DOI: 10.3901/JME.2020.04.042

基于最小包容区域法的圆度误差评定方法*

岳龙龙 黄强先 梅 隼 程荣俊 张连生 陈丽娟
(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要: 圆度误差的准确评定对轴和孔类零件的质量评判有很重要的意义。针对目前常用的圆度误差评定方法存在原理误差或模型误差的问题,提出一种完全符合最小包容区域法定义的圆度误差评定方法。该方法将区域搜索算法和圆度误差最小包容区域法评定的几何结构相结合,利用区域搜索算法确定准圆心,再根据准圆心位置和几何结构,对其进行判断和调整,最终找到准确的最小包容区域圆心,并给出最小包容区域圆度误差的精确解。构造多组仿真数据,利用此方法的评定结果与预设值相比较,证明了该方法的有效性和正确性;并利用该方法对其他文献中的数据进行评定与比较,数据处理的结果进一步显示了该方法的评定结果精确可靠,稳定性好,且效率高,可以有效地克服现有圆度误差评定方法难以找到准确最小包容区域圆心的缺陷。

关键词: 圆度误差; 最小包容区域; 交叉结构; 区域搜索算法
中图分类号: TG161

Method for Roundness Error Evaluation Based on Minimum Zone Method

YUE Longlong HUANG Qiangxian MEI Jian CHENG Rongjun
ZHANG Liansheng CHEN Lijuan

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: It is very important for the quality evaluation of shaft and hole parts to evaluate the roundness error accurately. Aiming at the problems of principle error or model error in the commonly used roundness error evaluation methods, a roundness error evaluation method which fully meets the definition of the minimum zone method is proposed. This method is an evaluation method that combines the area searching algorithm with the geometrical structure evaluated by the minimum zone method of roundness error. The quasi-central center are determined by the area searching algorithm. Then it is judged and adjusted according to the quasi-central center and geometrical structure. Finally, it can accurately find the center of the minimum zone circle. So the exact roundness error of the minimum zone method can be obtained. Several sets of simulation data are constructed. And the validity and correctness of this method are proved by comparing the evaluation results of this method with the preset values. After evaluating other literatures' data and comparing, the results further show that the evaluation results of this method are accurate, reliable, stable and efficient. It can effectively overcome the shortcomings of current roundness error evaluation methods.

Key words: roundness error; minimum zone; cross structure; area searching algorithm

0 前言

在精密制造中,对机械零件几何参数误差的控制越来越严格。圆度误差是评价回转体零件的一个重要指标,它的大小直接反映了回转体零件的回转精度和配合面的接触状况等,对机械零件的功能和寿命有很重要的影响。因此,圆度误差的准确评定对回转体机械零件合格性的判定十分重要。

按照国际标准规定^[1-2],圆度误差为包容实际圆轮廓的半径差为最小的两个同心圆的半径差。圆度误差的评定算法有四种,分别是最小二乘法,最小外接圆法,最大内接圆法和最小包容区域法^[3]。其中,最小二乘法理论成熟,简便易行,是最常用的方法,但最小二乘法不符合国际标准定义的最小条件。最小外接圆法主要用来评定外表面的圆度误差,最大内接圆法主要用来评定内表面的圆度误差,但实际上,对某一轮廓,有时符合三点或者两点接触形式的内接圆或者外接圆并不唯一,这样就使确定最小外接圆和最大内接圆很困难,在应用中极为不便^[4]。最小包容区域法符合标准定义中的最小条件,

* 国家自然科学基金(51475131, 51705123)和中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2018HGTA0211, JZ2017HGBZ0943)资助项目。20190225 收到初稿,20190719 收到修改稿

得到的圆度误差值为唯一最小值，也是圆度误差评定出现不一致时的仲裁方法，但其算法属于无约束非线性化问题，不能利用计算机对其直接求解。

国内外学者对基于最小包容区域法的圆度误差评定算法进行了很多的研究，也得到了很多成果，代表性的算法有：① 区域搜索法，如圆度误差的网格搜索算法^[5]，基于区域搜索的圆度误差评定算法^[6]和基于几何优化的圆度误差评定算法^[7]等，这类方法原理简单，可满足一定精度，但不一定能获得符合最小包容区域定义的结果；② 智能优化算法，如遗传算法^[8]，粒子群算法^[9]和改进蜂群算法^[10]等，智能优化算法速度快，有很好的稳定性，但存在相关参数(如迭代步数、学习因子等)如何确定的难题；③ 按数学算法对采样点进行筛选的方法，如单纯形法和仿增量算法^[11]等，线性规划的方法可能会陷入多个最优解或者无解的情况；④ 根据最大内接圆和最小外接圆确定最小包容区域圆的方法^[12-16]，这些算法大多是通过多组数据进行评定证明了其正确性，例如文献^[15]中指出提出的方法模型不能单独根据数学定义来判断。因此这些算法中的一些过程还有待严格的数学证明。

针对上述方法存在原理误差或模型误差，不能可靠地找到符合最小包容区域法定义的圆度误差的缺点。本文提出了一种将区域搜索算法和圆度误差最小包容区域法评定的几何结构相结合的圆度误差评定方法。该方法原理简单，不存在原理误差或模型误差，得到的结果符合最小包容区域法定义，避免了出现多个解，局部最优解或者无解的缺点，而且具有很好的稳定性。

1 圆度误差最小包容区域法评定模型

1.1 圆度误差最小包容区域法评定的目标函数

按照国际标准规定^[1-2]，圆度误差为包容实际圆轮廓的半径差为最小的两个同心圆的半径差。因此，圆度误差最小包容区域法评定的目标函数可表示为

$$\begin{cases} f_1 = \max \{ \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \} \\ f_2 = \min \{ \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \} \\ f = f_1 - f_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中， (x_0, y_0) 为最小包容区域圆心坐标， $i=1, 2, \dots, N$ 为采样数据点的序号， (x_i, y_i) 为采样数据点的坐标， f 为最小包容区域圆度误差。由上式可知，最小包容区域法圆度误差的评定属于无约束

非线性化问题，利用计算机直接对其求解非常困难。

1.2 圆度误差最小包容区域法评定的几何结构

最小包容区域法进行圆度误差评定的几何结构为“2+2”形式^[13,15-16]。“2+2”形式满足：① 被测的数据点中至少有四个点在一组同心圆上，这四个点被称为控制点；② 四个控制点中有两个点在外圆上，另外两个点在内圆上，且对这四个控制点来说，沿顺时针或逆时针某一方向，内圆上控制点与外圆上控制点交替出现；③ 内圆上两个控制点确定的线段与外圆上两个控制点确定的线段相交于一点，即控制点满足交叉结构。“2+2”形式的几何结构如图1所示。

图1 圆度误差最小包容区域法的“2+2”形式

在图1中， A 和 B 为外圆上两个控制点， C 和 D 为内圆上两个控制点。最小包容区域法的圆度误差值即为这两个同心圆的半径差值，且根据几何知识可知，外圆上两点连线的中垂线和内圆上两点连线的中垂线的交点 O 即为最小包容区域圆心。

线段 AB 的端点坐标为 $A(x_A, y_A)$ 和 $B(x_B, y_B)$ ，则其中垂线公式为

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 \quad (2)$$

同理，线段 CD 端点坐标为 $C(x_C, y_C)$ 和 $D(x_D, y_D)$ ，其中垂线公式为

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = (x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)，就可得到由外圆控制点 A ， B 和内圆控制点 C ， D 确定的最小包容区域圆心，其坐标 $O(x_O, y_O)$ 为

$$\begin{pmatrix} x_O \\ y_O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A - x_B & y_A - y_B \\ x_C - x_D & y_C - y_D \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} 0.5 \times (x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2) \\ 0.5 \times (x_C^2 - x_D^2 + y_C^2 - y_D^2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

2 评定方法

首先,在以最小二乘圆心为圆心,最小二乘误差为半径的圆内确定最小包容区域圆心所在范围。

其次,在确定的范围内进行区域搜索,根据圆度误差最小包容区域法定义来确定准圆心位置。当准圆心位置与最小包容区域圆心足够接近时,它们有相似的性质。

然后,由准圆心和圆度误差最小包容区域法的几何结构来确定外圆上两个点和内圆上两个点,依据圆度误差最小包容区域法定义判断当前4个点是否符合要求。若不符合,则进行调整;若符合,则当前4个点即为控制点。

最后,将控制点先后代入式(4)和式(1),计算得出最小包容区域圆心和圆度误差。

上述方法进行圆度误差最小区域评定过程如图2、3所示。

图2 圆度误差最小包容区域法评定

图3 图2中参考圆内部放大

3 评定步骤

(1) 确定最小包容区域圆心所在范围。根据采样点数据 $P_i(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$, 采用线性化最小二乘法得到最小二乘圆心 $O_{LS}(ox, oy)$ 、最小二乘半径

R_{LS} 和最小二乘圆度误差 v_{LS} 。

计算公式为

$$ox = -E/2 \quad oy = -F/2 \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} E \\ F \\ G \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T I$$

$$H = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix}$$

$$I = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ \vdots \\ x_i^2 + y_i^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{pmatrix}$$

$$R_{LS} = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + \left(\frac{F}{2}\right)^2 - G}$$

将 $O_{LS}(ox, oy)$ 坐标代入式(1), 可得到最小二乘球度误差 v_{LS} 。此时认为最小包容区域圆的圆心在以 O_{LS} 为圆心, v_{LS} 为半径的圆内。

在以最小二乘圆心 $O_{LS}(ox, oy)$ 为圆心, 以最小二乘误差 v_{LS} 为半径的圆内设置搜索点, 搜索点的坐标 $O_{JK}(J, K)$ 为

$$\begin{cases} J = ox + \frac{m_1 \times v_{LS}}{1000} \times \cos\left[\frac{\pi}{4} \times (n_1 - 1)\right] \\ K = oy + \frac{m_1 \times v_{LS}}{1000} \times \sin\left[\frac{\pi}{4} \times (n_1 - 1)\right] \\ m_1 = 0, 1, \dots, 1000 \\ n_1 = 1, 2, \dots, 8 \end{cases} \quad (6)$$

分别以 $O_{JK}(J, K)$ 作为假定最小包容区域圆心, 代入式(1)计算, 那么每个搜索点都对应一个距离差值。选取这些距离差值中的最小值对应的搜索点, 此点比其他搜索点更接近于最小包容区域圆心。若 Q 为满足条件的点, 直线 $O_{LS}Q$ 与 x 轴夹角为 θ , $O_{LS}Q'$ 为以 O_{LS} 为端点, 沿着由 O_{LS} 到 Q 方向, 长度为 v_{LS} 的线段。那么 $O_{LS}Q'$ 绕 O_{LS} 从 $\theta - \pi/4$ 旋转到 $\theta + \pi/4$ 所组成的扇形区域即为最小包容区域圆心的范围。

(2) 区域搜索, 确定准圆心位置。在最小包容区域圆心所在范围内设置搜索点, 搜索点的坐标 $O_{ST}(S, T)$ 为

$$\begin{cases} S = ox + \frac{m_2 \times v_{LS}}{1000} \times \cos\left[\theta - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{32} \times (n_2 - 1)\right] \\ T = oy + \frac{m_2 \times v_{LS}}{1000} \times \sin\left[\theta - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{32} \times (n_2 - 1)\right] \\ m_2 = 0, 1, \dots, 1000 \\ n_2 = 1, 2, \dots, 17 \end{cases} \quad (7)$$

依次将搜索点 $O_{ST}(S, T)$ 作为假定最小包容区域圆心，代入式(1)计算。每个搜索点对应一个距离差值，选取这些距离差值中的最小值对应的搜索点，将其作为准圆心 $O_q(x_q, y_q)$ 。

(3) 坐标平移变换并排序。以 $O_q(x_q, y_q)$ 为原点，对采样点 $P_i(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ 坐标平移得到 $P'_i(x'_i, y'_i), i=1, 2, \dots, n$ ，坐标平移变换公式为

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

坐标平移变换不会改变原数据的轮廓。由平移后坐标系的 x 轴正半轴开始对 $P'_i(x'_i, y'_i), i=1, 2, \dots, n$ 按逆时针方向排序。

(4) 确定外圆上两个点和内圆上两个点。计算采样点 $P'_i(x'_i, y'_i), i=1, 2, \dots, n$ 到坐标原点的距离，选取距离最大值、次大值和最小值对应的采样点 $U(x_U, y_U)$ 、 $V(x_V, y_V)$ 和 $u(x_u, y_u)$ 作为外圆上两个点和内圆上第一个点。线段 UV 将所有采样点分为两个部分，与 u 在线段同侧的点集和与 u 在线段异侧的点集。第一部分的点集不满足“2+2”形式，因此，内圆上第二个点在第二部分的点集中。如图 4 所示。

图 4 根据“2+2”形式确定内圆上第二个点

依次将第二部分的点集作为假定内圆上的第二个点，先后运用式(4)和式(1)，那么每个点对应一个距离差值，选取距离差值的最小值对应的点作为内圆上第二个点 $v(x_v, y_v)$ ，如图 5 所示。

图 5 内圆上第二个点位置

(5) 判断、调整以确定控制点。由步骤(4)中得到的 U 、 V 、 u 和 v 四个点，可确定一组圆心为 $W(x_w, y_w)$ ，内径为 R_u ，外径为 R_U 同心圆。

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_U - x_V & y_U - y_V \\ x_u - x_v & y_u - y_v \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} 0.5 \times (x_U^2 - x_V^2 + y_U^2 - y_V^2) \\ 0.5 \times (x_u^2 - x_v^2 + y_u^2 - y_v^2) \end{pmatrix}$$

$$R_u = \sqrt{(x_u - x_w)^2 + (y_u - y_w)^2}$$

$$R_U = \sqrt{(x_U - x_w)^2 + (y_U - y_w)^2}$$

计算 $P'_i(x'_i, y'_i), i=1, 2, \dots, n$ 到圆心 $W(x_w, y_w)$ 距离 $d_i, i=1, 2, \dots, n$ ，最小值用 $d_{\min}$ 表示，其对应的采样点为 $P'_{\min}(x'_{\min}, y'_{\min})$ ，最大值用 $d_{\max}$ 表示，其对应的采样点为 $P'_{\max}(x'_{\max}, y'_{\max})$ 。

比较 $d_{\min}$ 和 R_u 的大小，如果 $d_{\min} < R_u$ ，说明存在位于当前同心圆的内圆之内的点，那么就令 $P'_{\min}$ 为新的 u ，返回步骤(4)。如果 $d_{\min} \geq R_u$ ，说明不存在位于当前同心圆的内圆之内的点，那么就比较 $d_{\max}$ 和 R_U 的大小，如果 $d_{\max} > R_U$ ，说明存在位于当前同心圆外圆之外的点，返回步骤(2)，将式(7)中的角度(初始值为 $\pi/32$)改变为原来的一半，以此类推；如果 $d_{\max} \leq R_U$ ，说明不存在位于当前同心圆外圆之外的点，此时的 U 、 V 、 u 和 v 为符合圆度误差最小包容区域法定义的控制点。

(6) 计算最小包容区域圆心坐标和圆度误差值。对步骤(5)中确定的 4 个控制点，利用式(4)，可得出圆心坐标 $O'_{mz}(x'_{mz}, y'_{mz})$ ，平移变换可得到原始采样点数据对应的最小包容区域圆心，其坐标 $O_{mz}(x_{mz}, y_{mz})$ 为

$$\begin{pmatrix} x_{mz} \\ y_{mz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_{mz} \\ y'_{mz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} \quad (9)$$

再将 $O_{mz}(x_{mz}, y_{mz})$ 代入式(1)可得出最小包容区域圆度误差 e_{mz} 。

利用 Matlab 软件进行编程。图 6 为该圆度误差最小包容区域法评定方法的程序流程图。

图 6 圆度误差最小包容区域法评定程序流程图

4 仿真及实例验证

4.1 仿真验证

根据圆度误差最小包容区域法的“2+2”形式构造数据，验证以上所述的圆度误差评定方法的正确性。对数据的构造思路为设定一组同心圆的内径和外径的大小，设定内外圆上四个控制点的位置，使其满足“2+2”形式，然后在由这一组同心圆构成的圆环内填充数据点。

这组构造采样点数据以(0,0)为圆心，且设置同心圆的外径为 1 mm，内径为 0.998 mm，即圆度误差为 0.002 mm，构造数据的坐标如表 1 所示。另外，通过测试这些数据的所有可能组合，得到的最小区域圆心和最小区域圆度误差结果与预设值一致。由表 1 容易得出，外圆上两个控制点的序号为 1 和 9，内圆上两个控制点的序号为 5 和 13。

对构造的采样点数据分别利用最小二乘法、粒子群算法(PSO)和上文提出的方法进行处理。其中，粒子群算法采用的是自适应权重粒子群算法，这种方法很好地平衡了粒子群算法的全局搜索能力和局

部改良能力，参数设置中种群个数 $N=40$ ，惯性权重 $\omega=0.6\sim 0.9$ ，学习因子 $c_1=c_2=2$ ，循环次数 $M=100$ 。数据处理的结果如表 2 所示。

表 1 构造数据的坐标

序号	x/mm	y/mm
1	1.000 00	0.000 00
2	0.866 02	0.500 00
3	0.510 00	0.859 73
4	0.705 20	0.706 30
5	0.000 00	0.998 00
6	-0.705 83	0.706 00
7	-0.858 00	0.513 20
8	-0.518 90	0.854 30
9	-1.000 00	0.000 00
10	-0.705 82	-0.706 00
11	-0.857 00	-0.514 00
12	-0.520 00	-0.854 00
13	0.000 00	-0.998 00
14	0.709 00	-0.704 90

表 2 数据处理的结果

评定方法	圆心坐标		圆度误差值/mm
	x/mm	y/mm	
最小二乘法	$1.061\ 346\times 10^{-4}$	$-8.267\ 876\times 10^{-5}$	$2.188\ 811\times 10^{-3}$
PSO	$2.650\ 972\times 10^{-8}$	$5.250\ 172\times 10^{-8}$	$2.000\ 079\times 10^{-3}$
上文方法	0	0	0.002
评定方法	外圆控制点序号	内圆控制点序号	迭代次数
最小二乘法	9	13	—
PSO	9	5	100
上文方法	9,1	5,13	1

从表 2 可以看出，最小二乘法得到的圆度误差为 0.002 188 811 mm，PSO 算法得到的结果为 0.002 000 079 mm，本文提出方法得到的圆度误差值为 0.002 mm。因此，PSO 算法比最小二乘法得到的结果更精确，但仍是一个近似值，这是因为 PSO 算法存在模型误差，是一种近似求解方法。但利用本文提出的方法对数据进行处理的结果与预设值完全一致，说明此方法不存在原理误差和模型误差，可以得到完全符合最小包容区域法定义的精确解。

4.2 实例验证

采用文献[12]中的 39 个数据采样点对本文提出的方法进行验证，39 个数据点的坐标如表 3 所示。在表 4 中列出了文献[13]中对这组采样数据点分别利用最小外接圆法，最大内接圆法和最小包容区域法评定的结果，其中的最小包容区域法是由最小外接圆和最大内接圆与最小包容区域圆的关系而确定的方法。另外，对这组采样点数据利用最小二乘法、粒子群算法(PSO)和本文提出的方法进行处理，其中，PSO 算法参数设置与第 4.1 节中一致。数据处

理的结果如表 5 所示。

表 3 文献[12]中采样点的坐标

序号	x/mm	y/mm	序号	x/mm	y/mm
1	1.024 9	0.086 3	11	-0.068 3	0.938 2
2	0.999 1	0.222 6	12	-0.843 2	0.415 7
3	0.597 4	0.773 6	13	-0.902 2	0.289 0
4	0.473 1	0.848 5	14	-0.939 4	0.156 1
5	0.880 3	0.479 4	15	-0.207 1	0.921 8
6	0.801 7	0.589 9	16	-0.338 1	0.878 2
7	0.952 7	0.355 1	17	-0.464 3	0.813 2
8	0.704 7	0.688 4	18	-0.577 1	0.736 9
9	0.210 1	0.929 5	19	-0.776 3	0.536 7
10	0.070 8	0.948 3	20	-0.683 8	-0.748 5
21	-0.579 5	-0.842 4	31	0.995 0	-0.327 2
22	-0.961 8	0.017 0	32	1.021 8	-0.192 1
23	-0.945 4	-0.260 5	33	-0.068 6	-1.051 2
24	-0.907 7	-0.395 6	34	0.071 0	-1.056 8
25	-0.844 3	-0.520 3	35	0.208 7	-1.037 7
26	-0.776 4	-0.639 4	36	0.344 5	-1.007 8
27	-0.463 5	-0.919 5	37	0.708 2	-0.798 2
28	0.473 6	-0.950 7	38	0.887 3	-0.583 2
29	0.594 2	-0.878 1	39	0.951 0	-0.457 8
30	-0.205 9	-1.026 9			

表 4 文献[13]中对 39 个数据点的评定结果

评定方法	圆心坐标		圆度误差值
	x/mm	y/mm	/mm
最大内接圆法	0.035 5	-0.053 3	0.008 8
最小外接圆法	0.034 9	-0.053 0	0.009 1
最小包容区域法	0.035 6	-0.052 9	0.008 6
评定方法	外圆控制点序号		内圆控制点序号
最大内接圆法	15		12,25,32
最小外接圆法	7, 15, 34		12
最小包容区域法	15, 34		12,32

表 5 数据处理结果

评定方法	圆心坐标		圆度误差值/mm
	x/mm	y/mm	
最小二乘法	$3.555\ 072 \times 10^{-2}$	$-5.359\ 231 \times 10^{-2}$	$9.193\ 929 \times 10^{-3}$
PSO	$3.561\ 482 \times 10^{-2}$	$-5.292\ 950 \times 10^{-2}$	$8.537\ 574 \times 10^{-3}$
上文方法	$3.561\ 497 \times 10^{-2}$	$-5.292\ 948 \times 10^{-2}$	$8.537\ 464 \times 10^{-3}$
评定方法	外圆控制点序号	内圆控制点序号	迭代次数
最小二乘法	15	32	—
PSO	9	5	100
上文方法	15, 34	12, 32	1

对比表 4 和表 5 可以看出, 利用本文提出的圆度误差最小包容区域评定方法得到的 39 个数据中的控制点与文献[13]中的最小包容区域法得到的控制点完全一致, 但本文提出方法得到的最小包容区域圆度误差(0.008 537 46 mm)比文献[13]中给出的最小包容区域误差(0.0086 mm)和 PSO 算法得到的

圆度误差(0.008 537 57 mm)更小。

4.3 结果分析

在仿真试验和实例验证中, 通过将本文的评定方法与 PSO 算法和其他文献提出方法得到的结果进行对比, 证明了提出的圆度误差最小包容区域评定方法符合定义, 得到的结果是精确解。而且仿真和实例验证中, 程序只运行了一次, 表明了此方法迭代次数少, 效率高。

5 结论

提出的圆度误差最小包容区域评定方法符合定义, 克服了区域搜索算法、PSO 算法等方法不能可靠找到最小包容区域圆心的缺点, 得到的圆度误差是精确解; 对控制点的判断、调整和确定过程类似于控制系统中的“负反馈调节”, 因此, 对于每一组给定数据, 本文评定方法得到的结果稳定。

本文提出的将区域搜索算法和圆度误差最小包容区域法评定的几何结构相结合的评定方法原理简单, 不用满足“小偏差”假设, 对采样点数据的分布没有要求, 也不会出现智能优化算法或线性规划算法中陷入局部最优解的情况。因此, 该方法具有适用性。

需要指出的是, 本文提出方法所得结果依赖于区域搜索算法的精度, 而区域搜索算法的精度是由径向步进值(本文取 $v_{LS}/1000$)和角度步进值(本文初始值取 $\pi/32$)两个参数决定的, 可以通过减小参数的值来提高区域搜索算法的精度, 但这会导致计算量的增加。在实际中, 依据本文设置的参数值, 利用程序对仿真的一组几十, 上百甚至上千个数据进行处理, 处理结果与预设值完全一致, 也对其他文献中的已确定最小包容区域的数据进行评定, 处理结果与文献所得结果也完全一致。且实际运行时程序耗时少, 效率高。

参 考 文 献

- [1] The Standards Policy and Strategy Committee. DD CEN ISO/TS 12181-1 : 2007 Geometrical product specifications(GPS)-roundness-part 1 : vocabulary and parameters of roundness[S]. London, UK: the British Standards Institution, 2008.
- [2] The Standards Policy and Strategy Committee. DD CEN ISO/TS 12181-2 : 2007 Geometrical product specifications(GPS)-roundness-part 2 : specification operators[S]. London, UK : the British Standards Institution, 2008.

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7235-2004 产品几何量技术规范(GPS)评定圆度误差的方法 半径变化量测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 7235-2004 Geometrical product specification(GPS)-methods for the assessment of departure from roundness-measurement of variations in radius[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [4] 徐志玲, 刘宇, 程琦. 4 种圆度误差评定方法分析[J]. 计量学报, 2009, 30(5): 38-41.
- XU Zhiling, LIU Yu, CHENG Qi. Analysis of the four kinds of roundness error evaluation methods[J]. Acta Metrologica Sinica, 2009, 30(5): 38-41.
- [5] 雷贤卿, 畅为航, 薛玉君, 等. 圆度误差的网格搜索算法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2324-2329.
- LEI Xianqing, CHANG Weihang, XUE Yujun, et al. Evaluation of roundness error based on mesh search algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2324-2329.
- [6] 黄富贵, 郑育军. 基于区域搜索的圆度误差评定方法[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 117-119.
- HUANG Fugui, ZHENG Yujun. A method for roundness error evaluation based on area hunting[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 117-119.
- [7] 张春阳, 雷贤卿, 李济顺, 等. 基于几何优化的圆度误差评定算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 8-12.
- ZHANG Chunyang, LEI Xianqing, LI Jishun, et al. Method for roundness error evaluation based on geometry optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 8-12.
- [8] YAN Liwen, YAN Bing, CAI Lanrong, et al. Research on roundness error evaluation of shaft parts based on genetic algorithms with transfer-operator[C]//2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments(ICEMI 2009), August 16-19, 2009, Beijing, China, 2009: 1439-1443.
- [9] 王怡. 圆度误差粒子群智能评定的不确定度评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- WANG Yi. Uncertainty assessment for roundness error particle swarm optimization(PSO) intelligent evaluation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [10] 罗钧, 林于晴, 刘学明, 等. 改进蜂群算法及其在圆度误差评定中的应用[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 27-32.
- LUO Jun, LIN Yuqing, LIU Xueming, et al. Research on roundness error evaluation based on the improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 27-32.
- [11] 岳武陵, 吴勇. 基于仿增量算法的圆度误差快速准确评定[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 87-91.
- YUE Wuling, WU Yong. Fast and accurate evaluation of the roundness error based on quasi-incremental algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 87-91.
- [12] JYWE Wen-yuh, LIU Chien-hong, CHEN Chao-kuang. The min-max problem for evaluating the form error of a circle[J]. Measurement, 1999, 26(4): 273-282.
- [13] LI Xiuming, SHI Zhaoyao. The relationship between the minimum zone circle and the maximum inscribed circle and the minimum circumscribed circle[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 284-290.
- [14] LI Xiuming, ZHANG Jingcai, LIU Hongqi. Determination of the minimum zone circle based on the minimum circumscribed circle[J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(1): 7002.
- [15] LIU Fei, XU Guanghua, LIANG Lin, et al. Intersecting chord method for minimum zone evaluation of roundness deviation using cartesian coordinate data[J]. Precision Engineering, 2015, 42: 242-252.
- [16] LIU Fei, XU Guanghua, LIANG Lin, et al. Minimum circumscribed circle and maximum inscribed circle of roundness deviation evaluation with intersecting chord method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(12): 2787-2796.

作者简介: 岳龙龙, 男, 1995 年出生。主要研究方向为圆度及球度误差的评定模型研究及其仿真。

E-mail: yllhfut@163.com

黄强先(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳米三维测量技术、纳米扫描探针技术、仪器精度理论。

E-mail: huangqx@hfut.edu.cn