

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108243

## 基于工业 CT 的零件内外曲面形位误差分析\*

杨 晗<sup>1,2</sup>, 谭川东<sup>1,2</sup>, 盛晋银<sup>1,2</sup>, 司 磊<sup>1,2</sup>, 段黎明<sup>1</sup>

(1 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心 重庆 400044;

2. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044)

**摘 要:**针对具有复杂内腔结构零件的内部曲面形位误差分析困难的问题,提出了一种基于工业 CT 技术的零件复杂内腔的形位误差分析方法。首先,使用工业 CT 对零件进行扫描并重建为测量 STL 模型。然后将设计 IGES 模型离散为 STL 模型与测量 STL 模型进行配准。其次,利用设计 IGES 模型作为引导,判定测量 STL 模型中的点和 IGES 模型各曲面的归属,自动分割测量 STL 模型中的所有曲面。最后,选取设计 IGES 模型的曲面并对曲面对应的点云簇进行形位误差分析。选取百万级测量点云的阀体模型进行实验,完整地分割点云模型所有曲面,选择任意曲面进行形位误差分析,测得选定内部曲面的圆柱度为 1.11 mm、平面度为 0.61 mm、平行度为 1.92 mm。本文方法只需输入零件测量 STL 模型和零件设计 IGES 模型,再选取设计 IGES 模型待测曲面就可以自动地完成零件内外曲面的形位误差分析。

**关键词:** 计算机断层成像;点云曲面自动分割;误差分析;点云配准

**中图分类号:** TP391 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6099

## Form and position error analysis of inner and outer surface of parts based on the industrial CT

Yang Han<sup>1,2</sup>, Tan Chuandong<sup>1,2</sup>, Sheng Jinyin<sup>1,2</sup>, Si Lei<sup>1,2</sup>, Duan Liming<sup>1</sup>

(1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** It is difficult to analyze the shape and position error of internal surface of parts with complex cavity structure. To address this issue, a method of analyzing the shape and position error of complex cavity of parts is proposed, which is based on industrial CT technology. First, the parts are scanned by using industrial CT and reconstructed into the measurement STL model. Then, the design IGES model is discretized into the STL model and the measurement STL model for registration. Secondly, by using the designed IGES model as the guide, the points in the STL model and the belonging of each surface of the IGES model are determined. And all the surfaces in the STL model are automatically segmented and measured. Finally, the surface of IGES model is selected and the point cloud cluster corresponding to the surface is analyzed. The valve body model of the million-dollar measurement point cloud is selected for the experiment. All the surfaces of the point cloud model are completely segmented. The cylindricity, flatness and parallelism of the selected internal surface are measured to be 1.11 mm, 0.61 mm, and 1.92 mm, respectively. In this method, only the input STL model of part measurement and the IGES model of part design are required. The measured surface of IGES model is selected. The internal and external surface of part can be analyzed automatically.

**Keywords:** computed tomography; point clouds segmentation; error analysis; point cloud registration

收稿日期:2021-07-13 Received Date: 2021-07-13

\* 基金项目:国家自然科学基金(52075057)项目资助

## 0 引 言

零件的形位误差包括平面度、圆柱度、平行度、垂直度误差等。对零件的形位误差分析时,常采用三坐标测量(coordinate measuring machine, CMM)、三维激光扫描(3D laser scanner, 3DLS)等技术扫描零件,处理扫描后的数据获取零件的测量模型,然后对测量模型进行形位误差分析。王东霞等<sup>[1]</sup>利用 CMM 和粒子群优化算法实现对曲面的定位,然后计算轮廓峰谷误差实现对零件的外部曲面的形位误差分析。Lu 等<sup>[2]</sup>使用 3DLS 对零件进行扫描,再结合计算机图形学对零件的面轮廓度进行误差分析。孙彬等<sup>[3]</sup>使用 3DLS 获取叶片型面的点云数据,然后依据曲面网格线光顺法重构出曲面,最后根据待测点到重构曲面的距离进行误差分析。上述方法均是对零件外部轮廓度误差进行分析,无法对零件指定曲面进行形位误差分析。

针对零件指定曲面的形位误差分析,Miko<sup>[4]</sup>通过对测量的平面点集进行回归分析,计算有限点集的平面度误差。Li 等<sup>[5]</sup>对测量圆柱点集使用贪婪正弦算法进行数据处理,计算测量点集的圆柱度误差。也有其他学者对曲面的有限点集进行平面度、圆柱度、平行度等形位误差的分析<sup>[6-8]</sup>。上述方法均是对曲面的有限点集进行形位误差分析。针对具有复杂内腔的零件,尚未发现分割零件测量模型内部曲面的有限点集的方法,无法对零件内部曲面进行形位误差分析。

工业计算机断层成像技术(industrial computed tomography, ICT)能够在无损的条件下,对具有复杂内腔结构的零件进行检测,完整地重建零件内部的结构信息<sup>[9-11]</sup>。通过将工业 CT 获得的测量模型与 CAD 模型配准,可以实现零件的误差分析。Kruth 等<sup>[12]</sup>将汽车进风风扇的 CAD 模型和重建的 CT 模型进行配准,对整个风扇进行几何误差分析并实现误差可视化。Yao 等<sup>[13]</sup>基于工业 CT 的三维数据和工件的配准,将配准误差作为零件整体的几何误差进行分析。Nikon 公司首先将液压歧管的 CMM 外轮廓模型和 CAD 模型进行配准得到空间矩阵,然后用空间矩阵使 CT 重建模型和 CAD 模型重合,最终测量各圆柱曲面的几何误差<sup>[14]</sup>。上述基于工业 CT 对零件进行误差分析仅仅针对的是整体或外部规则曲面几何误差,对零件内部指定的非规则曲面的形位误差的分析尚未发现。

综上所述,实现内部自由曲面形位误差分析存在 3 个关键问题。1) 如何选取感兴趣的内部自由曲面。2) 如何对非规则自由曲面进行处理。3) 如何分割出归属于感兴趣内部曲面的点云簇。本文基于工业 CT,提出了一种初始化图形交换规范(initial graphics exchange

specification, IGES)模型引导的零件测量模型曲面自动分割方法,解决了上述问题并实现了零件内外曲面的形位误差分析。首先由工业 CT 扫描零件获取投影数据,并通过三维重建算法<sup>[15]</sup>得到零件的测量立体光刻(stereo lithography, STL)模型。然后以零件的设计 IGES 模型为引导,对测量 STL 模型的曲面进行自动分割。最后拟合分割后的有限点集,对拟合的曲面进行形位误差分析,实现零件内外曲面的形位误差分析。

## 1 模型配准

IGES 模型无法直接与 STL 模型进行配准,需要将设计 IGES 模型通过曲面细分离散为设计 STL 模型,然后对测量 STL 模型和设计 STL 模型进行配准,获取配准的空间旋转平移矩阵  $T$ ,最后对测量 STL 模型的点坐标进行空间变换,实现设计 IGES 模型和测量 STL 模型的配准。

### 1.1 模型配准数据预处理

设计 IGES 模型离散为设计 STL 模型后,只包含特征点。当曲面信息简单时,表示曲面的三角面片数量过少,导致曲面上点数过少,如平面由两个三角面片组成,最终只会用四个点进行平面的表示,无法准确表达平面在整体点云模型中的语义信息。所以配准之前,先对设计 STL 模型进行 Loop<sup>[16]</sup>细分稠密化点云,再进行下采样,使设计点云模型能够完整表达几何模型特征。

与设计模型离散后点云规模过小的问题相反,工业 CT 扫描重建获得的测量 STL 模型,存在点云规模过大的问题,如果直接使用未经处理的测量 STL 模型进行配准,会导致配准效率较低。所以需要测量点云模型进行下采样,提高配准效率。

### 1.2 点云配准

工业 CT 扫描获取的零件点云是完备数据,对完备数据常采用主成分分析法<sup>[17]</sup>(principal component analysis, PCA)进行配准,避免了基于概率的正态分布变换<sup>[18]</sup>(normal distributions transform, NDT)、相干点漂移<sup>[19]</sup>(coherent point drift, CPD)等算法对初始参数敏感性以及基于特征的快速点特征直方图<sup>[20]</sup>(fast point feature histograms, FPFH)等算法大量计算点与点之间特征值的过程,提高了配准效率。但 PCA 配准只使得模型大部分重合,而对形位误差进行定量分析时,对配准精度有较高要求,故需要对模型进行精配准,在 PCA 配准的基础上,使用经典的迭代最近点<sup>[21]</sup>(iterative closest point, ICP)算法对模型进行精配准。同时 PCA 配准提供的初始位置,也解决了 ICP 算法可能陷入局部最优的问题。

## 2 点与空间自由曲面匹配

分割点云模型的所有曲面,需要对测量 STL 模型的点和设计 IGES 模型曲面进行归属关系判定。假设点的归属曲面即三维空间中离该点距离最近的曲面,归属关系判定可以转换为点到空间曲面距离的求解问题。由于自由曲面没有具体的解析表达式,无法通过求解空间曲面方程进行点到空间自由曲面距离的计算。点投影问题一般是通过数值迭代法求解<sup>[22]</sup>,不断逼近距离的真实值。本文将设计 IGES 模型离散,使得 IGES 的曲面转化为有限数量的三角面片,通过遍历求解距离待求点最近的三角面片,最后将三角面片作为中间变量,判定点和空间曲面的归属关系,避免了直接求解点到空间自由曲面距离这一复杂问题。

### 2.1 IGES 模型曲面细分

编写函数从设计 IGES 模型中提取零件模型的各个曲面信息<sup>[23]</sup>,然后将各曲面细分为有限数量的三角面片,设计 IGES 模型曲面细分结果如图 1 所示。

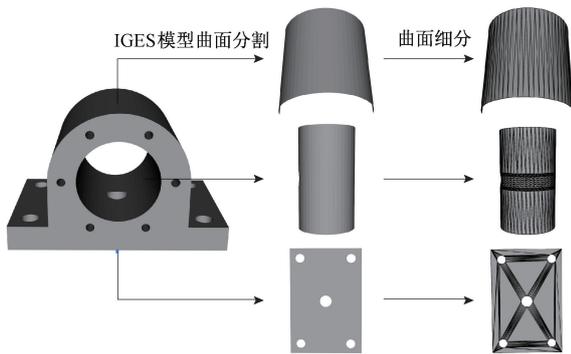


图 1 IGES 模型曲面细分  
Fig. 1 Surface subdivision of the IGES model

### 2.2 点和曲面归属关系判定

为判定测量 STL 模型中的点与设计 STL 模型中三角形的归属和关系,设离散后的设计 STL 模型中所有三角面片集合为  $T\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ , IGES 模型中所有曲面的集合为  $F\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ , 测量 STL 模型构成的点云模型中所有的点的集合为  $P\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 。

对集合  $P$  的每个点  $p_i(x_i, y_i, z_i)$ , 遍历集合  $T$ , 计算  $T$  中所有三角面片到  $p_i$  的距离  $d_i$ 。假设  $t_i$  的 3 点分别为  $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$ , 设  $t_i$  所在的空间平面方程  $\gamma$  为:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

则有:

$$a = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, b = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix}, c = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$d = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

展开行列式,可得计算平面系数的表达式:

$$a = y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \quad (2)$$

$$b = z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \quad (3)$$

$$c = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \quad (4)$$

$$d = -x_1(y_2z_3 - y_3z_2) - x_2(y_3z_1 - y_1z_3) - x_3(y_1z_2 - y_2z_1) \quad (5)$$

最终可求得平面方程,该平面的法向量  $n = (a, b, c)$ 。点与三角面片距离计算如图 2 所示。

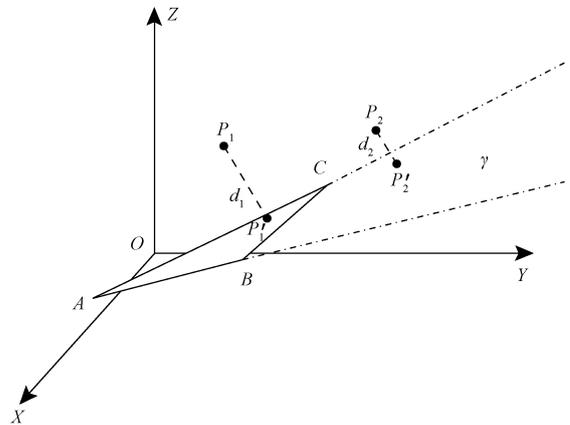


图 2 点与三角面片距离

Fig. 2 Distance between points and triangular patches

只有当  $p_i$  在平面  $\gamma$  的投影点  $p'_i$  在  $t_i$  中时才进行距离  $d_i$  的计算,否则视该点为无效点:

$$d_i = \frac{\|ax_i + by_i + cz_i + d\|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (6)$$

遍历完  $T$  得到距离集合  $D^i\{d_1^i, d_2^i, \dots, d_m^i\}$ , 其中  $D^i$  表示集合  $T$  引为 1 的三角面片到集合  $P$  引为  $i$  的点的距离。 $d_{\min}^i$  为集合  $D^i$  中的最小值,  $t_i$  表示集合  $T$  中到  $p_i$  的距离为  $d_{\min}^i$  的三角形。由于  $t_i$  必然属于集合  $F$  的某个曲面  $f_i$ , 最终形成点  $p_i$  和曲面  $f_i$  的映射关系,  $f_i$  表示点  $p_i$  的归属曲面。此时  $p_i$  到  $f_i$  的距离等于  $d_{p_i}^{f_i}$ , 且  $d_{p_i}^{f_i} = d_{\min}^i$ 。

当遍历完集合  $T$  和  $P$  后,即得到集合  $P$  中每个点和集合  $F$  中各个曲面的距离映射集合  $D_d\{d_{p_1}^{f_1}, d_{p_2}^{f_2}, \dots, d_{p_k}^{f_k}\}$ 。根据集合  $D_d$  中  $f_i$  和  $p_i$  的关系,对于集合  $F$  中的任意曲面  $f_n$ , 必定存在一个  $P$  的子集  $P_n\{p_n^1, p_n^2, \dots, p_n^r\} \in f_n$ , 且  $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P$ 。其中  $p_n^r$  表示属于曲面  $f_n$  的第  $r$  个点。

### 3 误差分析

零件的形位误差包含形状和位置误差,它是指实际形状和实际位置相对理想位置的变动量,而实际待测点相对理想位置的变动量有正负之分,变动量正负如图 3 所示,  $p_1$  相对理想位置在零件外侧,其变动量  $d_1$  为正,  $p_2$  相对理想位置在零件内侧,其变动量  $d_2$  为负,而距离集合  $D_d$  中的距离恒正,故要对集合  $D_d$  进行处理。

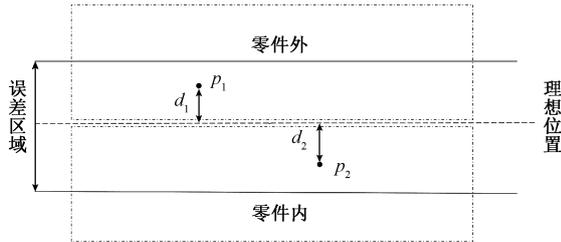


图 3 变动量正负

Fig. 3 Positive and negative changes

#### 3.1 正负偏差判定

以平面的法向量为基准,求待测点与法向量的内积,由内积的正负对距离集合  $D_d$  进行优化。由式(2)~(4)得到平面的法向量  $n(a, b, c)$ , 将平面一般方程转换为点法式方程:

$$a(x - x_o) + b(y - y_o) + c(z - z_o) = 0 \quad (7)$$

其中,三角面片内一点  $O = (x_o, y_o, z_o)$ , 待测点  $p_i(x_i, y_i, z_i)$ , 则点  $O$  与点  $p_i$  组成的向量  $Op_i = (x_i - x_o, y_i - y_o, z_i - z_o)$ 。  $sig$  表示内积的正负,  $n \cdot Op_i$  表示法向量  $n$  和  $Op_i$  的内积,使用  $sig$  对集合  $D_d \{d_{p_1}^1, d_{p_2}^2, \dots, d_{p_k}^k\}$  进行处理:

$$n \cdot Op_i = a(x_i - x_o) + b(y_i - y_o) + c(z_i - z_o) \quad (8)$$

$$sig = \begin{cases} 1, & n \cdot Op_i > 0 \\ -1, & n \cdot Op_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$d_{p_k}^{f_k} = \begin{cases} d_{p_k}^{f_k}, & sig = 1 \\ -d_{p_k}^{f_k}, & sig = -1 \end{cases} \quad (10)$$

#### 3.2 形位误差定量分析

##### 1) 平面度分析

选取需要误差分析的曲面  $f_k$ , 同时获取对应的测量点集  $P_k \{p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^r\}$ , 对集合  $P_k$  采用最小二乘法拟合平面  $f_v$ 。设双向距离集合  $dis \{d_{p_k^1}, d_{p_k^2}, \dots, d_{p_k^r}\}$ , 其中  $d_{p_k^r}$  表示点  $p_k^r$  到拟合平面  $f_v$  的有向距离。则平面度  $flat$ :

$$flat = \max(dis) - \min(dis) \quad (11)$$

其中,  $\max(dis)$  为集合  $dis$  中的最大值,  $\min(dis)$  为集合  $dis$  中的最小值,平面度误差如图 4 所示。

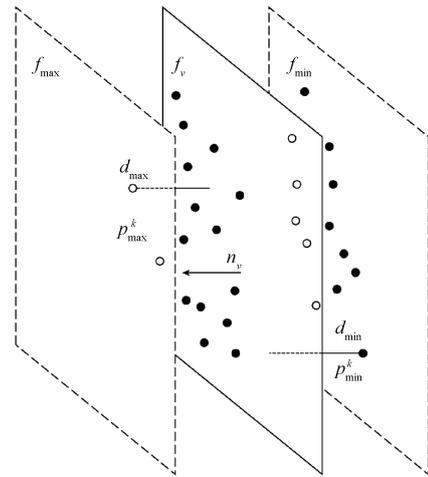


图 4 平面度误差

Fig. 4 Flatness error

##### 2) 平行度分析

平行度误差包括线线平行度、线面平行度、面面平行度,本文以面面平行度分析为例,面面平行度误差的检测需要选定一个面为基准面  $f_s$ , 一个面为待测面  $f_k$ , 相较于平面度的测量,平行度分析中与待测面匹配的点集拟合的平面要与基准面保持平行,故在使用最小二乘法进行平面拟合时,增加约束条件拟合平面法向量  $n_v$  与基准平面的法向量  $n_s$  相等或反向。

约束条件:

$$n_s = n_v \text{ 或 } n_s = -n_v \quad (12)$$

由曲面  $f_k$  获取对应的测量点集  $P_k \{p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^r\}$ , 根据点集  $P_k$  拟合辅助平面  $f_v$ , 设双向集合  $dis \{d_{p_k^1}, d_{p_k^2}, \dots, d_{p_k^r}\}$ , 其中  $d_{p_k^r}$  表示点  $p_k^r$  到拟合平面  $f_v$  的有向距离。则平行度误差  $para$ :

$$para = \max(dis) - \min(dis) \quad (13)$$

其中,  $\max(dis)$  为集合  $dis$  中的最大值,  $\min(dis)$  为集合  $dis$  中的最小值,平行度误差如图 5 所示。

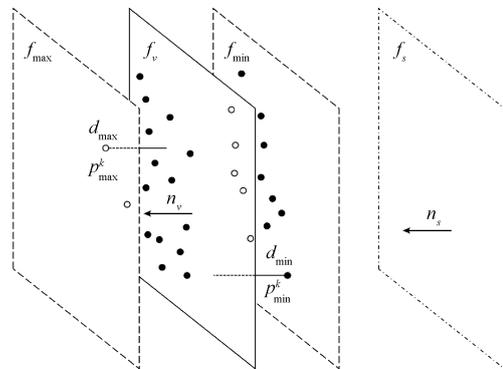


图 5 平行度误差

Fig. 5 Parallelism error

3) 圆柱度分析

圆柱度误差和平面度误差计算方式类似,选取要进行误差分析的圆柱曲面  $f_k$ , 同时获取对应的测量点集  $P_k \{p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^r\}$ , 根据点集  $P_k$  拟合圆柱曲面  $f_v$ , 计算点集  $P_k$  中的点到  $f_v$  的有向距离得到双向距离集合  $dis \{d_{p_k^1}, d_{p_k^2}, \dots, d_{p_k^r}\}$ , 其中  $d_{p_k^r}$  表示点  $p_k^r$  到拟合圆柱面的有向距离。则圆柱度误差  $cyl$ :

$$cyl = \max(dis) - \min(dis) \quad (14)$$

其中,  $\max(dis)$  为集合  $dis$  中的最大值,  $\min(dis)$  为集合  $dis$  中的最小值, 圆柱度误差如图 6 所示。

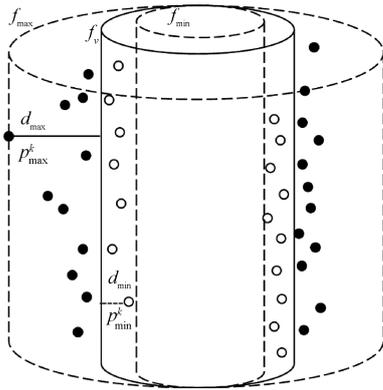


图6 圆柱度误差  
Fig. 6 Cylindricity error

4) 垂直度分析

垂直度误差检测需要选取一个基准平面  $f_s$  和一个待测平面  $f_k$ ,  $f_s$  的法向量为  $n_s$ ,  $f_k$  所对应的点集  $P_k \{p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^n\}$ , 集合  $P_k$  拟合一个辅助平面  $f_v$  且  $f_v$  的法向量  $n_v$  与  $n_s$  垂直, 计算集合  $P_k$  中所有的点到  $f_v$  的距离得到距离集合  $dis \{d_{p_k^1}, d_{p_k^2}, \dots, d_{p_k^n}\}$ ,  $d_{max}$  为  $dis$  中的最大正向距离, 其对应的点为  $p_{max}^k$ ,  $d_{min}$  为  $dis$  中的最大负向距离, 其对应的点为  $p_{min}^k$ 。通过  $n_s$  与  $p_{max}^k$  构建辅助平面  $f_{max}$ , 通过  $n_s$  与  $p_{min}^k$  构建辅助平面  $f_{min}$ ,  $p_{max}^k$  与  $p_{min}^k$  两点的距离即为垂直度, 垂直度误差如图 7 所示, 误差值  $ver$ :

$$ver = p_{max}^k - p_{min}^k \quad (15)$$

4 实验结果及分析

使用 Visual Studio 2017 平台、Open cascade 开源对象库, 实现零件点云模型全曲面分割与形位误差分析的整体流程, 实验机器搭载 AMD Ryzen 7 3700X 处理器和 16 GB 内存。对常见形位误差, 如: 平面度误差、面面平行度误差、面面垂直度误差、圆柱度误差进行了分析。

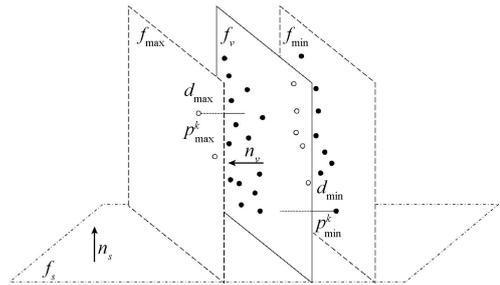


图7 垂直度误差  
Fig. 7 Verticality error

4.1 点云配准结果

点云配准前需要解决设计点云模型几何语义不准确的问题, 先对离散后的设计 STL 模型进行 Loop 细分, 补全设计点云模型几何形貌。图 8 所示为设计点云预处理前后几何形貌, 然后对细分后的设计点云模型使用体素滤波进行下采样, 在保证设计点云模型几何形貌的前提下减少点云规模, 提高配准效率。进行点云配准的设计模型和测量模型的数据如表 1 所示。

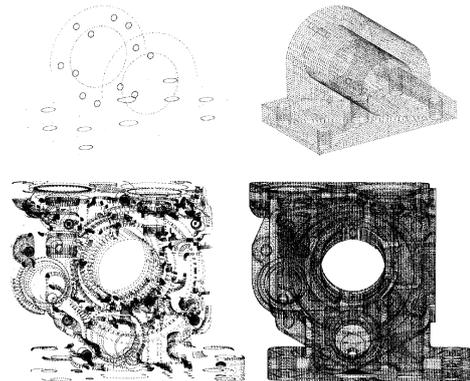


图8 预处理前后设计点云几何形貌  
Fig. 8 Geometric morphology of standard point cloud before and after pretreatment

表1 处理前后的点云模型规模

Table 1 Scale of point cloud model before and after processing

模型	设计 IGES 模型		测量 STL 模型 点云规模
	处理前点云规模	处理后点云规模	
支座	2 744	23 827	35 380
阀体	118 906	111 872	1 131 262

分别选取处理后的设计 STL 模型的 100%、50%、25% 和测量 STL 模型的 100%、50%、25%、10%、5%、2.5% 进行实验, 分析配准误差、配准时间、设计点云规模、测量点云规模之间的关系确定采样规模。

在设计点云规模分别为 100%、50%、25% 时,将测量点云均匀采样至原规模的 100%、50%、25%、10%、5%、2.5%,实验结果如图 9 所示,实线表示设计点云下采样、测量点云规模和配准时间之间的关系。虚线表示设计点云下采样、测量点云规模和配准误差之间的关系。

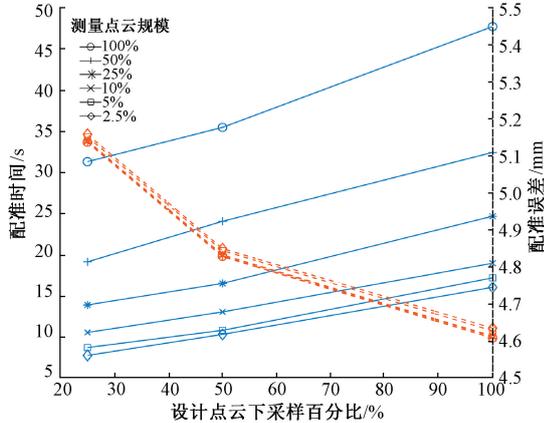


图 9 设计点云进行下采样

Fig. 9 Design of point cloud for down sampling

在测量点云规模分别为 100%、50%、25%、10%、5%、2.5% 时,将设计点云均匀采样至原规模的 100%、50%、25%,实验结果如图 10 所示,实线表示测量点云下采样、设计点云规模和配准时间之间的关系。虚线表示测量点云下采样、设计点云规模和配准误差之间的关系。

由图 9 和 10 可知,对设计点云模型进行下采样时,配准误差大幅增加。对测量点云模型进行下采样时,由于测量点云模型规模远大于设计点云模型规模,下采样

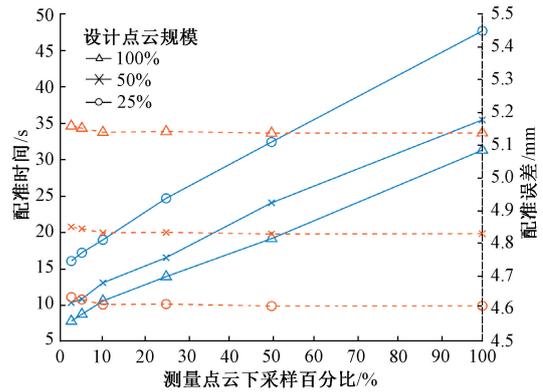


图 10 测量点云进行下采样

Fig. 10 Measure point cloud for down sampling

对配准误差几乎没有影响且配准时间大幅下降。因此,尽量减少对设计点云模型的下采样以提升配准精度,增加对测量点云模型的下采样以提升配准效率。

经上述分析,对支座进行配准时,直接选取处理后的设计点云和测量点云,不需要进行下采样。而对阀体进行配准时,直接选取设计点云规模的 50% 以及测量点云规模的 5%,配准过程相关参数如表 2 所示。

表 2 配准过程相关参数

Table 2 Parameters related to registration process

模型	设计/ %	测量/ %	设计点 云规模	测量点 云规模	配准时 间/s	配准误 差/mm
支座	100	100	23 827	35 380	4.328	0.504 1
阀体	50	5	55 937	56 565	10.83	1.844 4

支座和阀体的配准过程如图 11 所示,图 11(a)为测

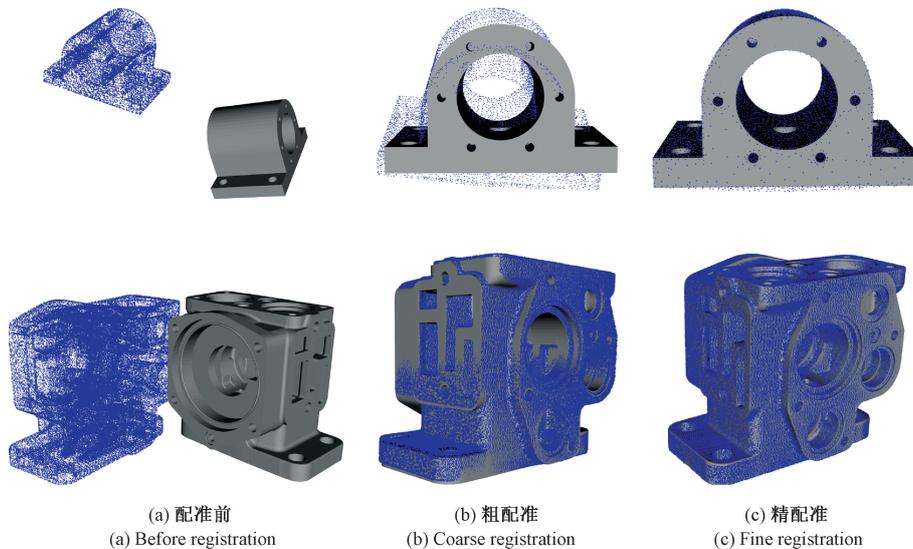


图 11 IGES 模型和点云模型配准结果

Fig. 11 Registration results of the IGES model and the point cloud model

量模型与设计 IGES 模型的初始位置,图 11(b)为粗配准结果,图 11(c)为精配准结果。

#### 4.2 点云分割结果

对配准后的测量点云模型进行点和空间曲面的匹配,自动分割所有曲面。为更加清晰地显示零件点云模型所有曲面的分割结果,将测量点云模型不同的曲面以不同的颜色表示加以区分,分割结果如图 12 所示。

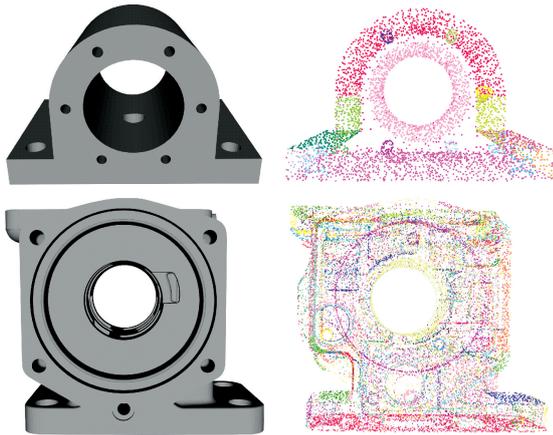


图 12 点云全曲面分割结果

Fig. 12 Segmentation results of point cloud full surface

选取两模型部分曲面为例进行形位误差分析。曲面选择及曲面对应点云簇如图 13 所示。

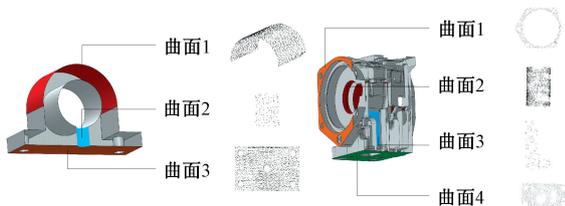


图 13 点云模型部分曲面示意图

Fig. 13 Partial surface sketch of point cloud model

#### 4.3 误差分析结果

对图 13 曲面进行形状误差分析。其中支座的曲面 2 和阀体的曲面 2 和曲面 3 均为零件内部曲面,其余曲面为零件外部曲面。对分割出的点云簇使用最小二乘法拟合圆柱面、平面,计算其圆柱度和平面度,误差分析结果如表 3 所示。

对两个模型进行位置误差分析。选取的基准曲面和待测曲面如图 14 所示,对支座进行垂直度误差分析,对阀体进行平行度误差分析,误差分析结果如表 4 所示。

表 3 圆柱度和平面度误差分析

Table 3 Analysis of cylindricity and flatness error mm

模型	曲面	圆柱度	平面度
支座	曲面 1	0.39	-
	曲面 2	0.61	-
	曲面 3	-	2.64
阀体	曲面 1	-	0.86
	曲面 2	1.11	-
	曲面 3	-	0.61
	曲面 4	-	1.05

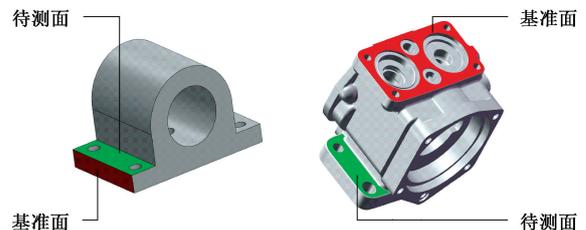


图 14 基准面与待测面

Fig. 14 Datum surface and detection surface

表 4 垂直度和平行度误差分析

Table 4 Error analysis of perpendicularity and parallelism mm

模型	垂直度	平行度
支座	1.13	-
阀体	-	1.92

## 5 结 论

本文提出一种基于工业 CT 技术的复杂内腔零件内外曲面形位误差分析方法,利用工业 CT 技术扫描零件并使用三维重建算法获得零件的测量 STL 模型,再使用 PCA-ICP 算法对设计 STL 模型和测量 STL 模型进行配准,最后借助设计 IGES 模型各曲面作为测量 STL 模型曲面分割的引导条件,对测量 STL 模型所有曲面进行自动分割并形成曲面与点云簇的映射关系,后续只需选取设计 IGES 模型的曲面就能够对零件外部轮廓曲面和复杂内腔曲面进行形位误差分析。该方法解决了以往对零件复杂内腔曲面进行形位误差分析的难题。在实验中,对具有复杂内腔结构的阀体的任意内部曲面进行了形位误差分析,验证了本文方法的可行性。该算法在对大型点云曲面进行自动划分存在耗时久的问题。因此,接下来考虑采用八叉树等数据结构对算法进行优化,降低算法的时间复杂度。

## 参考文献

- [ 1 ] 王东霞,温秀兰,赵艺兵. 基于 CAD 模型引导测量的自由曲面定位及轮廓度误差评定[J]. 光学精密工程,2012,20(12): 2720-2727.  
WANG D X, WEN X L, ZHAO Y B. Localization and profile error evaluation of freeform surface based on CAD model-directed measurement [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2720-2727.
- [ 2 ] LU F, LI N, ZHANG X F. Digital measurement and its error analysis for the machining free-form surface [ J ]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 664: 263-267.
- [ 3 ] 孙彬,杜虎兵,王建华,等. 航发叶片型面激光点云三维重构误差分析 [ J ]. 光子学报, 2018, 47 ( 5 ): 187-195.  
SUN B, DU H B, WANG J H, et al. Analysis of aero-engine blade surface laser point cloud 3D reconstruction error [ J ]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47 ( 5 ): 187-195.
- [ 4 ] MIKÓ B. Assessment of flatness error by regression analysis [ J ]. Measurement, 2021, 171: 108720.
- [ 5 ] LI Q J, NING H F, GONG J, et al. A hybrid greedy sine cosine algorithm with differential evolution for global optimization and cylindricity error evaluation [ J ]. Applied Artificial Intelligence, 2021, 35(2): 171-191.
- [ 6 ] 钱晓明,崔巍,楼佩煌. 高精度曲轴轴颈同步测量及误差分析研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41 ( 3 ): 113-121.  
QIAN X M, CUI W, LOU P H. Research on synchronous measurement and error analysis of crankshaft journal' s high-precision measurement [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 113-121.
- [ 7 ] ŠTRBAC B, MIKÓ B, RODIĆ D, et al. Analysis of characteristics of non-commercial software systems for assessing flatness error by means of minimum zone method [ J ]. Tehnički vjesnik, 2020, 27(2): 535-541.
- [ 8 ] GUO H, ZHANG Z, XIAO M, et al. Tolerance optimization method based on flatness error distribution [ J ]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1): 279-293.
- [ 9 ] DE CHIFFRE L, CARMIGNATO S, KRUTH J P, et al. Industrial applications of computed tomography [ J ]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 655-677.
- [ 10 ] YUAN J, WU Y, ZHANG J. Characterization of air voids and frost resistance of concrete based on industrial computerized tomographical technology [ J ]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 975-983.
- [ 11 ] PLESSIS A D, ROUX S, GUELPA A. Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing [ J ]. Case Studies in Nondestructive Testing & Evaluation, 2016, 6:17-25.
- [ 12 ] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, et al. Computed tomography for dimensional metrology [ J ]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 821-842.
- [ 13 ] YAO G J, ZOU Y N, WANG J, et al. Fully automated registration of 3D CT data to CAD model for surface deviation measurement [ J ]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2020, 27(6): 1101-1119.
- [ 14 ] CHIFFRE L D, ARMIGNATO S, KRUTH J P, et al. Industrial applications of computed tomography [ J ]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 655-677.
- [ 15 ] LIAO Y, DONNE S, GEIGER A. Deep marching cubes: Learning explicit surface representations [ C ]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 2916-2925.
- [ 16 ] KANG H, LI X, CHEN F, et al. Truncated hierarchical loop subdivision surfaces and application in isogeometric analysis [ J ]. Computers & Mathematics with Applications, 2016, 72(8): 2041-2055.
- [ 17 ] LIU D, ZHANG Y, LUO L, et al. PDC-Net: Robust point cloud registration using deep cyclic neural network combined with PCA [ J ]. Applied Optics, 2021, 60(11): 2990-2997.
- [ 18 ] JIW K, LEE B H. Robust and fast 3-D scan registration using normal distributions transform with supervoxel segmentation [ J ]. Robotica, 2016, 34(4):1630-1658.
- [ 19 ] MYRONENKO A, SONG X. Point set registration: Coherent point drift [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32 ( 12 ): 2262-2275.
- [ 20 ] LI P, WANG J, ZHAO Y, et al. Improved algorithm for point cloud registration based on fast point feature histograms [ J ]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(4):045024.
- [ 21 ] WU P, LI W, YAN M. 3D Scene reconstruction based on improved ICP algorithm [ J ]. Microprocessors and

Microsystems, 2020, 75(12):103064.

- [22] LI X, WANG L, WU Z, et al. Convergence analysis on a second order algorithm for orthogonal projection onto curves[J]. Symmetry, 2017, 9(10): 210.
- [23] BEDAKA A K, LIN C Y. CAD-based robot path planning and simulation using OPEN CASCADE [J]. Procedia Computerence, 2018, 133:779-785.

#### 作者简介



杨晗,2019年于湖北工业大学获得学士学位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、逆向工程等。

E-mail: 1006762108@qq.com

**Yang Han** received his B.Sc. degree from Hubei University of Technology in 2019. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interests include machine vision, reverse engineering, etc.



段黎明(通信作者),1985年于成都科技大学获得学士学位,1988年于重庆大学获得硕士学位、1998年于重庆大学获得博士学位。现任重庆大学教授,博士生导师。主要研究方向为工业计算机层析成像技术及系统、精密机械及仪器等。

E-mail: duanliming163@163.com

**Duan Liming** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Chengdu University of Science and Technology in 1985, and received his M.Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 1988 and 1998, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research direction are industrial computer tomography technology and system, precision machinery and instruments.