

面向变曲率曲面的自动钻铆垂直精度补偿技术

冯昌源,田威,胡俊山,沈建新,孙新月
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:飞机装配主要以铆接的连接方式来实现,铆接孔的垂直精度直接决定着装配质量与飞机性能的好坏。由于现有的制孔垂直精度补偿方法是针对平面以及定曲率曲面的垂直精度补偿,因而在对变曲率曲面的垂直精度补偿时,所拟合的平面法矢与曲面法矢不重合,使得所制孔的垂直精度误差远达不到工艺要求。针对此问题,提出了一种面向变曲率曲面的垂直精度补偿方法,该方法利用离线仿真环境的精确性,仿真预测出以拟合平面法矢替代曲面法矢而引入的固有理论误差,并针对该误差进行调姿补偿,实现了对变曲率曲面制孔的垂直精度补偿。实验结果表明:该方法可将制孔垂直精度控制在 0.4° 以内,大幅度提高了变曲率曲面制孔的垂直精度。

关键词:法向精度补偿;理论误差;离线预测;自动钻铆

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0033-03

Automatic Precision Riveting Vertical Accuracy Compensation Technology for Variable Curvature Surface

FENG Changyuan, TIAN Wei, HU Junshan, SHEN Jianxin, SUN Xinyue

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

Abstract: Aircraft assembly is mainly realized by riveting connection. The vertical accuracy of riveting hole directly determines the assembly quality and aircraft performance. As the existing vertical accuracy compensation methods of hole making is mainly aimed at the vertical accuracy compensation of plane and constant curvature surface, and in the progress of the vertical accuracy compensation of variable curvature surface, the plane normal vector fitted by the existing methods does not coincide with the surface normal vector, which may result in the failure of meeting the technological requirements by vertical accuracy error of hole making. As to this problem, a direct precision compensation method for variable curvature surface is proposed. The method makes the best of the accuracy of off-line simulation environment to predict the inherent theoretical error caused by replacing the surface normal vector with the fitting plane normal vector, and conducts the attitude adjustment compensation for the error, which realizes the vertical accuracy compensation for the hole making of the variable curvature surface. The experiment results show that the method can control the vertical precision of the hole within 0.4° , leading to the remarkable improvement of the vertical precision of the hole making surface with variable curvature.

Keywords: normal accuracy compensation; theoretical error; offline forecasting; automatic drilling

0 引言

在飞机装配的制孔过程中,铆接孔垂直精度的保证一直是航空制造业所研究的重点^[1-3]。研究表明,如果铆接孔垂直精度达不到要求,连接件将发生倾斜,进而产生弯曲应力,降低结构强度^[4]。当紧固件沿外载荷作用方向倾斜角度 $>2^\circ$ 时,疲劳寿命降低约47%,当倾斜角度 $>5^\circ$ 时,疲劳寿命降低95%^[2]。因此,为了保证制孔的垂直精度,机器人自动钻铆系统需采用垂直精度补偿技术来保证刀具轴线与工件表面的垂直精度。

目前,制孔垂直精度补偿技术已取得了一定进展,尤

其是对于平面以及定曲率曲面的垂直精度补偿技术已经可以满足航空航天产品装配的工艺要求^[3]。在现有方法中,制孔垂直精度补偿技术按照测量方式可分为机械接触式、涡流式、激光非接触式和视觉非接触式。机械接触式一般采用接触直线位移传感器进行表面测量,测量精度高,预算成本低,对平面法向的测量有较好效果;涡流式采用涡流传感器进行测量,可对金属工件表面进行测量,通过涡流强度的变化信号来获取距离信息,从而计算待测面法向^[5];激光非接触式采用激光位移传感器进行非接触式测量,其测量精度高,与工件表面无直接接触,安全性高^[6-9];视觉非接触式由于拍摄角度、环境光线、处理算法等因素影响,难以在复杂的作业环境下保证垂直精度

基金项目:国家自然科学基金项目(51875287);国防基础科研计划项目(JCK2018605C002);国家重点研发计划项目(2018YFB1306800)

第一作者简介:冯昌源(1993—),男,黑龙江富锦人,硕士研究生,研究方向为机器人自动钻铆离线优化。

要求^[10-12]。

上述方法在对平面和定曲率曲面的测量时,均能获得精度较高的法向测量结果。但对于变曲率曲面的法向测量时,由于所测法向与实际法向不重合,很难达到铆接孔的垂直度工艺要求。针对此问题,在激光非接触式法向测量技术的基础上提出了一种基于离线仿真预测的垂直精度补偿方法。该方法通过离线仿真环境对垂直精度补偿过程进行仿真模拟,预测出由于拟合平面法矢代替曲面法矢所引入的固有理论误差,并将其补偿到末端执行器的调姿过程中,从而实现对于变曲率曲面制孔的垂直精度补偿。

1 垂直精度补偿原理

本文所提出的变曲率曲面垂直精度补偿方法是在激光非接触式测量方法的基础上引入了离线仿真预测环节,通过对激光非接触式法向测量存在的固有理论误差进行仿真预测,并将预测值补偿到末端调姿过程中,极大地减小了固有理论误差对垂直精度补偿的影响。其工作流程如图1所示。

首先构建离线仿真环境,对非接触式垂直精度补偿过程进行仿真,并预测出固有理论误差;其次,将固有理论误差以及点位信息输入至机器人控制系统,待机器人末端执行器移至待测点位时,执行激光非接触式法向精度补偿流程,直到前一次测得法向与本次测得法向之间的夹角 $<0.5^\circ$,激光非接触式法向精度补偿过程结束;最后执行固有理论误差补偿流程,根据预测出的固有理论误差进行末端执行器自动调姿,直到垂直精度补偿过程结束。

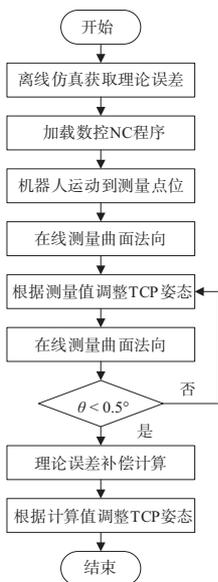


图1 垂直精度补偿流程

2 激光非接触式法向测量的理论误差分析

激光非接触式法向测量方法对变曲率曲面测量误差较大的主要原因是存在较大的固有理论误差。图2为激

光非接触式法向测量方法对变曲率曲面产品进行垂直精度补偿时的原理示意图。首先通过4个激光位移传感器获得曲面表面上4个投影点的位置信息,并通过最小二乘法^[9]进行平面拟合,然后以拟合平面法矢作为曲面待测孔位法矢进行新的制孔姿态求解。由于曲面曲率的变化,表面上的4个投影点相对于待测孔中心O呈空间非对称状态。因此,4个投影点所拟合的平面法向与理论法向之间必然不重合,存在方法上的固有理论误差偏角,其误差大小与曲面曲率的突变程度有关。

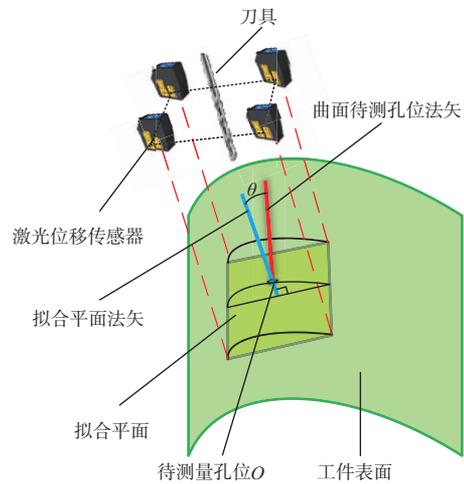


图2 理论误差分析

3 固有理论误差仿真预测方法

为了获取固有理论误差,在仿真环境中对激光非接触式法向精度补偿过程进行仿真预测。在仿真环境中的固有理论误差体现为工具坐标系x轴与待测点位法向的偏角,并以此偏角作为预测值。

3.1 仿真环境的构建

构建非接触式垂直精度补偿的离线仿真环境需获取4个激光位移传感器的安装位姿。通过平面标定法分别对4个激光位移传感器进行位姿标定^[7],按照标定数据在工具坐标系下建立激光位移传感器的位姿,并导入变曲率曲面产品数模,完成离线预测仿真环境的建立,如图3所示。

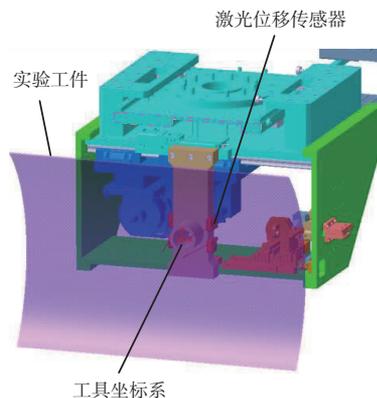


图3 仿真预测环境

3.2 制孔垂直度补偿过程仿真

在构建的仿真环境中,对激光非接触式法向测量方法进行仿真:投影点获取—最小二乘法拟合平面—获取法向—姿态调整。

仿真完成后,工具坐标系 x 轴将与 4 个投影点所拟合平面法向重合,此时曲面待加工点处的理论法向与工具坐标系的姿态关系如图 4 所示: $T-xyz$ 为工具坐标系; RT 为坐标平面 xTy 与坐标平面 xTz 的交线; TF 为工件表面的理论法向量; θ 为 TF 与工具坐标系 x 轴夹角,即为理论偏角; TN 为 TF 在坐标平面 xTy 上的投影向量; TM 为 TF 在坐标平面 xTz 上的投影向量; θ_1 为 TF 与向量 TN 的夹角; θ_2 为向量 TN 与工具坐标系 x 轴的夹角。固有理论误差可用理论偏角 θ 来表示。考虑到实际作业中机器人末端执行器的调姿计算,此处采用 θ_1 与 θ_2 来表示理论误差。 θ_1 与 θ_2 的推导过程如下:

θ_1 可表示为

$$\theta_1 = \arcsin \frac{TF \cdot m}{|TF| |m|} \quad (1)$$

其中 m 为坐标平面 xTy 的法向量,即 $k = \frac{m}{|m|}$ 。因此有

$$\theta_1 = \arcsin \frac{TF}{|TF|} \cdot k \quad (2)$$

投影向量 TN 可表示为

$$TN = TF \cos \theta_1 \quad (3)$$

θ_2 可表示为

$$\cos \theta_2 = \frac{TN}{|TN|} \cdot \tau \quad (4)$$

由式(2)、式(3)、式(4)可得:

$$\theta_2 = \arccos \left[\frac{TF \cdot \tau}{|TF| \cos \left(\arcsin \frac{TF}{|TF|} \cdot k \right)} \right] \quad (5)$$

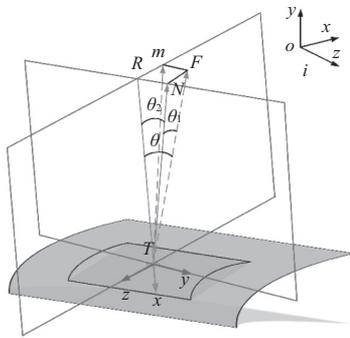


图 4 工具坐标系姿态与理论法向关系

4 固有理论误差补偿方法

固有理论误差补偿即在激光非接触式垂直精度补偿后,将离线环境获取的误差补偿值 θ_1 与 θ_2 补偿至末端执行器的法向调姿过程中。在垂直精度补偿过程中,非接触式法向精度补偿使工具坐标系 x 轴与拟合平面法向重合,此时工具坐标系姿态与理论法向量 TF 之间的关系如图 4 所示。机器人控制系统根据 θ_1 与 θ_2 对工具坐标系进行 2

次旋转调姿,使其 x 轴与理论法向量重合,调姿方法如下:

设当前工具坐标系的姿态为 (x, y, z, A, B, C) , 由欧拉角变换序列表示当前姿态为:

$$E_{uler}(A, B, C) = R_{ot}(z, C) R_{ot}(y, B) R_{ot}(x, A) \quad (6)$$

$$R_{ot}(x, A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cA & -sA \\ 0 & sA & cA \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_{ot}(y, B) = \begin{bmatrix} cB & 0 & sB \\ 0 & 1 & 0 \\ -sB & 0 & cB \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_{ot}(z, C) = \begin{bmatrix} cC & -sC & 0 \\ sC & cC & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: s 表示正弦; c 表示余弦。

保持工具坐标系的当前位置不变,调整工具坐标系的姿态。根据所得的理论误差 θ_1 与 θ_2 ,当前工具坐标系姿态先绕 z 轴旋转角 θ_2 ,再绕 y 轴旋转角 θ_1 (绕当前坐标系旋转),旋转矩阵如下:

$$R_{ot}(z, \theta_2) R_{ot}(y, \theta_1) = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_1 & 0 & c\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 c\theta_1 & -s\theta_2 & c\theta_2 s\theta_1 \\ s\theta_2 c\theta_1 & c\theta_2 & s\theta_2 s\theta_1 \\ -s\theta_1 & 0 & c\theta_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合式(6)与式(10),经两次旋转后最终加工姿态可表示为

$$E_{uler}(A, B, C) R_{ot}(z, \theta_2) R_{ot}(y, \theta_1) \quad (11)$$

末端执行器根据上述调姿过程,消除了固有理论误差,将刀具轴线从原来的与拟合法矢重合调整为与待测孔位法矢重合。

5 实验研究

实验以 API-T3 激光跟踪仪为测量仪器,以变曲率曲面为实验对象,以基于激光非接触式垂直精度补偿技术的机器人自动钻铆系统为实验平台,如图 5 所示。

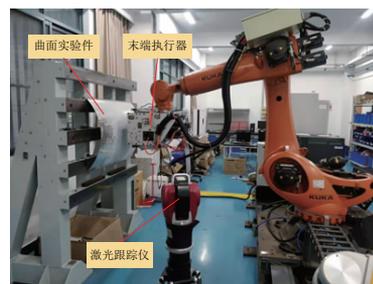


图 5 实验平台

根据前文提出的方法构建离线仿真环境,导入如图 3 所示实验工件三维数模。根据理论误差预测方法获取理论误差,并结合离线编程系统生成 NC 代码,输入至机器

(下转第 44 页)

- [3] 任建华,朱增伟,沈春健,等. 阳极偏置法摩擦辅助硫酸盐电铸铜[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1736-1742.
- [4] TAJIRI K, NAKAMURA T, KABEYA Z, et al. Development of an electroformed copper lining for accelerator components [J]. Electrochimica Acta, 2001, 47(1/2): 143-148.
- [5] 冯辉,张勇,张林森,等. 电镀理论与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [6] 陈亚. 现代实用电镀技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [7] 赵剑峰,朱获. 脉冲电流电铸技术的实验研究[J]. 航空工艺技术, 1996(5): 5-7.
- [8] 赵阳培,葛世荣,张君伟,等. 射流电铸快速成型纳米晶铜的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(1): 37-39.
- [9] 任建华,朱增伟,朱获. 过程参数对悬浮微珠摩擦辅助脉冲电铸铜表面形貌的影响[J]. 电加工与模具, 2016(6): 63-66.
- [10] 何桂军. 射流电铸技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [11] 李获. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [12] 卢柯,刘学东. 纳米晶体材料的 Hall—Petch 关系[J]. 材料研究学报, 1994, 8(5): 385-391.

收稿日期:2019-12-19

(上接第 35 页)

人控制系统。将实验件固定在工装上,并利用激光跟踪仪标定出机器人基坐标系与工件坐标系的相对位置关系,保证机器人末端可正确执行离线 NC 代码。具体实验步骤如下:

- 1) 利用激光跟踪仪采用微元法测量曲面待测点位处的法矢;
- 2) 使末端执行器运动到待测点位,执行激光非接触式垂直精度补偿程序进行垂直精度补偿。
- 3) 经激光非接触式垂直精度补偿后,测量末端执行器的主轴轴向法矢。
- 4) 执行固有理论误差补偿程序进行理论误差补偿。
- 5) 测量末端执行器上主轴轴向法矢。

分别测得理论误差补偿前后的垂直度误差,实验数据如表 1 所示。

表 1 实验数据 单位:(°)

序号	补偿前误差	补偿后误差
1	0.782 3	0.368
2	1.183 0	0.207
3	0.711 0	0.303
4	0.455 0	0.225
5	1.066 0	0.349
6	0.650 0	0.326
平均值	0.078 83	0.296 333

6 结语

现有的垂直精度补偿方法在对变曲率曲面进行垂直精度补偿时,由于以拟合平面法矢与实际曲面法矢不重合,进而无法保证制孔垂直精度。针对此问题,本文提出了一种面向变曲率曲面法向精度补偿方法。该方法通过

离线仿真环境预测出由平面代替曲面法矢而引入的固有理论误差,并针对该误差进行补偿调姿,实现了对变曲率曲面垂直精度补偿。实验结果表明:采用该方法对变曲率曲面进行垂直精度补偿时,可将垂直度误差控制在 0.4° 范围内,满足航空制造业对垂直精度的工艺要求。

参考文献:

- [1] 赵建国,郭洪杰,王丽秀,等. 飞机数字化柔性精准装配技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 32-35.
- [2] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005, 48(6): 50-52.
- [3] 曲巍岚,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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李冬冬,王永强,许增朴,等. 激光三角法在物面倾斜时的测量误差研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 28-29, 36.
- [7] 张为民. 基于视觉信息处理的飞行器型面法向矢量的在线测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 43-46, 87.
- [8] 曲绍君,邹方. 一种新型飞机曲面壁板自动制孔法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 134-137.
- [9] 雷斯聪,袁定新,朱忠良,等. 运载火箭蒙皮自动钻铆法向测量试验研究[J]. 航天制造技术, 2018(2): 36-39.
- [10] 段曙凯. 飞机蒙皮法矢的视觉检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] 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.
- [12] 徐源,沈建新. 机翼调姿对接运动仿真技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 110-113.

收稿日期:2019-11-12