

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.006

基于接触式压脚的机器人制孔垂直度优化研究

连哲楠¹, 郭英杰¹, 霍超², 赵树滨³, 董辉跃¹

(1. 浙江大学机械工程学院浙江省先进制造技术重点研究实验室, 杭州 310027; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034; 3. 杭州艾美依航空制造装备有限公司, 杭州 310018)

摘要: 针对传统非接触式法向校正技术在弱刚性薄壁上的不足, 在接触式压脚结构的基础上对传统法向校正方案进行了研究, 提出一种仅适用于接触式压脚结构的两点校正算法, 同时设计了一套基于激光跟踪仪的法向测量系统标定方法。针对弱刚性薄壁受到压脚单向压紧力产生回退对制孔位置精度的影响, 提出一种工具中心点 (Tool center point, TCP) 变位补偿技术, 该技术利用激光位移传感器监测壁板回退量, 在法向校正前动态调整 TCP 位置, 实现对壁板回退量的实时补偿。搭建试验平台并通过制孔试验验证了接触式法向校正技术与 TCP 变位补偿技术可有效保证孔的垂直度与孔位精度, 实现孔垂直度误差小于 0.25° , 孔位偏差小于 0.4 mm。

关键词: 飞机装配; 机器人制孔; 接触式压脚; 法向校正; 实时补偿

中图分类号: V 262.4; TP 242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)03-0418-09

Optimization of Robot Drilling Perpendicularity Based on Contact-Type Pressure Foot

LIAN Zhenan¹, GUO Yingjie¹, HUO Chao², ZHAO Shubin³, DONG Huiyue¹

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China; 3. Hangzhou AME Aerospace Manufacturing Equipment Corporation Limited, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Since traditional non-contact normal vector correction schemes cannot perform well on thin panels with weak rigidity, traditional normal vector correction schemes are studied based on the contact-type pressure foot structure, and a two-point correction algorithm suitable for this structure is proposed. A calibration method for the contact-type pressure foot's normal vector measurement system is designed. Since the elastic deformation on thin panels with weak rigidity under unidirectional pressure can impact the hole position accuracy, a tool center point (TCP) displacement compensation technology is proposed. This technology uses laser displacement sensors to monitor the amount of panels' setback and dynamically adjusts the TCP position before normal vector correction, thereby achieving real-time compensation for panels' setback. The test platform is built and the hole-making test verifies that the contact-type normal vector correction technology and the TCP displacement compensation technology could effectively ensure the perpendicularity and position accuracy of holes. The perpendicularity error of holes is less than 0.25° and the position deviation is less than 0.4 mm.

Key words: aircraft assembly; robot drilling; contact-type pressure foot; normal vector correction; real-time compensation

基金项目: 国家自然科学基金(52105535)。

收稿日期: 2022-03-27; **修订日期:** 2022-04-30

通信作者: 郭英杰, 男, 助理研究员, E-mail: zju_gyj@zju.edu.cn。

引用格式: 连哲楠, 郭英杰, 霍超, 等. 基于接触式压脚的机器人制孔垂直度优化研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 418-426. LIAN Zhenan, GUO Yingjie, HUO Chao, et al. Optimization of robot drilling perpendicularity based on contact-type pressure foot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 418-426.

轻量化是提高飞机性能、承载效率及减少油耗的重要手段。飞机部件常使用蒙皮配合整体骨架的半硬壳式结构,其中存在大量薄壁叠层区域,如B737-700垂尾肋类零件部分区域壁厚小于3 mm^[1]。飞机装配中机器人制孔系统加工的对象多为由碳纤维增强聚合物(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)、Al、Ti等材料构成的弱刚性叠层薄壁,如飞机襟翼的大部分制孔区域叠层厚度在10 mm内,部分区域厚度不足5 mm。由于工装定位误差及产品变形,实际产品表面法向与数模间存在不可预测的偏差^[2]。如果直接根据数模法向制孔,会影响飞机疲劳寿命。根据波音公司研究,当钛合金螺栓沿外载荷作用方向倾斜大于2°时,其疲劳寿命会降低约47%^[3]。为保证飞机结构抗疲劳性能与可靠性,需要在制孔前校正制孔方向,保证孔的倾斜角度在0.5°内^[4]。

目前中国自主研发的机器人制孔系统多采用非接触式法向校正技术与蒙皮单向压紧技术^[5-9]。非接触式,指“末端执行器在不接触壁板的状态”下,利用执行器上的传感器组完成法向测量并计算壁板法向与工具坐标系(Tool coordinate system, TCS) z 轴的偏角,控制机器人调整末端姿态实现制孔方向校正。蒙皮单向压紧指执行器在制孔过程中给壁板施加单向压紧力以消除壁板层间间隙,减少制孔层间毛刺。由于执行器给薄壁施加的单向压紧力通常大于200 N,非接触式法向校正后再施加压紧力,会使制孔区域法向发生变化。此时根据压紧前的壁板法向进行制孔,无法保证较高的孔垂直度^[10-11]。同时,在飞机壁板制孔中非接触式法向校正还出现边界孔区域激光未射到壁板上^[12]、密集孔区域激光射入已加工孔^[13]等现象,非接触式法向校正的典型难加工区域如图1所示。

针对非接触式法向校正技术在薄壁、零件拼接

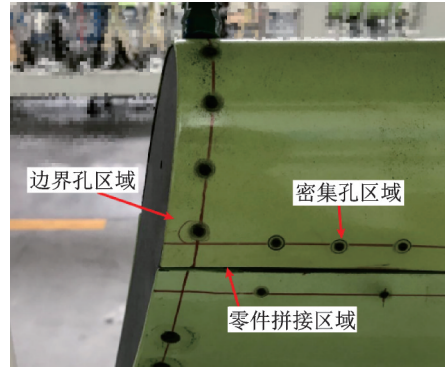


图1 非接触式法向校正的制孔困难区域

Fig.1 Difficult area of hole making for non-contact normal vector correction

等区域上的不足,设计一种接触式压脚结构以实现执行器压紧壁板后进行法向校正。分析了传统非接触式法向校正算法的不足,及其在接触式压脚结构上存在的冗余性。提出一种特定的适用于接触式压脚结构的两点校正算法,并设计一套基于激光跟踪仪的传感器标定方法。研究了接触式法向校正技术应用于弱刚性薄壁出现的壁板回退现象,提出工具中心点(Tool center point, TCP)变位补偿技术,通过改变TCP位置对壁板回退量进行实时补偿。搭建试切平台进行制孔试验,验证了接触式法向校正技术的可靠性。

1 接触式法向校正技术

1.1 接触式压脚结构

接触式压脚结构如图2所示,当压脚接触产品表面,球面副允许压脚前端绕球心旋转使压鼻端面紧贴壁板。压脚主体上装有4个激光位移传感器用于法向测量,传感器型号为OM20-P0120.HH.YIN,其测量面是自适应前端上的标准面,标准面与压鼻端面平行可较准确地代表制孔区域。压脚主体与自适应前端通过预紧弹簧连接,压脚外部套防尘罩避免复合材料粉尘干扰传感器测量环境。

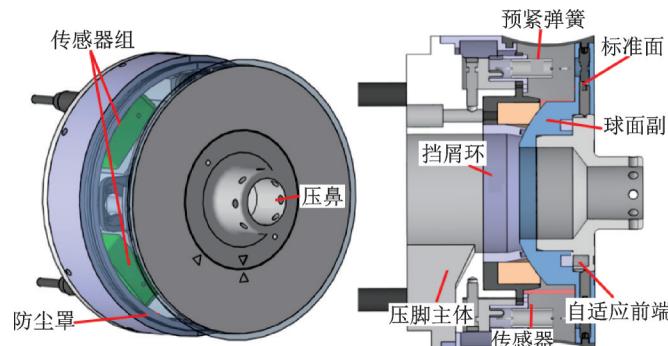


图2 接触式压脚结构

Fig.2 Contact-type pressure foot structure

压鼻端面压紧产品区域较小,将该区域近似视为平面可较准确地反映壁板区域法向。压脚压紧壁板后测量法向并校正机器人末端姿态,从根本上消除薄壁受单向压紧力变形对孔垂直度的影响。压脚中传感器的测量面是标准面,避免出现非接触式法向测量中边界区域光斑丢失、激光射入已加工孔、激光射入接缝等现象。压脚外部套防尘罩避免现场复杂环境干扰法向测量。

1.2 基于接触式压脚结构的两点校正算法

传统非接触式法向校正中传感器测量面是变曲率壁板,国内外研究集中于通过系列光斑点拟合壁面形貌,如平面拟合^[14-16]、球面拟合^[17-18]等,即在TCS下基于传感器位姿与读数求解壁面光斑点坐标,通过系列光斑点拟合壁面方程并求解壁面法向与 z 轴偏角。平面拟合算法中为确定空间任意平面需要至少3个点,故该类算法需要使用3个及以上传感器。

壁板制孔区域曲率较小时令4个光斑点聚拢在孔位周围,将光斑笼罩区域近似视为平面衍生出四点调平算法如图3所示。通过标定工具获得基准平面与TCS z 轴垂直时4个激光位移传感器的读数作为零点标定值,将求解壁面法向的问题转化为如何控制机器人调整末端姿态使4个传感器的读数变化量相等。图3中 xyz 为TCS的当前姿态, $x'y'z'$ 表示TCS法向校正的目标姿态。 $d_{1,offset}$ 为1号传感器零点标定值, Δd_1 为1号传感器读数与零点标定值之差即传感器读数变化量, Δd_{14} 为 Δd_1 与 Δd_4 的平均值,同理 Δd_{23} 为 Δd_2 与 Δd_3 的平均值, Δd_{12} 为 Δd_1 与 Δd_2 的平均值, Δd_{34} 为 Δd_3 与 Δd_4 的平均值。 l_{12} 为1、2号传感器投在标准面上光斑点间的距离,同理 l_{34} 为3、4号传感器光斑点间的距离, l_{14} 为1、4号传感器光斑点间的距离, l_{23} 为2、3号传感器光斑点间的距离。

根据图3易得

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(2 \frac{\Delta d_{23} - \Delta d_{14}}{l_{12} + l_{34}}\right) \\ \gamma = \arctan\left(2 \frac{\Delta d_{34} - \Delta d_{12}}{l_{14} + l_{23}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 β, γ 为 zyx 欧拉角,即法向校正中机器人先后绕TCS y 轴、 x 轴的旋转角。在数控系统840D sl中定义机床旋转顺序ORIAX_TURN_TAB_1使符合 zyx 欧拉角顺序,当NC程序中将 β, γ 的旋转指令下发,数控系统根据 zyx 欧拉角顺序及 β, γ 完

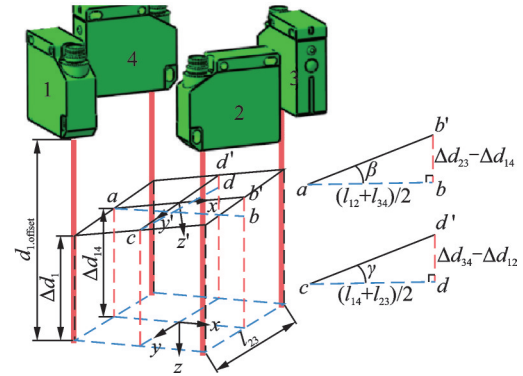


图3 4点调平算法

Fig.3 Four-point alignment algorithm

成目标姿态的反解,并控制机器人完成末端姿态调整。

传统非接触式平面拟合与4点调平算法的测量面是壁板,不同材料的壁板会对测量结果产生干扰,而接触式压脚的测量面始终为标准面,不受外界环境干扰,因此更加准确可靠。虽然平面拟合与4点调平算法经修改后可沿用于接触式压脚结构,但是平面拟合算法需要对3个传感器的位姿参数进行标定,计算量较大且标定参数较多。平面拟合算法求解空间平面在TCS下方程的过程中使用了3个传感器在TCS下的位置姿态以及其读数,共计21个参数。将这些参数输入到数控系统中,容易误操作,需要操作人员具有较高专业水平。而4点调平算法的准确度与零点标定值密切相关,因为4点调平算法的调整目标就基于零点标定值。这需要保证在加工现场中妥善保存标定工具,如果操作人员在使用过程中损伤了标定工具,会直接对算法准确度造成影响。同时,这两种算法在接触式压脚结构下对传感器的使用存在冗余性,提高设备成本的同时也不利于末端执行器的结构轻量化与小型化。

基于接触式压脚结构特点,提出一种受限于接触式压脚结构的两点校正法向校正算法。如图4所示,由于接触式压脚主体与执行器相连固定不动,在压脚主体施加的球面副约束下,自适应前端仅能绕着球面副球心转动,因此转动过程中标准面到球心的距离为定值。接触式压脚为避免球面副转动干涉,在法向校正阶段也将TCP设在球面副球心位置。

TCS下由于标准面到TCP距离固定且绕TCP旋转,可将标准面方程表示为

$$ax + by + cz = r \quad (2)$$

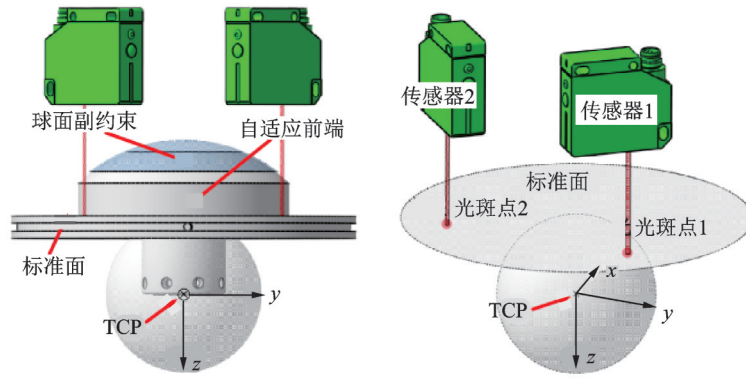


图4 接触式压脚结构下受约束的标准面

Fig.4 Constrained standard surface under contact-type pressure foot structure

式中: r 为标准面到TCP的距离,由标准面与TCP关系知 r 为负值常数; a 、 b 、 c 为标准面单位法向量的3个分量,其中 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$,可用 a 、 b 表示 c 。因此球面副约束下自适应前端转动过程中,标准面在TCS下的方程仅含 a 、 b 两个变量,可通过空间中另两个点确定该标准面如图4。因此在接触式压脚这种特殊结构下,能通过两个激光位移传感器求解标准面法向。将这种仅适用于接触式压脚结构利用两个激光位移传感器的法向校正算法称为两点校正算法。

设传感器在TCS下的位姿为 $(x_i, y_i, z_i, m_i, n_i, p_i)$, $i = 1, 2$, 其中 $m_i^2 + n_i^2 + p_i^2 = 1$ 。通过激光位移传感器获得激光出射点至标准面距离 L_i , $i = 1, 2$ 。因此光斑点空间坐标可表示为 $(x_i + L_i m_i, y_i + L_i n_i, z_i + L_i p_i)$, 由于光斑投射在标准面上,符合标准面平面方程,可得

$$\begin{cases} a(x_1 + L_1 m_1) + b(y_1 + L_1 n_1) + c(z_1 + L_1 p_1) = r \\ a(x_2 + L_2 m_2) + b(y_2 + L_2 n_2) + c(z_2 + L_2 p_2) = r \\ a^2 + b^2 + c^2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3)解得标准面法向量后,通过 zyx 欧拉角旋转矩阵求解 β 、 γ 角

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = R_{zyx}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \cos \gamma \\ -\sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $R_{zyx}(\alpha, \beta, \gamma)$ 表示 zyx 欧拉角旋转矩阵^[15]。

由于机器人的姿态调整目标是TCS z 轴垂直于制孔区域壁面,不约束 y 轴与 x 轴的方向,因此在进行调整时,机器人只需要绕TCS自身 y 轴与 x 轴分别旋转,即绕 z 轴旋转角 α 为零,绕 y 、 x 轴旋转角分别为 β 、 γ 。经计算可得标准面法向与 β 、 γ 关系为

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(\frac{a}{c}\right) \\ \gamma = \arcsin(-b) \end{cases} \quad (5)$$

1.3 激光位移传感器的标定

由于存在装配误差,激光位移传感器并不是理想地安装于压脚中预设位置,传感器的姿态也不能保证符合理论设计情况。基于式(3)利用两个激光位移传感器求解接触式压脚结构的标准面法向,需要首先标定传感器位姿参数以及标准面到球面副球心距离。由于制孔方向调整阶段中TCP与球面副球心重合,因此标定过程基于TCS。利用激光跟踪仪Leica AT930建立TCS,其中 z 轴通过主轴进给方向确定, x 轴通过工位切换轴确定,原点建立在球面副球心处,如图5所示。

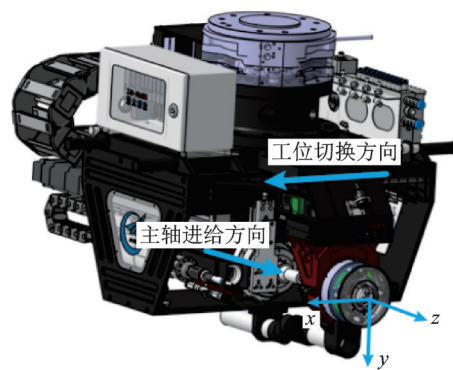


图5 建立坐标系标定传感器

Fig.5 Coordinate system before sensor calibration

假设传感器在TCS下的位姿为 $(x_i, y_i, z_i, m_i, n_i, p_i)$, $i = 1, 2$,为确定传感器位姿需要多个基准平面。图6所示为专用标定盘,其直杆轴线与基准平面法向存在 5° 夹角。利用这个标定盘可以快速生成这些基准平面,首先将标定盘的直杆插入主轴刀柄,然后控制主轴回退直到基准平面

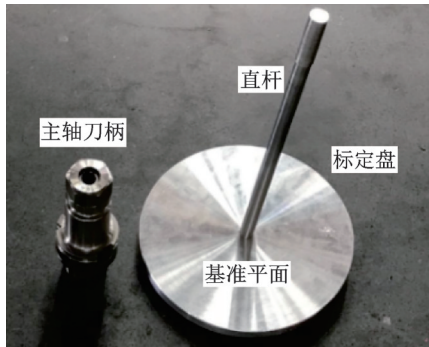


图6 标定工具

Fig.6 Calibration tool

紧贴压鼻端面,则基准平面与压鼻端面、标准面平

$$d = \frac{|a(x_i + L_i m_i) + b(y_i + L_i n_i) + c(z_i + L_i p_i) - r|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (6)$$

式中 (a, b, c) 通过跟踪仪拟合得到,传感器读数 L_i 直接读取,则光斑点到标准面的距离 d 可表示为关于 $(x_i, y_i, z_i, m_i, n_i, r)$ 的函数

$$d = f(x_i, y_i, z_i, m_i, n_i, r) \quad (7)$$

通过主轴旋转命令生成 n 个($n \geq$ 未知参数个数)基准平面,测量并记录 n 组数据。对于每个传感器都可以构建方程个数为 n 的非线性方程组为

$$\begin{bmatrix} d_{1,1} \\ d_{1,2} \\ \vdots \\ d_{1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_1, y_1, z_1, m_1, n_1, r) \\ f(x_1, y_1, z_1, m_1, n_1, r) \\ \vdots \\ f(x_1, y_1, z_1, m_1, n_1, r) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} d_{2,1} \\ d_{2,2} \\ \vdots \\ d_{2,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_2, y_2, z_2, m_2, n_2, r) \\ f(x_2, y_2, z_2, m_2, n_2, r) \\ \vdots \\ f(x_2, y_2, z_2, m_2, n_2, r) \end{bmatrix} \quad (9)$$

实际标定过程中为确保标定精度,通过8个基准平面构建超定方程组,并将其转化为最小二乘问题如式(10),最终利用matlab的非线性最小二乘函数lsqcurvefit求解。

$$\min_{(x_i, y_i, z_i, m_i, n_i, r)} \sum_{i=1, n=1}^{i=2, n=8} d_{i,n}^2 \quad (10)$$

2 壁板回退与TCP变位补偿技术

2.1 薄壁受单向压紧力回退的影响

为消除叠层材料的叠层间隙减少制孔毛刺,制孔过程中末端执行器需要给壁板施加单向压紧力,会引起壁板回退,给接触式法向校正技术带来挑战。理想情况下,当机器人按照移动指令携带末端执行器到指定位置,TCP与壁板表面上的待制孔

行。通过主轴旋转命令能快速生成多个与TCS的 z 轴不垂直的基准平面。

利用激光跟踪仪建立TCS后,将标定盘插入主轴刀柄,控制主轴回退直到基准平面紧贴压鼻端面,利用激光跟踪仪的靶标球测量基准平面上多个点的坐标,基于点云数据拟合平面,得到基准平面法向量 (a, b, c) 。标准面平行于基准平面则 (a, b, c) 也表示标准面法向。记录传感器组读数 L_i ,根据传感器的位姿与读数,可得光斑点的空间坐标 $(x_i + L_i m_i, y_i + L_i n_i, z_i + L_i p_i)$,同时标准面方程为 $ax + by + cz = r$,则光斑点到标准面距离为

位置重合,此时伸出压脚,TCP、孔位、压鼻端面中心3点重合于 T_0 ,如图7所示。然而,由于弱刚性壁板发生 Δz 的回退,孔位将跟随壁板表面移动到 T_1 ,但TCP位置不变,导致孔位与TCP发生错位。

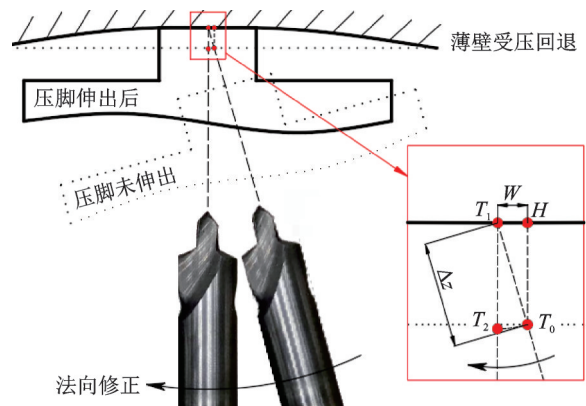


图7 薄壁受压回退的影响

Fig.7 Influence of elastic deformation of thin wall

法向校正前刀具轴线方向为 $\overrightarrow{T_0 T_1}$,壁板受压回退后,如果直接围绕TCP即 T_0 点调整机器人末端姿态,刀具轴线变为 $\overrightarrow{T_0 H}$ 。刀具轴线与壁板表面的交点从 T_1 变化到 H ,表示压鼻在壁板上发生了滑移,可能在产品表面留下划痕。同时实际制孔位置 H 偏离了待制孔位置,引入了孔位偏差 w 。

2.2 TCP变位补偿壁板回退

压脚模块在末端执行器上通过气缸驱动,为实时监测壁板回退距离,在驱动气缸的导轨上安装激光位移传感器。利用激光位移传感器计算压脚实时伸出量与标准伸出量的差值 Δz ,即为壁板回退距离,激光位移传感器的安装位置如图8所示。

通过改变末端执行器整体位置的物理补偿技术能削弱壁板回退造成的影响。当接触式压脚伸

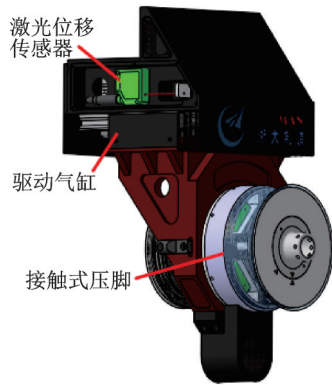


图 8 激光位移传感器测量压脚伸出量

Fig.8 Laser displacement sensor measures the extension of presser foot structure

出并压紧壁板后,首先测量壁板回退量 Δz ,然后控制压脚缩回并令机器人携带末端执行器沿 TCS 的 z 轴正向(即 $\overline{T_0T_1}$ 方向)位移 Δz 距离补偿壁板的回退量,最后再次伸出压脚,由于前后两次的压紧力未发生改变,壁板的变形情况与先前几乎一致,则孔位与 TCP 将重合于 T_1 。物理补偿技术的控制逻辑简单,但产品的各个区域受工装支撑状况不同,意味着相同压紧力作用下各孔位区域的弹性变形存在偏差,定量补偿效果较差。因此需要在每个孔的法向校正前引入压脚缩回、机器人沿 TCS z 轴移动、压脚再次伸出的动作,耗时数秒影响制孔效率。

针对壁板回退问题,李鹏程等^[19]提出一种 TCP 圆弧运动补偿技术,即机器人绕 TCS 自身坐标轴旋转调整制孔方向的同时引入 TCP 圆弧插补运动,其原理阐述如下:如果法向校正中控制机器人运动使 TCP 从 T_0 沿着以 T_1 为圆心 Δz 为半径的圆弧运动至 T_2 ,则法向校正后刀具轴线与 $\overline{T_2T_1}$ 重合,避免法向校正过程引入孔位偏差。其中 T_1 、 T_2 在法向校正前 TCS 下的坐标推导为

$$A_{T_1} = B_{T_0} + \Delta z \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_{T_2} = A_{T_1} - \Delta z \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta z \sin \beta \cos \gamma \\ -\Delta z \sin \gamma \\ \Delta z \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta z \sin \beta \cos \gamma \\ \Delta z \sin \gamma \\ \Delta z (1 - \cos \beta \cos \gamma) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(11)中 T_0 即 TCP 其坐标为 $(0, 0, 0)$, Δz 为壁板回退量, $(0, 0, 1)^T$ 向量表示 TCS z 轴正方向。式(12)中 $(a, b, c)^T$ 指壁板法向量 $\overline{T_2T_1}$ 在 TCS 下

的单位化, $(a, b, c)^T$ 与 β 、 γ 的关系推导见式(4)。TCP 圆弧运动补偿技术中法向校正的目标位置与姿态可通过 Δz 与 zyx 欧拉角表示,但机器人运动的圆弧插补路径需要在数控系统中额外定义,且实现机器人圆弧插补运动与末端姿态调整的动态同步存在难度。如果移动路径不进行圆弧插补而走直线,会造成球面副转动干涉,在移动过程中引起压鼻滑移。

基于以上两种补偿技术,提出一种 TCP 变位补偿技术,其原理阐述如下:接触式压脚压紧壁板后,首先测量壁板回退量 Δz ,然后在法向校正前,利用数控程序动态地改变 TCP 位置,将 TCP 从 T_0 沿 TCS z 轴(即 $\overline{T_0T_1}$ 方向)平移到 T_1 ,使 TCP 与孔位重合于 T_1 ,消除错位现象。记平移后的 TCP、TCS 为 TCP'、TCS',机器人围绕 TCS'调整末端姿态过程中,制孔位置不发生变化。

数控系统 840D sl 中坐标系具有传递性,TCS 位置与姿态的定义基于法兰坐标系。法兰坐标系依据设定的机床数据 ROBX_TTCFL_POS 和 ROBX_TTCFL_RPY 将自身平移再旋转后产生 TCS。其中 ROBX_TTCFL_POS 包含 3 个分量,用于控制法兰坐标系沿着自身坐标轴按照 xyz 顺序先后平移,ROBX_TTCFL_RPY 包含的 3 个分量控制平移后的旋转过程,法兰坐标系围绕自身坐标轴旋转,旋转次序同 zyx 欧拉角,正旋转方向根据右手定律确定。通过激光位移传感器得到壁板回退量 Δz 后,实时修改机床数据 ROBX_TTCFL_POS 即可使 TCP 沿 TCS z 轴方向从 T_0 平移至 T_1 ,完成对壁板回退量的实时补偿。

TCP 变位补偿技术通过改变机床数据修改 TCP 位置,避免了物理补偿技术中引入额外动作所造成的效率降低;法向校正过程中过程中 TCP' 位置固定不动,机器人调整制孔姿态只涉及绕 TCS' 自身坐标轴旋转,与非接触式法向校正中一致,避免额外引入机器人圆弧插补运动。TCP 变位补偿技术临时变更 TCP 位置存在安全隐患,因此需要完善其安全逻辑,在每次修改 TCP 位置后及时地复位,防止因 TCP 位置改变引发如末端执行器与工装干涉的安全事故。图 9 展示了包含 TCP 变位补偿技术的接触式法向校正流程,在每个孔加工结束后以及移动到下个孔之前对 TCP 设定位置进行初始化,即使数控程序中途中途暂停、跳行或者复位,都能在下次机器人移动前恢复 TCP 的理论设定。

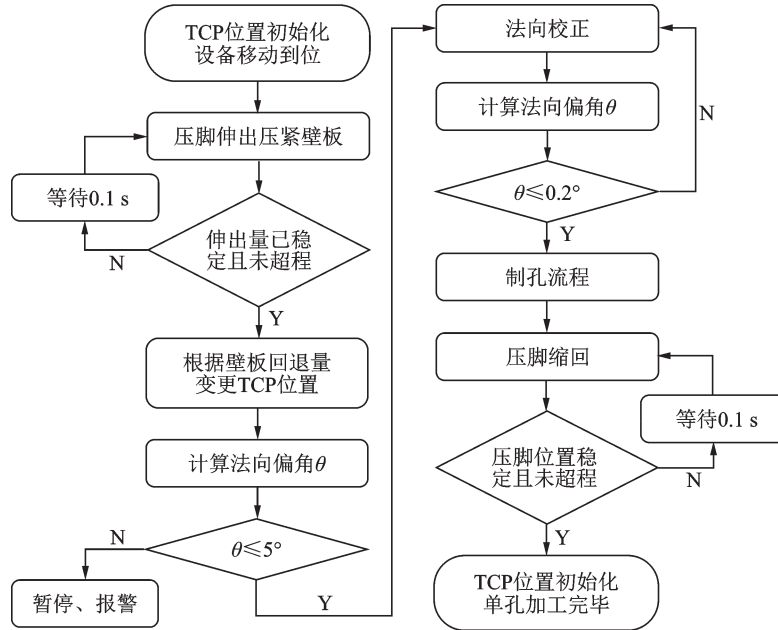


图9 法向校正流程图

Fig.9 Normal vector correction flow chart

3 试验验证

为验证接触式法向校正技术及TCP变位补偿技术的有效性,搭建了法向校正试切平台,如图10所示。机器人型号KUKA KR420 R3330,数控系统840D sl,自主研发末端执行器,法向校正中仅使

用接触式压脚的两个激光位移传感器。试刀台与机器人底座位于同一移动平台上,通过地轨扩大加工范围,试切对象为某型机襟翼同型T300复合材料制成的6 mm厚试切板。刀具直径5 mm,制孔主轴转速8 000 r/min,主轴进给速度200 mm/min,压紧力200 N。

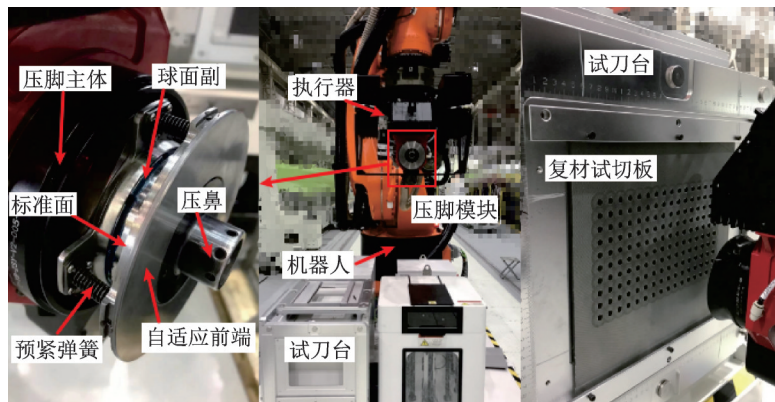


图10 试切平台

Fig.10 Test cutting platform

控制机器人在试切板上制孔的具体试验步骤阐述如下:

(1) 机器人回到安全姿态,地轨回零避免碰撞其余工装。在试切台上安装复合材料试切板。

(2) 根据1.3节内容利用激光跟踪仪Leica AT930建立坐标系并标定传感器。将标定结果输入数控系统840D sl中。

(3) 编写NC程序控制机器人加工试切板。利用Matlab给NC程序中给每个孔的法向添加3°内随机偏角,并将NC程序拷入数控系统。空走模式

下运行程序,空走即不法向校正和制孔,用于确认程序无误。

(4) 法向校正算法选用两点校正算法,偏角容差设为0.2°,运行程序控制机器人加工10行总计160个孔。通过执行器上的监测相机,观察压鼻在法向校正中是否出现滑移,并于后台记录每个孔的初始偏角与法向校正后的偏角。

(5) 试切结束机器人回安全姿态,拆下试切板观察孔的周围是否存在压鼻滑移留下的痕迹。每行孔抽样选取2个共20个孔,用三坐标测量仪测

量孔的垂直度;每行以第1个孔作为基准,每行抽样2个共20个孔,用三坐标测量仪测量孔位间距与理论值的偏差。

(6)对比分析实验数据,完成试切实验。

法向校正数据汇总如图11,法向校正前组为设备压紧试切板后第1次法向校正前,传感器组计算得到的法向偏角,法向校正前最大偏角 2.62° ;法向校正后组为设备跳出法向校正循环准备制孔前,传感器组测量得到的法向偏角;三坐标测量结果组为试切结束后三坐标测量仪测量孔垂直度的数据。接触式法向校正后,法向偏角能明显下降并稳定维持在 0.25° 以下,其均值为 0.16° ,满足航空飞机装配需求。

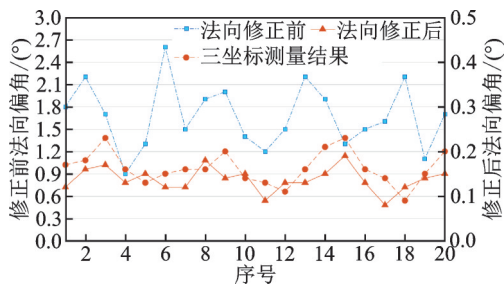


图11 法向校正前后对比图

Fig.11 Comparison before and after normal vector correction

试验中法向校正环节未观察到压鼻滑移,拆下试切板观察孔的周围,没有出现压鼻滑移留下的痕迹。通过三坐标测量仪测得的孔位偏差数据汇总如图12,最大偏差量 0.37 mm ,最小偏差量 0.07 mm ,孔位偏差整体维持在 0.4 mm 以下,20个抽样孔的平均孔位偏差为 0.21 mm ,满足制孔位置精度需求,说明TCP变位补偿技术可以有效保障制孔位置精度。

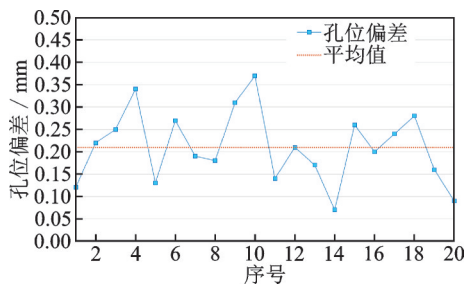


图12 孔位偏差图

Fig.12 Hole deviation measurement results

4 结 论

(1)研究飞机装配领域机器人自动化制孔中非接触式法向校正遇到的问题,针对更高的制孔垂直度要求,提出了一种搭载激光位移传感器组的接触

式压脚结构,实现压脚压紧壁板后再进行法向校正,避免弱刚性壁板受单向压紧力引起制孔区域法向变化对制孔垂直度的干扰。

(2)分析传统非接触式法向校正算法的不足,及其应用在接触式压脚结构上的冗余性。针对接触式压脚这种特殊结构提出了两点校正法向校正算法,并设计了基于激光跟踪仪的传感器位姿标定方法。

(3)针对薄壁受单向压紧力发生回退的现象,提出通过动态设定机床数据改变TCP位置实时补偿壁板回退量的方法,避免在接触式法向校正过程中引入孔位偏差。

(4)搭建试切平台验证了提出的接触式法向校正技术与TCP变位补偿技术能够保证制孔法向精度与位置精度,实现孔垂直度误差小于 0.25° ,孔位偏差小于 0.4 mm 。研究结果可为钻铆末端执行器的设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 田辉. 超长薄壁结构件的复合加工技术[J]. 航空制造技术, 2011, 391(19): 51-52.
TIAN Hui. Complex machining technology for super-long thin-wall structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 391(19): 51-52.
- [2] 刘镇阳, 翟雨农, 李东升, 等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 46-54.
LIU Zhenyang, ZHAI Yunong, LI Dongsheng, et al. Research and application progress of deformation control technology for aircraft composite panel assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(18): 46-54.
- [3] 曹国顺. 工业机器人精确制孔试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
CAO Guoshun. Research on industry robot precision drilling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [4] ZHANG Y, BI Q, 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(9/10/11): 3579-3599.
- [5] 张晋, 周新房, 乔顺成, 等. 一种机器人末端制孔接触式法向校正技术研究[J]. 测控技术, 2020, 39(4): 49-52.
ZHANG Jin, ZHOU Xinfang, QIAO Shuncheng, et al. Research on contact-type normal alignment technology of end actuator drilling for robots [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(4): 49-52.

- [6] 潘国威, 陈文亮. 基于多传感融合的自动钻铆孔位在线测量方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 388-393.
PAN Guowei, CHEN Wenliang. Online measurement method for automatic drilling and riveting based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 388-393.
- [7] 袁康正, 朱伟东, 陈磊, 等. 机器人末端位移传感器的安装位置标定方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(5): 829-834.
YUAN Kangzheng, ZHU Weidong, CHEN Lei, et al. Approach for calibration position of displacement sensor mounted on robot end-effector[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(5): 829-834.
- [8] 曹双倩, 袁培江, 陈冬冬, 等. 激光测距传感器光束矢向和零点位置标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(6): 1321-1327.
CAO Shuangqian, YUAN Peijiang, CHEN Dongdong, et al. Calibration method for laser beam direction and zero point of laser displacement sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(6): 1321-1327.
- [9] 袁培江, 陶一宁, 傅帅, 等. 航空制孔机器人的现状与展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 38-47.
YUAN Peijiang, TAO Yining, FU Shuai, et al. Status and prospect of aviation drilling robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 38-47.
- [10] HOLT S, CLAUSS R. Robotic drilling and counter-sinking on highly curved surfaces[EB/OL]. [2015-09-15]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2517>.
- [11] DEVLIEG R, MIR R. 777X control surface assembly using advanced robotic automation[EB/OL]. [2017-09-19]. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2092>.
- [12] 钟衡, 刘顺涛, 谯成. 特殊结构飞机壁板自动制孔法向调平算法研究[C] // 2017年中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2017: 404-409.
ZHONG Heng, LIU Shuntao, QIAO Cheng. Research on normal leveling algorithm of automatic hole making for aircraft panel with special structure[C] // Proceedings of 2017 China Aviation Science and Technology Conference Proceedings. Beijing: China Science and Technology Press, 2017: 404-409.
- [13] 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.
- [14] TIAN W, ZHOU W, 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.
- [15] 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. Robot automatic drilling system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(8): 1427-1433.
- [16] 冯昌源, 田威, 胡俊山, 等. 面向变曲率曲面的自动钻铆垂直精度补偿技术[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 33-35.
FENG Changyuan, TIAN Wei, HU Junshan, et al. Automatic precision riveting vertical accuracy compensation technology for variable curvature surface[J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(1): 33-35.
- [17] 张来喜, 王兴松. 曲面柔性制孔机器人末端执行器及其法向姿态调整的一种新算法[J]. 东南大学学报(英文版), 2012, 28(1): 29-34.
ZHANG Laixi, WANG Xingsong. 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.
- [18] 倪世远. 卧式双联机联合自动钻铆系统制孔法向修正技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
NI Shiyuan. Research on drilling normal correction technology with automatic horizontal dual-machine cooperative drilling and riveting system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [19] 李鹏程, 李明宇, 郑炜, 等. 基于接触式压力脚的机器人制孔法向检测与调姿方法[EB/OL]. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230104.1214.013.html>.
LI Pengcheng, LI Mingyu, ZHENG Wei, et al. Contact-type pressure foot-based detection and adjusting method of the normal direction for robotic drilling system[EB/OL]. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20230104.1214.013.html>.