

基于工业机器人的复杂曲面件保压侧移控制方法*

匡婷玉,李泷泉,翟建军,黄翔,江一帆

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 在保压力加载过程中,复杂曲面件在侧向力的作用下产生位姿侧移。为了保证复杂曲面件的位置精度,构建复杂曲面件保压控制系统,借助激光位移传感器和 T-Mac 激光跟踪系统,测量复杂曲面件的位置并在线补偿误差。通过 3 个位移传感器测量实际加载点的法矢方向,利用夹角逼近算法搜索获得实际点位,对比理论点位,得到复杂曲面件与机器人的相对位置。根据 T-Mac 实时反馈机器人的位置,解算获得复杂曲面件的绝对位置,并调整机器人末端实现复杂曲面件的位置修正。试验结果表明,经第 3 次在线补偿后,复杂曲面件位置精度达到 0.1mm,相比原始误差提升了 90%。

关键词: 机器人; 夹角逼近; 误差补偿; 闭环控制; 复杂曲面

A Method of Lateral Displacement Control for Complex Curved Surface Structure Based on Industrial Robot During Pressure Keeping Process

KUANG Tingyu, LI Shuanggao, ZHAI Jianjun, HUANG Xiang, JIANG Yifan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] There would be a lateral displacement caused by the lateral force for complex curved surface structure during the pressure keeping process. A pressure keeping system consisted of laser displacement sensor and T-Mac was built, in order to measure the position of complex curved surface structure and compensate the error on-line. Coordinates of the actual measuring point were calculated based on angle approaching, whose normal direction was measured by three displacement sensors. The relative location to complex curved surface structure from the robot was provided by comparing the coordinates of the actual measuring point with the theoretical point. The position of the robot was given real-time by T-Mac. Then the absolute position of complex curved surface structure was obtained. The position correction of complex curved surface structure was realized by adjusting the robot end. The results of three times of online error compensation experiments show that the position deviation is close to 0.1mm and is decreased by 90% compares to the original error.

Keywords: Robot; Angle approaching; Compensation; Closed-loop control; Complex curved surface

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.080

随着复合材料大量应用,航空结构件装配开始大量使用胶接的连接形式^[1-2]。对于采用胶接装配形式的复杂曲面件,需要对胶层加压固化。为获得理想的胶接强度,本文拟以工业机器人为载体对复杂曲面件加压,这种方法具备较高的自主性与较好的自适应性等优势。但由于复杂曲面件加工误差、机器人位置与法向定位误差等因素的存在,通常无法保证加载力方向与复杂曲面件表面法矢方向完全一致,由此产生的侧向力极易使得复杂曲面件发生位置侧移,进而影响复杂曲面件之间的

阶差与间隙,降低产品性能。因此研究控制复杂曲面件侧移的方法,对提高复杂曲面件装配的可靠性与飞行器的安全性能有着重大意义。

目前,国内外主要朝着末端执行器多功能化、机器人定位自动化与柔性化等方向发展^[3-4]。Park 等^[5]使用工业相机以及激光跟踪仪测量机器人的实际位姿,提高了机器人的定位精度。金涨军^[6]提出了一种飞机小部件的机器人辅助装配方法,通过激光跟踪仪在线迭代补偿,部件定位精度平均达到 0.069mm。曲巍崑等^[7]和 Albin^[8]采用激光跟踪仪在线测量位姿误差,对制孔系统进行闭环反馈补偿,提高了末端工具坐标系的位置精度。

* 基金项目: 航空科学基金项目(2016ZE52053)。

目前,曲面法向测量技术的研究进展已经比较深入。薛汉杰等^[9]提出利用接触式位移传感器调整法向的方法,但接触式测量法向的精度较低。公茂震等^[10]提出了一种非接触法线测量方法,利用3个激光测距传感器测量法向量及其与钻头中心轴线的夹角,此方法测量精度高并且不会损伤被测物体表面。应高明等^[11]通过激光测距传感器获取钻铆点周围特征点的坐标,并通过曲面二次拟合计算得到待钻铆点处法向量。

本文以 KUKA 工业机器人为运动平台,搭载自主研发的末端执行器,构建复杂曲面件保压控制系统。3个激光位移传感器实时测量加载点的法向,根据映射关系在数据库中搜索与法向相匹配的点坐标,确定复杂曲面件与机器人的空间位置关系。T-Mac 实时监控机器人的位置,计算得到复杂曲面件的位置偏移量,调整末端执行器进行位置误差补偿。最终实现复杂曲面件的位置精度控制。

1 复杂曲面件加载控制原理

复杂曲面件保压控制系统主要包括工装系统和控制软件。工装系统主要由工业机器人、末端执行器和移动平台组成。根据复杂曲面件定位与加载等工艺的需求,设计包含加载模块、在线测量模块的末端执行单元,结构如图1所示。加载模块由电机、升降机与压力传感器构成,用于压力的施加、监控与补偿。在线测量模块主要包括 T-Mac 激光测量系统、激光位移传感器,其目的是确定复杂曲面件和机器人的空间位置。机器人末端与复杂曲面件间采用柔性材料作为缓冲垫,用于加载

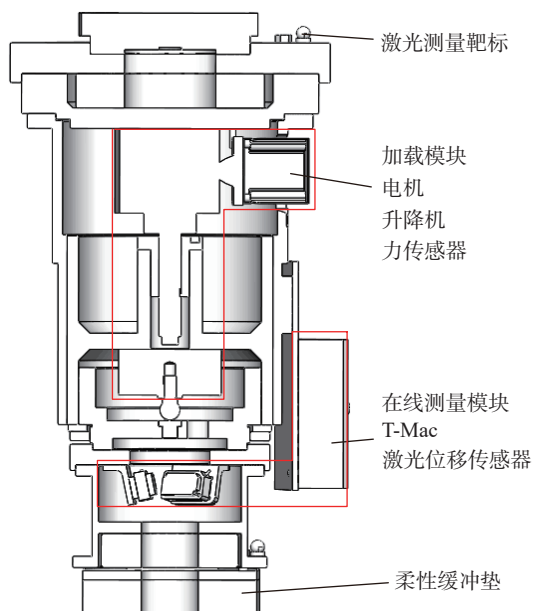


图1 末端执行器结构图

Fig.1 Structure of end-effector

过程中复杂曲面件的保护。

复杂曲面件加压过程需要多种设备联动完成整个流程,不同设备的工作坐标系并非一致,共分为基坐标系、测量坐标系等6个坐标系,如图2所示。

复杂曲面件加载的工作流程如图3所示,具体如下:

(1) 采用激光跟踪仪对坐标系进行离线标定,建立6个坐标系之间的空间转换关系。

(2) 工业机器人按既定轨迹运动到调姿位置(位于加载中心点法向上方),激光跟踪系统检测末端执行器偏差,并将偏差反馈给机器人控制系统,反复调节直至位姿偏差小于阈值。

(3) 复杂曲面件保压过程中, T-Mac、位移传感器在线测量复杂曲面件的偏移量,控制机器人进行误差迭代补偿,直至保压达到设定时间后停止。

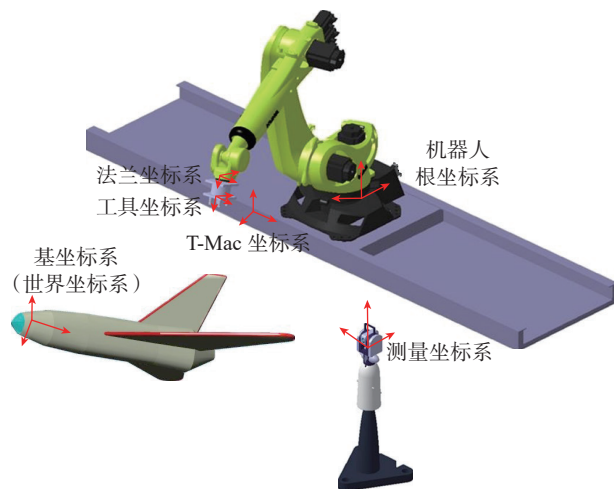


图2 坐标系系统组成

Fig.2 Distribution of coordinate systems

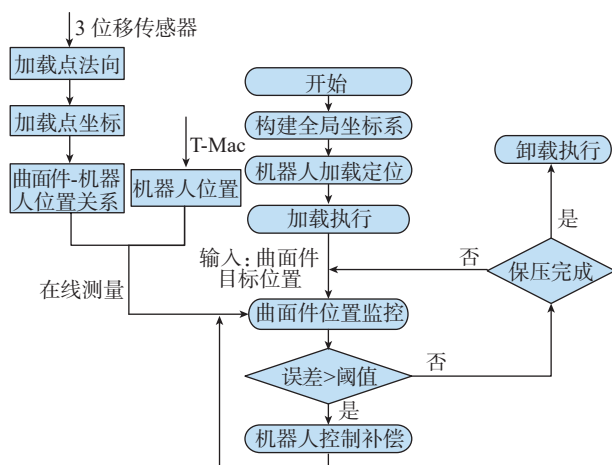


图3 复杂曲面件保压系统工作流程图

Fig.3 Workflow chart of pressure-keeping system for complex curved surface structure

2 复杂曲面件位置误差模型的建立与补偿

2.1 工具坐标系的标定

工具坐标系位于工具表面,其主要作用是控制机器人对复杂曲面件加载保压力。为了确定机器人的实际位姿,有必要对工具坐标系进行标定。由于系统的工艺流程都基于基坐标系下实现,因此首先建立测量坐标系相对基坐标系的转换关系 $T_{Measurement}^{Base}$ 。在工装上安装 3 个及以上基准点,则存在公式(1)的转换关系。其中 P_i^{Base} 为基准点在基坐标系下的坐标,直接从 CAD 模型中读取。 $P_i^{Measurement}$ 为基准点在测量坐标系下的坐标,通过激光跟踪仪测量得到。

$$P_i^{Base} = T_{Measurement}^{Base} \cdot P_i^{Measurement} \quad (1)$$

采用非线性最小二乘法解算坐标变换矩阵 $T_{Measurement}^{Base}$

$$\min \sum_{i=1}^n \|P_i^{Base} - T_{Measurement}^{Base} \cdot P_i^{Measurement}\| \quad (2)$$

使用 T-Mac 实现对末端执行器的六自由度进行跟踪测量,并实时地反馈 T-Mac 在测量坐标系的位置和方向。这避免了以往激光跟踪仪测量技术对多个基准点的依赖,提高了测量精度与效率。在基坐标系建立后,T-Mac 激光跟踪系统测量到的坐标就可以转到基坐标系下。根据公式(3)获取 T-Mac 在基坐标系下的位姿。其中 $M^{Measurement}$ 和 M^{Base} 均为 4×4 矩阵,分别代表 T-Mac 在测量坐标系下和在基坐标系下的位姿。

$$M^{Base} = T_{Measurement}^{Base} \cdot M^{Measurement} \quad (3)$$

将 T-Mac 在基坐标系下的位姿记作 $F_{T-Mac}^{Base} = (x \ y \ z \ rx \ ry \ rz)^T$, 则 T-Mac 坐标系与基坐标系的转换矩阵用公式(4)表示。其中, $crx = \cos(rx)$, $srx = \sin(rx)$, $cry = \cos(ry)$, $sry = \sin(ry)$, $crz = \cos(rz)$, $srz = \sin(rz)$ 。

$$T_{T-Mac}^{Base} = M^{Base} = \begin{pmatrix} crz \cdot cry & & & & & \\ srz \cdot crx + crz \cdot sry \cdot srx & & & & & \\ srz \cdot srx - crz \cdot sry \cdot crx & & & & & \\ & & & & & \\ -srz \cdot cry & sry & x & & & \\ crz \cdot crx - srz \cdot sry \cdot srx & -cry \cdot srx & y & & & \\ crz \cdot srx + srz \cdot sry \cdot crx & cry \cdot crx & z & & & \\ & & & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \end{pmatrix} \quad (4)$$

法兰坐标系、工具坐标系与 T-Mac 坐标系都固联在机器人的末端上,因此这 3 个坐标系之间的转换关系是固定的。T-Mac 坐标系相对于工具坐标系的转换矩阵 T_{T-Mac}^{Tool} 是定值。工具坐标系相对于基坐标系的转换矩阵 T_{Base}^{Tool} :

$$T_{T-Mac}^{Tool} = T_{Base}^{Tool} \cdot T_{T-Mac}^{Base} \quad (5)$$

$$T_{Base}^{Tool} = T_{T-Mac}^{Tool} \cdot (T_{T-Mac}^{Base})^{-1}$$

因此,基于以上的计算,实现了对工具坐标系的标定。通过 T-Mac 测量即可获取机器人末端执行器在基坐标系下的位姿。

2.2 法向测量模型与坐标计算

激光位移传感器是一种高精度的非接触式测量设备。如图 4 所示,将 3 个激光位移传感器 P_1 、 P_2 、 P_3 对称地布置在末端执行器上。传感器分别发出的激光束在复杂曲面件表面的投影点是 S_1 、 S_2 、 S_3 。由于 3 个点距离较近,则认为加载点 O 周围构成一个微小平面 $S_1S_2S_3$ 。通过拟合平面方程进而得到加载点法向量。

对激光位移传感器标定,得到每个传感器的位置坐标与激光方向。第 i 个激光位移传感器在工具坐标系的位置坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ,激光发射方向为 $\vec{m}_i = (P_i, Q_i, R_i)$ 。末端执行器到达加载位置之后,每个传感器读数为 L_i 。则复杂曲面件加载点附近的 3 个投影点在工具坐标系下的坐标 $S_i^{Tool}(X_{si}^{Tool}, Y_{si}^{Tool}, Z_{si}^{Tool})$:

$$X_i^{Tool} = X_i + L_i P_i, Y_i^{Tool} = Y_i + L_i Q_i$$

$$Z_i^{Tool} = Z_i + L_i R_i (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

基坐标系与工具坐标系之间转换关系将投影点坐标转换至在基坐标系下:

$$S_i^{Base} = T_{Tool}^{Base} \cdot S_i^{Tool} \quad (7)$$

通过 3 个点拟合平面,得到拟合方程 $ax+by+cz=d$ 。 $(a,b,c)^T$ 即为加载点的法向。当复杂曲面件在侧向力的作用下发生偏移时,加载点产生同样的偏移,因此位移传感器测量的法向发生变化。复杂曲面件是双曲率曲面,其表面上任意一点对应唯一的法向并且各点法向互不相同。即曲面各点的坐标与法向呈映射关系,通过搜索法向给定该点坐标的近似值。映射关系如图 5 所示。

由于曲面曲率连续且曲率变化不大,曲面两点的间距与其法向夹角成正比关系,夹角越小,两点间距越小,反之亦成立。在三维软件中将曲面三角网格离散化,

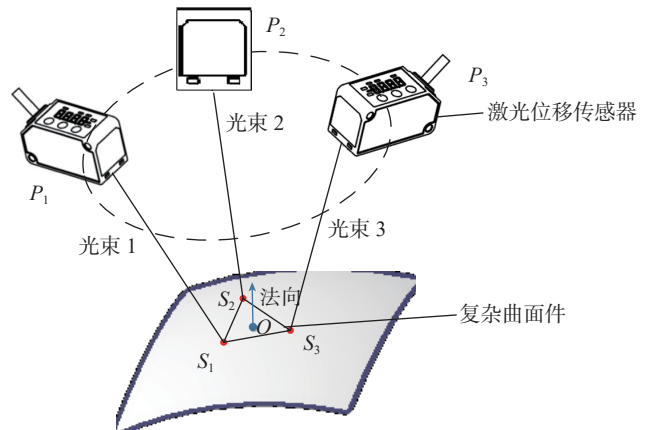


图4 法向测量模型

Fig.4 Surface-normal measurement model

提取离散点的坐标与法向信息。设离散点的坐标集合 M_d , 离散点的法向集合 $F_d = \{V_i | V_i \in R^d, i=1,2,\dots,n\}$ 。设曲面上所有点的法向空间为 R^d , 对于曲面任意一点 Q 的法向 $V_q \in R^d, \forall V_r \in F_d$ 使得点 R 是点 Q 的最近邻。计算子空间所有的向量 V_i 与 V_q 的夹角。根据以上思想可知, 取向量的夹角的最小值, 则该向量所对应的点一定是点 Q 的最近邻。

离散点的数目多达上万个, 每次查询与集合 F_d 中所有向量计算比较夹角, 所花费的时间成本较高并且实时性较差。因此随机引入集合 F_d 中某一个向量 V_z 作为参考向量, 求出集合中其他所有的向量与随机向量的夹角并按从小到大的顺序保存。对于测量得到的法向 V_q , 只需计算其与参考向量 V_z 的夹角 φ 。选择一个合适的 $\Delta\theta$, 利用二分法查找出范围在 $F'_d = \left\{ V_i | V_i \in F_d, V_i \text{ 与 } V_z \text{ 的等效夹角 } \in [\varphi - \Delta\theta, \varphi + \Delta\theta], i=1, 2, \dots, n \right\}$ 集合内的向量。此时搜索范围大大地减少。如图 6 所示, 以 V_q 为轴线, 顶角为 $2\Delta\theta$ 的圆锥区域内, 即在顶角 $\varphi - \Delta\theta$ 的圆锥之外 $\varphi + \Delta\theta$ 的圆锥之内的范围利用穷举法搜索得到最近邻。一一计算 F'_d 集合中的向量与 V_q 的夹角并进行比较, 最终选取与加载点 Q 最近的 4 个点。搜索示意图如图 6 所示。

如图 7 所示, Q_1, Q_2, Q_3 与 Q_4 是通过搜索算法获得的距离加载点最近的点。这 4 个点十分接近并且 4 点中任意 3 点都不共线, 则测量点周围可形成 4 个微小平面 ($Q_1Q_2Q_3, Q_1Q_2Q_4, Q_1Q_3Q_4, Q_2Q_3Q_4$)。认为平面上点的法向连续变化。以平面 $Q_1Q_2Q_3$ 为例, 当法向长度相同时, 随着距离的变化 Q_1Q_2 段上各点法向呈线性变化。同理, Q_1Q_3 等每一条直线直至整个平面上有着相同的规律。为了方便计算, 将法向单位矢量化。根据线性变化性质, 得到测量点的法向矢量 V_q 与邻近点的法向矢量 V_{q_1}, V_{q_2} 和 V_{q_3} 的关系。

$$K_1V_{q_1} + K_2V_{q_2} + K_3V_{q_3} = V_q \quad (K_1, K_2 \text{ 和 } K_3 \text{ 为常数}) \quad (8)$$

分别将法向矢量在 X, Y 和 Z 的分量代入方程, 通过求解公式 (9) 的方程组得到系数 K_1, K_2 和 K_3 的值。

$$\begin{cases} K_1V_{q_1x} + K_2V_{q_2x} + K_3V_{q_3x} = V_{qx} \\ K_1V_{q_1y} + K_2V_{q_2y} + K_3V_{q_3y} = V_{qy} \\ K_1V_{q_1z} + K_2V_{q_2z} + K_3V_{q_3z} = V_{qz} \end{cases} \quad (9)$$

加载点坐标的计算如公式 (10) 所示。

$$S_q = K_1S_{q_1} + K_2S_{q_2} + K_3S_{q_3} \quad (10)$$

式中, S_{q_i} 是 Q_i 的坐标值。其余 3 个面上对测量点的坐标求解方法相同。对 4 个坐标值加权平均, 作为测量点 Q 的坐标。4 点法向与坐标计算的结果更接近于 Q 点的实际坐标值。

求解向量 V_q 所对应的点 Q 坐标的具体实现步骤为:

步骤 1: 将曲面三角离散化, 将点与其对应的法向量存在数据库中。其中向量集合为 F_d 。

步骤 2: 在 F_d 中随机选择一个参考向量 V_s , 计算集合中所有向量与 V_s 的夹角。利用排序法将夹角的大小按从小到大的顺序排列, 保存在数组 Z_r 中。

步骤 3: 激光位移传感器测量法向 V_q , 计算 V_q 与参考向量 V_s 的夹角 φ 。选择合适的角度 V_{θ} 。利用二分法在数组中依次搜索与 $\varphi - V_{\theta}$ 和与 $\varphi + V_{\theta}$ 最接近的夹角, 并返回其对应索引 Index1 与 Index2。

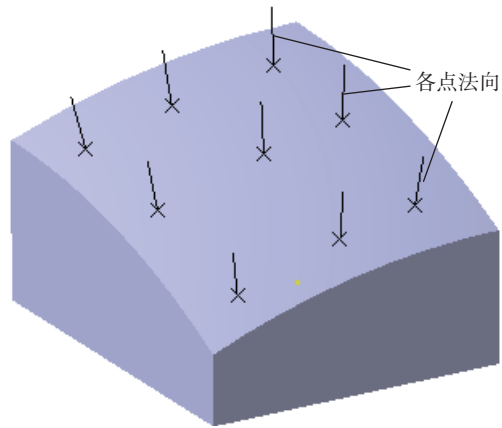


图5 映射关系示意图

Fig.5 Schematic plot of mapping relation

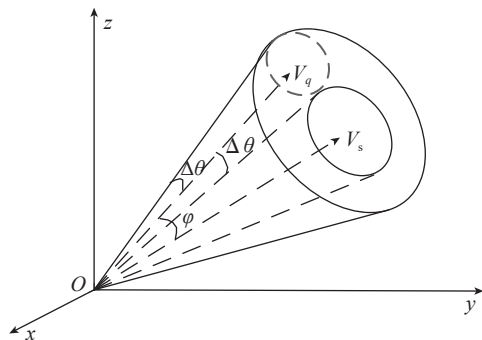


图6 搜索示意图

Fig.6 Schematic plot of searching

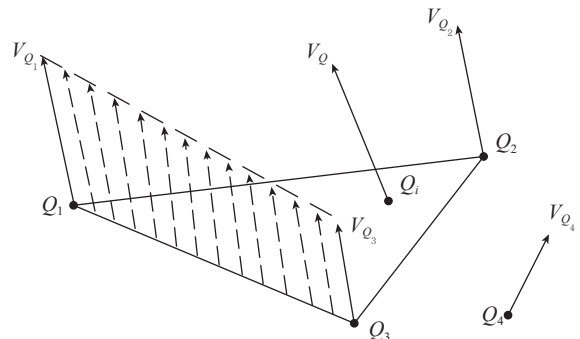


图7 坐标计算模型

Fig.7 Coordinates calculation model

步骤4：索引 [Index1, Index2] 对应的所有向量中，一一计算其与 V_q 的夹角，并利用穷举搜索法查找 Q 点最近的4个点。

步骤5：每3个点构建一个平面，加权计算出 Q 点的坐标。

由以上步骤可知，此算法首先降维至一维空间中确定较小的搜索范围，大大减少了三维空间内的搜索量，从而提高了搜索的效率。通过测量法向与夹角逼近搜索算法实现了实际加载点的坐标获取。

2.3 机器人在线迭代补偿

复杂曲面件的加载点从参考点 O 偏移至曲面件上另一点 Q ，由于其只发生微小偏移，且无角度旋转，则相对机器人的位置误差 $\Delta_{\text{机器人}}^{\text{曲面件}}$ 为向量 \vec{OQ} 在偏移面上的投影。T-Mac 测得机器人的当前位置，与初始位置的偏移量为 $\Delta_{\text{机器人}}$ 。复杂曲面件的位置误差补偿模型如图8所示，具体计算为公式为：

$$\Delta_{\text{曲面件}} = \Delta_{\text{机器人}} + \Delta_{\text{机器人}}^{\text{曲面件}} \quad (11)$$

由于侧向力作用，防护偏离原加载位置，运动至新的平衡点。为了保证复杂曲面件的绝对位置精度，需要重新修正机器人-复杂曲面件的相对位置关系，控制末端执行器沿侧向力的反向平移，产生与原侧向力方向相反的作用力进行补偿。记复杂曲面件的位置误差为 $\Delta_{\text{曲面件}} = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$ ，对机器人工具坐标系进行平移变换，变换公式如下：

$$R = -k(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T \quad (12)$$

比例系数 k 值的范围是 [0.6, 1.2]。粗略补偿时，选取较大的 k 值保证补偿效率；精细补偿时，将 k 值变小，避免出现过度补偿问题。机器人控制末端执行器在基坐标系中平移 $(-k \Delta x \ -k \Delta y \ -k \Delta z)^T$ ，即可修正复杂曲面件位置偏差。但往往经一次补偿后，并不能保证复杂曲面件的位置精度达到要求，此时需要对误差进行迭代补偿，过程如图9所示。通过 T-Mac 等构成的在线检测系统实时监控复杂曲面件位置，重复进行测量-反馈-补

偿的闭环控制过程，直至位置精度达到阈值。

3 试验验证和数据分析

3.1 试验设置

本试验以自行研制的构建的机器人保压控制系统为试验平台，试验平台工作现场如图10所示。测量系统和机器人由主控软件控制。

试验采用 KUKA KR90R3100extra 型号机器人。通过激光跟踪仪对机器人进行标定，标定结果表明机器人单向重复定位精度可达 0.02mm，双向重复定位精度可达 0.128mm。T-Mac 激光测量系统由激光跟踪仪和 T-Mac 组成。T-Mac 采用 Leica MC30-B 型号，位置测量精度为 $(\pm 15+6) \mu\text{m/m}$ ，方向测量精度为 0.01° 。激光位移传感器型号为 HG-C1100，测量精度为 $70 \mu\text{m}$ 。传感器标定后，利用激光跟踪仪对其法向测量结果检测，通过计算法向测量值与理论值的 20 组数据，得到其法向测量精度优于 0.15° 。以六自由度平台为测试件，进行法向分辨率验证，测试结果表明法向分辨率精度可达 0.01° 。

3.2 数据处理及分析

利用上述搭建的系统平台进行复杂曲面件侧移控制试验。首先，用标定后的三激光位移传感器测量加载点的法向。其次，在数据库中搜索到该法向对应的点坐标，计算出复杂曲面件得位置偏移量。共进行多组试验，部分数据如表1所示， V 为加载点法向矢量， P 为加载点坐标， T 为复杂曲面件位置误差， Δ 为综合位置误差。

由试验结果可知，侧向力作用下复杂曲面件的位置误差较大。复杂曲面件的平均误差为 0.983mm，最大误差为 1.031mm。通过控制机器人运动以修正复杂曲面件的位置，本项目中复杂曲面件的位置精度要求为 0.1mm。补偿结果如图11所示。

试验结果可知：经过第1次补偿之后，复杂曲面件的平均位置误差为 0.194mm。复杂曲面件的最大位置误差降低至 0.194mm，减少至原来最大误差的 20.4%。

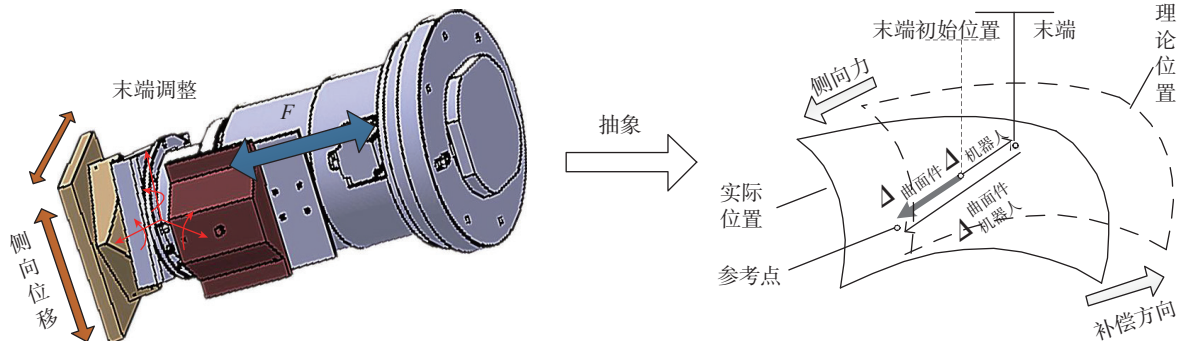


图8 机器人补偿模型

Fig.8 Compensation model of industrial robot

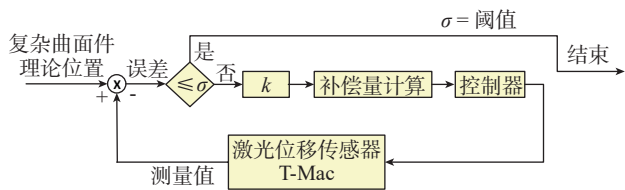


图9 基于在线测量的误差迭代补偿

Fig.9 Iterative compensation based on online measurement

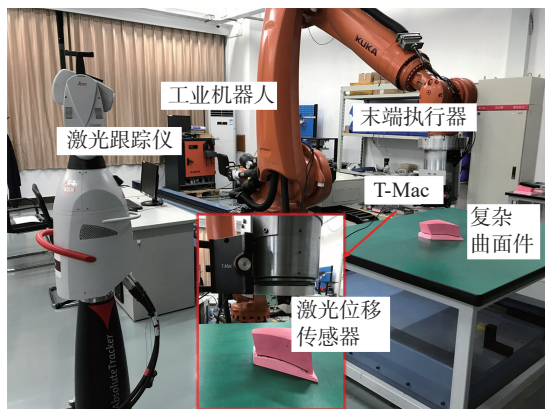


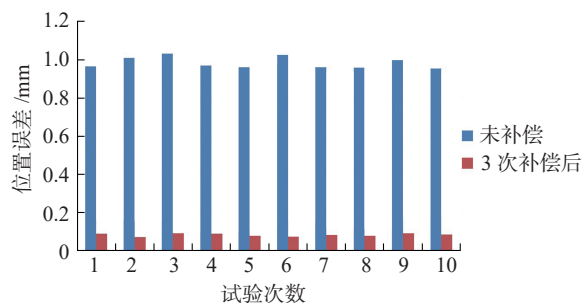
图10 保压系统控制试验现场

Fig.10 Experimental setup of pressure-keeping system

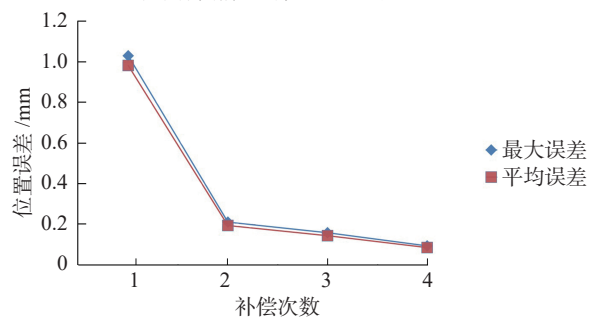
表1 位置误差测量结果

加载点法向矢量 V	加载点坐标 P/mm	复杂曲面件位置误差 $T(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)/mm$	综合位置误差 Δ/mm
(0.215 339,0.220 124,0.951 406)	(61.371,62.735, 71.150)	(-0.643,0.718, 0.026)	0.965
(0.215 089,0.220 104,0.951 468)	(61.300,62.729, 71.168)	(-0.071,0.712, 0.0297)	1.010
(0.214 846,0.219 929,0.951 563)	(61.230,62.682, 71.198)	(-0.786,0.665, 0.033)	1.031
(0.215 042,0.219 842,0.951 539)	(61.286,62.655, 71.188)	(-0.729,0.638, 0.030)	0.970
(0.215 164,0.219 933,0.951 49)	(61.322,62.680, 71.164)	(-0.692,0.663, 0.028)	0.960
(0.214 99,0.220 075,0.951 497)	(61.272,62.721, 71.176)	(-0.743,0.704, 0.0309)	1.025
(0.215 435,0.215 435,0.951 564)	(61.399,62.755, 71.110)	(-0.613,0.738, 0.025)	0.961
(0.215 022,0.219 753,0.951 564)	(61.281,62.629, 71.195)	(-0.735,0.612, 0.031)	0.958
(0.214 814,0.219 712,0.951 621)	(61.222,62.617, 71.211)	(-0.795,0.600, 0.033)	0.997
(0.215 109,0.219 839,0.951 525)	(61.306,62.654, 71.184)	(-0.710,0.637, 0.029)	0.955

经过第2次补偿后,复杂曲面件的平均位置误差为0.143mm,复杂曲面件的最大误差降低至0.159mm。经过第3次补偿后,复杂曲面件的平均误差为0.085mm,



(a) 补偿前后的位置误差对比



(b) 迭代补偿过程中的位置误差

图11 复杂曲面件位置误差补偿结果

Fig.11 Position errors of complex curved surface structure after compensation

减少为原来评平均误差的8.5%。复杂曲面件的最大误差降低至0.092mm,减少至原来最大误差的9.0%。

因此,第1次误差补偿之后即能补偿大部分的位置误差,当第3次补偿完成时复杂曲面件的位置误差达到很高的位置精度。平均3次迭代即可达到精度要求。

4 结论

针对复杂曲面件在保压过程中存在位置侧移的问题,构建高精度在线测量技术和工业机器人技术相结合的复杂曲面件保压控制系统,控制复杂曲面件达到期望的位置精度。

提出一种实时测量复杂曲面件位置的方法,该方法通过监控加载点的位置解算得到复杂曲面件的实际位置。

提出一种基于工业机器人的复杂曲面件位置补偿方法。多组试验结果表明:复杂曲面件位置误差在经过3次补偿后减少至0.1mm内。

参考文献

[1] 张新建,吴宏亮,陈洁,等.民用飞机胶接技术应用分析[J].航空制造技术,2014,57(17):46-49.

ZHANG Xinjian, WU Hongliang, CHEN Jie, et al. Application analysis of bonding technology for civil aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 46-49.

[2] 李春威.复合材料胶接技术的发展与应用[J].航空制造技术(下转第91页)

ball[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(5): 92-94.

[2] 尚建勤, 曾元松. 喷丸成形技术及未来发展与思考[J]. 航空制造技术, 2010, 53(16): 26-29.

SHANG Jianqin, ZENG Yuansong. Shot forming technology and its development trend and thinking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(16): 26-29.

[3] 陈金平, 党建卫. 大型双曲率高筋整体壁板展开关键问题分析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(1): 64-65.

CHEN Jinping, DANG Jianwei. Analysis of key problems during spread-modeling on large dual-curvature integral panel with high ribs[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(1): 64-65.

[4] 王永军, 陈龙辉, 乔明杰. 大型客机机翼壁板喷丸成形延展问题研究与分析[J]. 航空制造技术, 2012, 55(17): 32-35.

WANG Yongjun, CHEN Longhui, QIAO Mingjie. Study on elongation after shot-peen forming for wing skin panel of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(17): 32-35.

[5] 彭艳敏, 陈金平, 杨亮. 大型飞机整体壁板喷丸成形延展变形分析[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 97-105.

PENG Yanmin, CHEN Jinping, YANG Liang. Study on elongation after shot peen forming for integral panel of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 97-105.

[6] 王关峰. 机翼整体壁板坯快速建模与喷丸路径规划技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

WANG Guanfeng. Research on rapid modeling and shot path planning of wing integral panel[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2006.

[7] 李雁淮, 王飞, 吕坚, 等. 单丸粒喷丸模型和多丸粒喷丸模型的有限元模拟[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 348-352.

LI Yanhuai, WANG Fei, LÜ Jian, et al. Finite element analysis for shot-peening models of single shot impact and multiple impingement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 348-352.

[8] 胡凯征, 吴建军, 王涛, 等. 基于温度场的喷丸成形数值模拟及参数优化[J]. 中国机械工程, 2005, 18(3): 292-295.

HU Kaizheng, WU Jianjun, WANG Tao, et al. Numerical simulation and parameter optimization for shot peen forming process based on temperature gradient[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 18(3): 292-295.

[9] 尚建勤. 厚度对喷丸成形的影响[J]. 锻压技术, 1999(3): 38-40.

SHANG Jianqin. Effect of thickness on shot forming[J]. Forging and Stamping Technology, 1999(3): 38-40.

[10] GARIÉPY A, LAROSE S, PERRON C, et al. Shot peening and peen forming finite element modelling—Towards a quantitative method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(20): 2859-2877.

[11] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 119-134.

[12] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 31: 179-191.

[13] XIAO X D, WANG Y J, ZHANG W. Numerical research on stress peen forming with prestressed regular model[J]. Journal of

Materials Processing Technology, 2016, 229: 501-513.

通讯作者: 赵勇, 博士、副教授, 研究方向为精密先进材料加工技术自动化装备及喷丸加工, E-mail: zhao_yong@jlu.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第 85 页)

术, 2011, 54(20): 88-91.

LI Chunwei. Development and application of composites adhesive bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(20): 88-91.

[3] LARSSON S, KJELLANDER J A P. Motion control and data capturing for laser scanning with an industrial robot[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2006, 54(6): 453-460.

[4] 邹方. 飞机装配迎来机器人时代[J]. 航空制造技术, 2009, 52(23/24): 34-37.

ZOU Fang. Robotic era for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(23/24): 34-37.

[5] PARK I W, LEE B J, CHO S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1059-1067.

[6] 金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

JIN Zhangjun. Establishment and optimization of large-volume measuring field in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[7] 曲巍巍, 董辉跃, 柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960.

QU Weiwei, DONG Huiyue, KE Yinglin. Pose accuracy compensation technology in robot-aided aircraft assembly drilling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1951-1960.

[8] ALBIN S. Laser feedback control for robotics in aircraft assembly[D]. Sweden: Linköping University, 2003.

[9] 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.

[10] 公茂震, 袁培江, 王田苗, 等. 航空制孔机器人末端垂直度智能调节方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1400-1404.

GONG Maozhen, YUAN Peijiang, WANG Tianmiao, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1400-1404.

[11] 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(23): 1-4, 8.

YING Gaoming, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Study on normal vector measurement method in auto-drilling & riveting of aircraft panel[J]. Machinetool & Hydraulics, 2010(23): 1-4, 8.

通讯作者: 黄翔, 博士、教授, 研究方向为现代飞机装配技术, E-mail: xhuangnuaa@163.com.

(责编 大漠)