|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 点击此处添加ICS号 |
| CCS | |  | | --- | | D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.png CSOE |   点击此处添加CCS号 |

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

点击此处添加标准名称的英文译名

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](#_Toc196249481)

[1 范围 1](#_Toc196249482)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc196249483)

[3 术语和定义 1](#_Toc196249484)

[4 高反光球标准器校准法 2](#_Toc196249485)

[4.1 校准原理 2](#_Toc196249486)

[4.2 校准装置 3](#_Toc196249487)

[4.3 校准条件 3](#_Toc196249488)

[4.4 校准方法 3](#_Toc196249489)

[4.5 测量不确定度 4](#_Toc196249490)

[5 高反光球棒标准器校准法 4](#_Toc196249491)

[5.1 校准原理 4](#_Toc196249492)

[5.2 校准装置 5](#_Toc196249493)

[5.3 校准条件 5](#_Toc196249494)

[5.4 校准方法 5](#_Toc196249495)

[5.5 测量不确定度 6](#_Toc196249496)

[6 高反光平面标准器校准法 6](#_Toc196249497)

[6.1 校准原理 6](#_Toc196249498)

[6.2 校准装置 7](#_Toc196249499)

[6.3 校准条件 7](#_Toc196249500)

[6.4 校准方法 8](#_Toc196249501)

[6.5 测量不确定度 8](#_Toc196249502)

[7 高反光三平面组合标准器校准法 8](#_Toc196249503)

[7.1 校准原理 8](#_Toc196249504)

[7.2 校准装置 9](#_Toc196249505)

[7.3 校准条件 9](#_Toc196249506)

[7.4 校准方法 9](#_Toc196249507)

[7.5 测量不确定度 10](#_Toc196249508)

[8 校准结果 10](#_Toc196249509)

[9 复校时间间隔 10](#_Toc196249510)

[附录A （资料性） 不确定度评定示例 11](#_Toc196249511)

1. 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、姜宏志、李旭东、李本军、朱绪胜、缪寅宵、吴桐、杨永军、孙安斌、刘丽霞、唐小军、董科研等。

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

本标准给出了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、高反光三平面组合标准器校准法校准高反光表面结构光三维测量系统测量精度的校准原理、校准装置、校准条件和校准方法。

本标准规定了高反光表面结构光三维测量系统的校准结果和复校时间间隔要求。

本标准适用于以高反光表面、多次反光表面为测量对象时结构光三维测量系统测量精度的校准。

* 1. 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。

JJF1001-2011《通用计量术语及定义》

JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》

JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》

JJF1951-2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》

ISO 10360-13-2021 Geometrical product specifications(GPS)acceptance and reverification tests forcoordinate measuring systems (CMS) Part 13: Optical 3D CMS

* 1. 术语和定义

JJF1951-2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

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。

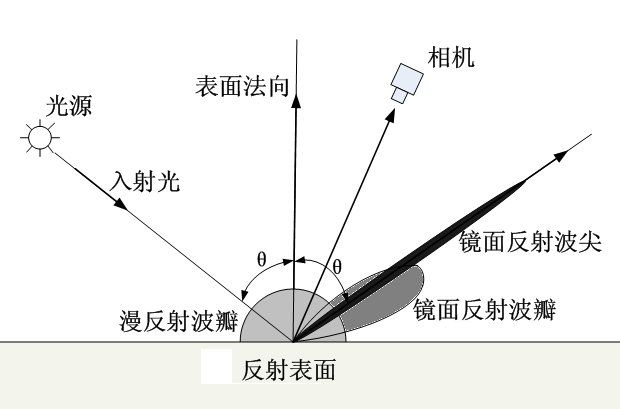
漫反射率 Diffuse Reflectance

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。

高反光表面 High-reflective Surface

指在结构光三维测量场景中呈现以下反射特性的物体表面：

* 1. 物体表面经过加工或镀膜后，呈现反射光线强烈的特征；
  2. 物体表面的反射特性不同于漫反射与镜面反射，其反射光主要是由漫反射波瓣、镜面反射波瓣以及镜面反射波尖组成；
  3. 相机接收到表面反射的镜面反射波尖远超漫反射波瓣亮度；
  4. 结构光投射到物体表面后，相机拍摄获得的表面图像呈现过曝或过暗的特点。



1. 高反光表面反射光示意图

多次反射表面 Multiple Reflection Surface

多次反射表面是指投射光线在其表面或内部结构上连续发生两次及以上反射的表面，其特性通常由表面反射特性和几何形状等决定。

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。

* 1. 高反光球标准器校准法
     1. 校准原理
        1. 单视角系统

在测量范围内大致均匀分布的个位置安装标准球，参见图2。测量标准球，得到标准球表面的点云数据。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 位置1 | 位置2 | 位置3 | 位置4 |
| 位置5 | 位置6 | 位置7 | 位置8 |

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与最小值之差为该位置的球形状探测误差

 ()

拟合球的直径与测量球直径参考值之间的差为该反射率标准球尺寸探测误差：

 ()

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和尺寸探测误差的测量结果：

 ()

 ()

式中：

——测量位置的序号，。

* + - 1. 多视角系统

球形状探测误差和尺寸探测误差应在整个测量范围8个不同位置分别测量。建议按照图2所示布置和测量标准器。每个被测球体需通过融合多个不同视角的测量数据进行三维拼接，且最终测量结果应至少覆盖每个球体的一个半球区域。

和的计算方法见4.1.1，公式(1)~公式(4)。

高反光表面结构光三维测量系统的测量精度由球形状探测误差和尺寸探测误差表征。

* + 1. 校准装置

高反光球标准器校准法校准装置为具有如表1所示技术参数的标准球。

1. 高反光球标准器技术要求

| **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 | 直径推荐使用（0.02~ 0.2）*L*S |
| 表面粗糙度 | ≤Ra 0.8 |
| 球径误差 | 优于±2 μm |
| *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。 | |

* + 1. 校准条件
       1. 环境条件

环境条件，包括环境的振动，背景光、环境温度及其均匀性、变化率等，应在不确定度评定中进行考虑。同时，不应有影响测量的其他环境因素。

* + - 1. 校准用软件

1. 校准过程中应使用设备的配套（数据采集和数据处理）软件。
2. 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。
   1. 需要稀疏点云时，应按照使用说明书进行。如果制造商未规定这些参数，则不考虑稀疏点云。
   2. 剔除率设定为0.3%。
   3. 除厂商明确规定外，拟合算法推荐采用最小二乘法。
      1. 校准方法
         1. 校准前准备

校准前作如下准备：

1. 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；
2. 结构光三维测量系统的配置与安装；
3. 对操作模式进行设置，包括照明的类型和亮度、测量范围、系统用传感器的类型、数量和分布等；
4. 结构光三维测量系统标定；
   * + 1. 校准步骤

校准步骤如下：

1. 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
2. 将高反光标准球按图2所示依次摆放8个位置；
3. 在每个位置，使用被校结构光三维测量系统测量高反光标准球；
4. 根据获取的三维数据计算球形状探测误差及球尺寸探测误差。
   * 1. 测量不确定度

按要求进行校准时,高反光球标准器校准法的测量不确定度优于被测仪器球形状探测误差及球尺寸探测误差的1/3。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。

* 1. 高反光球棒标准器校准法
     1. 校准原理
        1. 单视角系统

将系统的测量范围划分为8个大小接近的栅格，当测量范围为长方体时，划分方式如图3所示。如果测量范围不是长方体，栅格的划分也应该尽可能与长方体的划分相对应。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*应在整个测量范围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。建议按照图3所示布置和测量标准器。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 位置1 | 位置2 | 位置3 | 位置4 |
| 位置5 | 位置6 | 位置7 | 位置8 |
| 位置9 | 位置10 | 位置11 | 位置12 |

1. 球棒的推荐排列

对于所有测量位置，用定半径拟合法，拟合所有球心位置。计算球棒在每个位置的球心距，球心距测量示值误差，是测量值与被测长度校准值之差。

 ()

取各位置中绝对值最大者，作为球心距测量示值误差的测量结果：

 ()

式中：

——位置的序号，。

* + - 1. 多视角系统

球心距测量示值误差*SD*应在整个测量范围12个不同位置分别测量。建议按照图3所示布置和测量标准器。每个被测球体需通过融合多个不同视角的测量数据进行三维拼接，且最终测量结果应至少覆盖每个球体的一个半球区域。

*SD*的计算方法见5.1.1，公式(5)~公式(6)。

高反光表面结构光三维测量系统的测量精度由球心距测量示值误差表征。

* + 1. 校准装置

高反光球棒标准器校准法校准装置为具有如表2所示技术参数的标准球棒。

1. 球棒标准器技术要求

| **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 | ≤Ra 0.80 |
| 球径误差 | 优于±2 μm |
| 球心距误差 | 优于±5 μm |

* + 1. 校准条件
       1. 环境条件

环境条件，包括环境的振动，背景光、环境温度及其均匀性、变化率等，应在不确定度评定中进行考虑。同时，不应有影响测量的其他环境因素。

* + - 1. 校准用软件

1. 校准过程中应使用设备的配套（数据采集和数据处理）软件。
2. 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。
   1. 需要稀疏点云时，应按照使用说明书进行。如果制造商未规定这些参数，则不考虑稀疏点云。
   2. 剔除率设定为0.3%。
   3. 除厂商明确规定外，拟合算法推荐采用最小二乘法。
      1. 校准方法
         1. 校准前准备

校准前作如下准备：

1. 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；
2. 结构光三维测量系统的配置与安装；
3. 对操作模式进行设置，包括照明的类型和亮度、测量范围、系统用传感器的类型、数量和分布等；
4. 结构光三维测量系统标定；
   * + 1. 校准步骤

校准步骤如下：

1. 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
2. 将高反光标准球棒按图3所示依次摆放12个位置；
3. 在每个位置，使用被校结构光三维测量系统测量高反光标准球棒；
4. 根据获取的三维数据计算球心距测量示值误差。
   * 1. 测量不确定度

按要求进行校准时,高反光球棒标准器校准法的测量不确定度优于被测仪器球心距测量示值误差的1/3。

* 1. 高反光平面标准器校准法
     1. 校准原理
        1. 单视角系统

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。将系统的测量范围划分为8个大小接近的栅格，当测量范围为长方体时，划分方式如图4所示。如果测量范围不是长方体，栅格的划分也应该尽可能与长方体的划分相对应。标准平面在测量空间的至少6个不同位置安装，如图4所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 位置1 | 位置2 | 位置3 |
|  |  |  |
| 位置4 | 位置5 | 位置6 |

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。

1. 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，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的测量结果：

 ()

式中：

*——*位置的序号，。

平面测量完整率是指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：

 ()

式中：

——测量点云所表征的实测面积，（单位：mm²）；

——标准平面的测量视场区域面积（单位：mm²）。

取各位置中最小值，作为平面测量完整率*Comp*s的测量结果：

 ()

式中：

*——*位置的序号，。

* + - 1. 多视角系统

平面形状探测误差*F*s及平面测量完整率*Comp*s应在整个测量范围6个不同位置分别测量。建议按照图4所示布置和测量标准器。多视角测量以使点云应尽可能完整地覆盖标准平面的表面。每个位置，利用所有单幅图像的点云共同计算得到该位置的公共拟合平面。

*F*s和*Comp*s的计算方法见6.1.1，公式(7)~公式(9)。

高反光表面结构光三维测量系统的测量精度由平面形状探测误差*F*s及平面测量完整率*Comp*s表征。

* + 1. 校准装置

高反光平面标准器校准法校准装置为具有如表3所示技术参数的标准平面。

1. 平面标准器技术要求

| **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0.5*L*S×50 mm |
| 表面粗糙度 | ≤Ra 0.80 |
| 尺寸误差 | 优于标准器长度的0.05% |
| 平面度误差 | 优于被测仪器平面形状探测误差的1/4 |
| *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。 | |

* + 1. 校准条件
       1. 环境条件

环境条件，包括环境的振动，背景光、环境温度及其均匀性、变化率等，应在不确定度评定中进行考虑。同时，不应有影响测量的其他环境因素。

* + - 1. 校准用软件

1. 校准过程中应使用设备的配套（数据采集和数据处理）软件；
2. 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。
   1. 需要稀疏点云时，应按照使用说明书进行。如果制造商未规定这些参数，则不考虑稀疏点云。
   2. 剔除率设定为0.3%。
   3. 除厂商明确规定外，拟合算法推荐采用最小二乘法。
      1. 校准方法
         1. 校准前准备

校准前作如下准备：

1. 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；
2. 结构光三维测量系统的配置与安装；
3. 对操作模式进行设置，包括照明的类型和亮度、测量范围、系统用传感器的类型、数量和分布等；
4. 结构光三维测量系统标定；
   * + 1. 校准步骤

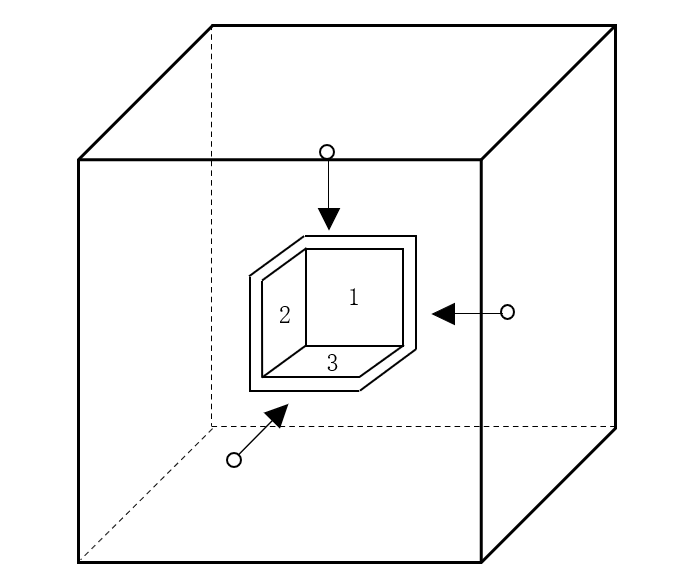
校准步骤如下：

1. 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
2. 将高反光标准平面按图4所示依次摆放6个位置；
3. 在每个位置，使用被校结构光三维测量系统测量高反光标准平面；
4. 根据获取的三维数据计算平面形状探测误差*F*及平面测量完整率*Comp*。
   * 1. 测量不确定度

按要求进行校准时,高反光平面标准器校准法的测量不确定度优于被测仪器平面形状探测误差的1/3。

* 1. 高反光三平面组合标准器校准法
     1. 校准原理

三平面组合标准器应位于测量范围内，并且应从不少于3个方向测量三平面组合标准器的三个内表面，参见图5，测量点云应尽可能完整地覆盖三平面组合标准器的表面。



1. **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的测量结果：

 ()

平面测量完整率可以表示为：

 ()

式中：

——测量点云所表征的实测面积，（单位：mm²）；

——为标准平面的测量视场区域面积（单位：mm²）

取各平面中最小值，作为平面测量完整率*Comp*m的测量结果：

 ()

式中：

——不同平面序号，。

三维测量系统测量多次反光表面的测量精度由平面形状探测误差*F*m及平面测量完整率*Comp*m

表征。

* + 1. 校准装置

高反光三平面组合标准器校准法校准装置为具有如表4所示技术参数的三平面组合标准器。

1. 三平**面组合标准器技术要求**

| **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 | ≤Ra 0.80 |
| 尺寸大小 | 工作面尺寸不小于0.5*L*S×0.5*L*S |
| 尺寸误差 | 优于标准器长度的0.05% |
| 平面度误差 | 优于被测仪器平面形状探测误差的1/4 |
| *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。 | |

* + 1. 校准条件
       1. 环境条件

环境条件，包括环境的振动，背景光、环境温度及其均匀性、变化率等，应在不确定度评定中进行考虑。同时，不应有影响测量的其他环境因素。

* + - 1. 校准用软件

1. 校准过程中应使用设备的配套（数据采集和数据处理）软件。
2. 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。
   1. 需要稀疏点云时，应按照使用说明书进行。如果制造商未规定这些参数，则不考虑稀疏点云。
   2. 剔除率设定为0.3%。
   3. 除厂商明确规定外，拟合算法推荐采用最小二乘法。
      1. 校准方法
         1. 校准前准备

校准前作如下准备：

1. 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；
2. 结构光三维测量系统的配置与安装；
3. 对操作模式进行设置，包括照明的类型和亮度、测量范围、系统用传感器的类型、数量和分布等；
4. 结构光三维测量系统标定；
   * + 1. 校准步骤

校准步骤如下：

1. 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
2. 将结构光三维测量系统按图5所示六个方向依次摆放；
3. 在每个方向，使用被校结构光三维测量系统测量三平面组合标准器；
4. 根据获取的三维数据计算平面形状探测误差*F*m及平面测量完整率*Comp*m。
   * 1. 测量不确定度

按要求进行校准时,高反光三平面组合标准器校准法的测量不确定度优于被测仪器平面形状探测误差的1/3。

* 1. 校准结果

经校准的结构光测量系统出具校准证书，校准证书应符合JJF1071—2010中5.12的要求，其中校准结果及其不确定度部分列出校准方法及数据，并注明测量环境（温度、湿度、振动）、测量时间、测量人员、点间距、快门时间、稀疏点云参数、删除点的比例、拟合算法、使用软件的生产商和版本号等必要信息。

* 1. 复校时间间隔

使用者根据实际使用情况决定复校时间间隔。建议复校间隔一般不超过1年。

2. （资料性）  
   不确定度评定示例

假设结构光测量系统具有温度补偿效果，测量选用高反光标准球，参考直径为，测量不确定度为，测量环境温度在内，温度测量误差优于，热膨胀系数为，半宽区间为。

测量模型：

 (A.1)

式中：

——第*i*次测量球尺寸测量值，mm；

：高反光标准球球尺寸的参考值，mm。

合成标准不确定度计算公式：

 (A.2)

式中：

——测量重复性引入的标准不确定度分量；

——标准器具引入的标准不确定度分量。

* 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，包含因子为，则

 (A.3)

* 1. 球温度变化引入的标准不确定度分量

球的线膨胀系数为，长度为，温度测量误差优于，按均匀分布处理，则

 (A.4)

* 1. 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，半宽区间内服从均匀分布，测量环境温度偏离标准温度不超过，则：

 (A.5)

则合成不确定度为：

 (A.6)

扩展不确定度最终为：

 (A.7)

