



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

涉水工程精密定位校准规范

Calibration Specification for Precision Positioning of Water-related Projects

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

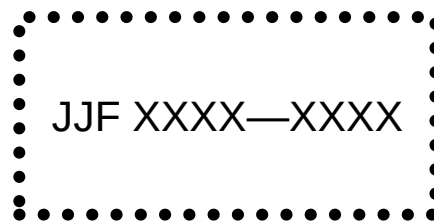
XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

涉水工程精密定位校准规范

Calibration Specification for Precision

Positioning of Water-related Projects



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：交通运输部天津水运工程科学研究所

参加起草单位：天津水运工程研究院有限公司

同济大学

哈尔滨工程大学

河海大学

山东科技大学

本规范由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：

杨 鲲（交通运输部天津水运工程科学研究所）

柳义成（交通运输部天津水运工程科学研究所）

张明敏（交通运输部天津水运工程科学研究所）

参加起草人：

隋海琛（天津水运工程研究院有限公司）

吴志露（同济大学）

余华兵（哈尔滨工程大学）

霍冠英（河海大学）

辛明真（山东科技大学）

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 卫星定位误差	(2)
5.2 声学定位误差	(2)
5.3 光学定位误差	(2)
5.4 综合定位误差	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果表达	(10)
9 复校时间间隔	(11)
附录 A 涉水工程精密定位原始记录格式	(12)
附录 B 涉水工程精密定位校准证书内页格式	(15)
附录 C 涉水工程精密定位校准结果不确定度评定示例	(17)

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012《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。

涉水工程精密定位校准规范

1 范围

本规范适用于涉水工程精密定位中卫星定位、水下声学定位与水下光学定位的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1403-2013 全球导航卫星系统（GNSS）接收机（时间测量型）校准规范

GB/T 39611-2020 卫星导航定位基准站术语

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

JJF 1001-2011界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

3.1 全球导航卫星系统 Global Navigation Satellite System；GNSS

在全球范围内提供定位、导航和授时服务的卫星系统的统称。如全球定位系统（GPS）、格洛纳斯导航卫星系统（GLONASS）、伽利略导航卫星系统（GALILEO）和北斗卫星导航系统（BDS）等。

[来源：GB/T 39611-2020，2.3.1]

3.2 地心地固坐标系 Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate System

原点 O 为地球质心， z 轴与地轴平行指向北极点， x 轴指向本初子午线与赤道的交点， y 轴垂直于 xoz 平面构成右手坐标系。

[来源：JJF 1403-2013，3.23]

4 概述

涉水工程精密定位系统包含了GNSS接收机、水下声学定位设备和水下光学定位设备等海洋工程环境精密定位设备，可实现复杂海洋工程、水运工程环境高精度定位能力。

涉水工程精密定位原理是GNSS接收机接收多颗卫星信号，利用后方交会原理获取空间三维坐标，同时将定位数据传递给水下声学/光学定位设备。水下声学定位设备通过水声测距、测角技术获取被测目标物的空间三维坐标定位数据。水下光学定位设备通过激光测距、测角技术获取被测目标物的空间三维坐标定位数据。工作原理图见图1。

涉水工程精密定位主要应用于沉管隧道、深水油田、海上风电等大型工程定位施工。

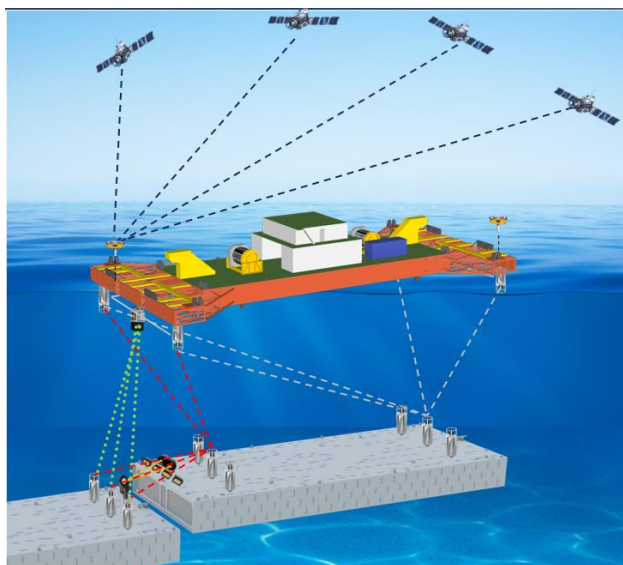


图1 涉水工程精密定位工作原理图

5 计量特性

5.1 卫星定位误差

a) 平面定位最大允许误差为 $\pm(8\text{mm}+1\times 10^{-6}\times D)$ 。

b) 高程定位最大允许误差为 $\pm(15\text{mm}+1\times 10^{-6}\times D)$ 。

5.2 声学定位误差

声学定位示值最大允许误差为 $\pm 2\%L$ ， L 为声学换能器与信标的距离。

5.3 光学定位误差

光学定位示值最大允许误差为 $\pm 3\text{mm}$ 。

5.4 综合定位误差

a) 声学+卫星定位最大允许误差为 $\pm(1\text{cm}+2\%L)$ 。

b) 光学+卫星定位最大允许误差为 $\pm 1.5\text{cm}$ 。

注：1 D 为GNSS接收机至CORS站的测量距离。

2 以上指标不作为合格性判据，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准环境条件要求如下：

- a) 环境温度：5℃~35℃；
- b) 校准期间温度变化不超过±5℃；
- c) 无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

校准使用的计量标准器及配套设备应符合表 1 的规定，或使用更高准确度的标准器。

表 1 计量标准器及配套设备

序号	名称	性能要求	用途
1	标准观测点	基线测量标准差 $\leq 3\text{mm} + 0.5 \times 10^{-6}D$ ； 具备地心地固坐标系下的坐标，坐标测量标准差不大于 0.10m（水平）和 0.15m（高程）； 布设、选点、埋石等应符合 GB/T 18314-2024 的规定。	校准卫星定位误差
2	钢卷尺	测量范围：0m~10m，I 级。	
3	室外水池	平均水深不小于 10m，长度不小于 150m； 具备声学换能器操作平台和信标操作平台。	校准声学定位误差
4	操作平台	配备升降装置：入水深度 0m~5m，最大允许误差 $\pm 5\text{mm}$ ； 配备平移装置：平移距离 0m~8m，最大允许误差 $\pm 5\text{mm}$ ； 配备回转装置：水平转动角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，最大允许误差 $\pm 0.1^\circ$ ； 配备俯仰装置：垂直转动角度 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，最大允许误差 $\pm 0.1^\circ$ 。	
5	室内水池	长度不小于 10m，宽度不小于 3m，深度不小于 3m； 水体浊度应不大于 20 NTU； 长边壁上方铺设平滑导轨。	校准光学定位误差

表 1 （续）

序号	名称	性能要求	用途
6	校准行车	校准行车在试验水槽导轨上平滑运行，具备升降机构。	校准光学定位误差
7	反射靶标	平面度不大于 0.2 mm。	
8	反射棱镜	/	
9	转接法兰	/	
10	开阔水域	配置升降装置，水体深度不小于 5m。	校准综合定位误差
11	升降装置	标志点：位于升降装置 A 顶端中心位置 基线测量标准差 $\leq 3\text{mm}+0.5\times 10^{-6}D$ ； 具备地心地固坐标系下的坐标，坐标测量标准差不大于 0.10m（水平）和 0.015m（高程）； 初始点：位于标志点下方 4m，水面上方 1m； 升降平台：升降范围 0m~6m，最大允许误差 $\pm 5\text{mm}$ ； 基座：位于升降装置 B 顶端中心位置，位于初始点上方 4m。	
12	全站仪	测量范围：0m~500m，I 级。	校准声学定位误差 校准光学定位误差

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目及对应的校准方法条款编号见表2。

表 2 校准项目表

序号	校准项目	校准方法对应条款编号
1	卫星定位误差	7.2.1
2	声学定位误差	7.2.2
3	光学定位误差	7.2.3
4	综合定位误差	7.2.4

7.2 校准方法

7.2.1 卫星定位误差

卫星定位误差校准步骤如下：

- a) 将GNSS接收机安装至标准观测点，连接GNSS接收机和采集设备；
- b) 使用钢卷尺测量GNSS接收机参考点至标准观测点的垂直高度 d ；
- c) 启动GNSS接收机，连接CORS，设置定位数据更新频率为1 Hz，连续记录时间不少于10 min；
- d) 选取10个连续定位数据，按公式（1）计算平面定位误差；

$$\Delta G = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}}{10} \quad (1)$$

式中：

ΔG ——卫星定位平面定位误差，m；

$(N_{G,i}, E_{G,i})$ ——GNSS接收机相对于CORS站点的平面坐标测量值，m；

$(N_{G,0}, E_{G,0})$ ——标准观测点相对于CORS站点的平面坐标标准值，m。

- e) 按公式（2）计算高程定位误差；

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sqrt{(U_{G,i} - d - U_{G,0})^2}}{10} \quad (2)$$

式中：

ΔU ——卫星定位高程定位误差，m；

$U_{G,i}$ ——GNSS接收机相对于CORS站点的高程坐标测量值，m；

d ——GNSS接收机参考点至标准观测点的垂直高度，m；

$U_{G,0}$ ——标准观测点相对于CORS站点的高程坐标标准值，m。

7.2.2 声学定位误差

声学定位误差校准步骤如下：

a) 安装声学换能器至室外水池的声学换能器操作平台，调节平移装置使声学换能器位于室外水池短边壁中心，调节俯仰装置使发射面平行于室外水池短边壁，调节升降装置使声学换能器入水深度为5m；

b) 安装信标至室外水池的信标操作平台，调节平移装置使信标位于室外水池短边壁中心，调节升降装置使信标入水深度为5m，将该位置作为起始点；

c) 启动信标操作平台，使其至声学换能器操作平台的水平距离为10m，使用全站仪测量信标至声学换能器的距离；

d) 在声学换能器定位开角范围内，依次调节信标操作平台的平移装置和升降装置；

e) 按公式（3）计算声学定位误差；

$$\Delta S_i = \sqrt{(X_{S,i} - X_{0,i}^S)^2 + (Y_{S,i} - Y_{0,i}^S)^2 + (Z_{S,i} - Z_{0,i}^S)^2} \quad (3)$$

式中：

ΔS_i ——第 i 个校准点声学定位误差。

$(X_{S,i}, Y_{S,i}, Z_{S,i})$ ——第 i 个校准点声学换能器测量的信标位置，m；

$X_{0,i}^S$ ——第 i 个校准点信标操作平台平移装置相对于起始点的平移距离，m；

$Y_{0,i}^S$ ——第 i 个校准点信标操作平台升降装置相对于起始点的升降距离，m；

$Z_{0,i}^S$ ——第 i 个校准点全站仪测量的信标至声学换能器的距离，m。

f) 选取50 m，100 m，150 m 3个校准点，按照步骤c) 至步骤d) 完成声学定位误差校准。

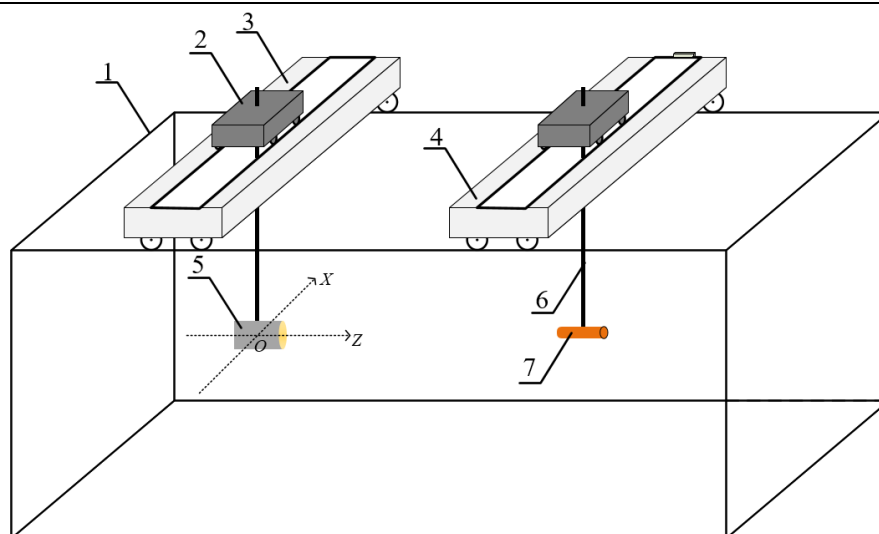


图2 声学定位校准示意图

- 1——室外水池；2——平移装置；3——声学换能器操作平台；4——信标操作平台；
5——声学换能器；6——升降装置；7——信标。

7.2.3 光学定位误差

光学定位误差校准步骤如下：

- 通过转接法兰将反射棱镜安装至水下光学定位设备正上方；
- 通过校准行车将水下光学定位设备放置于室内水池底部，且保持反射棱镜位于水面之上；
- 通过转接法兰将反射棱镜安装于反射靶标正上方；
- 将反射靶标固定安装于校准行车的升降机构，调节升降机构使水下光学定位设备定位中心与发射靶标中心入水深度相同；
- 控制校准行车使水下光学定位设备与反射靶标的距离为1m；
- 使用全站仪测量两个反射棱镜的相对位置，以水下光学定位设备正上方的反射棱镜为坐标原点；
- 读取并记录10个水下光学定位设备示值，取算术平均值作为测量值；
- 按公式（4）计算光学定位误差；

$$\Delta D_i = \sqrt{(\bar{X}_{D,i} - X_{0,i}^D)^2 + (\bar{Y}_{D,i} - Y_{0,i}^D)^2 + (\bar{Z}_{D,i} - Z_{0,i}^D)^2} \quad (4)$$

式中：

ΔD_i ——第 i 个校准点光学定位误差，m；

$(\bar{X}_{D,i}, \bar{Y}_{D,i}, \bar{Z}_{D,i})$ ——第 i 个校准点处水下光学定位测量值, m;

$(X_{0,i}^D, Y_{0,i}^D, Z_{0,i}^D)$ ——第 i 个校准点处水下光学定位标准值, m。

i) 按照步骤e)至步骤h)分别对2 m和3 m校准点进行光学定位误差校准。

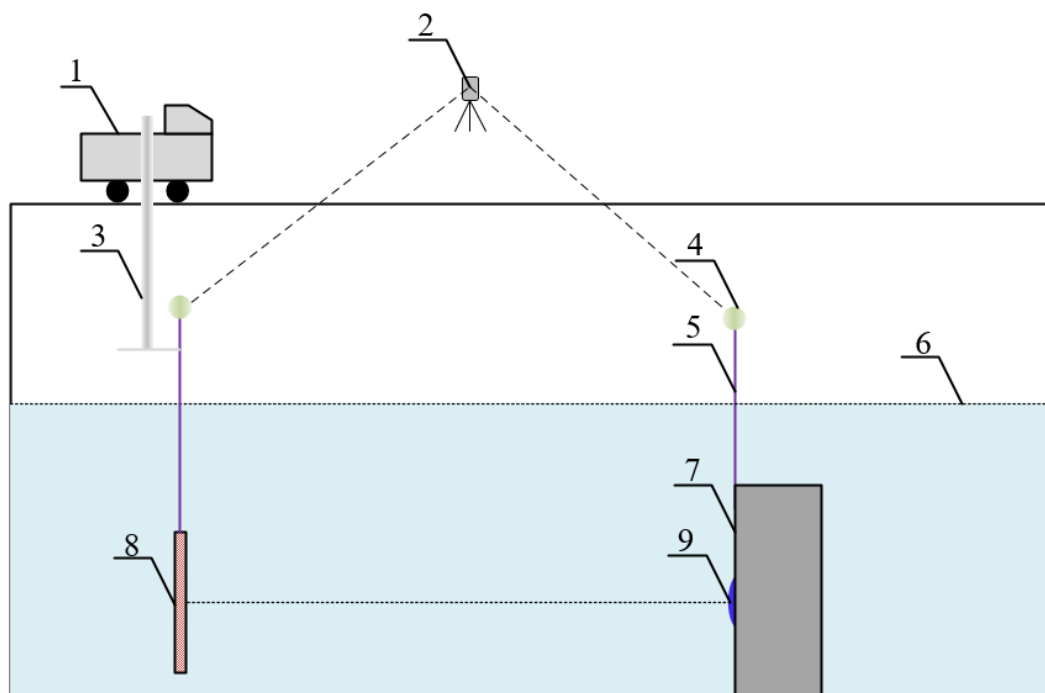


图3 光学定位误差校准示意图

1——校准行车; 2——全站仪; 3——升降机构; 4——反射棱镜; 5——转接法兰; 6——水面;

7——水下光学定位设备; 8——反射靶标; 9——水下光学定位设备发射中心。

7.2.4 综合定位误差

7.2.4.1 卫星+声学综合定位误差校准步骤如下:

- 将信标固定于升降装置A的升降平台中心位置, 调节升降平台使信标从初始点下降5m;
- 将GNSS接收机固定于升降装置B顶端的基座, 连接CORS;
- 将声学换能器固定于升降装置B的升降平台中心位置, 调节升降平台使声学换能器从初始点下降2m;
- 将声学换能器和GNSS接收机连接于甲板单元, 在控制软件中输入声学换能器偏离GNSS接收机的相对位置, 获取声学定位设备相对于CORS站点的坐标;

e) 使用声学换能器测量信标的位置，获取信标相对于CORS站点的坐标，按公式（5）计算综合定位误差。

$$\Delta C = \sqrt{(N_C - N_{C,0})^2 + (E_C - E_{C,0})^2 + (U_C - U_{C,0} - H_1 - H_2)^2} \quad (5)$$

式中：

ΔC ——综合定位误差，m；

(N_C, E_C, U_C) ——被校系统相对于CORS站点的定位结果，m；

$(N_{C,0}, E_{C,0}, U_{C,0})$ ——标志点相对于CORS站点的坐标，m；

H_1 ——初始点至标志点的距离，m；

H_2 ——升降平台下降距离，m。

7.2.4.2 卫星+光学综合定位误差校准步骤如下：

a) 将反射靶标固定于升降装置A的升降平台中心位置，调节升降平台使反射靶标从初始点下降5m；

b) 将GNSS接收机固定于升降装置B顶端的基座；

c) 将光学定位设备固定于升降装置B的升降平台中心位置，调节升降平台使学定位设备从初始点下降2m；

d) 将光学定位设备和GNSS接收机连接于甲板单元，在控制软件中输入学定位设备偏离GNSS接收机的相对位置，获取光学定位设备相对于CORS站点的坐标；

e) 使用学定位设备测量发射靶标的位置，获取发射靶标相对于CORS站点的坐标，按公式（5）计算综合定位误差。

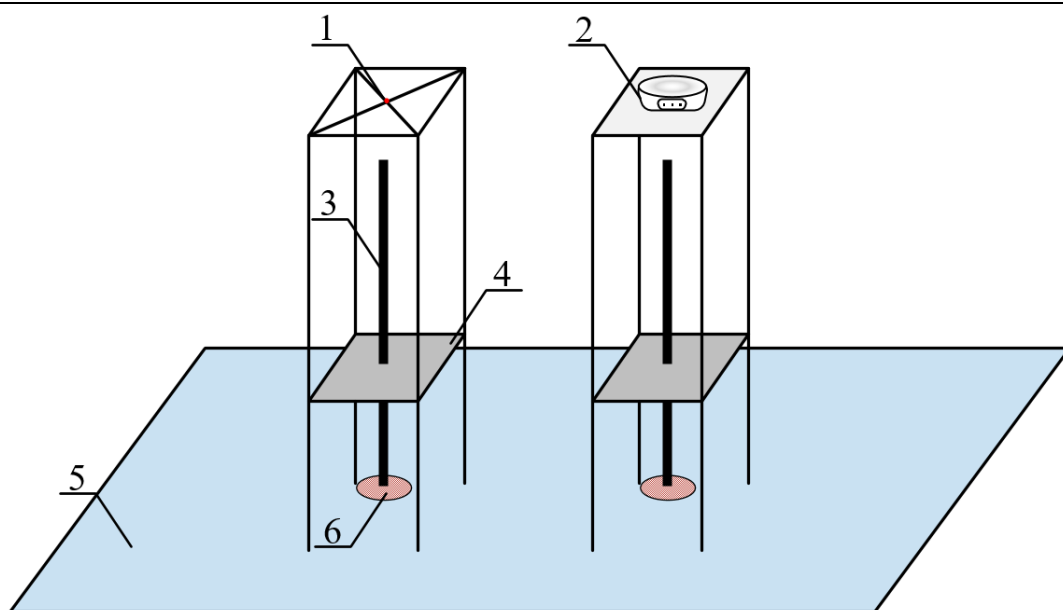


图4 综合定位误差校准示意图

1——标志点；2——GNSS接收机；3——升降杆；4——初始点；
5——水面；6——升降平台。

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称与地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用性有关，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用性有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称和代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；

- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务和等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

校准原始记录格式见附录A, 校准证书内页格式见附录B, 校准结果的不确定度评定示例见附录C。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由被校对象的使用情况、使用者及其本身质量等诸因素所决定的, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔, 建议复校时间间隔为12个月。

附录 A

涉水工程精密定位原始记录格式

证书编号：_____

涉水工程精密定位校准记录							第 页 共 页			
器具名称					规格型号					
出厂编号					制造单位					
送检单位										
校准地点										
环境条件		环境温度：_____℃ 温度变化量：_____℃								
1、卫星定位误差										
序号	标准值 m			测量值 m			天线高 m	平面定 位误差 m	高程定 位误差 m	测量不 确定度 m
	N	E	U	N	E	U				
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

涉水工程精密定位校准记录

第 页 共 页

2、声学定位误差

校准点 m	测量值 m			信标平 移距离 m	信标升 降距离 m	信标至声学换能 器的水平距离 m	定位 误差 m	测量不确 定度 m
	X	Y	Z					
5.000								
50.000								
100.000								
150.000								

3、光学定位误差

校准点 m	测量值 m						测量值均值 m			标准值 m			定位 误差 m	测量不 确定度 m
	X		Y		Z		X	Y	Z	X	Y	Z		
1.000														
2.000														
3.000														

涉水工程精密定位校准记录

第 页 共 页

4、综合定位误差

4.1 声学+卫星综合定位误差

标志点坐标 m			信标测量值 m			定位误差 m	测量不确定度 m
N	E	U	N	E	U		

4.2 光学+卫星综合定位误差

标志点坐标 m			反射靶标测量值 m			定位误差 m	测量不确定度 m
N	E	U	N	E	U		

校准员：_____

核验员：_____

校准日期：____年__月__日

附录 B

涉水工程精密定位校准证书内页格式

证书编号XXXX-XXX				
校准机构授权说明				
校准的技术依据				
校准环境条件及地点				
环境温度	℃	地 点		
校准使用的计量（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
校准使用的标准器				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量（基）标准 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、卫星定位误差

平面定位误差 m	高程定位误差 m	测量不确定度 m

2、声学定位误差

校准点 m	定位误差 m	测量不确定度 m
5.000		
50.000		
100.000		
150.000		

3、光学定位误差

校准点 m	测量值均值 m			标准值 m			定位误差 m	测量不确定度 m
	X	Y	Z	X	Y	Z		
1.000								
2.000								
3.000								

4、综合定位误差

4.1 声学+卫星综合定位误差

标志点坐标 m			信标测量值 m			定位误差 m	测量不确定度 m
N	E	U	N	E	U		

4.2 光学+卫星综合定位误差

标志点坐标 m			反射靶标测量值 m			定位误差 m	测量不确定度 m
N	E	U	N	E	U		

附录 C

涉水工程精密定位校准结果不确定度评定示例

C.1 卫星定位误差测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$\Delta G = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}}{10} \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔG ——卫星定位平面定位误差，m；

$(N_{G,i}, E_{G,i})$ ——GNSS 接收机相对于 CORS 站点的平面坐标测量值，m；

$(N_{G,0}, E_{G,0})$ ——标准观测点相对于 CORS 站点的平面坐标标准值，m。

C.1.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$\begin{aligned} c(N_{G,i}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(N_{G,i})} = \frac{(N_{G,i} - N_{G,0})}{10\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(E_{G,i}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(E_{G,i})} = \frac{(E_{G,i} - E_{G,0})}{10\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(N_{G,0}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(N_{G,0})} = \frac{-(N_{G,i} - N_{G,0})}{\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \\ c(E_{G,0}) &= \frac{\partial(\Delta G)}{\partial(E_{G,0})} = \frac{-(E_{G,i} - E_{G,0})}{\sqrt{(N_{G,i} - N_{G,0})^2 + (E_{G,i} - E_{G,0})^2}} \end{aligned}$$

C.1.3 测量不确定度来源分析

- (1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$ ；
- (2) 测量重复性引入的标准不确定度 $u(E_{G,i})$ ；
- (3) 标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ ；
- (4) 标准值测量引入的标准不确定度 $u(E_{G,0})$ 。

C.1.4 各输入量的标准不确定度分量评定

C.1.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$ 和 $u(E_{G,i})$

以平面坐标 (4308842.251, 560564.818) m 为例进行重复性测量, 计算算术平均值, 作为本次卫星定位平面坐标测量值参与重复性计算。

表 C.1 平面重复性试验数据

测量次数	测量值 m		测量次数	测量值 m	
	N	E		N	E
1	4308842.240	560564.826	6	4308842.250	560564.833
2	4308842.265	560564.801	7	4308842.248	560564.809
3	4308842.234	560564.828	8	4308842.265	560564.800
4	4308842.237	560564.803	9	4308842.251	560564.809
5	4308842.240	560564.800	10	4308842.237	560564.836

使用贝塞尔公式计算单次测量标准偏差, 得 $s_N = 0.011\text{m}$, $s_E = 0.014\text{m}$ 。校准时, 单次测量值作为测量结果, 则测量重复性引入的测量不确定度为 $u(N_{G,i}) = 0.011\text{m}$, $u(E_{G,i}) = 0.016\text{m}$ 。

C.1.4.2 标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ 和 $u(E_{G,0})$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$ 和 $u(E_{G,0})$ 相等, 下面以 $u(N_{G,0})$ 为例进行评定。此外, 标准值测量引入的标准不确定度主要来源于标准观测点基线测量标准差。

对标准观测点采用标准不确定度的 B 类评定方法, 基线测量最大允许误差为 $\leq 3\text{mm} + 0.5 \times 10^{-6}D$, 以中基线 10000m 为例, 则基线测量最大允许误差为 8mm。估计其为均匀分布, 则其不确定度 $u(X_{G,0})$ 为 $u(X_{G,0}) = \frac{0.008\text{m}}{\sqrt{3}} = 0.0046\text{m}$ 。

C.1.5 各不确定度分量汇总

表 C.2 卫星定位平面定位误差标准不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(N_{G,i})$	A	0.011m	-0.026

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(E_{G,i})$	A	0.016m	-0.022
3	标准值测量引入的标准不确定度 $u(N_{G,0})$	B	0.0046m	0.26
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(E_{G,0})$	B	0.0046m	0.22

C.1.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta G) = \sqrt{c(N_{G,i})^2 u(N_{G,i})^2 + c(N_{G,0})^2 u(N_{G,0})^2 + c(E_{G,i})^2 u(E_{G,i})^2 + c(E_{G,0})^2 u(E_{G,0})^2} = 0.0016\text{m}$$

C.1.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta G) \approx 0.004\text{m}$ 。

C.2 声学定位误差测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$\Delta S = \sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2} \quad (\text{C.2})$$

式中：

ΔS ——声学定位误差，m。

(X_s, Y_s, Z_s) ——声学换能器测量的信标位置，m；

X_0^s ——信标操作平台平移装置相对于起始点的平移距离，m；

Y_0^s ——信标操作平台升降装置相对于起始点的升降距离，m；

Z_0^s ——信标操作平台至声学换能器的水平距离，m。

C.2.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$c(X_s) = \frac{(X_s - X_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Y_s) = \frac{(Y_s - Y_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Z_s) = \frac{(Z_s - Z_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(X_0^s) = \frac{-(X_s - X_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Y_0^s) = \frac{-(Y_s - Y_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

$$c(Z_0^s) = \frac{-(Z_s - Z_0^s)}{\sqrt{(X_s - X_0^s)^2 + (Y_s - Y_0^s)^2 + (Z_s - Z_0^s)^2}}$$

C.2.3 测量不确定度来源分析

(1) 测量重复性引入的标准不确定度。

(2) 标准值测量引入的标准不确定度。

C.2.4 各输入量的标准不确定度分量评定

C.2.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(X_s)$ 、 $u(Y_s)$ 和 $u(Z_s)$

以 (1.000, 1.000, 50.000) m 为例进行重复性测量。

表 C.3 测量重复性试验数据

测量次数	测量值 m		
	X	Y	Z
1	0.999	1.004	49.996
2	1.007	1.005	50.009
3	1.005	0.998	49.996
4	1.003	1.009	50.006
5	1.005	1.006	50.008
6	1.002	1.005	49.992
7	1.010	0.994	50.000
8	1.002	1.003	49.992

测量次数	测量值 m		
	X	Y	Z
9	1.000	1.001	49.995
10	0.997	1.001	50.007

使用贝塞尔公式计算实验标准偏差，得 $s(X_s) = 0.0039\text{m}$ ， $s(Y_s) = 0.0043\text{m}$ ， $s(Z_s) = 0.0068\text{m}$ 。校准时，取单次测量值作为测量结果，则测量重复性引入的测量不确定度与实验标准偏差相同。

C.2.4.2. 标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^S)$ 、 $u(Y_0^S)$ 和 $u(Z_0^S)$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^S)$ 、 $u(Y_0^S)$ 和 $u(Z_0^S)$ 相等，下面以 $u(X_0^S)$ 为例进行评定。

C.2.4.2.1 全站仪测量引入的标准不确定度 $u_1(X_0^S)$

标准值测量的标准不确定来源全站仪的测距误差，对全站仪采用标准不确定度的 B 类评定方法，全站仪的准确度等级为 I 级，最大允许误差为 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 。斜距为 100m 时，计算得最大允许误差 $\pm 1.1\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度 $u(X_0^S)$ 为

$$u(X_0^S) = \frac{1.1\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.63\text{mm}。$$

C.2.4.2.2 操作平台测量引入的标准不确定度 $u_2(X_0^S)$

标准值测量的标准不确定来源操作平台的位移误差，对操作平台采用标准不确定度的 B 类评定方法，操作平台的最大允许误差为 $\pm 5\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度为

$$u_2(X_0^S) = \frac{5\text{mm}}{\sqrt{3}} = 2.9\text{mm}。$$

全站仪测量引入的标准不确定度与操作平台测量引入的标准不确定度互不相关，则标准值测量引入的标准不确定度为 $u(X_0^S) = \sqrt{u_1^2(X_0^S) + u_2^2(X_0^S)} = 3\text{mm}。$

C.2.5 各不确定度分量汇总

表 C.5 不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(X_s)$	A	3.9mm	0.755
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(Y_s)$	A	4.3mm	0.654
3	测量重复性引入的标准不确定度 $u(Z_s)$	A	6.8mm	0.025
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^S)$	B	3mm	-0.755
5	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Y_0^S)$	B	3mm	-0.654
6	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Z_0^S)$	B	3mm	-0.025

C.2.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta S) = \sqrt{c(X_s)^2 u(X_s)^2 + c(Y_s)^2 u(Y_s)^2 + c(Z_s)^2 u(Z_s)^2 + c(X_0^S)^2 u(X_0^S)^2 + c(Y_0^S)^2 u(Y_0^S)^2 + c(Z_0^S)^2 u(Z_0^S)^2} = 5\text{mm}$$

C.2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta S) = 10\text{mm}$ 。

C.3 光学定位示值误差测量不确定度评定

C.3.1 测量模型

$$\Delta D = \sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2} \quad (\text{C.3})$$

式中：

ΔD_i ——光学定位误差，m；

$(\bar{X}_D, \bar{Y}_D, \bar{Z}_D)$ ——水下光学定位测量值，m；

(X_0^D, Y_0^D, Z_0^D) ——水下光学定位标准值，m。

C.3.2 灵敏系数

由于测量模型中各输入量互不相关，则灵敏系数为

$$c(\bar{X}_D) = \frac{(\bar{X}_D - X_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(\bar{Y}_D) = \frac{(\bar{Y}_D - Y_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(\bar{Z}_D) = \frac{(\bar{Z}_D - Z_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(X_0^D) = \frac{-(\bar{X}_D - X_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(Y_0^D) = \frac{-(\bar{Y}_D - Y_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

$$c(Z_0^D) = \frac{-(\bar{Z}_D - Z_0^D)}{\sqrt{(\bar{X}_D - X_0^D)^2 + (\bar{Y}_D - Y_0^D)^2 + (\bar{Z}_D - Z_0^D)^2}}$$

C.3.3 测量不确定度来源分析

- (1) 测量重复性引入的标准不确定度。
- (2) 标准值测量引入的标准不确定度。

C.3.4 各输入量的标准不确定度分量评定

C.3.4.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{X}_D)$ 、 $u(\bar{Y}_D)$ 和 $u(\bar{Z}_D)$

以 (0.000, 0.000, 1.000) m 为例进行重复性测量, 计算算术平均值, 作为本次光学定位测量值参与重复性计算。

表 C.6 重复性试验数据

测量次数	测量值 m		
	$\bar{X}_D$	$\bar{Y}_D$	$\bar{Z}_D$
1	0.001	0.002	0.999
2	-0.001	0.000	0.999
3	0.002	-0.001	1.001
4	0.001	0.002	1.002

测量次数	测量值 m		
	$\bar{X}_D$	$\bar{Y}_D$	$\bar{Z}_D$
5	-0.001	0.000	1.000
6	0.002	0.002	1.002
7	0.000	0.001	1.002
8	-0.001	0.000	1.000
9	0.001	0.000	0.999
10	0.000	0.002	1.002

使用贝塞尔公式计算单次测量标准偏差，得 $s(\bar{X}_D)=0.001\text{m}$ ， $s(\bar{Y}_D)=0.001\text{m}$ ， $s(\bar{Z}_D)=0.001\text{m}$ 。校准时，取 10 个测量值的平均值作为测量结果，则测量重复性引入的测量不确定度为 $u(\bar{X}_D)=\frac{s(\bar{X}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ ， $u(\bar{Y}_D)=\frac{s(\bar{Y}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ ， $u(\bar{Z}_D)=\frac{s(\bar{Z}_D)}{\sqrt{10}}=0.4\text{mm}$ 。

C.3.4.2 标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$ 、 $u(Y_0^D)$ 和 $u(Z_0^D)$

标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$ 、 $u(Y_0^D)$ 和 $u(Z_0^D)$ 相等，下面以 $u(X_0^D)$ 为例进行评定。标准值测量引入的标准不确定度主要来源于全站仪，因此评定全站仪引入的不确定度即可。

对全站仪采用标准不确定度的 B 类评定方法，全站仪的准确度等级为 I 级，最大允许误差为 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 。斜距为 10m 时，计算得最大允许误差 $\pm 1\text{mm}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度为 $u(X_0^D)=\frac{1\text{mm}}{\sqrt{3}}=0.58\text{mm}$ 。

C.3.5 各不确定度分量汇总

表 C.7 不确定度分量一览表

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
1	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{X}_D)$	A	0.4mm	0
2	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{Y}_D)$	A	0.4mm	0.74

序号	来源	类型	标准不确定度	灵敏系数
3	测量重复性引入的标准不确定度 $u(\bar{Z}_D)$	A	0.4mm	0.56
4	标准值测量引入的标准不确定度 $u(X_0^D)$	B	0.58mm	0
5	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Y_0^D)$	B	0.58mm	-0.74
6	标准值测量引入的标准不确定度 $u(Z_0^D)$	B	0.58mm	-0.56

C.3.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta D) = \sqrt{c(\bar{X}_D)^2 u(\bar{X}_D)^2 + c(X_0^D)^2 u(X_0^D)^2 + c(\bar{Y}_D)^2 u(\bar{Y}_D)^2 + c(Y_0^D)^2 u(Y_0^D)^2 + c(\bar{Z}_D)^2 u(\bar{Z}_D)^2 + c(Z_0^D)^2 u(Z_0^D)^2} = 0.65\text{mm}$$

C.3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k \times u_c(\Delta D) = 1.3\text{mm} \approx 1\text{mm}$ 。