JJF

陕 西 省 地 方 计 量 技 术 规 范

JJF（陕）XXX－2021

柔性测量仪校准规范

Calibration Specification for Flexible Measuring Instrument

（报批稿）

2021－XX－XX 发布　　2021－XX－XX 实施

陕 西 省 市 场 监 督 管 理 局 发布

柔性测量仪校准规范

Calibration Specification for Flexible Measuring Instrument

JJF(陕)XXX－2021

归 口 单 位：陕西省市场监督管理局

主要起草单位：陕西省计量科学研究院

参加起草单位：中国航发西安航空发动机有限公司

本规范由陕西省市场监督管理局负责解释

本规范主要起草人：

刘　莹　（陕西省计量科学研究院）

张　丽　（中国航发西安航空发动机有限公司）

徐浩元　（中国航发西安航空发动机有限公司）

参加起草人：

杨　宁　（陕西省计量科学研究院）

李　勋　（陕西省计量科学研究院）

赵　迪　（陕西省计量科学研究院）

刘　霞　（陕西省计量科学研究院）

目　　录

引　　言.....（Ⅰ）
1　范围.....（1）
2　引用文件.....（1）
3　术语和定义.....（1）
4　概述.....（1）
5　计量特性.....（2）
5.1　测量重复性.....（2）
5.2　示值误差.....（3）
6　校准条件.....（3）
6.1　环境条件.....（3）
6.2　测量标准及其他设备.....（3）
7　校准项目和校准方法.....（3）
7.1　测量重复性.....（3）
7.2　示值误差.....（8）
8　校准结果表达.....（8）
9　复校时间间隔.....（8）
附 录A　柔性测量仪校准原始记录推荐样式.....（9）
附 录B　校准证书内容及内页格式（参考）.....（**错误！未定义书签。**）
附 录C　柔性测量仪示值误差测量不确定度评定示例.....（**错误！未定义书签。**）

引　　言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》等基础性系列规范文件进行制定。

本规范为首次发布。

柔性测量仪校准规范

1 范围

本规范适用于测量范围为（0~500）mm 柔性测量仪的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1859—2020 标准球棒校准规范

GB/T 1958—2017 产品几何技术规范（GPS）几何公差检测与验证

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 多特征标准器（Multi-feature standard）

具有尺寸、位置、距离、形状、曲线等多个特征，用于评定柔性测量仪计量特性的标准器（见图 1）。

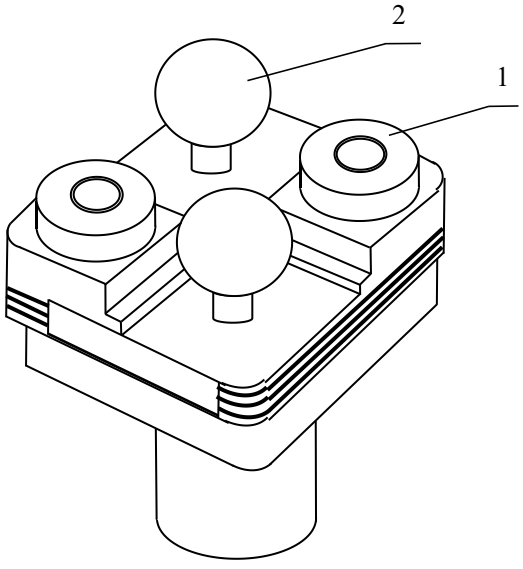


图 1 多特征标准器

1-标准环规 2-标准球

4 概述

柔性测量仪采用比较测量法，以标准件约定量值作为比对测量的参考值（或参考坐标）赋予柔性测量仪，测量标准件，生成标准数据集，以相同的测量程序采集其他被测工件的测

量参数，通过数据比对以确定被测工件的量值。

柔性测量仪主要由机械主机、探测系统、控制部分和测量软件组成，通过测头与被测物体的相对运动，对各种复杂的三维零件几何形状进行测量，主要用于精密加工行业批量加工件的快速检测，是一种能够应对车间温度的起伏变化，同时保证测量精度的自动比对测量设备。

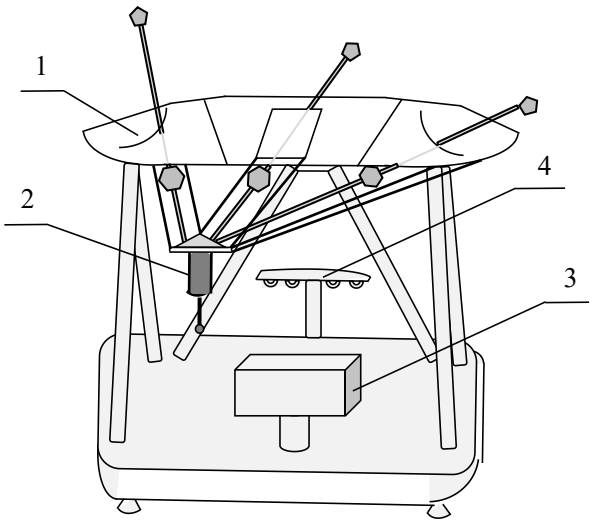


图 2 柔性测量仪示意图

1-主体　2-探测系统　3-被测零件　4-探针架

5　计量特性

5.1　测量重复性

测量重复性指标见表 1。

表 1 测量重复性指标

序号	测量特征参数		校准要求
1	尺寸特征 S		≤2.0 μm
2	位置特征 P		≤2.0 μm
3	距离特征 L_d	1D距离 L_{1d}	≤2.8 μm
		2D距离 L_{2d}	≤4.0 μm
		3D距离 L_{3d}	≤4.9 μm
4	形状误差 F		≤5.0 μm
5	曲线轮廓度 E_c		≤5.0 μm

5.2　示值误差 e

柔性测量仪在有效测量范围内的空间长度最大示值误差。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准温度在(10~40)℃范围内，相对湿度不大于 80%，柔性测量仪在室内平衡温度的时间不少于 4 h，无影响测量的振动、噪音和空气波动。

6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 2。

表 2 测量标准及其他设备

序号	校准项目	校准设备		技术参数	
1	测量重复性	多特征标准器	标准球 直径：25 mm 球心距：50 mm	球度	U≤0.5 μm，k=2
				直径	U≤0.5 μm，k=2
				球心距	U≤1.0 μm，k=2
			标准环规 直径：10 mm 圆心距：50 mm	圆度	U≤0.5 μm，k=2
				圆心距	U≤1.0 μm，k=2
2	示值误差	标准球棒	标准球 直径：(10～30) mm 球心距：(100～300) mm	球度	U≤0.8 μm，k=2
				球心距	U≤1/4|MPE|（柔性测量仪空间长度最大允许示值误差）

注：示值误差也可采用满足测量不确定度要求的其他测量设备进行校准。

7 校准项目和校准方法

7.1 测量重复性

将多特征标准器的尺寸特征、位置特征、距离特征、形状误差、曲线轮廓度等参数的约定量值作为比对测量的参考值（或参考坐标）赋予柔性测量仪，并以此标准器进行各特征参数测量重复性的测量。

7.1.1 尺寸特征 S

在标准球表面各选取 25 个测量点（见图 3），获得表面坐标点集，坐标点集分布如下：

———在标准球的极点一点;

———极点下 22.5°四点 (均匀分布)；

———极点下 45°八点 (均匀分布),相对于前一组点旋转 22.5°；

———极点下 67.5°四点 (均匀分布),相对于前一组点旋转 22.5°；

———极点下 90° (即在赤道上)八点 (均匀分布),相对于前一组点旋转 22.5°。

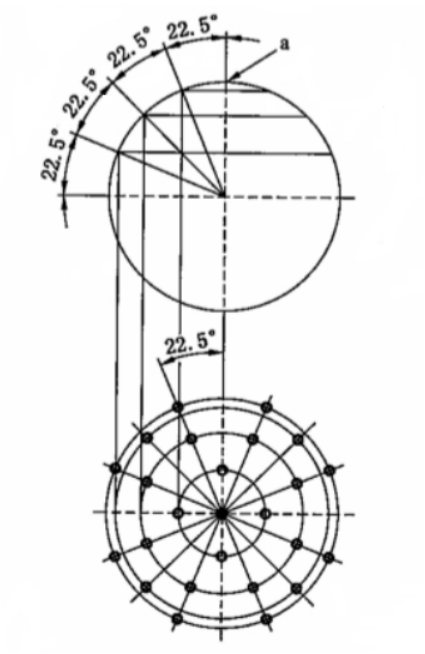


图 3 尺寸特征测量点分布图

利用标准球的坐标点集，采用最小二乘法拟合球，获得标准球直径D_i，计算D_i与参考直径D_r之差S_i，测量 10 次，取S_i中偏差最大测量值的绝对值为尺寸特征 S 测量重复性。

$$S_i = D_i - D_r \qquad （1）$$

式中：

S_i——尺寸特征的测量值；

D_i——标准球最小二乘拟合直径；

D_r——标准球参考直经；

i=1，2，…，10。

7.1.2　位置特征 P

测量标准环规在不同高度的内径圆 R1、R2（见图 4），采用最小二乘拟合圆，获得 R1、R2 圆心坐标(x_1, y_1)、(x_2, y_2)，分别计算 X 方向位置特征 P_{xi}、Y 方向位置特征 P_{yi}，测量 10 次，分别取P_{xi}、P_{yi}中偏差最大测量值的绝对值为位置特征 P 的测量重复性。

$$P_{xi} = x_{1i} - x_{2i} \qquad (2)$$

$$P_{yi} = y_{1i} - y_{2i} \qquad (3)$$

式中：

P_{xi}、P_{yi}——分别为 X 方向、Y 方向上位置特征的测量值；

(x_1, y_1)——标准环规内径圆 R1 最小二乘拟合圆心坐标；

(x_2, y_2)——标准环规内径圆 R2 最小二乘拟合圆心坐标；

i=1，2，…，10。

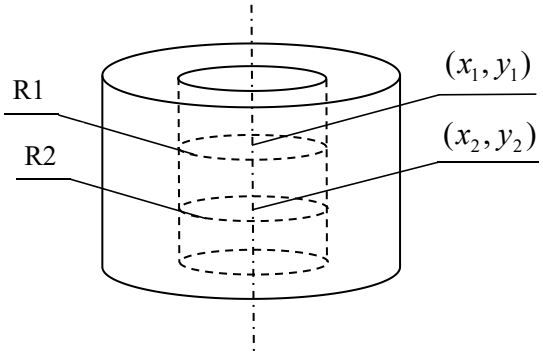


图 4 位置特征测量示意图

7.1.3 距离特征 L_d

（a）1D 距离 L_{1d}：

分别以标准器中 X、Y、Z 三个方向的平面 P_j 为基准面（见图 5），测量平行于各基准面 P_j 的直线 L_j 到对应基准面的距离 D_i，计算 D_i 与 1D 距离参考值 D_r 之差 L_{di}，测量 10 次，取 L_{di} 中偏差最大测量值的绝对值为测量结果。

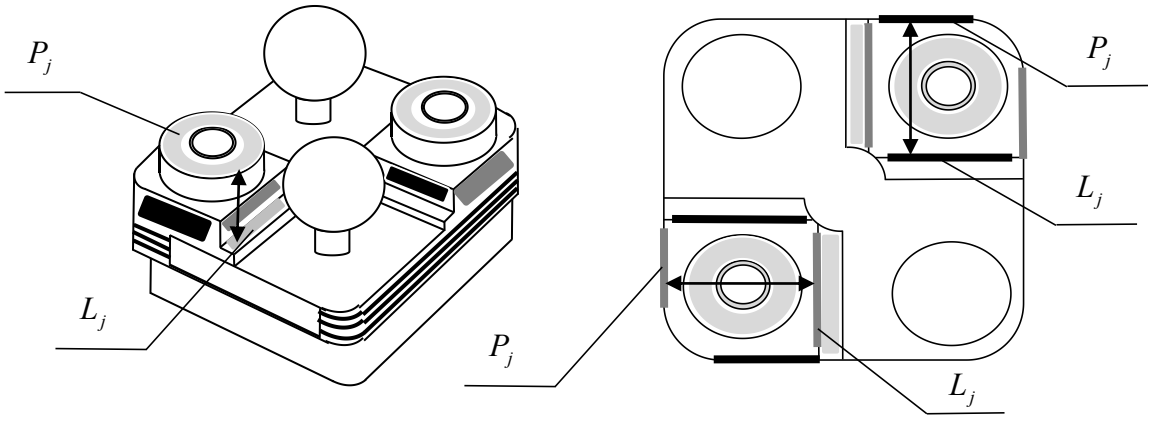


图 5 1D 距离特征测量示意图

$$L_{di} = D_i - D_r \tag{4}$$

式中：

L_{di}——1D 距离特征的测量值；

D_i——直线 L_i 到基准面 P_i 的距离；

D_r——1D 距离参考值；

i=1，2，…，10。

（b） 2D 距离 L_{2d}

分别测量标准环规 1 和标准环规 2 在同一高度的内径圆（见图 6），采用最小二乘拟合获得标准环规 1 和标准环规 2 圆心坐标(x_1, y_1)、(x_2, y_2)，计算两圆心连线的距离D_{2di}与 2D 距离参考值D_{2dr}之差L_{2di}，测量 10 次，取L_{2di}中偏差最大测量值的绝对值为测量结果。

$$D_{2di} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{5}$$

式中：

D_{2di}——内径圆 R1、R2 圆心连线的距离；

(x_1, y_1)——标准环规 1 内径圆 R1 最小二乘拟合圆心坐标；

(x_2, y_2)——标准环规 2 内径圆 R2 最小二乘拟合圆心坐标；

$$L_{2di} = D_{2di} - D_{2dr} \tag{6}$$

式中：

L_{2di}——2D 距离特征的测量值；

D_{2di}——内径圆 R1、R2 圆心连线的距离；

D_{2dr}——2D 距离参考值；

i=1，2，…，10。

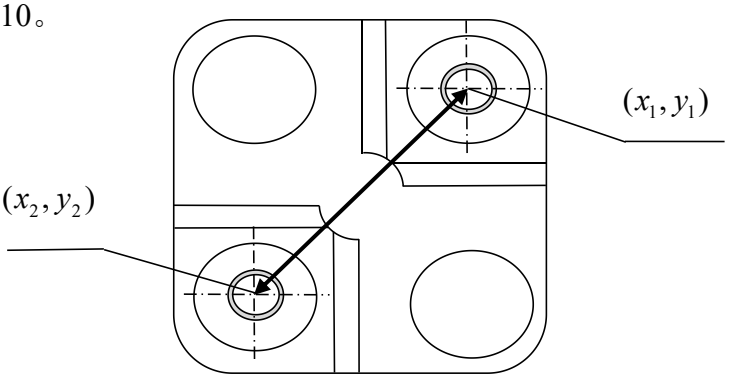


图 6 2D 距离特征测量示意图

（c）3D 距离特征 L_{3d}

按照 7.1.1 测量标准球 1 和标准球 2，获得标准球 1 和标准球 2 球心坐标(x_1, y_1, z_1)、(x_2, y_2, z_2)（见图 7），计算球心距D_{3di}与 3D 距离特征参考距离D_{3dr}之差L_{3di}，测量 10 次，取L_{3di}中偏差最大测量值的绝对值为测量结果。

$$D_{3di} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \tag{7}$$

式中：

D_{3di}——标准球 1 到标准球 2 球心距；

(x_1, y_1, z_1)——标准球 1 最小二乘拟合球心坐标；

(x_2, y_2, z_2)——标准球 2 最小二乘拟合球心坐标；

i=1，2，…，10。

$$L_{3di} = D_{3di} - D_{3dr} \tag{8}$$

式中：

L_{3di}——3D 距离特征的测量值；

D_{3di}——标准球 1 到标准球 2 球心距；

D_{3dr}——3D 距离参考值；

i=1，2，…，10。

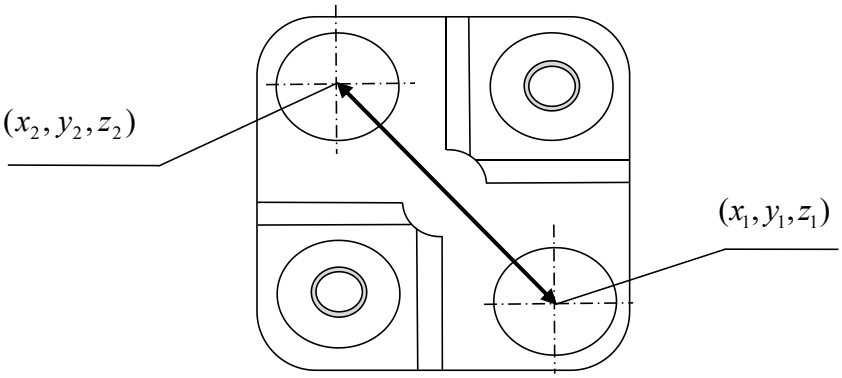


图 7 3D 距离特征测量示意图

7.1.4 形状特征 F

由 7.1.1 获得球心坐标(x, y, z)，计算标准球上的测量点与拟合球心的距离，其中最大距离$R_{\max}$与最小距离$R_{\min}$之差，即为球面形状误差F_i，测量 10 次，取F_i中最大的测量值为测量结果。

$$F_i = R_{\max} - R_{\min} \tag{9}$$

式中：

F_i——球面形状误差测量值；

$R_{\max}$——球 i 上的测量点与拟合球心的最大距离；

$R_{\min}$——球 i 上的测量点与拟合球心的最小距离；

i=1，2，…，10。

7.1.5 曲线轮廓度 E_c

扫描环规外径圆曲线（见图 8），在扫描曲线上均匀提取 6 个扫描点的坐标$(x_i，\ y_i，\ z_i)$，与相应的 6 个参考坐标$(x_r，\ y_r，\ z_r)$比较，计算各扫描点与相应参考点的距离偏差E_i，提取其中的极大偏差值和极小偏差值。测量 10 次，其中偏差最大测量值的绝对值为测量结果。

$$E_i = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} \tag{10}$$

式中：

E_i——6 个扫描点与相应的参考坐标的距离偏差；

$(x_i，y_i，z_i)$——扫描曲线上 6 个扫描点的坐标；

$(x_r，y_r，z_r)$——扫描曲线上 6 个扫描点的参考坐标；

i=1，2，…，10。

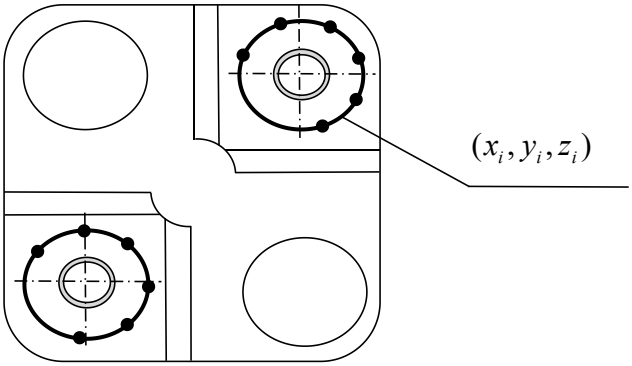


图 8 曲线轮廓度测量示意图

7.2 示值误差

选择两件相同规格的标准球棒作为标准器，球棒长度覆盖范围应不小于柔性测量仪测量范围的 30%，以标准球棒 1 的球心距约定量值作为参考值赋予柔性测量仪，使用柔性测量仪测量球棒 2 的球心距，测量 3 次，比较测量值和球棒 2 球心距的参考值，取测量结果中绝对值最大的测量值为示值误差。

$$e = L_m - L_r \tag{11}$$

式中：

e——柔性测量仪单次测量球心距的示值误差；

L_m——仪器测量球棒 2 球心距的测量值；

L_r——球棒 2 球心距参考值。

8 校准结果表达

经过校准的柔性测量仪发给校准证书，校准结果应在校准证书上反映。校准证书内容及内页格式（参考）见附录 B。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 12 个月。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间。

附 录 A

柔性测量仪校准原始记录推荐样式

记录编号：_____

委托单位：_____

器具名称：_____ 规格型号：_____

制造厂商：_____ 出厂编号：_____

校准依据：_____

校准用主要测量设备：

名称	测量范围	准确度等级\最大允许误差\测量不确定度	证书编号	有效期至

校准地点：_____ 环境温度：_____℃ 相对湿度：_____%

序号	校准项目			校准结果
1	测量重复性	尺寸特征		
		位置特征		
		距离特征	1D 距离	
			2D 距离	
			3D 距离	
		形状误差		
		曲线轮廓度		
2	示值误差			
测量结果不确定度：				

校准人员：_____ 核验人员：_____ 校准时间：_____

附 录B

校准证书内容及内页格式（参考）

B.1 校准证书应包括以下信息：

a）标题：“校准证书”；

b）实验室名称和地址；

c）进行校准的地点；

d）校准证书编号、页码及总页数的标识；

e）客户名称和地址；

f）被校仪器的制造单位、名称、型号及编号；

g）校准单位校准专用章；

h）校准日期；

i）校准所依据的技术规范名称及代号；

j）本次校准主要测量设备名称、型号、准确度等级或不确定度或最大允许误差、仪器编号、证书编号及有效期；

k）校准时的环境温度、相对湿度；

l）校准结果及其测量不确定度；

m）对校准规范偏离的说明（若有）；

n）复校时间间隔的建议；

o）“校准证书”的校准人、核验人、批准人签名及签发日期；

p）校准结果仅对被校仪器本次测量有效的声明；

q）未经实验室书面批准，部分复制证书或报告无效的声明。

B.2 推荐的校准证书内页格式

证书编号：

<table>
<tr><td>序号</td><td colspan="3">校准项目</td><td>校准结果</td></tr>
<tr><td rowspan="6">1</td><td rowspan="6">测量重复性</td><td colspan="2">尺寸特征</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">位置特征</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">距离特征</td><td>1D 距离</td><td></td></tr>
<tr><td>2D 距离</td><td></td></tr>
<tr><td>3D 距离</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">形状误差</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">曲线轮廓度</td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="3">示值误差</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">测量结果不确定度：</td></tr>
</table>

附 录 C

柔性测量仪示值误差测量不确定度评定示例

A.1 概述

A.1.1 环境条件：温度 21.0℃，湿度 42%RH。

A.1.2 测量标准：标准球棒（球心距：U=1.0 μm，k=2）

A.1.3 被测对象：测量范围（0~300 mm）的柔性测量仪

A.1.4 测量过程及方法：采用比较测量法

依据本规范 7.2 相关要求，选择球心距为 110 mm 的两件相同规格的标准球棒作为标准器，以其中一件为参考标准，将该标准球棒球心距的约定量值作为参考值赋予柔性测量仪；使用柔性测量仪测量 3 次被测球棒球心距，通过比较被测球棒球心距测量值和参考值，评价柔性测量仪尺寸示值误差。

A.2 测量模型

柔性测量仪单次测量球心距示值误差计算公式为：

$$e = L_m - L_r \tag{A.1}$$

式中：

e——柔性测量仪单次测量球心距的示值误差；

L_m——仪器测量被测标准球棒球心距的测量值；

L_r——被测标准球棒球心距参考值；

柔性测量仪测量示值误差测量模型为：

$$E = e_{|\max|} = (L_m - L_r)_{|\max|} + \delta_r + \delta_t + \delta_\alpha + \delta_c \tag{A.2}$$

式中：

$e_{|\max|}$——柔性测量仪三次测量中绝对值最大的测量值；

δ_r——参考标准球棒约定值赋予柔性测量仪引入的测量误差；

δ_t——两个标准球棒温度差引入的测量误差；

δ_α——两个标准球棒热膨胀系数差引入的测量误差；

δ_c——标准球棒装卡固定位置基准变化引入的测量误差；

A.3 不确定度传播率

式（A.2）中测量模型是线性模型，其中各影响分量互不相关，故有

$$\mu^2(E)=c_1^{\,2}\mu^2(L_m)+c_2^{\,2}\mu^2(L_r)+c_3^{\,2}\mu^2(\delta_r)+c_4^{\,2}\mu^2(\delta_t)+c_5^{\,2}\mu^2(\delta_\alpha)+c_6^{\,2}\mu^2(\delta_c) \qquad (A.3)$$

对式中各影响量求偏导数，得对应各影响量的灵敏系数为:

$$c_1=\frac{\partial E}{\partial L_m}=1 \qquad c_2=\frac{\partial E}{\partial L_r}=-1 \qquad c_1=\frac{\partial E}{\partial \delta_r}=1$$

$$c_4=\frac{\partial E}{\partial \delta_t}=1 \qquad c_5=\frac{\partial E}{\partial \delta_\alpha}=1 \qquad c_1=\frac{\partial E}{\partial \delta_c}=1$$

将各影响量的灵敏系数带入式（A.3）中可以表示为:

$$\mu^2(E)=\mu^2(L_m)+\mu^2(L_r)+\mu^2(\delta_r)+\mu^2(\delta_t)+\mu^2(\delta_\alpha)+\mu^2(\delta_c) \qquad (A.4)$$

由于参考标准球棒和被测标准球棒球心距约定值引入的不确定度分量来源相同，$u(L_r)=u(\delta_r)$，式（A.4）成为:

$$\mu^2(E)=\mu^2(L_m)+2\mu^2(L_r)+\mu^2(\delta_t)+\mu^2(\delta_\alpha)+\mu^2(\delta_c) \qquad (A.5)$$

A.4 不确定度因素分析

A.4.1 柔性测量仪测量引入的不确定度分量$u(L_m)$

参考柔性测量仪主要技术指标，仪器比对不确定度区间要求不大于±2 μm，U=2 μm，按正态分布处理，取 k=2 则:

$$u(L_m)=\frac{U}{k}=1\ \mu\text{m}$$

A.4.2 标准球棒球心距约定值引入的不确定度分量$u(L_r)$

依据标准球棒证书给的结论，球心距测量结果的不确定度为 U=1.0 μm，k=2，没有特殊说明，按正态分布处理，则:

$$u(L_r)=\frac{U}{k}=0.5\ \mu\text{m}$$

A.4.3 两标准球棒温度差引入不确定度分量$u(\delta_t)$

两个标准球棒在相同环境下恒温放置超过 4 h，估计其温度差Δt 在±0.5℃范围内，标准球棒热膨胀系数$\alpha=11.5\times10^{-6}℃^{-1}$，假设其满足均匀分布，取$k=\sqrt{3}$，$L$=110 mm，则:

$$u(\delta_t)=\frac{\Delta t\times\alpha\times L}{k}=0.37\ \mu\text{m}$$

A.4.4 两个标准球棒热膨胀系数差引入不确定度分量$u(\delta_\alpha)$

两个标准球棒的热膨胀系数$\alpha=(11.5\pm0.5)\times10^{-6}℃^{-1}$，故其线膨胀系数差$\Delta\alpha$ 应在

$\pm 1\times10^{-6}$℃$^{-1}$ 范围内，假设其满足三角分布，取 $k=\sqrt{6}$，$t=0.5$℃，L=110 mm，则：

$$u(\delta_\alpha)=\frac{t\times\Delta\alpha\times L}{k}=0.02\ \mu m$$

A.4.5　被测标准球棒装卡固定位置基准变化引入的不确定度分量 $u(\delta_c)$

标准球棒测量时都是装卡固定在专用卡具上，卡具与被测球棒接触面及定位基准位置要求公差在±0.5 mm，对是否加紧有 LED 指示灯提示，在测量前会重新定位建立坐标系，依据测量经验，每次装卡重新定位测量时引入的误差在±2 μm 范围内，其满足均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$，则：

$$u(\delta_c)=\frac{U}{k}=1.16\ \mu m$$

A.5　测量不确定度分量一览表

表 A.1 测量不确定度一览表

序号	不确定度来源	灵敏系数 c_i	不确定度分量 $u(x_i)$/um	$\lvert c_i\rvert\times u(x_i)$/um
1	$u(L_m)$	1	1	1
2	$u(L_r)$	$\sqrt{2}$	0.5	0.71
3	$u(\delta_t)$	1	0.37	0.37
4	$u(\delta_\alpha)$	1	0.02	0.02
5	$u(\delta_c)$	1	1.16	1.16

A.6　合成标准不确定度

各测量不确定度分量无相关性，合成标准不确定度：

$$u(E)=\sqrt{u^2(L_m)+2u^2(L_r)+u^2(\delta_t)+u^2(\delta_\alpha)+u^2(\delta_c)}=1.73\ \mu m$$

A.7　扩展不确定度

由表 A.1 得知，不确定度分量中没有明显占优势的分量，不确定度分量合成后，接近于正态分布，估计有 95%的概率落在该区间内，取包含因子 $k=2$，数据修约后，扩展不确定度为：

$$U(E)=k\bullet u(E)=3.5\ \mu m$$