守国, 李江雄, 等. 基于孔边距约束和Shepard插值的孔位修正方法[J]. *航空学报*, 2015, 36(12): 4025-4034.
WANG Qing, ZHENG Shouguo, LI Jiangxiong, et al. A correction method for hole positions based on hole margin constraints and Shepard interpolation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(12): 4025-4034.
- [14] 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(23): 52-54, 58.
XUE Hanjie, ZHANG Jingpei. Normal measurement and adjustment for skin drilling[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(23): 52-54, 58.
- [15] ZHANG L X, WANG X S. A novel algorithm of normal attitude regulation for the designed end-effector of a flexible drilling robot[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2012, 28(1): 29-34.
- [16] 邹冀华, 周万勇, 韩先国. 飞机装配中基于3-RPS的并联机构法向调整算法[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(5): 557-560.
ZOU Jihua, ZHOU Wanyong, HAN Xianguo. Normal adjusting algorithm of a 3-RPS parallel mechanism in airplane assembly[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(5): 557-560.
- [17] 毕运波, 李永超, 顾金伟, 等. 机器人自动化制孔系统[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(8): 1427-1433.
BI Yunbo, LI Yongchao, GU Jinwei, et al. Robotic automatic drilling system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(8): 1427-1433.
- [18] ZHU W W, MEI B, GUO R Y, et al. Development of a monocular vision system for robotic drilling[J]. *Journal of Zhejiang University Science C (Computers & Electronics)*, 2014(8): 593-606.
- [19] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.