

T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0008—2025

用于高反光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 for Highly
Reflective Surface Measurement

（报批稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国光学工程学会 发布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 高反光球标准器校准法 2

 4.1 适用范围 2

 4.2 校准原理 2

 4.3 校准装置 3

 4.4 校准条件 3

 4.5 校准方法 4

 4.6 测量不确定度 5

5 高反光球棒标准器校准法 5

 5.1 适用范围 5

 5.2 校准原理 5

 5.3 校准装置 6

 5.4 校准条件 6

 5.5 校准方法 6

 5.6 测量不确定度 7

6 高反光平面标准器校准法 7

 6.1 适用范围 7

 6.2 校准原理 7

 6.3 校准装置 8

 6.4 校准条件 8

 6.5 校准方法 8

 6.6 测量不确定度 9

7 高反光中空角锥标准器校准法 9

 7.1 适用范围 9

 7.2 校准原理 9

 7.3 校准装置 10

 7.4 校准条件 10

 7.5 校准方法 10

 7.6 测量不确定度 10

附 录 A （资料性） 不确定度评定示例 11

 A.1 测量方法 11

 A.2 测量模型 11

 A.3 合成标准不确定度计算公式 11

 A.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(D_i)$ 11

A. 5 标准器具引入的标准不确定度 $u(D)$ 11

A. 6 合成不确定度 12

A. 7 扩展不确定度 12

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、成都飞机工业（集团）有限责任公司、北京航天计量测试技术研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京卫星制造厂有限公司、长春理工大学等。

本文件主要起草人：赵慧洁、李本军、缪寅宵、姜宏志、杨永军、李旭东、朱绪胜、孙增玉、甘晓川、刘丽霞、唐小军、董科研。

用于高反光表面测量的结构光三维测量系统校准方法

1 范围

本文件规定了用于高反光表面测量的结构光三维测量系统校准的高反光球标准器校准法、高反光球棒标准器校准法、高反光平面标准器校准法、高反光中空角锥标准器校准法。

本文件适用于高反光表面物体的曲面、距离、平面以及多次反射表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/T1031 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值
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/T1031、JJF1001以及JJF1951界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

镜面反射率 specular Reflectance

在特定入射角条件下，材料表面沿镜面反射方向（反射角=入射角）的反射光通量与入射光通量的百分比比值。

3.2

漫反射率 diffuse Reflectance

在朗伯体近似下，材料表面在半球空间内所有方向反射光通量的积分与入射光通量的百分比比值。

3.3

高反光表面 high-reflective Surface

反射率动态范围不小于50:1的物体表面。

注：

- 1) 入射光照射到高反光表面，反射光主要由漫反射波瓣、镜面反射波瓣以及镜面反射波尖组成；
- 2) 结构光三维测量系统在适当的曝光时间、投影仪投射亮度条件下，反射率动态范围 η 定义为：

$$\eta = \frac{Gray_h \cdot S_l \cdot L_l}{Gray_l \cdot S_h \cdot L_h} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$Gray_h$ ——相机接收到镜面反射分量的最大灰度值，且小于相机饱和灰度值；
 $Gray_l$ ——相机接收到漫反射分量的最小灰度值，且大于相机暗噪声；
 S_h ——相机接收到镜面反射分量的最大灰度值时的曝光时间；
 S_l ——相机接收到漫反射分量的最小灰度值时的曝光时间；
 L_h ——相机接收到漫反射分量的最小灰度值时的投射亮度；
 L_l ——相机接收到漫反射分量的最小灰度值时的投射亮度。

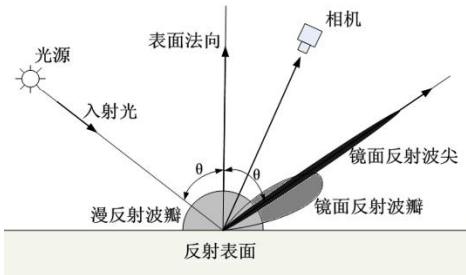


图 1 高反光表面反射光示意图

3.4

多次反射表面 multiple Reflection Surface

投射光线在表面或内部结构上连续发生两次及以上反射的物体表面。

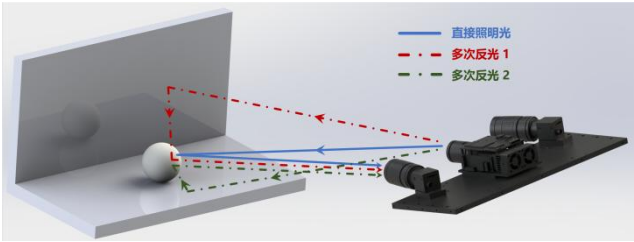


图 2 多次反射表面示意图

3.5

平面测量完整率 complete rate of plane measurement

Comp

有效点云覆盖面积与目标平面理论面积的比值。

3.6

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。

3.7

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 高反光球标准器校准法

4.1 适用范围

高反光球标准器校准法适用于结构光三维测量系统对高反光表面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

在测量范围内均匀分布的 8 个位置安装标准球,见图 3。测量标准球,得到标准球表面的点云数据。

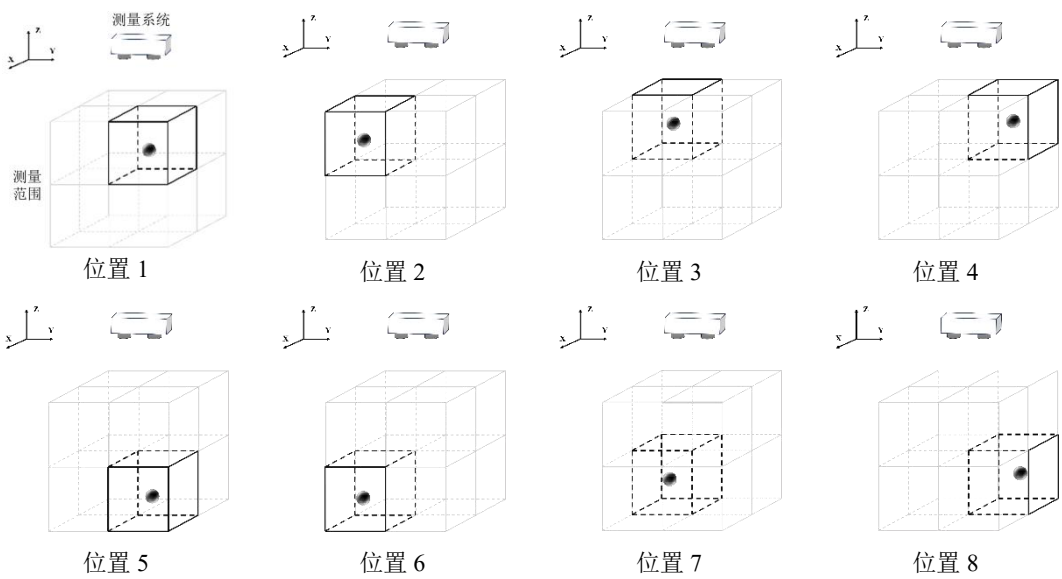


图 3 标准球在测量范围内的安装位置示意图

分别对测量位置点云计算，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} ，按下式确定

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

拟合球的直径 D_{ai} 与测量球直径参考值 D_r 之间的差为该反射率标准球尺寸探测误差 P_{Si} ，按下式确定：

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

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，按下式确定：

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

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

式中：

i ——测量位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 8$ 。

4.3 校准装置

高反光球标准器应符合表 1 的规定。

表 1 高反光球标准器

参数	技术要求
材质	钢，优选 GCr15、2Cr13 材料
加工工艺	端铣/研磨，无镀膜
尺寸大小	直径（0.02~0.2） L_s
表面粗糙度 Ra	$0.1 \leq Ra \leq 0.8$
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<75%RH。

4.4.2 校准用软件

校准用软件包括数据采集、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) 将高反光标准球按图 3 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 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 。

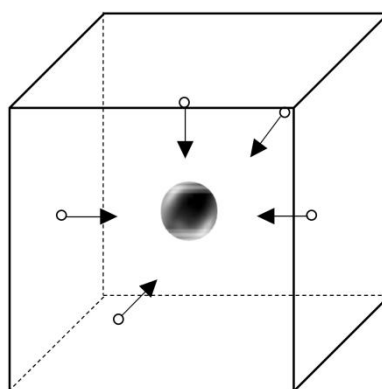


图 4 多视角测量方向示意图

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，高反光球标准器校准法的测量不确定度一般不大于 $5\mu\text{m}$ ($k=2$)。高反光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 高反光球棒标准器校准法

5.1 适用范围

高反光球棒标准器校准法适用于结构光三维测量系统对高反光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 5 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 to 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 5 所示布置和测量标准器。

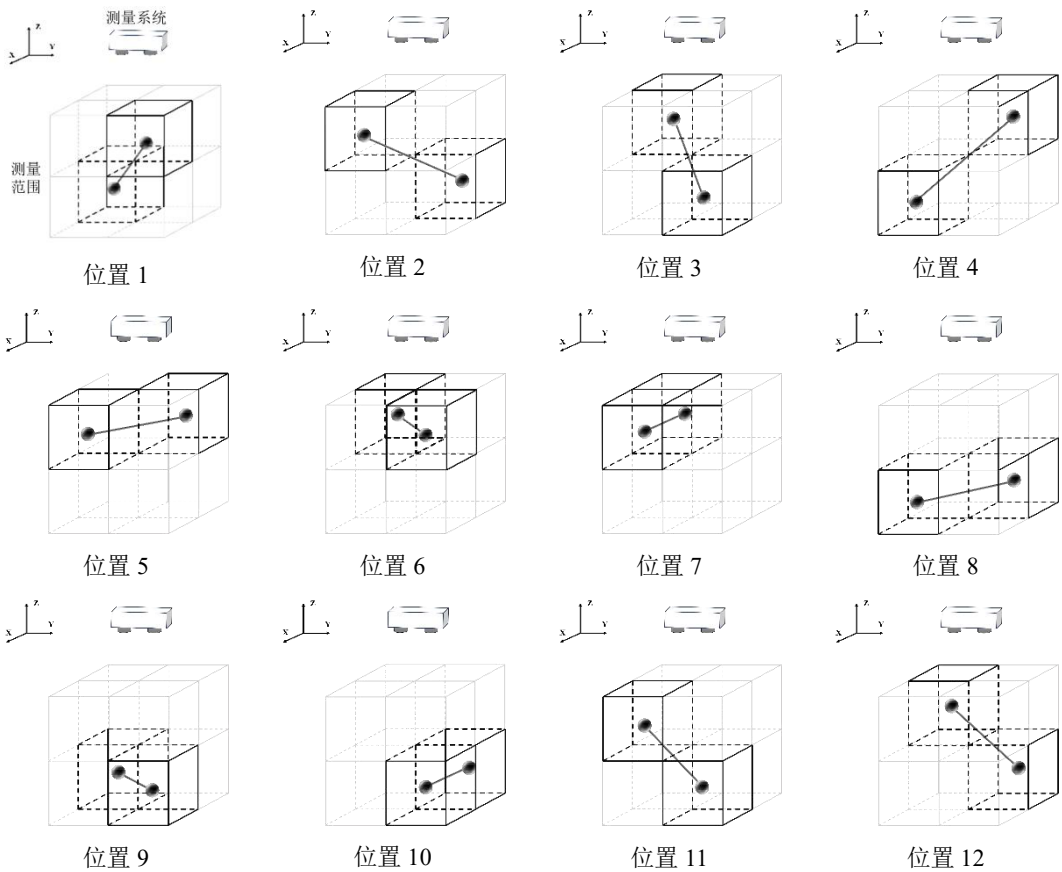


图 5 球棒的推荐排列

对于测量位置获取点云后，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 ，是测量值 L_{ai} 与被测长度校准值 L_c 之差，按下式计算：

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

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

$$SD = \text{MAX}(|SD_i|) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

i ——位置的序号， $i=1,2,\dots,12$ 。

5.3 校准装置

球棒标准器应符合表 2 的规定。

表 2 球棒标准器

参数	技术要求
材质	钢，优选 GCr15、2Cr13 材料
加工工艺	端铣/研磨，无镀膜
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
表面粗糙度	$0.1 \leq Ra \leq 0.8$
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 $\leq 2 \mu\text{m}$ ($k=2$)

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：

- a) 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- b) 将高反光标准球棒按图 5 所示依次摆放 12 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 ；
- 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 6 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 ；
- e) 计算球心距测量示值误差 SD 。

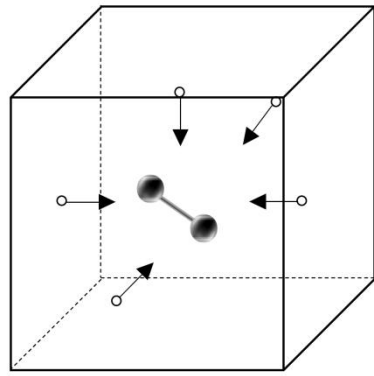


图 6 多视角测量方向示意图

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,高反光球棒标准器校准法的测量不确定度一般不大于 $5\mu\text{m}$ ($k=2$)。

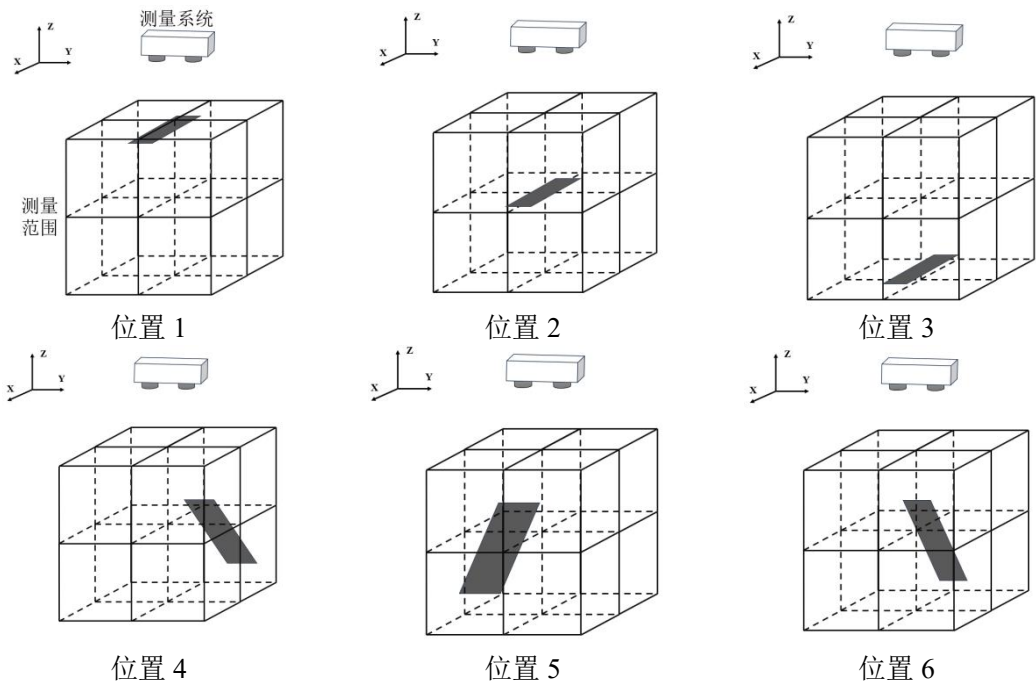
6 高反光平面标准器校准法

6.1 适用范围

高反光平面标准器校准法适用于结构光三维测量系统对高反光平面探测能力的校准,由平面形状探测误差 F_s 及平面测量完整率 $Comp_s$ 表征。

6.2 校准原理

测量系统光轴平行于 z 轴方向,标准平面应在所有测量位置垂直于 xoz 平面。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 7 所示。测量范围不是长方体,栅格也应与长方体划分相对应。标准平面在测量空间的至少 6 个不同位置安装,如图 7 所示。



位置 1-3: 标准平面垂直于 z 轴,长边对齐 x 轴;
位置 4-5: 标准平面垂直于 xz 平面对角线,长边平行于该对角线;
位置 6: 标准平面垂直于 xyz 空间对角线,长边平行于该对角线。

图 7 标准平面的推荐排列

测量得到标准平面工作面的点云数据,计算每个测量方向的最佳拟合平面。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_{si} , 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_s 的测量结果:

$$F_s = \text{MAX}(F_{si}) \dots\dots\dots (1)$$

式中:

i ——位置的序号, $i=1,2,\dots,6$ 。

平面测量完整率应为结构光三维测量系统在指定扫描条件下,对标准平面表面有效点云数据的捕获能力,表征为有效点云面积与理论平面面积的百分比比值。各位置平面测量完整率可以表示为:

$$Comp_{si} = \frac{A_{ai}}{A_r} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 A_{ai} ——测量点云表征的实测面积，（单位： mm^2 ）；
 A_r ——标准平面的测量视场区域面积（单位： mm^2 ）。

f) 取各位置中最小值，作为平面测量完整率 $Comp_s$ 的测量结果，按下式确定：

$$Comp_s = \text{MIN}(Comp_{si}) \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 i ——位置的序号， $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

6.3 校准装置

高反光平面标准器应符合表 3 的规定。

表 3 平面标准器

参数	技术要求
材质	钢，优选 GCr15、2Cr13 材料
加工工艺	端铣/研磨，无镀膜
尺寸大小	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 50 \text{ mm}$
表面粗糙度	$0.1 \leq Ra \leq 0.8$
尺寸误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ($k=2$)
平面度误差	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：

- a) 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
- b) 将高反光标准平面按图 7 所示依次摆放 6 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_{si} ，分别计算平面测量完整率及其算术平均值作为该位置的平面测量完整率 $Comp_{si}$ ；
- 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 8 所示，拼接融合多组点云数据，且每个位置最终测量结果应完整覆盖标准平面的表面，每个位置重复测量不少于 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_{si} ，分别计算平面测量完整率及其算术平均值作为该位置的平面测量完整率 $Comp_{si}$ ；
- e) 分别计算平面形状探测误差 F 及平面测量完整率 $Comp$ 。

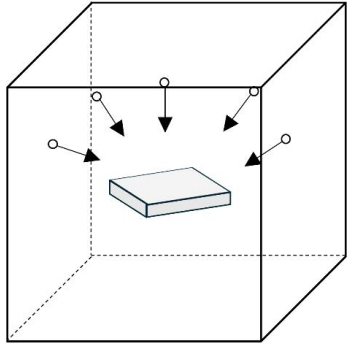


图 8 多视角测量方向示意图

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，高反光平面标准器校准法的测量不确定度一般不大于 $6\mu\text{m}$ ($k=2$)。

7 高反光中空角锥标准器校准法

7.1 适用范围

高反光中空角锥标准器校准法适用于结构光三维测量系统对多次反射表面测量能力的校准，由平面形状探测误差 F_m 及平面测量完整率 $Comp_m$ 表征。

7.2 校准原理

高反光中空角锥标准器应位于测量范围内，并且应从不少于 3 个方向测量高反光中空角锥标准器的三个内表面，见图 9，测量点云应完整地覆盖高反光中空角锥标准器的表面。

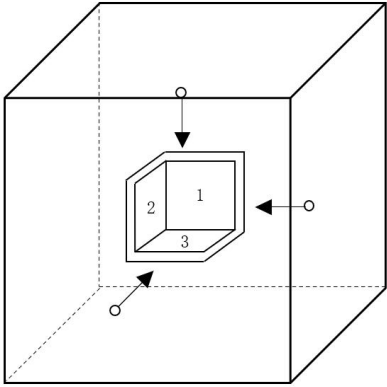


图 9 测量方向示意图

每个平面，利用测量到的点云拟合计算平面。取各平面中误差绝对值最大者作为平面形状探测误差 F_m 的测量结果，按下式确定：

$$F_m = \text{MAX}(F_{mk}) \dots\dots\dots (1)$$

平面测量完整率可以表示为：

$$Comp_{mk} = \frac{A_{ak}}{A_r} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 A_{ak} ——测量点云表征的实测面积，（单位： mm^2 ）；

A_{r} ——为标准平面的测量视场区域面积（单位： mm^2 ）

f) 取各平面中最小值，作为平面测量完整率 $Comp_{\text{m}}$ 的测量结果，按下式确定：

$$Comp_{\text{m}} = \text{MIN}(Comp_{\text{mk}}) \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：

k ——不同平面序号， $k=1,2,3$ 。

7.3 校准装置

高反光中空角锥标准器应符合表 4 规定。

表 4 高反光中空角锥标准器

参数	技术要求
材质	钢，优选 GCr15、2Cr13 材料
加工工艺	端铣/研磨，无镀膜
表面粗糙度	$0.1 \leq Ra \leq 0.8$
尺寸大小	工作面尺寸不小于 $0.5L_s \times 0.5L_s$
尺寸误差	测量不确定度 $\leq 2\mu\text{m}$ ($k=2$)
平面度误差	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。	

7.4 校准条件

符合 4.4 校准条件的规定。

7.5 校准方法

7.5.1 校准准备

符合 4.5.1 校准准备的规定。

7.5.2 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) 将结构光三维测量系统按图 9 所示三个方向依次摆放；
- c) 在每个方向，使用被校结构光三维测量系统测量不少于 5 次，分别计算平面形状探测误差及其算术平均值作为该方向的平面形状探测误差 F_{mk} ，分别计算平面测量完整率及其算术平均值作为该方向的平面测量完整率 $Comp_{\text{mk}}$ ；
- d) 分别计算平面形状探测误差 F_{m} 及平面测量完整率 $Comp_{\text{m}}$ 。

7.6 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，高反光中空角锥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

选用国内某用于高反光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 的高反光标准球。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 49.997mm，测量不确定度为 2.0μm，线膨胀系数为 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量时环境温度为 $(20 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C}$ ，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 ——高反光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

$$u(D_i) = \frac{s(D_i)}{\sqrt{5}} = 1.0 \mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

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 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，直径为 49.997mm，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

$$u_2(D) = \frac{49.997\text{mm} \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.17\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

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 $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，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°C 估计，包含因子 $k_3 = \sqrt{6}$ ，则：

$$u_3(D) = \frac{49.997\text{mm} \times 5 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{6}} \approx 0.10\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

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：

$$u(D) = \sqrt{u_1^2(D) + u_2^2(D) + u_3^2(D)} = \sqrt{1.0^2 + 0.17^2 + 0.1^2} \approx 1.0\mu\text{m} \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

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

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