

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.05.05

# 大半径小圆弧几何特征的精确测量方法

李富强<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>2</sup>, 谢吉庆<sup>3</sup>, 陈永当<sup>3</sup>, 常智勇<sup>2\*</sup>

(1. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西 西安 710077;

2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;

3. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710699)

**摘要:** 针对现有大半径小圆弧几何特征测量方法的效率和精度难以满足大批量零件检测需求的问题, 提出了一种新的测量方法。首先采用三坐标测量机测量连接圆弧的两直线边, 计算得到两直线的交点坐标和夹角, 然后求解角平分线的方向向量, 利用三坐标测量机从两直线交点开始沿方向向量逼近工件, 记录三坐标测量机测球与圆弧的接触点, 计算接触点与两直线交点之间的距离, 最后根据该距离计算得到圆弧半径值。开展实验对所提出的方法的应用效果进行验证, 结果表明: 相较传统测量方法, 该方法测量精度更高且耗时更短。研究成果对于推动高端制造领域的技术进步具有重要意义。

**关键词:** 几何量计量; 零件检测; 大半径小圆弧; 圆弧半径测量; 坐标测量机; 测量精度; 测量重复性; 测量效率

中图分类号: TB92; V262.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 05-0040-08

## Accurate measurement method for geometric features of short circular arcs with large radii

LI Fuqiang<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>2</sup>, XIE Jiqing<sup>3</sup>, CHEN Yongdang<sup>3</sup>, CHANG Zhiyong<sup>2\*</sup>

(1. AECC Xi'an Aero-Engine Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710699, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the efficiency and accuracy of existing measurement methods for geometric features of large-radius short arcs are difficult to meet the inspection requirements of mass-produced parts, a new measurement method is proposed. Firstly, a coordinate measuring machine is used to measure the two straight edges connected to the arc, and the intersection coordinates and included angle of the two straight lines are calculated. Then, the direction vector of the angle bisector is solved. The coordinate measuring machine is used to approach the workpiece along the direction vector from the intersection of the two straight lines, and the contact point between the coordinate measuring machine probe and the arc is recorded. The distance between the contact point and the intersection of the two straight lines is calculated, and finally the arc radius is obtained based on this distance. Experiments were conducted to verify the application effect of the proposed method, and the results show that compared with traditional measurement methods, this method has higher

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175435)

引用格式: 李富强, 陈鹏, 谢吉庆, 等. 大半径小圆弧几何特征的精确测量方法[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 40-47.

Citation: LI F Q, CHEN P, XIE J Q, et al. Accurate measurement method for geometric features of short circular arcs with large radii[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 40-47.



measurement accuracy and shorter time consumption. The research results are of great significance for promoting technological progress in the field of high-end manufacturing.

**Key words:** geometric metrology; parts measurement; large-radius short arc; arc radius measurement; coordinate measuring machine; measurement accuracy; measurement repeatability; measurement efficiency

## 0 引言

随着现代制造业的快速发展，产品复杂性显著提升，对制造精度的要求也日益严格。几何尺寸测量已成为制造流程中的关键环节<sup>[1]</sup>，特别是在航空航天、精密仪器制造及汽车工程等领域，零部件的几何尺寸精度直接影响产品的可靠性及安全性<sup>[2]</sup>。大半径小圆弧类特征是机械制造领域中广泛存在的一种典型几何形态，在众多零部件结构中扮演着重要角色。大半径小圆弧特征是指：在零件转角部位，具有较大半径但相对弧长较小的圆弧过渡区。半径值与圆弧所对应的弧度值的比值定义为径弧比，通常将径弧比大于5的圆弧特征称为大半径小圆弧特征。圆弧过渡设计旨在优化零件的应力分布均匀性、减少应力集中现象，并增强零件的可装配性和使用性能<sup>[3]</sup>。精确测量大半径小圆弧几何特征对于确保机械设备性能符合要求至关重要<sup>[4]</sup>，实现大半径小圆弧类特征的高精度测量已成为高端制造领域面临的重要技术挑战之一。

众多学者针对圆弧特征测量问题开展了研究。绍伟国等人<sup>[5]</sup>采用圆心固定法，在圆周上选取3个不重合的坐标点来确定圆心，利用非接触式测量技术在小圆弧上采集数据点，并计算各点到圆心的距离以确定圆弧半径。秦世林<sup>[6]</sup>通过获取微小圆弧的点云数据，利用直线与曲线斜率的差异，基于三点曲率计算剔除直线点云，对剩余点云进行拟合以获取微小圆弧的半径。丁圣<sup>[7]</sup>提出了一种基于法矢量移动的方法，在圆弧面上测量一个点，并沿法矢量方向移动一个理论半径值，建立极坐标系测量圆弧数据点，并对实测值与理论值进行比较。王涛等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于旋转坐标系的定心测量方法，通过旋转、平移坐标系使圆弧圆心与原点重合，并旋转坐标系使某轴向指向圆弧方向，以降低小圆弧数据点拟合时的误差。

上述方法为推动大半径小圆弧几何特征测量

领域的发展提供了技术参考，但是这些方法仅适用于少量大半径小圆弧类零件的几何特征测量，对于大批量的大半径小圆弧类零件几何特征测量，现有方法的测量效率和精度难以同时满足需求<sup>[9]</sup>。针对此问题，本文提出了一种新的测量方法，通过三坐标测量机测量连接圆弧的两直线边，根据数学关系间接求解得到圆弧半径值，实现大半径小圆弧类几何特征的高精度、高效率测量。分别采用传统方法与本文提出的方法开展柱塞泵壳体圆弧测量实验并对结果数据进行对比，验证本文提出的方法的应用效果。

## 1 大半径小圆弧特征测不准机理分析

### 1.1 基于三坐标测量机的传统测量方法的局限性

三坐标测量机是一种高精度的坐标测量设备，可用于各种精密零件的几何尺寸检测。三坐标测量机的探针与被测零件接触，获得零件各个点的空间坐标，基于这些坐标进行数据处理，计算得到零件的尺寸和几何形状。三坐标测量机的优势在于精度高、适用范围广，能够完成复杂几何形状零件的高精度测量<sup>[10]</sup>。但进行微小零件测量时，由于测量区域过于狭小，探针无法有效地覆盖整个测量区域，且因探针半径偏移引入的误差较大<sup>[11]</sup>。以燃油控制系统零件中的大半径小圆弧测量为例，如图1所示，当使用基于三坐标测量机的传统测量方法进行测量时，短弧段上的探针采样点分布存在微小偏差，通过软件算法拟合圆时，该微小偏差会被成倍放大。尤其是测量径弧比大于5的圆弧时，若未能精准控制采样点的密度与分布，小圆弧弧长的微小变化会严重影响拟合圆的精度，导致最终测量结果与实际值存在较大偏差。

### 1.2 基于影像测量仪的测量方法的局限性

影像测量仪通过光学成像原理对被测零件进行非接触式测量，具有测量速度快、操作简便等优点<sup>[12]</sup>。然而，对于大半径小圆弧特征而言，被

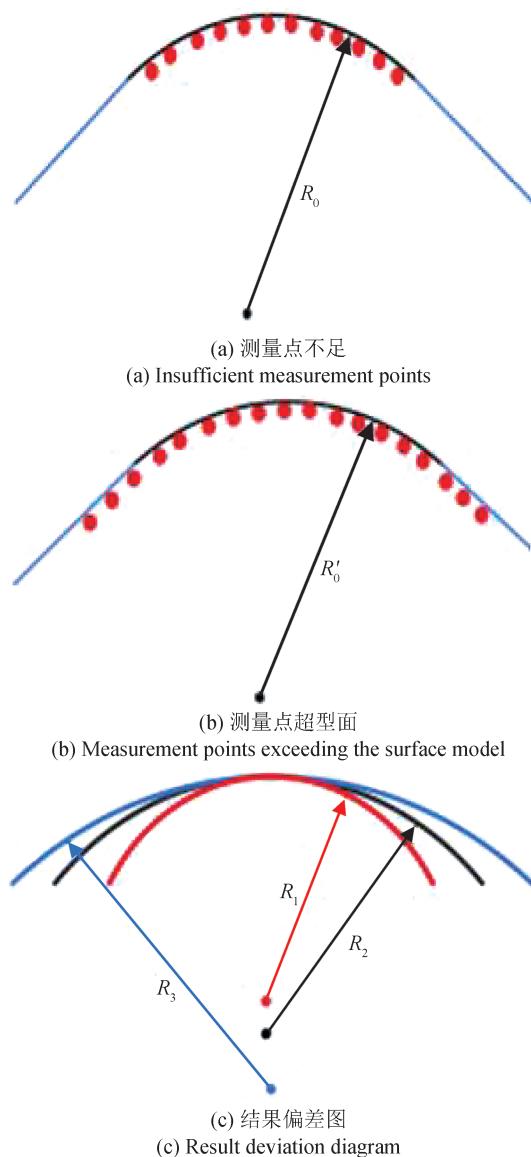


图1 大半径小圆弧特征和测量局限性

Fig.1 Large-radius small circular arc features and measurement limitations

测区域位于两直边过渡区域，影像测量仪在测量过程中易受光线、阴影等因素干扰，导致测量结果不稳定<sup>[13]</sup>。此外，影像测量仪的测量精度受相机分辨率、镜头畸变等因素的影响，难以实现高精度测量。并且利用影像测量仪进行测量时，通常需要将基准原点平移到理论圆心，在实际操作中，若理论圆心存在偏差，后续的坐标转换和测量数据都将产生系统性偏差。因此，影像测量仪通常应用于对测量精度要求不高的场合。

### 1.3 其他测量方法的局限性

大半径小圆弧类零件的测量方法还有激光测

距仪测量法<sup>[14]</sup>、游标卡尺测量法、弓高弦长法等，这些方法同样存在局限性。激光测距仪测量法虽然测量速度快，但测量精度受激光束发散角、被测表面粗糙度等因素的影响。对于表面粗糙的铸件，激光光斑散射导致测距信号不稳定，使得测量数据波动较大。游标卡尺测量法存在测量范围有限等问题，难以实现大批量大半径小圆弧特征零件的高精度、高效率测量。弓高弦长法虽原理简单，但在实际操作中，测量弓高和弦长时对测量工具的定位精度要求极高，且整个测量过程耗时较长。

## 2 大半径小圆弧几何特征的精确测量方法

### 2.1 测量原理

针对现有测量方法存在的问题，本文提出了大半径小圆弧几何特征的精确测量方法。圆弧半径R的测量原理如图2所示，两直线边分别标记为 $L_1$ 与 $L_2$ ，圆角与两直线边分别在点 $P_1$ 和 $P_2$ 处相切，通过 $P_1$ 和 $P_2$ 分别向对应的直线边作垂线，两垂线相交于点O。两直线边的延长线在点P处相交，而线段 $P_1P$ 与线段 $P_2P$ 之间形成的夹角被定义为 $\theta$ 。连接点O与点P，所得线段OP将平分角 $\theta$ 。线段OP与圆弧相交于点 $P_c$ ， $P_c$ 到点P之间的距离为d。当已知d和 $\theta$ 的具体值时，可通过式(1)计算得到R。

$$R = d \cdot \frac{\sin(\theta/2)}{1 - \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

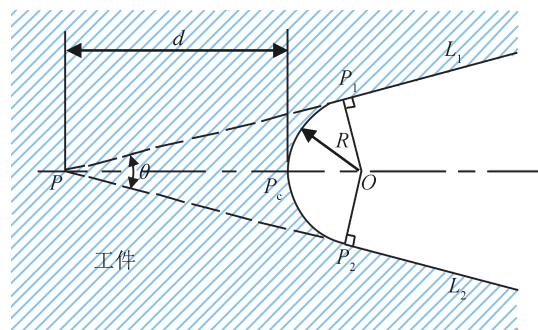


图2 圆弧半径R的测量原理

Fig.2 Measurement principle of the radius R of a circular arc

### 2.2 测量步骤

步骤1：利用三坐标测量机沿 $L_1$ 和 $L_2$ 分别进行测量，获得 $L_1$ 和 $L_2$ 所在直线的方程 $y_1$ 和 $y_2$ ，即

$$y_1 = a_1 x + b_1 \quad (2)$$

$$y_2 = a_2 x + b_2 \quad (3)$$

式中:  $x$  为与圆弧相连的两直线边上点的横坐标值,  $a_1$  和  $a_2$  为拟合得到的直线的一次项系数,  $b_1$  和  $b_2$  为拟合得到的直线的截距。

步骤2: 联立两直线方程, 求得两直线的交点  $P$  坐标, 并通过式(4)计算得出  $\theta$ 。

$$\theta = \arctan \frac{|a_1 - a_2|}{1 + a_1 \cdot a_2} \quad (4)$$

步骤3: 根据两直线方程和  $\theta$ , 求解  $\theta$  的角平分线的方向向量  $n$ , 公式为

$$n = \left( 1, \frac{a_1 + a_2}{2} + \cot \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

步骤4: 利用三坐标测量机从点  $P$  开始沿着方向向量  $n$  逼近工件, 直到坐标测量机触发并获得接触点, 记录测球与圆弧的接触点为  $P_c(x_c, y_c)$ 。为了减小接触点  $P_c$  的测量误差, 通常采用直径较大的测球来完成该步骤的测量。

步骤5: 计算点  $P_c$  与点  $P$  之间的距离  $d$ , 具体公式为

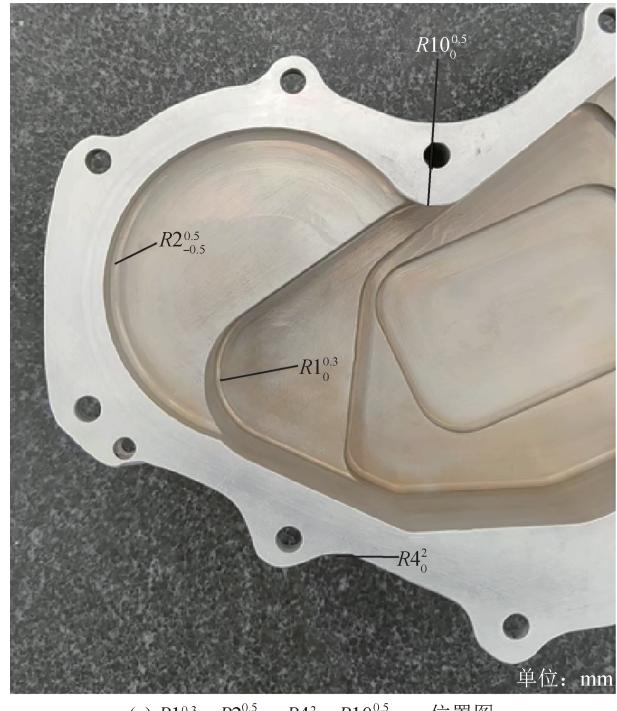
$$d = \sqrt{\left( \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} - x_c \right)^2 + \left( \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2} - y_c \right)^2} \quad (6)$$

步骤6: 将  $d$  与  $\theta$  代入式(1)中, 求解得到  $R$ 。

### 3 实验

为了验证本文方法的有效性和准确性, 分别采用传统三坐标测量方法和本文方法对某柱塞泵壳体零件的大半径小圆弧几何特征进行测量, 并对结果进行分析。某柱塞泵壳体圆弧测量位置如图3所示。在零件上选择6类大半径小圆弧特征进行测量, 如图4所示, 这6类特征的圆弧半径分别为  $R1_0^{0.3}$ 、 $R4_0^2$ 、 $R2_{-0.5}^{0.5}$ 、 $R2_0^{0.35}$ 、 $R10_0^{0.5}$ 、 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm, 其中上下标表示公差带的大小。待测圆弧特征的径弧比如表1所示。

为精确获取每个圆弧半径的真实值, 采用五轴摆扫测量技术对圆弧面进行摆扫测量。五轴摆扫测量技术是一种具备诸多优势的测量手段, 在高精度数据采集、灵活性扫描等方面均表现出色<sup>[15]</sup>。五轴摆扫测量机测针具有较高的自由度, 能够有效满足复杂曲面的测量需求<sup>[16]</sup>。本实验使



(a)  $R1_0^{0.3}$ 、 $R2_{-0.5}^{0.5}$ 、 $R4_0^2$ 、 $R10_0^{0.5}$  mm位置图  
(a) Diagram of positions of  $R1_0^{0.3}$ 、 $R2_{-0.5}^{0.5}$ 、 $R4_0^2$ 、 $R10_0^{0.5}$  mm



(b)  $R2_0^{0.35}$ 、 $R10_0^{0.5}$  mm位置图  
(b) Diagram of positions of  $R2_0^{0.35}$ 、 $R10_0^{0.5}$  mm

图3 某柱塞泵壳体圆弧测量位置图

Fig.3 Arc measurement position diagram of a plunger pump housing

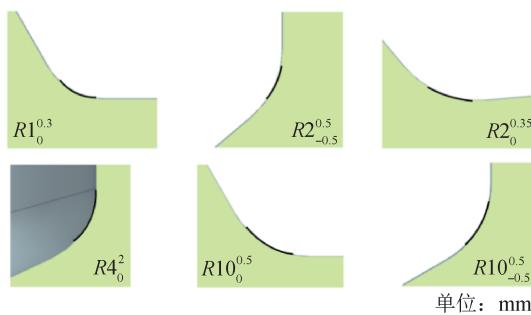


图4 待测圆弧特征

Fig.4 Circular arc characteristics to be measured

表1 待测圆弧特征径弧比

Tab.1 Ratio of diameter to arc of the circular arc characteristics to be measured

| 圆弧半径/mm            | 径弧比   |
|--------------------|-------|
| $R1_0^{0.3}$       | 1.28  |
| $R2_{-0.5}^{0.5}$  | 2.54  |
| $R2_0^{0.35}$      | 2.54  |
| $R4_0^2$           | 7.08  |
| $R10_0^{0.5}$      | 12.70 |
| $R10_{-0.5}^{0.5}$ | 12.70 |

用的五轴摆扫测量机长度最大允许误差为 $\pm(1.9 + L/350)\mu\text{m}$ ，测量速度高达500 mm/s，可以在短时间内获取大量的采样点数据<sup>[17]</sup>。但五轴摆扫测量机价格高昂、操作难度较大且普及程度较低，不适用于大批量零件测量，本文仅借助该测量机获得圆弧半径的实际值。

如图5所示，对每个圆弧特征执行五轴摆扫测量之后，通过软件对待测圆弧进行评价，并输出该圆弧的半径值，以此作为圆弧半径的真实值。之后分别使用传统测量方法和本文提出的方法对6类圆弧特征进行测量和评价。

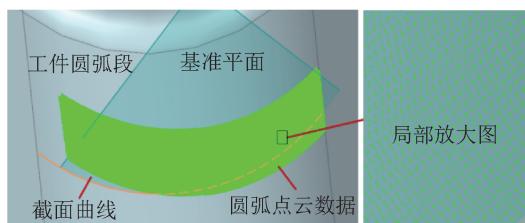


图5 圆弧半径真值的获取

Fig.5 Acquisition of the true value of the circular arc radius

### 3.1 方法验证

#### 3.1.1 传统测量方法

针对每个圆弧段，均采用手动采点的方式采集5个采样点，之后基于这5个采样点，运用拟合算法计算得出半径值。为减小随机误差对测量结果的影响，针对每组圆弧，均独立重复进行3次采点与拟合的操作流程。最终，将3次计算所得的半径值进行算术平均，将平均值作为该组圆弧半径的实测值。

#### 3.1.2 本文测量方法

如图2所示，采用三坐标测量机分别对 $L_1$ 和 $L_2$ 进行采样，采样长度为5 mm。借助软件中自带的算法对两直线边进行拟合操作，输出直线方程。之后利用软件求解出两条直线的交点 $P$ ，并输出两条直线的夹角 $\theta$ 。依据向量运算法则，计算得出角平分线的向量 $n$ ，设置三坐标测量机沿 $n$ 逼近交点 $P$ ，直到三坐标测量机触发，获得接触点 $P_c$ 。计算得出点 $P_c$ 与点 $P$ 之间的距离 $d$ ，根据式(1)求解得出圆弧半径 $R$ 。

### 3.2 实验数据对比分析

传统测量方法实验数据如表2所示，本文测量方法实验数据如表3所示。测量同一个圆弧半径时，传统方法和本文方法结果数据的极差不同，传统方法结果数据的极差较大，本文方法结果数据的极差较小，说明相较传统方法，本文方法测量圆弧半径时更稳定。分析测量值与真实值之间的差异可知：与传统方法相比，本文方法测得的圆弧半径值与真实值的差异更小，说明本文方法测量得到的结果更可信。

根据表3可知：测量 $R1_0^{0.3}$ 、 $R2_{-0.5}^{0.5}$ 、 $R2_0^{0.35}$  mm时，本文方法得到的测量值与真实值之间的差异均小于公差带的1/10；测量 $R4_0^2$ 、 $R10_0^{0.5}$ 、 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm时，本文方法得到的测量值与真实值之间的差异略大，均超过了公差带的1/10，但小于公差带的1/2。产生此现象的原因： $R1_0^{0.3}$ 、 $R2_{-0.5}^{0.5}$ 、 $R2_0^{0.35}$  mm对应径弧比相对较小的圆弧， $R4_0^2$ 、 $R10_0^{0.5}$ 、 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm对应径弧比相对较大的圆弧，当径弧比较大时，圆弧更平缓，角度变化更小，测量角度时产生的微小误差在计算半径时会被放大；测量时存在温度变化，不同零件结构的热胀冷缩程度不同，较大

表2 传统方法实验数据  
Tab.2 Experimental data of the traditional method

单位: mm

| 测量半径               | 实际值   | 测量值   |       |       | 极差    | 均值   | 均值与实际值的差值 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|
|                    |       | 第1次实验 | 第2次实验 | 第3次实验 |       |      |           |
| $R1_0^{0.3}$       | 1.36  | 1.17  | 0.95  | 0.96  | 0.222 | 1.03 | -0.33     |
| $R2_{-0.5}^{0.5}$  | 2.02  | 2.63  | 4.55  | 1.69  | 2.86  | 2.96 | 0.94      |
| $R2_0^{0.35}$      | 2.02  | 1.98  | 1.48  | 1.38  | 0.60  | 1.61 | -0.41     |
| $R4_0^2$           | 4.99  | 3.96  | 3.72  | 5.27  | 1.55  | 4.32 | -0.68     |
| $R10_0^{0.5}$      | 10.26 | 9.88  | 9.00  | 10.17 | 1.17  | 9.68 | -0.58     |
| $R10_{-0.5}^{0.5}$ | 10.28 | 10.52 | 9.78  | 8.95  | 1.57  | 9.75 | -0.53     |

表3 本文方法实验数据  
Tab.3 Experimental data of the method in this paper

单位: mm

| 测量半径               | 实际值   | 测量值   |       |       | 极差   | 均值    | 均值与实际值的差值 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----------|
|                    |       | 第1次实验 | 第2次实验 | 第3次实验 |      |       |           |
| $R1_0^{0.3}$       | 1.36  | 1.39  | 1.38  | 1.39  | 0.01 | 1.38  | 0.02      |
| $R2_{-0.5}^{0.5}$  | 2.02  | 2.04  | 2.02  | 2.03  | 0.02 | 2.03  | 0.01      |
| $R2_0^{0.35}$      | 2.02  | 2.04  | 2.04  | 2.03  | 0.01 | 2.04  | 0.01      |
| $R4_0^2$           | 4.99  | 4.85  | 4.96  | 4.79  | 0.17 | 4.87  | -0.12     |
| $R10_0^{0.5}$      | 10.26 | 10.36 | 10.58 | 10.45 | 0.22 | 10.46 | 0.20      |
| $R10_{-0.5}^{0.5}$ | 10.28 | 10.38 | 10.49 | 10.36 | 0.13 | 10.41 | 0.13      |

半径零件结构的尺寸变化更显著，引入了额外误差。

### 3.3 测量重复性

采用三坐标测量机基于本文方法进行测量，以径弧比大于5的大半径小圆弧 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm的测量误差为例，分析测量结果的重复性。在 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm处重复测量10次，测量偏差分别为0.14、0.04、0.13、0.14、0.12、0.02、0.02、0.04、0.10、0.11 mm，10次测量的算数平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0.086 \text{ mm} \quad (7)$$

式中： $x_i$ 为第*i*次测量的偏差，*n*为测量次数。极限偏差值范围为0.02~0.14 mm。

单次测量实验标准偏差*s*为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.05 \text{ mm} \quad (8)$$

极限偏差在实验标准偏差的3倍以内，因此对 $R10_{-0.5}^{0.5}$  mm的圆弧特征而言，本文方法的测量重复性可达0.05 mm，明显优于传统方法。

### 3.4 测量效率

测量效率对比数据如表4所示。使用传统方法测量时，手动打1个点平均耗时4 s，完成6条圆弧的打点测量及数据计算总共需要120 s。利用本文方法进行测量时，完成1条圆弧的扫描、接触点测量及数据计算共需要14 s，完成6条圆弧的测量共用时84 s。对比可知：相较传统方法，本文提出的大半径小圆弧几何特征测量方法的效率提升了约30%。

表4 测量效率对比

Tab.4 Comparison of measurement efficiency

单位: s

| 传统方法 |     | 本文方法     |     |
|------|-----|----------|-----|
| 单点用时 | 总用时 | 测量单个圆弧用时 | 总用时 |
| 4    | 120 | 14       | 84  |

## 4 结论

分析了现有大半径小圆弧类特征测量方法存在的精度低、速度慢以及数据稳定性不足等问题，提出了一种新的大半径小圆弧类特征测量方法，通过测量连接圆弧的直线边，结合拟合算法间接求解圆弧半径值。开展某柱塞泵壳体圆弧测量实验，对比传统三坐标测量方法和本文方法的实际应用效果，结果显示：本文方法具有更高的测量精度、稳定性、效率。研究成果为高端制造领域中的大批量大半径小圆弧类特征几何尺寸测量提供了技术借鉴。

需要指出的是，本文方法仅适用于小圆弧两侧为相切直边的情况，当圆弧边界与非相切直边相连，或存在多段曲线组合的复杂构型时，本文方法将无法准确构建几何约束关系。此外，在实际测量场景中，受设备安装精度、工件装夹误差等因素影响，测量平面与理论平面难以完全重合，由此产生的空间角度偏差会导致测量点的平面投影偏移，进而影响圆弧半径计算的准确性。未来需要针对上述情况进一步开展研究。

## 参考文献

- [1] 裴祖荣,石照耀,李岩.机械制造领域测量技术的发展研究[J].机械工程学报,2010,46(14):1-11.  
QIU Z R, SHI Z Y, LI Y. Research on the development of measurement technology in the field of mechanical manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 1-11. (in Chinese)
- [2] 孙安斌,曹铁泽,王继虎,等.高端装备大型零部件几何尺寸测量技术现状及趋势[J].计测技术,2021,41(2):41-50.  
SUN A B, CAO T Z, WANG J H, et al. Current status and trends of geometric dimension measurement technology for large components of high-end equipment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 41-50. (in Chinese)
- [3] CEGLAREK P G M. Design verification and validation in product lifecycle [J]. CIRP Annals, 2010, 59 (2) : 740-759.
- [4] 包祥威.基于机器视觉的摄影几何尺寸测量系统研究[D].郑州:河南工业大学,2022.  
BAO X W. Research on photographic geometric dimension measurement system based on machine vision [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [5] 邵伟国,王霄.非接触式三坐标测量短圆弧方法研究[J].测控技术,2013,32(6):140-141, 147.  
SHAO W G, WANG X. Research on the method of non-contact three - coordinate measurement of short - arc [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(6): 140-141, 147. (in Chinese)
- [6] 秦世林.基于机器视觉的非完整小圆弧测量方法研究[D].柳州:广西科技大学,2023.  
QIN S L. Research on measurement method of incomplete small arc based on machine vision[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [7] 丁圣.航空产品的大半径小圆弧测量方法研究[J].计测技术,2017,37(增刊1):68-69.  
DING S. Research on measurement method for large radius and small arc of aviation products [J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(supplement 1): 68-69. (in Chinese)
- [8] 王涛,杨林林,雷天才,等.基于坐标旋转的偏心过渡圆弧定心约束坐标测量方法[J].工具技术,2021,55(7):114-116.  
WANG T, YANG L L, LEI T C, et al. Coordinate measurement method for eccentric transition arc centering constraint based on coordinate rotation [J]. Tool Engineering, 2021, 55(7): 114-116. (in Chinese)
- [9] 杨晓民,张伟涛,陈涛,等.大半径小圆弧测量方法分析[J].工业计量,2014,24(3):17-18, 42.  
YANG X M, ZHANG W T, CHEN T, et al. Analysis of measurement methods for large-radius small arcs [J]. Industrial Measurement, 2014, 24 (3) : 17-18, 42. (in Chinese)
- [10] 陆晓.三坐标测量仪在复杂零件检测中的应用[J].装备制造技术,2023(7):248-252.  
LU X. Application of coordinate measuring machine in in-

- spection of complex parts [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(7): 248–252. (in Chinese)
- [11] 刘利剑, 王春华, 贾立红. 三坐标测量机使用中的典型问题及其解决方案[J]. 河北工业科技, 2006, 23(6): 350–352.  
LIU L J, WANG C H, JIA L H. Typical problems and their solutions in the use of coordinate measuring machines [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2006, 23(6): 350–352. (in Chinese)
- [12] 杨佳辉. 影像测量仪定位误差补偿系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
YANG J H. Design and implementation of positioning error compensation system for image measuring instrument [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 刘俊汉, 彭艺, 杜好岗, 等. 影像测量仪光学成像系统对测量的影响及测量结果不确定度分析[J]. 电子测试, 2022, 36(18): 38–40, 21.  
LIU J H, PENG Y, DU H G, et al. Influence of optical imaging system of image measuring instrument on measurement and uncertainty analysis of measurement results [J]. Journal of Electronic Testing, 2022, 36 (18) : 38–40, 21. (in Chinese)
- [14] 谢庚承. 飞行目标激光测距技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.  
XIE G C. Research on laser ranging technology for flying targets [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018. (in Chinese)
- [15] SHEN Y J, ZHANG W Z, ZHU L M, et al. An image-based algorithm for generating smooth and interference-free five-axis sweep scanning path[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71: 102159.
- [16] LI Z R, SHEN Y J, ZHANG W Z, et al. Five-axis continuous sweep scanning for curvature variable surfaces [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1009713.
- [17] SHEN Y J, REN J J, HUANG N D, et al. Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 5(2): 022006.

(本文编辑: 刘圣晨)

**第一作者:** 李富强(1976—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为几何量计量与检测。



**作者简介:** 陈鹏(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为复杂件加工测量一体化技术。



**作者简介:** 谢吉庆(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂件加工测量一体化技术。



**作者简介:** 陈永当(1972—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为先进制造技术。主持参与科研项目 20 余项, 发表论文 60 余篇, 授权专利 10 余项, 获省部级教学科研奖励 8 项。担任中国机械工程教育协会机械工程专业教学委员会委员、中国高等教育学会实验室管理工作分会理事等职务。



**通信作者:** 常智勇(1971—), 男, 教授, 博士, 长期从事计算机辅助设计与制造、航空复杂产品高性能制造等领域的科学研究、技术开发和应用推广工作。担任陕西省航空发动机智能装配工程技术中心主任、信息化生产力促进中心主任等职务。主编出版国家级规划教材 1 部, 发表高水平期刊论文百余篇, 获省部级科研和教学成果奖 5 项。