

基于线激光在机测量的一面两孔特征寻位方法

周晏锋, 陈蔚芳*, 曹新航, 潘立剑

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210001

摘要 针对生产现场中工件精确测量和寻位问题, 基于计算机数字控制机床(CNC)平台和线激光搭建了一套在机测量系统, 并对工件一面两孔特征的快速寻位方法进行研究。利用球面的各向同性, 通过标准球实现线激光在机测量系统的全局标定。将平面和孔作为找正特征, 基于线激光传感器获取的测量数据, 设计拟合算法并对相关特征的尺寸位置信息进行计算, 最后利用试验件进行快速寻位实验。实验结果表明, 该在机测量系统具有较高的精度和稳定性, 能够满足生产加工中的工件寻位找正要求。

关键词 测量; 线激光传感器; 一面两孔; 快速寻位; 在机测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0112004

One-Plane Two-Hole Feature Positioning Method Based on Line Laser On-Machine Measurement

Zhou Yanfeng, Chen Weifang*, Cao Xinhang, Pan Lijian

College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210001, China

Abstract This article focuses on the research of fast-positioning method of one-plane two-hole feature, while aiming at the precise measurement and positioning of workpieces at a production site, and it builds a set of on-machine measurement system based on the computer numerical control (CNC) platform and line laser. Using the isotropy of the spherical surface, global calibration of the line laser on-machine measurement system is achieved through a standard sphere. The plane and holes are used as the positioning features. Based on the measurement data obtained by the line laser sensor, a fitting algorithm is designed and the size and position information of the relevant features are calculated. Finally, a test piece is used for the fast positioning test. The test results exhibit that the on-machine measurement system can meet the requirements of workpiece positioning and alignment in production and processing, and the system also possesses high accuracy and stability.

Key words measurement; line laser sensor; one-plane two-hole; fast positioning; on-machine measurement

OCIS codes 120.6650; 120.4820; 100.6890

1 引言

随着信息化、自动化、数字化先进技术的不断发展, 制造业正面临着前所未有的挑战。在航空、航天、船舶等尖端工业领域中, 复杂结构件尤其是复杂曲面件应用广泛, 如大型舰船螺旋桨、航空发动机叶

片、汽车覆盖件精密模具等^[1]。在计算机数字控制机床(CNC)精加工前, 需要保证工件在数控机床中处于精确位置, 传统方式为人工调整夹具位置, 工装夹具形变、定位误差、人工操作误差等因素会使工件装夹不精确。一些复杂工件的夹具设计要求较高, 制造周期较长, 成本负担较重, 且要实现工件的精确

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-06-06; 录用日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(51775277)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190514)、江苏省重点研发项目(BE2018721)

* E-mail: meewfchen@nuaa.edu.cn

定位往往耗时长,效率低。此外,对于一些大型重型工件,其位置难以微调,要实现在机床上的精确定位十分困难^[2-4]。

因此,实现快速准确的工件找正成为数控加工实现更高效率、更高精度、更高自动化发展的关键。在此背景下,“测量-自动寻位-数控加工”一体化制造模式应运而生^[5-8]。Xiong 等^[9]提出了一种关于工件的空间定位算法,以三轴数控机床为平台,开发了计算机辅助定位系统。莫卫强^[10]通过对工件进行数字图像的采集与处理,获取工件轮廓和特征点在机床坐标系中的三维坐标信息,确定其在机床上的位姿信息,实现了自动寻位找正。

工件的找正特征是指用于确定工件在机床上占据正确位置的特征,可以是工件上的点、线、面等实际轮廓特征,也可以是由相关特征决定的几何中心对称特征,如中心线、中心平面、球心等。面和孔是工件最为常见的特征,本文选取“一面两孔”作为找正特征,以实现自动寻位,其适用于根据面和孔的相对位置关系确定空间位姿的零件。要得到测量信息,需要对相关特征进行测量,而接触式测量设备体积大,与机床之间标定困难,难以测量机床工作台上待测零件的位置,且效率低下,目前主流的测量方式包括视觉测量和线激光测量^[11-14]。解则晓等^[15]通过利用双目视觉系统对薄壁零件的圆孔进行三维重建,获取圆孔的孔径信息和三维坐标。陈瀚等^[16]基于多个线激光传感器,提出了一种基于二维轮廓数据的旋转扫描系统标定方法,实现在线三维测量。

本文基于线激光传感器,搭建基于数控机床平台的工件寻位在机测量系统,通过线激光测量系统全局标定、平面特征和孔特征的拟合,得到相关特征的尺寸位置信息,从而在工件装夹位置不精确的情况下,实现工件的快速寻位。

2 在机测量系统

2.1 线激光在机测量系统构建

图 1 为线激光在机测量系统构成,主要包括多轴数控机床、工件、传感器夹具及线激光传感器。其中,线激光传感器通过设计的工装夹具集成在多轴数控机床主轴末端,从而具有数控机床进给机构的全部自由度,能够实现精准可控的运动,扩大了测量范围。

建立在机测量系统的数学模型,如图 2 所示,分别定义机床坐标系 $O_M-X_M Y_M Z_M$ 、工件坐标系 $O_P-X_P Y_P Z_P$ 及线激光坐标系 $O_L-X_L Y_L Z_L$,为了实现各部分坐标系的全局统一,借助球面的各向同性,利用

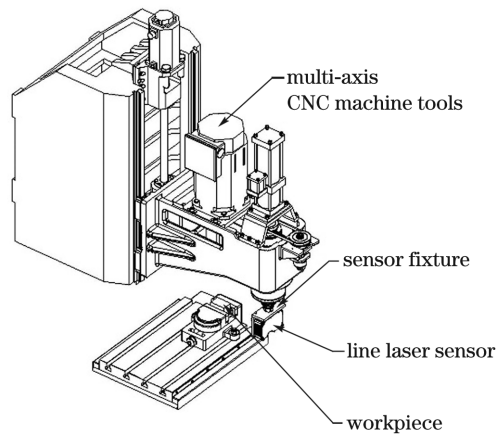


图 1 线激光在机测量系统构成

Fig. 1 Composition of line laser on-machine measurement system

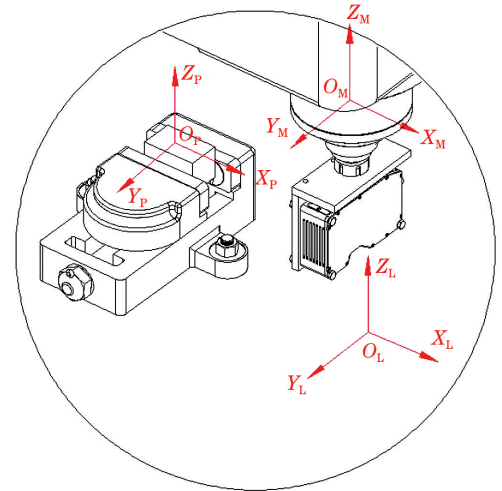


图 2 线激光在机测量系统坐标系

Fig. 2 Coordinate system of line laser on-machine measurement system

标准球进行线激光传感器的位姿标定。

2.2 线激光在机测量系统标定

线激光传感器可以通过校准功能来补偿其安装误差,若存在一平面与机床坐标系的 $X_M O_M Y_M$ 平面相平行,并已知该平面在机床坐标系 Z_M 轴方向的高度值 H ,当以该平面为参考面进行校准后,传感器便以该平面为零基准平面。图 3 为线激光在机测量数学模型,此时线激光所在平面与机床坐标系的 $X_M O_M Y_M$ 面垂直。激光线长方向与机床坐标系 X_M 轴之间存在偏角 β ,则线激光在机测量系统标定问题转换为偏角的求解问题。

该偏角值的计算步骤如下。

- 1) 将半径已知的标准球固定于机床工作台面,利用机床探头预先获取球心在机床坐标系下的三维坐标 $(x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0})$ 。

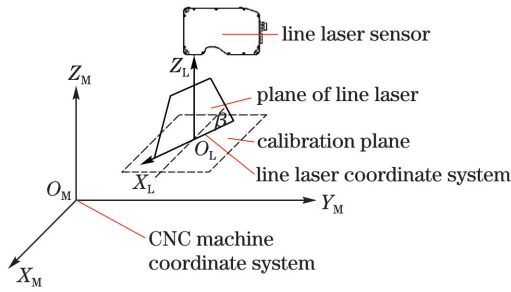


图 3 线激光在机测量系统数学模型

Fig. 3 Mathematical model of line laser on-machine measurement system

2) 控制数控机床沿 Y_p 轴进行单轴运动, 线激光传感器对标准球表面进行扫描, 获取标准球表面轮廓的一系列二维测量坐标, 记为 (x_i, z_i) 。

3) 线激光在标准球面的投影为一系列圆弧, 拟合圆弧可以得到一系列同心圆, 如图 4 所示, 各位置拟合的圆心连线垂直于激光平面。设数控机床沿 Y_p 轴移动了 L 距离, 激光平面由位置 0 移至位置 1, 记两位置下拟合圆的圆心在对应线激光坐标系下的坐标分别为 (x_{L0}, z_{L0}) 和 (x_{L1}, z_{L1}) , 即 $O_{L1}G = |x_{L0}|, O_{L2}F = |x_{L1}|$ 。

4) 易知 $l = O_{L1}E = O_{L1}G - O_{L2}F = |x_{L0} - x_{L1}|$, 根据三角关系, 可得

$$\sin \beta = \frac{l}{L} = \frac{|x_{L0} - x_{L1}|}{L} \quad (1)$$

则根据反三角函数, 可以计算出偏角 β 值, 至此, 可以利用旋转变换矩阵实现线激光坐标系与机床坐标系的平行。再结合球心在机床坐标系中的坐标值, 可以得到线激光坐标系与机床坐标系之间的平移变换矩阵, 实现二者的统一。

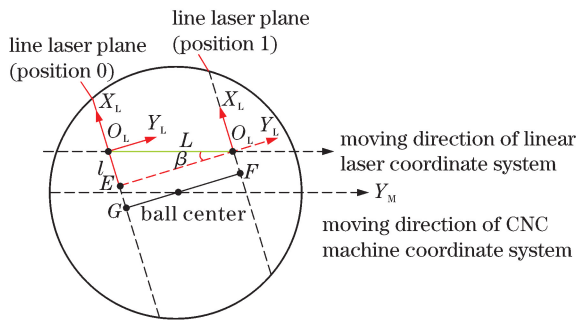


图 4 求解偏角的原理

Fig. 4 Principle of solving deflection angle

3 一面两孔特征拟合

3.1 平面特征的拟合

数控机床带动线激光轮廓测量仪对工件基准面

进行扫描测量, 可以得到一系列的测量点在线激光坐标系中的二维坐标 (x_{Li}, z_{Li}) , 结合标定结果, 可以得到工件基准面上测量点在机床坐标系中的坐标值, 记为 (x'_i, y'_i, z'_i) , $i=1, 2, \dots, n$, 其应满足空间平面方程, 即

$$Ax'_i + By'_i + Cz'_i + D = 0. \quad (2)$$

(2) 式等价于 $z'_i = -\frac{A}{C}x'_i - \frac{B}{C}y'_i - \frac{D}{C}$ 。令 $a_0 = -\frac{A}{C}, a_1 = -\frac{B}{C}, a_2 = -\frac{D}{C}$, 则有

$$a_0x'_i + a_1y'_i + a_2 = z'_i. \quad (3)$$

利用最小二乘法实现空间平面拟合, 即要使

$V = \sum_{i=0}^n (a_0x'_i + a_1y'_i + a_2 - z'_i)^2$ 最小, 其中, $a_0, a_1,$

a_2 为未知参数, 则 V 应满足 $\frac{\partial V}{\partial a_k} = 0, k = 0, 1, 2$, 即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n 2(a_0x'_i + a_1y'_i + a_2 - z'_i)x'_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n 2(a_0x'_i + a_1y'_i + a_2 - z'_i)y'_i = 0, \\ \sum_{i=1}^n 2(a_0x'_i + a_1y'_i + a_2 - z'_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

转换为矩阵形式, 表达式为

$$\begin{bmatrix} \sum x_i'^2 & \sum x_i'y_i' & \sum x_i' \\ \sum x_i'y_i' & \sum y_i'^2 & \sum y_i' \\ \sum x_i' & \sum y_i' & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i'z_i' \\ \sum y_i'z_i' \\ \sum z_i' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

求解(5)式, 计算出 a_0, a_1, a_2 , 即可得到工件基准面在机床坐标系中的平面方程。

对于利用组合面定位的工件, 也可以利用多轴数控机床(如加工中心)的工作台倾斜功能或主轴倾斜功能, 使线激光同时投射在工件上表面和侧面, 获取两个表面上激光点的二维坐标, 分别对其进行平面拟合, 从而得到两平面之间的相对位置关系。

3.2 孔特征的拟合

利用线激光传感器扫描工件基准孔表面, 线激光与基准孔表面的轮廓圆相交, 形成两个拐点测量点, 如图 5 中的 J 点与 K 点, 记录不同位置下的测量点坐标值。

结合标定结果, 将测量点坐标转换至机床坐标系下, 记为 (x_i, y_i, z_i) , 其应满足空间球面方程, 即

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2 = R^2, \quad (6)$$

式中: (a, b, c) 为球心坐标; R 为球的半径。对(6)

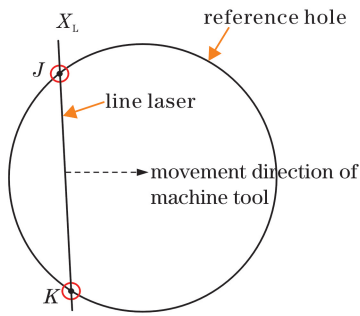


图 5 线激光扫描基准孔表面

Fig. 5 Scanning reference hole surface by line laser

式进行展开,可得

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2ax_i - 2by_i - 2cz_i + a^2 + b^2 + c^2 = R^2. \quad (7)$$

令 $M = 2a, N = 2b, P = 2c, Q = a^2 + b^2 + c^2 - R^2$, 则(7)式可以简化为

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - Mx_i - Ny_i - Pz_i + Q = 0, \quad (8)$$

式中: M, N, P, Q 即为所求解的未知参数。

利用平面拟合方法,基于测量点坐标得到基准孔所在的平面方程,记为

$$A'x_i + B'y_i + C'z_i + D' = 0. \quad (9)$$

已知基准孔所在的平面方程,所在球面的球心坐标 (a, b, c) 、半径 R , 则球心在平面上的投影点即为基准孔表面轮廓圆的圆心,记为 (x_0, y_0, z_0) 。由图 6 可知,孔心和球心的连线垂直于基准孔所在平面,则

$$\begin{cases} y_0 = \frac{B'}{A'}(x_0 - a) + b \\ z_0 = \frac{C'}{A'}(x_0 - a) + c \end{cases}. \quad (10)$$

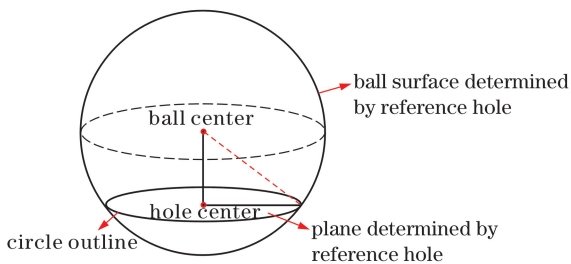


图 6 基准孔拟合原理

Fig. 6 Principle of fitting reference hole

结合(9)式,可以解得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(B'^2 + C'^2)a - A'(B'b + C'c + D')}{A'^2 + B'^2 + C'^2} \\ y_0 = \frac{(A'^2 + C'^2)b - B'(A'a + C'c + D')}{A'^2 + B'^2 + C'^2} \\ z_0 = \frac{(A'^2 + B'^2)c - C'(A'a + B'b + D')}{A'^2 + B'^2 + C'^2} \end{cases}. \quad (11)$$

至此,得到了基准孔表面轮廓圆的圆心坐标,结合球的半径 R 和球心到平面的距离 $d = \frac{|A'a + B'b + C'c|}{\sqrt{A'^2 + B'^2 + C'^2}}$, 根据三角原理,可以得到基准孔表面轮廓圆的半径为

$$r = \sqrt{R^2 - d^2}. \quad (12)$$

4 实验结果及分析

4.1 寻位试验需求

如图 7 所示,以一块定制的尺寸为 $92 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的试验件来模拟传统加工中以平面和孔作为定位基准的工件。图 8 为试验件的具体尺寸, T_L, T_R 孔为基准孔,以此为基准加工得到 T_C 孔,试验件的孔与基准面位于同一平面。当试验件位于理想安装位置时,基准面所确定的平面应与机床坐标系 $X_M O_M Y_M$ 面相平行,基准孔的连心线应与机床坐标系的 X_M 轴平行。

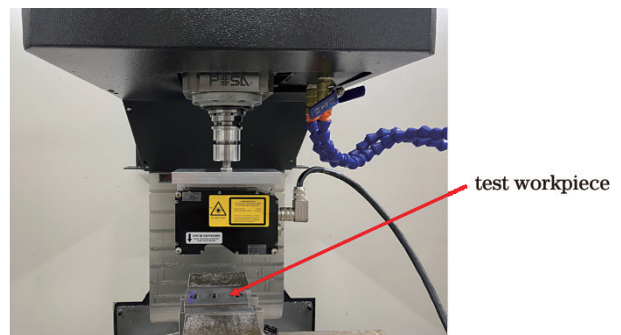


图 7 工件寻位试验件

Fig. 7 Test piece for workpiece positioning

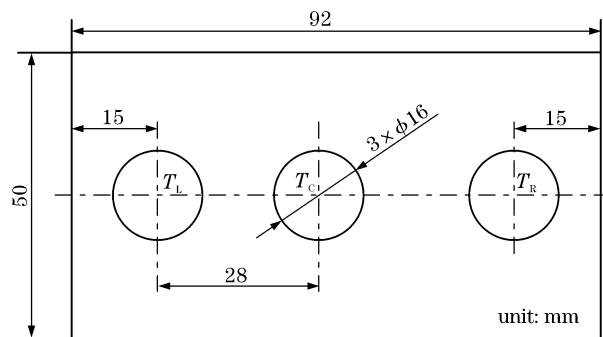


图 8 试验件尺寸

Fig. 8 Size of test workpiece

针对该试验件装夹位置不精确的问题,通过对基准面进行测量和拟合,得到该平面与机床坐标系 $X_M O_M Y_M$ 面之间的平行度偏差。此外,通过对基准孔表面轮廓圆进行测量和拟合,分别得到孔心的三维坐标和半径,从而得到两孔连心线与机床坐标 X_M 轴之间的角向偏差。

4.2 基准面水平偏差检测实验

要得到试验件基准面所确定的平面与机床坐标系 $X_M O_M Y_M$ 面之间的平行情况,可以保持数控机床 Z_M 轴坐标不变,带动线激光轮廓测量仪对试验件的基准平面进行扫描,如图 9 所示。记录不同位置下线激光投影至基准面上的测量点坐标,基于此,利用平面特征拟合原理可以求解出基准面的平面方程,从而得到基准面在空间中的位置信息。



图 9 线激光扫描基准面

Fig. 9 Line laser scanning datum plane

设置机床 Z_M 轴坐标为 -202.280 并保持不变,控制机床沿 X_M 轴单轴移动。由于线激光传感器只有 X_L 和 Z_L 轴,因此机床 X_M 轴坐标即为线激光传感器的 Y_L 轴坐标。根据测得的基准面点云数据,使用 Matlab 软件进行平面拟合,所得结果如图 10 所示。该面的平面方程为 $7.93 \times 10^{-4}x + 8.90 \times 10^{-3}y - z + 4.1207 = 0$,计算可得该面与机床 $X_M O_M Y_M$ 面 $z=0$ 的空间夹角为 0.512° 。

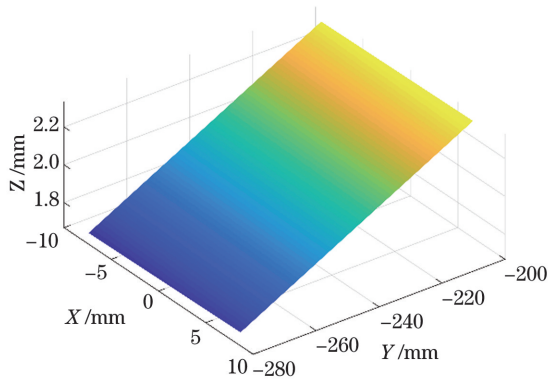


图 10 测试件基准面

Fig. 10 Reference plane of test workpiece

通过千分表进行进一步检验,将千分表安装于数控机床主轴,在机床 Z_M 轴坐标不变的情况下,千分表在试验件基准面分别沿机床坐标系 X_M 轴和 Y_M 轴滑动一段距离,测得角度倾斜情况分别如

表 1、2 所示。计算后得到该基准面在空间中的倾角为 0.568° ,点云数据拟合得到的 0.512° 与之相比误差为 9.86% 。平面偏差与测量结果吻合,证明水平偏差检测结果精度较高,平面倾角的分辨率可达 0.1° 。

表 1 试验件沿 X_M 方向的角度倾斜情况

Table 1 Inclination of test workpiece along X_M direction

Change of dial indicator reading along X_M coordinate $\Delta X_M / \text{mm}$	Change of dial indicator reading along Z_L coordinate $\Delta Z_L / \mu\text{m}$	$\tan \theta_X / 10^{-3}$
0.807	7.4	9.1698
3.135	34.8	11.1005
0.115	0.9	7.8261
2.931	35.7	12.1801
1.574	13.8	8.7675
Mean		9.8088

表 2 试验件沿 Y_M 方向的角度倾斜情况

Table 2 Inclination of test workpiece along Y_M direction

Change of dial indicator reading along Y_M coordinate $\Delta Y_M / \text{mm}$	Change of dial indicator reading along Z_L coordinate $\Delta Z_L / \mu\text{m}$	$\tan \theta_Y / 10^{-3}$
1.896	-1.7	-0.8966
0.787	-2.1	-2.6684
2.609	7.2	2.7597
0.746	-1.0	-1.3405
-1.444	-2.1	1.4543
Mean		-0.1383

4.3 基准孔连心线角向偏差检测实验

图 11 为试验件角向偏差检测图,机床保持



图 11 试验件角向偏差检测

Fig. 11 Angular deviation test of test workpiece

Z_M 轴坐标不变, 带动线激光轮廓测量仪对基准孔进行扫描测量, 记录不同位置下线激光在基准孔表面轮廓圆上的测量点数据 (u_i, v_i) 。图 12(a) 为线激光传感器自带软件生成的点云图, 图 12(b) 为将点云数据导入 Imageware 后得到的点云图, 可以发现, 得到的点云数据存在一些杂点, 且工件孔的边缘是一个倾斜的空间圆。因此对点云进行去噪后, 基于孔特征的拟合原理, 对试验件上 T_L 、 T_C 、 T_R 三孔进行拟合, 最终得到的圆心坐标和半径如表 3 所示。

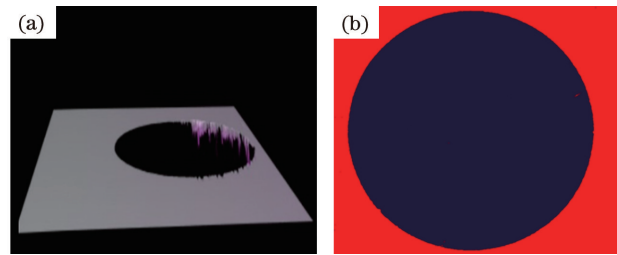


图 12 孔边缘扫描结果。(a) 传感器点云图;
(b) Imageware 点云图

Fig. 12 Hole edge scan results. (a) Sensor point cloud map; (b) Imageware point cloud map

表 3 试验件的孔拟合计算结果

Table 3 Fitting calculation results of test workpiece holes

Hole	Hole center coordinate/mm	Calculation value of radius R_c /mm	Actual value of radius R_a /mm	Error /%
T_L	(-0.5798, -269.8576, 1.7185)	8.0215	7.92	1.27
T_C	(-0.6243, -207.9228, 2.2697)	7.8282	7.94	1.43
T_R	(-0.5477, -241.8253, 1.9680)	8.0296	7.90	1.61

T_L 、 T_R 两孔为本试验件的基准孔, 孔 T_C 圆心与 T_L 、 T_R 圆心的距离分别为 28 mm、34 mm, 实际尺寸分别为 28.06 mm 和 33.88 mm, 根据拟合数据, 可得计算值分别为 28.033 mm、33.904 mm, 误差皆小于 0.1%, 而 T_L 、 T_C 、 T_R 三孔拟合半径的误差也均在 2% 以下, 表明计算结果的精度较高。

在机床上已经调整过虎钳的位置, 工件装夹后基准孔 T_L 、 T_R 孔心连线应当与机床 X_M 轴平行。根据拟合的 T_L 、 T_R 两孔孔心坐标, 可以计算得到两孔连心线与机床 X_M 轴之间的角向偏差为 0.00072° , 可以发现, 角向误差极小。

5 结 论

针对工件装夹位置不精确的问题, 将平面和孔作为找正特征, 通过搭建线激光在机测量系统, 并结合标定技术, 实现对平面和孔的扫描测量, 以确定工件在机床中的精确位置。在此基础上, 利用最小二乘法, 设计了平面和孔的拟合算法, 计算出相关特征的尺寸和位置信息, 结合标定结果进行坐标转换, 得到了试验件的倾斜角度和角向偏差情况。对结果和人工测量结果进行比较, 发现此种方式更为快速, 且测量结果一致, 能够满足加工需求。值得注意的是, 除了使用的点云拟合算法、试验件制造误差、试验件测量误差及线激光传感器本身精度, 控制机床运动时产生的振动也会对测量精度造成影响, 对这些因

素进行考虑和处理后可以继续提高精度, 满足加工过程中的更高要求。

参 考 文 献

- [1] Mou L X. Study on key technologies of complex surfaces on machine measurement and application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 1-2.
牟鲁西. 复杂曲面零件在机测量关键技术研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 1-2.
- [2] Wang W L, Yuan S P. Category and application of adaptive machining technology in NC machining field [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(6): 26-29.
王文理, 袁士平. 自适应加工技术在数控加工领域的分类与应用 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(6): 26-29.
- [3] Cui K. Research of information localizing technology for machining large scaled flange [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
崔科. 超大法兰自寻位加工技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] Niu T F. Research on key technology in intelligent position-arching machining of super-large components [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
牛同锋. 超大构件自寻位加工的关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] Sun Y W, Guo D M, Jia Z Y. Integrated measurement and machining technology of complex surfaces [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(9): 781-791.

- 孙玉文, 郭东明, 贾振元. 复杂曲面的测量加工一体化[J]. 科学通报, 2015, 60(9): 781-791.
- [6] Wang Q X. Research of several key technology on numerical control processing based on computer vision[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
王清秀. 基于计算机视觉定位的数控加工若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [7] Wang Q X, Li B Z. Study on workpiece initiative locating methods based on the image measurement technique [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(8): 261-263.
王庆霞, 李蓓智. 基于影像测量技术的工件主动寻位问题研究[J]. 机械设计与制造, 2010(8): 261-263.
- [8] Lu A X. Research on the technology of workpiece positioning based on binocular vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
卢岸潇. 基于双目立体视觉的工件定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [9] Xiong Z H, Chu Y X, Liu G F, et al. Workpiece localization and computer aided setup system [C]// Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29-November 3, 2001, Maui, HI, USA. New York: IEEE Press, 2001: 1141-1146.
- [10] Mo W Q. Research of several key technology on part-location system based on computer vision [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007: 4-5.
莫卫强. 基于数字图像的工件自动寻位系统若干关键技术的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 4-5.
- [11] Li D F. Research and application of three-dimensional object measurement based on CNN [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
李东方. 基于 CNN 的三维目标测量研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [12] Luo W T, Liu L X, Li L. Measuring rutting dimension and lateral position using 3D line scanning laser and inertial measuring unit[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103056.
- [13] He Y, Zheng S Y, Zhu F B, et al. Real-time 3D reconstruction of thin surface based on laser line scanner[J]. Sensors, 2020, 20(2): 534.
- [14] Wang X M, Xie Z X, Wang K, et al. Research on a handheld 3D laser scanning system for measuring large-sized objects [J]. Sensors, 2018, 18 (10): 3567.
- [15] Xie Z X, Wang X D, Gong H L. Round-hole profile measurement of thin-walled parts based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1204004.
解则晓, 王晓东, 宫韩磊. 基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓测量 [J]. 中国激光, 2019, 46 (12): 1204004.
- [16] Chen H, Zhang S J, Gao J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704006.
陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704006.