

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407760

微小圆柱零件圆度精密测量及不确定度评价

赵家黎¹ 赵妍¹ 王紫涵¹ 李飞宇¹ 李桥林² 吴丹¹

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050; 2. 清华大学深圳国际研究生院 深圳 518000)

摘要:圆度是评价微小圆柱零件制造精度和互换性的一项重要指标。针对圆度测量过程中零件定位不准导致测量数据存在倾斜误差的问题,提出一种分割-截取圆度测量方法,将零件横截面圆分割为8等分、10等分和12等分,采用轮廓仪对等分后的零件表面进行线性扫描,利用扫描得到的一系列坐标数据表征出各段圆弧轮廓,截取各段圆弧中心部分重构零件横截面圆轮廓,拟合得到被测零件的半径和圆度,实现了微小圆柱零件的高精度圆度测量。以直径为3 mm的滚针为例进行圆度测量实验,不同分割-截取情况的测量结果表明,十等分截取75°圆弧拟合得到的滚针半径和圆度分别为1.500 892 9 mm和0.092 μm ,偏差均在 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 内。通过GUM法对影响测量结果的不确定度分量进行分析,计算得到影响圆柱零件半径的综合标准不确定度为0.049 96 μm ,表明了所提分割-截取圆度测量方法的可靠性和一致性。

关键词:圆柱零件;圆度;分割-截取;不确定度评价

中图分类号: TH16; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Precision measurement and uncertainty evaluation of roundness of micro-cylindrical parts

Zhao Jiali¹ Zhao Yan¹ Wang Zihan¹ Li Feiyu¹ Li Qiaolin² Wu Dan¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Roundness is an important index for evaluating the manufacturing accuracy and interchangeability of tiny cylindrical parts. In order to address the inaccurate positioning of the part in the roundness measurement process, which leads to the existence of tilting errors in the measurement data, a segmentation-interception roundness measurement method is proposed, in which the cross-section circle of the part is segmented into eight, ten and twelve equal parts, and the surface of the part is scanned linearly with a profilometer after the equal parts are divided, and a series of coordinate data obtained by scanning is used to characterize the arc contour of each segment, and then the center part of each segment is reconstructed to obtain the radius and roundness of the measured part. The center part of each arc is intercepted to reconstruct the cross-sectional circular profile of the part, and the radius and roundness of the measured part are fitted to realize the high-precision roundness measurement of tiny cylindrical parts. Taking a needle with a diameter of 3 mm as an example for roundness measurement experiments, the measurement results of different segmentation-interception cases show that the radius and roundness of the needle obtained by ten equal interceptions of 75° arc fitting are 1.500 892 9 mm and 0.092 μm , respectively, with a deviation within $\pm 0.1 \mu\text{m}$. The uncertainty components affecting the measurement results were analyzed by the GUM method, and the integrated standard uncertainty affecting the radius of cylindrical parts was calculated to be 0.049 96 μm , which demonstrated the reliability and consistency of the proposed splitting-intercepting circularity measurement method.

Keywords: cylindrical parts; roundness; segmenting-extracting; uncertainty evaluation

0 引言

微小圆柱零件是高端装备传动系统中常用的零部件^[1]。例如滚针轴承内部滚动体滚针,相比于其他滚子,滚针长且细,与滚圈的接触面积更大,负荷承载能力更强,被广泛应用于高精度工业机器人领域^[2]。滚针表面的形状精度会影响轴承的传动性能,进而影响机器人的运动精度,为保证机器人的运动性能和使用寿命,提高滚针的制造精度非常必要^[3-4]。同时随着机械制造业的不断升级,高精度装备对微小圆柱零件精密测量和分析提出了更高的要求,因此开展微小圆柱零件高精度圆度测量具有重要意义^[5]。

圆度作为评价圆柱零件互换性和形状精度的重要指标之一,国内外学者针对圆度测量问题开展了诸多研究工作^[6-9]。周怡君等^[10]将机械臂和V型块相结合实现了连杆颈的圆度在线测量。陈振亚等^[11]通过搭建基于圆结构光的测量系统,对圆度系统误差进行了补偿。梁杰等^[12]开发了一种曲轴横截面圆圆度测点提取算法实现了曲轴圆度测量。Li等^[13]基于非接触式光学平台对小尺寸圆柱零件进行了圆度测量。Cai等^[14]通过旋转扫描系统实现了球面圆度误差的在线测量。然而实验测量得到的圆度仅仅是一个估计值,不能体现测量结果是否可靠,故需要对测量结果进行测量不确定度评价^[15]。张珂等^[16]分析了测量不确定度指南法(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM)和蒙特卡洛法评定轴承外圆圆度误差测量不确定度的实际适用范围;付扬等^[17]基于多元融合理论对机床圆度误差进行了测量不确定度评价。测量不确定度是衡量测量结果是否能保持稳定的重要指标,低测量不确定度意味着高测量质量^[18]。因此在测量零件尺寸时,不仅要给出测量结果还需要对结果进行不确定度评价^[19-20]。

目前常用的圆度测量方法难以实现微小圆柱零件圆度的高精度测量,为了解决这一问题,本文提出一种分割-截取圆度测量方法。通过分段扫描得到的被测圆表面坐标拟合完整的圆度轮廓并以此计算其半径和圆度值。最后分析影响测量结果的不确定度因素,根据圆度测量原理进行数学建模,计算综合标准不确定度,验证所提方法对实现微小圆柱零件圆度高精度测量的有效性。

1 分割-截取法

微小圆柱零件具有体积小、长度短和直径小的特点,在圆度测量过程中易受位置误差的影响,提出一种分割-截取方法提高微小圆柱零件圆度测量精度。

将被测零件横截面圆分割为几个相等的部分如图

1(a)所示,扫描零件表面得到 n 组图1(b)所示的弧线,通过数据处理将所有弧线拼接成一个完整的圆即为被测零件横截面圆的圆度轮廓,如图1(c)所示。

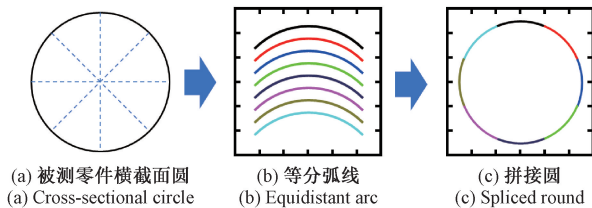


图1 分割测量原理

Fig. 1 Split measurement principle

然而并非简单的拼接就能得到被测零件完整的圆度轮廓,图2所示为圆弧表面坐标数据处理流程。如图2(a)所示,探针沿 x 轴方向自左向右扫描零件表面,得到一段圆弧的表面坐标后回到测量起点,按照标记逆时针旋转一个等分角度 $360^\circ/n$,探针再次从测量起点出发,扫过零件表面,再得到一系列圆弧坐标,重复操作 $n-1$ 次即可得到 n 组圆弧轮廓如图2(b)所示。将 x 坐标看作角度位置, z 坐标看作位移值,圆弧拼接是将相邻圆弧在同一角度位置的位移值进行匹配。由于探针每次扫描结束后都会回到测量起点,即 n 段圆弧的测量位置相同,所以在拼接相邻圆弧时,需调整圆弧位置。图2(b)中圆弧1保持原位置,圆弧2向右移动 $360^\circ/n$,图2(c)即为直角坐标系中两组圆弧拼接后的结果。为更直观地展示相邻圆弧拼接过程,将图2(b)和(c)转换至极坐标系,如图2(d)圆弧1保持原位置,圆弧2顺时针旋转 $360^\circ/n$,图2(e)即为两组圆弧拼接后的结果,重复操作 $n-1$ 次即可得到完整的圆度轮廓如图2(f)所示。相邻圆弧拼接得越准确,证明测量精度越高。为减小环境噪声产生的高频数据对测量结果的影响,通过50UPR滤波处理得到被测零件横截面圆圆度轮廓如图2(g)所示。

将扫描得到的第 i 个圆弧半径记为 R_i ,第 i 个圆弧上第 j 个坐标点记为 $(x_{i,j}, z_{i,j})$,由最小二乘法(式(1))拟合得到每个圆弧的圆心 (x_j, z_j) ,由式(2)计算得到 n 段圆弧半径的平均值即为被测零件的半径 R 。

$$R_i = \sqrt{(x_{i,j} - x_j)^2 + (z_{i,j} - z_j)^2} \quad (1)$$

$$R = R_{mean} = \frac{R_1 + R_2 + \cdots + R_i + \cdots + R_n}{n} \quad (2)$$

为提高数据处理过程中相邻圆弧的拼接精度,首先考虑不同分割情况对拼接精度的影响。所用探针的最大可测倾角为 90° ,至少要将被测零件横截面圆分割为四等分才能拼接成完整的圆度轮廓。图3所示为被测零件不同等分情况示意图,当零件4等分和6等分时相邻圆弧重合角度过少,没有足够的相似特征进行精准拼接;当零件8等分、10等分和12等分时,相邻圆弧重合角度分别

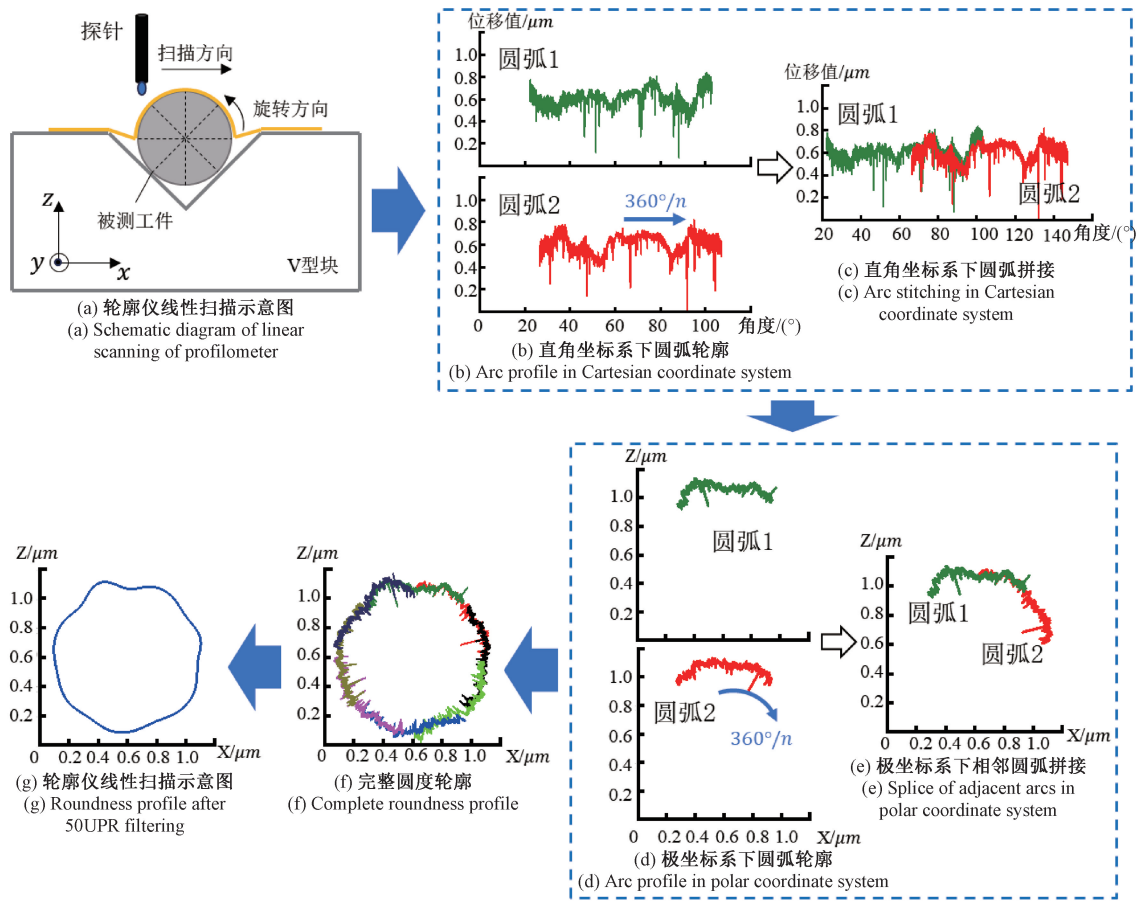


图 2 数据处理流程
Fig. 2 Data processing flowchart

为 45°、54°和 60°，相邻圆弧之间的重合角度由式 (3) 计算得到，图 4 所示为这 3 种分割情况下相邻圆弧重合角度示意图；而当零件 18 等分时虽有足够的重合角度，但此种情况重合部分过于复杂。因此在考虑分割问题时，本文将被测零件横截面圆分割为 8 等分、10 等分和 12 等分。

$$\theta_0 = \theta_e - \theta_r \tag{3}$$

式中： θ_0 为相邻圆弧的重合角度； θ_e 为测量圆弧的角度； θ_r 为等分角度。

其次，考虑探针扫描轨迹对相邻圆弧拼接精度的影响。如图 5(a) 所示，在探针自左往右的运动过程中，探针尖端与被测零件间的夹角 α 先变大后变小，在零件顶点处达到最大。而由图 5(b) 可明显看出，靠近中心部分的圆弧拼接更精确。即探针尖端与被测圆柱零件的夹角越大，测量质量越高。所以，为提高相邻圆弧的拼接精度，在分割的基础上，截取圆弧的中心部分重构圆度轮廓。

2 实验过程及结果评价

实验设备选用 SJ5730-100 高精度粗糙度轮廓一体测

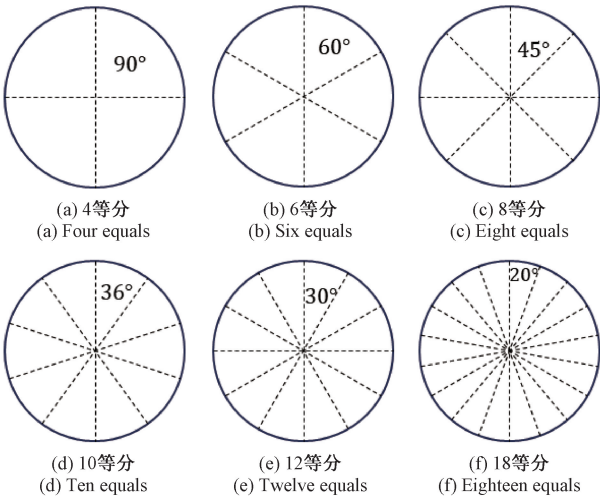


图 3 不同等分情况
Fig. 3 Different equalization scenarios

量仪对被测零件表面进行扫描，轮廓仪最小分辨率为 0.001 μm ，测量重复性 $18 \leq 1 \text{ nm}$ ，可以满足测量精度的要求。被测零件使用 BK 0306 TN 冲压外圈滚针轴承的

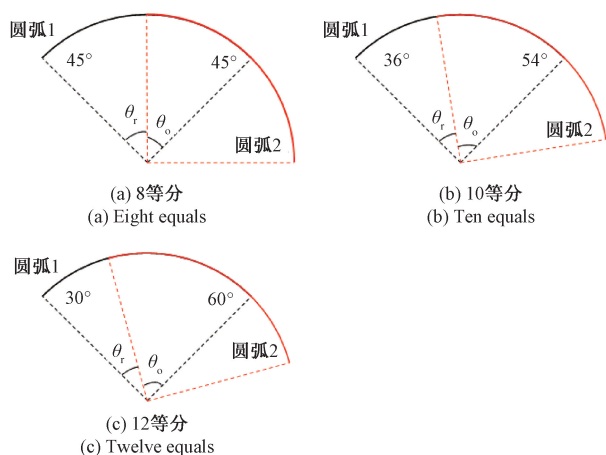


图4 相邻圆弧重合角度

Fig. 4 The overlap angle of neighboring arcs

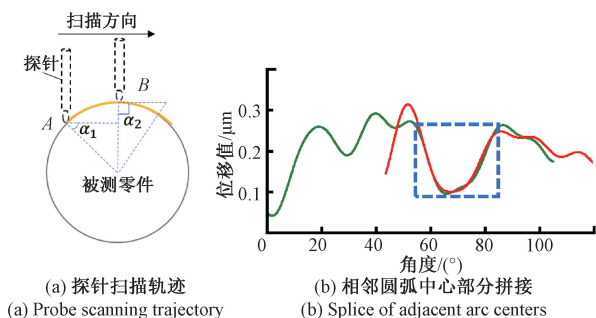


图5 探针扫描原理

Fig. 5 Probe scanning principle

内部滚动体滚针,直径3 mm,宽6 mm。

采用分割-截取法对被测零件进行圆度测量。如图6所示,将一端装有旋转夹具的被测零件水平放置在V型块内,根据夹具表面的等分标记旋转被测零件,探针以0.01 mm/s的速度沿X轴方向扫描被测零件表面,根据理论分析将被测零件横截面圆分割为8等分、10等分和12等分,重复扫描过程,得到8段、10段和12段圆弧,截取各段圆弧中心部分85°、80°、75°、70°、65°重构被测零件横截面圆圆度轮廓。

然而在数据处理过程中受旋转角度误差的影响存在相邻圆弧错误拼接的情况如图7(a)所示,角度误差可由互相关函数(式(4))计算,为提高相邻圆弧的拼接精度,圆弧一在原位置保持静止,圆弧二移动计算得到的角度误差,如图7(b)所示,误差补偿后相邻圆弧重合部分拼接得更加精确。

$$C_{i-i+1} = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\theta) f_{i+1}(\theta + \Delta\theta_{i-i+1}) d\theta \quad (4)$$

式中: C_{i-i+1} 是相邻圆弧重合部分的匹配系数; $f_i(\theta)$ 是第 i 个圆弧; $f_{i+1}(\theta)$ 是第 $i+1$ 个圆弧; θ 是圆弧角度位置;

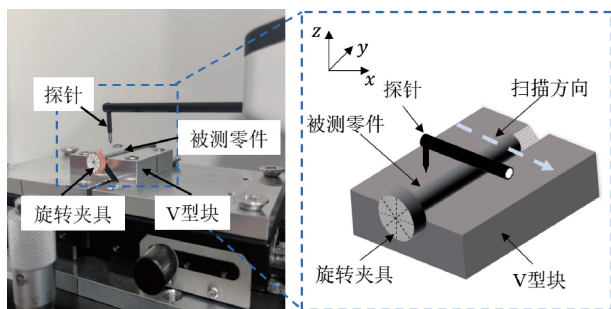


图6 轮廓仪测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of profilometer measurement

$\Delta\theta_{i-i+1}$ 是第 i 个圆弧与第 $i+1$ 个圆弧的角度误差。

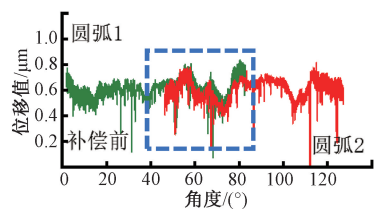
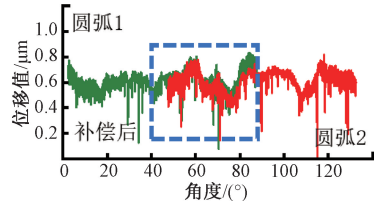
(a) 补偿前相邻圆弧拼接
(a) Splice of adjacent arc before compensation(b) 补偿后相邻圆弧拼接
(b) Splice of adjacent arc after compensation

图7 角度误差补偿

Fig. 7 Angular error compensation

利用相邻圆弧重合部分的匹配系数、同一角度位置两点的欧氏距离和圆弧曲率对测量结果进行评价。匹配系数由互相关函数计算得到,互相关函数是描述随机信号在任意两个不同时刻取值之间的相关程度。本文用 C_{i-i+1} 表示相邻圆弧重合部分的匹配系数。 C_{i-i+1} 越高,表示相邻圆弧在同一角度位置的位移值越接近,由此拼接得到的圆越接近被测工件横截面圆的圆度轮廓,最终计算得到的圆度值也就越趋近于真值。即 C_{i-i+1} 与圆度测量结果精度成正比,当 C_{i-i+1} 取得最大值时,认为相邻圆弧重合部分达到正确拼接位置。

相邻圆弧同一角度位置两点的欧氏距离由式(5)计算得到,欧氏距离与圆度测量结果精度成反比,欧氏距离越小,测量精度越高。

$$D = \frac{1}{n} \sum \sqrt{(\theta_{i,j} + \theta_{i+1,j})^2 - (\Delta R_{i,j} - \Delta R_{i+1,j})^2} \quad (5)$$

式中; i 为第 i 个圆弧; j 为圆弧上的第 j 个点; θ 为角度位置; ΔR 为圆弧上任意点半径与被测零件横截面圆半径的差值。

圆弧平均曲率由式 (6) 计算,计算得到的 K 值越接近被测零件的标准曲率 $0.666\,667\text{ mm}^{-1}$,测量精度越高。

$$K=\frac{1}{n}(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_i}+\cdots+\frac{1}{R_n})$$

(6)

通过 3 种评价指标对不同情况的分割-截取方法评价结果如表 1 所示。评价结果表明 10 等分截取 75° 圆弧,平均欧氏距离和圆度分别为 $0.023\,8\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.092\text{ }\mu\text{m}$,均为所有分割-截取情况下的最小值;相邻圆弧的平

均匹配系数 $0.649\,5$,是所有情况中的最大值;圆弧曲率 $0.666\,671\text{ mm}^{-1}$ 最接近被测零件的标准曲率,即在将被测零件横截面圆 10 等分的基础上保留 75° 圆弧测得的零件半径和圆度更接近真值。将十等分截取 75° 圆弧相邻圆弧角度误差补偿前后拼接对比如图 8 所示,拼接后完整的圆弧轮廓如图 9 所示。图 9(a)、(b) 为补偿前后拼接得到的圆度轮廓,可明显看出,角度误差补偿后的圆度轮廓更接近理想圆。图 9(c) 所示 50UPR 滤波后的圆度轮廓曲线即为最终测量得到的被测零件横截面完整的圆度轮廓。

表 1 不同分割-截取情况评价

Table 1 Evaluation table for different segmentation-interception situations

(等分数,截取角度)	匹配系数	欧氏距离/ μm	曲率/ mm^{-1}	圆度(50UPR)/ μm
(8,85°)	0.345 7	0.025 6	0.666 883	0.131
(8,80°)	0.463 4	0.025 1	0.666 799	0.123
(8,75°)	0.621 5	0.024 1	0.666 592	0.118
(8,70°)	0.380 4	0.025 7	0.666 847	0.124
(8,65°)	0.347 9	0.025 9	0.666 769	0.130
(10,85°)	0.495 3	0.025 3	0.666 750	0.108
(10,80°)	0.553 3	0.024 9	0.666 733	0.106
(10,75°)	0.649 5	0.023 8	0.666 671	0.092
(10,70°)	0.575 9	0.024 4	0.666 292	0.109
(10,65°)	0.498 7	0.024 7	0.666 270	0.109
(12,85°)	0.451 4	0.025 5	0.666 785	0.122
(12,80°)	0.503 6	0.025 2	0.666 765	0.121
(12,75°)	0.621 9	0.024 6	0.666 737	0.118
(12,70°)	0.504 3	0.025 2	0.666 531	0.125
(12,65°)	0.475 9	0.025 9	0.666 510	0.132

3 测量不确定度分析

根据实验部分证明 10 等分截取 75° 圆弧测量精度最高,所以本文只对该组数据进行测量不确定度评价。分析影响圆弧上各点坐标 (x_i,z_i) 的不确定度因素并对其进行数学建模,测得圆弧的半径可由式 (7) 表示。

$$R=\sqrt{(x_i^2+z_i^2)}$$

(7)

由于圆弧数据是由数万个 (x_i,z_i) 坐标点构成的,因此需要分别分析影响 x_i 坐标和 z_i 坐标的不确定度因素。

3.1 影响坐标 x_i 的不确定度分量

1) $u(e_{calibration_x})$: 探针校准在 X 轴方向上引起的不确定度分量

使用专用标准球和标准量块对探针进行校准。校准后测量标准球的直径误差为 $0.028\,3\text{ }\mu\text{m}$,量块高度误差为 $0.026\,6\text{ }\mu\text{m}$,均小于 Pt 值精度 $0.03\text{ }\mu\text{m}$,所以探针校准在 X 轴方向的引起不确定度可以用式 (8) 计算得到。

$$u(e_{calibrationx})=0.03\text{ }\mu\text{m}=30\text{ nm}$$

(8)

2) $u(e_{alignment_z})$: 被测零件绕 Z 轴的位置误差引起的不确定度分量

被测零件绕 Z 轴的位置误差如图 10 所示,图 10(a) 中 D 表示理想状态下的零件直径; D_e 表示存在绕 Z 轴的旋转误差时测得的零件直径; θ_z 为绕 Z 轴的位置误差角度。图 10(b) 中 R_i 表示测得的圆弧半径, (x_i,z_i) 为测得圆弧上的点坐标。在实际圆度测量实验时,可以进行多次实验将误差角度 θ_z 对测量结果的影响降到最小。实验过程中,测得的零件半径为 $1.500\,892\,9\text{ mm}$, θ_z 可以保持在 $\pm 1^\circ$ 的范围内,绕 Z 轴的位置误差引起的不确定度分量由式 (9) 计算得到。

$$u(e_{alignmentz})=\frac{x_i}{\frac{\cos\theta_z}{\sqrt{3}}}-x_i=R_i\sin\frac{\varphi}{2}(\frac{1}{\frac{\cos\theta_z}{\sqrt{3}}})=$$

$$1.500\,892\,9\times\sin\frac{75^\circ}{2}(\frac{1}{\frac{\cos1^\circ}{\sqrt{3}}})=0.000\,040\,94\text{ mm}=$$

$$40.94\text{ nm}$$

(9)

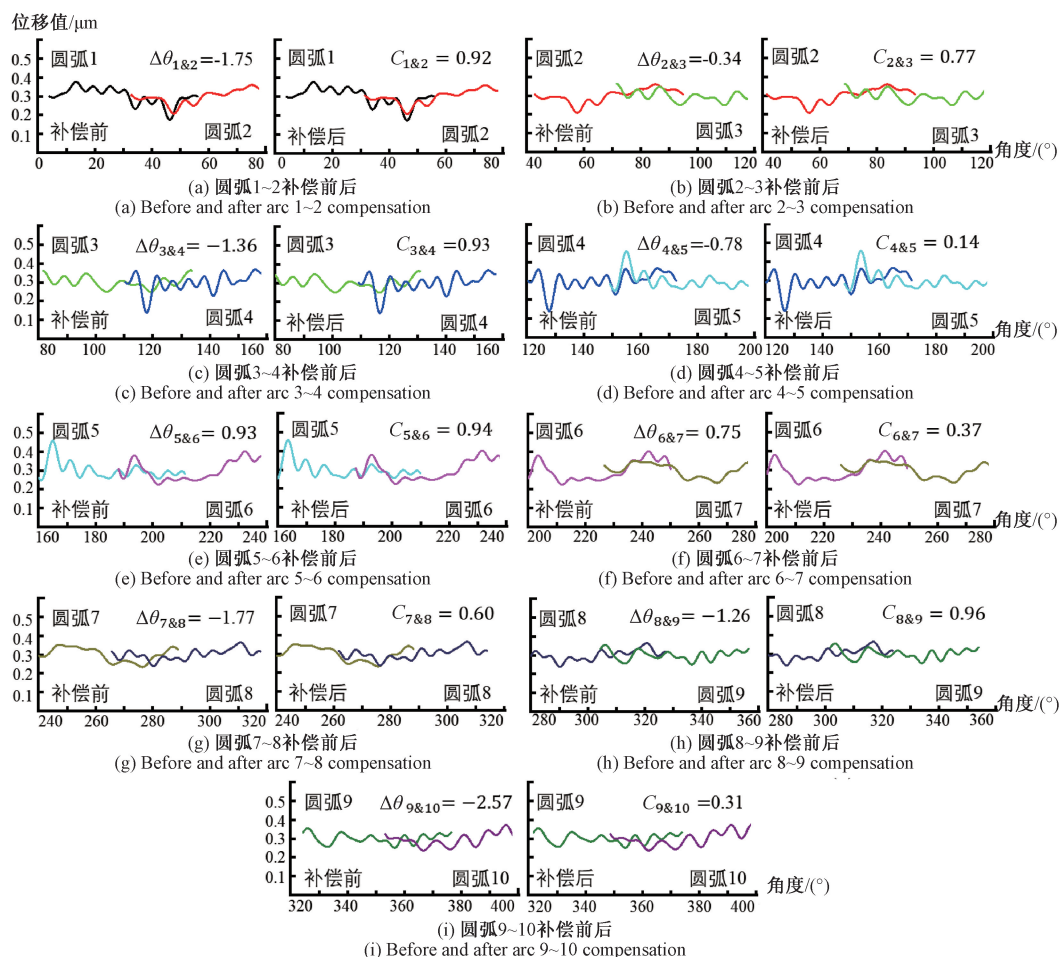


图8 10等分补偿前后相邻圆弧拼接情况对比

Fig. 8 Comparison of adjacent arc splices before and after decimal compensation

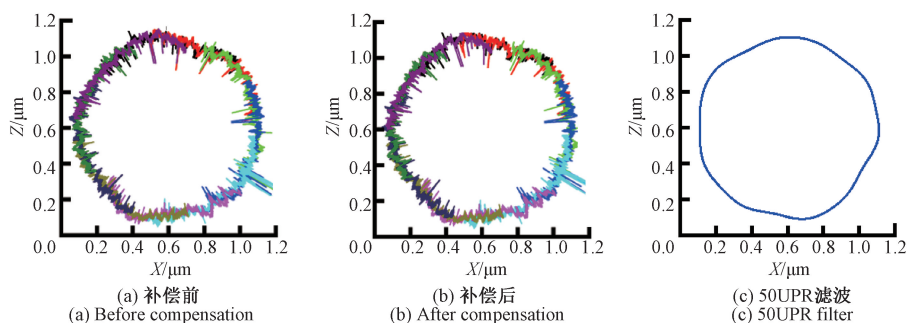


图9 10等分圆度轮廓

Fig. 9 Ten equal roundness contour

3) $u(e_{\text{alignment}_x})$:被测零件绕 X 轴的位置误差引起的不确定度分量

被测零件绕 X 轴的位置误差的影响如图 11 所示,图 11(a)中 D 表示理想状态下测得的零件直径; D_e 表示存在绕 X 轴的旋转误差时测得的零件直径; θ_x 为绕 X 轴的位置误差角度。图 11(b)中 R_i 表示测得的圆弧半径,

(x_i, z_i) 为测得圆弧上的点坐标。实际实验过程中,通过校准实验 θ_x 可以保持在 $\pm 1^\circ$ 范围内,被测零件绕 X 轴的位置误差引起的不确定度可由式(10)计算得到,影响坐标 x_i 的综合标准不确定度可由式(11)计算得到。

$$u(e_{\text{alignment}_x}) = x_i - x_i \cos \frac{\theta_x}{\sqrt{3}} = R \sin \frac{\varphi}{2} (1 - \cos \frac{\theta_x}{\sqrt{3}}) =$$

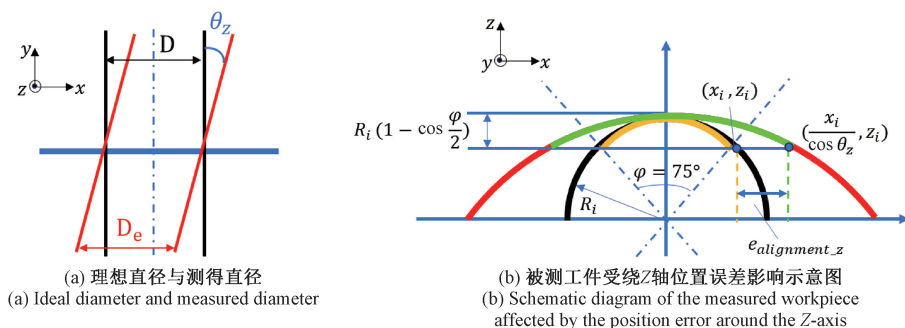


图 10 被测零件绕 Z 轴位置误差示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the position error of the measured part around the Z-axis

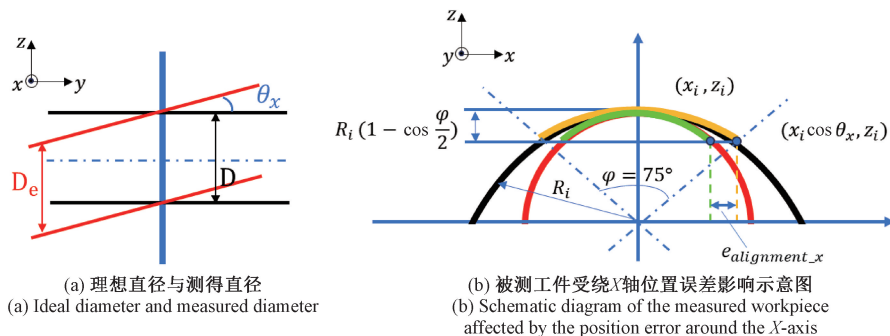


图 11 被测零件绕 X 轴位置误差示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the position error of the measured part around the X-axis

$$1.500\,892\,9 \times \sin \frac{75^\circ}{2} (1 - \cos \frac{1^\circ}{\sqrt{3}}) = 0.000\,040\,94 \text{ mm} = 40.94 \text{ nm} \quad (10)$$

$$u(x_i) = \sqrt{u^2(e_{\text{calibration}_x}) + u^2(e_{\text{alignment}_z}) + u^2(e_{\text{alignment}_x})} = \sqrt{30^2 + 40.94^2 + 40.94^2} = 65.21 \text{ nm} \quad (11)$$

3.2 影响坐标 z_i 的不确定度分量

1) $u(e_{\text{calibration}_x})$: 探针校准在 Z 轴方向上引起的不确定度分量

Z 轴方向上探针校准的引起的不确定度与 X 轴方向上探针校准引起的不确定度相同, 由式(12)计算得到。

$$u(e_{\text{calibration}_x}) = 0.03 \text{ } \mu\text{m} = 30 \text{ nm} \quad (12)$$

2) $u(e_{\text{resolution}})$: 探针分辨率引起的不确定度

实验所采用的探针垂直分辨率为 0.1 nm, 服从 $\pm 0.05 \text{ nm}$ 的矩形分布, 探针分辨率引起的不确定度由式(13)计算得到。

$$u(e_{\text{resolution}}) = \frac{0.1/2}{\sqrt{3}} = 0.028\,87 \text{ nm} \quad (13)$$

3) $u(e_{\text{repeat}})$: 测量误差引起的不确定度

测量误差引起的不确定度通过对被测零件多次实验来进行评价。从 50 次重复实验的测量结果来看, 探针的重复性为 35.67 nm, 测量误差引起的不确定度由式(14)

计算得到, 影响坐标 z_i 的综合标准不确定度由式(15)计算得到。

$$u(e_{\text{repeat}}) = \frac{35.67}{\sqrt{10}} = 11.28 \text{ nm} \quad (14)$$

$$u(z_i) = \sqrt{u^2(e_{\text{calibration}_x}) + u^2(e_{\text{resolution}}) + u^2(e_{\text{repeat}})} = \sqrt{30^2 + 0.028\,87^2 + 11.28^2} = 32.05 \text{ nm} \quad (15)$$

3.3 半径综合标准不确定度

测量结果与理想圆之间必然存在偏差, 假设拟合得到的圆弧中心为原点。圆弧端点坐标为 (0.517 6, 0.566 1), 影响被测圆弧半径的综合标准不确定度由式(16)计算得到。

综上所述, 当将被测零件十等分截取 75° 圆弧时, 影响坐标 x_i 和 z_i 的综合标准不确定度分别为 65.21 nm 和 32.05 nm, 影响圆弧半径的综合标准不确定度为 49.96 nm。

$$u(R) =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + \left(\frac{\partial R}{\partial z_i}\right)^2 u^2(z_i)} = \frac{x_i^2}{z_i^2 + x_i^2} u^2(x_i) + \frac{z_i^2}{z_i^2 + x_i^2} u^2(z_i) \\ \sqrt{\frac{0.517\,6^2}{0.517\,6^2 + 0.566\,1^2} \times 65.21^2 + \frac{0.566\,1^2}{0.517\,6^2 + 0.566\,1^2} \times 32.05^2} = 49.96 \text{ nm} \quad (16)$$

4 结 论

针对微小圆柱零件圆度测量中存在定位困难且测量精度低的问题,提出一种坐标建模分割-截取圆度测量方法。该方法根据轮廓仪的测量原理将被测零件横截面圆分割为8等分、10等分和12等分,由扫描获得的表面坐标表征出各段圆弧,截取测量精度较好的圆弧中心部分重构完整的圆度轮廓。相邻圆弧的匹配系数、同一角度位置两点的欧氏距离和圆弧曲率3种指标评价结果表明,将被测零件10等分,截取75°圆弧拼接得到的圆度轮廓最接近被测圆。最后根据测量不确定度分析结果验证了测量结果的可靠性,证明利用圆弧表面坐标建模的方法极大地提高了微小圆柱零件圆度的测量精度,为微小零件的高精度测量提供了新思路。未来可探索非接触式测量技术在圆度测量领域的应用,以减小探针测量力对测量结果的影响,提高圆度测量精度。

参考文献

- [1] GUO Y, WANG Z. Analysis of error compensation algorithm in screw thread contact scanning measurement[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021, 41(2): 74-78.
- [2] 张红, 张方, 蒋祺, 等. RV减速机关键件及整机固有模态分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21): 54-58.
ZHANG H, ZHANG F, JIANG Q, et al. Natural modal analysis of key parts and whole machine of RV reducer[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(21): 54-58.
- [3] 路遥环, 裴祖荣, 尤悦, 等. 精密减速器角位移测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 14-20.
LU Y H, QIU Z R, YOU Y, et al. Design of angular displacement measuring system for precision reducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 14-20.
- [4] XU L. A study on dynamic load characteristics of multi-group needle roller bearings used in RV reducer considering the position errors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 144-155.
- [5] 杨文辉. 基于机器视觉的零件几何量测量技术与系统开发[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
YANG W H. Research and system development of part geometry measurement technology based on machine vision[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [6] VARGA G, DEZSO G, SZIGETI F. Shape accuracy improvement in selective laser-melted Ti6Al4V cylindrical parts by sliding friction diamond burnishing[J]. Machines, 2022, 10(10): 949.
- [7] PARTHIBAN M, HARINATH M, KIRUBAKARAN M. Measurement of roundness on the bearing by varying probe length in CMM [J]. Materials Today Proceedings, 2021, 42(3): 1393-1403.
- [8] 田慧慧, 王亚晓, 王洪喜, 等. 曲轴连杆颈圆度误差的测量与评定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 53-61.
TIAN H H, WANG Y X, WANG H X, et al. Research on roundness error measurement and evaluation for crankshaft pin journal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 53-61.
- [9] 章家威, 李昊冉, 罗天慧, 等. 融合多组双目视觉系统的管道尺寸测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(6): 137-146.
ZHANG J W, LI H R, LUO T H, et al. Research on the external size measurement for industrial pipes using multi-group binocular vision system [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(6): 137-146.
- [10] 周怡君, 胡慧远, 费嘉铖. 曲轴连杆颈圆度在线测量机构设计与运动分析[J]. 机械设计, 2024, 41(1): 15-20.
ZHOU Y J, HU H Y, FEI J CH. Design of roundness onlin measuring mechanism for crankshaft connecting rod neck and analysis on its kinematics [J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(1): 15-20.
- [11] 陈振亚, 马卓强, 李翔, 等. 圆结构光系统深孔圆度测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(4): 210-217.
CHEN ZH Y, MA ZH Q, LI X, et al. Deep hole roundness measurement method of circular structured light system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(4): 210-217.
- [12] 梁杰, 孙震伟. 基于线激光的压缩机曲轴圆度和平面度测量[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 133-139.
LIANG J, SUN ZH W. Line laser roundness and flatness measurement of compressor crankshaft [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 133-139.
- [13] LI Q, WANG Y, LI J, et al. Non-contact ultra-precision metrology of superfine cylinders with a developed two-dimensional coordinate measuring device[J]. Measurement, 2023, 223: 113727.
- [14] CAI Y, XIE B, LING S, et al. On-line measurement method for diameter and roundness error of balls [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2020, 3(3): 218-227.

- [15] FU K, NI P, TANG S, et al. Uncertainty analysis of industrial CT linear size measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(5): 151-161.
- [16] 张珂, 苏凯伦, 成果. 轴承圆度误差测量不确定度 GUM 法和 MCM 评定分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(6): 48-54.
- ZHANG K, SU K L, CHENG G. Comparison of the uncertainty of bearing roundness error measurement by the method of GUM and MCM [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(6): 48-54.
- [17] 付扬, 李国龙, 徐凯, 等. 基于多源融合理论的机床圆度误差测量不确定度评定[J]. 工程设计学报, 2021, 28(3): 278-286.
- FU Y, LI G L, XU K, et al. Evaluation of uncertainty of machine tool roundness error measurement based on multi-source fusion theory [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(3): 278-286.
- [18] BITTERA M, HALLON J, SZOLIK I, et al. Alternative approach leading to reduction in measurement instrument uncertainty of EMI measurement [J]. Measurement Science Review, 2023, 23(2): 64-71.
- [19] 李常春, 魏明明. 光电式风向传感器测量不确定度的分析与评定[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5): 150-156.
- LI CH CH, WEI M M. Analysis and evaluation of measurement uncertainty of photoelectric wind direction sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(5): 150-156.

- [20] 黄强先, 张祖杨, 郭小倩, 等. 微纳测量机靶镜正交偏差角测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 1-8.
- HUANG Q X, ZHANG Z Y, GUO X Q, et al. Measurement uncertainty evaluation of the orthogoonal deviationangles of the target mirror of micro-nano measuring machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 1-8.

作者简介



赵家黎 (通信作者), 2007 年于天津大学获得博士学位, 现为兰州理工大学教授, 主要研究方向为精密测量和增材制造智能设计。

E-mail: j_l_zh@163.com

Zhao Jiali (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2007. He is currently a professor at Lanzhou University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligent design for additive manufacturing.



赵妍, 2022 年于兰州理工大学获得学士学位, 现为兰州理工大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测量、仪器与仪表。

E-mail: fine_zhaoyan@163.com

Zhao Yan received her B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2022. She is currently a M. Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. Her main research interests include precision measurement, instrumentation and metrology.