

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—××××

水声探测阵列水听器原位校准规范

（无指向性声源法）

In-situ Calibration Specification of Hydrophones of Underwater Acoustic Detection Array (Non-directional Sound Source Method)

（征求意见稿）

××××-××-××发布 ××××-××-××实施

国家市场监督管理总局　发布

JJF XXXX—XXXX

水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）In-situ Calibration Specification of Hydrophones of Underwater Acoustic Detection Array（Non-directional Sound Source Method）

归口单位：全国声学计量技术委员会

主要起草单位 ：中国计量大学

中国计量科学研究院

参加起草单位 ：中国船舶集团有限公司第七六〇研究所

天津大学

本规范委托全国声学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

郭世旭（中国计量大学）

王月兵（中国计量大学）

赵 鹏（中国计量大学）

王 敏（中国计量科学研究院）

沈 超（中国计量大学）

参加起草人：

管宇（中国船舶集团有限公司第七六〇研究所）

李鹏（中国船舶集团有限公司第七六〇研究所）

徐佳毅（天津大学）

目 录

引言 Ⅱ

[1 范围 1](#_Toc212627586)

[2 引用文件 1](#_Toc212627587)

[3 术语 1](#_Toc212627588)

[3.1 标准水听器 hydrophone 1](#_Toc212627589)

[3.2 自由场灵敏度级 free-field sensitivity level 1](#_Toc212627590)

[3.3 浅水域 shallow water 2](#_Toc212627591)

[3.4 深水域 deep water 2](#_Toc212627592)

[3.5 声源级 sound pressure level of a sound source 2](#_Toc212627593)

[3.6 最近测量距离 closest measuring distance 2](#_Toc212627594)

[3.7 原位校准 In-situ Calibration 2](#_Toc212627595)

[4 概述 2](#_Toc212627596)

[5 计量特性 3](#_Toc212627597)

[5.1 自由场灵敏度[级] 3](#_Toc212627598)

[6 校准条件 3](#_Toc212627599)

[6.1环境条件 3](#_Toc212627600)

[6.2 校准用设备 4](#_Toc212627601)

[7 校准项目和校准方法 4](#_Toc212627602)

[7.1校准项目 4](#_Toc212627603)

[7.2校准方法 4](#_Toc212627604)

[8 校准结果表达 8](#_Toc212627605)

[8.1校准证书 8](#_Toc212627606)

[8.2 校准结果的测量不确定度 8](#_Toc212627607)

[9 复校时间间隔 8](#_Toc212627608)

[附录A 9](#_Toc212627609)

[校准证书的内容 9](#_Toc212627610)

[附录B 11](#_Toc212627611)

[水声探测阵列水听器自由场灵敏度测量不确定度评定示例 11](#_Toc212627612)

引 言

本规范依据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》、JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的规则和要求进行编制。

本规范参考了IEC 60565-1-2020 《水声 水听器 水听器校准 第1部分:水听器自由场校准步骤(Underwater acoustics—Hydrophones—Calibration of hydrophones—Part1:Proceduresforfree-fieldcalibrationof hydrophones)》、GB/T 44042—2024《船舶水下辐射噪声测量方法》。

本规范为首次制定。

水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）

# 范围

本规范适用于垂直水声探测阵列，对其水听器阵元在1kHz~10kHz频率范围内的自由场灵敏度级开展原位校准。

# 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1034—2020 声学计量名词术语及定义

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

JJF 185—2017 500 Hz~1 MHz标准水听器(自由场比较法)

JJF1861—2020 1kHz~200kHz水声换能器校准规范

GB/T 3102.7—1993 声学的量和单位

GB/T 44042—2024 船舶水下辐射噪声测量方法

GB/T 13972-2010 海洋水文仪器通用技术条件

GJB 273A-1996 船舶水下噪声测量方法

HY/T 141-2011 海洋仪器海上试验规范

IEC 60565-1-2020 水声 水听器 水听器校准 第1部分:水听器自由场校准步骤(Underwater acoustics—Hydrophones—Calibration of hydrophones—Part1:Proceduresforfree-fieldcalibrationof hydrophones)

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。

# 术语

JJF 1001—2011、JJF 1034—2020、GB/T 3102.7—1993、JJF 1059.1—2012、JJF 185—2017、IEC 60565-1-2020、GB/T 18314—2009、GB/T 44042—2024、GJB 273A-1996、GB/T 13972-2010、HY/T 141-2011界定的及以下术语和定义适用于本规范。

本规范采用GB 3102.7-1993规定的量和单位。

## 标准水听器 hydrophone

用作水声计量的、性能稳定并经过绝对校准的换能器。

[JJF 1034—2020，定义5.3]

## 自由场灵敏度级 free-field sensitivity level

自由场灵敏度的量值与基准值之比取以10为底的对数乘以20。

注：基准值为1 V/μPa

符号：*M*

单位：Db

[JJF 1861—2020，定义3.4]

## 浅水域 shallow water

水深大于30 m ，小于150 m 与1.5倍船长的较大值。

[GB/T 44042—2024,定义3.2]

## 深水域 deep water

水深大于150 m 与1.5倍船长的较大值。

[GB/T 44042—2024,定义3.1]

## 声源级 sound pressure level of a sound source

水声换能器在某频率下、在指定方向上，离其参考中心1m处的表观声压级。

注：基准值为1 μPa•m

符号：*Lsp*

单位：dB

[JJF 1861—2020，定义3.9]

## 最近测量距离 closest measuring distance;

测量船参考点与垂直线列阵的最近水平距离。

注：定义参考[GB/T 44042—2024]中关于最近会遇距离的描述。

## 原位校准 In-situ Calibration

在测量设备的实际安装位置或工作环境中，使用可溯源的计量标准，通过现场比对操作确定设备示值误差及计量性能，以满足特定工况下的量值准确性和可靠性需求。

注：定义参考了[GB/T 44042—2024]中对于现场校准的描述。

# 概述

水声探测线列阵主要用于对水下目标的探测、识别、定位以及对舰船辐射噪声测量。其基本原理是按照一定间距、几何形状排列构成水听器阵列，同步接收水下目标辐射或反射的声波信号，通过波束形成等信号处理技术，实现对目标的探测。



图1 垂直水声探测阵列示意图

主要有水听器阵元、沉块、释放器、承重缆、信号缆、浮体、信号采集处理系统等组成，如图1所示。根据水下布放方式不同，一般有垂直线列阵，海底水平固定阵等类型，组成阵列的水听器一般是压电水听器或者光纤水听器等类型。

# 计量特性

## 5.1 自由场灵敏度[级]

水声探测线列阵水听器阵元自由场灵敏度[级]，一般其范围为−-200dB～−130 dB(参考值1V/μPa)。

注：水声探测阵列阵元灵敏度包含系统的调理电路增益，本规范对成阵后整体的阵元灵敏度开展校准，对于超出该范围的水声探测阵列，其阵元灵敏度校准也可参考本规范进行。

# 校准条件

## 6.1 环境条件

6.1.1环境条件要求：

（1）环境温度：10℃～35℃；

（2）媒质环境温度：5℃～30℃；

（3）相对湿度：30%～80%；

（4）供电电压：（220±10）V，（50±0.5）Hz。

6.1.2水域条件要求：

（1）水域开阔，远离航道，保证试验船有充足的机动范围；

（2）水深大于30m。

（3）宜选泥沙底质的水域。

注：海上开展校准时，海况小于三级，流速小于1m/s。

6.1.3 对测量船的要求：

（1）具有低噪声供电系统；

（2）设备处于良好状态，运转正常；

（3）测试期间，停止影响测量的机械运行，测量船按照规定的工况锚泊或者漂泊。

## 6.2 校准用设备

校准用设备应经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。

6.2.1信号发生器

在频率范围1kHz~20kHz内，电压示值最大允许误差不超过±1%，频率示值最大允许误差不超过±0.02%。

6.2.2信号采集器

通道数不少于4通道，最高采样率大于100kSPS，在频率范围1kHz~20kHz内，信号幅度测量误差不大于±1 %。

6.2.3 功率放大器

在频率范围1kHz~20kHz内，最大输出功率应不小于800W，总谐波失真系数不大于2 %。

6.2.4 无指向性声源

优选球形换能器，工作频率范围大于1kHz~10kHz，水平、垂直全向，10kHz处水平、垂直指向性起伏小于±1dB。

6.2.5 标准水听器

工作频率范围大于100Hz~20kHz，灵敏度级范围为-220dB~-200dB，灵敏度级测量不确定度不大于0.7dB（*k*=2）。

6.2.6 自容式声速剖面仪

工作水深范围覆盖水听器阵列所在的水深，声速测量精度优于±0.1m/s。

6.2.7 北斗定位仪

平面定位精度优于±1m，PPS秒脉冲同步精度优于±100ns。

6.2.8 授时同步时钟

授时同步时钟输出高稳定度1PPS信号，驯服后，授时同步时钟时间同步精度优于±100ns，24小时自守时精度优于±100us。

6.2.9 卷尺

测量范围不小于10m，精度等级优于Ⅱ级。

# 校准项目和校准方法

## 7.1 校准项目

水声探测阵列水听器阵元自由场灵敏度[级]。

## 7.2 校准方法

7.2.1 海上布放及航行要求

a) 对于阵元为自容水听器的线列阵，要求内部有时钟守时功能，布放前需要完成各阵元之同步及授时，守时精度优于±100us/24h；对于在线实时传输类型的水听器阵元，要求具备北斗时钟同步功能，或者具备北斗时钟PPS秒脉冲触发采集模式，布放后完成授时同步或者开始触发采集。

b) 根据水声线列阵的用途，由客户参考相关规范（如GB/T 44042—2024、GJB 273A-1996等）在测量船上开展垂直线列阵的布放，布放完成后，测量船机动，行驶至与垂直线列阵最近测量距离100m~300m范围内时锚定。



图2 垂直水声探测阵列阵元灵敏度原位校准示意图

7.2.2 校准前的准备

校准前的准备步骤如下：

a) 自容式声速剖面仪外观完好，测试基本功能正常，并设置设备时间与校准系统时间同步，利用吊放设备完成该海域从海面到海底一条完整的声速剖面测量。

b) 无指向性声源以及标准水听器的辐射面应整洁光滑、无明显机械损伤。球形无指向性声源、标准水听器固定于刚性支架，刚性支架下端设置重块。利用钢卷尺测量记录无指向性声源声中心与标准水听器之间直线距离*d*，该距离不小于1m。

c) 利用悬臂吊将固定声源的刚性支架柔性吊放深度不小于10m，北斗定位仪的定位天线固定于悬臂吊吊绳附近2m以内。

d）按照下图2，连接信号发射器、信号采集器、功率放大器、无指向性声源以及标准水听器等。PC机内预制发射信号（信号形式参考7.2.3），利用北斗定位仪输出的PPS秒脉冲，通过信号发射卡实现触发发射，驱动功率放大器及无指向性声源；信号采集器同时采集保存PPS秒脉冲信号、UTC及定位数据、标准水听器输出的信号、以及功率放大器电压监视信号。

文本

AI 生成的内容可能不正确。

图3 校准系统设备连接示意图

7.2.3 校准步骤

a) 时间同步

如图2所示，利用卫星授时的PPS秒脉冲信号，使无指向性声源按照1s的周期触发发射预制信号，同时触发信号采集器同步采集标准水听器信号、功放电压监控信号、UTC时间及定位数据、PPS秒脉冲信号。

b) 发射信号形式。

****

图4 校准发射信号形式示意图

如图4所示，信号发射采用周期循环结构信号串的形式，周期为1s，利用PPS秒脉冲触发发射。第一段为线性调频信号（频率7-10kHz，长度100ms），用于高精度测距；第二段为单频脉冲校准信号，交错发射1kHz-10kHz频率范围内脉冲声信号，顺序为：1kHz，4kHz，1.25kHz，5kHz，1.6kHz，6.3kHz，2kHz，8kHz，2.5kHz，10kHz，3.15kHz，发射周期数为10个，每个频点间隔100ms，最后是线性调频信号（频段10kHz-1kHz，长度100ms），完成1s内的信号发射。

c) 发射信号声源级计算

监控标准水听器输出信号，并调整信号发射卡输出幅度，使其不限幅。如果被测线列阵可实时读取数据，监控其每个阵元的输出信号，满足信噪比大于10dB且不限幅。如果的被测线列阵阵元为自容存储形式，需要根据已知的阵元灵敏度，按照传播损失大致推算其阵元输出幅度，确保信噪比大于10dB且不限幅。

在每个频点处，利用标准水听器按公式（1）对此频点处的发射源级进行现场标定。

 （1）

*Lsp*—被校准无指向性声源的发射声源级，dB，基准值为1uP·m；

*UFP*—标准水听器输出开路电压，V;

*d*—无指向性声源与标准水听器声中心之间的距离，m，由卷尺测得。

标定完成后，连续发射图4信号串不少于10次。

d) 水声探测线列阵水听器阵元灵敏度校准数据处理。

对线列阵中第*i*个水听器阵元接收到的信号进行数据解析，并对读取每个频点处的开路电压为。经过PPS秒脉冲时间同步对齐后，利用匹配滤波等水下同步钟测距技术，求得无指向性声源发射信号与第*i*个待校准水听器输出信号时间延迟为*Δti*。处理7.2.2中a) 步骤中的声速剖面数据，读取第*i*个水听器阵元深度处的声速数据为*ci*，则被第*i*个校准水听器的声压灵敏度级见公式（2）

 （2）

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声源级，dB，基准值为1uP·m；

—第*i*个水听器阵元输出信号中，某个频点对应的的开路电压平均值，V；

*ci*—第*i*个水听器阵元深度位置处测得的平均声速，m/s；

*Δti*—无指向性声源发射信号与待校准水听器输出信号绝对时间延迟，s；

# 校准结果表达

## 8.1 校准证书

经校准的线列阵阵元应出具校准证书，校准证书应包括的信息以及推荐的校准证书的内页格式参见附录A。

## 8.2 校准结果的测量不确定度

线列阵阵元灵敏度级校准结果的测量不确定度按JJF 1059.1—2012的要求评定，测量不确定度评定的示例见附录B。

# 复校时间间隔

对于长时间固定于水下的水声探测线列阵，其阵元灵敏度复校时间间隔一般不超过12个月，对于临时布放并回收的水声探测线列阵，在其开始测量任务前，推荐开展一次阵元灵敏度校准。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

校准证书的内容

A.1 校准证书至少应包括以下信息：

1. 标题，如“校准证书”；
2. 校准实验室的名称和地址；
3. 进行校准的地点（如果不在实验室内进行校准）；
4. 证书的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
5. 客户的名称和地址；
6. 被校对象的描述和明确标识；
7. 进行校准的日期；
8. 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
9. 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
10. 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
11. 环境条件的描述；
12. 校准结果及其测量不确定度的说明；
13. 对校准规范的偏离的说明；
14. 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
15. 校准结果仅对被校对象有效的声明；
16. 未经校准实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

A.2 推荐的水声探测阵列水听器自由场灵敏度校准证书内页格式

水声线列阵水听器阵元校准证书内页格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准结果　　 　　 共　页　　　第　页  一、环境条件：  海区位置：经度 ；纬度 ；  海区水深： m；  风速： m/s；  海况等级： 级；  环境温度： ℃；  水温： ℃  二、校准依据：  三、校准装置名称：  四、测量不确定度：  五、阵元敏度（参考值：1V/μPa）：   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 线列阵阵元编号： | | | | | 水深： m | | | | | 声速： m/s | | | | | *f* /Hz | ***M****x* /dB | *f* /Hz | ***M****x* /dB | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  | |  |  |  |  |   备注： |

注：校准频率按1/3倍频程，或根据客户指定的频率。

附录B

水声探测阵列水听器自由场灵敏度测量不确定度评定示例

按照JJF 1059.1—2012中规定的方法，在海洋自由场环境中对水声探测阵列水听器在使用中利用无指向性声源对比法，对其自由场灵敏度进行测量不确定度进行评定。

B.1 数学模型

自由场环境中水听器灵敏度级按公式（B.1）进行计算:



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声源级，dB，基准值为1uP·m；

—第*i*个水听器阵元输出信号中，某个频点对应的的开路电压平均值，V；

*ci*—第*i*个水听器阵元深度位置处测得的平均声速，m/s；

*Δti*—无指向性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

根据测量模型公式（B.1）计算灵敏系数，确定各分量对不确定度的贡献权重如下。













B.2 测量不确定度

（1）重复性测量引入不确定度

相同测量条件对水声探测阵列的某个水听器的自由场灵敏度级重复测量6次，测量结果如表B.1所示。其中最大偏差发生在1kHz，此时*s*n= 0.792dB，所以测量重复性引入的不确定度分量为*u*1=0.792 / √6 = 0.33 dB（3.9%）。

表B.1 XX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 | ***s***n/dB |
| 1000 | -172.56 | -172.35 | -173.12 | -172.01 | -173.50 | -172.88 | 0.457 |
| 1250 | -173.04 | -171.92 | -172.23 | -173.31 | -172.60 | -173.79 | 0.590 |
| 1600 | -173.07 | -172.47 | -173.64 | -171.82 | -173.89 | -173.22 | 0.647 |
| 2000 | -172.03 | -171.52 | -173.23 | -172.88 | -173.72 | -172.43 | 0.681 |
| 3150 | -172.72 | -172.15 | -173.89 | -172.62 | -174.19 | -173.50 | 0.677 |
| 4000 | -172.08 | -172.35 | -173.81 | -171.72 | -173.52 | -172.92 | 0.698 |
| 5000 | -172.17 | -171.62 | -173.52 | -172.31 | -174.09 | -173.23 | 0.792 |
| 6300 | -172.95 | -172.02 | -173.72 | -171.89 | -174.01 | -173.41 | 0.747 |
| 8000 | -172.68 | -171.72 | -173.31 | -172.21 | -173.81 | -172.62 | 0.633 |
| 10000 | -173.96 | -172.21 | -174.12 | -172.81 | -174.41 | -173.72 | 0.718 |

表B.2 校准频率为5kHz时的原始测量数据

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | *Ux*/ mV | *c0*/ m/s | Δt/ms | SL/dB |
| 1 | 21.63 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 2 | 21.6 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 3 | 21.74 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 4 | 21.82 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 5 | 21.61 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 6 | 21.77 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |
| 平均值 | 21.7 | 1515.9 | 0.318 | 184.33 |

（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）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，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，由声源引入的不确定度为:

（4.9%） (B.11)

（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，由信号分析处理引入的不确定度：

 (B.12)

（8）声速误差引入的不确定度分量

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

 (B.13)

（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：

 (B.14)

（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：

 (B.15)

（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：

 (B.16)

（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：

 (B.17)

（13）水面起伏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：

 (B.18)

（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：

 (B.19)

B.2.1 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：

 (B.18)

B.2.2 扩展不确定度

取包含因子*k*＝2，则水声探测阵列水听器自由场灵敏度级的测量扩展不确定度为

(2.1dB) (*k*=2) (B.19)