

基于三维点云的栅极间距测量方法^{*}

杨蕴杰, 方 宇, 杨 皓, 张伯强, 黄子健, 李皓宇

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要: 栅极组件间距决定了离子推力器的工作性能和可靠性, 栅极间距自动化检测对提高栅极装配效率和装配质量具有十分重要意义。为了解决栅极间距自动化检测问题, 采用线激光扫描技术, 建立了双层拱面栅极件的三维点云模型, 使用点云密度算子区分了点云模型中边缘点和非边缘点, 通过 DBSCAN 算法将边缘点根据数据连续性聚类; 针对点云边缘数据存在的噪点和密度分布不均问题, 提出了边缘数据的中心计算方法, 通过边缘点集合到中心距离的离散程度判断形状是否为圆孔, 最后计算圆心坐标到栅极下表面距离作为栅极间距。通过试验对本文提出的算法进行鲁棒性和精度验证, 结果显示: 在添加标准差为 0.05mm 和 0.1mm 的高斯噪声模拟环境干扰下, 算法鲁棒性良好; 将本文方法计算得出的栅极间距与传统人工方法进行比较, 测量值最大误差为 36 μm , 误差均值为 17 μm 。研究结果表明, 本方法有望代替现有人工测量手段, 实现栅极间距非接触式自动化测量。

关键词: 离子推力器; 栅极间距; 三维点云; 圆孔提取; 圆心计算; 自动化测量

中图分类号: TN206

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210600-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210600

Grid Gap Measurement Method Based on Three-Dimensional Point Cloud

YANG Yun-jie, FANG Yu, YANG Hao, ZHANG Bo-qiang, HUANG Zi-jian, LI Hao-yu

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science,
Shanghai 201620, China)

Abstract: The grid gap determines the working performance and reliability of the ion thruster. Automatic detection of grid gap is of great significance to improve grid assembly efficiency and quality. In order to solve the problem of automatic detection of grid gap, a three-dimensional point cloud model of double-layer arched grid was established by using line laser scanning technology. The point cloud density operator was used to distinguish the edge points and non-edge points in the point cloud model, and then the edge points were clustered according to the continuity of the data through the DBSCAN algorithm. Aiming at the problems of noise and uneven density distribution in point cloud edge data, a center calculation method of edge data was proposed and whether the shape was a circular hole was judged by the dispersion of the distance from the edge point set to the center. Finally, the distance from the center coordinate to the lower surface of the grid was calculated as the grid gap. The robustness and accuracy of the proposed algorithm were verified by experiments. The results show that the algorithm had good robustness when Gaussian noises with standard deviation of 0.05mm and 0.1mm were added to simulate

^{*} 收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2021-12-13。

基金项目: 上海市松江区科技攻关项目 (20SJKJGG08C); 上海市高水平应用技术大学创新平台建设项目。

作者简介: 杨蕴杰, 硕士生, 研究领域为三维点云检测。

通讯作者: 方 宇, 博士, 教授, 研究领域为智能装备与精密检测。

引用格式: 杨蕴杰, 方 宇, 杨 皓, 等. 基于三维点云的栅极间距测量方法[J]. 推进技术, 2022, 43(11):210600.
(YANG Yun-jie, FANG Yu, YANG Hao, et al. Grid Gap Measurement Method Based on Three-Dimensional Point Cloud[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210600.)

the environmental interference. Comparing the calculated value of the algorithm with the traditional manual method, the maximum error was $36\mu\text{m}$ and the average error was $17\mu\text{m}$. The research shows that this method is expected to replace manual measurement and realize non-contact and automatic detection.

Key words: Ion thruster; Grid gap; Three-dimensional point cloud; Circle extraction; Center calculation; Automatic detection

1 引言

离子推进器作为一种静电加速式电推力器,以其高比冲,寿命长,工作模式精确可调等优点在航天器位置保持、姿态控制及轨道转移等领域得到广泛的应用^[1-2]。栅极组件是离子推进器的关键部件,其间距变化是影响离子推进器冷态启动,推力性能和使用寿命的重要因素,同时还会对离子束的发散角、推力大小等产生重大影响^[3-5],所以栅极间距测量对离子推进器的工作质量具有十分重要的意义。

现常见的栅极间距测量主要采用探针式测量方法,如 Soulas 等^[6]通过螺栓将氧化铝探针固定在屏栅极上,探针通过加速栅极的孔洞中心,使用远距离显微镜测量探针伸出长度变化,计算栅极间距的热变形;袁杰红等^[7]在其基础上做出了改进,使用高温结构胶和高温高瓷将探针固定在屏栅和加速栅孔中,避免了螺栓固定探针的影响,并提出了可检测三层栅极组件热态间距的探针安装方案,利用亚像素定位和图像算法,提高了整体系统测量精度,实现栅极组件中心位置热态间距的高精度,非接触在线测量;唐福俊^[8]设计了一种导电金属材质的台阶轴塞规,利用万用表检测屏栅极与加速栅极之间导通情况来判断台阶轴塞规的前端是否接触到加速栅极,通过测量塞规长度来确定栅极组件的间距。探针法虽然在单一栅极孔间距测量中有着高精度的优势,但是依旧有以下几个缺陷:第一,探针法适用于栅极单孔间距测量,但在对栅极整体间距进行测量时效率较低;第二,探针本身在高温环境下会产生热形变,影响测量精度;第三,无论是采用在栅极表面安装还是使用台阶轴式的探针,测量时都更容易损伤栅极表面,影响后续的表面质量评估工作。除了探针法外,国外还有一些基于光学测量方法的尝试,如 Trava-Airolti 等^[9]设计了一种基于氦氖激光的光学测量系统,通过精密透镜聚焦的孔洞光斑几何信息变化测量栅极组件的热变形;Pollard 等^[10]在推力器前方两侧分别放置两块镜子,通过不同的远距离显微镜相机分别拍摄镜子的反射成像,计算 T5 离子推力器栅极的热变形量。上述两种方法都有自己的局限性,前者对环

境和安装精度有着较高要求,后者通过角度的变化获取三维数据,精度较差。总体来看,无论是探针法还是其他一些光学方法虽然可以测量栅极单孔间距,但都没有很好解决栅极整体间距的非接触式自动化测量问题。

目前对栅极间距进行非接触式自动化测量的研究仍然较少,本文提出了一种基于三维点云的栅极间距非接触式测量方法,通过线激光相机对栅极组件进行三维建模,将实际测量问题转化成点云数据处理和特征提取问题,实现栅极间距的自动化测量。

2 栅极间距测量方法

2.1 栅极间距测量系统

如图1所示,整个栅极间距测量系统由升降丝杆,阻尼隔振平台,线激光相机和高精度运动滑台组成。栅极组件通过夹具固定在高精度运动滑台上,可实现沿 x, y 轴方向运动功能;线阵结构相机固定在升降丝杆上,可沿 z 轴方向进行测量高度调整;整个系统放置在阻尼隔振平台上,避免地面震动对量测结果产生影响。

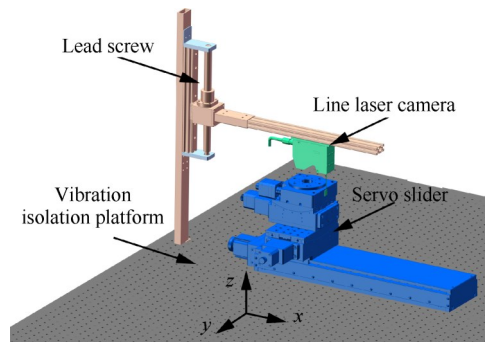


Fig. 1 Gap measurement system

本文先对栅极组件沿 x 轴正方向进行扫描,每次沿 y 轴移动 l_1 ,设线阵结构光相机宽度为 l ,其中 $l > l_1$;再沿 x 轴重复扫描,直至栅极组件整体扫描完成。线激光相机扫描栅极件表面获得表面深度信息,与 x, y 轴滑台编码器信息配准,计算每一个线激光扫描点在滑台移动后的 x, y 坐标,从而获取每一个点完整的三维空间位置坐标 (x, y, z) ,建立点云数据集,构建三维空间点云模型,如图2所示。

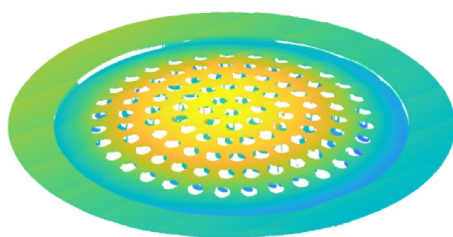


Fig. 2 Grid point cloud model

2.2 栅极间距测量方法

对于点云模型的栅极间距测量,如何对拱面栅极进行圆孔特征提取和圆心定位是测量的核心问题。为了减少计算复杂度并提高特征识别率,本文先使用基于密度的边缘提取和聚类算法将整体模型的边缘特征点提取出来,然后通过点距的最大距离分布,解决圆孔特征识别和圆心定位问题,最后完成栅极间距计算。

2.2.1 栅极间距定义

图3为拱面栅极组件示意图,图4为拱面栅极单孔剖面图。如图4所示,离子推力器栅极组件由上层屏栅极(S)和下层加速栅极(A)组成,由于现栅极间距测量采用人工塞规法,通过多次测量各方向上的栅极圆孔边缘间距,计算测量均值作为该孔的栅极间距,其测量结果为屏栅极上表面圆孔圆心与对应加速栅极上表面圆孔圆心距离,而线激光扫描的深度距离分别为屏栅极上表面 h_s 和加速栅极上表面 h_a ,故定义上表面作为栅极间距不仅容易验证,而且精度更高;另一方面,由于单线激光在测量遮挡工件存在测量原理上的缺陷,即由于三角测量原理,扫描加速栅极的激光在返回时会被上层屏栅极遮挡,所以加速栅极只能扫描出部分数据,无法求得圆心,故栅极间距 d 定义为屏栅极圆孔圆心 O 与加速栅极圆孔拟合平面 L 之间距离,其计算式为

$$d = \text{dist}(O, L) \quad (1)$$

式中 dist 为点到平面距离公式。



Fig. 3 Schematic diagram of the grid

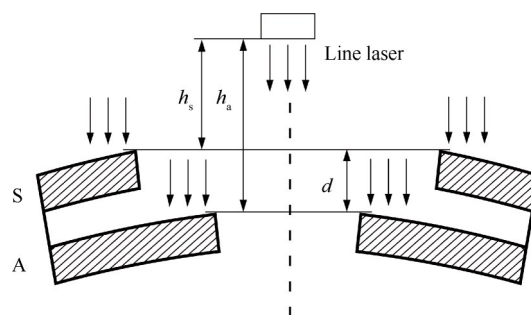


Fig. 4 Schematic diagram of the grid gap

2.2.2 边缘提取

由于点云数据存在无序性,点云特征通常需要通过近邻点之间的关系表示。设扫描得到的点云数据集为 $P = \{p_i | p_i \in R^3, i=1, 2, 3, \dots, N_1\}$, $N_k(p_i)$ 为通过kd-Tree搜索距离点 p_i 欧式距离最近的 k 个点的集合。查询近邻点 $N_k(p_i)$ 的方法一般分为两种,一种是设置邻域半径,将半径内的点都作为近邻点;另一种是 k 近邻点法,即查找离点 p_i 欧式距离最近的 k 个点。为了使点云边缘点和非边缘点的区分明显,这里选择使用第二种方法查询近邻点,所有试验的近邻点个数 k 均取30,点 p_i 的密度根据与最远近邻点距离的反比关系^[11],计算式如下

$$\rho(p_i) = \frac{k}{r_{\max}} \quad (2)$$

式中 $r_{\max}$ 为 $N_k(p_i)$ 中的点到点 p_i 的最大距离,计算式如下

$$r_{\max} = \max(|N_k(p_i) - p_i|) \quad (3)$$

得到点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 的密度 $\rho(p_i)$ 后,使用K-means^[12]算法计算边缘点密度阈值 ρ_e ,判断 p_i 是否为边缘点。对于点云数据而言,由于线激光本身采样点较为规整,导致非边缘点的密度高度集中,边缘点密度基本小于非边缘点密度。使用K-means算法,可以通过预设类的个数和基于密度数据迭代计算类中心的方式,计算非边缘点的密度中心位置,从而提取出边缘点。如图5所示,左图红点为非边缘点,右图红点为边缘点,边缘点右侧无点云数据;设线激光单点间距为 δ ,搜索最近邻点25个,非边缘点最远近邻点距离约为 2.82δ ,边缘点最远近邻点距离约为 4.47δ ,最远近邻点距离如图5红线所示;根据公式(2)可得,非边缘点密度约为边缘点密度的1.58倍左右。

判断边缘点方式如下

$$\rho_e = \frac{\max(D(\rho_2)) + \min(D(\rho_1))}{2} \quad (4)$$

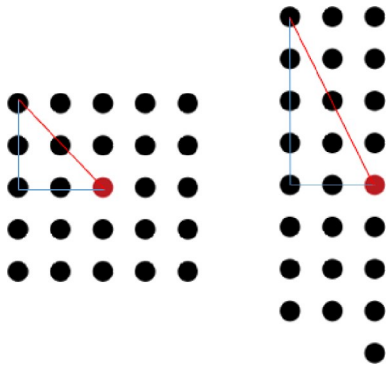


Fig. 5 Schematic diagram of non-edge points and edge points

$$I_i = \begin{cases} 1, & \rho(p_i) < \rho_e \\ 0, & \rho(p_i) \geq \rho_e \end{cases} \quad (5)$$

式中 ρ_1, ρ_2 为 K-means 计算后的密度中心, 且 $\rho_1 > \rho_2$; $D(\rho_1)$ 和 $D(\rho_2)$ 分别为 ρ_1 和 ρ_2 的密度聚类点集; ρ_e 为边缘点密度阈值, 点云密度小于 ρ_e 时, 即 I_i 为 1 时, 该点为边缘点, 反之则为非边缘点。如图 6 所示, 栅极点云模型边缘点基本全部提取完成。上层屏栅极圆孔边缘形状完整; 下层加速栅极圆孔数据由于线激光三角测量原理, 反射激光被上层屏栅极遮挡, 呈半月状。设提取的边缘数据集为 $E = \{e_i | e_i \in \mathbb{R}^3, i=1, 2, 3, \dots, N_2\}$ 。

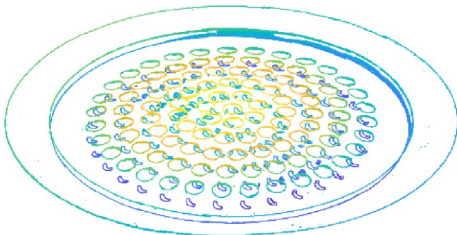


Fig. 6 Edge point cloud model

2.2.3 边缘聚类

得到整体的边缘数据集 E 后, 使用基于密度的聚类算法 (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)^[13] 对点云边缘进行聚类分析。设定球半径 r 和球内点的数量的最小值 minpts , 对 E 中任取点 e_i 为球心, 计算在半径 r 内点的数量 Num ; 如果 Num 大于给定的阈值 minpts , 便认为该半径 r 内的点为一类, 遍历 E 中每个点完成边缘数据聚类。使用 DBSCAN 聚类算法的目的在于将原本离散的点云边缘数据拟合成线段, 并按照线段的连续性进行分类, 方便后续对边缘特征的识别。

2.2.4 基于最大距离的圆孔特征识别

完成对点云边缘的聚类后, 需要识别屏栅极上每一个圆孔特征并计算圆心坐标。常用的方法有最

小二乘法和随机采样一致性 (Random Sample Consensus, RANSAC), 但是都并不适用于栅极组件间距检测。最小二乘法在面对边缘密度分布不均的点云数据时, 存在着较大的圆心计算误差; RANSAC 虽然能从密度不均的点云数据提取出圆形的特征, 但由于其本身是通过概率迭代寻找特征点, 求解后的圆孔边缘经常残缺, 影响检测精度; 另外, 由于栅极组件拱面多孔的结构, 使用 RANSAC 算法经常会拟合拱面整体特征而忽视圆孔特征。针对上述存在的实际问题, 本文提出了一种基于最大距离分布的方法, 将点云边缘的形状特征和噪声点区分, 并完成圆孔特征识别和圆心坐标计算。

设点云边缘 E 聚类后的簇的个数为 m , 则簇 $C = \{C_l | C_l, l=1, 2, 3, \dots, m\}$, $p_i(C_l)$ 为 C_l 中第 i 点。计算 C_l 中欧式距离最大的点, 计算式如下

$$D_{\max} = \max(|p_i(C_l) - p_j(C_l)|) \quad (6)$$

将 $p_i(C_l), p_j(C_l)$ 分别存入集合 A, B , 并继续查找剩余点中间距最大的两点, 建立点和最大距离对应关系 $f(A_i, B_i) \rightarrow D_{\max, i}$ 。

考虑到线激光的重复精度, 为了使距离分布密度具有稳定性, 设定直方图区间范围为 0.1mm , 建立距离特征直方图。如图 7 左图所示, 簇 C_l 中点距的最大距离主要分布在区间 $[4.3, 4.4]$ 之间, 为边缘主要特征点, 对应右图圆孔边缘特征区域。

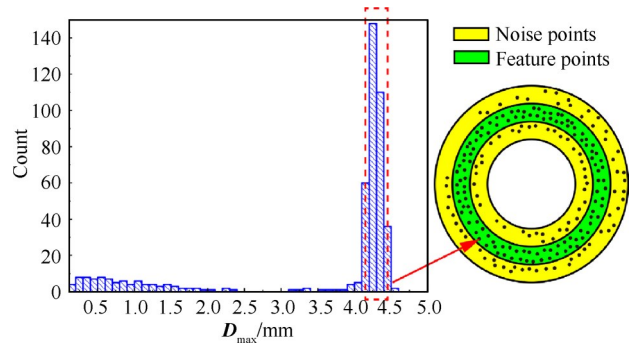


Fig. 7 Schematic diagram of hole feature point

设定阈值 t , 计算提取参与计算特征点的个数 n 。阈值 t 的选择会影响簇中心坐标计算精度, t 如果太大或者太小都会导致簇中心坐标的偏移。一般认为统计估计算子的特征点通常取总数的 50% 较好^[14], 一方面是避免异常数据参与计算, 影响最后特征估计的稳定性; 另一方面较多的特征数据可以评价采样数据整体效果, 过滤掉异常值较多的情况, 所以为了获得稳定的特征提取效果, 将 t 值选取为 0.5, 簇 C_l 的中心 $O_l(x_l, y_l, z_l)$ 计算式如下

$$n = tN \quad (7)$$

$$(x_l, y_l, z_l) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(D_{\max}) \quad (8)$$

式中 N 为簇 C_l 中点云数据的个数; $p_i(D_{\max})$ 为通过直方图提取出的点云特征点。

得到 $O_l(x_l, y_l, z_l)$ 后, 通过簇 C_l 中各个点到 $O_l(x_l, y_l, z_l)$ 距离的离散程度 σ 判断簇 C_l 是否为圆孔边缘, 判断方法如下

$$u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_l - p_i(C_l)| \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|O_l - p_i(C_l)| - u)^2}{N - 1}} \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_l - p_i(D_{\max})| \quad (11)$$

$$J = \begin{cases} 1, & 3\sigma \leq 0.15R \\ 0, & 3\sigma > 0.15R \end{cases} \quad (12)$$

其中, 当 J 为 1 时, 簇 C_l 识别为圆孔特征。最终拱面栅极圆孔提取效果如图 8 所示: 整个屏栅极的拱面一共 102 个圆孔, 提取出 100 个, 其中两个圆孔由于栅极表面粗糙导致的点云数据离散程度较大而被过滤掉; 完成散乱点云边缘聚类过程和圆心空间坐标计算; 过滤掉了加速栅极残缺孔洞边缘和其余边缘点云特征。

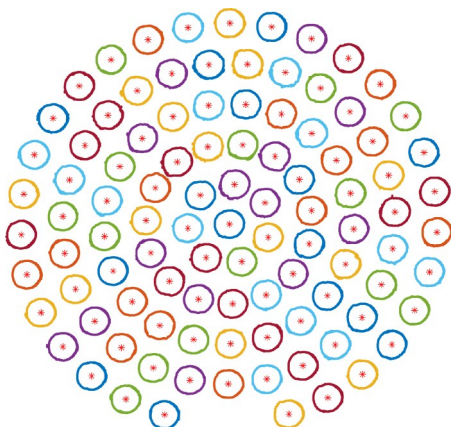


Fig. 8 Schematic diagram of algorithm results

2.2.5 栅极间距计算方法

根据得到的栅极组件上层圆孔坐标 O 后, 需要得到对应下层的点云数据才能计算间距。由于屏栅极对加速栅极存在遮挡和线激光相机三角测距原理, 加速栅极只能扫描出部分圆孔数据, 无法直接获得圆心位置, 本文采用对下层圆孔数据进行平面拟合的方法, 通过计算点到平面的距离的方式计算栅极间距。首先计算簇 C_l 的协方差矩阵^[15], 利用协方差

矩阵的特征向量提取出对应圆孔的栅极下层点云数据, 计算式如下

$$M = \begin{bmatrix} \text{cov}(X, X) & \text{cov}(X, Y) & \text{cov}(X, Z) \\ \text{cov}(Y, X) & \text{cov}(Y, Y) & \text{cov}(Y, Z) \\ \text{cov}(Z, X) & \text{cov}(Z, Y) & \text{cov}(Z, Z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$T = [v_3 \ v_2 \ v_1]^{-1} (E - O_l) \quad (14)$$

式中 M 为圆孔 C_l 的边缘点云数据的协方差矩阵; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 与 v_1, v_2, v_3 为协方差矩阵 M 的特征值和特征向量, 且 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$; E 为整体边缘数据; T 为坐标系变换后并以 O_l 为原点的点云边缘数据。从 T 提取出与 z 轴垂直距离小于 R 的点集 L_1 , 加速栅极数据 L_2 为点集 L_1 和圆孔 C_l 的差集, 圆孔的栅极间距 d 计算式如下

$$L_2 = L_1 - p_i(C_l) \quad (15)$$

$$d = \frac{|Ax_l + By_l + Cz_l + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (16)$$

式中 $Ax + By + Cz = D$ 为 L_2 拟合的平面方程, $O_l(x_l, y_l, z_l)$ 为屏栅极圆孔圆心坐标。

3 拱面栅极间距精度验证试验

3.1 试验设计

为了验证基于三维点云的拱面栅极组件层间距测量方法的精度和可靠性, 本文设计了两组对比试验: (1) 对同一圆孔边缘数据添加标准差为 5%, 10% 的高斯噪声, 与原数据结果对比, 分析算法鲁棒性和可靠性; (2) 使用精度为 0.02mm 的探针塞规对栅极组件单孔间距测量 20 次, 计算均值作为栅极单孔间距, 并与本文研究的测量方法进行对比试验。测量对比试验随机抽取 30 个圆孔进行精度验证。

3.2 算法鲁棒性分析

为了验证在不同环境影响下算法对同一圆孔定位精度的鲁棒性, 本文以原始圆孔边缘数据的计算结果为标准, 对数据添加均值为 0, 标准差分别为 5%, 10% 的高斯噪声, 模仿不同环境的干扰情况, 计算噪声模型与原始模型的圆心距离, 分析算法鲁棒性, 添加高斯噪声后的模型如图 9 所示。试验重复 20 次, 对比模型圆心距离如图 10 所示。

由图 10 和表 1 可知, 本文所使用的算法在添加标准差为 5% 的高斯噪声下, 圆心坐标的计算偏差基本在 $10\mu\text{m}$ 以下, 与原始数据的圆心距离平均在 $9\mu\text{m}$ 左右, 标准偏差为 $3\mu\text{m}$; 在标准差为 10% 的高斯噪声下, 对比图 9(a), (b), 点云数据离散程度更高, 均值偏差虽然变得较大, 但标准差变化较小, 中位数和均值相差不多, 表明总体上算法在面对噪声时效果稳定。

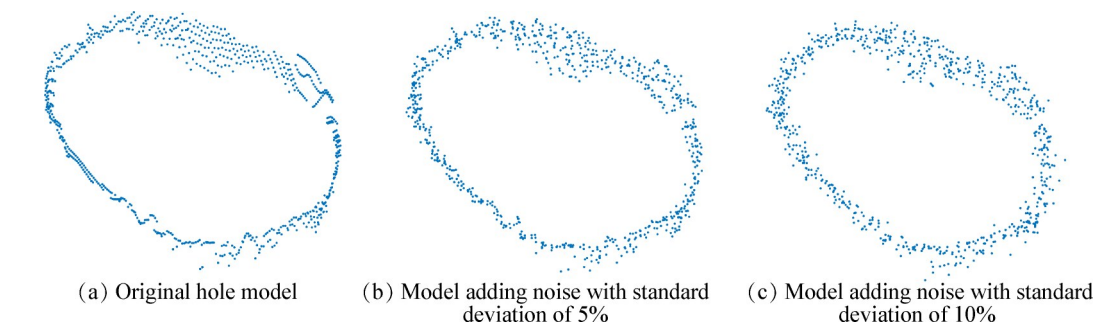


Fig. 9 Edge points with Gaussian noise

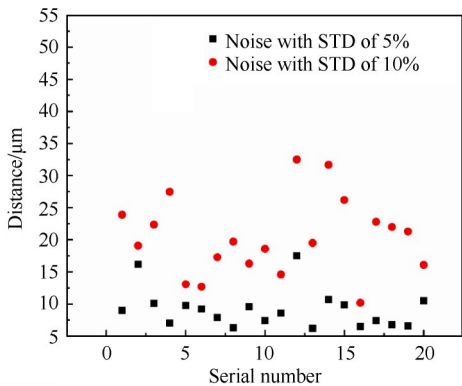


Fig. 10 Distance between the center of the original model and the noise model

Table 1 Main robustness parameters of algorithm

Parameter	5%	10%
Minimum error/ μm	6	10
Median error/ μm	8	20
Maximum error/ μm	18	33
Average error/ μm	9	20
Sigma/ μm	3	5

3.3 间距测量精度分析

本文选择结构和尺寸满足要求的零件作为试验对象,使用精度为0.02mm的探针塞规,以上层栅极孔边缘为基准,测量到下层栅极垂直距离,并作为栅极单孔间距。由于上层和下层栅极孔面经常存在不平行的情况,不同方向上测量的栅极间距大小不同,本文以90°为间隔,对栅极单孔四个方向上的边缘间距分别反复测量5次,总计20次,并计算均值作为栅极单孔间距。栅极间距实际测量与算法计算值如图11所示,实际测量值与计算值的误差如图12所示。

由图11可得,本方法计算值基本全部处于实际测量值误差带范围内,证明算法计算结果基本可靠。由图12和表2可得,整体栅极间距测量值最大误差为36 μm ,误差均值为17 μm ,标准差为10 μm 。该试验证明,本方法可代替人工进行非接触式测量,实现栅极间距检测自动化。

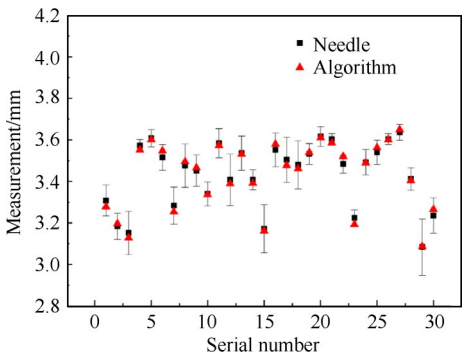


Fig. 11 Grid gap measurement comparison

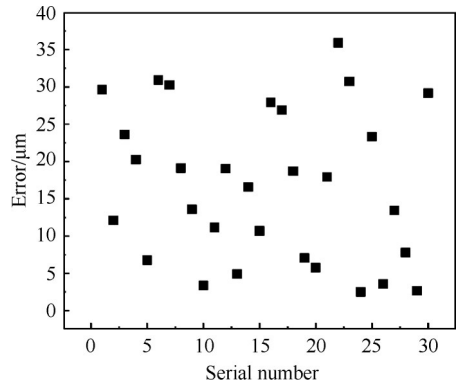


Fig. 12 Grid gap measurement error

Table 2 Main measurements parameters of algorithm

Parameter	Value
Minimum error/ μm	2.5
Median error/ μm	17.2
Maximum error/ μm	35.9
Average error/ μm	16.8
Sigma/ μm	10.0

4 结 论

本文提出了一种基于三维点云的栅极组件间距测量方法,搭建了相关试验平台,并进行精度验证试验,研究结论如下:

(1)提出了一种基于三维点云数据的圆孔特征提取和圆心计算方法,该方法具有较强的噪声抗干

扰能力,在出现异常值和点云边缘密度分布不均的情况下能稳定提取出圆心和圆孔特征。

(2)通过线激光扫描的方式,建立了栅极组件三维模型;通过最大距离分布识别圆孔特征并计算圆心位置,实现栅极间距非接触式自动化检测,检测最大误差为 $36\mu\text{m}$,误差均值为 $17\mu\text{m}$ 。

本文目前利用单线激光传感器进行了测量,采用平面拟合的方法计算了栅极间距,后续将针对单线激光的检测精度不足问题,采用双线激光测量的方法对加速栅极孔洞进行融合曲面重建,从而提高栅极间距的检测精度。

致 谢:感谢上海市松江区科技攻关项目、上海市高水平应用技术大学创新平台建设项目的资助。

参考文献

- [1] 胡 竟,王 亮,张天平,等. LIPS-300 离子推力器环形会切磁场等效磁路分析研究[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 715-720. (HU Jing, WANG Liang, ZHANG Tian-ping, et al. Research on Equivalent Magnetic Circuit of Ring-Cusp Magnet Field for LIPS-300 Ion Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(3): 715-720.)
- [2] 张中磊,丁永杰,于达仁. 面向任务的电推进航天器性能优化与控制[J]. 宇航学报, 2016, 37(8): 1006-1014.
- [3] 孙明明,郑 艺,杨俊泰,等. 30cm 离子推力器在轨环境下的工作点及热控措施研究[J]. 推进技术, 2021, 42(3): 711-720. (SUN Ming-ming, ZHENG Yi, YANG Jun-tai, et al. Working Points and Thermal Control of 30cm Diameter Ion Thruster in Orbit[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(3): 711-720.)
- [4] 孙明明,耿 海,王 亮,等. 空间在轨环境下的 30cm 离子推力器三栅极组件间距变化仿真分析[J]. 宇航学报, 2019, 40(11): 1375-1382.
- [5] Wirz R E, Katz I, Dan M G, et al. Electron Backstreaming Determination for Ion Thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(1): 206-210.
- [6] Soulas G C, Frandina M M. Ion Engine Grid Gap Measurements [C]. *Florida: Proceedings of 40th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.
- [7] 袁杰红,梁 栋,周仕明,等. 离子推力器栅极组件热态间距测量系统研制[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 51-58.
- [8] 唐福俊. 一种用于离子推力器栅极组件的栅间距测量方法和测量具[P]. 中国专利: 201410449605.9, 2014-12-24.
- [9] Trava-Airoldi V J, Garner C E, Pivrotto T J, et al. An Optical Technique to Measure Ion Engine Grid Distortion due to Differential Thermal Expansion [C]. *Orlando: Proceedings of 21st International Electric Propulsion Conference*, 1990.
- [10] Pollard J, Welle R. Thrust Vector Measurements with the T5 Ion Engine [C]. *San Diego: Proceedings of 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1995.
- [11] Qian Xie, Dening Lu, Kunpeng Du, et al. Aircraft Skin Rivet Detection Based on 3D Point Cloud via Multiple Structures Fitting [J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 120(10).
- [12] Arthur D, Vassilvitskii S. K-means++: The Advantages of Careful Seeding [C]. *New Orleans: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2007.
- [13] Ester M, Kriegel H P, Sander J, et al. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise [M]. *Portland: AAAI Press*, 1996.
- [14] Wang Hanzi, Suter David. Robust Adaptive-Scale Parametric Model Estimation for Computer Vision [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(11): 1459-1474.
- [15] Bazazian D, Casas J R, Ruiz-Hidalgo J. Fast and Robust Edge Extraction in Unorganized Point Clouds [C]. *Sydney: International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 2015.

(编辑:梅 瑛)