**国家计量技术规范**

**水声探测阵列水听器****原位校准规范**

**（无指向性声源法）**

**（征求意见稿）**

**测量不确定度评定报告**

**规范起草组**

**2025年06月**

目 录

[1 水声探测阵列水听器自由场灵敏度级测量模型 1](#_Toc211063353)

[2 灵敏度级测量模型灵敏系数 1](#_Toc211063354)

[3 千岛湖湖试不确定度评定 2](#_Toc211063355)

[3.1 不确定度分量 2](#_Toc211063356)

[3.2 不确定度分量汇总 4](#_Toc211063357)

[4南海海试不确定度评定 5](#_Toc211063358)

[4.1 不确定度分量 5](#_Toc211063359)

[4.2 不确定度分量汇总 7](#_Toc211063360)

[5黄海海试不确定度评定 8](#_Toc211063361)

[5.1 不确定度分量 8](#_Toc211063362)

[5.2 不确定度分量汇总 11](#_Toc211063363)

# 1 水声探测阵列水听器自由场灵敏度级测量模型

水声探测阵列水听器自由场灵敏度级测量误差的计算公式如（1）所示：



式中：

*Mix*—水声探测阵列被校准水听器的声压灵敏度级，dB，基准值为1V/uPa；

*Lsp*—经过校准的无指向性声源的发射源级，dB，基准值为1uP·m；

*Uix*—线列阵水听器阵元在绝对时间t1时刻记录的输出信号的开路电压，V；

*ci*—声源吊放位置处测得的平均声速，m/s；

*Δti*—高频测距声源发射信号与待校准水听器输出信号绝对时间延迟，s；

*UFP*—为标准水听器输出开路电压，V;

*d*—为被校准换能器与标准水听器参考声中心之间的距离，m；

*M0*—为标准水听器在该频点处的灵敏度，dB；

# 2 灵敏度级测量模型灵敏系数

根据测量模型公式（1）计算灵敏系数，确定各分量对不确定度的贡献权重如下。













# 3 千岛湖湖试不确定度评定

## 3.1 不确定度分量

1）重复性测量引入不确定度

相同测量条件下，在1kHz-10kHz频段内按照三分之一倍频程进行测量，在对水声探测阵列的第17个水听器的自由场灵敏度级重复测量6次，测量结果如下表1所示，其中*‾M*表示某一频点重复6次测量的平均值，*Sn*为其标准偏差。

表1 水声探测阵列8号阵元自由场灵敏度级校准数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* / Hz | ***M***1 /dB | ***M***2 /dB | ***M***3 /dB | ***M***4 /dB | ***M***5 /dB | ***M***6 /dB | ***‾M*** | ***s***n/dB |
| 1k | -144.59 | -144.8 | -144.9 | -144.74 | -144.8 | -144.52 | -144.725 | 0.143 |
| 1.25k | -144.04 | -144.57 | -145.4 | -144.49 | -144.06 | -144.08 | -144.44 | 0.524 |
| 1.6k | -144.55 | -145.78 | -144.82 | -144.7 | -144.51 | -145.31 | -144.945 | 0.5 |
| 2k | -145.43 | -144.89 | -145.33 | -145.47 | -145.72 | -144.76 | -145.267 | 0.368 |
| 3.15k | -143.83 | -143.66 | -143.72 | -143.55 | -143.44 | -143.4 | -143.6 | 0.167 |
| 4k | -143.32 | -143 | -143.23 | -142.87 | -143.42 | -142.55 | -143.065 | 0.324 |
| 5k | -143.41 | -142.88 | -143.02 | -142.93 | -143.26 | -143 | -143.083 | 0.207 |
| 6.3k | -144.6 | -144.13 | -144.19 | -144.25 | -144.99 | -144.3 | -144.41 | 0.328 |
| 8k | -143.5 | -143.62 | -143.46 | -143.94 | -143.48 | -143.79 | -143.632 | 0.195 |
| 10k | -143.6 | -144.45 | -143.78 | -144.82 | -143.8 | -144.88 | -144.222 | 0.566 |

取所有频段中最大偏差*Sn*，测量重复性引入的不确定度分量为：

（2.7%）

2）标准水听器灵敏度引入的不确定度分量

依据标准水听器校准证书得到，标准水听器在1Hz-2kHz频率范围内的测量不确定度U=0.5dB（k=2），在2kHz-100kHz频段内的测量不确定度U=0.7dB（*k* =2），按0.7dB计算，以正态分布考虑，取*k* =2 ，因其灵敏度系数为1，则准水听器灵敏度引入的不确定度分量为：

（4.2%）

3）标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量

由USB-4431信号采集卡读取标准水听器开路电压，由说明书可得，在测量范围内，最大幅值精度为±0.1％，使用环境和寿命导致采样精度变化，误差取±0.5％，按采集卡满量程10Vpp计算UFP，以均匀分布考虑，取 ，则标准水听器引入的不确定度分量为：



4）线列阵阵元水听器采集电压引入的不确定度分量

线列阵阵元水听器采集电压误差不超过±1%，以均匀分布考虑，取 ，水听器阵元输出电压Ux测量误差的不确定度分量为：



5）时间差测量误差引起的不确定度分量

时间差测量精度由GPS/BD的同步误差决定，采用高精度GNSS天线接收GPS/BD信息，输出 1PPS 信号间同步误差一般为±100ns，线列阵阵元内部原子钟的自守时误差一般为±100us/24h，以±100us计算，其误差不超过±0.01%，即分贝误差为0.00087dB，则时间误差测量引起的不确定度分量为可忽略不计。

6）声源指向性引起的不确定度

声源采用无指向性球形声源T150，产品手册指出在10kHz处垂直指向不均匀性小于0.7dB，以均匀分布考虑，取 ，由声源引入的不确定度为:

（4.84%）

7）信号分析处理引起的测量不确定度

由无指向性声源法仿真及水池实验验证得到，在300Hz以上引入的误差不超过±5%，以均匀分布考虑，取 ，由信号分析处理引入的不确定度：



8）声速误差引入的不确定度分量

声速误差不应超过±0.6%；以均匀分布考虑，取 ，则声速误差引入的不确定度分量为：



9）无规噪声干扰引入的不确定度分量

无规噪声干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取 ，则无规噪声干扰引入的不确定度分量为：



10）电磁干扰引入的不确定度分量

电磁干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则电磁干扰引入的不确定度分量为：



11）信噪比不足引入的不确定度分量

信噪比不足引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则海况不稳定引入的标准不确定度分量为：



12）水面起伏引入的不确定度分量

水面起伏引入的误差不应超过±5%，以均匀分布考虑，取，则水面起伏引入的标准不确定度分量为：



3.1.1 **合成标准不确定度**

将上述不确定度分量转换为百分比形式的相对不确定度后，按照以下公式得到合成标准不确定度：



3.1.2 **扩展不确定度**

按95%的置信概率，取包含因子*k*＝2，则扩展不确定度为：

(1.66 dB) （*k*=2）

## 3.2 不确定度分量汇总

湖上实验水声探测阵列阵元灵敏度校准（无指向性声源法）的测量不确定度来源汇总于表2。

表2 湖试无指向性声源法测量不确定度来源汇总表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 来源 | 符号 | 数值 |
| 1 | 重复性测量引入不确定度 | *u*1 | 见表1 |
| 2 | 标准水听器灵敏度引入的不确定度分量 | *u*2 | 4.2% |
| 3 | 标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量 | *u*3 | 0.25% |
| 4 | 线列阵阵元水听器采集电压引入的不确定度分量 | *u*4 | 5% |
| 5 | 时间差测量误差引起的不确定度分量 | / | 忽略 |
| 6 | 声源指向性引起的不确定度 | *u*5 | 4.84% |
| 7 | 信号分析处理引起的测量不确定度 | *u*6 | 2.89% |
| 8 | 声速误差引入的不确定度分量 | *u7* | 0.35% |
| 9 | 无规噪声干扰引入的不确定度分量 | *u8* | 0.7% |
| 10 | 电磁干扰引入的不确定度分量 | *u9* | 0.7% |
| 11 | 信噪比不足引入的不确定度分量 | *u10* | 0.7% |
| 12 | 水面起伏引入的不确定度分量 | *u11* | 2.89% |

# 4南海海试不确定度评定

## 4.1 不确定度分量

1）重复性测量引入不确定度

测量不确定度的A类评定主要来源于测量的重复性，相同测量条件下，在1kHz-10kHz频段内按照三分之一倍频程进行测量，在对水声探测阵列F489号阵元的自由场灵敏度级重复测量6次，测量结果如下表3所示，其中*‾M*表示某一频点重复6次测量的平均值，Sn为其标准偏差。

表3 水声探测阵列F489号阵元自由场灵敏度级校准数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* / Hz | ***M***1 /dB | ***M***2 /dB | ***M***3 /dB | ***M***4 /dB | ***M***5 /dB | ***M***6 /dB | ***‾M*** | ***s***n/dB |
| 1k | -160.19 | -159.14 | -160.49 | -158.81 | -157.08 | -161.26 | -159.50 | 1.48 |
| 1.25k | -159.82 | -158.37 | -161.79 | -158.92 | -161.24 | -159.45 | -159.93 | 1.33 |
| 1.6k | -158.90 | -157.83 | -159.83 | -162.38 | -158.46 | -161.25 | -159.78 | 1.75 |
| 2k | -157.24 | -159.40 | -157.04 | -160.55 | -159.84 | -157.37 | -158.57 | 1.53 |
| 3.15k | -163.48 | -164.22 | -165.18 | -166.50 | -163.83 | -162.97 | -164.36 | 1.29 |
| 4k | -160.11 | -159.34 | -157.02 | -158.42 | -156.73 | -159.61 | -158.54 | 1.40 |
| 5k | -162.47 | -162.61 | -161.09 | -163.98 | -162.84 | -161.52 | -162.42 | 1.02 |
| 6.3k | -162.41 | -165.10 | -163.27 | -161.93 | -165.31 | -163.64 | -163.61 | 1.38 |
| 8k | -157.72 | -158.11 | -159.49 | -158.85 | -157.33 | -159.72 | -158.54 | 0.97 |
| 10k | -161.36 | -159.31 | -162.16 | -161.20 | -159.69 | -158.73 | -160.41 | 1.35 |

取所有频段中最大偏差*Sn*，测量重复性引入的不确定度分量为：

（8.65%）

2）标准水听器灵敏度引入的不确定度分量

依据标准水听器校准证书得到，标准水听器在1Hz-2kHz频率范围内的测量不确定度U=0.5dB（k=2），在2kHz-100kHz频段内的测量不确定度U=0.7dB（*k* =2），按0.7dB计算，以正态分布考虑，取*k* =2 ，因其灵敏度系数为1，则准水听器灵敏度引入的不确定度分量为：

（4.2%）

3）标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量

由USB-4431信号采集卡读取标准水听器开路电压，由说明书可得，在测量范围内，最大幅值精度为±0.1％，使用环境和寿命导致采样精度变化，误差取±0.5％，按采集卡满量程10Vpp计算UFP，以均匀分布考虑，则标准水听器引入的不确定度分量为：



4）垂直线列阵自容水听器采集电压引入的不确定度分量

线列阵自容水听器采集电压误差不超过±1%，以均匀分布考虑，取，水听器阵元输出电压Ux测量误差的不确定度分量为：



5）时间差测量误差引起的不确定度分量

时间差测量精度由GPS/BD的同步误差决定，采用高精度GNSS天线接收GPS/BD信息，输出 1PPS 信号间同步误差一般为±100ns，线列阵阵元内部原子钟的自守时误差一般为±100us/24h，以±100us计算，其误差不超过±0.01%，即分贝误差为0.00087dB，则时间误差测量引起的不确定度分量为可忽略不计。

6）声源指向性引起的不确定度

声源采用无指向性球形声源T150，产品手册指出在10kHz处垂直指向不均匀性小于0.7dB，以均匀分布考虑，取，由声源引入的不确定度为:

（4.84%）

7）信号分析处理引起的测量不确定度

由无指向性声源法仿真及水池实验验证得到，在300Hz以上引入的误差不超过±5%，以均匀分布考虑，取，由信号分析处理引入的不确定度：



8）声速误差引入的不确定度分量

声速误差不应超过±0.6%；以均匀分布考虑，取，则声速误差引入的不确定度分量为：



9）无规噪声干扰引入的不确定度分量

无规噪声干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则无规噪声干扰引入的不确定度分量为：



10）电磁干扰引入的不确定度分量

电磁干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取 ，则电磁干扰引入的不确定度分量为：



11）信噪比不足引入的不确定度分量

信噪比不足引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则海况不稳定引入的标准不确定度分量为：



12）水面起伏引入的不确定度分量

水面起伏引入的误差不应超过±15%，以均匀分布考虑，取，则水面起伏引入的标准不确定度分量为：



13）自容水听器、声源的状况不稳定引入的不确定度分量

自容水听器、声源的状况不稳定引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，则自容水听器、声源的状况不稳定引入的标准不确定度分量为：



14）阵元位置偏差引入的不确定度分量

阵元位置偏差引入的误差不应超过±5%，以均匀分布考虑，则阵元位置偏差引入的标准不确定度分量为：



4.1.1 **合成标准不确定度**

将上述不确定度分量转换为百分比形式的相对不确定度后，按照以下公式得到合成标准不确定度：



4.1.2 **扩展不确定度**

按95%的置信概率，取包含因子*k*＝2，则扩展不确定度为：

(2.42 dB)（*k*=2）

## 4.2 不确定度分量汇总

南海海上实验水声探测阵列阵元灵敏度校准（无指向性声源法）的测量不确定度来源汇总于表4。

表4 南海海上试验测量不确定度来源汇总表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 来源 | 符号 | 数值 |
| 1 | 重复性测量引入不确定度 | *u*1 | 见表3 |
| 2 | 标准水听器灵敏度引入的不确定度分量 | *u*2 | 4.2% |
| 3 | 标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量 | *u*3 | 0.25% |
| 4 | 线列阵阵元水听器采集电压引入的不确定度分量 | *u*4 | 5% |
| 5 | 时间差测量误差引起的不确定度分量 | / | 忽略 |
| 6 | 声源指向性引起的不确定度 | *u*5 | 4.84% |
| 7 | 信号分析处理引起的测量不确定度 | *u*6 | 2.89% |
| 8 | 声速误差引入的不确定度分量 | *u7* | 0.35% |
| 9 | 无规噪声干扰引入的不确定度分量 | *u8* | 0.7% |
| 10 | 电磁干扰引入的不确定度分量 | *u9* | 0.7% |
| 11 | 信噪比不足引入的不确定度分量 | *u10* | 0.7% |
| 12 | 水面起伏引入的不确定度分量 | *u11* | 8.66% |
| 13 | 自容水听器、声源的状况不稳定引入的不确定度分量 | *u12* | 0.7% |
| 14 | 阵元位置偏差引入的不确定度分量 | *u13* | 2.89% |

# 5黄海海试不确定度评定

## 5.1 不确定度分量

1）重复性测量引入不确定度

测量不确定度的A类评定主要来源于测量的重复性，相同测量条件下，在1kHz-10kHz频段内按照三分之一倍频程进行测量，在对水声探测阵列1967号阵元的自由场灵敏度级重复测量6次，测量结果如下表5所示，其中*‾M*表示某一频点重复6次测量的平均值，Sn为其标准偏差。

表5 水声探测阵列1967号阵元自由场灵敏度级校准数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* / Hz | ***M***1 /dB | ***M***2 /dB | ***M***3 /dB | ***M***4 /dB | ***M***5 /dB | ***M***6 /dB | ***‾M*** | ***s***n/dB |
| 1k | -172.56 | -172.35 | -173.12 | -172.01 | -173.50 | -172.88 | -172.738 | 0.457 |
| 1.25k | -173.04 | -171.92 | -172.23 | -173.31 | -172.60 | -173.79 | -172.817 | 0.590 |
| 1.6k | -173.07 | -172.47 | -173.64 | -171.82 | -173.89 | -173.22 | -173.018 | 0.647 |
| 2k | -172.03 | -171.52 | -173.23 | -172.88 | -173.72 | -172.43 | -172.635 | 0.681 |
| 3.15k | -172.72 | -172.15 | -173.89 | -172.62 | -174.19 | -173.50 | -173.181 | 0.677 |
| 4k | -172.08 | -172.35 | -173.81 | -171.72 | -173.52 | -172.92 | -172.737 | 0.698 |
| 5k | -172.17 | -171.62 | -173.52 | -172.31 | -174.09 | -173.23 | -172.825 | 0.792 |
| 6.3k | -172.95 | -172.02 | -173.72 | -171.89 | -174.01 | -173.41 | -173.003 | 0.747 |
| 8k | -172.68 | -171.72 | -173.31 | -172.21 | -173.81 | -172.62 | -172.728 | 0.633 |
| 10k | -173.96 | -172.21 | -174.12 | -172.81 | -174.41 | -173.72 | -173.541 | 0.718 |

取所有频段中最大偏差*Sn*，测量重复性引入的不确定度分量为：

（3.9%）

2）标准水听器灵敏度引入的不确定度分量

依据标准水听器校准证书得到，标准水听器在1Hz-2kHz频率范围内的测量不确定度U=0.5dB（k=2），在2kHz-100kHz频段内的测量不确定度U=0.7dB（*k* =2），按0.7dB计算，以正态分布考虑，取*k* =2 ，因其灵敏度系数为1，则准水听器灵敏度引入的不确定度分量为：

（4.2%）

3）标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量

由USB-4431信号采集卡读取标准水听器开路电压，由说明书可得，在测量范围内，最大幅值精度为±0.1％，使用环境和寿命导致采样精度变化，误差取±0.5％，按采集卡满量程10Vpp计算UFP，以均匀分布考虑，则标准水听器引入的不确定度分量为：



4）垂直线列阵自容水听器采集电压引入的不确定度分量

线列阵自容水听器采集电压误差不超过±1%，以均匀分布考虑，取，水听器阵元输出电压Ux测量误差的不确定度分量为：



5）时间差测量误差引起的不确定度分量

时间差测量精度由GPS/BD的同步误差决定，采用高精度GNSS天线接收GPS/BD信息，输出 1PPS 信号间同步误差一般为±100ns，线列阵阵元内部原子钟的自守时误差一般为±100us/24h，以±100us计算，其误差不超过±0.01%，即分贝误差为0.00087dB，则时间误差测量引起的不确定度分量为可忽略不计。

6）声源指向性引起的不确定度

声源采用无指向性球形声源T150，产品手册指出在10kHz处垂直指向不均匀性小于0.7dB，以均匀分布考虑，取，由声源引入的不确定度为:

（4.84%）

7）信号分析处理引起的测量不确定度

由无指向性声源法仿真及水池实验验证得到，在300Hz以上引入的误差不超过±5%，以均匀分布考虑，取，由信号分析处理引入的不确定度：



8）声速误差引入的不确定度分量

声速误差不应超过±0.6%；以均匀分布考虑，取，则声速误差引入的不确定度分量为：



9）无规噪声干扰引入的不确定度分量

无规噪声干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则无规噪声干扰引入的不确定度分量为：



10）电磁干扰引入的不确定度分量

电磁干扰引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取 ，则电磁干扰引入的不确定度分量为：



11）信噪比不足引入的不确定度分量

信噪比不足引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，取，则海况不稳定引入的标准不确定度分量为：



12）水面起伏引入的不确定度分量

水面起伏引入的误差不应超过±15%，以均匀分布考虑，取，则水面起伏引入的标准不确定度分量为：



13）自容水听器、声源的状况不稳定引入的不确定度分量

自容水听器、声源的状况不稳定引入的误差不应超过±1.2%，以均匀分布考虑，则自容水听器、声源的状况不稳定引入的标准不确定度分量为：



14）阵元位置偏差引入的不确定度分量

阵元位置偏差引入的误差不应超过±5%，以均匀分布考虑，则阵元位置偏差引入的标准不确定度分量为：



5.1.1 **合成标准不确定度**

将上述不确定度分量转换为百分比形式的相对不确定度后，按照以下公式得到合成标准不确定度：



5.1.2 **扩展不确定度**

按95%的置信概率，取包含因子*k*＝2，则扩展不确定度为：

(2.2 dB)（*k*=2）

## 5.2 不确定度分量汇总

黄海海上实验水声探测阵列阵元灵敏度校准（无指向性声源法）的测量不确定度来源汇总于表6。

表6 黄海海上试验测量不确定度来源汇总表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 来源 | 符号 | 数值 |
| 1 | 重复性测量引入不确定度 | *u*1 | 见表5 |
| 2 | 标准水听器灵敏度引入的不确定度分量 | *u*2 | 4.2% |
| 3 | 标准水听器输出电压读数误差引入的不确定度分量 | *u*3 | 0.25% |
| 4 | 线列阵阵元水听器采集电压引入的不确定度分量 | *u*4 | 5% |
| 5 | 时间差测量误差引起的不确定度分量 | / | 忽略 |
| 6 | 声源指向性引起的不确定度 | *u*5 | 4.84% |
| 7 | 信号分析处理引起的测量不确定度 | *u*6 | 2.89% |
| 8 | 声速误差引入的不确定度分量 | *u7* | 0.35% |
| 9 | 无规噪声干扰引入的不确定度分量 | *u8* | 0.7% |
| 10 | 电磁干扰引入的不确定度分量 | *u9* | 0.7% |
| 11 | 信噪比不足引入的不确定度分量 | *u10* | 0.7% |
| 12 | 水面起伏引入的不确定度分量 | *u11* | 8.66% |
| 13 | 自容水听器、声源的状况不稳定引入的不确定度分量 | *u12* | 0.7% |
| 14 | 阵元位置偏差引入的不确定度分量 | *u13* | 2.89% |