

DOI:10.13196/j.cims.2015.01.012

基于逆向工程的孔浮动位置度公差建模和配准

丁立军^{1,2}, 戴曙光¹, 穆平安¹, 侯文玫¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海医疗器械高等专科学校 医疗器械工程系, 上海 200093)

摘要: 在应用逆向工程技术对零件孔浮动位置度误差的检测中, 提出一种孔位置度公差边界模板与被测孔的配准算法。根据位置度公差的平面浮动特点, 将被测孔与孔公差边界模板向基准平面投影, 建立被测孔的平面影响区域、区域中心以及边界模板中各孔中心线在基准平面的投影。定义了模板孔投影中心到被测孔影响区域中心的距离测度和相应的权重系数。结合对应点的加权利弗博格—马夸特迭代计算, 实现了孔位置度公差边界模板与被测孔的合理配准。通过实例验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 逆向工程; 浮动位置度误差; 孔位置度公差边界模板; 合理配准

中图分类号: TP391.7; TH164 **文献标识码:** A

Holes floating position tolerance modeling and registration based on reverse engineering

DING Li-jun^{1,2}, DAI Shu-guang¹, MU Ping-an¹, HOU Wen-mei¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Department of Medical Devices Engineering, Shanghai Medical Instrumentation College, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the application of Reverse Engineering (RE) of part holes floating position error detection, an algorithm of Holes Position Tolerance border Template (HPTT) reasonable registration with the measured holes was presented. Based on the plane-floating characteristics of position tolerance, the measured holes and HPTT were projected to the baseline plane to build the influence regions, regional centers of measured holes and the projection points of hole centerlines in HPTT. The definitions of distance measure of template hole projection centers to the influence region centers of measured holes and the distance weighting factor were established. By a weighted Levenberg-Mar (L-M) quardt -iterative process of corresponding points in the baseline plane, the reasonable registration of HPTT and measured holes was achieved. An example was conducted to verify the feasibility and availability of the proposed algorithm.

Key words: reverse engineering; float position error; holes position tolerance border template; reasonable registration

0 引言

位置度用于控制被测要素(点、线、面)对基准的位置误差, 在零件孔组的设计和加工中应用比较广泛, 其精度主要有两方面的要求: 孔组内各孔之间的相互位置精度以及孔组相对于基准面的位置精度。

各孔间的位置关系可以通过孔组中各个孔处于理想相对位置而构成的几何框图来规定, 而孔组相对于基准的位置关系中常常遇到用尺寸公差定位上述几何框图的问题, 即该几何框图允许在一定的几何尺寸公差范围内浮动, 为位置度误差的检测带来了一定困难, 需要借助特定的测量装置进行检测^[1]。

收稿日期: 2014-03-21; 修订日期: 2014-07-09。Received 21 Mar. 2014; accepted 09 July 2014.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075280); 上海市教委重点学科第五期基金资助项目(J50505)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51075280), and the 5th Foundation of Shanghai Municipal Education Commission, China(No. J50505).

随着逆向工程(Reverse Engineering, RE)技术在工业产品数字化和制造中的应用越来越广泛,将 RE 技术应用于零件误差检测相关领域的应用性研究也在积极推进中^[2]。运用 RE 技术对浮动位置度进行检测需要解决两个问题,即建立位置度公差边界模型和边界模型的定位、配准问题。

目前,在误差边界模型的表达方面,Bourdet 提出基于小位移矢量(Small Displacement Torsor, SDT)的公差建模理论^[3-4],建立了基于 SDT 的变动方程和约束方程,求出了公差域的边界和各几何要素的变动表达;文献[5]对典型公差域进行分类,建立了尺寸和位置度公差边界模型,结合几何精度向量化解析和小位移理论,建立了约束几何模型的表达式和微动描述。

在点云模型的定位和配准问题上,1992 年 Besl 和 Mckay 提出的迭代最近点法(Iterative Closest Point, ICP)具有无特征、无分割配准功能,该算法使用的前提是需要有一个比较好的初始位置和姿态估计,且最后往往收敛于局部最优,而不是全局最优^[6-8];文献[9]对从不同角度扫描获取的点云,采用二次曲面拟合,并分别提取其曲率特征,以局部最大变化曲率点作为特征点,通过对曲率 Hausdorff 距离进行计算,求出初始匹配点,然后通过局部表面的圆周形状特征获得精确匹配点,利用四元素和迭带算法求取变换矩阵,完成点云的配准;文献[10]对源点集和目标点集进行一维和高维曲率分析,寻找并精简对应点,通过对应点集的误差评价函数确定精确配准点,采用迭代最近点法求取变换矩阵;文献[11]对 3 维点云深度值进行 Hotelling 方法和规范化处理,通过对所得图像进行带权重自适应平滑处理,降低了点云的空间梯度和局部不均匀性,利用平滑处理对边界和角点没有影响的性质筛选出关键点,通过对点云交叠区域关键点的提取与变换,完成点云的配准;文献[12]在点云中建立 K 维角不变特征向量,该向量中的元素是该点法向量和与之相邻的 K 个点中每一点的法向量夹角。通过对比相邻点云交叠区域点云的角不变特征向量建立匹配点,通过特征点求取变换矩阵完成点云的配准,该算法比迭代最近点法和曲率法更有效率;文献[13]对工业 CT 图像角点特征与工件的计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)模型用旋转投影法求取方向包围盒,进而实现粗配准,再结合角点特征点集和奇异值分解—迭代最近点算法进行精配准,该算法通过粗、精配准两个步骤完成。

目前,RE 测量软件具备了多种点云(模型)配准方法,如 3-2-1 对齐、CAD 工件对齐、Reference Point System(RPS)找正、多点拟合、迭代对齐等。在浮动位置度误差测量的误差模型与被测孔配准中,寻找误差模型与配准孔组间若干特征点对,以特征点对间距离的最小二乘为准则,通过多点对齐完成配准工作。但由于特征点对的选择方法和数量不同,以及变换矩阵求取方法的有效性差异,难以达到孔组中的所有孔配准结果一致,影响了孔组整体测量结果的准确性。

本文对基于尺寸误差定位的位置度公差概念进行分析,构建了位置度公差理想边界模型和变动表达,并根据浮动位置度公差域的平面浮动特点,将被测孔与孔组公差边界模板对基准平面进行投影,建立被测孔的平面影响区域、区域中心以及孔组公差边界模板各孔中心线在基准平面的投影点,通过在基准平面内对应点的加权 L-M(Levenberg-Marquardt)迭代,实现位置度公差边界模板与被测孔的精确配准。

1 用尺寸公差定位的位置度公差描述

在位置度公差的定位中,有一种是用尺寸公差定位的情形^[14],如图 1a 所示为具有四个孔的孔组位置度要求,该位置度对各孔实际轴线的位置精度要求如下(如图 1b):

(1)1,2,3 三孔轴线受尺寸公差带控制,孔 1 的实际轴线必须在 $2\Delta L_1 \times 2\Delta L_2$ 公差带内;孔 2 的实际轴线在 x 方向上,必须在 $\pm\Delta L_1$ 公差带内;孔 3 的实际轴线在 y 方向上,必须在 $\pm\Delta L_2$ 公差带内。

(2)四孔轴线还受位置度公差带控制,因此 1,2,3 三孔实际轴线必须位于两公差带和重叠部分,四个孔的实际轴线落在位置度公差带内方为合格。

(3)孔组几何框图可相对于两基准平面浮动,不受尺寸公差带限制。

2 位置度公差域边界模型及变动描述

2.1 位置度基本公差域及边界模板

公差域的表达可以转化为在零件坐标系下所有边界面或边界线表达的组问题,用数学方程组的形式表达为

$$F_i = F_i(x, y, z), i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1)$$

式中: F 为面或者线的数学方程表达式,具体视面或线的类型确定; n 为公差域边界面或边线的数量。

由于位置度公差域为若干个圆柱面内的区域

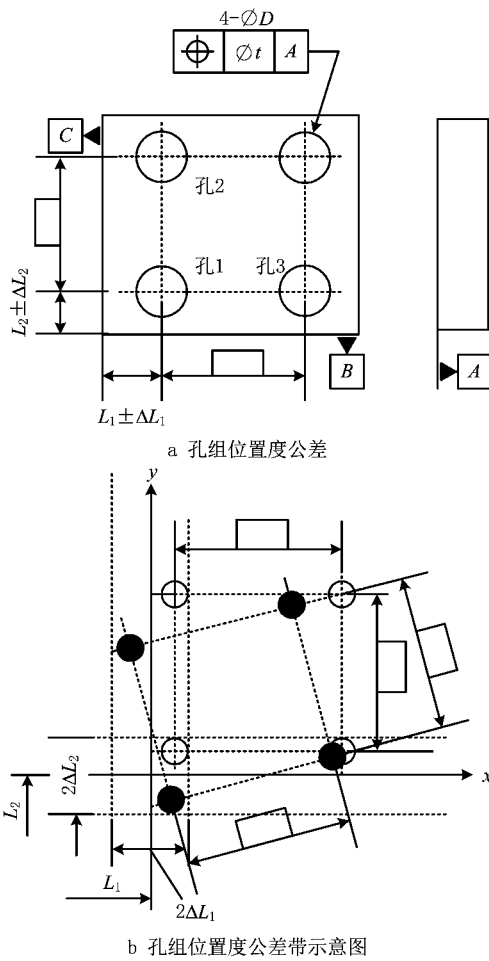


图1 用尺寸公差定位的孔组位置度公差带

(如图 2), 其边界的数学表达式为

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r^2, i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad z_1 \leq z \leq z_2. \quad (2)$$

式中: (x_i, y_i) 为各孔理论公差边界在参考平面上投影的中心点; z_1 和 z_2 为公差域的上下边界值。孔组中各孔的理论公差边界的总和构成了位置度公差边界模板, 以下简称为公差边界模板。

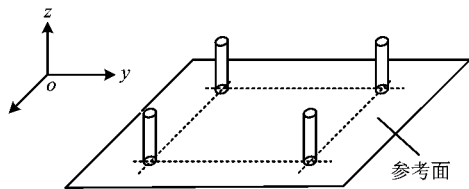


图2 孔组位置度公差边界

2.2 公差边界模板变动的几何表达

公差边界模板与被测孔配准的过程即为公差边界模板相对于零件坐标系的旋转和移动问题, 通常公差边界模板与零件坐标系存在六个方向的自由度, 用变量的方式表示为

$$T = \{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma\}.$$

式中: T 为模板的变动向量, δ 为模板相对于原零件坐标系的移动和转动变量。

由于在公差模板与被测孔组配准过程中, 边界模板的参考平面始终平行于基准 A, 且只有该边界模板与基准面 B 和 C 的相对变动(如图 1), 因此其模型的变动向量为

$$T = \{\delta_x, \delta_y, 0, 0, 0, \delta_\gamma\}.$$

即模板只存在平行于基准 A 平面内的刚体移动和旋转变换, 相应的变换矩阵可简化为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

若原各个孔公差边界在基准面 A 的投影中心坐标为 $P_i = (x_i, y_i, 1)^T (i = 1, 2, \dots, n)$, 则变换后的坐标为

$$P'_i = M \times P_i. \quad (3)$$

经过配准后的位置度公差域边界的数学表达式为:

$$(x - x'_i)^2 + (y - y'_i)^2 = r^2, i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad z_1 \leq z' \leq z_2. \quad (4)$$

3 位置度公差边界的配准

根据位置度定义的要求, 孔组位置度公差边界模板的浮动始终与基准面 A 保持平行, 因此该配准过程可转化为平面配准问题加以解决。如图 3 所示, 在零件上以三个相互垂直的平面拟合相应的与设计基准对应的平面, 建立测量基准, 并建立右手坐标系 $oxyz$, 该坐标系为零件坐标系。

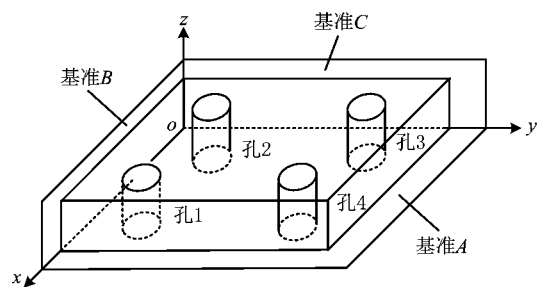


图3 孔组测量基准的建立

以实体模型的三个基准面为参考系建立孔组位置度公差边界模板, 其中边界模板上的孔到第一基准面 A 的投影点为一组圆, 其圆心为 m_1, m_2, \dots, m_n , 求取所有圆心的总重心, 以该重心为原点, 在分别与模型坐标轴平行的方向建立公差边界模板局部坐标系。图 4 所示为具有 4 个孔孔组的公差边界模板及局部坐标系 $o'x'y'z'$ 。

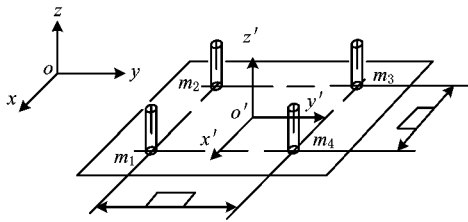


图4 4个孔组位置度公差边界模板及在参考面的投影

3.1 距离测度系数

如图 5 所示,某被测孔中心线段为 o_1o_2 , s 面为投影平面, o_1o_2 在 s 平面上的投影点分别为 o'_1 和 o'_2 , 以线段 $o'_1o'_2$ 为直径画圆, 圆心为 n , 称该圆为被测孔中心线的影响区域。

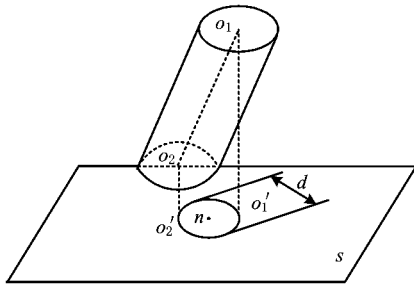


图5 被测孔中心线段在基准面的投影

在孔组公差边界模板与被测孔配准过程中, 将被测孔组中心线段与孔组边界模板的边界分别向某一参考平面进行投影, 同时将配准过程转化为该参考平面内的两组投影进行配准来处理。图 6 所示为 4 个孔孔组的被测孔组中心线段的影响区域与孔组位置度公差边界模板的投影。

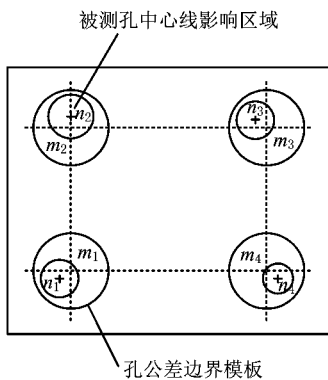


图6 被测孔组中心线段的影响区域与孔组位置度公差边界模板的投影

为使孔组公差边界模板在进行旋转和平移变换后, 公差边界模板所有孔与对应的被测孔影响区域处于同等的偏差程度, 在此引入距离测度的定义如图 7 所示。

设投影平面上的被测孔影响区域为以 n_i 为中心、直径为 d 的圆形区域, 孔的公差边界模板为以

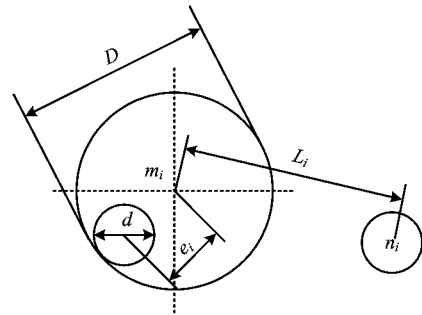


图7 孔投影的距离测度

m_i 为中心、直径为 D 的圆。设模型孔影响区域处于公差模板的内部边缘位置时(图中所示位置), 两圆的中心距离为 e_i , 定义孔的公差模板与实体孔的距离测度系数为

$$\epsilon_i = \frac{l_i}{e_i} = \frac{\|m_i n_i\|}{e_i} = \frac{2\sqrt{(x_{m_i} - x_{n_i})^2 + (y_{m_i} - y_{n_i})^2}}{D - d_i} \quad (5)$$

式中 l_i 为被测孔中心线影响区域中心到对应理想框架模型中心投影点的距离。

3.2 配准变换

配准变换的过程即对孔的公差边界模板进行平面旋转和平移变换, 使每个模板孔到被测孔之间的距离具有相近的距离测度系数且取最小值, 即满足

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \min. \quad (6)$$

令 $\lambda'_i = \frac{1}{\epsilon_i}$, 对所有 λ'_i 进行归一化处理:

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{\sum_{i=1}^n \lambda'_i} \quad (7)$$

则可将 λ'_i 看作最小二乘距离的权重系数。

于是配准问题可归结为求取变换矩阵, 使带权重的被测孔投影中心到孔公差边界模板投影中心距离的平方和为最小, 即求 $\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \|m_i n_i\|^2$ 为最小值时的变换矩阵。

该变换矩阵可以通过 L-M 迭代算法求出^[15-16]。L-M 算法又称为阻尼最小二乘法, 是解决非线性最小二乘法的有力工具, 它是马夸特(Marquardt)在利弗博格(Levenberg)工作基础上提出的一种非常精致的迭代策略, 算法如下:

令

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [f_i(x)]^2 = \frac{1}{2} f(x)^T f(x); \quad (8)$$

$$f(x+h) \triangleq f(x) + J(x)h = l(h). \quad (9)$$

式中 $J(x)$ 为 f 对 x 的雅可比行列式。

则

$$F(x+h) \triangleq L(h) = \frac{1}{2} I(h)^T I(h)。 \quad (10)$$

当 $F(x+h)$ 取得最小值时 $L'(h)=0$, 在高斯—牛顿迭代公式的基础上, 构造 L-M 迭代公式为

$$\mathbf{h}_{LM} = -[\mathbf{J}(x)^T \mathbf{J}(x) + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}(x)^T f(x), \quad u > 0。 \quad (11)$$

该式比高斯—牛顿迭代公式增加了 $\mu \mathbf{I}$ 项, 可以保证 $\mathbf{J}(x)^T \mathbf{J}(x) + \mu \mathbf{I}$ 正定, 且当 μ 值较大时 \mathbf{h}_{LM} 的方向为最速下降方向, 使其更接近全局最优解。

在各个孔的公差域边界投影中心到相应被测孔投影中心的配准过程中, 设位置度公差模板孔中心到基准面的投影点为 P , 经过变换后的投影点位置变为 P' , 则

$$P' = M \times P。 \quad (12)$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_x \\ \sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P' = \begin{bmatrix} x'_{p1} & \cdots & x'_{pn} \\ y'_{p1} & \cdots & y'_{pn} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} x_{p1} & \cdots & x_{pn} \\ y_{p1} & \cdots & y_{pn} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}。$$

构造算式

$$F(\theta, t_x, t_y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [(x'_{pi} - x_{qi})^2 + (y'_{pi} - y_{qi})^2]。 \quad (13)$$

式中 $(x_{qi}, y_{qi}, 1)$ 为被测孔与 $(x_{pi}, y_{pi}, 1)$ 对应的匹配点。令

$$f_i(\theta, t_x, t_y) = \lambda_i [(x'_{pi} - x_{qi})^2 + (y'_{pi} - y_{qi})^2]^{\frac{1}{2}}。 \quad (14)$$

该式的雅可比行列式具有如下形式:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1}{\partial t_x} & \frac{\partial f_1}{\partial t_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial \theta} & \frac{\partial f_i}{\partial t_x} & \frac{\partial f_i}{\partial t_y} \end{bmatrix}。 \quad (15)$$

通过迭代式 (11) 可以得到每一步的迭代变量 \mathbf{h}_{LM} , 经过一定迭代步骤, 可以得到 $F(\theta, t_x, t_y)$ 小于阈值时的转换矩阵 M 。

为提高迭代效率和转换精度, 可以采取以下配准步骤:

(1) 将孔组公差边界模板放置在初始位置, 使其局部坐标系与基准坐标系重合。

(2) 对所有被测孔在基准面的影响区域中心点

求取重心, 并将该重心平移到基准坐标系的原点。

(3) 进行配准变换。

(4) 将配准好的位置度公差边界模板和被测孔平移回原被测孔位置。

变换过程如下:

$$\begin{bmatrix} x''_{p1} & \cdots & x''_{pn} \\ y''_{p1} & \cdots & y''_{pn} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & t'_x \\ 0 & 0 & t'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_x \\ \sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{p1} & \cdots & x_{pn} \\ y_{p1} & \cdots & y_{pn} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}。 \quad (16)$$

式中: t'_x 和 t'_y 为配准好的位置度公差边界模板和被测孔平移回原孔位置的位移量; $(x''_{pi}, y''_{pi}, 1)^T (i=1, 2, \dots, n)$ 为所求的各个孔位置度公差边界在基准面投影中心的坐标值。

3.3 实体模型中孔组位置度误差的测量

通过 RE 测量方法建立满足测量精度要求的实体孔组点云模型, 并建立其孔组位置度公差边界模板。通过上述算法完成实体模型与边界模板的配准后, 即可对实体模型中的孔组进行位置度误差的测量。

设被测孔组中共有 n 个孔, 对孔组中的第 i 个孔取其中心线段的两个端点, 测量其到配准后相应模板孔中心线的距离分别为 η_{i1} 和 $\eta_{i2} (i=1, 2, \dots, n)$, 且令 $\eta_i = \max(\eta_{i1}, \eta_{i2})$, 则该孔的位置度误差为 $\phi_i = 2\eta_i$, 对整个孔组而言, 令 $\phi_c = \max(\phi_i) (i=1, 2, \dots, n)$, ϕ_c 值即为最终测量的模型孔组的位置度误差。

4 举例

4.1 测量要求

某零件的 4 个 $\phi 6$ 孔具有如图 8 所示的位置度要求, 其中孔 1, 2, 4 的位置首先应满足相应的尺寸公差要求; 该孔组的 4 个孔还应满足位置度要求, 该位置度公差边界模板相对于被测孔组可以浮动, 因此在测量孔组的位置度误差时, 先要将位置度公差边界模板与实际孔组进行配准。

4.2 建立零件的三维模型和测量基准

对零件进行 RE 建模, 建立满足测量精度的点云模型(在后续测量中不考虑建模误差的影响), 对点云模型进行去噪、点云简化处理后建立三维点云模型(如图 9), 随后建立相互垂直的基准拟合平面(如图 10)。

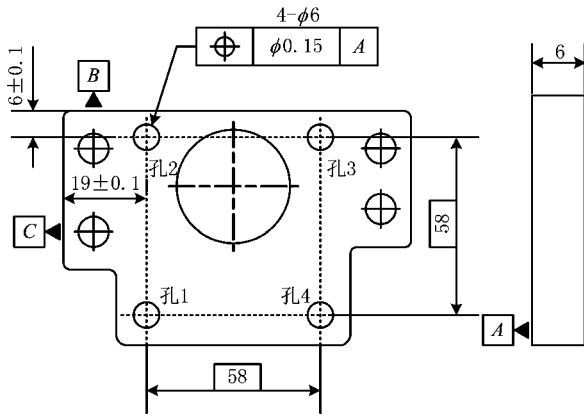


图8 零件的位置度要求

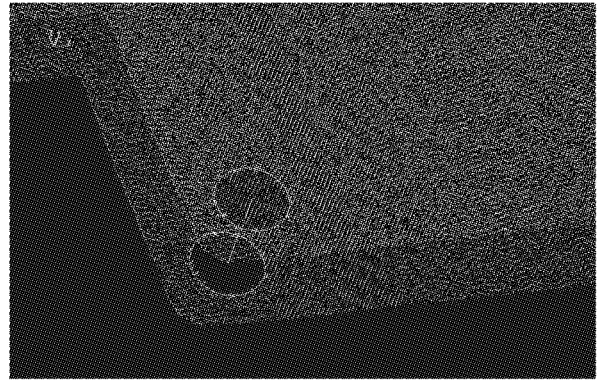


图11 零件孔中心线的拟合

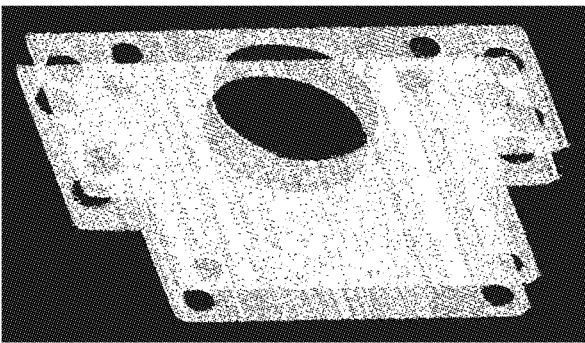


图9 零件的部分点云模型

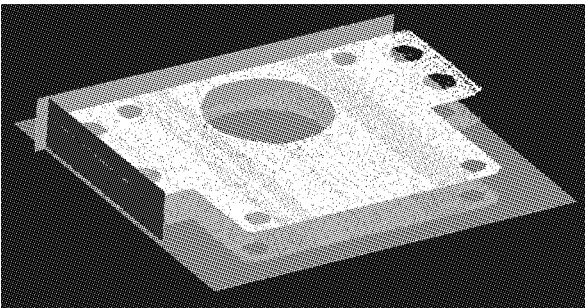


图10 位置度测量基准的建立

4.3 模板匹配

在进行配准之前,需求取每个被测孔的中心线段,以及该中心线段在基准面 A 上的投影影响区域和中心点坐标。

同时,建立孔组位置度公差边界模板和局部坐标系。在配准前将孔组位置度公差边界模板放置在初始位置,使其局部坐标系与基准坐标系重合。通过测量得到如表 1 和表 2 所示的参数数据。

通过设定迭代阈值,经过 6 次迭代,得到匹配转换矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0.0014 & -0.0559 \\ -0.0014 & 1 & -0.0563 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

变换后的相关参数值如表 2 所示。

表 1 匹配前孔组参数测量值 mm

孔序号	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4
公差模板各孔中心投影初始位置	(29, -29)	(-29, -29)	(-29, 29)	(29, 29)
被测孔影响区域中心坐标	(63.968, 18.965)	(5.963, 19.084)	(6.034, 77.069)	(64.048, 77.01)
各被测孔影响区域中心重心投影坐标	(35, 48.032)			
被测孔影响区域直径 d_i	0.055	0.040	0.048	0.022
e_i	0.0475	0.0550	0.0510	0.0640
λ_i	0.22	0.19	0.36	0.23

表 2 匹配后的参数 mm

孔序号	孔 1	孔 2	孔 3	孔 4
匹配后的模板孔投影中心坐标	(63.904, -77.129)	(5.903, 19.017)	(5.985, 77.017)	(63.985, 76.936)
模板孔投影中心到相应被测孔影响区域中心的距离值	0.071	0.075	0.072	0.098
距离测度 (l_i/e_i)	1.49	1.36	1.41	1.53

由式(3)和式(4)可以建立配准后孔组的公差边界表达式

$$(x - x''_i)^2 + (y - y''_i)^2 = r^2, i = 1, 2, 3, 4;$$

$$0 \leq z''_i \leq z。$$

其中 (x''_i, y''_i) 为表中匹配后模板孔投影中心的坐标值, $r=0.075, z=6$ 。

该零件模型配准后,对孔组中每个孔的位置度误差进行测量,结果如表 3 所示。

表 3 零件模型测量结果 mm

孔序号(<i>i</i>)	η_i	ϕ_c
1	0.097	0.206
2	0.090	
3	0.083	
4	0.103	

由于孔组位置度误差测量值 $\phi_c=0.206$, 大于零件模型位置度误差要求 ($\phi=0.15$), 故测量结果为不合格。

5 结束语

本文围绕基于 RE 技术的零件浮动位置度检测, 提出孔组位置度公差边界模板与被测孔组的合理配准问题, 根据孔组位置度公差边界模板的平面浮动特点, 提出将位置度边界模板与被测孔组向基准面投影, 将配准过程进行二维化处理。在配准过程中引入距离测度权重因子进行 L-M 算法迭代, 并在配准完成后, 对孔组位置度公差边界进行模型描述, 为应用 RE 技术进行零件浮动位置度检测提供了一种有效的方法。进一步将对浮动位置度公差边界模板与被测孔组的配准结果提出评估要求和算法进行研究, 并分析测量要求与配准评估结果的关系, 使该研究更具有实际工程意义。

参考文献:

- [1] WANG Yujie, YIN Baohua. Design method and application of holes poison error synthetic gauge[J]. Mechanical Engineer, 2013(9):46-47(in Chinese). [王玉杰, 殷保华. 孔位置度综合量规的设计方法与应用[J]. 机械工程师, 2013(9):46-47.]
- [2] SONG Hao, JIANG Changhua. Methods of form error detection on reverse engineering[J]. Tool Technology, 2011, 45(7): 92-94(in Chinese). [宋浩, 蒋昌华. 基于逆向工程技术的形状误差检测方法[J]. 工具技术, 2011, 45(7):92-94.]
- [3] WANG Haoyu, PRAMANIK N, ROY U. A scheme for mapping tolerance specifications to generalized deviation space for use in tolerance synthesis and analysis[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2006, 3(1):81-89.
- [4] ZHANG Mabiao, YE Xiaoping, LIU Yusheng. Mathematical model of dimensional tolerance of straight line based on variation along DOF[J]. Journal of Engineering Design, 2009, 12(3):172-177(in Chinese). [张马彪, 叶晓平, 刘玉生. 基于自由

作者简介:

丁立军(1971—),男,山东龙口人,上海理工大学光电信息与计算机工程学院博士研究生,上海医疗器械高等专科学校医疗器械工程系讲师,研究方向:测试信息获取与处理、计算机图形图像处理, E-mail: dinglj111@163.com;
戴曙光(1957—),男,上海人,教授,硕士,研究方向:工业光电检测技术与装置、在线检测技术与装置;
穆平安(1964—),男,上海人,教授,硕士,研究方向:智能与虚拟仪器技术、机器视觉检测技术;
侯文玫(1950—),女,山东青岛人,研究员,博士,研究方向:精密测试技术与装置。

度变动的直线尺寸公差数学模型[J]. 工程设计学报, 2009, 12(3):172-177.]

- [5] WANG Jie, LIU Jianhua, LIU Weidong, et al. Modeling of tolerance zone in virtual environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(12): 2595-2603(in Chinese). [王洁, 刘检华, 刘伟东, 等. 虚拟环境中公差域建模技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12):2595-2603.]
- [6] BESL P, MCKAY H. A method for registration of 3D shapes[J]. Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [7] AIGER D, MITRA N, COHEN O. 4-points congruent sets for robust surface registration[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3):1-10.
- [8] LI Shifei, WANG Ping, SHEN Zhenkang. A survey of iterative closest point algorithm[J]. Signal Processing, 2009, 25(10):1582-1588(in Chinese). [李世飞, 王平, 沈振康. 迭代最近点算法研究进展[J]. 信号处理, 2009, 25(10):1582-1588.]
- [9] HE Bingwei, LIN Zeming, LI Y F. An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46(3):53-60.
- [10] PENG Bo. Study of registration for laser 3D point cloud data[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011(in Chinese). [彭博. 激光三维扫描点云数据的配准研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.]
- [11] LIU Yonghuai, MARTIN R, DOMINICIS L, et al. Using retinex for point selection in 3D shape registration[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(6):2126-2142.
- [12] JIANG Jun, CHENG Jun, CHEN Xinglin. Registration for 3-D point cloud using angular-invariant feature[J]. Neurocomputing, 2009, 72(16/17/18):3839-3844.
- [13] ZHANG Zhibo, ZENG Li, HE Hongju. Improved comparison inspection algorithm between ICT images & CAD model[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(6):2342-2345(in Chinese). [张志波, 曾理, 何洪举. 改进的工业 CT 图像与 CAD 模型的比对检测[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6):2342-2345.]
- [14] LIAO Nianzhao. The foundation of interchangeability and measurement technology[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1989(in Chinese). [廖念钊. 互换性与测量技术基础[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989.]
- [15] MADSEN K, NIELSEN H, TINGLEFF O. Methods for nonlinear least squares problems[EB/OL]. [2013-08-12]. http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc2download.php/3215/pdf/imm3215.pdf.
- [16] CAO Hongxing, LIU Jiahang, RUAN Ping. Computation of transformation matrix using L-M algorithm[J]. Modern Electronics Technology, 2008(24):99-101(in Chinese). [曹红杏, 柳稼航, 阮萍. L-M 算法在变换矩阵计算中的应用[J]. 现代电子技术, 2008(24):99-101.]