|  |  |
| --- | --- |
| 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 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

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](#_Toc196249717)

[1 范围 1](#_Toc196249718)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc196249719)

[3 术语和定义 1](#_Toc196249720)

[4 半透明球标准器校准法 1](#_Toc196249721)

[4.1 校准原理 1](#_Toc196249722)

[4.2 校准装置 2](#_Toc196249723)

[4.3 校准条件 3](#_Toc196249724)

[4.4 校准方法 3](#_Toc196249725)

[4.5 测量不确定度 3](#_Toc196249726)

[5 半透明球棒标准器校准法 3](#_Toc196249727)

[5.1 校准原理 3](#_Toc196249728)

[5.2 校准装置 4](#_Toc196249729)

[5.3 校准条件 5](#_Toc196249730)

[5.4 校准方法 5](#_Toc196249731)

[5.5 测量不确定度 5](#_Toc196249732)

[6 球-平面组合标准器校准法 5](#_Toc196249733)

[6.1 校准原理 5](#_Toc196249734)

[6.2 校准装置 6](#_Toc196249735)

[6.3 校准条件 7](#_Toc196249736)

[6.4 校准方法 7](#_Toc196249737)

[6.5 测量不确定度 7](#_Toc196249738)

[7 校准结果 7](#_Toc196249739)

[8 复校时间间隔 8](#_Toc196249740)

[附录A （资料性） 不确定度评定示例 9](#_Toc196249741)

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、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、姜宏志、李旭东、杨永军、孙安斌、张海存、鲍晨兴、李本军、朱绪胜、马振华、何骁翔、董科研等。

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

本标准给出了半透明球标准器校准法、半透明球棒标准器校准法、球-平面组合标准器校准法校准用于半透明表面测量的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。

本标准规定了半透明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。

本标准适用于以半透明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。

GB/T2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》

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

GB/T2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》与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。

半透明表面 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. 半透明表面的反射特性是能够透过光线但不完全透明，这种特性介于完全透明和完全不透明之间，光线可以通过该表面，但无法完全穿透。
  2. 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。

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。

* 1. 半透明球标准器校准法
     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半透明标准球，，总计测量8次，参见图1。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1所示布置和测量标准器。每个被测球体需通过融合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7.1.1，公式~公式。

半透明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

半透明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. **球标准器**技术要求

|  |  |
| --- | --- |
| **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 | 直径推荐使用（0.02~ 0.2）*L*S |
| 透射特性 | 透光率（10%~80%） |
| 球径误差 | 优于±2µm |
| *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. 将半透明标准球按图1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半透明标准球；
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,半透明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。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。

* 1. 半透明球棒标准器校准法
     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2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应在整个测量范围12个不同位置分别测量，，总计测量12次，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2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，作为球心距示值误差的测量结果：

 ()

式中：

*i*——测量位置的序号，。

* + - 1. 多视角系统

球心距测量示值误差应在整个测量范围12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。

的计算方法见7.2.1，公式~公式。

半透明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

半透明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 | 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%~80%） |
| 球径误差 | 优于±2µm |
| 球心距误差 | 优于±5µm |
| *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

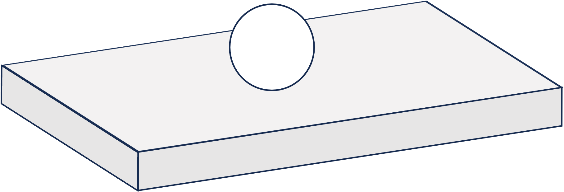
校准步骤如下：

1. 结构光三维测量系统的启动/预热周期；
2. 将半透明标准球棒按图2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半透明标准球棒；
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,半透明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. 球-平面组合标准器校准法
     1. 校准原理

如图3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。



1. **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4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。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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. **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，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：

 ()

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，即测量值与被测长度校准值之差：

 ()

取各球心-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的测量结果：

 ()

式中：——测量位置的序号，。

半透明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*及球心-平面间距测量示值误差表征。

* + 1. 校准装置

球-平面组合标准器校准法校准装置为具有如表3所示技术参数的三平面组合标准器。

1. **球-平面组合标准器技术要**求

| **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0.5*L*S×50 mm |
| 透射特性 | 透光率（10%~80%） |
| 平面度误差 | 优于被测仪器平面形状探测误差的1/4 |
| 球径误差 | 优于±2µm |
| 球心-平面间距误差 | 优于±5µm |
| *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. 将球-平面组合标准器按图4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球-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*及球心-平面间距测量示值误差。
   * 1. 测量不确定度

按要求进行校准时,球-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及球心-平面间距测量示值误差的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，测量选用半透明标准球，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；

：半透明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)

