**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）**

**编制说明**

**规范起草组**

**2025年9月**

目 录

[1 任务来源 1](#_Toc212627500)

[2 制定背景及意义 2](#_Toc212627501)

[3 编制过程 3](#_Toc212627502)

[4 编制依据 3](#_Toc212627503)

[5 主要技术内容说明 4](#_Toc212627504)

[6 验证试验的情况和结果 9](#_Toc212627505)

[7 与国际计量规范、国内标准等技术文件的兼容情况 9](#_Toc212627506)

[8 预审会专家修改意见 9](#_Toc212627507)

1 任务来源

依据国家市场监督管理总局下达的“2024年国家计量技术法规文件制定/修订计划（MTC13-2024-11）”，由中国计量大学组织成立了《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）》国家校准规范起草小组，承担校准规范编写工作，《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）》归口于全国声学计量技术委员会，计划要求于2025年四季度报批。

本规范主要起草人及其分工见表1。

表1 规范主要起草人及其主要工作

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 姓名 | 单位 | 职务/职称 | 主要工作内容 |
| 1 | 郭世旭 | 中国计量大学 | 副教授 | 负责规范编写过程中的人员、部门组织、协调，对规范质量、技术要求总把关，是规范编写的总负责人。 |
| 2 | 王月兵 | 中国计量大学 | 研究员 | 校准规范的技术参数，技术路线把关，论证方法的可行性，规范内容审查。 |
| 3 | 赵鹏 | 中国计量大学 | 高级实验师 | 实验组织，实验报告编制。参与规范内容和编制说明的编制工作 |
| 4 | 王敏 | 中国计量科学研究院 | 副研究员 | 提出并论证规范中重要性能指标要求，确定校准方式，不确定度评定报告编制。 |
| 5 | 沈超 | 中国计量大学 | 讲师 | 参与海试实验，规范内容和编制说明的编制工作 |
| 6 | 管宇 | 中国船舶集团有限公司第七六〇研究所 | 高级工程师 | 海试组织，参与规范内容和编制说明的编制工作。 |
| 7 | 李鹏 | 中国船舶集团有限公司第七六〇研究所 | 高级工程师 | 海试组织，参与规范内容和编制说明的编制工作。 |
| 8 | 徐佳毅 | 天津大学 | 副教授 | 参与海试实验，规范内容和编制说明的编制工作。 |

2 制定背景及意义

水下线列阵是由若干水听器按照一定的几何形状构成的水听器阵列，主要用于水下目标的探测、识别、定位以及对水下辐射噪声测量。根据水下布放方式不同，通常包括垂直线列阵、海底水平固定阵、拖曳阵等类型，组成阵列的水听器类型一般是压电水听器或者光纤水听器等。水下线列阵相比单个水听器空间增益高，可提高接收信号的信噪比，常用于低噪声目标宽带辐射噪声测量。而辐射噪声源级测量依赖阵元灵敏度的校准准确度，因此水声探测阵列的阵元灵敏度校准具有重要工程意义。

水声线列阵在成阵之前，一般会对水听器阵元在实验室环境下进行灵敏度响应、幅度相位一致性进行测试，目前国内外相关的校准方法及规范体系相对完善，其中，国际电工技术委员会发布了IEC60565-2:2019、IEC60565-1:2020两项国际标准用以对声压场和自由场水听器校准方法进行规范。在国内，国家发布了JJG 1017-2007《1 kHz~1 MHz标准水听器检定规程》、JJG 1018-2007《1 Hz~2 kHz标准水听器检定规程》等对标准水听器、测量水听器的检定和校准进行规范。由于阵列物理结构、电子系统等均会影响成阵后阵元实际的灵敏度和幅相一致性，而且在实际海洋环境中，水听器阵元灵敏度受海水温度、压力影响，其灵敏度会发生一定变化，尤其对于海底固定线列阵，受海底声障板作用，其边界条件已不再是自由场边界，其灵敏度以及频率响应变化情况难以预测，对噪声测量及目标识别感知能力造成影响。

对线列阵成阵后的阵元校准，国内普遍采用湖上比较法校准或者线列阵管中校准的方法。在IEC 60565-1-2020中9.4节提到，可以通过使用经过校准的声源（受控声源）对水听器灵敏度展开校准，其声场要求、布放准备、校准声源注意事项、不确定度分析等内容作了较为粗略的方法描述。在GB/T 44042—2024中5.2.3节中，对于船舶辐射噪声测量的水听器需要在使用中对其进行校准，要求：“每年应依据IEC60565-1:2020和IEC60565-2:2019 要求对便携式水听器进行一次实验室校准。对固定式水听器(永久安装在水下的),应按照IEC60565-1:2020 的要求,利用一个已经过校准的水下声源 ,采用比较法对其所有的工作频段每年进行一次校准。也可将固定式水听器从水下取出,每年进行一次保养和实验室校准”。起草组查阅国内相关文献，目前国内外尚无相关的计量技术规范。

目前我国水声线列阵研制科研单位包括中国船舶集团有限公司第七一五研究所、第七二六研究所、中船重工海声科技有限公司（六一二厂）、中科院声学所、哈尔滨工程大学、西北工业大学、国防科技大学、北京神州普惠科技股份有限公司、天津市远海声学仪器有限公司等单位，线列阵孔径通常为几百米甚至上千米，在水池或者湖泊环境中开展校准较为困难。近几年国家在南海、东海建设多种水下探测网，被越来越多地应用于海洋资源勘探、海底地质勘察、目标识别、辐射噪声测量等。水听器作为水声信号接收的主要传感器，其在海洋环境中的原位校准，可满足我国水声探测阵列系统中的水听器的高精度溯源需求，进一步建立和完善我国水声量值传递体系，保证了水声线列阵的水听器阵元在成阵后，尤其是在海洋现场环境中声学参数的量值准确性，提高目标感知识别能力。

3 编制过程

在全国声学计量技术委员会的指导下，规范承担单位于2024年12月填报《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）》的国家计量技术规范制修订项目申报书、草案及编制说明。

2025年01月~03月，成立规范编写组，细化工作内容，明确工作分工。调研国内外研究进展及应用情况，制定总体研究方案。

2025年04月~05月，开展量传溯源方法研究，确定计量技术参数及指标，建立量值溯源路线。开展湖上实验验证，并进行第一次海上实验。

2025年06月~8月，开展第二次海上实验，对湖上实验及海上实验数据进行处理，完成试验报告及不确定度分析报告。

2025年9月~10月，完成规范征求意见稿编制，并开展意见征集及修改。

4 编制依据

本规范根据JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》进行编制，并在编写中参考了以下有关文件：

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

GB/T 3102.7—1993 声学的量和单位

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)

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 18314—2009 全球定位系统(GPS)测量规范

GB/T 44042—2024 船舶水下辐射噪声测量方法

GJB 273A-1996 船舶水下噪声测量方法

GB/T 13972-2010 海洋水文仪器通用技术条件

HY/T 141-2011 海洋仪器海上试验规范

5 主要技术内容说明

## 5.1 规范名称

任务下达时的规范名称为《水声探测阵列水听器原位校准规范（标准声源法）》，标准声源一词，意味着声源及功率驱动部分均需标准化，在本规范实际实验中，利用一个无指向性的球形声源，利用标准水听器对其发射源级实施监控，有利于海上实施，因此，经起草组讨论，并听取相关专家建议，将规范名称修改为：《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）》，英文名称为《In-situ Calibration Specification of Hydrophones of Underwater Acoustic Detection Array（Non-directional Sound Source Method）》。

## 5.2 规范格式

按照JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》要求，本规范包括9个章节和两个个附录：1范围、2引用文件、3术语、4概述、5计量特性、6校准条件、7校准方法、8校准结果表达、9复校时间间隔，以及附录A校准证书内容，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。

## 5.3 范围

本规范适用于垂直水声探测阵列在使用中，对其水听器阵元在1kHz~10kHz频率范围内的自由场接收灵敏度级开展原位校准。其它海底水平固定阵或拖曳阵的阵元灵敏度校准可参考本规范。

由于水平式固定阵阵元受海底障板影响大，起草组在听取相关专家意见后，选取更贴近自由场空间的垂直线列阵开展实验验证，垂直线列阵在目标辐射噪声测量等方面应用广泛，GJB 273A-1996《船舶水下噪声测量方法》、GB/T 44042—2024《船舶水下辐射噪声测量方法》、《船舶水下辐射噪声指南-2025》（中国船级社）等相关辐射噪声测量的指导性文件，均利用垂直线列阵开展辐射噪声测量，在推算目标辐射噪声源级需要准确的阵元灵敏度。因此本规范首先以垂直线列阵为校准对象，对于海底水平固定阵或拖曳阵的阵元灵敏度校准可参考本规范开展。另外，对于大部分水听器，起伏较大的频段通常位于1kHz以上，1kHz以下较为平坦，1kH以上频段的无指向性发射声源也相对容易获得，并且考虑到浅海区海面海底反射影响，选取1kHz~10kHz作为线列阵阵元灵敏度校准的频段。

## 5.4 引用文件

起草组在前期调研的基础上，除了参考了常规的声学计量相关标准规范外，重点参考了海上实施相关的GB/T 44042—2024、GJB 273A-1996、GB/T 13972-2010、HY/T 141-2011等相关标准。尤其是GB/T 44042—2024中的多个名词术语定义以及海上具体实施方法为本规范提供了良好基础。

## 5.5 术语和定义

本部分对标准水听器、自由场灵敏度级、声源级进行了定义，并且参考GB/T 44042—2024，对实验海域的浅水域还是深水域进行了定义，并对海上测量实施中船载发射声源与接收阵列之间的距离做了定义。参考GB/T 44042—2024中对于现场校准的表述，对线列阵原位校准做了定义。

## 5.6 概述

描述了水声探测线列阵的组成、作用、类型以及阵元数据输出的类型等。

## 5.7 计量特性

起草组在前期调研的基础上，选择水声探测阵列阵元自由场灵敏度级作为计量特性，该阵元灵敏度包括前置放大器以及调理电路的增益，经过前期调研，针对自容水听器阵元、压电水听器阵元、光纤水听器阵元常见的系统总灵敏度，确定了其范围为−200 dB～−130 dB(参考值1V/μPa)。

## 5.8 校准条件

**1. 环境条件**

校准环境条件分为环境条件、水域条件以及测量船的要求。其中环境条件规定主要考虑环境温度与湿度环境应能保证干端设备的正常运行；水域条件以及测量船的规定参考了GB/T 44042—2024《船舶水下辐射噪声测量方法》、GJB 273A-1996《船舶水下噪声测量方法》中的要求。

**2. 校准用设备**

校准使用的计量标准器应符合表4的规定，或使用更高准确度的标准器。

表4 计校准用设备及其性能要求

| 序号 | 校准用设备 | 性能要求 | 用途 |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 信号发射器 | 1kHz~20kHz内，电压示值误差小于±1%，频率示值误差小于±0.1%，频率稳定度小于0.1 %/h | 用于将计算机预制的校准数字信号转化为模拟信号输出给功率放大器 |
| 2 | 信号采集器 | 4通道，采样率大于100kSPS，1kHz~20kHz内电压示值误差小于±1% | 用于同步采集标准水听器输出信号，PPS秒脉冲信号，功放监控电压信号，北斗定位仪的UTC及定位数据 |
| 3 | 功率放大器 | 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 % | 用于驱动无指向性声源 |
| 4 | 无指向性声源 | 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2dB | 用于发射校准声波信号，优选压电球形声源 |
| 5 | 标准水听器 | 工作频率范围大于100Hz~20kHz，灵敏度级不大于-200dB，灵敏度级测量不确定度不大于0.7dB（k=2） | 用于对无指向性声源在海洋现场实时对其发射声源级进行标定 |
| 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 | 用于测量实验海域声速剖面 |
| 7 | 北斗定位仪 | 平面定位精度优于±1m | 用于对声源实时定位 |
| 8 | 授时同步时钟 | 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 | 用于对发射声源PPS秒脉冲触发发射，并对接收水听器阵列授时，实现高精度同步钟测距 |
| 9 | 卷尺 | 测量范围不小于10m，精度等级不小于Ⅱ级 | 用于测量声源与标准水听器之间的刚性间距，声源吊放柔性绳的长度 |

## 5.9 校准项目和校准方法

本部分规定了水声探测阵列水听器阵元自由场灵敏度[级]作为校准项目。

参考规范中图1，并参考了GB/T 44042—2024、GJB 273A-1996等规范，规定了海上布防以及航行的要求。

校准前首先开展一些列准备工作，包括声速剖面测量的步骤、声源与标准水听器刚性固定以及吊放的方法，北斗定位仪的安装位置要求，以及仪器设备连接的关系等。

校准步骤中，规定了同步钟测距中的时间同步、发射信号的形式等，为了提高测试效率，以信号串的形式发射测试信号，每秒钟实现测距以及多个频点的校准。

由于在阵列近场测试，以球面波传播计算水听器阵元灵敏度，校准步骤c）规定了如何现场对发射声源级开展标定，步骤d）规定了如何计算某个阵元某个频点处的灵敏度。

## 5.10校准结果

依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求对校准结果中的校准证书信息进行了规定。依据本规范出具的校准证书至少包括以下信息：

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应用有关时，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。

## 5.11 复校时间间隔

依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》要求对复校时间间隔进行了规定：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。

6 验证试验的情况和结果

对本规范规定的计量特性的校准进行了湖上及海上实验验证，验证数据详见《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）试验验证报告》与《水声探测阵列水听器原位校准规范（无指向性声源法）不确定度分析报告》。试验结果表明依据本规范的校准试验测量数据准确、可靠，校准规范具有较好的实用性和可操作性，可以作为水声探测阵列水听器阵元灵敏度级、溯源的依据文件，从而规范其校准方法，实现量值统一。

7 与国际计量规范、国内标准等技术文件的兼容情况

水声探测阵列水听器阵元的原位校准规范在技术框架、精度指标和数据处理流程上与国际计量规范（如 IEC60565-1:2020和IEC60565-2:2019）和国内标准（如JJF 185—2017、GB/T 44042—2024）具有较高兼容性。截止目前，国际国内尚无针对水声探测阵列水听器阵元在海上布防后开展实际海洋环境下的灵敏度校准相关计量规范，起草组在前期充分调研并根据海上具体实施制定本规范。

8 预审会专家修改意见

2025年10月24日，中国计量大学组织召开了技术规范预审会，经过专家质询及讨论，形成以下修改意见：

1） 规范名称中“标准声源法”修改为“无指向性声源法”，对应英文相应修改。

2）范围中删去“其它海底水平固定阵或拖曳阵的阵元灵敏度校准可参考本规范” 。

3）引用文件中，按照规范，国标，国军标，行业标准分类，国际标准放置最后。

4) 术语中，对自由场灵敏度级，声源级给出定义出处，3.6最近会遇距离改为最近测量距离，并删除100m或1倍船长的较大值的表述

5）概述中，按照作用，工作原理，组成介绍，并增加一副图对垂直线列阵海上布置以及组成构成做介绍。

6）5.1中修改为：一般其范围为−200 dB～−130 dB。

7）校准条件中，水域条件将湖试与海试合并，增加注：水域为海洋时，海况小于三级，流速小于1m/s。

8）6.2.1信号发射卡改为信号发射器，删除频率稳定度的要求，6.2.2信号采集卡改为信号采集器。

9）6.2.4标准声源修改为无指向性声源，垂直指向性起伏2dB改为±1dB。

10）标准水听器灵敏度不大于-200dB，改为范围为-220dB~-200dB。

11）6.2.9 卷尺精度不小于2级，改为优于2级。

12）7.2.1 a）守时精度不大于改为优于，布放前改为布放后，b）中删除最近会遇距离表述，改为测量船机动，行驶至与垂直线列阵最近测量距离100m~300m范围内时锚定。

13）修改7.2.2 d）中的设备名称与6.2校准设备中名称一致。

14）修改图3，图中无指向性声源，标准水听器的形式与图2一致，并修改图中设备名称，保持与6.2一致。

15）修改图4，PPS改为PPS触发信号，无指向性声源，改为校准发射信号

16）7.2.3 b），第一句话修改为，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。

17）7.2.3 c），发射信号声源级现场标定，改为发射信号声源级计算。

18）7.2.3 c）连续发射上述信号100次，修改为连续发射图4信号串不少于10次。

19）7.2.3 d）*Uix*改为，应为多个测量的平均值，修改下面对应的表述，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，

20）删除7.2.4 自由场灵敏度级的频率响应，或者增加计量特性

21）B.1数学模型改为测量模型，B.1公式中*Uix*改为

22）相对不确定度中百分比保留1位小数。