

文章编号 1004-924X(2018)10-2438-08

工件圆度误差测量不确定度评定

王东霞*, 温秀兰, 乔贵方

(南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要:为了实现工件圆度误差的不确定度评定,对基于三坐标测量机的工件圆度轮廓数据的采样策略、圆度评定方法及不确定度评定方法进行研究。首先,根据工件圆度轮廓特征进行实验测量,获取不同工件的多个样本。接着,基于最小二乘法和微分进化优化算法对样本的圆度误差进行了误差评定。然后,在分析比较误差大小的基础上,说明了采用的采样策略和微分进化评定算法。最后,基于圆度误差评定结果运用了测量不确定度表示指南(GUM)和蒙特卡洛方法(MCM)进行不确定度评定。实验结果表明:微分进化算法与最小二乘法相比均值差最大达到 $1.1\ \mu\text{m}$,MCM方法比GUM方法得到的标准不确定度均值小 $0.02\ \mu\text{m}$ 。合理的采样点数、微分进化算法及MCM不确定度评定方法可以得到更稳定可靠、精度高的评定结果。

关键词:圆度误差;不确定度评定;采样策略;微分进化;蒙特卡洛方法

中图分类号:TH161.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182610.2438

Estimation of uncertainty in measuring the workpiece circularity error

WANG Dong-xia*, WEN Xiu-lan, QIAO Gui-fang

(School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

* Corresponding author, E-mail: wangdongxia93@163.com

Abstract: In order to realize the uncertainty evaluation of the workpiece circularity error, the sampling strategy, error evaluation method, and uncertainty of the circular outline of the workpiece were investigated based on the Coordinate Measuring Machine (CMM). First, to achieve many samples from different workpieces, circular outlines were measured. Next, the sample circularity errors were evaluated according to the Differential Evolution (DE) algorithm. Then, by comparing the errors, the adopted sampling strategies and the DE algorithm were explained. Finally, based on the results of the circularity error, the uncertainty was evaluated by applying the GUM and MCM methods. The maximum average difference is $1.1\ \mu\text{m}$, and the average standard uncertainty of the MCM method is $0.02\ \mu\text{m}$ less than the GUM method. More stable, reliable, and accurate results can be obtained using reasonable sampling points, DE algorithm, and MCM evaluation method.

Key words: circularity error; uncertainty evaluation; sample strategy; differential evolution; MCM

收稿日期:2018-03-12;修订日期:2018-04-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51675259);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20170763);江苏省高校自然科学基金资助项目(No. 16KJB460013);南京工程学院科研基金资助项目(No. ZKJ201609)

1 引言

圆度误差作为评价圆柱零件的一个重要指标,在机械制造、电力、运输、航空航天、自动检测等领域中的主轴回转误差评价、精密测量工具和圆柱度零件高精度误差评定方面起着非常重要的作用^[1]。不确定度理论是现代测试技术、仪器仪表及工程实验等领域不可缺少的重要理论。不确定度在所有测量过程中是不可避免的,形状误差测量不确定度的准确评定十分重要。本文主要针对工件圆度误差进行了不确定度评定研究。

根据 ANSI 和 ISO 尺寸与公差标准,圆度误差指的是包含所有轮廓点的两同心圆之间的最小半径差。在众多圆度评定算法中,最小二乘法和最小区域法是两种常用的圆度误差评估方法^[1]。最小二乘拟合算法因其计算简便,广泛应用于三坐标测量机上^[2],然而最小区域法是最适合的评估算法,因为它满足 ISO 标准的定义,能够给出最准确的拟合结果。为了从给定的点集中获得最小区域的圆度误差, Samuel 和 Shunmugam^[3]提出了一种新启发式算法解决内凸(内壳 inner hull)问题,并采用等距与等角度法评估圆度误差;Huang^[4]提出了一种新的方法用于圆度误差解决方法,通过隔离关键数据点尽可能地减少冗余数据点周围的计算,提高了计算效率;Zhu 等^[5]提出了通过计算两个凸多边形之间的最小平移距离来决定最速下降方向的圆度评估算法。这些圆度误差评定方法基于数学理论或几何方法,实现起来比较复杂。

无论采用什么算法,形状误差的测量不确定度总是存在的,因为圆度采样点通常来自于圆度轮廓特征的一部分。对于同样的圆度特征,如果样本大小或抽样数据点的位置变化,评定的圆度误差会有所不同。由于测量的不确定性,对同一被测轮廓不同次测量所得到的结果都不一样。为此,研究人员^[6-7]对被测轮廓采样的不确定性进行了广泛的研究,综合考虑被测轮廓的尺寸和形状、采样策略、测点数量等因素,结果表明,测量点数量对测量结果的不确定性的影响远远大于其他因素的影响。因此测量点数越多,越能反映被测轮廓的真实形状特征,测量结果的不确定性就越小。但是,测点数据越多,计算工作量就越大^[8]。

采样策略通常考虑采样方法、时间和成本及获取最多代表信息的样本大小^[9]。因此,采样策略涉及在测量圆上取多少点以及这些点如何分布的问题,这是一个测量不确定度的主要组成部分。常用的采样技术有等间隔采样策略、随机采样策略和分层采样策略。Chan 等^[10]提出均匀覆盖整个工件形状的等间隔采样法,采集到的点代表了工件的几何特征。Odi^[11]指出等间隔采样是最合适的方法,因为有最小的不确定度能够适当地检验形状误差。这种方法比其它采样技术更容易在测量机上编程实现等角度或等距离移动。等间隔采样技术已被普通用户证实是最实用的技术^[9,10]。

Dhanish 和 Mathew^[12]研究了三个坐标测量机测量点对圆度误差不确定度的影响,提出在圆截面上使用接触式探针应该采样 22 个点。Jiang 和 Feng^[1]提出按照一个满意的轮廓置信水平圆度可以采用确定性的轮廓评定,算法的优势在于对于一个理想圆,如果样本量是大于或等于确定性轮廓的最高频率的两倍,样本量或者采样点的分布对于所评定的圆度值来说几乎没有影响。一般来说,采样获取的信息质量取决于采样点的分布位置和点数,如果能得到更多的采样点数就可以改善采样精度,但是采样点数越多需要的测量和计算时间越多。因此,在工件尺寸测量时应该同时考虑采样点数、测量与计算时间以及结果的准确度。在等间隔采样技术基础上选择多少采样点数更合适,是本文对工件圆度误差测量不确定度研究的关键之一。

过去的文献中,圆度误差的不确定度计算方法主要基于 GUM 框架^[13-14],尽管 GUM 对不确定度的评估提供了定义和标准程序,但是这种程序是繁杂的,难以解决复杂的尺寸测量问题。而蒙特卡洛仿真技术(MCM)对于复杂的尺寸测量可以进行直接、准确的不确定度评估^[15-16]。不需要考虑状态函数是否非线性和随机变量之间有何种相关性,只需确定参数的分布状态和期望值,并且方法思路简单易于编制程序。

目前,基于坐标测量机的圆度误差测量不确定度研究主要集中在采样策略、拟合算法、测量设备与环境影响、不确定度的计算方法等方面。本文按照圆度误差特征,给出了基于三坐标测量机测量的不确定度评定与验证过程,建立了最小二

乘法与最小区域法的圆度数学模型,应用微分进化算法进行圆度误差的评定,提出了合适的采样点数,分析了测量不确定度的主要来源,给出了 GUM 和 MCM 方法的测量不确定度评定结果和 95% 置信概率下的包含区间,并用实例验证了所提算法的有效性。

2 圆度误差评定数学模型与拟合算法

2.1 数学模型

最小二乘法(Least Square Method, LSM)和最小区域法(Minimum Zone Method, MZC)同时用来计算圆度误差,两种方法的数学模型描述如式(1)和式(2)所示。

假定一个圆截面上的测量点集 $P_i(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$, n 是测量点集 P 的数据点数), 则有:

$$f(a', b', r) = \min \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - a')^2 + (y_i - b')^2} - r)^2, \quad (1)$$

其中 (a', b') 和 r 分别是最小二乘圆的圆心和半径。

MZC 方法的数学模型为:

$$f(a^*, b^*) = \min(\max \sqrt{(x_i - a^*)^2 + (y_i - a^*)^2} - \min \sqrt{(x_i - a^*)^2 + (y_i - a^*)^2}), \quad (2)$$

其中 (a^*, b^*) 是 MZC 的圆心。

2.2 拟合算法

在不确定度评定中圆度误差的最小区域解采用微分进化算法实现。微分进化是一种并行直接搜索方法,它采用 N 个 D 维参数向量 $\mathbf{X}_{i,G}$ 作为第 G 代的一个种群成员。微分进化是从当前种群中选取的 2 个或多个任意个体做差值运算,并乘以系数产生变异向量。如果变异向量比预先确定作为比较的成员向量的目标函数值更优,则此变异向量取代原先确定作为比较的向量;否则,原向量保留不变。最小区域圆度误差评定的微分进化实现流程如下:

① 输入圆度误差微分进化评定的各个算法参数。

② 产生初始化种群。设置进化代数 $G=0$, 初始化第 G 代种群 $\mathbf{P}_G = \{X_{1,G}, X_{2,G}, \dots, X_{N,G}\}$, 第 G 代种群的第 i 个向量成员 $\mathbf{X}_{i,G} = \{x_{i,G}^1, \dots, x_{i,G}^D\}$, $i=1, 2, \dots, N$, N 为种群数。

③ 评估 $\mathbf{P}_{G=0}$, 并设置代数计数器 $t=0$ 。

④ 当停止条件不满足时,重复以下操作:

每一个个体向量 $\mathbf{X}_{i,G=i}$, $i=1, 2, \dots, N$, 它的子代 $\mathbf{X}_{i,G=t+1}$ 都由变异、交叉、选择操作产生,然后评估 $\mathbf{P}_{G=t+1}$ 中的目标函数,并设置 $t=t+1$ 。

⑤ 输出最优目标向量 $\mathbf{X}_{\text{best},G}$ 和目标函数值(最小区域圆的圆度误差值)。

在圆度误差评定中参数维数 $D=2$, 种群大小 $N=10 * D$, 进化代数均设置为 100 代, 变异因子 $F=0.95$, 交叉因子 $C_R=0.85$, 变异策略为“DE/rand-to-best/1”^[17]。

3 采样策略与数据处理

本文采用等间隔采样技术,为获得大多数工件都适当的采样点数,实验选取了 4 个以三爪卡盘固定加工的工件,如图 1 所示。1 号工件直径为 34.69 mm, 2 号工件和 3 号工件同批加工,直径均为 28.02 mm, 4 号工件直径为 70 mm。等间隔采样,被采样的圆截面在 1 号、2 号、3 号、4 号工件的相应高度分别为 70, 20, 20 和 16 mm。



图 1 工件图片

Fig. 1 Four workpieces

本文中三坐标测量机采用青岛诺顿公司生产的 Miracle 系列 Leader/ NC454 型号,测量头是 Renishaw 的接触式触发探针,探头直径是 4 mm, 加长杆长度为 40 mm。实验过程中,环境温度保持在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。为获得合适的采样点数,做了大量的实验。对于 4 个工件,采样的样本量分别取 8, 12, 16, 20, 24, 32, 40, 64, 80 和 100 点。每种采样点均测量 12 次,测量点是以待评估圆的中心等角度随机分布,每次测量的起始点不同而且是随机的,所以称为均匀随机采样策略。

对于每种样本量的测量数据,都进行了 LSM

和基于微分进化算法 (Differential Evolution, DE) 的最小区域法计算圆度误差,两种方法分别计算了各种样本量下 12 组测量数据点集的圆度误差,均值列于图 2~图 5 中。

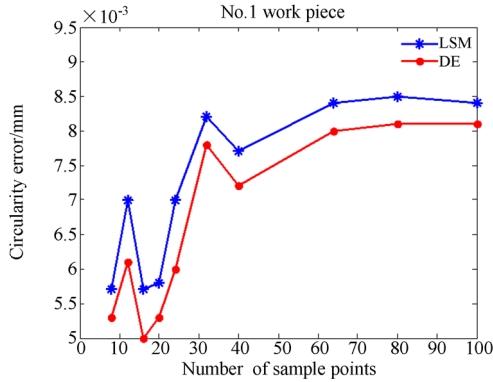


图 2 1 号工件不同采样点数的圆度误差

Fig. 2 Circularity errors of different sample sizes for No. 1 workpiece

图 2~图 5 表明,由 DE 计算得到的所有圆度误差均值均小于 LSM。实验中,对于 4 个工件,两种方法均值差的最大值是 1.1 μm。随着测量点数的增加,4 个工件的圆度误差值都在增大,当样本量达到 64 点及以上时,圆度误差趋于稳定。因此,采样点数应该大于等于 64 点,才能保证结果的准确性。以工件 3 为例,64 点采样的三次测量优化过程如图 6 所示,微分优化过程的终止条件设置为 100 代,每次优化过程的参数设置已在文中 2.2 节拟合算法部分给出。可以看出,三次测量结果中,大约 40 代的时候已经得到最优解。另外,也可以看出微分进化优化算法具有良好的鲁棒性和准确性。

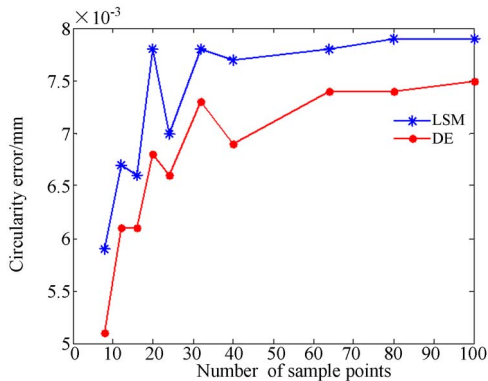


图 3 2 号工件不同采样点数的圆度误差

Fig. 3 Circularity errors of different sample sizes for No. 2 workpiece

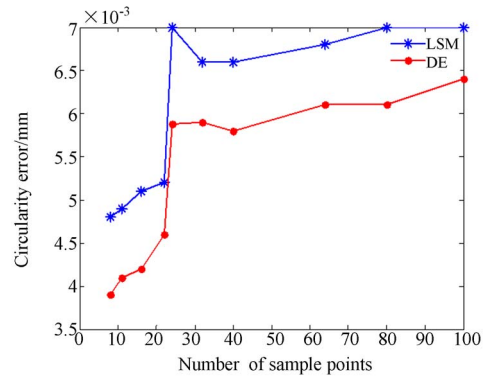


图 4 3 号工件不同采样点数的圆度误差

Fig. 4 Circularity errors of different sample sizes for No. 3 workpiece

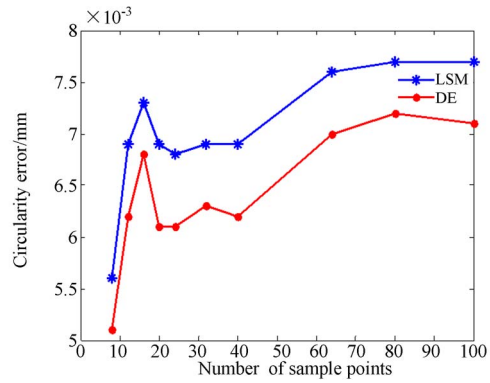


图 5 4 号工件不同采样点数的圆度误差

Fig. 5 Circularity errors of different sample sizes for No. 4 workpiece

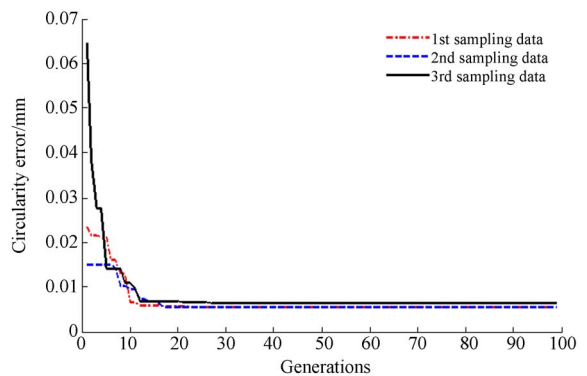


图 6 三次采样数据圆度误差的优化过程

Fig. 6 Optimization processes of circularity errors of three-time sampling data

4 不确定度计算

基于以上的实验结果,综合考虑测量时间、计算时间以及结果准确度,以工件 3 为例,取 64 点三坐标测量的 12 组样本量,进行圆度误差评定后的不确定度评估。GUM 法中,不确定度是基于误差传播规律计算的,由 JCGM 建议的 GUM 的

$$u_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial a^*} u_{a^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b^*} u_{b^*}\right)^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial a^*} \frac{\partial f}{\partial b^*} \rho_{a^* b^*} u_{a^*} u_{b^*} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{\max}} u_{x_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_{\max}} u_{y_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{\min}} u_{x_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_{\min}} u_{y_{\min}}\right)^2, \quad (3)$$

其中: a^* 和 b^* 为参考圆的坐标中心, (x_{\max}, y_{\max}) 和 (x_{\min}, y_{\min}) 是距离坐标中心最远和最近的两个点, $u_{x_{\max}}, u_{y_{\max}}, u_{x_{\min}}$ 和 $u_{y_{\min}}$ 是 CMM 采样点 (x_{\max}, y_{\max}) 和 (x_{\min}, y_{\min}) 的标准不确定度; u_{a^*}, u_{b^*} 是参数 a^* 和 b^* 的标准不确定度; $u_{a^* b^*}$ 是参数 a^* 和 b^* 的相关不确定度,按照式(4)由协方差矩阵计算得到; $\rho_{a^* b^*}$ 是参数 a^* 和 b^* 的相关系数。

$$\text{cov}(a^*, b^*) = \begin{bmatrix} u_{a^*}^2 & u_{a^* b^*} \\ u_{a^* b^*} & u_{b^*}^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4.2 MCM 不确定度评定

MCM 不确定度评定是基于合成整体因素分布的概率方法,不仅仅是基于均值和标准差。MCM 方法实现的关键是对输入量的概率密度分布重复采样,进行各种情况下的模型评价。圆度误差的测量不确定度为:

$$f = \sqrt{(x_{\max} - a^*)^2 + (y_{\max} - b^*)^2} - \sqrt{(x_{\min} - a^*)^2 + (y_{\min} - b^*)^2}, \quad (5)$$

其中: $x_{\max}, y_{\max}, x_{\min}, y_{\min}, a^*$ 和 b^* 是在 MCM 实现中分别服从高斯概率分布 $N(x_{\max}, u_0^2), N(y_{\max}, u_0^2), N(x_{\min}, u_0^2), N(y_{\min}, u_0^2), N(a^*, u_{a^*}^2)$ 和 $N(b^*, u_{b^*}^2)$ 的 M 个矢量, u_0 为测量点的标准不确定度, M 是蒙特卡洛试验次数,研究中设置为 10^6 。

由于整个实验测量过程中温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,测量不确定度主要来源于测量环境和测量设备。

4.2.1 测量环境温度影响引起的不确定度因素

GPS 测量的标准参考温度是 20°C ,温度的影响主要导致测量件和测量设备的线性膨胀和弯曲。长度方向由温度变化引起的变形为^[22]:

$$\Delta L = \Delta T \times \alpha \times L, \quad (6)$$

补充 1^[16]中提供了不同概率密度分布的输入量通过 MCM 方法决定被测量的概率密度分布的方法指导。这里分别采用两种方法 GUM 和 MCM 计算圆度误差的测量不确定度^[18-21]。

4.1 GUM 法不确定度评定

基于最小区域误差公式,按照 GUM 原则,圆度误差的测量不确定度由误差传播标准计算得到:

式中: L 为有效长度, ΔT 为相对温度偏差, α 为材料的温度膨胀系数。由温度引起的不确定度(u_1)为:

$$u_1 = \Delta L / r_1, \quad (7)$$

其中 r_1 是与分布有关的参数。当误差分布是高斯分布、矩形分布和 U 形分布时, r_1 分别等于 2, $\sqrt{3}$ 或者 $\sqrt{2}$ 。从安全角度考虑,假定误差分布为矩形分布($r_1 = \sqrt{3}$)^[22]。实验中,零件是碳素钢材料, $\alpha = 1.1 \mu\text{m}/(100 \text{ mm} \times ^\circ\text{C})$ 。长度 L 为所测圆直径, $L = 28.02 \text{ mm}$, $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ 。由式(6)和式(7)计算得到 $u_1 = 0.36 \mu\text{m}$ 。

因测量过程中测量机与工件之间无温度差的影响,故不考虑这部分引起的不确定度。

4.2.2 测量环境灰尘的影响

在实验中由灰尘的影响引起的不确定度因素^[23]通常估计为 $u_2 = 0.2 \mu\text{m}$ 。

4.2.3 坐标测量机测量重复性引起的不确定度因素

重复性引起的不确定因素 u_3 取决于三坐标测量机。在圆截面上随机选择 12 个点,每个点测量 20 次,计算每个点的半径的不确定度。重复性引起的不确定度 u_3 是 12 点标准不确定度的均值, $u_3 = 1.42 \mu\text{m}$ 。

4.2.4 三坐标测量机的漂移与迟滞引起的不确定度因素

由漂移与迟滞影响引起的不确定度估计为 $u_4 = 0.2 \mu\text{m}$ ^[16],则测量点的标准不确定度为:

$$u_0 = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 1.49 \mu\text{m}.$$

样本量为 64 点的 12 次测量数据点集的 3 号工件圆度误差基于 GUM 和 MCM 方法的标准不确定度计算结果 u_f ,扩展不确定度 U (包含因

子 $k=2$) 以及包含区间(95%置信水平)均列于表 1 中。

表 1 3 号工件圆度误差基于 GUM 和 MCM 方法的不确定度评定结果

Tab. 1 Uncertainty evaluation results of 12 data sets for No. 3 workpiece based on GUM and MCM respectively

(mm)

N	GUM			MCM		
	u_f	U	包含区间	包含区间	u_f	U
1	0.002 7	0.005 4	[0.000 1,0.010 9]	0.002 6	0.005 2	[0.000 2,0.010 6]
2	0.002 4	0.004 8	[0.000 7,0.010 3]	0.002 4	0.004 8	[0.000 8,0.010 1]
3	0.002 5	0.005 0	[0.001 5,0.011 4]	0.002 4	0.004 8	[0.001 8,0.011 1]
4	0.002 4	0.004 8	[0.001 9,0.011 4]	0.002 3	0.004 6	[0.002 1,0.011 1]
5	0.002 3	0.004 6	[0.001 6,0.010 8]	0.002 2	0.004 4	[0.001 8,0.010 6]
6	0.002 5	0.005 0	[0.000 9,0.011 0]	0.002 4	0.004 8	[0.001 2,0.010 7]
7	0.002 3	0.004 6	[0.001 8,0.011 1]	0.002 3	0.004 6	[0.002 0,0.010 9]
8	0.002 2	0.004 4	[0.001 3,0.010 2]	0.002 2	0.004 4	[0.001 5,0.010 0]
9	0.002 1	0.004 2	[0.002 4,0.010 9]	0.002 2	0.004 4	[0.002 2,0.011 0]
10	0.002 2	0.004 4	[0.002 1,0.010 8]	0.002 3	0.004 6	[0.001 9,0.011 0]
11	0.002 2	0.004 4	[0.001 7,0.010 6]	0.002 2	0.004 4	[0.001 9,0.010 4]
12	0.002 1	0.004 2	[0.001 3,0.009 8]	0.002 2	0.004 4	[0.001 3,0.009 9]

表 1 表明,3 号工件基于 GUM 方法的扩展不确定度 U 的均值是 0.004 65 mm, 基于 MCM 的结果是 0.004 62 mm。MCM 的不确定度略小于 GUM 的结果,其他 3 个工件的比较结果与 3 号工件的结果是一致的,就不在文中列出了。

5 结 论

本文从采样策略、拟合算法和不确定度计算方法三个方面综合考虑,实现了基于三坐标测量机的工件圆度误差的不确定度评定。采样策略采用均匀随机采样技术,应用微分进化智能优化算

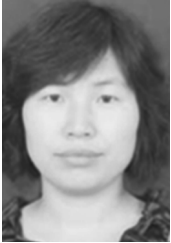
法,快速有效地评定基于最小区域的圆度误差,与最小二乘法相比均值差最大达到 $1.1 \mu\text{m}$;根据两种不确定度方法 GUM 和 MCM 的计算结果,两种方法得到的标准不确定度均值分别是 $2.32 \mu\text{m}$ 和 $2.30 \mu\text{m}$,MCM 方法比 GUM 方法小 $0.02 \mu\text{m}$ 。两种方法的评定结果基本一致。比较结果证实,工件圆度测量误差的 GUM 与 MCM 不确定度评定结果一致,两种方法都是适用的。通过三个方面实现了对工件圆度误差的测量不确定度评价。这种方法能够更加稳定可靠地评价圆度测量的不确定度,也可为其他形状误差的不确定度评价提供参考。

参考文献:

- [1] JIANG Q M, FENG H Y, OUYANG D S, *et al.*. A roundness evaluation algorithm with reduced fitting uncertainty of CMM measurement data [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(3): 184-195.
- [2] WEN X L, SONG A G. Cylindricity error evaluation based on an improved genetic algorithm [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(2): 115-118.
- [3] SAMUEL G L, SHUNMUGAM M S. Evaluation of circularity from coordinate and form data using computational geometric techniques [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24 (3): 251-263.
- [4] HUANG J. A new strategy for circularity problems [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25 (4): 301-308.
- [5] ZHU L M, DING H, XIONG Y L. A steepest descent algorithm for circularity evaluation [J]. *Computer Aided Design*, 2003(35): 255-265.

- [6] ZHU X Y, DING H. Flatness tolerance evaluation: an approximate minimum zone solution [J]. *Computer Aided Design*, 2002, 34 (9):655-665.
- [7] EDGEWORH R, WILHELM R. Adaptive sampling for coordinate metrology[J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(3):144-154.
- [8] 廖平. 基于遗传算法的形状误差计算研究[D]. 长沙:中南大学, 2002.
LIAO P. *Research of Form Error Calculation Based on Genetic Algorithm*[D]. Changsha: Central South University, 2002. (in Chinese)
- [9] HEMANT R, SRIKANTH B A, YASHPAL K. A multivariate statistical analysis of sampling uncertainties in geometric and dimensional errors for circular features[J]. *J. Manuf. Syst.*, 2006, 25(2): 77-94.
- [10] CHAN F M M, KING T G, STOUT K J. The influence of sampling strategy on a circular feature in coordinate measurements[J]. *Measurement*, 1996, 19(2):73-81.
- [11] ODI O. *Development of Methodologies for Measurement of Circles on a Coordinate Measuring Machine*[D]. Caroline:UNC Charlotte,1992.
- [12] DHANISH P B, MATHEW J. Effect of CMM point coordinate uncertainty on uncertainties in determination of circular features[J]. *Measurement*, 2006, 39(6): 522-531.
- [13] FENG X C J, SAAL A L, SALSBURY J G, *et al.*. Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study[J]. *Precis. Eng.*, 2007, 31(2): 94-101.
- [14] FERRERO A, PRIOLI M, SALICONE S. Processing dependent systematic contributions to measurement uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62 (4):720-731.
- [15] KRUTH J P. Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009,58(1): 463-466.
- [16] JCGM member organizations. JCGM 101, Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method[S]. BIPM Joint Committee for Guides in Metrology, Sevres, 2008.
- [17] 张仁勇,罗建军,程滴,等. 基于微分进化算法的深空轨道全局优化设计[J]. *力学学报*,2012, 44(6): 1079-1083.
ZHANG R Y, LUO J J, CHENG J, *et al.*. The global optimization of space exploration trajectory design based on differential evolution algorithm [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(6): 1079-1083. (in Chinese)
- [18] 谷勇强,张立超,武潇野,等. 基于指数法评估激光量热仪吸收测量不确定度[J]. *光学精密工程*, 2016,24(2): 278-285.
GU Y Q,ZHANG L CH,WU X Y, *et al.*. Evaluation of absorption measurement uncertainty of laser calorimeter by exponential method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(2):278-285. (in Chinese)
- [19] 程亚平,张恩忠,齐月玲,等. 光学自由曲面精密数控机床几何误差测量与综合建模[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 174-182.
CHENG Y P, ZHANG E ZH, QI Y L, *et al.*. Geometric error measurement and integrated modeling for precision CNC machine tools of optical free-form surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10):174-182. (in Chinese)
- [20] 胡毅,江超,黄炜,等. 用蚁群算法求解关节式坐标测量机的最佳测量区[J]. *光学精密工程*,2017,25 (6):1487-1493.
HU Y, JIANG CH, HUANG W, *et al.*. Optimal measurement area of articulated coordinate measuring machine calculated by ant colony algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(6):1487-1493. (in Chinese)
- [21] 周炼,安晨辉,候晶,等. 圆弧金刚石砂轮三维几何形貌的在位检测和误差评价[J]. *光学精密工程*, 2017,25(12): 2079-3088.

- ZHOU L, AN CH, HOU J, *et al.*. 3D geometric topographic measurement and error evaluation of are diamond wheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2079-3088. (in Chinese)
- [22] International Standard Organization. ISO/TS 14253-2:1999. Geometrical Product Specification (GPS) - Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment. Part 2: Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verific [S]. Switzerland: ISO copyright office, 1999.
- [23] BARINI E M, TOSELLO G, DE CHIFFRE L. Uncertainty analysis of point-by-point sampling complex surfaces using touch probe CMMs; DOE for complex surfaces verification with CMM[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1):16-21.

作者简介:

王东霞(1973—),河南南阳人,博士,副教授,1997年、2003年于山东科技大学分别获得学士、硕士学位,2015年于东南大学获得博士学位,主要研究方向为精密计量技术、进化计算。E-mail: wandongxia93@163.com



温秀兰(1966—),内蒙古丰镇人,博士,教授,1988年于南京理工大学获得学士学位,1991年于中北大学获得硕士学位,2004年于东南大学获得博士学位,主要研究方向为智能计算、逆向工程和精密计量技术。E-mail: zdhxwzl@njit.edu.cn