



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXX—XXXX

## 船载水陆一体化点云测距系统校准规范

Calibration specification for shipborne integrated point cloud ranging system

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

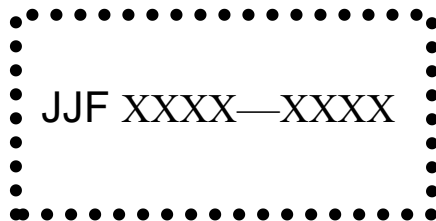
XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布



船载水陆一体化点云测距系统  
校准规范

Calibration specification for shipborne  
integrated point cloud ranging system



归口单位：全国水运专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位：浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院）

参加起草单位：山东科技大学

交通运输部天津水运工程科学研究所

杭州市水库管理服务中心

本规范委托全国水运专用计量器具计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

孙月文（浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院））

**参加起草人：**

阳凡林（山东科技大学）

段文义（浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院））

柳义成（交通运输部天津水运工程科学研究所）

石波（山东科技大学）

金国栋（杭州市水库管理服务中心）

卫进进（浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院））

# 目 录

引 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语 .....	1
4 概述 .....	1
5 计量特性 .....	2
5.1 空间相对距离示值误差 .....	2
5.2 一致性示值误差 .....	2
6 校准条件 .....	2
6.1 环境条件 .....	2
6.2 校准设备 .....	3
7 校准项目和校准方法 .....	3
7.1 校准项目 .....	3
7.2 校准前准备 .....	3
7.3 空间相对距离示值误差 .....	6
7.4 一致性示值误差 .....	6
8 校准结果表达 .....	7
9 复校时间间隔 .....	8
附录 A 船载水陆一体化点云测距系统检校方法 .....	9
附录 B 基于半径约束的球型靶标球心坐标拟合方法 .....	11
附录 C 船载水陆一体化点云测距系统校准记录表格式 .....	13
附录 D 船载水陆一体化点云测距系统校准证书内页格式 .....	14
附录 E 船载水陆一体化点云测距系统校准评定示例 .....	16

# 引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语与定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

# 船载水陆一体化点云测距系统校准规范

## 1 范围

本规范适用于船载水陆一体化点云测距系统的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1406—2013 地面激光扫描仪校准规范

JJG 100—2003 全站型电子速测仪

JJG 741—2022 标准钢卷尺

HY/T 0350—2023 船载海陆地形地貌一体化调查技术要求

CH/T 8023—2011 机载激光雷达数据处理技术规范

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

### 3.1 点云 point cloud

以离散、不规则方式分布在三维空间中的点的集合。

[CH/T 8023—2011，术语和定义3.3]

### 3.2 球型靶标 spherical target

具有几何中心并可用于校准的球型扫描目标。

[改写 JJF 1406—2013，术语和定义3.1]

### 3.3 空间相对距离 relative distance

在空间中，球型靶标球心之间的相对距离。

### 3.4 球棒 ball bar

通过刚性结构连接两个靶标构成的标准器。

[JJF 1406—2013，术语和定义3.5]

### 3.5 一致性 consistency

是指船载水陆一体化点云测距系统所测水上部分点云与水下部分点云在水平面内和垂直面内的符合程度。

## 4 概述

船载水陆一体化点云测距系统是（简称点云测距系统）以水面船只（含无人船）为载体将多种传感器集成于一体，采用条带测量的方式，同步获取近岸水上及水下地形点云数

据。水上部分通常采用三维激光扫描仪，水下部分通常采用多波束测深仪，利用定位仪和姿态仪获取三维激光扫描仪和多波束测深仪的位置和姿态信息，通过计算机对各传感器的数据进行融合计算，形成水上及水下地形的点云成果，点云测距系统构成见图1。

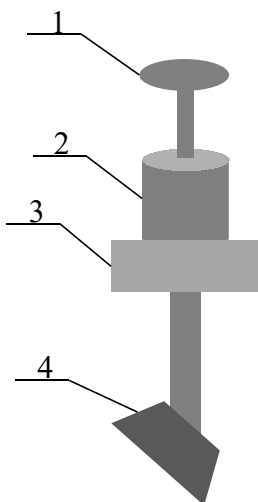


图1 点云测距系统构成

## 5 计量特性

### 5.1 空间相对距离示值误差

水上部分空间相对距离示值误差不大于0.3 m，水下部分空间相对距离示值误差不大于0.5 m。

### 5.2 一致性示值误差

水平面内的一致性示值误差不超过0.3 m，垂直面内的一致性示值误差不超过0.2 m。

注：示值误差要求不作为仪器设备合格判读的依据。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

#### 6.1.1 水上环境条件

环境条件要求如下：

- a) 室温：-10℃ ~ 40℃。
- b) 空气相对湿度：应不大于90%。

c) 点云测距系统校准不应受到强磁场、电场、障碍物阻挡以及反光物反光和阳光直射等光的干扰。

#### 6.1.2 水下环境条件



环境条件要求如下：

- a) 水温： $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 系统的校准不应受到强磁场、电场、声波干扰，水下障碍物的阻挡。

## 6.2 校准设备

### 6.2.1 计量标准器

计量校准装置或标准器具校准标准要求如下：

a) 球棒：应包含球型靶标和连接杆；球型靶标表面应漫反射，无投射型靶标（推荐选用表面喷砂处理的不锈钢制品），直径不小于0.5 m，直径变化量不大于3 mm；连接杆（推荐选用不锈钢制品）长度5 m，每隔0.3 m应设置定位点，各定位点距两球型靶标球心连线的距离不大于3 mm，见图2。

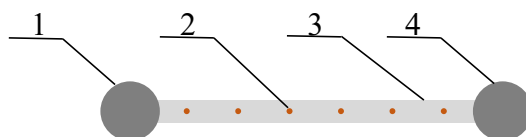


图2 球棒示意图

1——球型靶标1；2——定位点；3——连接杆；4——球型靶标2；

- b) 全站仪：测距 I 级，测角最大允许误差 $\pm 0.5''$ ，免棱镜。
- c) 钢卷尺：测量范围0 m~10 m，准确度等级 II 级。

### 6.2.2 辅助设备

室外试验平台：便于安装校准装置，水底平台，水深大于7 m，无水流，便于船舶航行。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

校准项目见表1。

表1 校准项目

序号	项目名称	校准方法
1	空间相对距离示值误差	7.3
2	一致性示值误差	7.4

### 7.2 校准前准备

#### 7.2.1 校准装置安装

a) 球棒安装前，使用钢卷尺测量各定位点至连接杆一端的距离，测量3次取算术平均值作为最终结果。

b) 将3组球棒安装至试验平台，保持球棒铅垂，各球棒的间距互不相等且不小于3m，水上球型靶标球心不共线且不在同一高度，距离水面高度不小于2 m，安装示意图，见图3。

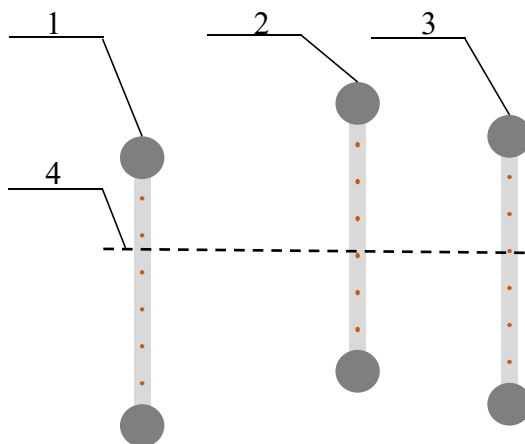


图3 球棒安装侧视示意图

1——球棒1；2——球棒2；3——球棒3；4——水面；

c) 任意设站架设全站仪，精确整平，测量过程中应保持全站仪稳定。

d) 采用测站坐标系，使用全站仪分别测量各球棒定位点的三维坐标（见图4），测量不少于3次。

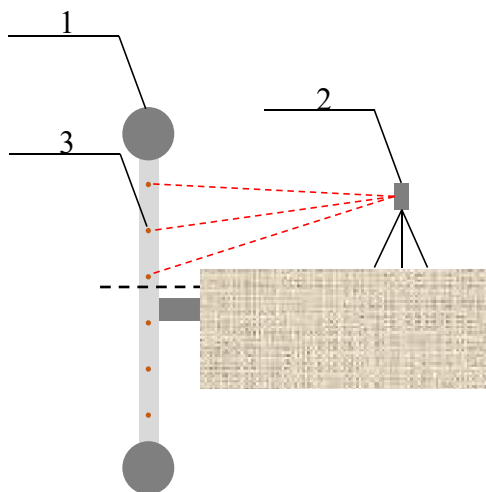


图4 全站仪测量定位点示意图

1——球棒；2——全站仪；3——定位点；

e) 根据定位点的测站坐标，按公式（1）确定球棒定位点连线的直线方程。

$$\frac{X - X_0}{m} = \frac{Y - Y_0}{n} = \frac{H - H_0}{p} \quad (1)$$

式中：

$(m, n, p)$ ——为直线的法向量，m；

$(X_0, Y_0, H_0)$ ——为定位点的测站坐标，m；

$(X, Y, H)$ —为直线上任意一点的测站坐标, m;

f) 按公式 (2)、(3)、(4) 计算球型靶标的球心坐标。

$$X = X_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L \quad (2)$$

$$Y = Y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L \quad (3)$$

$$H = H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L \quad (4)$$

式中:

$L$ —同一球棒定位点与水上或水下球型靶标球心的空间距离, m;

$(X, Y, H)$ —在测站坐标系下, 水上或水下球型靶标球心的坐标, m;

g) 按公式 (5) 和公式 (6) 计算水上和水下部分各球型靶标球心的空间相对距离的标准值, 并取算术平均值作为最终结果。

$$L_{S,i} = \sqrt{(X_{s,i} - X_{s,i+1})^2 + (Y_{s,i} - Y_{s,i+1})^2 + (H_{s,i} - H_{s,i+1})^2} \quad (5)$$

$$L_{X,i} = \sqrt{(X_{x,i} - X_{x,i+1})^2 + (Y_{x,i} - Y_{x,i+1})^2 + (H_{x,i} - H_{x,i+1})^2} \quad (6)$$

式中:

$L_{S,i}$ —水上球型靶标球心的空间相对距离的标准值, m;

$L_{X,i}$ —水下球型靶标球心的空间相对距离的标准值, m;

$i$ —为球棒个数, 取值范围 1~2。

h) 按照公式 (7) 和公式 (8) 计算水上与水下球型靶标球心在水平面内的投影距离和在垂直面内的投影距离的标准值, 并取算术平均值作为最终结果。

$$L_{P,i} = \sqrt{(X_{s,i} - X_{x,i})^2 + (Y_{s,i} - Y_{x,i})^2} \quad (7)$$

$$L_{S,i} = H_{s,i} - H_{x,i} \quad (8)$$

式中:

$L_{P,i}$ —同一球棒水上与水下球型靶标球心在水平面内的投影距离标准值, m;

$L_{S,i}$ —同一球棒水上与水下球型靶标球心在垂直面内的投影距离标准值, m;

$i$ —为球棒个数, 取值范围 1~3。

$(X_{s,i}, Y_{s,i}, H_{s,i})$ —同一球棒水上球型靶标球心的测站坐标, m;

$(X_{x,i}, Y_{x,i}, H_{x,i})$ —同一球棒水下球型靶标球心的测站坐标, m;

### 7.1.2 设备准备

- a) 检查确认点云测距系统各传感器安装无松动，按键、开关均能正常工作。
- b) 接通各传感器，按使用说明书要求进行预热。
- c) 点云测距系统校准前宜对各传感器的安装偏差进行检校，检校方法见附录A。
- d) 完成点云测距系统检校后，将各传感器安装偏差输入采集软件，并检查各传感器设置参数。

e) 在距校准装置 4 m 和 8 m 处布设计划线，并导入点云测距系统导航软件中。

### 7.3 空间相对距离示值误差

- a) 按照计划线测量球棒水上和水下球型靶标，船速不超过 2 节；
- b) 数据采集及数据处理参照 HY/T 0350-2023 中 6 和 7 规定执行，并形成水上部分及水下部分点云成果；
- c) 提取球型靶标点云，使用半径约束的球型拟合法（附录 B），分别拟合水上和水下球型靶标的球心坐标；
- d) 按照公式（9）分别计算点云测距系统所测水上或水下球型靶标球心的空间相对距离示值。

$$L_i = \sqrt{(X_i - X_{i+1})^2 + (Y_i - Y_{i+1})^2 + (H_i - H_{i+1})^2} \quad (9)$$

式中：

$L_i$ —点云测距系统所测水上或水下各球型靶标球心的空间相对距离示值，m；

$(X_i, Y_i, H_i)$ —点云测距系统所测水上或水下球型靶标球心的坐标，m；

$i$ —为球棒个数，取值范围 1~2。

- e) 按照公式（10）和公式（11）分别计算点云测距系统水上或水下部分的球型靶标球心的空间相对距离的示值误差；

$$\Delta_{X,i} = L_i - L_{X,i} \quad (10)$$

$$\Delta_{S,i} = L_i - L_{S,i} \quad (11)$$

式中：

$\Delta_{S,i}$ —点云测距系统水上部分球型靶标球心的空间距离示值误差，m；

$\Delta_{X,i}$ —点云测距系统水下部分球型靶标球心的空间距离示值误差，m；

$L_i$ —点云测距系统所测水上或水下各球型靶标球心的空间相对距离的示值，m；

$i$ —为球棒个数，取值范围 1~2。

- f) 重复 a)~e) 步骤 3 次，分别计算系统水上部分或水下部分球型靶标的空间相对距离示值误差的算术平均值；

### 7.4 一致性示值误差

- a) 按 7.2 a)~c) 步骤，获取点云测距系统所测球型靶标点云成果，根据公式（12）计算同一球棒水上和水下球型靶标球心在水平面内的投影距离，作为水平方向一致性校准的

示值；

$$L_{YP,i} = \sqrt{(X_{sp,i} - X_{xp,i})^2 + (Y_{sp,i} - Y_{xp,i})^2} \quad (12)$$

式中：

$L_{YP,i}$ ——点云测距系统所测两球型靶标球心在水平面内的投影距离示值，m；

$(X_{sp,i}, Y_{sp,i})$ ——点云测距系统所测水上球型靶标球心坐标，m；

$(X_{xp,i}, Y_{xp,i})$ ——点云测距系统所测水下球型靶标球心坐标，m；

$i$ ——为球棒个数，取值范围 1~3。

b) 按 7.3 节 a)——c) 步骤，获取点云测距系统所测球型靶标点云成果，根据公式 (13) 计算同一球棒水上和水下球型靶标球心在垂直面内的投影距离，作为垂直方向一致性校准的示值；

$$L_{YS,i} = H_{ss,i} - H_{xs,i} \quad (13)$$

式中：

$L_{YS,i}$ ——点云测距系统所测两球型靶标球心在垂直面内的投影距离示值，m；

$H_{ss,i}$ ——点云测距系统测量的水上球型靶标球心高程，m；

$H_{xs,i}$ ——点云测距系统测量的水下球型靶标球心高程，m；

$i$ ——为球棒个数，取值范围 1~3。

c) 按照公式 (14) 和公式 (15) 计算点云测距系统在水平方向和垂直方向的一致性示值误差；

$$\Delta_{YP,i} = L_{YP,i} - L_{P,i} \quad (14)$$

$$\Delta_{YS,i} = L_{YS,i} - L_{S,i} \quad (15)$$

式中：

$\Delta_{YP,i}$ ——点云测距系统在水平方向的一致性示值误差，m；

$\Delta_{YS,i}$ ——点云测距系统在垂直方向的一致性示值误差，m；

$i$ ——为球棒个数，取值范围 1~3。

d) a)——c) 步骤重复 3 次，计算系统在水平方向和垂直方向的一致性示值误差的算术平均值；

## 8 校准结果表达

系统被校准后，出具校准证书。校准证书至少应包括以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 证书的编号，每页及总页数的标识；
- 校准单位校准专用章；
- 送校单位的名称和地址；

- f) 被校准系统各传感器的名称、制造商、规格型号、出厂编号；
- g) 进行校准的日期和地点；
- h) 对校准所依据的技术规范标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用的测量标准的名称、出厂编号、不确定度/准确度等级/最大允许误差、证书编号、溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境条件的描述，包括：温度、湿度等；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 校准证书签发人的签名、职务，以及签发日期；
- m) 校准试验的操作人及核验人的签名；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的说明。

校准原始记录推荐格式见附录C，校准证书内页推荐格式见附录D，测量结果的不确定度评定示例见附录E。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔最长为1年。

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

## 附录 A

### 船载水陆一体化点云测距系统检校方法

#### A.1 概述

在陆上空间将点云测距系统的水上、水下部分进行一体化组装，并利用工业测量系统对点云测距系统进行室内粗检校。在保障系统水上、水下部分重复组装装配精度的前提下，可将上述检校结果作为点云测距系统水上、水下部分拆解并重新组装后的系统检校参数。

点云测距系统室内粗检校参数应满，水上部分：轴向旋转角偏差应优于  $0.02^\circ$ ，偏移量应优于  $0.005\text{ m}$ 。水下部分：偏差应优于  $0.05^\circ$ ，偏移量偏差应优于  $0.010\text{ m}$ 。否则应再进行室外精检校。粗检校由于传感器内部不可视，导致轴向旋转角偏差较大。因此，室外精检校只需点云测距系统轴向旋转角偏差进行高精度检校即可。

#### A.2 室内粗检校

室内粗检校的过程如下：

a) 使用工业测量系统三台及以上（通常为三台）电子经纬仪分别对 INS、多波束测深仪、激光扫描仪和 GNSS 天线上所构建的各传感器坐标系特征点以及用于各传感器之间坐标系转换所布设的公共点进行测量；

b) 基于上述点位构建各传感器单体坐标系，并确定用于各传感器之间坐标系转换所布设的公共点在相应单体坐标系下坐标；

c) 在点云测距系统集成组合状态下，拆掉设备外壳，保证 INS、多波束测深仪、激光扫描仪（例：若为三维激光扫描仪，则通过软件控制三维激光扫描仪旋转到  $0^\circ$ ，并利用断电的方式保证仪器在测量过程中不会有旋转）和 GNSS 天线保持固定；

d) 利用工业测量系统，在观测坐标系下对用于各传感器之间坐标系转换所布设的公共点进行联测，得到其在观测坐标系下的坐标；

e) 分别基于公共点在各传感器单体坐标系以及集成组装状态观测坐标系下的坐标，通过公共点坐标转换方式，获得各传感器坐标系转换参数，完成点云测距系统整体检校工作，得到多波束测深仪中心、激光扫描仪中心、GNSS 天线相位中心到 INS 中心的偏移量、轴向旋转角偏差。

#### A.3 室外精检校

##### A.3.1 水上部分

##### A.3.1.1 检校场的要求

在建立高精度 GNSS 控制网基础上，利用高精度全站仪对用于检校的平面进行测量，每个用于检校的平面上应均匀分布不少于 25 个测量点，平面长、宽宜大于  $2\text{ m}$ ，每个检校平面拟合后测量点的残差中误差优于  $5\text{ mm}$ ，平面个数应多于 6 个，具有不同的朝向（即法矢量方向不同），且有至少 3 个平面的朝向接近垂直。此外，载体应以不同路线、不同

距离（载体与检校平面之间）分别进行检校数据采集，路线应至少包含一对相反方向，不同距离的间隔宜大于 1 m。

#### A.3.1.2 检校方法

水上部分的室外精检校过程如下：

- a) 建立面模型检校场，测量面模型检校场的点云数据并精确提取各个特征平面；
- b) 以已知特征平面方程为控制，根据激光点云定位方程及平面的几何模型建立平差模型；
- c) 利用非线性最小二乘优化方法得到轴向旋转角偏差参数。

#### A.3.2 水下部分

##### A.3.2.1 检校要求

水下部分参数的测定必须按横摇偏差、电罗经偏差、纵摇偏差、导航时延（同一目标探测法）或按横摇偏差、电罗经偏差、导航时延（剖面重叠法）和纵摇偏差的顺序测定。

##### A.3.2.2 检校方法

- a) 横摇偏差测定的准确度应优于 $\pm 0.05^\circ$ ；可在水底平台区域布设一条计划线测线，同速往返测量。
- b) 罗经偏差测定的准确度应优于 $\pm 0.1^\circ$ ；可跨越一条线性目标物布设一条计划测线，同速往返测量。
- c) 纵摇偏差测定的准确度应优于 $\pm 0.05^\circ$ ；可在一陡坡或特征物上布设一条计划测线，同速往返测量；
- d) 测深与定位的时间延迟测定的准确度应由于 $\pm 0.1$  s；可在一特征物上布设一条计划测线，同速往返通过目标测量两次，此法为同一目标探测法；或同向不同速度通过目标，速度差别尽可能大，同时要保持均匀并严格在计划航线上行驶，此外称为剖面重叠法，检校中应尽量采用此法。



## 附录 B

## 基于半径约束的球型靶标球心坐标拟合方法

设球型靶标圆心三维坐标为 $(x, y, z)$ ，半径为 $r$ ，则球型靶标的方程为：

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = r^2 \quad (\text{B.1})$$

其中， $(x, y, z)$ 为球心坐标， $r$ 为球的半径， $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 为球面上的点；

对(C.1)式展开并移项可得：

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = 2x_i x + 2y_i y + 2z_i z + (r^2 - x^2 - y^2 - z^2) \quad (\text{B.2})$$

记：

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix}, \vec{b} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r^2 - x^2 - y^2 - z^2 \end{bmatrix}, \vec{Y} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix}$$

按式(B.3)求解此超定方程，将该方程的解记为靶标的球心近似值 $(x_0, y_0, z_0)$ ，将靶标球的设计半径 $r_0$ 作为半径近似值当作约束条件：

$$\begin{aligned} \vec{b} &= (A^T A)^{-1} A^T Y \\ r_0 + \hat{r} &= r \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

构造如下函数：

$$f(x, y, z, r) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - r \quad (\text{B.4})$$

对(B.4)式在球心近似值及设计半径 $(x_0, y_0, z_0, r_0)$ 处线性化可得：

$$f(x, y, z, r) = f(x_0, y_0, z_0, r_0) - \frac{(x_i - x_0)\hat{x} + (y_i - y_0)\hat{y} + (z_i - z_0)\hat{z}}{R_0^i} - \hat{r} = L_1 + V = 0 \quad (\text{B.5})$$

式中： $i$ 表示球面点的编号； $R_0^i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$ ； $r_0$ 为靶标球半径的设计值； $[\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z} \ \hat{r}]^T = [(x - x_0) \ (y - y_0) \ (z - z_0) \ (r - r_0)]^T$ ； $L_1$ 为观测值； $V$ 为观测值的改正数； $\varepsilon_0^i = f(x_0, y_0, z_0, r_0)$ ；

写作矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} V_0^i \\ \hat{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_i - x_0)}{R_0^i} & -\frac{(y_i - y_0)}{R_0^i} & -\frac{(z_i - z_0)}{R_0^i} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{r} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\varepsilon_0^i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

$V_0^i$ 为第*i*个球面点到近似球心 $(x_0, y_0, z_0)$ 的改正数；使用间接平差方法求解(B.6)式，定义如下矩阵：

$$B_{m \times 4} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_1 - x_0)}{R_0^1} & -\frac{(y_1 - y_0)}{R_0^1} & -\frac{(z_1 - z_0)}{R_0^1} & -1 \\ -\frac{(x_2 - x_0)}{R_0^2} & -\frac{(y_2 - y_0)}{R_0^2} & -\frac{(z_2 - z_0)}{R_0^2} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -1 \\ -\frac{(x_n - x_0)}{R_0^n} & -\frac{(y_n - y_0)}{R_0^n} & -\frac{(z_n - z_0)}{R_0^n} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P_{m \times m} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 10 \end{bmatrix}, J_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0^1 \\ \varepsilon_0^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_0^n \\ 0 \end{bmatrix}$$

得到参数 $x_0, y_0, z_0, r_0$ 的改正数 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{r}$ ：

$$\begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} & \hat{r} \end{bmatrix}^T = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (\text{B.7})$$

从而平差结果为：

$$\begin{bmatrix} x & y & z & r \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & r_0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} & \hat{r} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.8})$$

则球形标靶的球心坐标为 $(x, y, z)$ 。

附录 C

船载水陆一体化点云测距系统校准记录表格式

证书编号：

器具名称					传感器型号		
传感器编号			传感器 制造单位				
送检单位及地址							
检定地点				环境条件	温度：_____相对湿度：_____		
外观检查				铭牌检查			
校准项目	示值					标准值	示值误差
空间相对距离							
一致性							

校准员：\_\_\_\_\_ 核验员：\_\_\_\_\_ 试验日期： 年 月 日

附录 D

船载水陆一体化点云测距系统校准证书内页格式

证书编号××××××-××××				
检定机构授权说明				
检定环境条件及地点：				
温 度	℃	地 点		
相对湿度	%	其 他		
检定使用的计量（基）标准装置				
名 称	测量范围	不确定度/准确 度等级/最大 允许误差	计量（基）标准 证书编号	有效期至
检定使用的标准器				
名 称	测量范围	不确定度/准确 度等级/最大 允许误差	检定/校准证书 编号	有效期至
第 2 页 共 3 页				

证书编号 XXXX-XXX

校准结果

1. 空间相对距离

示值 m	标准值 m	示值误差 m

2.一致性

示值 m	标准值 m	示值误差 m

6.一致性重复性

____m 测量结果					
算术平均值/m			标准偏差/m		

以下空白

## 附录 E

## 船载水陆一体化点云测距系统校准评定示例

## E.1 船载水陆一体化点云测距系统空间相对距离不确定度评定示例

船载水陆一体化点云测距系统空间相对距离指标校准结果不确定度评定，是针对目标球相对距离开展测量不确定度评定工作。系统所测两目标球的相对距离由两目标球球心点坐标计算得到，计算公式如下：

$$L_p = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (H_1 - H_2)^2} \quad (\text{E.1})$$

$$X_1 = X_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 \quad (\text{E.2})$$

$$Y_1 = Y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 \quad (\text{E.3})$$

$$H_1 = H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 \quad (\text{E.4})$$

$$X_2 = X'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2 \quad (\text{E.5})$$

$$Y_2 = Y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2 \quad (\text{E.6})$$

$$H_2 = H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2 \quad (\text{E.7})$$

式中：

- $L_p$ ——被校准系统测量两目标球球心距离示值，m；
- $X_1$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的北向水平坐标，m；
- $Y_1$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的东向水平坐标，m；
- $X_2$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的北向水平坐标，m；
- $Y_2$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的东向水平坐标，m；
- $H_1$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的高程，m；
- $H_2$ ——被校准系统测量相邻目标球球心的高程，m；
- $X_0$ 、 $X'_0$ ——被校准系统测量对应球棒定位点的北向水平坐标，m；
- $Y_0$ 、 $Y'_0$ ——被校准系统测量对应球棒定位点的东向水平坐标，m；
- $H_0$ 、 $H'_0$ ——被校准系统测量对应球棒定位点的高程，m；
- $L_1$ 、 $L_2$ ——被校准系统测量对应球棒定位点与对应球心的距离，m；
- $(m \ n \ p)$ ——为相应球棒对应直线的法向量，m；

## E.2 测量模型及不确定度来源

### E.2.1 测量模型

考虑到影响测量不确定度的因素，系统所测两目标球球心坐标相对距离示值误差 $\Delta_s$ 表示为：

$$\Delta_s = L_s - L_{s1} + \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 \quad (\text{E.8})$$

其中

$$L_{s1} = \sqrt{\left(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - \left(x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2\right)\right)^2 + \left(y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - \left(y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2\right)\right)^2 + \left(H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - \left(H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2\right)\right)^2} \quad (\text{E.9})$$

式中：

$\Delta_s$ ——水上或水下两球型靶标球心空间相对距离示值误差，m；

$L_{s1}$ ——水上或水下两球型靶标球心空间相对距离的标准值，m；

$L_s$ ——点云测距系统测量水上或水下两球型靶标球心空间相对距离的示值，m；

$\zeta_1$ ——仪器及标准球棒的安装误差，m；

$\zeta_2$ ——目标球直径不均匀引入的距离偏差，m；

$\zeta_3$ ——球棒定位点引入的距离偏差，m。

### E.2.2 不确定度来源

测量不确定度的主要来源有：

- (1) 测量重复性的标准不确定度；
- (2) 钢卷尺引入的标准不确定度；
- (3) 全站仪引入的标准不确定度；
- (4) 校准装置安装误差引入的标准不确定度；
- (5) 目标球直径不均匀引入的标准不确定度；
- (6) 球棒定位点引入的标准不确定度。

## E.3 校准能力分析

### E.3.1 测量重复性引入的标准不确定度

此测量不确定度为被校准设备所引入的测量不确定度，主要影响因素为测量重复性所引入的测量不确定度分量。在对系统空间相对距离校准的过程中，需要在各距离处采集至少 10 组数据，求其算术平均值作为系统的测量结果。

在测量不确定度评价的过程中，采用船距球棒装置 4m 处系统所测数据作为代表性数据开展测量不确定度的评价，具体数据见表 E.1。

表 E.1 4 m 处系统所测水上和水下两目标球球心相对距离测量数据

水上两目标球相对距离 (m)	水下两目标球相对距离距离 (m)
5.32	5.28
5.35	5.10
5.29	5.19
5.31	5.09
5.28	5.25
5.29	5.40
5.31	5.04
5.27	5.37
5.36	5.32
5.31	5.09

采用测量不确定度 A 类评定方法计算标准不确定度,使用贝塞尔公式计算实验标准偏差,计算算数平均值的测量不确定度。系统在水上及水下相对距离的实验标准偏差分别为:  $S_{L,1}=0.039\text{m}$ ,  $S_{L,2}=0.129\text{m}$ , 系统在水上和在水下相对距离重复性所引入的测量不确定度分别为:

$$\mu_{L,1} = \mu(\bar{y})_{L,1} = \frac{S_{L,1}}{\sqrt{10}} = 12.3\text{mm} \quad (\text{E.10})$$

$$\mu_{L,2} = \mu(\bar{y})_{L,2} = \frac{S_{L,2}}{\sqrt{10}} = 40.8\text{mm} \quad (\text{E.11})$$

### E.3.2 钢卷尺测量引入的标准不确定度 $\mu_{L,0}$

试验采用 II 级钢卷尺最大允许误差:  $\pm (0.3+0.2L) \text{ mm}$ ; 经检定合格的钢卷尺应满足以上的技术要求, 检定依据为 JJG741-2022 《标准钢卷尺》。

在测量的过程中, 连接杆长度为 5.81m, 已知钢卷尺的实际测量值为 5.811m, 由钢卷尺测量所引入的测量不确定度  $\mu_{L,0}=1.5\text{mm}$ 。

### E.3.3 全站仪引入的标准不确定度 $\mu_q$

试验中所采用的 I 级全站仪测距最大允许误差  $\pm (1+1\times 10^{-6}D) \text{ mm}$ , 测角最大允许误差  $\pm 0.5''$ 。经检定合格的全站仪应满足以上的技术要求, 检定依据 JJG 100—2003 全站型电子速测仪。

全站仪分别对各定位点坐标进行测量, 不确定度评估按最远距离 100m 估计。根据有关技术资料和检定证书, 估计全站仪距离测量误差角度测量误差符合为正态分布, 取  $k=2$ , 则坐标测量标准不确定度为:

$$u_q = \frac{(100000 * 0.5 * \pi / (180 * 3600))^2 + (1 + 1 \times 10^{-6} \times 100000)^2}{2} = 0.56\text{mm} \quad (\text{E.12})$$

### E.3.4 校准装置安装偏差引入的标准不确定度 $\mu_{\zeta}$



球棒装置使用前需要拼接安装，利用螺栓及螺母将连接杆、目标球拼接在一起。根据校准装置拼接安装使用经验，估计校准装置拼接安装引入的距离偏差区间半宽度均为 3mm，估计安装偏差属于矩形分布，经查表可知  $k=\sqrt{3}$ ，则校准装置偏差引入的测量不确定度分量为：

$$\mu_{\zeta} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1.7mm \quad (E.13)$$

#### E.3.5 目标球直径不均匀引入的标准不确定度 $\mu_r$

根据有关技术资料、使用经验，估计目标球加工导致直径不均匀偏差的区间半宽度为 5 mm，估计其为矩形分布，经查表可知  $k=\sqrt{3}$ ，则目标球加工直径不均匀偏差引入的测量不确定度分量为：

$$\mu_d = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2.9mm \quad (E.14)$$

#### E.3.6 球棒定位点引入的标准不确定度 $\mu_d$

根据有关技术资料、使用经验，估计球棒定位点标记偏差的区间半宽度为 3 mm，估计其为矩形分布，经查表可知  $k=\sqrt{3}$ ，则球棒定位点标记偏差引入的测量不确定度分量为：

$$\mu_d = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1.73mm \quad (E.15)$$

#### E.4 各不确定度分量汇总表

系统水上水下点云一致性校准装置相邻两个球心坐标分别为 (54.12, 58.11, 15.23)，(51.32, 53.24, 16.17) 两球棒的法向量分别为 (0.2, 0.2, 0.959)、(0.1, 0.3, 0.948)，定位点距球心的距离  $L_1$ 、 $L_2$  分别为 3m、4m，则各输入量的灵敏系数可表示为：

$$c_{L,s}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(L_s)} = 1 \quad (E.16)$$

$$c_{x,o}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(x_o)} = - \frac{x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2+p_1^2}} \times L_2)}{\sqrt{(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2+p_1^2}} \times L_2))^2 + (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2+p_1^2}} \times L_2))^2 + (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2+n^2+p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2+n_1^2+p_1^2}} \times L_2))^2}} = -0.4916 \quad (E.17)$$

$$c_{x',o}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(x'_o)} = \frac{x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)}{\sqrt{\left(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2 + \left(y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2 + \left(H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2}} = 0.4916$$

(E.18)

$$c_m(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(m)} = \frac{(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times (L_1 m^2 (m^2 + n^2 + p^2)^{-1.5} - \frac{L_1}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}) + (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times L_1 m n (m^2 + n^2 + p^2)^{-1.5} + (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times L_1 m p (m^2 + n^2 + p^2)^{-1.5}}{\sqrt{\left(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2 + \left(y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2 + \left(H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)\right)^2}} = -1.423$$

(E.19)

$$\begin{aligned}
 & (x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times \\
 & (L_2 m_1^2 (m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)^{-1.5} - \frac{L_2}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}) + \\
 & (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times \\
 & L_2 m_1 n_1 (m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)^{-1.5} + \\
 & (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) \times \\
 c_{m1}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(m_1)} = & - \frac{L_2 m_1 p_1 (m_1^2 + n_1^2 + p_1^2)^{-1.5}}{\left[ \begin{aligned} & (x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\ & (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\ & (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 \end{aligned} \right]} = 1.9867
 \end{aligned}
 \tag{E.20}$$

$$\begin{aligned}
 & (x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}) + \\
 & (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}) + \\
 & (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}) \\
 c_{L1}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(L_1)} = & - \frac{\left[ \begin{aligned} & (x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\ & (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\ & (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 \end{aligned} \right]}{ } = -0.0856
 \end{aligned}
 \tag{E.21}$$

$$\begin{aligned}
& (x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}) + \\
& (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}) + \\
& (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2)) (\frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}) \\
c_{L2}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(L_2)} = & \frac{(x_0 + \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (x'_0 + \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\
& (y_0 + \frac{n}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (y'_0 + \frac{n_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2 + \\
& (H_0 + \frac{p}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2}} \times L_1 - (H'_0 + \frac{p_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}} \times L_2))^2}{-0.0508} \\
& (E.22)
\end{aligned}$$

$$c_{\zeta_1}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(\zeta_1)} = 1 \quad (E.23)$$

$$c_{\zeta_2}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(\zeta_2)} = 1 \quad (E.24)$$

$$c_{\zeta_3}(\Delta_s) = \frac{\partial(\Delta_s)}{\partial(\zeta_3)} = 1 \quad (E.25)$$

则各不确定度分量汇总表为：

表 E.2 各不确定度分量汇总

	符号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
水上相邻目标球	$\mu_L$	测量重复性	A	12.3 mm	1
	$\mu_{L,1}$	钢卷尺	B	1.5 mm	球棒 1: -0.0856
	$\mu_{L,2}$				球棒 2: -0.0508
	$\mu_{q1}$	全站仪	B	0.56 mm	定位点: 0.4916
	$\mu_{q2}$				球棒 1 法线: -1.423
	$\mu_{q3}$				球棒 1 法线: 1.9867
	$\mu_\zeta$	安装偏差	B	1.7mm	1
	$\mu_r$	目标球直径不均匀引起的偏差	B	2.9 mm	1
	$\mu_d$	定位点偏差	B	1.73mm	1
水	$\mu_L$	测量重复性	A	40.8mm	1

下 相 邻 目 标 球	$\mu_{L,1}$	钢卷尺	B	1.5 mm	球棒 1: -0.0856
	$\mu_{L,2}$				球棒 2: -0.0508
	$\mu_{q1}$	全站仪	B	0.56 mm	定位点: 0.4916
	$\mu_{q2}$				球棒 1 法线: -1.423
	$\mu_{q3}$				球棒 1 法线: 1.9867
	$\mu_{\zeta}$	安装偏差	B	1.7 mm	1
	$\mu_r$	目标球直径不均 匀引起的偏差	B	2.9 mm	1
	$\mu_d$	定位点偏差	B	1.73mm	1

### E.5 合成标准不确定度

参照不确定度分量汇总表 E.2，各分量互不相关，水上和水下两目标球空间相对距离校准合成标准不确定度计算公式如下：

$$\mu_s(\Delta_s) = \sqrt{c_L^2(\Delta_s) \times \mu_L^2 + c_{L,1}^2(\Delta_s) \times \mu_{L,1}^2 + c_{L,2}^2(\Delta_s) \times \mu_{L,2}^2 + c_{q1}^2(\Delta_s) \times \mu_{q1}^2 + c_{q2}^2(\Delta_s) \times \mu_{q2}^2 + c_{q3}^2(\Delta_s) \times \mu_{q3}^2 + c_{\zeta}^2(\Delta_s) \times \mu_{\zeta}^2 + c_r^2(\Delta_s) \times \mu_r^2 + c_d^2(\Delta_s) \times \mu_d^2} = 12.94 \text{ mm} \quad (\text{E.26})$$

$$\mu_{s1}(\Delta_s) = \sqrt{c_L^2(\Delta_s) \times \mu_L^2 + c_{L,1}^2(\Delta_s) \times \mu_{L,1}^2 + c_{L,2}^2(\Delta_s) \times \mu_{L,2}^2 + c_{q1}^2(\Delta_s) \times \mu_{q1}^2 + c_{q2}^2(\Delta_s) \times \mu_{q2}^2 + c_{q3}^2(\Delta_s) \times \mu_{q3}^2 + c_{\zeta}^2(\Delta_s) \times \mu_{\zeta}^2 + c_r^2(\Delta_s) \times \mu_r^2 + c_d^2(\Delta_s) \times \mu_d^2} = 40.99 \text{ mm} \quad (\text{E.27})$$

则水上两目标球空间相对距离校准合成标准不确定度为 12.94mm，水下两目标球空间相对距离校准合成标准不确定度为 40.99mm。

### E.6 合成扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，水平方向扩展不确定度为： $U_1=k \times \mu_P=25.88 \text{ mm}$ ，垂直方向扩展不确定度为： $U_2=k \times \mu_S=81.98 \text{ mm}$ 。

### E.7 评定其他测量点的测量不确定度

通过对其他测量点试验，验证重复性、安装偏差、钢卷尺、全站仪、目标球、定位点等引入的不确定度与测量距离无强相关关系，因此不改变本校准装置的校准能力。