

团 体 标 准

T/SASC 04002-2024

水声换能器的混响声场校准方法

Reverberation sound field calibration method of
underwater sound transducers

(发布稿)

本电子版为发布稿，请以正式出版的标准文本为准。

2024-06-01 发布

2024-09-01 实施

中国声学学会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 混响声场互易法校准.....	6
5 混响声场比较法校准.....	10
附录 A（资料性）“水声换能器混响声场互易校准方法”示例.....	12
附录 B（资料性）混响声场互易法校准结果不确定度分析.....	15
参考文献.....	18



前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国声学学会提出。

本文件由中国声学学会归口。

本文件起草单位：哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、中国船舶集团公司第七一五研究所。

本文件主要起草人：李琪、尚大晶、唐锐、张林、孙俊东、莫喜平、陈毅、鲁帆、黄勇军、黄益旺、夏峙、王文芝。



水声换能器的混响声场校准方法

1 范围

本文件给出了水声换能器在混响声场条件下的校准方法，分为混响声场互易法和混响声场比较法，包括水声换能器的混响声场校准原理及校准条件。

本文件给出的校准方法适用于：发射换能器混响声场声功率发送电压（电流）响应校准，水听器的电压灵敏度校准。

本文件中的混响声场互易法适用于标准水听器和标准声源的校准；混响声场比较法适用于水听器和发射换能器的校准。

本文件适用的频率范围从 100Hz 至 100kHz，具体受限于混响水池的几何尺寸。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3102.7-1993 声学的量和单位

GB/T 3947-1996 声学名词术语

GB/T 3223-1994 声学 水声换能器自由场校准方法

GB/T 6881.1-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级 混响室精密法

3 术语和定义

GB/T 3102.7-1993 和 GB/T 3947-1996 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水声换能器 underwater sound transducer

将其他形式的能量转换为声能向水中辐射，或将接收到的水声信号转换为其他能量形式的信号的换能器。

注：本文件中包括了发射换能器和水听器。

[来源：GB/T 3947-1996，6.14]

3.2

水听器 hydrophone

用于接收水声信号的电声换能器。

[来源：GB/T 3947-1996，7.81]

3.3

标准水听器 standard hydrophone

用作水声计量的、性能稳定并经过绝对校准的换能器。常作为建立水中声压基准用的标准器，并借此传递声压量值。

[来源：GB/T 3947-1996，7.82]

3.4

发射换能器 transmitting transducer

用于向水中发射声波的电声换能器。

[来源：GB/T 3947-1996，7.85，有修改]

3.5

标准声源 reference sound source

经过校准的、有足够辐射声功率的声源。

[来源：GB/T 3947-1996，6.47]

3.6

互易换能器 reciprocal transducer

线性、无源、可逆并满足互易原理的换能器。

[来源：GB/T 3947-1996，6.8]

3.7

混响声场 reverberation sound field

封闭空间中主要由反射声和散射声形成的声场。

注：本文件的混响声场特指混响水池中的混响声场。

[来源：GB/T 3947-1996，4.59，有修改]

3.8

混响水池 reverberation water tank

所有界面能有效地反射声波，且界面的声压无规入射反射系数不小于0.8的水池（包括水箱、水槽）。

注：混响水池不再特指形成扩散声场的测量水池。

[来源：GB/T 3947-1996，7.88，有修改]

3.9

混响时间 reverberation time

T_{60}

混响声场达到稳态，声源瞬间停止发声后声压级衰减60dB所需要的时间或外推得到的时间。

注：混响时间，单位为秒(s)。

[来源：GB/T 3947-1996，12.47]

3.10

混响水池常数 reverberation tank constant

R

反映混响水池对声吸收能力的常数，见公式（1）。

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \dots \dots \dots (1)$$

式中，

R ——混响水池常数，单位为平方米（ m^2 ）；

S ——混响水池总面积，单位平方米（ m^2 ）；

$\bar{\alpha}$ ——平均吸声系数。

注：混响水池常数的定义与房间常数（GB/T 3947—1996，12.58）在形式上是一样的。

3.11

均方声压 mean-square sound pressure

$\overline{p^2}$

声压平方的时间平均值。

注：均方声压，单位为帕方（ Pa^2 ）。

3.12

空间平均均方声压 space-averaged mean-square sound pressure

$$\langle \overline{p^2} \rangle$$

声场中均方声压的空间平均值。

$$\langle \overline{p^2} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \overline{p^2} dV \dots \dots \dots (2)$$

式中，

$\overline{p^2}$ ——声压平方的时间平均，单位为帕方（Pa²）；

V ——体积，单位为立方米（m³）。

注：空间平均均方声压，单位为帕方（Pa²）。

3.13

空间平均均方根声压 space-averaged root mean square sound pressure

$$\langle \overline{|p|} \rangle$$

空间平均均方声压的平方根，见公式（3）。

$$\langle \overline{|p|} \rangle = \sqrt{\langle \overline{p^2} \rangle} \dots \dots \dots (3)$$

注：空间平均均方根声压，单位为帕方（Pa）。

3.14

混响半径 reverberation radius

r_c

在混响水池内，各方向的平均均方直达声压与空间平均均方声压相等的点到声源中心的距离。用公式表示为：

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{QR}{\pi}} \dots \dots \dots (4)$$

式中，

Q ——声源的指向性因数；

R ——混响水池常数，单位为平方米（m²）。

注：混响半径的单位为米（m）。

[来源：GB/T 3947-1996，12.24，有修改]

3.15

混响水池的下限频率 the lower limit frequency of a reverberation water tank

f_s

满足混响条件的测量最低频率，见公式（5）。

$$f_s = 0.33 \sqrt{\frac{T_{60} c^3}{V}} \dots \dots \dots (5)$$

式中，

T_{60} ——混响时间，单位为秒（s）；

c ——声波在水中传播的速度，单位为米每秒（m/s）；

V ——混响水池中水的体积，单位为立方米（m³）。

3.16

水听器平均开路电压 averaged open-circuit voltage at receiving hydrophone

\overline{U}_j

水听器输出端没有电流流入时，水听器平均开路电压，见公式（6）。

$$\overline{U}_j = \left[\frac{1}{T} \int_0^T U_j^2(t) dt \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

式中，

$U_j(t)$ ——水听器的瞬时开路电压，单位为伏（V）；

T ——测量时间，单位为秒（s）；

注1：水听器平均开路电压，单位为伏（V）。

注2：当水听器包含前置放大器时，是指在前置放大器输出端的平均开路电压。

[来源：GB/T 4130-2017，3.1.3，有修改]

3.17

发射换能器输入电压 input voltage of transmitting transducer

 U

发射换能器电输入端的电压。

注：发射换能器输入电压单位为伏（V）。

3.18

发射换能器输入电流 input current of transmitting transducer

 I

发射换能器电输入端的电流。

注：发射换能器输入电流，单位为安（A）。

3.19

水听器混响声场电压灵敏度 reverberation-field voltage sensitivity of hydrophone

 M

水听器平均开路电压与空间平均均方根声压之比，见公式（7）。

$$M = \overline{U}_j / \langle |p| \rangle \dots\dots\dots (7)$$

式中：

\overline{U}_j ——水听器平均开路电压，单位为伏（V）；

$\langle |p| \rangle$ ——空间平均均方根声压，单位为帕（Pa）。

注1：水听器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕（V/Pa）。

注2：对于无指向性水听器，其混响声场电压灵敏度等于自由场电压灵敏度。如果是有指向性水听器，则它的灵敏度与指向性因数有关。

3.20

水听器混响声场电压灵敏度级 reverberation-field voltage sensitivity level of receiving hydrophone

 L_M

水听器混响声场电压灵敏度的量值与基准灵敏度之比的以 10 为底的对数乘以 20，见公式（8）。

$$L_M = 20 \lg(M/M_{\text{ref}}) \dots\dots\dots (8)$$

注1：通常，水听器混响声场电压灵敏度的基准值 $M_{\text{ref}} = 1 \text{V}/\mu\text{Pa}$ 。

注2：水听器混响声场电压灵敏度级，单位为分贝（dB）。

3.21

发射换能器的混响声场声压发送电流响应 reverberation-field pressure transmitting current response of transmitting transducer

$$S_I$$

在某频率，与发射换能器辐射声功率对应的自由场距等效声中心 1m 处的等效均方根声压与发射换能器输入电流的比值，见公式（9）。

$$S_I = p_1 / I = \langle |p| \rangle / (r_c \cdot I) \dots \dots \dots (9)$$

式中，

I ——发射换能器输入电流，单位为安（A）；

p_1 ——自由场距等效声中心 1m 处的等效均方根声压，单位为帕（Pa）。

注：发射换能器的混响声场声压发送电流响应，单位为帕每安（Pa/A）。

3.22

发射换能器的混响声场声功率发送电流响应 reverberation-field sound power transmitting current response of transmitting transducer

$$S_{IW}$$

在某频率，混响声场中测量的发射换能器的辐射声功率与发射换能器输入电流的比值，见公式（10）。

$$S_{IW} = W / I \dots \dots \dots (10)$$

式中，

I ——发射换能器输入电流，单位为安（A）；

W ——发射换能器的辐射声功率，单位为瓦（W）。

注：发射换能器的混响声场声功率发送电流响应，单位为瓦每安（W/A）。

3.23

发射换能器混响声场声功率发送电流响应级 reverberation-field sound power transmitting current response level of transmitting transducer

$$L_{SI}$$

发射换能器混响声场声功率发送电流响应的量值与声功率发送电流响应的基准值之比以 10 为底的对数乘以 20，见公式（11）。

$$L_{SI} = 20 \lg(S_{IW} / S_{IWref}) \dots \dots \dots (11)$$

注1：发射换能器混响声场声功率发送电流响应的基准值 $S_{IWref} = 0.67 \times 10^{-18} \text{ W/A}$ 。

注2：发射换能器混响声场声功率发送电流响应级，单位为分贝（dB）。

3.24

发射换能器的混响声场声功率发送电压响应 reverberation-field sound power transmitting voltage response of transmitting transducer

$$S_{vW}$$

在某频率，混响声场测量的发射换能器辐射声功率与发射换能器输入电压的比值，见公式（12）。

$$S_{vW} = W / U \dots \dots \dots (12)$$

式中，

U ——发射换能器输入电压，单位为伏（V）；

W ——发射换能器的辐射声功率，单位为瓦（W）。

注：发射换能器的混响声场声功率发送电压响应，单位为瓦每伏（W/V）。

3.25

发射换能器混响声场声功率发送电压响应级 reverberation-field sound power transmitting voltage response level of transmitting transducer

L_{SV}

发射换能器混响声场声功率发送电压响应的量值与声功率发送电压响应的基准值之比的以 10 为底的对数乘以 20，见公式（13）。

$$L_{SV} = 20 \lg(S_{VW}/S_{VWref}) \dots\dots\dots (13)$$

注1：发射换能器混响声场声功率发送电压响应的基准值 $S_{VWref} = 0.67 \times 10^{-18} \text{ W/V}$ 。

注2：发射换能器混响声场声功率发送电压响应级，单位为分贝（dB）。

3.26

混响声场互易常数 reverberation field reciprocity constant

J_r

混响声场中，一个线性、无源、可逆的电声换能器，用作水听器时的电压灵敏度和用作发射换能器时的发送电流响应之比，与换能器本身结构无关，见公式（14）。

$$J_r = \frac{M}{S_i} \dots\dots\dots (14)$$

式中，

J_r ——混响声场互易常数，单位为伏安米每二次方帕（ $\text{m} \cdot \text{A} \cdot \text{V}/\text{Pa}^2$ ）；

M ——水听器的电压灵敏度，单位为伏每帕（ V/Pa ）；

S_i ——发射换能器的声压发送电流响应，单位为帕每安（ Pa/A ）。

[来源：GB/T 3223-1994，2.17，有修改]

4 混响声场互易法校准

4.1 校准原理

混响声场互易法校准是根据混响声场互易原理和互易换能器遵守的电声互易原理进行的一种绝对校准方法，用于标准水听器或标准声源校准。根据混响声场互易原理，混响声场的互易常数还可表示为：

$$J_r = \frac{2}{\rho f} \dots\dots\dots (15)$$

式中，

ρ ——水介质的密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；

f ——声波的频率，单位为赫兹（Hz）。

该校准方法使用一个发射换能器（F）、一个互易换能器（H）和一个水听器（J），其中的发射换能器（F）和水听器（J）满足线性条件。在混响声场中按图 1 所示组合，作三步测量，测量过程中发射换能器发射声信号，水听器接收声信号，测量水听器的开路电压。发射换能器置于发射移动区、水听器置于混响控制区，两个区域间距 l 应大于 $4r_c$ ，见图 2 所示，发射移动区与池壁、池底和水面的距离，以及混响控制区与池壁、池底和水面的距离应大于下限频率对应波长的 $1/4$ （ $d = \lambda_s/4$ ）。

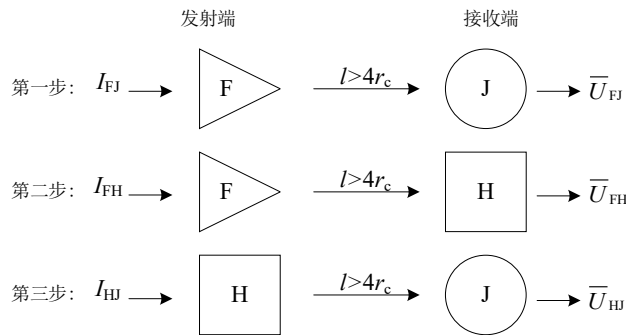


图 1 水声换能器混响声场互易校准的步骤和排布示意图

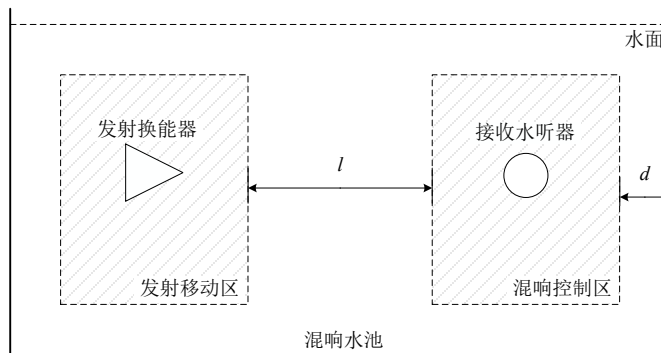


图 2 水声换能器布放区域平面示意图

测量步骤如下：

第一步，发射换能器发射声信号，水听器接收。发射换能器输入电流与水听器的空间平均均方根声压之间满足：

$$\langle |p| \rangle_{FJ} = r_c I_{FJ} S_{IF} \dots\dots\dots (16)$$

式中，

I_{FJ} ——发射换能器与水听器组合时，发射换能器的输入电流，单位为安（A）；

$\langle |p| \rangle_{FJ}$ ——发射换能器与水听器组合时，水听器的空间平均均方根声压，单位为帕（Pa）；

S_{IF} ——发射换能器的声压发送电流响应，单位为帕每安（Pa/A）。

水听器的平均开路电压与水听器的空间平均均方根声压的关系：

$$\bar{U}_{FJ} = M_J \langle |p| \rangle_{FJ} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

\bar{U}_{FJ} ——发射换能器与水听器组合时，水听器的平均开路电压，单位为伏特（V）；

M_J ——水听器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕（V/Pa）；

$\langle |p| \rangle_{FJ}$ ——发射换能器与水听器组合时，水听器的空间平均均方根声压，单位为帕（Pa）。

第二步，发射换能器发射声信号，互易换能器接收。互易换能器的平均开路电压与互易换能器的空间平均均方根声压的关系：

$$\bar{U}_{FH} = M_H \langle |p| \rangle_{FH} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

\bar{U}_{FH} ——发射换能器与互易换能器组合时，互易换能器的平均开路电压，单位为伏（V）；

M_H ——互易换能器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕（V/Pa）；

$\langle |p| \rangle_{FH}$ ——发射换能器与互易换能器组合时，互易换能器的空间平均均方根声压，单位为帕（Pa）。

当第一步和第二步中发射换能器（F）输入电流相同时（ $I_{FJ} = I_{FH}$ ），水听器（J）和互易换能器（H）的空间平均均方根声压相同（ $\langle |p| \rangle_{FJ} = \langle |p| \rangle_{FH}$ ），公式（18）与公式（17）两端相除可得：

$$\frac{M_H}{M_J} = \frac{\bar{U}_{FH}}{\bar{U}_{FJ}} \dots\dots\dots (19)$$

第三步，互易换能器作为发射换能器发射声信号，水听器接收。水听器的平均开路电压和互易换能器的输入电流的关系：

$$\frac{\bar{U}_{HJ}}{I_{HJ}} = \frac{\bar{U}_{HJ}}{\langle |p| \rangle_{HJ}} \frac{\langle |p| \rangle_{HJ}}{I_{HJ}} = M_J r_c S_{HJ} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

\bar{U}_{HJ} ——互易换能器与水听器组合时，水听器的平均开路电压，单位为伏（V）；

I_{HJ} ——互易换能器与水听器组合时，互易换能器的输入电流，单位为安（A）；

$\langle |p| \rangle_{HJ}$ ——互易换能器与水听器组合时，水听器的空间平均均方根声压，单位为帕（Pa）；

S_{HJ} ——互易换能器的发送电流响应，单位为帕米每安（Pa·m/A）。

联立公式（14）、（19）和（20）可得：

$$S_{IW-F} = \frac{r_c \bar{U}_{FJ} \bar{U}_{HJ} I_{FH} R}{4 \bar{U}_{FH} I_{HJ} J_r \rho_0 c_0} \dots\dots\dots (21)$$

$$S_{IW-H} = \frac{r_c \bar{U}_{FH} \bar{U}_{HJ} R}{4 \bar{U}_{FJ} J_r \rho_0 c_0} \dots\dots\dots (22)$$

$$M_H = \left(\frac{\bar{U}_{FH} \bar{U}_{HJ} J_r}{\bar{U}_{FJ} I_{HJ} r_c} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (23)$$

$$M_J = \left(\frac{\bar{U}_{FJ} \bar{U}_{HJ} J_r}{\bar{U}_{FH} I_{HJ} r_c} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

S_{IW-F} ——发射换能器 F 的混响声场声功率发送电流响应；

S_{IW-H} ——发射换能器 H 的混响声场声功率发送电流响应。

4.2 校准条件

4.2.1 对混响水池的要求

混响水池应满足以下条件：

- 为判定混响水池尺寸是否符合要求，应首先确定混响水池的下限工作频率，见公式（5）。混响水池尺寸应能覆盖测量所需的频率范围；
- 水池体积应大于待测声源体积的 100 倍；
- 水池三边长度互质，对角线的最大值不应大于 $1.9V^{1/3}$ ；
- 混响水池壁面的反射主要影响混响测试区域的大小和声场的均匀性，因此池壁要选用坚硬、光滑的材料，壁面的无规入射反射系数不小于 0.8；
- 壁面和底面应具有一定的厚度或足够的隔振隔声结构，避免外部振动及噪声的干扰；

- f) 水池应具备足够低的背景噪声。即在所有水听器位置或行进路程上,在所需考虑频率范围内所有频带的背景噪声级比被测声源的声压级至少低 10dB。

4.2.2 水声换能器的准备

水声换能器校准前的准备工作:

- 在校准前应使用清洁剂将水声换能器表面清洗干净,浸泡在水中半小时以上,使水声换能器表面充分湿润,不附有气泡并与环境温度、压力达到平衡;
- 水声换能器采用细线或弹性支架等方式悬挂,以避免由于支架引起的结构噪声等对测量结果的影响;
- 检查并排除静电干扰和电磁干扰。

4.2.3 水声换能器布放要求

水声换能器按图 2 布放。在校准测量过程中发射换能器和水听器要进行随机扫描操作,按如下要求:

- 发射换能器和水听器之间的最短距离应大于混响半径的 4 倍;
- 发射换能器和水听器距离池壁、水面的最短距离应大于下限频率对应波长的 $1/4$ ($d=\lambda_s/4$)。

4.2.4 混响声场的有效性验证

根据布放要求,发射换能器随机扫描并稳定地辐射声信号,水听器同步随机扫描并接收声信号,空间平均均方根声压的测量不确定度不超过 0.5dB。

4.2.5 水声换能器线性范围验证

水声换能器的线性范围是其输入量与输出量之比保持不变时输入量变化的范围,其验证方法是,对于发射换能器而言,用输入电流与空间平均均方根声压之比表示。对于水听器而言,是空间平均均方根声压与其平均开路电压之比。测定发射换能器和水听器的转移电阻抗不随输入电流变化的范围。确定线性范围的判据:在测量范围内,电转移阻抗模的变化当频率低于 100kHz 时应小于 0.2dB。

4.2.6 互易换能器互易性验证

互易换能器的互易性的检验就是看其线性范围内是否遵守电声互易原理,其验证方法是,测定的换能器对 (F-H) 的转移电阻抗 $|z_{FH}|$ 和 $|z_{HF}|$ 相等的范围。换能器的互易性的判据为:此两值之差当频率低于 100kHz 时应小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。

4.3 校准方法

4.3.1 水声换能器混响声场互易校准装置

水声换能器混响声场互易校准装置组成示意图如图 3 所示,校准装置包括信号发生器、功率放大器、电流变换器、发射换能器、水听器、信号采集器和计算机等。

互易法校准时发射换能器和水听器做随机扫描,信号采集器同步测量并记录。需要测量的电学量有:互易换能器和水听器开路电压、发射换能器和互易换能器的输入电流。水声换能器混响声场互易校准方法示例参见附录 A。

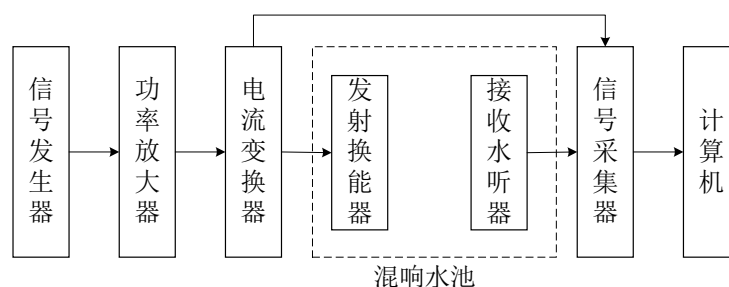


图 3 水声换能器混响声场互易校准装置组成示意图

4.3.2 测量信号类型和频率

水声换能器混响声场校准可用单频连续信号或一定带宽的随机噪声信号。校准时的频率间隔应小于 1/3 倍频程，在发射换能器的共振峰附近，其频率间隔可以更小一些，能获得精细的幅频特性。

4.3.3 随机扫描操作

随机扫描操作方法：发射换能器和水听器同步进行无规则随机路径扫描。在扫描过程中，发射换能器稳定地辐射声信号，数据采集器测量并记录发射换能器的输入电流和水听器的开路电压。

在测量过程中，扫描路径大于最低频率对应波长的 2 倍，建议测量时长不少于 120s。

4.3.4 开路电压的测量

水听器开路电压的测量应在水听器电缆末端进行。在随机扫描测量过程中，测量仪器连续测量互易换能器或水听器的开路电压时域信号，根据公式（6）计算水听器的平均开路电压。

4.3.5 输入电流的测量

在随机扫描测量过程中，发射换能器的输入电流是与水听器的开路电压同步测量的。

测量发射换能器的输入电流通常有两种方法：用电流变换器测量或者是在发射换能器的低电位端串联一个标准电阻器，测量标准电阻上的电压，得到发射换能器的输入电流。

4.3.6 其他测量要求

测量过程中还应注意以下问题。

——防止电干扰。采用本校准测量仪器采集时域信号，如果存在由电串扰带来的干扰，应通过采取适当的接地措施降低影响。

——在校准测量频率范围内，信噪比宜大于 20dB。

4.4 校准不确定度

互易法校准中的不确定度来源可分两部分：A 类不确定度和 B 类不确定度。校准不确定度则为两部分不确定度分量的合成不确定度。

A 类不确定度是由测试中某些不明的偶然因素造成的，此类不确定度服从统计规律，因而可用多次测量来减小。

B 类不确定度是由于测试设备的准确度，测试环境的影响，校准时所要求的条件如混响声场，换能器的线性、互易性等的不满足程度所引起。此类不确定度一般可通过提高测试设备的准确度，改善测试环境和条件来减小。

当按要求进行校准时，水声换能器的混响声场互易法校准的测量不确定度小于 2.0dB（包含因子取 $k_p=2$ ）。

5 混响声场比较法校准

5.1 水听器混响声场灵敏度的校准

水听器的混响声场比较法校准是二级校准，混响声场比较法校准频率范围与互易法相同。

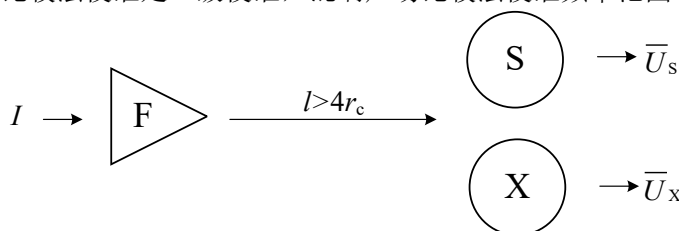


图 4 水听器混响声场灵敏度比较法校准示意图

水听器混响声场灵敏度比较法校准是将被校水听器 (X) 和一个已校好灵敏度的标准水听器 (S)，同时放入混响水池的混响控制区中。发射换能器 (F) 辐射声信号，采用随机扫描操作，并且确保被校水听器和标准水听器之间的距离不小于下限频率对应波长的1/4，同步测量这两个水听器的平均开路电压。被校水听器的混响声场电压灵敏度为：

$$M_x = \frac{\bar{U}_x M_s}{\bar{U}_s} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

\bar{U}_x ——被校水听器的平均开路电压，单位为伏 (V)；

\bar{U}_s ——标准水听器的平均开路电压，单位为伏 (V)；

M_x ——被校水听器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕 (V/Pa)；

M_s ——标准水听器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕 (V/Pa)。

灵敏度的校准亦可以采用两步置换的方式，将被校水听器和标准水听器先后放入混响声场中的混响控制区进行校准，校准必须保持置换前后发射端的工作状态不变。

5.2 发射换能器的混响声场声功率发送电压（电流）响应的校准

混响声场中发射换能器的校准是利用标准水听器来完成的，把发射换能器放入混响声场中，利用一个已知灵敏度的标准水听器 (S)，采用随机扫描操作，测量加在发射换能器两段的输入电压（电流）和标准水听器的平均开路电压，则发射换能器的混响声场声功率发送电压（电流）响应为：

$$S_{vw} = \frac{\bar{U}_s^2 R}{M_s^2 U \rho_0 c_0} \dots\dots\dots (26)$$

$$S_{iw} = \frac{\bar{U}_s^2 R}{M_s^2 I \rho_0 c_0} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

S_{vw} ——发射换能器的混响声场声功率发送电压响应，单位为瓦每伏 (W/V)；

S_{iw} ——发射换能器的混响声场声功率发送电流响应，单位为瓦每安 (W/A)；

M_s ——标准水听器的混响声场电压灵敏度，单位为伏每帕 (V/Pa)；

\bar{U}_s ——标准水听器的平均开路电压，单位为伏 (V)；

U ——发射换能器的输入电压，单位为伏 (V)；

I ——发射换能器的输入电流，单位为安 (A)。

5.3 校准不确定度

比较法校准的不确定度来源与互易法校准相同（见 4.4）。当按要求进行时，水声换能器的混响声场比较法校准的测量不确定度小于 3.0dB（包含因子取 $k_p=2$ ）。

附录 A

(资料性)

“水声换能器混响声场互易校准方法”示例

A.1 概述

本附录是对某型水听器进行混响声场互易校准，校准频率范围为：2kHz~20kHz。

A.2 校准前的准备

A.2.1 混响水池基本参数

混响水池为长方体结构，尺寸为：长 9.0m、宽 3.2m、水深 1.7m。在室温环境下，取水的密度 $\rho=1.0\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，水中声速 $c=1.5\times 10^3 \text{ m/s}$ 。根据中断声源法测量的 1/3 倍频程中心频率混响时间如表 A.1 所示。

表 A.1 混响水池的混响时间 T_{60}

中心频率 /kHz	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0
混响时间 /ms	457.1	438.8	437.4	443.4	448.7	446.1	450.8	436.3	435.9	436.1	435.3

根据混响时间计算混响水池的混响半径，结果见表 A.2。

表 A.2 混响水池的混响半径 r_c

中心频率 /kHz	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0
混响半径 /m	0.27	0.28	0.28	0.28	0.27	0.28	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28

根据混响时间计算混响水池的混响声场互易常数，结果见表 A.3。

表 A.3 混响水池的混响声场互易常数 J_r

中心频率 /kHz	2.0	2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0
互易常数	2.72	2.22	1.76	1.38	1.10	0.87	0.68	0.56	0.45	0.35	0.28

A.2.2 水声换能器布放

发射换能器和水听器分布放在两个独立区域内，见图 A.1 和图 A.2 所示，采用随机扫描的方式运行。根据水声换能器布放要求和随机扫描操作的要求，将发射换能器和水听器的移动区域范围划分为：发射移动区和混响控制区，二者最小间距为 5m，区域边界距离水池池壁、水面的最短垂直距离为 0.4m。

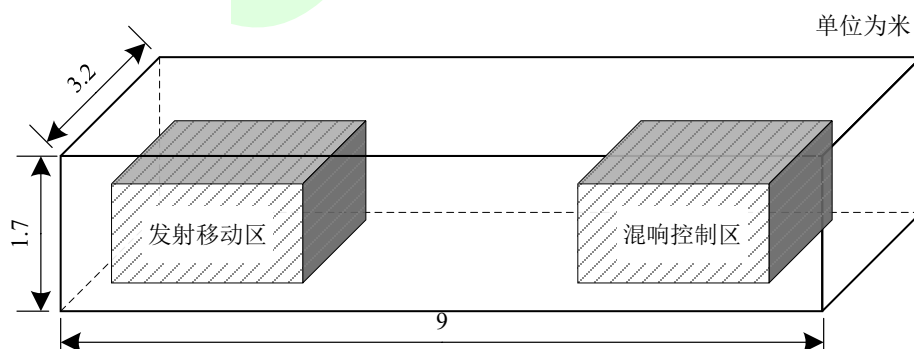


图 A.1 水声换能器布放移动区域示意图

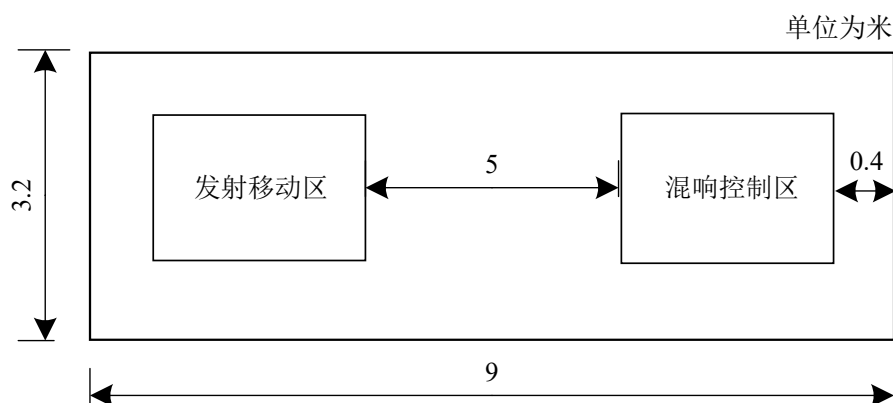


图 A.2 水声换能器布放移动区域俯视图

A. 2.3 混响声场的验证

发射换能器发出宽带平稳随机白噪声信号，水听器随机缓慢扫描，扫描时长为 120s。用 6 次独立重复测量的空间平均声压级进行标准不确定度的 A 类评定，测量不确定度小于 0.5dB。

A. 2.4 水声换能器线性范围的验证

采用调节功率放大器输出功率增益的方式，在动态范围内验证 F-J 换能器对的转移电阻抗，在校准频段内，最大线性误差 0.2dB。

A. 2.5 互易换能器互易性的验证

将发射换能器、互易换能器组成互为发射换能器—水听器对，测量转移电阻抗 $|z_{FH}|$ 和 $|z_{HF}|$ 相等的范围，二者之差小于 0.3dB。

A. 3 校准测量

发射换能器发出 2kHz~20kHz 低频宽带白噪声信号，发射换能器输入端的电流采用间接法测量，在功率放大器的输出端与发射换能器的输入端之间的低电位上串联一个 1Ω 标准电阻，标准电阻的准确度优于 0.1%，采用动态信号分析仪测量电阻两端电压，即得到发射换能器的输入电流。水听器两端输出电压直接由动态数据分析仪测量。

按照校准原理的三步测量操作，根据随机扫描操作分别测量：发射换能器与互易换能器组合时：测量水听器的输出电压 \bar{U}_{FJ} ；发射换能器与互易换能器组合时，测量互易换能器的输出电压 \bar{U}_{FH} ；互易换能器与水听器组合时：测量互易换能器的输入电流 I_{HF} ，水听器平均输出电压 \bar{U}_{HF} 。

A. 4 校准测量结果

遵照本文件，在混响水池中对发射换能器、互易换能器和水听器进行混响法互易校准。发射换能器混响声场声功率发送电流响应级和水听器的电压灵敏度级如图 A.3 和图 A.4。

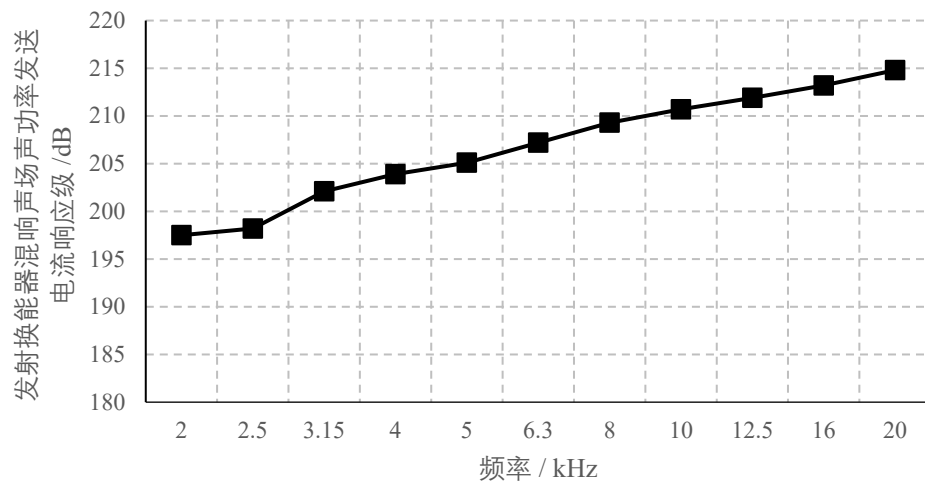


图 A.3 发射换能器的混响声场声功率发送电流响应互易校准结果

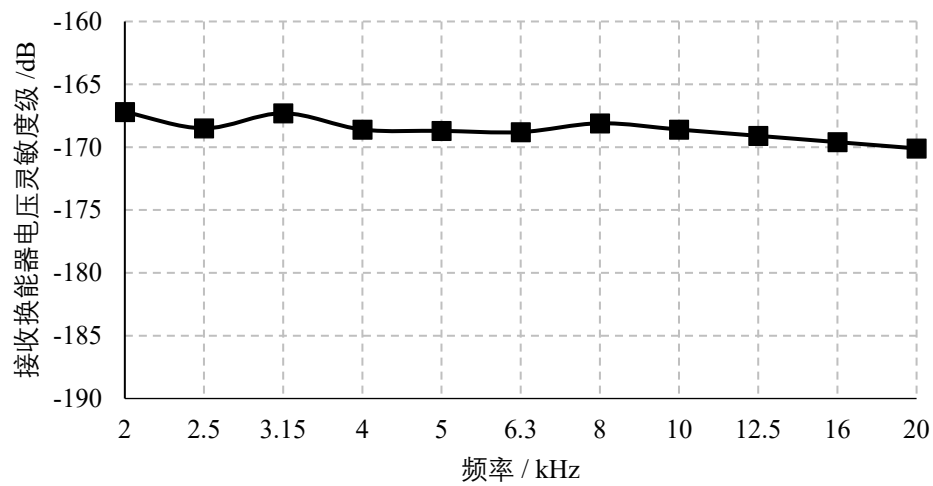


图 A.4 水听器的混响声场电压灵敏度互易校准结果

附录 B

(资料性)

混响声场互易法校准结果不确定度分析

B.1 概述

对混响声场互易法校准标准水听器电压灵敏度级的测量不确定进行分析。

B.2 电压灵敏度测量的不确定度评定

B.2.1 数学模型

根据公式(8)、公式(15)和公式(24)，标准水听器的电压灵敏度级可写作：

$$L_M = 10 \lg \bar{U}_{FJ} + 10 \lg \bar{U}_{HJ} - 10 \lg \bar{U}_{FH} - 10 \lg I_{HJ} + 10 \lg r_c - 10 \lg \rho - 10 \lg f - 112 \dots \dots \dots (B.1)$$

B.2.2 标准不确定度的A类评定

标准不确定度的 A 类不确定度评定一般是通过对样本 x_i 进行独立的 n 次独立测量，以测量平均值的实验标准偏差作为标准不确定度的 A 类不确定度分量，通过公式 (E.1) 计算被测参数的标准不确定度的 A 类测量不确定度 μ_A ：

$$u_A = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \dots \dots \dots (B.2)$$

A 类标准不确定度主要来源于测量的重复性，根据上述校准操作进行 6 次独立重复测量，水听器灵敏度级的测量标准差，见表 A.1。

表 A.1 水听器电压灵敏度级测量 A 类不确定度

f / kHz	2	2.56	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20
u_A / dB	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.17	0.17	0.14	0.16	0.15	0.15

标准测量不确定度的 A 类评定为 0.17dB。

B.2.3 标准不确定度的B类评定

根据公式 (B.1) 计算水听器电压灵敏度级不确定度的各分量灵敏度系数：

$$c(\bar{U}_{FJ}) = \frac{\partial L_M}{\partial (\bar{U}_{FJ})} = \frac{10}{U_{FJ}} \lg e \dots \dots \dots (B.3)$$

$$c(\bar{U}_{HJ}) = \frac{\partial L_M}{\partial (\bar{U}_{HJ})} = \frac{10}{U_{HJ}} \lg e \dots \dots \dots (B.4)$$

$$c(\bar{U}_{FH}) = \frac{\partial L_M}{\partial (\bar{U}_{FH})} = -\frac{10}{U_{FH}} \lg e \dots \dots \dots (B.5)$$

$$c(I_{FJ}) = \frac{\partial L_M}{\partial (I_{FJ})} = -\frac{10}{I_{FJ}} \lg e \dots \dots \dots (B.6)$$

$$c(r_c) = \frac{\partial L_M}{\partial (r_c)} = -\frac{10}{r_c} \lg e \dots \dots \dots (B.7)$$

水听器电压灵敏度的 B 类不确定度的分量主要来源于：

- a) 混响声场测量的不均匀引入的不确定度分量。混响声场空间平均测量的不均匀性应超过 $\pm 0.50\text{dB}$ ，以正态分布考虑，包含因子取 $k_p=1.96$ ，则混响声场测量不均匀引起的不确定度分量为

$$u_f = 0.50/1.96 = 0.2551\text{dB}$$

- b) 互易换能器的互易性偏差引入的不确定分量。互易换能器的互易性偏差不应超过 $\pm 0.10\text{dB}$ ，以均匀分布考虑，包含因子取 $k_p = \sqrt{3}$ ，则互易换能器的互易性偏差引入的不确定分量为

$$u_H = 0.10/\sqrt{3} = 0.058\text{dB}$$

- c) 电压 \bar{U}_{F1} 的测量不确定度分量。电压的测量不确定度是因电压读数误差而引入。数据采集器的测量相对误差不应超过 $\pm 1.0\%$ ，以均匀分布考虑，包含因子取 $k_p = \sqrt{3}$ ，则电压 \bar{U}_{F1} 的测量不确定度分量为

$$u_{\bar{U}_{F1}} = c(\bar{U}_{F1}) \cdot u(\bar{U}_{F1}) = \frac{10}{\bar{U}_{F1}} \lg e \cdot \frac{\bar{U}_{F1} \cdot 1\%}{\sqrt{3}} = 0.025\text{dB}$$

- d) 电压 \bar{U}_{W1} 的测量不确定度分量，计算方法与电压 \bar{U}_{F1} 相同，写作：

$$u_{\bar{U}_{W1}} = c(\bar{U}_{W1}) \cdot u(\bar{U}_{W1}) = 0.025\text{dB}$$

- e) 电压 \bar{U}_{F11} 的测量不确定度分量，计算方法与电压 \bar{U}_{F1} 相同，写作：

$$u_{\bar{U}_{F11}} = c(\bar{U}_{F11}) \cdot u(\bar{U}_{F11}) = -0.025\text{dB}$$

- f) 电流 I_{F1} 的测量不确定度分量。电流的测量不确定度是因电流读数误差而引入。信号采集器的测量电流变换器示数相对误差不应超过 $\pm 2.0\%$ ，以均匀分布考虑，包含因子取 $k_p = \sqrt{3}$ ，则电流 I_{F1} 读数误差引入的不确定分量为

$$u_{I_{F1}} = c(I_{F1}) \cdot u(I_{F1}) = \frac{10}{U_{F1}} \lg e \cdot \frac{\bar{U}_{F1} \cdot 2\%}{\sqrt{3}} = -0.050\text{dB}$$

- g) 混响半径 r_c 测量误差引入的不确定度分量。混响半径引入的测量误差不应超过 $\pm 0.20\text{dB}$ ，以正态分布考虑，包含因子取 $k_p = 1.96$ ，则水的密度值引入的不确定分量为：

$$u_{r_c} = 0.20/1.96 = 0.1020\text{dB}$$

- h) 水中声速误差引入的不确定度分量。查询手册，水中声速值引入的测量误差不应超过 $\pm 0.15\text{dB}$ ，以均匀分布考虑，包含因子取 $k_p = \sqrt{3}$ ，则水的密度值引入的不确定分量为：

$$u_c = 0.15/\sqrt{3} = 0.087\text{dB}$$

- i) 水的密度误差引入的不确定度分量。查询手册，水的密度值引入的测量误差不应超过 $\pm 0.10\text{dB}$ ，以均匀分布考虑，包含因子取 $k_p = \sqrt{3}$ ，则水中声速值引入的不确定分量为：

$$u_p = 0.10/\sqrt{3} = 0.058\text{dB}$$

- j) 换能器辐射信号频率引入的不确定度分量。对于连续信号，换能器辐射信号的频率指示误差引入的不确定度认为可忽略不计；

- k) 信噪比引入的不确定度分量。校准要求信噪比大于 20dB ，信噪比引入的不确定度认为可忽略不计；

综合以上不确定度分量，B 类标准不确定分量为：

$$u_B = (u_f^2 + u_H^2 + u_{\bar{U}_{F1}}^2 + u_{\bar{U}_{W1}}^2 + u_{\bar{U}_{F11}}^2 + u_{I_{F1}}^2 + u_{r_c}^2 + u_c^2 + u_p^2)^{1/2} = 0.307\text{dB}$$

B.2.4 合成不确定度

合成标准不确定度为：

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.35\text{dB} \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

B.2.5 拓展不确定度

扩展不确定度，取包含因子 $k_p=2$ ，则电压灵敏度测量的拓展不确定度为：

$$U = k_p \cdot u_c = 0.7\text{dB} \dots\dots\dots (\text{B.9})$$



参 考 文 献

- [1] IEC 60565-1-2020 Underwater acoustics—Hydrophones—Calibration of hydrophones—Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones
- [2] Diestel, H. G. Reciprocity Calibration of Microphones in a Diffuse Sound Field. *J. Acoust. Soc. Am.*, 33(4): 514-518, 1961.
- [3] Hill, Eric. A reciprocity technique for estimating the diffuse-field sensitivity of piezoelectric transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 67: 666-672, 1980.
- [4] Barrera-Figueroa, S. Rasmussen, K. et al. A note on determination of the diffuse-field sensitivity of microphones using the reciprocity technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(3): 1505-1512, 2008.
- [5] 尚大晶. 水下复杂声源的混响法测量技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [6] B. Milhomem TA, et al. Diffuse-field reciprocity calibration of half-inch laboratory standard microphones using simultaneous reverberation time measurement. *J. Acoust. Soc. Am.*, 143(6): 3658-3664, 2018.
- [7] LI Qi, et al. Source spatial averaging for the sensitivity measurement of multiple hydrophones in a tank *Applied Acoustics*, 172, 2020.