

# 激光与光电子学进展

## 复杂曲面多特征点匹配的喷油嘴定位技术

梁晨涛<sup>1</sup>, 吴平<sup>2\*</sup>, 赵卫<sup>1</sup>, 赵华龙<sup>1</sup>, 奚秀锋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所光子制造系统与应用研究中心, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>西安中科微精光子制造科技有限公司, 陕西 西安 710119

**摘要** 汽车喷油嘴的喷油孔加工一般使用工装夹具进行定位并建立坐标系, 工装夹具制造精度和安装误差会导致孔径、孔形以及孔的位置与理论值有较大的偏差, 从而影响喷油嘴工作的可靠性, 这对柴油机的整体性能、排放指标的稳定性甚至柴油机工作的可靠性产生严重影响。基于此, 提出了一种基于多特征点匹配算法的高精度自适应定位技术。通过在真实的燃油喷嘴上测量若干(最少 6 个)特征点的空间位置, 以模型中给出的特征点测量数据为基础, 计算实际工件与理论模型在机床坐标系下的精确定位参数, 以此计算工件上所有待加工孔的机床参数。实验结果表明, 工件定位精度小于等于 0.1 mm。该定位技术能有效减小孔加工偏差, 是解决燃油喷油嘴定位精度的一种有效可行的方案。

**关键词** 测量; 激光加工; 复杂曲面; 多特征点匹配; 自适应定位; 误差分析

中图分类号 TH161; V261.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0512003

## Nozzle Location Technology for Multifeature Point Matching of Complex Surfaces

Liang Chentao<sup>1</sup>, Wu Ping<sup>2\*</sup>, Zhao Wei<sup>1</sup>, Zhao Hualong<sup>1</sup>, Xi Xiufeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Photon Manufacturing System and Application Research Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

<sup>2</sup>Xi'an Micromach Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** The traditional method for locating and establishing a coordinate system for fuel injection nozzle processing of automobile nozzles uses tooling fixtures. Because the manufacturing accuracy and installation error of tooling fixtures will result in a large deviation between measured aperture, hole shape, and hole position and theoretical values affecting the reliability of fuel injection nozzle; moreover, the performance of the diesel engine, stability of emission targets, and reliability of the diesel engine produce a substantial influence. Based on these, we propose a high-precision adaptive location technology based on a multifeature point matching algorithm. By measuring the spatial position of several feature points (at least six feature points) on a real automobile nozzle, the precise positioning parameters of the actual automobile nozzle and theoretical model in the machine tool's coordinate system are calculated based on the measurement data of feature points given in the three dimensional model. The automobile nozzle's all-generation hole machine parameters are then calculated. The experimental results show that the locating accuracy is less than 0.1 mm. The location technology can effectively reduce the hole machining deviation, which is an effective and feasible solution to improve the automobile nozzle location accuracy.

**Key words** measurement; laser processing; complex curved surface; multi-feature point matching; adaptive localization; error analysis

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1108000)

通信作者: \*wu\_ping26@opt.cn

## 1 引言

随着当今社会对环境污染控制日益严格,为满足国家对汽车排放的要求,降低燃油消耗,提高汽车柴油机各项性能指标已是当务之急。随着高压共轨技术的应用,喷油嘴逐步向多孔数、小孔径、高质量方向发展,制孔质量会直接影响燃油雾化效果、油线贯穿度及流量系数,最终影响柴油机的经济性、动力性和排放指标<sup>[1]</sup>。当前喷油嘴喷孔发展的趋势是小孔径、多孔数,喷孔的形状精度、位置精度以及方向精度对喷油嘴的性能影响很大,随着加工制造业的不断发展,喷油嘴喷孔的制造精度要求越来越高,技术要求也越来越严,因此加工喷油嘴的高精度定位技术尤为重要<sup>[2-3]</sup>。

当前复杂曲面零件已成为近年来数字化制造的重要对象,根据调研,对复杂曲面零件的高精度定位与加工主要有三种方法:专用工装夹具,针对加工零件设计专用夹具,大大提高加工成本;手动定位,通过手动测量,在零件或者夹具上建立零件坐标系,通过零件坐标系与设计模型坐标系的转换关系实现零件定位,该方法效率低、受限人的经验,难以保证定位精度;设备集成的专用定位工具,只满足专用设备使用,价格昂贵,精度受限设备自身。综上所述,针对复杂曲面零件在五轴机床加工过程中存在的工装夹具精度差、工件自身形变、曲面加工方向难定位等导致的定位精度低问题,基于六点定位算法原理,考虑零件自身形变,提出了一种基于零件设计模型,给出固定数量和位置的特征点,并以此为参考点,通过多次迭代调整工件空间姿态的定位算法。

## 2 定位算法原理与实现

### 2.1 算法原理

汽车喷油嘴的喷油孔对孔的位置和方向有很高的要求,传统的机床加工一般都是通过工装夹具来建立工装坐标系的,在工装坐标系下进行加工。而实际工件与理论模型存在形变、工装夹具的定位误差、人为装夹引入的误差,这些误差都会导致在加工时孔的位置和方向有较大误差,影响工件的整体性能指标。针对该问题,提出一种基于复杂曲面多特征点匹配的自适应定位技术。该技术通过在工件上测量若干个特征点,并与模型上对应特征点的点云进行迭代匹配<sup>[4]</sup>,找到实测工件与理论模型在空间上的最佳匹配位姿,以此来确定工件上待加工孔在机床坐标系的加工位置和方向,有效减小工装夹具

以及工件形变等带来的误差<sup>[5-7]</sup>,如图 1 所示。

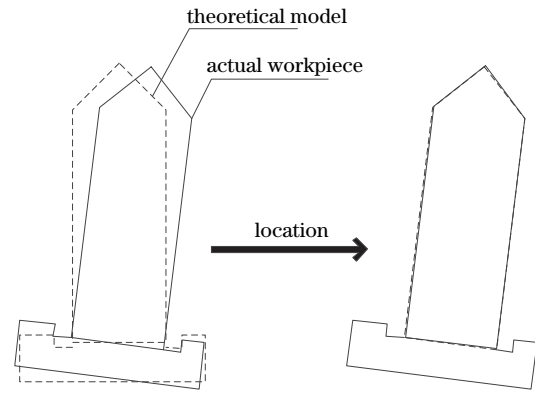


图 1 定位模型图

Fig. 1 Location modeling diagram

一个位于任意空间的自由物体,相对于三个互相垂直的坐标平面,都可以分解为 6 个方向的运动,即沿  $O_x$ 、 $O_y$ 、 $O_z$  轴方向移动和以三个坐标轴为中心的旋转运动。针对常规工件,要想确定工件在机床中的唯一姿态,需要在工件的 6 个自由度方面对工件的运动进行限制。如图 2 所示,首先以工件最大的平面作为工件的底面,选取不共线三点(点 1、2、3),抑制工件沿  $O_z$  方向的移动及绕  $O_x$ 、 $O_y$  轴的旋转;侧面选取不重合两点(点 4、5),抑制工件沿  $O_x$  轴的移动与绕  $O_z$  轴的旋转;最后在正面或者背面选取一点(点 6),抑制工件沿  $O_y$  方向的移动。

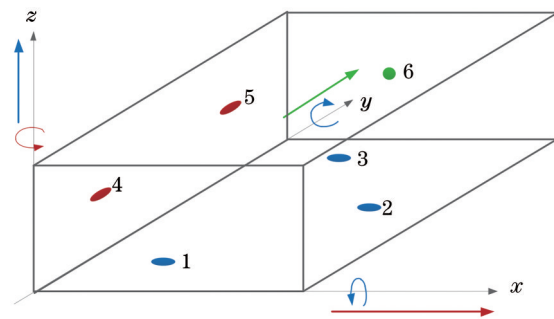


图 2 常规工件特征点选取原则

Fig. 2 Selection of feature points for common workpiece

针对回转体工件(柱状工件),如图 3 所示,工件在  $xoy$  平面没有明显的方向特征,因此该类型工件无需限制工件绕  $O_z$  轴旋转。只需在底面或与底面平行的平面选取不共面 3 点(点 1、2、3),抑制工件沿  $O_z$  方向的移动及绕  $O_x$ 、 $O_y$  轴的旋转,从圆柱表面选取同一  $z$  方向截面 3 点,且任意两点与截面圆心确定的夹角大于  $90^\circ$ (点 4、5、6),抑制工件沿  $O_x$ 、 $O_y$  方向的移动。

1) 在理论模型坐标系  $(OXYZ)_L$  内,在喷油嘴理

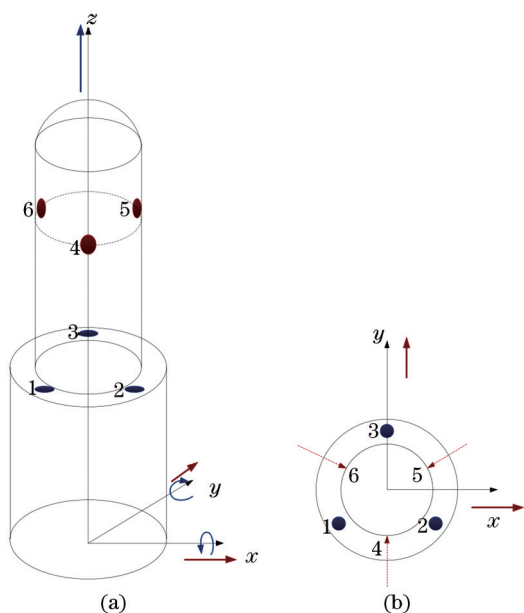


图 3 回转工件特征点选取。(a)三维图;(b)俯视图  
Fig. 3 Selection of feature points for rotary workpiece.  
(a) 3D view; (b) overhead view

论模型  $M_L$  上选取能够最佳定位喷嘴位置和方向的特征点,以特定的方法,在理论模型上获取 6 个或 6 个以上特征点的坐标  $(X_L, Y_L, Z_L)_i, i \geq 6$ 。

2) 采用机床定位,在真实喷嘴建立工件实际坐标系  $(OXYZ)_M$ ,喷嘴的待测模型  $M_M$ 。假设工件实际坐标和理论模型坐标重合,在  $(OXYZ)_M$  坐标系内,为保证在真实喷嘴工件上获得的特征点与理论模型上的特征点个数相同并且一一对应,在机床上初次定位时采用人为选择特征点的方式,在零件表面按照理论模型使用测距传感器选取特征点的顺序与数量,选择一组待定位点<sup>[8]</sup>,定位点坐标  $(X_M, Y_M, Z_M)_i, i \geq 6$ 。为确保测距传感器能完成所有定位点测量,将测距传感器安装到机床 Z 轴,测量方向与 Z 轴运动方向平行,通过移动 X、Y 轴以及 A、C 转轴,如图 4 所示,一个测距传感器即可确保完成零件上所有特征点测量,安装方式如图 5 所示。手动选择的特征点必须确保在对应理论模型特征点的点云范围内,根据定位算法计算理论特征点与初次手动选择的待定位点的最优匹配,获取初次的旋转矩阵  $R$  与平移矩阵  $T$ 。将该旋转矩阵与平移矩阵作为初始计算矩阵,在后续的自动定位过程中,可确保测距传感器获取的实测特征点与理论模型上的特征点对应,且测量点在点云范围内。

3) 利用夹具装夹喷嘴,并将其安装到五轴数

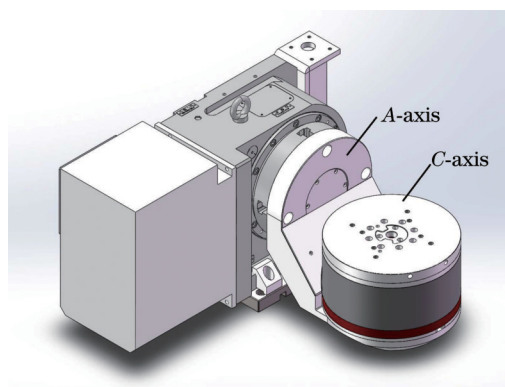


图 4 A/C 转轴示意图  
Fig. 4 Schematic of A/C shaft

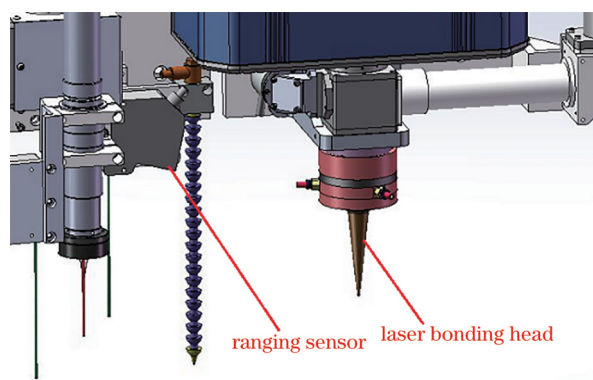


图 5 测距传感器示意图  
Fig. 5 Schematic of ranging sensor

控机床,开始进行定位操作。对于喷嘴某一关键点,根据其在机床坐标系下的理论数值,自动解算机床参数,使得测距传感器表征的矢量点与该关键点处于共线状态,以此获取该关键点在喷嘴实际模型上对应的测量点,按此方法分别获取所有测量点。

4) 由于真实喷嘴和理论模型存在形变差异、装夹误差以及夹具误差,在真实喷嘴上得到的测量点与理论模型上得到的测量点通常存在一定的差异,因此需要通过优化调整迭代的方式让理论模型与实测零件在空间姿态上达到最佳对齐。从分析角度来讲,每个测量点在其对应的网格点云内必然存在最佳匹配的对应点,使得所有测量点的空间散布姿态与对应点空间散布姿态最为相似。其过程就是从网格点云中迭代递进,寻找空间测量点的最近点<sup>[9-11]</sup>;在迭代过程中,保持测量点不动,从网格点云中查找与测量点空间距离最近的对应点,建立模型关系,计算匹配姿态;并根据本次结果更新网格点云数据,重复迭代过程,如图 6 所示,直到结果收敛到最小;计算迭代过程中累积的刚体变换参数,将该参数作用于喷嘴待加工孔,即可获得所



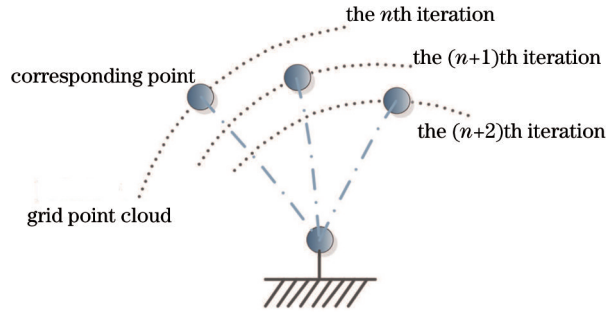


图 6 测量点到参考点的迭代过程

Fig. 6 Iterative process from measuring point to corresponding point

有待加工孔最贴近实际模型的数学表达。

假设理论模型与待测模型一致,理论模型与待测模型质心的平移关系为  $T$ ,理论模型到待测模型的旋转矩阵为  $R$ ,理论模型与待测模型的关系为

$$M_M = M_L \cdot R + T. \quad (1)$$

在理论模型特征点附近区域内一定有一组与测量点  $(X_M, Y_M, Z_M)_i$  对应位置相同的  $(X_C, Y_C, Z_C)_i, i \geq 6$ , 得

$$(X_M, Y_M, Z_M)_i = (X_C, Y_C, Z_C)_i \cdot R + T. \quad (2)$$

$(X_C, Y_C, Z_C)_i$  中心为  $P_C, (X_M, Y_M, Z_M)_i$  测量点的中心为  $P_M$ , 可得

$$T = P_M - P_C, \quad (3)$$

$$R = \left[ (X_M, Y_M, Z_M)_i - T \right] \cdot \left[ (X_C, Y_C, Z_C)_i \right]^{-1}. \quad (4)$$

待测模型上的孔位  $H_M$  与理论模型上的孔位  $H_L$  的关系为

$$H_M = H_L \cdot R + T. \quad (5)$$

最终可求得实际加工的坐标。

## 2.2 定位实现

所提自适应定位技术依托于五轴数控机床,如图 7 所示,各轴分别为  $X, Y, Z, A, C$ 。 $X, Y, Z$  为平行于  $O_x, O_y, O_z$  的位移轴,  $A, C$  为旋转轴,其中  $A$  轴轴心平行于  $X$  轴,  $C$  轴轴心随  $A$  轴旋转且垂直于  $X$  轴,安装工件的工作台位于  $C$  轴之上,在机床  $Z$  轴上固定装置激光测距传感器<sup>[12-13]</sup>。

测距传感器读数为零的空间位置在机床坐标系下固定不变,基于这一约定,将机床坐标系的原点设置在测距传感器读数为零的位置,而且确保机床坐标系三个坐标轴的方向与机床主轴的运动方向平行。测距传感器在机床坐标系下的数学描述可表示为  $(x, y, z, u, v, w)$ , 其中  $(x, y, z)$  表示测距传

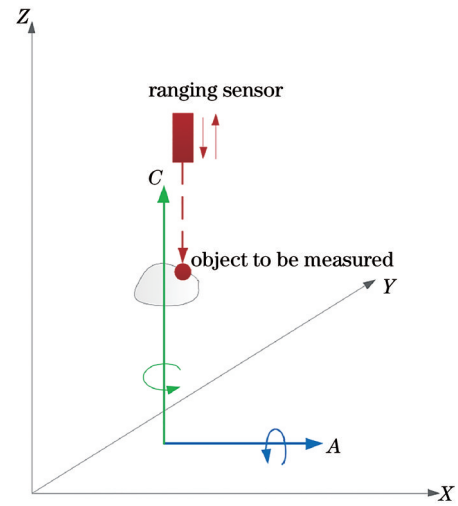


图 7 测量结构示意图

Fig. 7 Machine structure

感器的原点位置,  $(u, v, w)$  表示测距传感器的方向(单位向量)。当  $A, C$  轴保持不动,机床读数显示为  $(x_i, y_i, z_i), i \geq 0$ , 测距传感器读数显示为  $h_i$  时,被测点在机床坐标系下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}^T + h_i [u, v, w], i \geq 1. \quad (6)$$

为方便后续坐标系转换,需要标定测距传感器的空间位置。确保标定板在机床坐标系下固定不动,令测量传感器分别沿着  $X, Y, Z$  三个方向按照一定步距分别移动  $n$  步,总共测得标定板上  $m (m = n^3)$  个点。已知标定板平面度小于等于  $5 \mu\text{m}$ , 那么测距传感器测得标定板上的任意点均满足

$$a(x_i + h_i \cdot u) + b(y_i + h_i \cdot v) + c(z_i + h_i \cdot w) + d = 0, i \geq 1, \quad (7)$$

式中:  $a, b, c, d$  表示平面方程的系数。令  $au + bv + cw = e$ , 代入(7)式, 可得

$$ax_i + by_i + cz_i + eh_i + d = 0. \quad (8)$$

理论上,当每个面测量点数  $m \geq 5$  时,即可确定  $a, b, c, d, e$  这 5 个参数,考虑到标定板平面度误差、测距传感器误差以及计算误差,在每个面尽量多地选择测量点。调整标定板的位置,重复上述操作,每次位置的调整即可确定一组  $a, b, c, d, e$  值,假设总共获得  $t$  组,每组参数均满足  $a_j u + b_j v + c_j w = e_j$ , 理论上当  $t \geq 3$  时,即可唯一确定  $(u, v, w)$ 。

在机床中,测距传感器所测点的读数  $[X_M, Y_M, Z_M, A_M, C_M, H_M]$  转化为该点在机床坐标系  $(OXYZ)_M$  的坐标  $[X_M, Y_M, Z_M]$  时,须知  $A, C$  旋转轴回转中心与回转轴方向  $[P_A, N_A], [P_C, N_C]$ , 因此需要对该参数进行标定,标定方法如下。

1) 将标定板带角度固定在装夹工件的台面上, 依次测量待测轴不同角度下的  $n(n \geq 3)$  个平面上的矩阵点并计算出平面方程, 理想情况下  $n(n \geq 3)$  个平面有唯一交点  $P_1$ ,  $n(n \geq 3)$  个平面的法相有唯一交点  $P_2$ , 令  $P_2$  为该旋转轴的旋转中心, 旋转轴的方向  $N = P_2 - P_1$ , 测量过程如图 8 所示。



图 8 转轴标定示意图

Fig. 8 Schematic of shaft calibration

2) 得到 A、C 轴回转中心后, 可以将机床坐标与  $(OXYZ)_M$  坐标系下坐标相互转换, 要想用钻头对喷嘴进行加工, 仍需知道钻头与激光测距仪的相对位置  $P_s = [X_s, Y_s, Z_s]^T$ , 因此需要对激光钻头的空间位置进行标定, 方法如下。

将 A、C 轴机床位置调整至 0 位, 并通过工艺手法将激光钻头的工作位置移动至 C 轴回转中心, 当前位置为  $P_N = [X_N, Y_N, Z_N]^T$ , C 轴回转中心  $P_C = [X_C, Y_C, Z_C]^T$ , 得

$$P_s = P_N - P_C \quad (9)$$

系统采用一维点激光测距传感器实现原始数据采集, 系统每测量一个点, 测量结果是基于机床坐标系的。基于系统标定(A、C 轴标定)信息后, 可

根据实际测量结果的机床姿态计算三维坐标系下的实际测量点, 计算方式为

记被测点的测量结果为  $Q$ ;

记测量传感器标定参数为  $N_h$ , 当前读数为  $h$ ;

记机床 X, Y, Z 轴当前读数分别为  $x, y, z$ ;

记机床转轴 C 标定参数为  $(P_C, N_C)$ , 当前读数为  $c$ ;

记机床转轴 A 标定参数为  $(P_A, N_A)$ , 当前读数为  $a$ ;

基于已知机床结构, 结合运动学关系, 得到

$$T(P_C, N_C, c)T(P_A, N_A, a) \begin{bmatrix} Q \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} hN_h \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -x \\ -y \\ z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

在模型中提取测量点理论坐标, 再通过上述过程, 获取实际测量点位, 通过坐标转换后在机床中进行测量, 经过特征点匹配后得到实际孔位信息。最终将实际孔位信息转换为激光钻头作用点下的机床坐标进行加工<sup>[14]</sup>。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 测试方法分析

##### 3.1.1 环境分析

为确保测试过程, 准备两台相同硬件配置的五轴数控机床(X、Y、Z、A、C, 直线轴定位精度为  $10 \mu\text{m}$ , 重复定位精度为  $5 \mu\text{m}$ , 转轴定位精度为  $30''$ , 重复定位精度为  $15''$ , 整体布局如图 9 所示)与一台高精度三坐标测量仪(分辨率为  $0.0001 \text{ mm}$ , 测量行程为  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 放大倍率为 400, 测量精度为  $2 \mu\text{m}$ )。

按机床标定流程, 先完成五轴机床上测距传感器、A 轴与 C 轴的标定, 获取测距传感器空间位置与测量方向、旋转轴回转中心与回转轴方向, 标定结果如表 1 所示。

为确保测试数据样本足够, 在喷嘴模型表面选取 30 个孔作为待加工孔坐标。在喷嘴模型表面选取  $m(m \geq 6)$  个特征点, 并在特征点附近框选

表 1 仪器标定结果

Table 1 Machine calibration results

| Coordinate axis | X         | Y         | Z         | A | B | C |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---|---|---|
| Ranging sensor  | 0         | 0         | 0         | 0 | 0 | 1 |
| A               | -233.8876 | -260.5231 | -306.7610 | 1 | 0 | 0 |
| C               | -233.9111 | -260.5317 | -160.0697 | 0 | 0 | 1 |

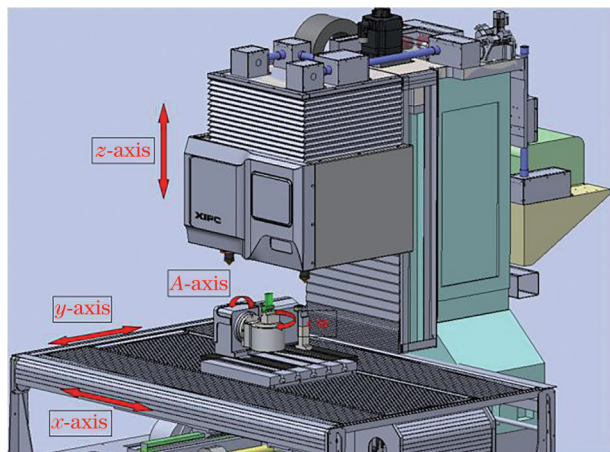


图 9 整体布局模型

Fig. 9 Overall layout model

特定大小、特定间隔的点云,最终选取了6个特征点,并在特征点附近以0.005 mm的间隔选取对应点云<sup>[15]</sup>。

### 3.1.2 定位精度测量

针对喷油嘴,根据要求给出加工孔位数据以及定位相关特征点与点云数据。根据提供的数据,对喷油嘴进行定位操作,如图10所示,并针对定位后的加工数据,在喷油嘴上扫环加工。加工完成后,在测量设备上测量加工孔位置,如图11所示,计算该加工位置与前期设定位置的距离偏差,并统计每个孔位的偏差值。

### 3.1.3 重复定位精度测量

针对喷油嘴,使用3.1.2节中相同的定位数据,



图 10 喷油嘴定位操作

Fig. 10 Nozzle positioning operation

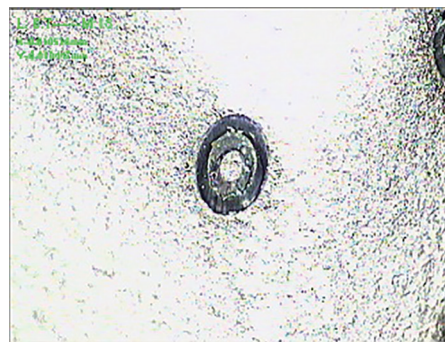


图 11 仪器结果的测量

Fig. 11 Measurement of machining results

不重新装夹,重新进行定位操作,对定位后的数据进行扫环加工;加工完成后,在测量设备上测量加工孔位置,并计算本次加工位置与3.1.2节中加工位置的距离偏差,统计每个孔位的偏差值。

### 3.1.4 重复装夹定位精度测量

针对喷油嘴,使用3.1.2节中相同的定位数据,重新装夹,重新进行定位操作,对定位后的数据进行扫环加工;加工完成后,在测量设备上测量加工孔位置,并计算本次加工位置与3.1.2节中加工位置的距离偏差,统计每个孔位的偏差值。

### 3.1.5 不同设备定位精度测量

针对喷油嘴,使用3.1.2节中相同的定位数据,使用相同硬件配置的另一台五轴数控设备装夹,重新进行定位操作,对定位后的数据进行扫环加工;加工完成后,在测量设备上测量加工孔位置,并计算本次加工位置与3.1.2节中加工位置的距离偏差,统计每个孔位的偏差值。

## 3.2 测试结果分析

按照3.1节的测试方案进行测试,使用高精度三坐标测量仪测量标记点与理论点位置,得到的喷油嘴测量结果如图12所示。测试结果统计值的最大值为0.01196 mm,最小值为0.002379 mm,均方根为0.007868 mm,标准差为0.001804 mm。

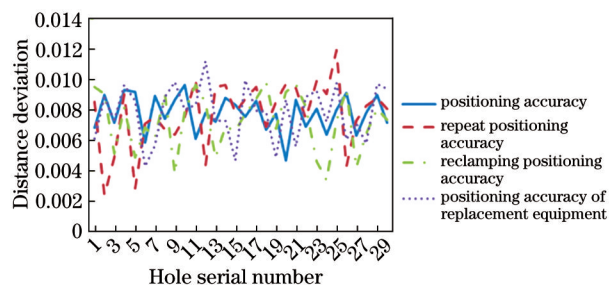


图 12 测量结果

Fig. 12 Measured results



## 4 结 论

所介绍的基于复杂曲面多特征点匹配的喷嘴定位技术能够有效地提高汽车喷嘴的孔位置精度,并保证在重复上下料或者切换设备的情况下的孔位置精度,大大提高了汽车柴油发动机的稳定性与可靠性。该技术在精密加工中具有很广泛的应用前景。目前该技术已经应用于激光微孔成形的生产中,并得到了充分的验证。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang J, Tang W P, Du Y. Technical research of nozzle spray hole[J]. Modern Vehicle Power, 2010 (1): 43-46.  
张婕,唐维平,杜严. 喷嘴喷孔加工工艺技术[J]. 现代车用动力, 2010(1): 43-46.
- [2] Ren Z D, Huang Q Y. Discussion on the processing process and application equipment of injection nozzle injection nozzle[J]. Automobile Manufacturing, 2008, (14): 50, 52, 54.  
任振挡,黄全印. 喷嘴喷孔加工工艺及应用设备探讨[J]. 汽车制造业, 2008, (14): 50, 52, 54.
- [3] Bu K, Qiao Y, Cheng Y Y, et al. Registration technology of dense point cloud of turbine blade based on positioning feature point[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(Z1): 93-96, 100.  
卜昆,乔燕,程云勇,等. 基于定位特征点的叶片锥束 CT 点云模型配准方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(Z1): 93-96, 100.
- [4] Boehm W. Inserting new knots into B-spline curves [J]. Computer-Aided Design, 1980, 12(4): 199-201.
- [5] Guo W C, Mei B Z. Six-point location principle and its application[J]. Machinery, 2007, 34(3): 49, 52.  
郭万川,梅碧舟. 六点定位原理及其应用[J]. 机械, 2007, 34(3): 49, 52.
- [6] Cheng W M, Sun L Z, Zhang H T. Improvement of positioning precision for precise stage with compensation [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 884-888.  
程维明,孙麟治,章海涛. 利用补偿提高精密定位平台的定位精度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 884-888.
- [7] Wu G, Wu C F, Hou Q Y, et al. Target location method based on invariable moment feature matching[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 460-468.  
吴刚,武春风,侯晴宇,等. 基于不变矩特征匹配的目标定位方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 460-468.
- [8] He Q Y, Huang L H. Imaging technology based on single-point laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0628002.  
何巧莹,黄林海. 基于单点激光测距的扫描成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0628002.
- [9] Liu Y Z, Zhang Q, Lin S. Improved ICP point cloud registration algorithm based on fast point feature histogram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0611003.  
刘玉珍,张强,林森. 一种改进的基于快速点特征直方图的 ICP 点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0611003.
- [10] Zhang Y, Li X Y, Han X. Three-dimensional point cloud registration method with low overlap rate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810014.  
张元,李晓燕,韩燮. 一种低重叠率的三维点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810014.
- [11] Song T, Cao L B, Zhao M F, et al. Registration and optimization algorithm of key points in three-dimensional point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0415008.  
宋涛,曹利波,赵明富,等. 三维点云中关键点的配准与优化算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0415008.
- [12] Xu L, Zhang Z J. Error propagation analysis of structured light system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 306-313.  
许丽,张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
- [13] Liu Y, Li K, Wang G Y. Implementation of laser on-machine measuring system[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2668-2675.  
刘勇,李昆,王帼媛. 激光在机测量系统的实现[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2668-2675.
- [14] Liu Y, Wang C Y, Gao N, et al. Point cloud adaptive simplification of feature extraction[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 245-254.  
刘迎,王朝阳,高楠,等. 特征提取的点云自适应精简[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 245-254.
- [15] Fan J J, Ma L Q, Sun A B, et al. Extraction of line contour points from point cloud data using pattern vector method[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1640-1648.  
樊晶晶,马骊群,孙安斌,等. 模式向量法提取点云数据线轮廓点[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1640-1648.