

# T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0006—2025

## 用于半透明表面测量的结构光三维测量系 统校准方法

Calibration Method for Structured Light 3D Measurement System Applied to  
Translucent Surface Measurement

(报批稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国光学工程学会 发布

## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 半透明球标准器校准法 .....	1
4.1 适用范围 .....	1
4.2 校准原理 .....	2
4.3 校准装置 .....	2
4.4 校准条件 .....	3
4.5 校准方法 .....	3
4.6 测量不确定度 .....	4
5 半透明球棒标准器校准法 .....	4
5.1 适用范围 .....	4
5.2 校准原理 .....	4
5.3 校准装置 .....	5
5.4 校准条件 .....	5
5.5 校准方法 .....	5
5.6 测量不确定度 .....	6
6 球-平面组合标准器校准法 .....	6
6.1 适用范围 .....	6
6.2 校准原理 .....	6
6.3 校准装置 .....	7
6.4 校准条件 .....	7
6.5 校准方法 .....	7
6.6 测量不确定度 .....	7
附 录 A (资料性) 不确定度评定示例 .....	8
A.1 测量方法 .....	8
A.2 测量模型 .....	8
A.3 合成标准不确定度计算公式 .....	8
A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_i)$ .....	8
A.5 标准器具引入的标准不确定度 $u(D)$ .....	8
A.6 合成不确定度 .....	9
A.7 扩展不确定度 .....	9

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、北京长城计量测试技术研究所、北京航天计量测试技术研究所、成都飞机工业（集团）有限责任公司、思看科技（杭州）股份有限公司、长春理工大学等。

本文件主要起草人：赵慧洁、孙安斌、姜宏志、李本军、张海存、李旭东、朱绪胜、马振华、鲍晨兴、杨永军、何骁翔、董科研。

# 用于半透明表面测量的结构光三维测量系统校准方法

## 1 范围

本文件规定了用于半透明表面测量的结构光三维测量系统校准的半透明球标准器校准法、半透明球棒标准器校准法和球-平面组合标准器校准法。

本文件适用于半透明表面物体的曲面、距离以及平面测量的结构光三维测量系统校准。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T2410 透明塑料透光率和雾度的测定

JJF1001 通用计量术语及定义

JJF1951 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范

## 3 术语和定义

GB/T2410、JJF1001以及JJF1951界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**半透明表面 high-reflective Surface**

材料透光率在10%~90%之间的物体表面。

注：

- 1) 半透明表面入射光线可通过该表面，但无法完全穿透；
- 2) 且半透明表面在结构光投射下，穿透表面的光线产生次表面散射效应。

### 3.2

**球心-平面间距测量示值误差 sphere-flat-spacing error**

*SPD*

拟合球心到平面的垂直距离与理论距离之间的差值。

### 3.3

**单视角系统 single-view System**

测量时不改变结构光三维测量系统与被测物体之间相对位置的结构光三维测量系统。

### 3.4

**多视角系统 multi-view System**

测量时通过改变结构光三维测量系统与被测物体之间相对位置，从被测物体的不同方向采集三维点云，并将所有三维点云变换到统一的坐标系进行数据处理的结构光三维测量系统。多视角系统可以是在被测物体的不同方向安装的多个结构光三维测量子系统组成，也可以是通过移动单视角系统到被测物体的不同方向构成。

## 4 半透明球标准器校准法

### 4.1 适用范围

半透明球标准器校准法适用于结构光三维测量系统对半透明曲面探测能力的校准，由球形状探测误差  $P_F$  和尺寸探测误差  $P_S$  表征。

## 4.2 校准原理

在结构光三维测量系统的测量范围内均匀分布的8个位置安装半透明球标准器，见图1。测量标准球，得到标准球表面的点云数据。

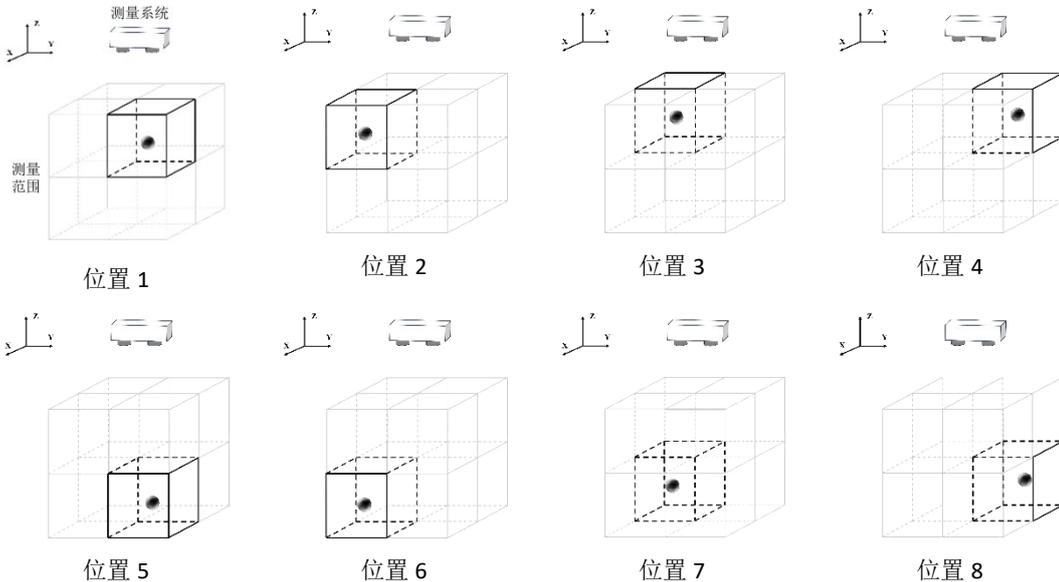


图1 标准球在测量范围内的安装位置示意图

分别对各测量位置的点云进行计算，得到拟合球。

所有点到拟合球心距离的最大值  $r_{\max}$  与最小值  $r_{\min}$  之差为该位置的球形状探测误差  $P_{Fi}$ ，按下式计算：

$$P_{Fi} = r_{\max} - r_{\min} \quad \dots\dots\dots (1)$$

拟合球的直径  $D_{ai}$  与测量球直径参考值  $D_r$  之间的差为该位置的尺寸探测误差  $P_{Si}$ ，按下式计算：

$$P_{Si} = D_{ai} - D_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

取各位置中形状探测误差和尺寸探测误差最大者，分别作为球形状探测误差  $P_F$  和尺寸探测误差  $P_S$  的测量结果，下式确定：

$$P_F = \text{MAX}(P_{Fi}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P_S = \text{MAX}(|P_{Si}|) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$i$ ——测量位置的序号， $i=1,2,\dots,8$ 。

## 4.3 校准装置

半透明球标准器应符合表1的规定。

表1 半透明球标准器

参数	技术要求
材质	标准器基体材料应具有典型半透明特性，如陶瓷、玉、玻璃等
尺寸大小	直径 $(0.02\sim 0.2) L_s$
透射特性	透光率 10%~90%，光源波段 380nm~760nm
球径误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
$L_s$ —结构光测量系统测量范围立方体的空间对角线长度，由制造厂商给出。	

#### 4.4 校准条件

##### 4.4.1 环境条件

校准环境条件包括温度和湿度：

- a) 温度：符合制造商仪器使用说明书的规定。
- b) 湿度：相对湿度宜小于75%RH。

##### 4.4.2 校准用软件

校准软件包括数据采集、数据处理和评价分析软件：

- a) 数据采集和数据处理软件使用设备配套软件，并按照制造商说明书设定图像采集处理的点间距、快门时间、稀疏点云参数、剔除率、拟合算法等，且测量结果应统一输出为点云。
- b) 评价分析软件具有点云几何量特征提取功能，包括但不限于球直径、球形状探测误差、球心坐标、平面度、点到面距离、平面测量完整率，且支持输入数据类型包含点云。

注：

- 1) 剔除率设定为0.3%。
- 2) 除制造商明确规定外，拟合算法宜采用最小二乘法。

#### 4.5 校准方法

##### 4.5.1 校准准备

校准前应作下列准备：

- a) 清洁结构光三维测量系统和标准器，不应有影响校准操作的多余物；
- b) 结构光三维测量系统配置与安装；
- c) 对操作模式进行设置，包括照明类型和亮度、测量范围、传感器类型、数量和分布等；
- d) 结构光三维测量系统标定；

##### 4.5.2 校准步骤

校准应按下列步骤执行：

- a) 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- b) 将半透明球标准器按图1所示依次摆放8个位置；
- c) 若为单视角测量，每个位置测量不少于5次，分别计算球形状探测误差及其算术平均值作为该位置的球形状探测误差  $P_{Fi}$ ，分别计算球尺寸探测误差及其算术平均值作为该位置的球尺寸探测误差  $P_{Si}$ ；
- d) 若为多视角测量，每个位置从至少3个不同视角扫描，如图2所示，拼接融合多组点云数据，且每个位置最终测量结果应至少覆盖每个球体的一个半球区域，每个位置重复测量不少于5次，分别计算球形状探测误差及其算术平均值作为该位置的球形状探测误差  $P_{Fi}$ ，分别计算球尺寸探测误差及其算术平均值作为该位置的球尺寸探测误差  $P_{Si}$ ；
- e) 分别计算球形状探测误差  $P_F$  及球尺寸探测误差  $P_S$ 。

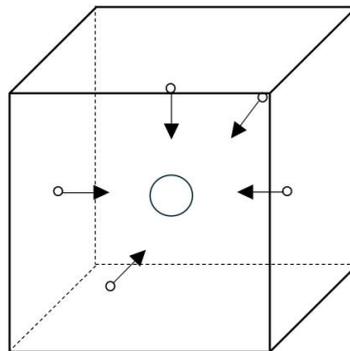


图2 多视角测量方向示意图

## 4.6 测量不确定度

按要求校准时,在不考虑被校准仪器测量重复性引入的标准不确定度时,半透明球标准器校准法的测量不确定度一般不大于  $5\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。半透明表面结构光三维测量系统校准结果的测量不确定度评定示例见附录 A。

## 5 半透明球棒标准器校准法

### 5.1 适用范围

半透明球棒标准器校准法适用于结构光三维测量系统对半透明表面距离探测能力的校准,由球心距测量示值误差  $SD$  表征。

### 5.2 校准原理

将系统测量范围划分为8个接近的栅格,当测量范围为长方体时,划分方式如图3所示。测量范围不是长方体时,栅格划分也应与长方体划分相对应。球棒每个球的可测量区域应完全位于一个栅格内,且两个球的可测量区域位于不同的栅格内。

球心距测量示值误差  $SD$  应在测量范围12个不同位置分别测量,在每个位置,球棒上至少一个球应接近传感器测量范围的外边缘,球上至少25%的点到系统测量范围的外边缘的距离不超过测量范围内最长长度的10%,或球心与系统测量范围外边缘之间的距离不超过测量范围内最长长度的10%。对角线方向的球棒摆放应相对于水平面有显著倾斜。宜按图2所示布置和测量标准器。

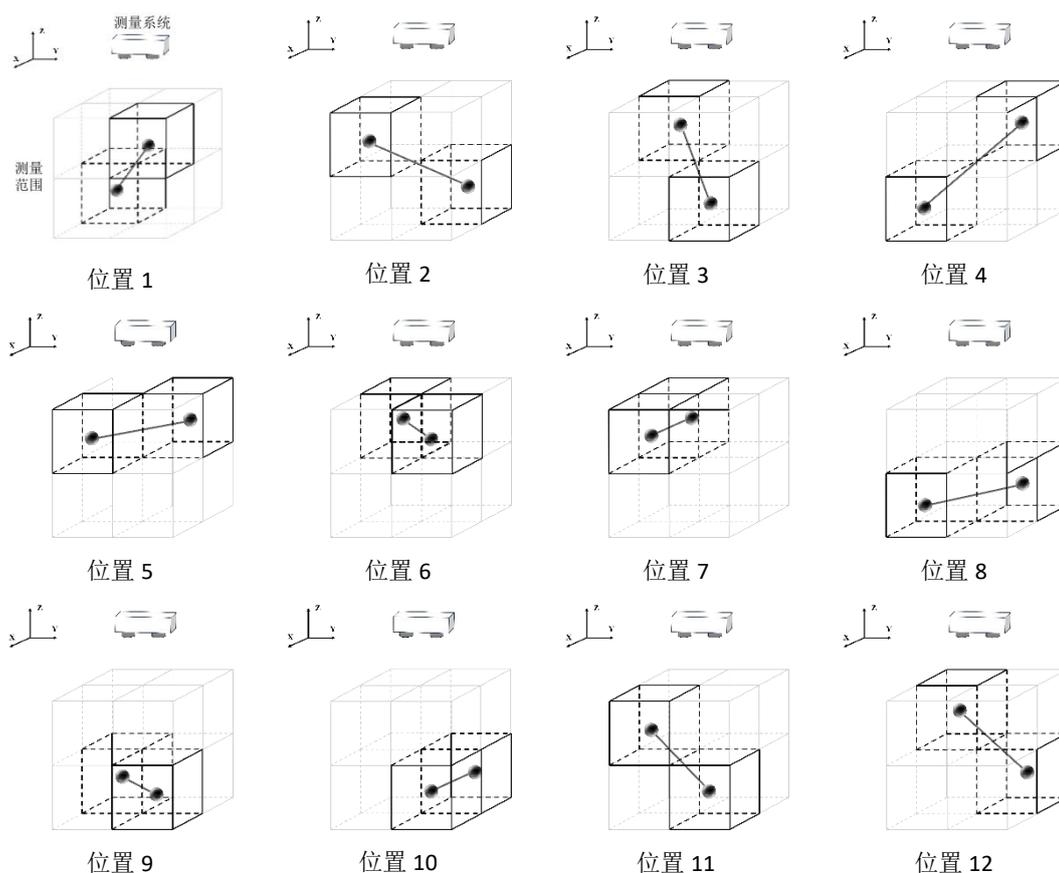


图3 球棒的推荐排列

对于测量位置,用定半径拟合法,拟合球心位置。计算球棒在每个位置的球心距,球心距测量示值误差  $SD_i$ , 为测量值  $L_{ai}$  与被测长度校准值  $L_r$  之差,按下式计算:

$$SD_i = L_{ai} - L_r \cdots \cdots (1)$$

取各位置中绝对值最大者，作为球心距示值误差  $SD$  的测量结果，按下式确定：

$$SD = \text{MAX}(|SD_{si}|) \cdots \cdots (2)$$

式中：

$i$ ——测量位置的序号， $i=1,2,\dots,12$ 。

### 5.3 校准装置

半透明球棒标准器应符合表 2 所示的规定。

表 2 球棒标准器

参数	技术要求
材质	标准器基体材料应具有典型半透明特性，如陶瓷、玉、玻璃等
尺寸大小	单视角系统：球心距不小于测量范围短边的 1/3 多视角系统：不小于测量范围最短边的 2/3，不大于测量范围对角线的 2/3
透射特性	透光率 10%~90%，光源波段 380nm~760nm
球径误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
球心距误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
$L_s$ —结构光测量系统测量范围立方体的空间对角线长度，由制造厂商给出。	

### 5.4 校准条件

符合 4.4 校准条件的规定。

### 5.5 校准方法

#### 5.5.1 校准准备

符合 4.5.1 校准准备的规定。

#### 5.5.2 校准步骤

校准应按下列步骤执行：

- 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- 将半透明球棒标准器按图 3 所示依次摆放 12 个位置；
- 若为单视角测量，每个位置测量不少于 5 次，分别计算球心距示值误差及其算术平均值作为该位置的球心距示值误差  $SD_i$ ；
- 若为多视角测量，每个位置从至少 3 个不同视角扫描，如图 4 所示，拼接融合多组点云数据，且每个位置最终测量结果应至少覆盖每个球体的一个半球区域，每个位置重复测量不少于 5 次，分别计算球心距示值误差及其算术平均值作为该位置的球心距示值误差  $SD_i$ ；
- 计算球心距测量示值误差  $SD$ 。

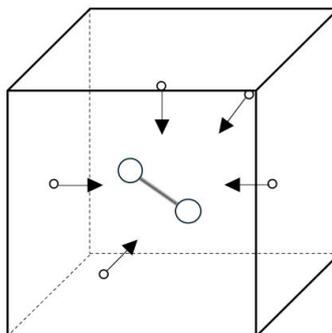


图 4 多视角测量方向示意图

## 5.6 测量不确定度

按要求校准时，在不考虑被校准仪器测量重复性引入的标准不确定度时，半透明球棒标准器校准法的测量不确定度一般不大于 $5\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。

## 6 球-平面组合标准器校准法

### 6.1 适用范围

球-平面组合标准器校准法适用于结构光三维测量系统对半透明平面探测能力的校准，由平面形状探测误差 $F$ 及球心-平面间距测量示值误差 $SPD$ 表征。

### 6.2 校准原理

如图5所示，球-平面组合标准器中标准球为漫反射表面，标准平面为半透明表面。

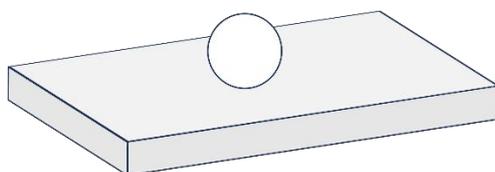


图5 球-平面组合标准器示意图

测量系统光轴平行于 $z$ 轴方向，球-平面组合标准器应在所有测量位置垂直于 $xoz$ 平面。球-平面组合标准器在测量空间的至少8个不同位置安装，如图6所示。球-平面组合标准器采用适当的方式固定，避免因不稳定引入测量误差。

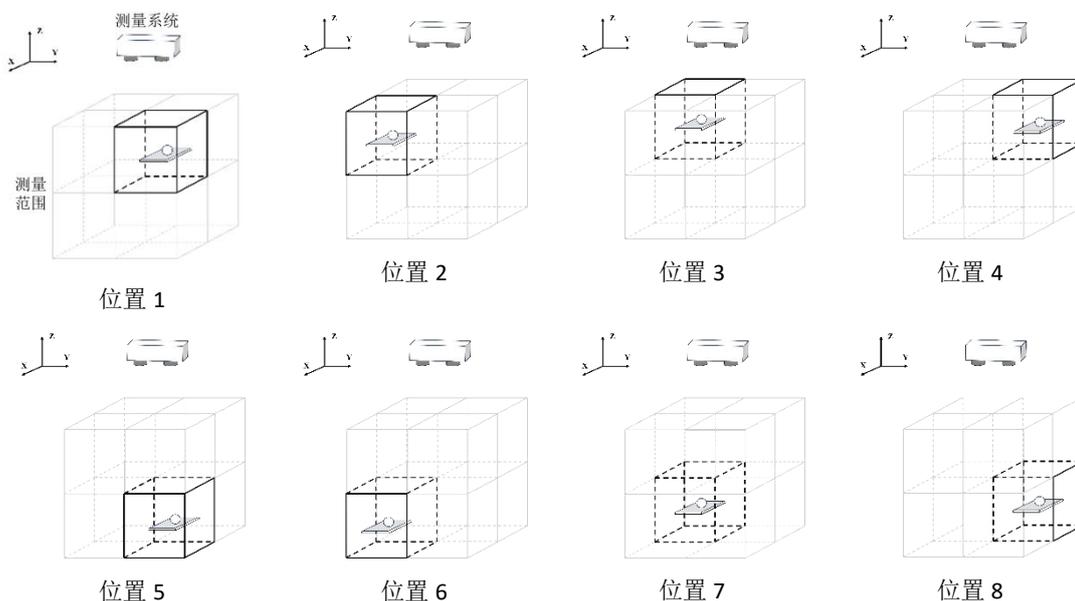


图6 平面标准器的推荐排列

测量得到标准平面工作面及标准球的点云数据，计算每个测量方向的最佳拟合平面及标准球球心坐标。分布在拟合平面两侧的点，到拟合平面单侧距离最大值的代数和，作为该位置平面形状探测误差 $F_i$ ， $i$ 表示测量位置的序号。

取各位置中最大值，作为平面形状探测误差 $F$ 的测量结果：

$$F = \text{MAX}(F_i) \dots\dots\dots (1)$$

计算每个测量方向的球心到拟合平面之间的距离，球心-平面间距测量示值误差  $SPD_i$ ，即测量值  $L_{spdi}$  与被测长度校准值  $L_{spdr}$  之差：

$$SPD_i = L_{spdi} - L_{spdr} \dots\dots\dots(2)$$

各球心-平面间距测量示值误差中绝对值最大者，作为球心-平面间距测量示值误差  $SPD$  的测量结果：

$$SPD = \text{MAX}(|SPD_i|) \dots\dots\dots(3)$$

式中： $i$ ——测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 8$ 。

### 6.3 校准装置

球-平面组合标准器应符合表 3 的规定。

表 3 球-平面组合标准器

参数	技术要求
材质	标准球具备漫反射特性，平面具备半透明特性
尺寸大小	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 50$ mm
透射特性	透光率 10%~90%，光源波段 380nm~760nm
平面度误差	测量不确定度 $\leq 4\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
球径误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
球心-平面间距误差	测量不确定度 $\leq 5\mu\text{m}$ ( $k=2$ )
$L_s$ —结构光测量系统测量范围立方体的空间对角线长度，由制造厂商给出。	

### 6.4 校准条件

符合 4.4 校准条件的规定。

### 6.5 校准方法

#### 6.5.1 校准准备

符合 4.5.1 校准准备的规定。

#### 6.5.2 校准步骤

校准应按下列步骤执行：

- 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- 将球-平面组合标准器按图 4 所示依次摆放 8 个位置；
- 每个位置测量不少于 5 次，分别计算平面形状探测误差及其算术平均值作为该位置的平面形状探测误差  $F_i$ ，分别计算球心-平面间距测量示值误差及其算术平均值作为该位置的球心-平面间距测量示值误差  $SPD_i$ ；
- 分别计算平面形状探测误差  $F$  及球心-平面间距测量示值误差  $SPD$ 。

### 6.6 测量不确定度

按要求校准时，在不考虑被校准仪器测量重复性引入的标准不确定度时，球-平面组合标准器校准法的测量不确定度一般不大于  $6\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。

附 录 A  
(资料性)  
不确定度评定示例

### A.1 测量方法

选用国内某用于半透明表面测量的结构光三维测量系统，其单视角系统测量空间范围400mm×200mm×200mm。选用直径50mm的半透明球标准器。在测量范围内，按照4.2的方法，采用单视角方式进行测量，分别放置于测量空间的8个不同位置进行测量。

球直径参考值为49.850mm，测量不确定度为2.0μm，线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量时环境温度 $(20 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$ ，温度测量误差优于 $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，结构光三维测量系统具有温度补偿功能。无其他明显的影响因素。

### A.2 测量模型

$$P_s = \text{MAX} (|P_{s_i}|) = \text{MAX} (|D_i - D|) \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

式中：

$D_i$ ——第*i*次测量球尺寸测量值，mm；

$D$ ——半透明标准球球尺寸的参考值，mm。

### A.3 合成标准不确定度计算公式

$$u_c(P_s) = \text{MAX}[u(P_{s_i})] = \text{MAX}[\sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)}] \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

式中：

$u(D_i)$ ——测量重复性引入的标准不确定度；

$u(D)$ ——标准器具引入的标准不确定度。

### A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_i)$

通过5次重复测量固定标准球，则测量重复性引入的标准不确定度

$$u(D_i) = \frac{s(D_i)}{\sqrt{5}} = 1\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

式中：

$s(D_i)$ ——多次重复测量球直径的实验标准偏差。

### A.5 标准器具引入的标准不确定度 $u(D)$

#### A.5.1 球尺寸参考值引入的标准不确定度分量

球尺寸参考值的测量不确定为2.0μm，包含因子 $k_1 = 2$ ，则

$$u_1(D) = \frac{2.0\mu\text{m}}{2} = 1.0\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

#### A.5.2 球温度变化引入的标准不确定度分量

球的线膨胀系数为 $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，直径为49.850mm，温度测量误差优于 $\pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，按均匀分布处理，包含因子 $k_2 = \sqrt{3}$ ，则

$$u_2(D) = \frac{49.850\text{mm} \times 8.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.12 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

#### A.5.3 球的线膨胀系数测量误差引入的标准不确定度分量

球的线膨胀系数为  $(8.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，半宽区间  $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  内服从均匀分布，测量环境温度按平均偏离标准温度  $5 \text{ } ^\circ\text{C}$  估计，包含因子  $k_3 = \sqrt{6}$ ，则：

$$u_3(D) = \frac{49.850\text{mm} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 0.10 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

#### A.5.4 合成标准器具引入的标准不确定度

各不确定度分量互不相关，合成标准器具引入的标准不确定度为：

$$u(D) = \sqrt{u_1^2(D) + u_2^2(D) + u_3^2(D)} = \sqrt{1.0^2 + 0.12^2 + 0.1^2} \approx 1.0 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

#### A.6 合成不确定度

各不确定度互不相关，合成不确定度为：

$$u_c(P_S) = \sqrt{u^2(D_i) + u^2(D)} = \sqrt{1.0^2 + 1.0^2} \approx 1.4 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

#### A.7 扩展不确定度

$$U = k u_c(P_S) = 2.8 \mu\text{m}, k = 2 \dots\dots\dots (\text{A.9})$$