

国家计量技术规范
合成孔径声呐
（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
三、结论	9

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

1 工作频率误差校准结果的测量不确定度评定

1.1 测量模型

工作频率误差通过合成孔径声呐标称的工作频率值减去校准装置测得的工作频率获得，其测量模型如下：

$$\Delta F = F_s - F_b \quad (1)$$

式中：

ΔF ——合成孔径声呐工作频率误差，Hz；

F_s ——合成孔径声呐标称工作频率，Hz；

F_b ——合成孔径声呐实际工作频率，Hz。

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

$$c(F_s) = \frac{\partial(\Delta F)}{\partial(F_s)} = 1 \quad c(F_b) = \frac{\partial(\Delta F)}{\partial(F_b)} = -1$$

1.3 标准不确定度来源

标称工作频率没有引入标准不确定度，工作频率实际值测量引入的不确定度分量如下：

(1) 数字示波器引入的标准不确定度 $u_1(F_b)$ ；

(2) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(F_b)$ 。

1.4 标准不确定度的评定

1.4.1 信号采集器引入的标准不确定度 $u_1(F_b)$

信号采集器频率最大允许误差为 $\pm 0.01\%$ ，被校设备的标称频率 120kHz，因此，本次校准使用的信号采集器的最大允许误差为 12Hz，以均匀分布考虑，包含因子 k 取 $\sqrt{3}$ ，则

信号采集器引入的标准不确定度为 $u_1(F_b) = \frac{12\text{Hz}}{\sqrt{3}} = 6.93\text{Hz}$ 。

1.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(F_b)$

被校设备标称的工作频率为 120kHz，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 1。

表 1 合成孔径声呐工作频率测量数据

序号	1	2	3	4	5
测量值/kHz	120.06	119.95	119.94	120.05	120.01
序号	6	7	8	9	10
测量值/kHz	119.93	119.95	120.08	119.91	120.06

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，根据贝塞尔公式得工作频率实验标准偏差 $s = 0.07\text{kHz}$ ，则工作频率测量重复性所引入的标准不确定度为 $u_2(f_b) = 0.07\text{kHz}$ 。

$u_1(f_b)$ 、 $u_2(f_b)$ 两个不确定度分量互不相关，则工作频率实际值测量引入的不确定度为 $u(f_b) = \sqrt{u_1(f_b)^2 + u_2(f_b)^2} = 70.34\text{Hz}$ 。

1.5 标准不确定度分量汇总

标准不确定度汇总表见表 2。

表 2 工作频率测量不确定度分量综合分析表

不确定度来源	符号	灵敏系数	标准不确定度
工作频率实际值测量引入的不确定度	$u(F_b)$	-1	70.34Hz

1.6 合成标准不确定度

根据不确定度的传播律，工作频率校准结果的合成不确定度为

$$u_c(\Delta F) = \sqrt{(c(F_s)u(F_s))^2 + (c(F_b)u(F_b))^2} = 70.34\text{Hz}$$

1.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U = 2u_c(\Delta F) \approx 0.14\text{kHz}$ 。

2 分辨率示值误差校准结果的测量不确定度评定

2.1 测量模型

分辨率示值误差是通过合成孔径声呐分辨率的测量值减去校准装置实际分辨率获得值，其测量模型如下：

$$\Delta R = R_m - R_b \quad (2)$$

式中：

ΔR ——分辨率示值误差，mm；

R_m ——合成孔径声呐分辨率测量值，mm；

R_b ——目标块之间的标准距离，mm。

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

$$c(R_m) = \frac{\partial(\Delta R)}{\partial(R_m)} = 1 \quad c(R_b) = \frac{\partial(\Delta R)}{\partial(R_b)} = -1$$

2.3 标准不确定度来源

标准不确定度的主要来源有：

(1) 合成孔径声呐引入的标准不确定度 $u(R_m)$ ；

(2) 目标块距离测量引入的标准不确定度 $u(R_b)$ 。

2.4 不确定度的评定

2.4.1 合成孔径声呐引入的标准不确定度 $u(R_m)$

2.4.1.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(R_m)$

此测量不确定度为被校准设备测量重复性所引入的标准不确定度，在测量不确定度评价的过程中，被校设备可分辨的相邻目标块最小距离为 30mm，重复测量 10 次进行标准不确定度评价，具体数据见表 3。

表 3 合成孔径声呐分辨率测量数据

序号	1	2	3	4	5
测量值/mm	31	31	29	30	31
序号	6	7	8	9	10
测量值/mm	29	31	31	30	31

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，根据贝塞尔公式计算距离分辨力测量数据的实验标准偏差 $s = 0.8\text{mm}$ ，则距离分辨力测量重复性所引入的标准不确定度为 $u_1(R_m) = 0.8\text{mm}$ 。

2.4.1.2 水中声速误差引入的标准不确定度 $u_2(R_m)$

声速是合成孔径声呐进行分辨率校准的重要参量，在合成孔径声呐工作的过程中，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。在合成孔径声呐校准的过程中，声波沿水平方向传播，声波所经过的水域的温度和盐度变化较小，声速变化较小。因此，无须对合成孔径声呐进行整个声速剖面的声速改正。采用测量不确定度的 B 类评定方法进行评定。表面声速仪最大允许误差 $\pm 0.2\text{m/s}$ ，由于 $D = \frac{1}{2}ct$ ，在本测试距离下，声波传播时间为 0.01s ，则由声速极限误差引起的合成孔径声呐分辨率示值极限误差为 $\pm 2 \times 10^{-3}\text{m}$ ，以均匀分布考虑，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，其标准不确定度为 1.15mm 。

$u_1(R_m)$ 、 $u_2(R_m)$ 两个不确定度分量互不相关，则合成孔径声呐引入的标准不确定度 $u(R_m) = \sqrt{u_1(R_m)^2 + u_2(R_m)^2} = 1.4\text{mm}$ 。

2.4.2 目标块距离测量引入的标准不确定度 $u(R_b)$

目标块距离误差来源于钢卷尺，钢卷尺最大允许误差 $\pm 4\text{mm}$ ，采用 B 类不确定度评定方法，估计分布为均匀分布，则目标块距离误差引入的测量不确定度为

$$u(R_b) = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2.31\text{mm}。$$

2.5 标准不确定度分量汇总

标准不确定度汇总表见表 4。

表 4 分辨率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	合成孔径声呐引入的标准不确定度	$u(R_m)$	1	1.4mm
2	目标块距离测量引入的标准不确定度	$u(R_b)$	-1	2.31mm

2.6 合成标准不确定度

各不确定度分量互不相关，根据不确定度的传播律，将上述不确定度分量进行合成，则：

$$u_c(\Delta R) = \sqrt{\left(c(R_m)u(R_m)\right)^2 + \left(c(R_b)u(R_b)\right)^2} = 2.7\text{mm}$$

2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=2u_c(\Delta R) \approx 6\text{mm}$ 。

3 波束宽度误差校准结果的测量不确定度评定

3.1 测量模型

波束宽度误差通过合成孔径声呐标称的波束宽度减去校准装置测得的波束宽度获得，测量模型如下：

$$\Delta\theta = \theta_s - \theta_b \quad (3)$$

式中：

$\Delta\theta$ ——合成孔径声呐波束宽度误差，°；

θ_s ——合成孔径声呐标称波束宽度，°；

θ_b ——合成孔径声呐波束宽度实际值，°。

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

$$c(\theta_s) = \frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial(\theta_s)} = 1 \quad c(\theta_b) = \frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial(\theta_b)} = -1$$

3.3 标准不确定度来源

标称波束宽度没有引入标准不确定度，波束宽度实际值测量引入的不确定度分量如下：

(1) 升降装置引入的标准不确定度 $u_1(\theta_b)$ ；

(2) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(\theta_b)$ 。

3.4 标准不确定度的评定

3.4.1 升降装置引入的标准不确定度 $u_1(\theta_b)$

升降装置位移控制最大允许误差 $\pm 0.5\text{mm}$ ，合成孔径声呐距离标准水听器 1m 处采集声

信号，则升降装置在平行航迹线方向引入的角度控制最大允许误差为

$$\tan^{-1}\left(\frac{0.5}{1000}\right)=0.0286^{\circ}, \text{采用 B 类不确定度评定方法, 估计分布为均匀分布, 升降装置引}$$

$$\text{入的测量不确定度为 } u_1(\theta_b)=\frac{0.0286}{\sqrt{3}}=0.02^{\circ}。$$

3.4.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(\theta_b)$

被校设备标称的波束宽度为 0.9° ，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 5。

表 5 合成孔径声呐波束宽度测量数据

序号	1	2	3	4	5
测量值/ $^{\circ}$	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90
序号	6	7	8	9	10
测量值/ $^{\circ}$	0.91	0.91	0.90	0.91	0.90

采用测量不确定度的 A 类评定方法计算标准不确定度，根据贝塞尔公式得波束宽度实验标准偏差 $s=0.01^{\circ}$ ，则波束宽度测量重复性所引入的标准不确定度为 $u_2(\theta_b)=0.01^{\circ}$ 。

$u_1(\theta_b)$ 、 $u_2(\theta_b)$ 两个不确定度分量互不相关，则波束宽度实际值测量引入的不确定度为 $u(\theta_b)=\sqrt{u_1(\theta_b)^2+u_2(\theta_b)^2}=0.022^{\circ}$ 。

3.5 标准不确定度分量汇总

标准不确定度汇总表见表 6。

表 6 波束宽度测量不确定度分量综合分析表

不确定度来源	符号	灵敏系数	标准不确定度
波束宽度实际值测量引入的不确定度	$u(\theta_b)$	-1	0.022°

3.6 合成标准不确定度

根据不确定度的传播律，波束宽度校准结果的合成不确定度为

$$u_c(\Delta\theta)=\sqrt{(c(\theta_s)u(\theta_s))^2+(c(\theta_b)u(\theta_b))^2}=0.022^{\circ}$$

3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，扩展不确定度为 $U = 2u_c(\Delta\theta) \approx 0.04^\circ$ 。

4 声源级误差校准结果的测量不确定度评定

4.1 测量模型

$$SL = 20\lg U_{oc} + 20\lg r - M \quad (4)$$

式中：

SL ——合成孔径声呐实际发射声源级，dB；

U_{oc} ——标准水听器输出的开路电压，V；

r ——合成孔径声呐至标准水听器的距离，m；

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

4.2 标准不确定度来源

标准不确定度的主要来源有：

- (1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u(L_s)$ ；
- (2) 标准水听器开路电压测量引入的标准不确定度 $u(U_{FP})$ ；
- (3) 钢卷尺引入的标准不确定度 $u(d)$ ；
- (4) 标准水听器灵敏度级引入的标准不确定度 $u(M_0)$ 。

4.3 标准不确定度的评定

4.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u(L_s)$

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。在对合成孔径声呐声源级校准的过程中，每个校准点采集 10 个数据，求其平均值作为测量结果。具体数据见表 7。

表 7 声源级 190dB 时测量数据

序号	1	2	3	4	5
测量结果/dB	189.4	189.5	189.4	189.3	189.2
序号	6	7	8	9	10
测量结果/dB	189.9	189.8	190.9	189.9	190.6

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 10 次测

量中某单个测得值的实验标准偏差 $s = 0.57\text{dB}$ ，10 测量的算术平均值的实验标准偏差为 0.18dB 。则由测量重复性所引入的标准不确定度 $u(L_s) = 0.18\text{dB}$ 。

4.3.2 标准水听器开路电压测量引入的标准不确定度 $u(U_{\text{FP}})$

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 8 可得最大允许误差为 $\pm 0.0030\text{V}$ ，按均匀分布估计，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：

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

表 8 测量频率为 10kHz 时原始测量数据

序号	U_1/mV	d/m
1	111.6	1.01
2	105.5	1.00
3	93.7	1.01
4	105.2	1.02
5	95.1	1.01
6	89.1	1.00
平均值	100.03	1.00

4.3.3 钢卷尺引入的标准不确定度 $u(d)$

根据 JJG 4-2015《钢卷尺》的规定，声源级校准过程中使用的钢卷尺最大允许误差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ，按均匀分布估计，取 $k = \sqrt{3}$ ，则钢卷尺距离测量示值误差引入的不确定度分量：

$$u(d) = \frac{0.5\text{mm}}{\sqrt{3}} = 0.29\text{mm}。$$

4.3.4 标准水听器灵敏度级引入的标准不确定度 $u(M_0)$

标准水听器灵敏度级最大允许误差 $\pm 0.9\text{dB}$ ，按均匀分布估计， $k = \sqrt{3}$ ，则标准水听器灵敏度级引入的标准不确定度为：

$$u(M_0) = \frac{0.9\text{dB}}{\sqrt{3}} = 0.52\text{dB}。$$

4.4 各不确定度分量汇总

表 9 各不确定度分量汇总

序号	不确定度来源	评定方法	符号	标准不确定度
1	测量重复性引入的标准不确定度	A 类	$u(L_s)$	0.18dB
2	标准水听器开路电压引入的标准不确定度	B 类	$u(U_{FP})$	1.7mV
3	钢卷尺引入的标准不确定度	B 类	$u(d)$	0.29mm
4	标准水听器灵敏度级引入的标准不确定度	B 类	$u(M_0)$	0.52dB

4.5 合成标准不确定度

各不确定度分量互不相关，根据不确定度的传播律，将上述不确定度分量进行合成，则

$$u_c = \sqrt{[c(L_s)u(L_s)]^2 + [c(U_{FP})u(U_{FP})]^2 + [c(d)u(d)]^2 + [c(M_0)u(M_0)]^2} \approx 0.56\text{dB}$$

4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \times u_c = 1.12\text{dB}$ 。

三、结论

在测量范围内，工作频率误差、分辨率示值误差、波束宽度误差和声源级误差校准结果的扩展不确定度均小于其最大允许误差的 1/3，符合量传比。