

基于末端定位的制孔系统工件坐标系标定研究

Research on Work Piece Frame Calibration of Drilling System Based on Positioning Function of End-Effector

中航工业北京航空制造工程研究所
数字化技术航空科技重点实验室

黄澄 张书生 李光丽

[摘要] 自动制孔设备进行自动制孔之前,需要对待加工零部件与设备坐标系进行标定。传统的标定方法以工装为中心,应用激光跟踪仪统一对设备、工装和工件进行测量,过程繁琐、生产准备时间长。针对这一问题提出了一种利用自动制孔末端的孔定位功能和设备坐标系下可知的刀尖点坐标的标定方法,并对该方法的关键技术进行了详细研究。

关键词: 自动制孔系统 末端定位 坐标系标定

[ABSTRACT] Frame calibration process is inevitable before an auto drilling system works. Traditional method centres on fixtures. Equipment, fixture and work piece are calibrated uniformly with laser tracker, which results in cumbersome procedures and long lead time. To solve this problem, a method based on positioning function of the end effector and coordinates obtainable tool tip is proposed, and key technologies are discussed in detail.

Keywords: Auto drilling system End effector Coordinates calibration

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.21.142

飞行器制造装配过程中通常需要制造大量连接孔,连接孔的制孔质量和制孔效率直接影响着整机的制造质量和生产周期^[1-2]。为了满足飞行器高质量、高效制造的需求,应用自动化的制孔设备来代替传统人工制孔已成为现代飞行器制造的必然趋势。自动制孔设备通常由多功能自动制孔末端和移动定位机构组成,通过移动定位机构改变制孔末端和飞机待加工零部件的相对位姿,实现连接孔的批量自动制造。

对于大尺寸待加工对象,通常将其固定在特定的工装之上,然后采用五坐标移动机构或者六轴串联工业机器人携带自动制孔末端,根据离线编程程序依次运动到制孔点位完成制孔循环^[3]。为了确定制孔位置、保证自动制孔的孔位精度,在制孔之前首先标定零部件和自动制孔设备的坐标系相对关系,使基准点实际测量数据与理论数字化模型保持一致。由于激光跟踪测量系统具有测量精度高、测量尺寸大等优点,在飞机装配中应用

广泛,目前,常采用激光跟踪仪实现这一标定过程^[4-5]。然而现在的标定方法需要统一标定制孔设备与工装的坐标系,并严格保证工件与工装的相对位姿关系,每次新零件上架都要重新标定,激光跟踪仪作为独立于制孔设备之外的测量系统,需要额外的人员配合操作,费时费力,生产准备时间占比大,制约了生产效率的提升。

为了缩短自动制孔设备的生产准备时间,提高生产效率,本文基于一自研的五坐标自动制孔设备,提出了一种快速确定大型零部件与自动制孔设备相对坐标系关系的方法,利用多功能制孔末端具有的孔定位功能和制孔设备坐标系下可知的刀尖点坐标,通过人机协同的方式完成,能有效地缩短生产准备时间,提高生产效率。

下文将首先简要描述自研的五坐标自动制孔设备和常用的基于激光跟踪仪的坐标系统一方法;然后对所提出的基于末端定位的工件坐标系标定方法做具体介绍,给出操作方法;最后对该方法的两个关键技术进行详细讨论。

1 五坐标自动制孔设备与自动制孔系统坐标系标定

1.1 五坐标自动制孔设备总体结构

针对飞机翼面类部件设计的五坐标自动制孔设备主要由五坐标移动定位机构和多功能制孔末端构成,设备三维模型图如图1所示。五坐标移动定位机构包括相互正交的 X 、 Y 、 Z 三坐标平移机构和 C 、 A 双摆角机构,可分别实现沿三坐标的平移和绕 C 轴、 A 轴的转动。五坐标移动定位机构以西门子840D数控系统为控制核心,能实现精确定位控制和五轴联动等功能。

多功能制孔末端上集成了制孔电主轴、进给伺服机构、压脚机构、激光测距传感器和工业测量相机等单元,能完成曲面法向测量、孔位偏差照相测量、蒙皮压紧和制孔等一系列制孔功能。

1.2 基于激光跟踪仪的坐标系标定方法

自动制孔系统需要根据数字化模型,由离线编程软件生成自动制孔程序。基于激光跟踪仪的坐标系标定方法的基本思路是分别测量制孔设备、工装和工件的实

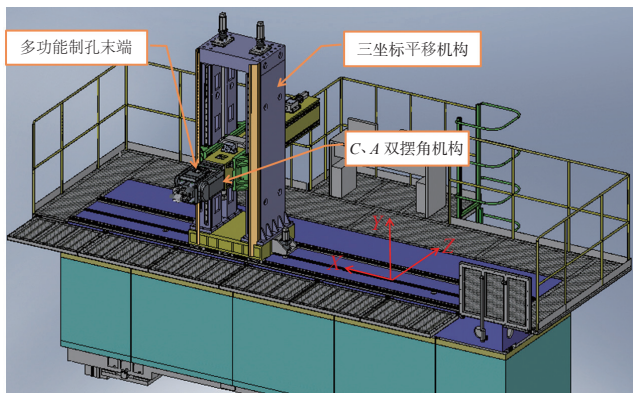


图1 五坐标自动制孔设备三维模型

Fig.1 3D model of the five-axes automatic drilling equipment

际坐标系,然后统一实际测量值与理论数模。具体实施步骤如图2所示,首先在适当位置放置激光跟踪仪建立坐标系;然后在同一坐标系统下标定制孔设备的 X 、 Y 、 Z 三条轴线和刀尖点坐标,同时标定工装各基准点坐标,并严格按照理论数模进行工件上架,保证其各基准点与工装相对关系;最后根据这些实测数据拟合得到制孔设备和工装的实际坐标系及原点,修正理论数模。

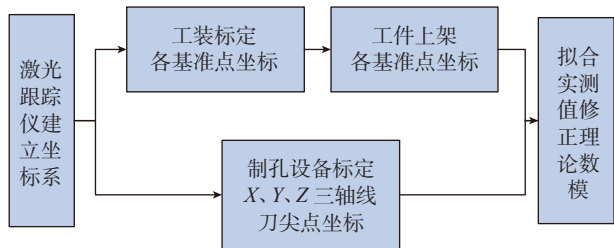


图2 基于激光跟踪仪的制孔系统坐标系标定流程

Fig.2 Coordinates calibration procedure of drilling system based on laser tracker

1.3 基于末端定位的工件相对坐标系标定方法

基于激光跟踪仪的坐标系标定过程事实上是以工装为中心的标定过程,一方面工件通过工装确定位姿,另一方面制孔设备通过确定与工装的相对位姿进而确定与工件的相对位姿。如果能绕过工装直接标定工件与制孔设备的相对位姿关系,去除中间环节,无疑将提高标定的效率。

多功能制孔末端具有激光测距和照相测量功能,其本身能在一定范围内进行精确的孔定位,而且多功能制孔末端刀尖点在设备坐标系下的坐标是可知的,因此可以利用多功能制孔末端的孔定位功能,通过刀尖点直接确定工件基准孔的位置,获得工件基准孔在设备坐标系下的坐标,进而拟合出工件在设备坐标系下的位姿,完成两者坐标关系的标定。基于末端定位的工件相对位姿标定流程如图3所示。该过程以制孔设备为中心,充分利用设备功能直接标定工件在设备坐标系下的位姿,

简化了标定过程,能有效缩短生产准备时间。

基于刀尖点的工件相对位姿标定包括基准孔坐标确定和工件坐标系拟合两个关键技术,下面将分别进行

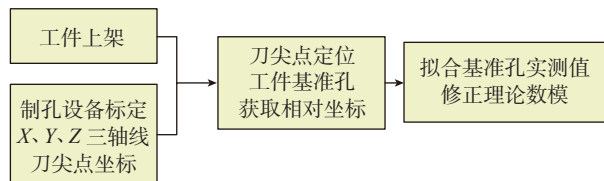


图3 基于末端定位的工件相对坐标系标定流程

Fig.3 Relative frame coordinates calibration procedure of work piece based on positioning of end effector

具体描述。

2 基于末端定位的基准孔坐标确定

为确定工件基准孔在制孔设备坐标系下的坐标,首先运用孔定位相关功能定位基准孔,然后根据设备结构参数即可计算出基准孔坐标。

2.1 基准孔定位

多功能制孔末端具有激光测距和照相测量功能。激光测距功能由安装在压脚头上的4个激光测距传感器实现,根据其测量值可计算出工件曲面的法向量^[6]和压脚端面中心到工件表面的距离。照相测量功能采用高分辨率工业相机,能测量切平面上孔中心相对于刀具中心的两坐标偏差。运用以上两项功能,制孔设备能在特定范围内实现孔定位。因此,先通过人工操作将制孔设备刀尖移动到工件基准孔附近区域,再执行相关功能即可定位基准孔。

基于该思路,编写了专用的基准孔定位程序,定位过程由人机协同完成,具体流程如图4所示。首先通过人工操作,或者运行离线点位辅以人工操作修正,将制孔设备刀尖点移动到工件基准孔附近,然后自动进行激光测距、法向调整和照相测量等程序,完成刀具法向、刀尖距离和刀具中心的调整,正确定位基准孔后自动记录设备各轴坐标,此过程中若基准孔超出设备定位范围,程序将自动暂停等待人工干预并确认,如此循环,直到定位所有待测基准孔。

2.2 基准孔坐标计算

通过刀尖点定位基准孔,根据每个基准孔处记录的制孔设备各轴坐标值,结合设备结构参数,即可通过刀尖点坐标计算出基准孔在设备坐标系下的坐标值。本文中的五坐标自动制孔设备定义的直角坐标系 X 、 Y 、 Z 轴分别与实际 X 、 Y 、 Z 轴平行,坐标系原点则定义为三轴在零位时的刀尖点位置。因此刀尖点实际坐标由 X 、 Y 、 Z 三轴的平移值和 C 、 A 摆角所产生偏移值两部分构成。

C 、 A 摆角轴线分别平行与 Z 、 X 两轴,设两摆角角

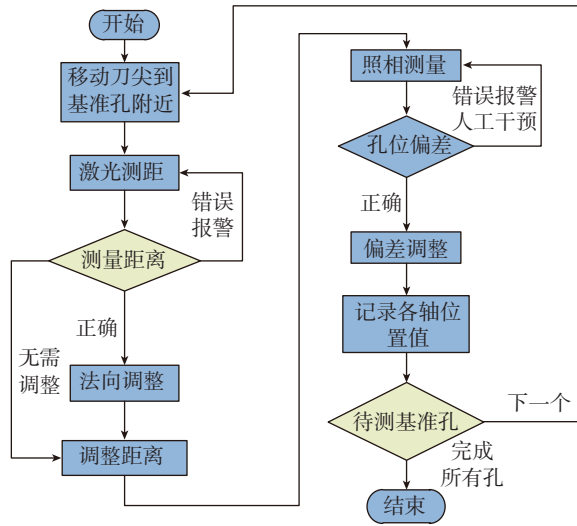


图4 基于末端定位的基准孔定位流程

Fig.4 Basic hole positioning procedure based on positioning of end effector

度分别为 σ 和 β , 则 C 、 A 摆角产生的相对于设备坐标系定系的旋转矩阵 R_z 、 R_x 分别为:

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$$

可求得 C 、 A 摆角所产生的坐标偏移值 ΔB 为:

$$\Delta B = (l_A + d)(z_0 - R_z R_x z_0) = (l_A + d) \begin{pmatrix} -\sin \beta \sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta & 1 - \cos \beta \end{pmatrix}^T, \quad (2)$$

式中: l_A 表示设备 A 摆半径; d 表示压脚端面到工件表面距离; $z_0 = [0, 0, -1]^T$, 代表 C 、 A 摆角均为零度时的刀具矢量。结合 X 、 Y 、 Z 三轴的平移值 $B = [x_b, y_b, z_b]^T$, 即可得基准孔的相对坐标 P_r :

$$P_r = \begin{pmatrix} x_r & y_r & z_r \end{pmatrix} = B + \Delta B = \begin{pmatrix} x_b - (l_A + d) \sin \beta \sin \alpha \\ y_b + (l_A + d) \cos \alpha \sin \beta \\ z_b + (l_A + d)(1 - \cos \beta) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

将基准孔定位程序所记录的各个点处的各轴坐标代入式(3), 即可得设备坐标系下的实测工件序列基准孔坐标值 $P_m, n=(1, 2, 3 \dots, n)$ 。

3 工件坐标系拟合

根据实测的工件基准孔相对坐标值, 可以通过最小二乘拟合算法^[7]对模型空间位姿进行修正, 为离线编程提供准确模型。

设修正前三维模型中, 工件基准孔序列在制孔设备坐标系下的理论齐次坐标值为 $P_m = [x_m, y_m, z_m, 1]^T, n=(1, 2,$

$3 \dots)$, 这些理论齐次坐标点可以通过某个齐次坐标变换矩阵 T_i^s 转换至空间中一系列新的点 $P_{sn} = [x_{sn}, y_{sn}, z_{sn}, 1]^T$, 用于拟合基准孔实测齐次坐标点, 即:

$$P_{sn} = T_i^s P_m, \quad (4)$$

其中, 齐次坐标变换矩阵 T_i^s 由直角坐标系下的平移向量 P 和旋转矩阵 R 共同表示, 即:

$$T_i^s = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, P 和 R 可由 12 个未知参数分别表示为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, P = [x_p, y_p, z_p]^T, \quad (6)$$

则拟合后对应点的位置误差 e_n 为:

$$e_n = P_{sn} - P_m = T_i^s P_m - P_m, \quad (7)$$

将每组对应点的坐标代入式(7), 得到由变换矩阵 T_i^s 的 12 个未知参数组成的 3 个线性方程, 当测量的基准孔数量大于等于 4 时, 即可由最小二乘法求解 T_i^s , 所求得解将使得拟合后的对应基准孔距离的均方差最小。

4 结论

现代飞机装配中, 自动制孔必不可少。要实现自动制孔就需要确定待加工零部件与制孔设备的坐标系关系。本文详细论述了基于多功能制孔末端所具有的孔定位功能进行工件相对坐标系标定的方法, 相对于传统依靠激光跟踪仪、以工装为中心的标定方法, 所提出的方法简化了标定过程, 能有效提高生产准备效率。本文论述的标定方法也适用于包括基于工业机器人的各种移动式制孔设备。

参考文献

- [1] 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. 航空制造技术, 2010(2):47-50.
- [2] 周万勇, 邹方, 薛贵军, 等. 飞机翼面类部件柔性装配五坐标自动制孔设备的研制. 航空制造技术, 2010(2):44-46.
- [3] EICKHORST D. Solution for automated frame drilling and fastening system using an 840D controlled standard robot. SAE International, 2011:2535.
- [4] 陈智勇, 吴建军, 赵玉静, 等. 激光跟踪测量系统在飞机型面测量中的应用. 机械设计与制造, 2009, 12: 68-70.
- [5] 王丽秀. 飞机柔性装配制孔设备的工件坐标系建立方法. 机械设计与制造, 2012, 4: 229-231.
- [6] MAOZHEN G, PEIJIANG Y, TIANMIAO W, et al. A novel method of surface-normal measurement in robotic drilling for aircraft fuselage using three laser range sensors, in The 2012 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, Taiwan, 2012.
- [7] 吕鹏, 孟正大. 弧焊机器人离线编程的实用化技术. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, S1:273-276. (责编 春早)