

国家计量技术规范
船载中深水多波束测深系统
（征求意见稿）
不确定度评定报告

规范起草组

2025 年 5 月

目 录

一、概述	1
二、不确定度评定示例	1
1 数学模型	1
2 合成灵敏度系数	1
3 不确定度分量评定	2
5 扩展不确定度	3
三、结论	6

一、概述

应用不确定度评定方法，分析所规定的计量性能、技术条件、检定条件（所使用的标准器及有关设备仪器，环境条件等）、校准方法是否科学合理，给出测量不确定度评定示例。

二、不确定度评定示例

（一）测深误差校准结果的测量不确定度评定

1 数学模型

船载中深水多波束测深系统校准结果测量不确定度评定，就是对多波束测深系统在水深测量范围内各水深校准结果开展测量不确定度评定工作。由于多波束测深系统在不同的水深值的测量不确定度的结果不相同。因此采用标准水深为500 m时作为测量不确定度评定的典型案例。考虑到影响测量不确定度的因素，其测量模型为：

$$\Delta L = L - L_0 + \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4 \quad (C.1)$$

式中：

ΔL ——多波束测深系统的示值误差，m，

L ——船载中深水多波束测深系统的测量结果，m；

L_0 ——基于无人船的多波束测深系统计量装置的测量结果，m；

ΔL_1 ——由水中声速不准确所引入的测量偏差，m；

ΔL_2 ——由定位误差引入的测量偏差，m；

ΔL_3 ——由姿态测量误差引入的偏差，m；

ΔL_4 ——由安装时产生的多波束测深仪的位置偏差，m。

2 合成灵敏度系数

由于多波束测深系统测量误差数学模型中的 L 、 L_0 、 ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 、 ΔL_4 互不相关，故其合成方差为：

$$u(\Delta L)^2 = c^2(L)u^2(L) + c^2(L_0)u^2(L_0) + c^2(\Delta L_1)u^2(\Delta L_1) + c^2(\Delta L_2)u^2(\Delta L_2) + c^2(\Delta L_3)u^2(\Delta L_3) + c^2(\Delta L_4)u^2(\Delta L_4)$$

式中灵敏系数为：

$$c(L) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(L)} = 1, \quad c(L_0) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(L_0)} = -1, \quad c(\Delta L_1) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(\Delta L_1)} = 1, \quad c(\Delta L_2) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(\Delta L_2)} = 1$$

$$c(\Delta L_3) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(\Delta L_3)} = 1, \quad c(\Delta L_4) = \frac{\partial(\Delta L)}{\partial(\Delta L_4)} = 1。$$

3 不确定度分量评定

3.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(L)$

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。在对多波束测深系统校准的过程中，每个校准点采集 50 个数据，求其平均值作为多波束测深系统测量的结果。在测量不确定度评价的过程中，采用标准水深 500 m 时的数据，作为代表性数据开展测量不确定度的评价，具体数据见表 1。

表 1 500 m 水深值时多波束测深仪水深测量数据

序号	测量结果 m	序号	测量结果 m	序号	测量结果 m	序号	测量结果 m	序号	测量结果 m
1	500.2	11	502.4	21	498.3	31	500.8	41	502.5
2	500.9	12	498.0	22	500.4	32	501.7	42	500.3
3	500.3	13	500.8	23	502.2	33	499.4	43	498.8
4	499.8	14	499.7	24	498.1	34	498.6	44	498.1
5	498.6	15	502.3	25	501.5	35	501.2	45	499.6
6	501.9	16	502.0	26	497.8	36	501.1	46	497.3
7	502.3	17	499.1	27	497.4	37	502.3	47	500.2
8	497.5	18	499.7	28	500.2	38	499.5	48	500.6
9	501.1	19	499.0	29	501.7	39	498.2	49	499.6
10	498.8	20	499.8	30	501.8	40	500.3	50	499.5

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，使用贝塞尔公式计算标准偏差，计算平均值的测量不确定度。水深测量数据的标准偏差 $s=1.5$ m，水深测量重复性所引入的测量不确定度为

$$\mu(L) = \frac{s}{\sqrt{50}} = 0.2\text{m}$$

3.2 船载单波束测深系统计量装置引入的标准不确定度 $u(L_0)$

在船载中深水多波束测深系统校准过程中，以经过校准溯源的搭载单波束测深系统作为计量标准器进行同水域同步比测，获取标准值。计量装置分别在实验室环境下、原型深水港池、水库、江河湖泊进行系统测深结果的不确定度评定，经评定该套计量标准引入的标准不确定度 $u_1(L_0)$ 为 0.7 m。

3.3 由水中声速测量不准确所引入的标准不确定度 $u(\Delta L_1)$

声速是多波束测深仪进行几何测量的重要参量，在多波束测深仪工作的过程中，应当进行整个声速剖面的声速修正。水中的声速主要受温度、盐度和压力影响。试验中所采用的声速仪最大允许误差 $\pm 0.2\text{m/s}$ 。由于 $D=ct/2$ ，在标准水深为 500 m 条件下，选取声速为

1500 m/s，则声波传播时间为 0.7 s，则由声速极限误差引起的多波束测深仪示值极限误差为± 0.14 m，其标准不确定度 $u(\Delta L_1)$ 为 0.08 m。

3.4 由定位误差引入的标准不确定度 $u(\Delta L_2)$

定位误差主要来源于 GNSS 接收机，对 GNSS 接收机采用标准不确定度的 B 类评定方法，最大允许误差为±1 m，估计其为均匀分布，则其不确定度为

$$\mu(\Delta L_2) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.6\text{m}$$

3.5 由姿态误差引入的标准不确定度 $u(\Delta L_3)$

姿态测量误差主要来源于姿态测量仪，对姿态测量仪采用标准不确定度的 B 类评定方法，根据 JJG（交通）170-2020《水运工程 姿态测量仪》，试验中所采用的姿态测量仪最大允许误差±0.1°，当标准水深为 500 m 时，引入的斜距最大允许误差为 $7.6 \times 10^{-4}\text{m}$ ，估计其为均匀分布，则其不确定度为

$$\mu(\Delta L_3) = \frac{7.6 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 4.4 \times 10^{-4}\text{m}$$

可忽略不计。

3.6 由安装时引入的标准不确定度 $u(\Delta L_4)$

船载中深水多波束测深系统在安装时各设备相对位置主要通过激光测距的方式建立船体坐标系，最大允许误差± 1 cm，采用 B 类不确定度评定方法，估计分布为均匀分布，查表得到 $k=\sqrt{3}$ ，则由安装引入的标准不确定度为 6 mm，可忽略不计。

4 合成标准不确定度

表 2 各不确定度分量汇总

符号	来源	类型	标准不确定度	灵敏度系数
$u(L)$	测量重复性	A	0.2 m	1
$u(L_0)$	校准装置	B	0.7m	-1
$u(\Delta L_1)$	声速仪	B	0.08 m	1
$u(\Delta L_2)$	GNSS 接收机	B	0.6 m	1
$u(\Delta L_3)$	姿态测量仪	B	$4.4 \times 10^{-4}\text{m}$	1
$u(\Delta L_4)$	安装偏差	B	6 mm	1

参照不确定度分量汇总表，各分量互不相关，合成标准不确定度如下：

$$\mu_c = \sqrt{\mu^2(L) + \mu^2(L_0) + \mu^2(L_1) + \mu^2(L_2) + \mu^2(L_3) + \mu^2(L_4)} = 0.95\text{m}$$

5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为： $U = k \times \mu_c = 1.9\text{m}$ 。

（二）发射声源级误差校准结果的测量不确定度评定

1 测量模型

发射声源级误差测量模型如下：

$$\Delta S = S_s - 10 \lg U_\infty - 120 + M - 20 \lg d$$

式中：

ΔS ——多波束测深仪发射声源级误差，dB；

S_s ——多波束测深仪标称发射声源级，dB；

U_∞ ——标准水听器输出端开路电压，V；

M ——标准水听器灵敏度，dB（基准值 $1 \mu\text{V}/\mu\text{Pa}$ ）；

d ——标准水听器到换能器相位中心距离，m。

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

$$\begin{aligned} c(S_s) &= \frac{\partial(\Delta S)}{\partial(S_s)} = 1 & c(U_\infty) &= \frac{\partial(\Delta S)}{\partial(U_\infty)} = -43.48 \frac{\text{dB}}{\text{V}} \\ c(M) &= \frac{\partial(\Delta S)}{\partial(M)} = 1 & c(d) &= \frac{\partial(\Delta S)}{\partial(d)} = -8.70 \frac{\text{dB}}{\text{m}} \end{aligned}$$

3 标准不确定度来源

标称发射声源级没有引入标准不确定度，标准不确定度主要来源包含以下分量：

- （1）标准水听器开路电压测量引入的标准不确定度 $u(U_\infty)$ ；
- （2）标准水听器灵敏度引入的标准不确定度 $u(M)$ ；
- （3）距离测量引入的标准不确定度 $u(d)$ ；
- （4）测量重复性引入的标准不确定度 $u(S)$ 。

4 标准不确定度的评定

4.1 标准水听器开路电压测量引入的标准不确定度 $u(U_\infty)$

标准水听器开路电压测量误差来源于数字示波器电压示值误差，数字示波器的示值误差不超过 $\pm 3\%$ ，由表 3 可得绝对误差为 0.0030V ，以均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，则数字示波器电压示值误差引入的不确定度分量：

$$u(U_{\infty}) = \frac{0.0030V}{\sqrt{3}} = 0.0017V。$$

表 3 测量频率为 50kHz 时原始测量数据

序号	U_{∞} / mV	d / m
1	112.3	1.01
2	104.5	1.00
3	92.7	1.02
4	106.4	1.00
5	94.1	1.01
6	89.6	1.01
平均值	99.9	1.01

4.2 标准水听器灵敏度引入的标准不确定度 $u(M)$

标准水听器校准结果偏差不应超过 $\pm 0.9\text{dB}$ ，取 $k=2$ ，则标准水听器灵敏度引入的标准不确定度为 $u(M) = \frac{0.9\text{dB}}{2} = 0.45\text{dB}$ 。

4.3 距离测量误差引入的标准不确定度 $u(d)$

Ⅱ级钢卷尺测距最大允许误差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ，以均匀分布考虑，取 $k=\sqrt{3}$ ，则钢卷尺测距示值误差引入的不确定度分量为 $u(d) = \frac{0.5\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.29\text{mm}$ 。

4.4 测量重复性引入的标准不确定度 $u(S)$

被校设备标称的声源级为 220dB ，计算 10 次重复测量值的实验标准偏差，进行测量重复性引入的标准不确定度评价，具体数据见表 4。

表 4 多波束测深仪声源级测量数据

序号	1	2	3	4	5
测量值/dB	219.98	219.95	219.96	219.95	220.04
序号	6	7	8	9	10
测量值/dB	219.96	220.02	220.02	220.02	220.00

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，根据贝塞尔公式得声源级实验标准偏差 $s = 0.04\text{dB}$ ，则声源级测量重复性所引入的标准不确定度为 $u(S) = 0.04\text{dB}$ 。

5 标准不确定度分量汇总

标准不确定度汇总表见表 5。

表 5 发射声源级误差测量不确定度分量综合分析表

序号	不确定度来源	符号	灵敏系数	标准不确定度
1	标准水听器开路电压测量引入的标准不确定度	$u(U_{\infty})$	$-43.48 \frac{\text{dB}}{\text{V}}$	0.0017V
2	标准水听器灵敏度引入的标准不确定度	$u(M)$	1	0.45dB
3	距离测量误差引入的标准不确定度	$u(d)$	$-8.70 \frac{\text{dB}}{\text{m}}$	0.29mm
4	测量重复性引入的标准不确定度	$u(S)$	1	0.04dB

6 合成标准不确定度

根据不确定度的传播律，将上述不确定度分量进行合成，则

$$u_c(\Delta S) = \sqrt{[c(U_{\infty})u(U_{\infty})]^2 + [c(M)u(M)]^2 + [c(d)u(d)]^2 + [c(S)u(S)]^2} \approx 0.46\text{dB}$$

7 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为 $U = 2u_c(\Delta S) = 0.92\text{dB}$ 。

三、结论

500m 水深条件下，多波束测深系统测深误差校准结果的扩展不确定度为 1.9m；发射声源级误差校准结果的扩展不确定度为 0.92dB。