

团 体 标 准

T/SASC 04001-2024

混响声场测定水下声源辐射声功率

Determination of radiation sound power from underwater sound
sources using the reverberation sound field

(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 测量原理.....	4
5 测量装置和要求.....	5
6 混响水池的声学参数校准.....	6
7 待测声源的安装和运行.....	7
8 水听器阵的安装和运行.....	8
9 水下声源稳态辐射噪声测量.....	9
10 水下声源瞬态声能量测量.....	10
附录 A（资料性）空间平均声压级标准差与空间测点数的关系.....	11
附录 B（规范性）混响水池混响时间的测量方法.....	12
附录 C（资料性）“混响法测定水下声源中低频辐射声功率”示例.....	13
附录 D（资料性）“混响法测定水下声源中高频辐射声功率”示例.....	15
附录 E（资料性）测量不确定度分析和验证.....	17
附录 F（资料性）测量不确定度分析示例.....	23
附录 G（资料性）“混响法测定电火花瞬态声源辐射声能量”示例.....	25
参考文献.....	27

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。



混响声场测定水下声源辐射声功率

1 范围

本文件给出了水下声源辐射声功率的混响声场测量方法,以及相应的测量原理、测量条件及测量装置。

本文件适用于水下声源稳态辐射声功率和瞬态辐射声能量的测量,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。

按照本文件规定的安装要求和规则,可以测得 1 级准确度的水下声源辐射声功率。

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 6881.1-2002 声学 声压法测定噪声源声功率级混响室精密法

GB/T 6881.2-2017 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 混响场内小型可移动声源工程法
硬壁测试室比较法

GB/T 4128-1995 声学 标准水听器

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

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]

3.2

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]

3.3

稳态声 steady sound

处于稳定状态、统计特性不随时间变化的声波。

3.4

瞬态声 transient sound

持续时间短、有明显的开端和结束的声波。

示例:机器部件受瞬时冲击形成的撞击声、爆破声等。

3.5

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]

3.6

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，定义为：

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

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。

3.7

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 ）。

3.8

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（ Pa^2 ）；

V ——体积，单位为立方米（ m^3 ）。

注：空间平均均方声压，单位为帕方（ Pa^2 ）。

3.9

空间平均声压级 space-averaged sound pressure level

 $L_{(p)}$

空间平均均方声压的量值与声压基准值平方之比取以 10 为底的对数乘以 10，见公式（3）。

$$L_{(p)} = 10 \lg \left(\frac{\langle \overline{p^2} \rangle}{p_{\text{ref}}^2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

注：空间平均声压级，单位为分贝（dB）。通常，声压基准值取 $p_{\text{ref}} = 1\mu Pa$ 。

3.10

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 6881.1-2002]

3.11 声源辐射声功率 sound power radiated by sound source

W

声源在单位时间内辐射的总声能。

注: 声源辐射声功率, 单位为瓦 (W)。

3.12 辐射声功率级 radiated sound power level

L_W

声源辐射声功率与声功率基准值之比取以 10 为底的对数的 10 倍。

注: 辐射声功率级, 单位为分贝 (dB), 声功率基准值取 $W_{\text{ref}} = 0.67 \times 10^{-18} \text{W}$ 。

3.13 声能量 sound energy

E

声功率 W 在一定持续时间段 T (起始于 t_1 , 终止于 t_2) 的积分, 见公式 (4)。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} W(t) dt \dots \dots \dots (4)$$

注1: 声能量, 单位为焦耳 (J)。

注2: 该量特别适用于非稳态的、间歇的声。

[来源: GB/T 6881.2-2017]

3.14 声能量级 sound energy level

L_E

声能量 E 与基准声能量 E_0 之比, 取以 10 为底的对数的 10 倍, 见公式 (5)。

$$L_E = 10 \lg \left(\frac{E}{E_0} \right) \dots \dots \dots (5)$$

注: 声能量级, 单位为分贝 (dB)。通常声能量基准值取 $E_0 = 0.67 \times 10^{-18} \text{J}$ 。

[来源: GB/T 6881.2-2017]

3.15 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, 见公式 (6)。

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{QR}{\pi}} \dots \dots \dots (6)$$

式中:

Q ——声源的指向性因数。

R ——混响水池常数, 单位平方米 (m^2)。

注: 混响半径, 单位为米 (m)。

[来源: GB/T 3947-1996, 12.24, 有修改]

3.16 混响水池的下限频率 cut-off frequency of a reverberation water tank

f_s

满足混响条件的测量最低频率，见公式（7）。

$$f_s = 0.33 \sqrt{\frac{T_{60} c^3}{V}} \dots\dots\dots (7)$$

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 ——混响水池体积，单位为立方米（m³）。

4 测量原理

4.1 稳态声测量

在混响水池中，声源稳定地辐射声波，声波不断被边界反射而充满整个空间。当声源辐射与混响水池壁面吸收达到平衡时，混响水池内的声场处于稳定状态，形成了稳定混响声场。声源辐射声功率与空间平均均方声压的关系见公式（8）。

$$\langle p^2 \rangle = \frac{4\rho cW}{R} \dots\dots\dots (8)$$

式中，

- $\langle p^2 \rangle$ ——空间平均均方声压，单位为二次方帕（Pa²）；
- ρ ——水的密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
- W ——声源辐射声功率，单位为瓦（W）；
- R ——混响水池常数，单位为平方米（m²）。

声源辐射声功率级与空间平均声压级之间的关系见公式（9）。

$$L_W = L_{(p)} + 10 \lg \left(\frac{R}{4} \right) \dots\dots\dots (9)$$

混响法测定水下稳态声源辐射声功率的基本原理：混响水池中只有待测声源发声，根据混响水池的声学参数并通过测量 $L_{(p)}$ 而得到声源辐射声功率级。

4.2 瞬态声测量

混响水池中测点的瞬态声信号自相关函数见公式（10）。

$$R_c(\tau) = \int_0^T p(t)p^*(t-\tau) dt \dots\dots\dots (10)$$

式中，

- $R_c(\tau)$ ——混响水池中测点的瞬态声信号的自相关函数，单位为二次方帕（Pa²）；
- T ——混响水池中瞬态声信号采样时间长度，单位为秒（s）；
- τ ——时延。

$R_c(0)$ 即为混响水池中测点瞬态声信号的总能量，用 E_n 表示。通过测点位置的空间平均，得公式（11）。

$$\langle E \rangle = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} E_n \dots\dots\dots (11)$$

式中，

- E_n ——混响水池中测点的瞬态声信号的总能量，单位为焦（J）；
- $\langle E \rangle$ ——混响水池中瞬态声信号的空间平均总能量，单位为焦（J）；
- N_0 ——水听器测点数。

将混响水池中瞬态声信号的空间平均总能量转化为瞬态声能量，见公式（12）。

$$E_T = \frac{\langle E \rangle R}{\rho c^4} \dots \dots \dots (12)$$

式中, E_T 为瞬态声能量, 单位为焦 (J)。

则混响水池瞬态声能量级见公式 (13)。

$$L_{E_T} = 10 \lg \langle E \rangle + 10 \lg \left(\frac{R}{4} \right) + 120 \dots \dots \dots (13)$$

式中, L_{E_T} 为混响水池瞬态声能量级, 单位为分贝 (dB)。

5 测量装置和要求

5.1 测量装置

水下声源辐射声功率的混响法测量装置组成如图 1 所示。测量系统的构成为混响水池、水听器或水听器阵、信号调理器、信号采集器和计算机。

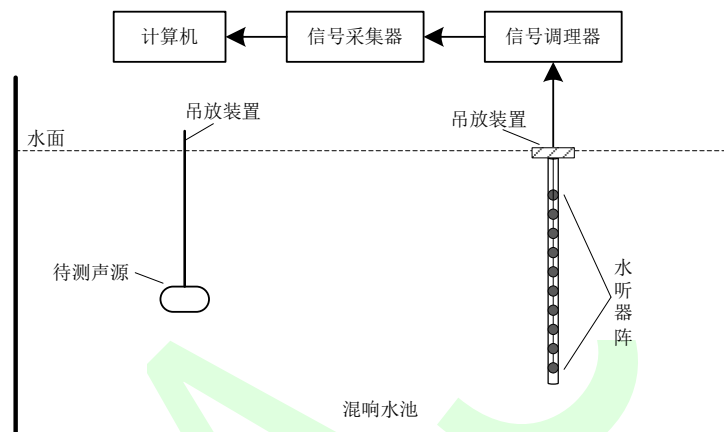


图 1 混响法水下声源辐射声功率测量装置框图

待测声源安放到特定位置, 水听器采集记录混响水池内不同位置处的声压, 单水听器或水听器线阵采用空间扫描方式采集记录不同位置声压, 水听器体积阵测量则不需要空间扫描, 直接测量记录水听器所在位置的声压。

5.2 对混响水池的声学要求

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 (7)。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 $1.9l^{1/3}$;
- 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;
- 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。

5.3 对水听器或水听器阵的要求

具体指标如下。

- 使用无指向性的水听器或水听器阵列, 水听器指向性图与理想的全指向性图的偏差应小于 $\pm 1.5\text{dB}$ (指向性起伏不大于 2.0dB);
- 在测量频率范围内, 水听器灵敏度应大于 -205.0dB , 频响起伏不均匀性应不大于 $\pm 2.0\text{dB}$;

- c) 测量水听器灵敏度的标准测量不确定度应不大于 1.0dB;
- d) 所有测量水听器的幅值灵敏度不一致性应不大于 2.0dB;
- e) 其它电声性能应符合 GB/T4128-1995 的有关规定;
- f) 水听器阵的阵元间距应不大于 $\lambda_s/4$;
- g) 体积阵阵元数目大于 128。

5.4 对电子测量仪器的要求

电子测量仪器工作频率范围应不小于待测声源所考虑的频率范围，应满足下列要求。

- a) 信号调理器：具备信号匹配放大和滤波功能，输入阻抗大于水听器输出等效阻抗的 100 倍，增益误差不超过 $\pm 0.1\text{dB}$ ，滤波频带宽度任意连续可调；
- b) 信号采集器：可使用各种类型具有高保真地采集并存储电压信号波形的数字信号波形采集器或者频谱分析仪，数据采样率应为所需考虑的最高分析频率的 2 倍以上，模数转换字节位数至少为 12 位，电压测量范围下限不大于 1mV，上限不小于 1V，数据记录长度可按实际要求确定，一般不少于 120s，电压测量最大允许误差不超过 $\pm 0.6\%$ ；
- c) 建议使用计算机进行测量控制，计算机通过运行适当的软件控制信号采集、数据的处理和保存；
- d) 供电系统应强弱电分离、接大地避免电干扰，检查并排除静电干扰和电磁干扰。

5.5 对吊装设备的要求

用于固定或运行待测声源或水听器阵的吊放设备，应满足下列要求。

- a) 待测声源的吊装设备应具有升降、平移和旋转功能。吊装设备的平移速度可调；吊装设备的旋转速度可调；
- b) 用于固定和运行水听器阵的吊放设备，应保持工作稳定；应具有空间扫描移动功能。

6 混响水池的声学参数校准

6.1 参数的确定

混响水池的校准是为了获取混响水池的声学特性参数，确定混响水池的适用频率范围，划分混响声场的区域范围，用于布放水听器阵；获得混响水池常数。校准包括了声场的基本声学参数和测试条件参数。

混响水池的声学特性参数包括背景噪声、混响时间、混响水池常数。当混响水池的声学特性未知的时候，需要先对混响水池进行校准。

背景噪声是指待测声源不工作时测量系统的输出。

混响时间的测量方法可参见附录 B，校准混响水池适用频率范围内的各个频段的混响时间，混响时间的测量不确定度不大于百分之一。

混响水池的下限频率，见公式 (7)。

混响水池的适用上限频率主要与声吸收有关，在测试频率范围内声吸收可忽略，而主要考虑壁面吸收，壁面吸声系数随频率升高而增加可能导致混响水池内的声能降低。

6.2 混响声场空间范围的界定

根据预先校准过的混响水池声学参数，确定混响声场空间范围，见图 2。按照以下要求进行划分。

- a) 混响声场与声源的最短距离大于混响半径的 2 倍，其中混响水池常数 R 的表达式见公式 (14)；

$$R = S \left[\exp \left(\frac{55.2V}{T_{60}Sc} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (14)$$

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)；

S ——混响水池总面积，单位为平方米 (m²)；

V ——混响水池体积，单位为立方米 (m³)。

- b) 混响声场与池壁、池底、水面的最短距离 d 应大于下限频率对应波长的 1/4；

c) 混响声场空间范围尽可能的大。

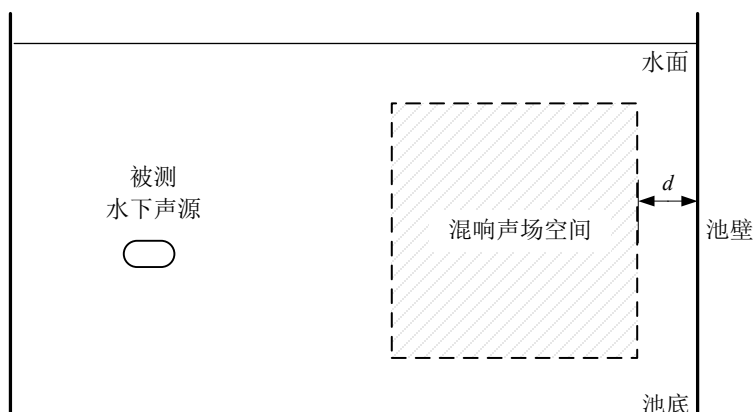


图 2 混响声场空间范围示意图

6.3 混响水池常数的测量

混响水池常数是混响水池声场的固有声学属性，与混响水池的尺度和壁面材料的吸声性能有关，与声源种类、信号类型无关。混响水池常数的测量方法可采用直接法或间接法。对于宽带信号功率测量可采用直接法，对于窄带或离散信号功率的测量采用间接法。

直接法是根据混响水池的体积、面积和混响时间，根据公式（1）直接计算得到。

间接法是利用一个已知辐射声功率的无指向性标准声源，测量标准声源在混响水池中辐射混响声场的空间平均功率谱密度级。将公式（13）变换为公式（15）可得，

$$R(f) = 10^{0.1[L_W(f) - L_{(p)}(f) + 6]} \dots \dots \dots (15)$$

式中，

$L_W(f)$ ——标准声源辐射声功率的功率谱密度级，单位为分贝（dB）；

$L_{(p)}(f)$ ——标准声源在混响水池中的空间平均声压谱密度级，单位为分贝（dB）。

注：在此处，式中的 L_W 和 $L_{(p)}$ 分别代入标准声源的辐射声功率级和标准声源空间平均声压谱密度级。

利用直接法计算的混响水池常数的频率与混响时间一致，用于宽带噪声测量。利用公式（15）的间接法使用窄带信号测量的混响水池常数，用于水下声源辐射声功率的窄带测量。

7 待测声源的安装和运行

7.1 待测声源的安装要求

待测声源声功率输出与安装条件有关，待测声源的安装应使用或模拟典型的安装条件，避免测试用的吊放装置引起声源声输出的变化，应采取措施减少来自待测声源安装结构的任何声辐射。

安装位置应满足如下要求：

- 待测声源可安装在混响水池中的一个或多个位置；
- 待测声源的安装位置宜选择在靠近混响水池短边的位置，避免安装在混响水池的轴线位置上；
- 待测声源与池壁、池底、水面的最短距离应不小于 d ；对于声源体积非有型的分布式待测声源（例如：射流、降雨），应保证振动或扰动不会引起池壁或池底振动。

7.2 待测声源的运行要求

待测声源的运行应以典型的运行工况。如果有指定的噪声测试运行规范，应按测试规范运行。

声源运行应具有高的可复现性。

对稳态噪声的测量，应保证稳定运行。

待测声源工作过程中应避免引起吊放设备等附加设备的振动或干扰声。

9 水下声源稳态辐射噪声测量

9.1 水下声源稳态辐射噪声测量步骤

水下声源稳态辐射噪声测量步骤如下。

- 测量前完成混响水池校准。
- 按规定要求安装待测声源，安装水听器阵。
- 在规定的测量工况条件下，开启待测声源、让运行达到稳定状态。
- 水听器阵运行，信号采集器同步测量信号。
- 在待测声源的此位置上，每个水听器测点的均方声压在全位置上的平均，见公式（16）；

$$\langle p^2 \rangle_i = \frac{1}{N_o} \sum_{j=1}^{N_o} (p^2)_{ij} \dots\dots\dots (16)$$

式中，

$\langle p^2 \rangle_i$ ——第*i*个声源位置对所有水听器测点的均方声压的平均值，单位为二次方帕（Pa²）；

$(p^2)_{ij}$ ——第*i*个声源位置、第*j*个水听器测点的均方声压，单位为二次方帕（Pa²）；

N_o ——水听器测量位置点数。

- 待测声源至少更换 5 个安装位置，且任意位置间距不小于测量下限频率对应波长的 1/4，重复步骤 e)，对于不易移动的声源可根据情况少更换或不更换安装位置；
- 完成以上声源位置的测量，取所有声源位置上均方声压的平均值，再取分贝平均，见公式（17），空间平均声压级的标准偏差应优于 0.5dB；

$$L_{(p)} = 10 \lg \left[\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \langle p^2 \rangle_i \right] + 120 \dots\dots\dots (17)$$

式中，

$L_{(p)}$ ——空间平均声压级，单位为分贝（dB）；

N_s ——待测声源位置数。

- 根据测量原理，将公式（17）空间平均声压级，代入到公式（9）计算待测声源的辐射声功率级。也可根据需要计算水下声源在各个频带的辐射声功率级。

注1：当背景噪声不能忽略时，为了减少背景噪声对测量的影响，对测量结果进行修正，修正方法为在测量值基础上减去修正值，参考GB 5265-2009。

注2：注明频带宽度。

9.2 稳态声功率谱计算

空间平均均方声压功率谱密度表示见公式（18）。

$$\langle S(f) \rangle = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_o} S_{ij}(f) \dots\dots\dots (18)$$

式中，

$\langle S(f) \rangle$ ——空间平均均方声压功率谱密度，单位为瓦每赫兹（W/Hz）；

$S_{ij}(f)$ ——第*i*个声源位置、第*j*个水听器测点的均方声压功率谱密度，单位为瓦每赫兹（W/Hz）；

N_o ——水听器采样位置点数；

N_s ——待测声源位置数。

用分贝表示，见公式（19）。

$$L_{(p)} = 10 \lg \langle S(f) \rangle + 120 \dots\dots\dots (19)$$

式中，

$L_{(p)}$ ——空间平均声压级，单位为分贝（dB）。

空间平均声压级的标准偏差应优于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。

根据 4.1 测量原理，将公式（19）代入到公式（9），可测得待测声源的辐射声功率级。

9.3 水下声源稳态信号的测量不确定度

附录 C 和附录 D 分别给出混响法测定水下声源中低频和中高频段声功率的示例，附录 E 给出测量标准的测量不确定度分析和验证报告。

按要求进行测量时，混响法测量水下声源辐射声功率稳态信号的测量不确定度不大于 2.0dB （包含因子 k_p 取 2）。

9.4 水下声源稳态信号的测量误差分析

水下声源辐射声功率测量不确定度的主要影响因素来自于空间平均声压级，附录 F 给出了测量误差分析示例。

10 水下声源瞬态声能量测量

10.1 水下声源瞬态声能量测量步骤

水下声源瞬态声能量测量步骤可参见附录 G，具体如下：

- a) 测量前完成混响水池校准。
- b) 安装待测声源，安装水听器阵。
- c) 在规定的待测声源测量工况条件下，开启待测声源。
- d) 按照体积阵的运行方式，信号采集器同步测量水听器阵元传输信号。
- e) 在规定的待测声源测量工况条件下，待测声源开启，测量瞬态声。
- f) 截取完整的瞬态声信号。
- g) 用公式（10）~（13）计算可得混响水池瞬态声能量级。

10.2 混响水池瞬态声能量级的测量不确定度

按本文件规定的要求进行测量时，混响法测定混响水池瞬态声能量级的测量不确定度不大于 2.0dB （包含因子 k_p 取 2）。

附 录 A
(资料性)

空间平均声压级标准差与空间测点数的关系

封闭空间的共振模式引起声场空间声能密度的不均匀。任意位置的声能密度正比于该点的均方声压，均方声压服从指数分布。根据大数定理和中心极限定理，声场空间采集点的空间平均均方声压均值的方差随测点数的增加而减少，表 A.1 给出了空间平均声压级的标准差与空间测点数的关系。

表 A.1 空间平均声压级标准差与空间测点数的关系

空间测点数	标准差/dB	空间测点数	标准差/dB
20	0.98	320	0.24
40	0.69	340	0.24
60	0.56	360	0.23
80	0.49	380	0.23
100	0.44	400	0.22
120	0.40	420	0.21
140	0.37	440	0.21
160	0.34	460	0.20
180	0.32	480	0.20
200	0.31	500	0.19
220	0.29	520	0.19
240	0.28	540	0.18
260	0.27	560	0.18
280	0.26	580	0.18
300	0.25	600	0.17

附录 B (规范性) 混响水池混响时间的测量方法

B.1 概述

混响时间的测量一般采用中断声源法或脉冲积分法。在水中不易产生脉冲声信号，附录中主要说明了混响时间的中断声源法，该方法参考了 GB/T 20247-2006 中的第 7 章。

B.2 测量装置

混响时间的测量装置包括：信号发生器、功率放大器、标准声源、水听器、滤波器、信号采集器和计算机等仪器，如图 B.1。标准声源应是全指向性声源，设置不同的声源位置；水听器是全指向性，应设置不同的测点位置。

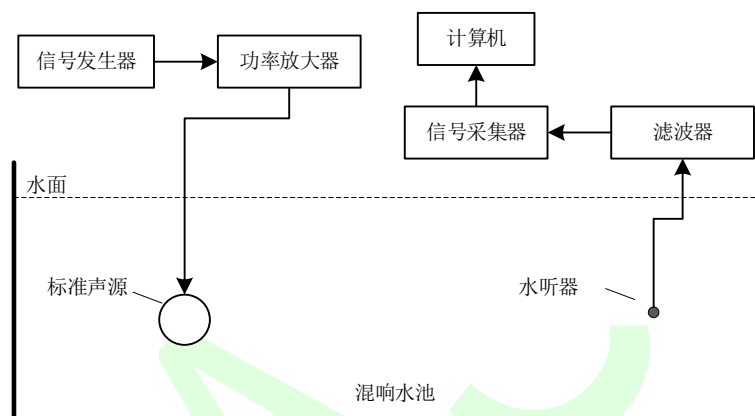


图 B.1 混响水池的混响时间测量装置框图

B.3 测量步骤

混响水池混响时间的测量步骤如下：

- a) 将标准声源放置于混响水池中，与任意壁面或水面的距离都大于下限频率对应波长的 $1/4$ ，且声源应避免放置在混响水池的几何中心或对称轴线上。
- b) 信号发生器产生宽带白噪声或粉红噪声信号，经功率放大器输出到标准声源辐射声波，待形成混响声场后测量，要求信噪比至少 40dB 。
- c) 控制信号发生器中断输出，信号采集器记录声压变化曲线。
- d) 混响时间的测量应至少选择 6 个水听器测点位置，任意两个测点之间的距离大于下限频率对应波长的 $1/4$ ，每个测点与任意边的距离都大于下限频率对应波长的 $1/4$ ，每个测点与标准声源的距离不小于混响半径的 2 倍。
- e) 计算稳态声压级以下 $5\text{dB}\sim 25\text{dB}$ 范围内声压级衰减直线的平均斜率，计算混响时间。
- f) 水听器的测点应做大于 6 次的测量，取平均值。
- g) 声源位置至少要改变 5 次，特殊情况下声源位置可以不变，重复上述测量。
- h) 每个频带内的混响时间至少是 30 个测点的平均值。
- i) 测量结果应注明频率带宽和测量不确定度。

附录 C (资料性)

“混响法测定水下声源中低频辐射声功率”示例

C.1 概述

现要测量一个压电陶瓷换能器的辐射声功率。换能器为直径 0.2m、高度 0.2m 的圆柱型，测试工况为低频宽带白噪声信号在一定电功率驱动下，在 1kHz~10kHz 频率范围内的辐射声功率。遵照本文件，测量该换能器在工作频段内的稳态辐射声功率。

C.2 测量前的准备

- 测量换能器稳态辐射声功率，按照 4.1 稳态声测量原理。
- 选择适合测量频率范围的混响水池：混响水池的适用频率范围应覆盖测试频段，要求混响水池的最小尺度应大于 4.5m，最大尺度应大于 7.5m。现有混响水池长度 15m、宽度 9m、水深 6m，按照满足混响水池的尺度要求，混响水池体积远远大于换能器体积。对混响水池进行校准，测量混响时间、背景噪声和声场的不均匀性。
- 使用一条垂直阵采用空间扫描的方法，水听器阵元间距为 0.4m，阵元个数为 12 个，放置在混响控制区内。
- 安装测量装置，组成测量。

C.3 测量过程

- 将被测换能器置于混响水池中，待测换能器与池壁或水面的距离大于 0.1m，保持静止状态。
- 换能器稳定工作，水听器阵在混响控制区内做空间扫描移动，测量声压信号，在一次测量过程中标准水听器移动速度不超过 0.1m/s，移动的路径应大于测量下限频率对应波长的 2 倍，遍及整个扫描移动区域，采取边采集边扫描移动的方式测量时长为 120s。
- 对采集的数据进行离散功率谱分析，计算空间平均声压级。
- 计算声源辐射声功率级。

C.4 测量结果

给出在测量工况下换能器辐射声功率谱密度级，如图 C.1 所示。

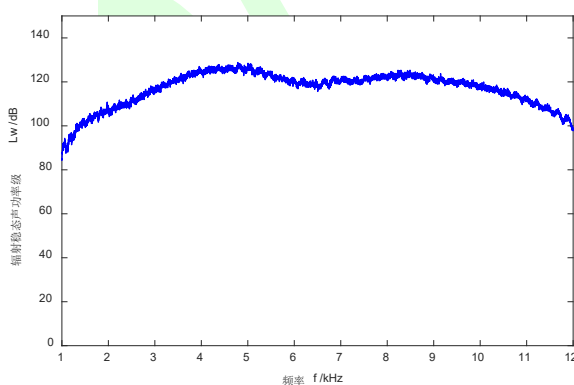


图 C.1 换能器辐射声功率级

保持测量工况不变，进行 6 次独立测量，测量结果进行测量不确定度的 A 类评定，对于离散功率谱的测量不确定度不超过 0.6dB，见图 C.2。

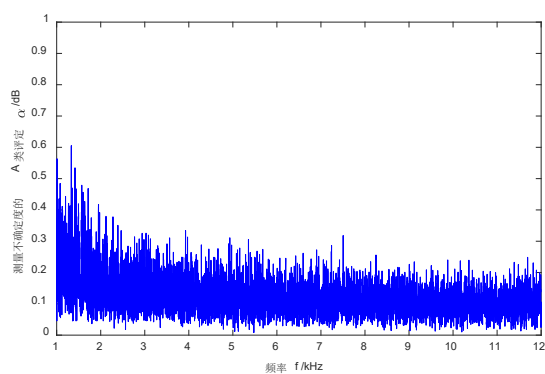


图 C.2 测量不确定度的 A 类评定

仪器测量精度及读数误差、声传播速度误差、水听器灵敏度校准等引起的测量不确定度的 B 类不超过 0.8dB。

合成不确定度评定，不超过 1.0dB。

SASC

附录 D (资料性)

“混响法测定水下声源中高频辐射声功率”示例

D.1 概述

现要测量一个压电陶瓷换能器的辐射声功率。换能器为直径 0.1m 的球型，测试工况为高频宽带白噪声信号在一定电功率驱动下，在 10kHz~50kHz 频率范围内的辐射声功率。遵照本文件，测量该换能器在工作频段内的稳态辐射声功率。

D.2 测量前的准备

- 测量换能器稳态辐射声功率，按照 4.1 稳态声测量原理。
- 选择适合测量频率范围的混响水池：混响水池的适用频率范围应覆盖测试高频频段，要求混响水池体积应尽量小，且边界具有良好反射特性，避免高频声场条件下水介质声吸收引起的声能衰减。现有玻璃边界的混响水池长度 1.5m、宽度 0.7m、水深 0.9m，按照满足混响水池的尺度要求，混响水池体积远远大于换能器体积。对混响水池进行校准，测量混响时间、背景噪声和声场的不均匀性。
- 使用一条垂直阵采用空间扫描的方法，水听器阵元间距为 0.05m，阵元个数为 6 个，放置在混响控制区内。
- 安装测量装置，组成测量系统。

D.3 测量过程

- 将被测换能器置于混响水池中，待测换能器与池壁或水面的距离大于 0.2m，保持静止状态。
- 换能器稳定工作，水听器阵在混响控制区内做空间扫描移动，测量声压信号，在一次测量过程中标准水听器移动速度不超过 0.1m/s，移动的路径应大于测量下限频率对应波长的 2 倍，遍及整个扫描移动区域，采取边采集边扫描移动的方式测量时长为 120s。
- 对采集的数据进行离散功率谱分析，计算空间平均声压级。
- 计算声源高频辐射声功率级。

D.4 测量结果

给出在测量工况下换能器辐射声功率谱密度级，如图 D.1 所示。

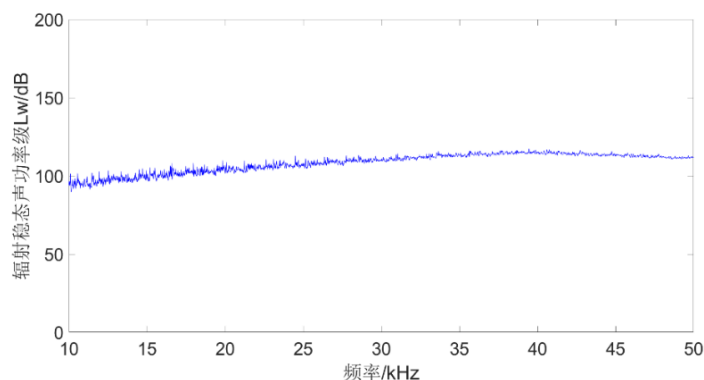


图 D.1 换能器高频辐射声功率级

保持测量工况不变，进行 6 次独立测量，测量结果进行测量不确定度的 A 类评定，对于离散功率谱的测量不确定度不超过 0.66dB，见图 D.2 所示。

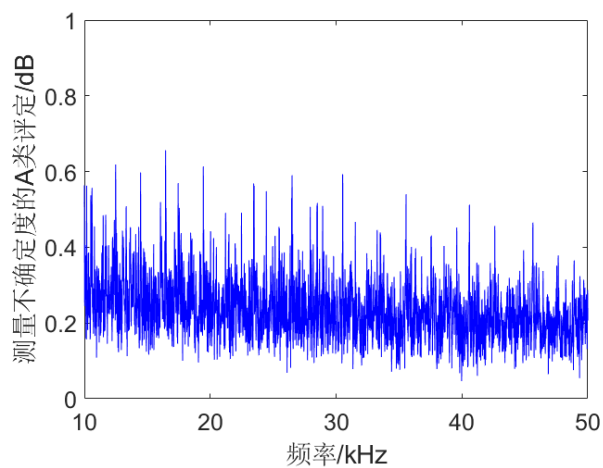


图 D.2 测量不确定度的 A 类评定

仪器测量精度及读数误差、声传播速度误差、水听器灵敏度校准等引起的测量不确定度的 B 类评定不超过 0.80dB。

合成不确定度评定，不超过 1.0dB。

SASC

附录 E

(资料性)

测量不确定度分析和验证

E.1 概述

本附录对混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度进行分析，待测声源选择 UW350 型低频宽带发射换能器，分析频率范围为 315Hz~10kHz。

在混响水池中采用混响法测量了水下声源的辐射声功率，实验的记录如表 E.1 所示。根据水下声源辐射声功率的测量结果进行了不确定度分析，得到合成不确定度如表 E.2 所示，具体计算过程如 E.2。根据不确定测量结果可知：在 315Hz~10kHz 频段，采用混响声场测定水下声源辐射声功率的合成不确定度 u_c 不超过 1.2dB，扩展不确定度不超过 2.3dB ($k_p=2$)。

表 E.1 混响法测定水下声源辐射声功率的实验记录表

测试混响水池:	水声技术重点实验室混响水池 (长15m×宽9.3m×高6.15m)
测试条件:	室温: 25℃, 水温: 18℃, 相对湿度: 56%
日期:	2014年3月3日
测量声源名称:	3829-17k发射换能器
测量频率范围:	315Hz~10kHz
测试内容:	混响法测定水下声源辐射声功率

表 E.2 各项测量不确定度分量

中心频率 /Hz	A类不确定度分量				B类不确定度分量		合成不确定度 u_c /dB	扩展不确定度 ($k_p=2$) U /dB
	混响水池扩散声场不均匀性 $u(x_1)$ /dB	混响声场重复测量 $u(x_2)$ /dB	混响时间测量 $u(x_3)$ /dB	水池体积及表面积测量 $u(x_4)$ /dB	水中声传播速度 $u(x_5)$ /dB	水听器灵敏度校准误差 $u(x_6)$ /dB		
315	1.05	0.04	0.28	0.01	0.03	0.20	1.11	2.22
400	0.39	0.03	0.13	0.01	0.03	0.20	0.46	0.92
500	0.49	0.02	0.27	0.01	0.03	0.20	0.60	1.20
630	0.88	0.07	0.50	0.01	0.03	0.20	1.03	2.06
800	0.90	0.04	0.25	0.01	0.03	0.20	0.96	1.92
1000	0.95	0.03	0.30	0.01	0.03	0.20	1.02	2.04
1250	0.70	0.03	0.36	0.01	0.03	0.20	0.81	1.62
1600	0.49	0.05	0.07	0.01	0.03	0.20	0.54	1.08
2000	0.14	0.03	0.17	0.01	0.03	0.20	0.30	0.60
2500	0.27	0.04	0.21	0.01	0.03	0.20	0.40	0.80
3150	0.13	0.04	0.17	0.01	0.03	0.20	0.30	0.60
4000	0.10	0.06	0.16	0.01	0.03	0.20	0.28	0.56
5000	0.08	0.05	0.15	0.01	0.03	0.20	0.27	0.54
6300	0.05	0.03	0.11	0.01	0.03	0.20	0.24	0.48
8000	0.03	0.04	0.15	0.01	0.03	0.20	0.26	0.52
10000	0.16	0.03	0.13	0.01	0.03	0.20	0.29	0.58

E.2 混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度评定

E.2.1 数学模型

根据公式 (13)，水下声源辐射声功率级写作公式 (E.1)。

$$L_W = 10 \lg \left(\overline{p^2} \right) + 10 \lg R + 114 \dots \dots \dots (E.1)$$

E.2.2 测量不确定度评定

混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度评定分为以下两类：标准不确定度的 A 类评定和标准不确定度的 B 类评定。标准不确定度的 A 类评定是由重复测量引起的，可通过统计的方法进行评定；标准不确定度的 B 类评定是由测量系统本身或测量方法不完善等因素引起的，可通过理论和经验分析的方法进行评定。

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.2) 计算被测参数的标准不确定度的 A 类测量不确定度 u_A ：

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

E.2.3 混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度分量

混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度来源有：

- a) 混响水池扩散声场不均匀性引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 A 类；
- b) 混响水池混响声场重复测量的标准偏差引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 A 类；
- c) 混响水池混响时间测量引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量；
 - 仪器测量精度及读数误差引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 B 类；
 - 混响时间重复测量引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 A 类。
- d) 混响水池体积及表面积测量引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量；
 - 测量混响水池体积引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 A 类；
 - 测量混响水池表面积引起声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 A 类。
- e) 在声源声功率计算中，因水温及水压而对水中声传播速度进行修正而引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量，属 B 类；
- f) 标准器校准水听器所引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量；
 - 水听器校准腔及校准仪器不确定度引起的声源辐射声功率测量的不确定度，属 B 类；
 - 水听器检测装置的不确定性引起的测量结果不确定度，属 B 类。

E.2.4 合成不确定度及不确定度分量的灵敏度系数

由公式 (E.3) 求得合成不确定度，见公式 (E.3)。

$$u_c^2(L_W) = u_{cA}^2(L_W) + u_{cB}^2(L_W) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial L_W}{\partial x_{ij}} \right)^2 u^2(x_{ij}) \dots \dots \dots (E.3)$$

式中：

$u_{cA}^2(L_W)$ ——声功率级 L_W 估计的 A 类不确定度总方差；

$u_{cB}^2(L_W)$ ——声功率级 L_W 估计的 B 类不确定度总方差；

$u^2(x_{ij})$ ——声功率级 L_W 公式（见公式 (9)）中变量 x_i 的方差，可为 A 类或 B 类方差，见 E.2.3 中的分量；

$\frac{\partial L_W}{\partial x_{ij}}$ ——灵敏度系数；

$u_c(L_W)$ ——合成不确定度。

根据 E.2.3 的不确定度分类方法，可求得各分量的灵敏度系数如下。

- a) 混响水池扩散声场不均匀性不确定度分量灵敏度系数为：

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_1} = \frac{\partial L_W}{\partial L_p} = 1 \dots \dots \dots (E.4)$$

- b) 混响水池混响声场重复测量的标准偏差不确定度分量灵敏度系数为：

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_2} = \frac{\partial L_W}{\partial L_p} = 1 \dots \dots \dots (E.5)$$

c) 混响水池混响时间测量分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_{31}} = \frac{\partial L_W}{\partial x_{32}} = \frac{\partial L_W}{\partial T_{60}} = \frac{10}{R \times \ln 10} \frac{\partial R}{\partial T_{60}} \dots\dots\dots (E.6)$$

d) 混响水池体积及表面积测量引起的声源辐射声功率测量的不确定度分量:

——测量水池体积引起的不确定度分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_{41}} = \frac{\partial L_W}{\partial V} = \frac{10}{R \times \ln 10} \frac{\partial R}{\partial V} \dots\dots\dots (E.7)$$

——测量水池表面积引起的不确定度分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_{42}} = \frac{\partial L_W}{\partial S} = \frac{10}{R \times \ln 10} \frac{\partial R}{\partial S} \dots\dots\dots (E.8)$$

f) 因水温及水压而对水的密度和水中声传播速度进行修正而引起的不确定度分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_5} = \frac{\partial L_W}{\partial c} = \frac{10}{R \times \ln 10} \frac{\partial R}{\partial c} \dots\dots\dots (E.9)$$

g) 标准器校准水听器所引起的不确定度分量灵敏度系数。

——水听器校准腔及校准仪器不确定度引起的不确定度分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_{61}} = \frac{\partial L_W}{\partial L_p} = 1 \dots\dots\dots (E.10)$$

——水听器检测装置的不确定性引起的测量结果不确定度分量灵敏度系数为:

$$\frac{\partial L_W}{\partial x_{62}} = \frac{\partial L_W}{\partial L_p} = 1 \dots\dots\dots (E.11)$$

E.2.5 不确定分量的不确定度计算

a) 混响水池扩散声场不均匀性引起的声源辐射声功率测量不确定度

在相同条件下,将接收水听器分别置于5个不同的位置,在混响水池中选取5个不同位置测量 UW350 声源的空间平均声压级数据见表 E.3。

表 E.3 在混响水池中 5 个不同位置测量的空间平均声压级及不确定度

中心频率/Hz	空间平均声压级/dB						不确定度 $\mu(x_1)$ /dB
	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	平均	
315	123.04	123.36	123.79	126.67	128.36	125.05	1.05
400	125.28	125.25	124.98	124.25	126.68	125.29	0.39
500	123.69	124.73	125.56	126.14	123.70	124.76	0.49
630	123.73	127.08	127.16	124.54	122.81	125.06	0.88
800	123.63	124.49	125.32	124.21	120.10	123.55	0.90
1000	127.58	128.55	127.67	126.93	123.12	126.77	0.95
1250	125.36	125.36	126.24	125.75	122.27	124.99	0.70
1600	123.43	123.85	124.42	124.34	121.74	123.56	0.49
2000	123.07	123.16	122.87	123.38	122.54	123.01	0.14
2500	123.46	123.09	121.83	122.82	122.83	122.81	0.27
3150	127.67	127.92	127.57	127.11	127.70	127.59	0.13
4000	118.13	118.44	118.58	118.03	118.34	118.31	0.10
5000	120.86	120.80	120.93	120.50	120.57	120.73	0.08
6300	120.43	120.67	120.45	120.56	120.7	120.56	0.05
8000	121.44	121.54	121.41	121.40	121.44	121.45	0.03
10000	124.72	124.80	124.54	124.44	123.88	124.48	0.16

则标准不确定度为:

$$u(x_1) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{(L_p(i) - \bar{L}_p)^2}{n_1(n_1-1)}}, (n_1 = 5) \dots\dots\dots (E.12)$$

计算结果也如表 E.3。

b) 混响声场重复测量的标准偏差引起的声源辐射声功率测量不确定度

在同等条件下,在同一位置(相同高度及范围的空间平均)重复测量 UW350 声源的辐射声功率 5 次,测量的空间平均声压级数据如表 E.4。按公式 (E.4) 计算的不确定度结果见表 E.4。

表 E.4 在水池中相同位置不同次测量的空间平均声压级及不确定度

中心频率/Hz	空间平均声压级/dB						不确定度 $\mu(x_2)$ /dB
	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	平均	
315	123.82	123.98	123.98	124.05	123.85	123.93	0.04
400	124.95	125.01	125.08	125.15	125.11	125.06	0.03
500	125.65	125.66	125.56	125.69	125.58	125.63	0.02
630	127.00	126.95	127.11	127.07	127.32	127.09	0.07
800	125.24	125.33	125.24	125.14	125.38	125.26	0.04
1000	127.77	127.74	127.69	127.70	127.57	127.69	0.03
1250	126.22	126.31	126.38	126.30	126.21	126.29	0.03
1600	124.52	124.35	124.41	124.66	124.41	124.47	0.05
2000	122.97	122.84	122.86	122.80	122.95	122.88	0.03
2500	121.93	121.78	121.79	121.67	121.77	121.79	0.04
3150	127.43	127.69	127.56	127.60	127.57	127.57	0.04
4000	118.77	118.72	118.61	118.60	118.43	118.63	0.06
5000	120.90	121.05	120.97	121.01	120.77	120.94	0.05
6300	120.49	120.29	120.46	120.42	120.41	120.42	0.03
8000	121.44	121.48	121.48	121.51	121.30	121.44	0.04
10000	124.49	124.54	124.49	124.67	124.51	124.54	0.03

c) 混响水池混响时间不确定性测量引起的声源辐射声功率测量不确定度。

——仪器测量精度及读数误差引起的声源辐射声功率测量的不确定度为:

$$u(x_{31}) = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{ dB}$$

——混响时间重复测量引起的声源辐射声功率测量的不确定度。

在水池中不同位置测量混响时间的不确定性会引起声源辐射声功率测量的不确定度。为此,在水池中选择不同的 5 个位置,分别测量其混响时间,测量结果见表 E.5。按公式 (E.13) 计算混响时间测量的不确定度,如表 E.5 所示。

表 E.5 混响水池中 5 个不同位置测量的混响时间及不确定度

中心频率 / Hz	混响时间/s						不确定度 $\mu(x_{32})$ /dB
	位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	平均	
315	0.21	0.22	0.21	0.17	0.20	0.20	0.01
400	0.24	0.22	0.22	0.23	0.24	0.23	0.01
500	0.26	0.29	0.26	0.29	0.23	0.27	0.01
630	0.31	0.20	0.29	0.30	0.36	0.29	0.03
800	0.37	0.43	0.46	0.37	0.46	0.42	0.02
1000	0.60	0.67	0.68	0.72	0.86	0.71	0.04
1250	0.85	1.09	1.31	0.91	1.12	1.06	0.08
1600	1.31	1.26	1.25	1.22	1.33	1.28	0.02
2000	0.63	0.69	0.76	0.72	0.77	0.71	0.03
2500	0.67	0.54	0.61	0.69	0.62	0.62	0.03
3150	0.28	0.28	0.29	0.25	0.26	0.27	0.01
4000	0.44	0.39	0.41	0.43	0.47	0.43	0.01
5000	0.43	0.42	0.46	0.40	0.39	0.42	0.01
6300	0.30	0.29	0.29	0.27	0.27	0.29	0.01
8000	0.35	0.32	0.31	0.31	0.30	0.32	0.01
10000	0.24	0.21	0.22	0.23	0.22	0.22	0.01

以上两个分量相互独立,则:

$$u(x_3) = \sqrt{\sum \left[\frac{\partial L_W}{\partial x_{3j}} u(x_{3j}) \right]^2} \dots\dots\dots (E.13)$$

按公式 (E.13) 可求得混响时间测量引起的不确定度 $u(x_3)$ 如表 E.6。

表 E.6 混响时间测量不确性引起的辐射声功率测量的不确定度

中心频率/Hz	不确定度 $\mu(x_3)$ /dB
315	0.28
400	0.13
500	0.27
630	0.50
800	0.25
1000	0.30
1250	0.36
1600	0.07
2000	0.17
2500	0.21
3150	0.17
4000	0.16
5000	0.15
6300	0.11
8000	0.15
10000	0.13

d) 混响水池体积测量不确定性引起的声源辐射声功率测量的不确定度。

——测量水池体积引起的声源辐射声功率测量的不确定度；

分别对水池体积进行 5 次测量，按公式 (E.7) 可求出其不确定度分量为：

$$u(x_{41}) = 0.20\text{dB}$$

——测量水池表面积引起的声源辐射声功率测量的不确定度

同样分别对水池内表面积进行 5 次测量，按公式 (E.8) 可求出其不确定度分量为：

$$u(x_{42}) = 0.10\text{dB}$$

以上两个分量相互独立，则：

$$u(x_4) = \sqrt{\sum \left[\frac{\partial L_W}{\partial x_{4j}} \mu(x_{4j}) \right]^2} = 0.01\text{dB}$$

e) 因水温及水压而对水中声传播速度进行修正而引起的声源辐射声功率测量的不确定度。

若水温及水压变化引起的水中声传播速度的变化为 1%，则：

$$u(x_5) = \sqrt{\sum \left[\frac{\partial L_W}{\partial x_{5j}} \mu(x_{5j}) \right]^2} = 0.03\text{dB}$$

f) 标准器校准水听器所引起的声源辐射声功率测量的不确定度。

——水听器校准腔及校准仪器不确定度引起的声源辐射声功率测量的不确定度；

根据校准器上级证书，给出其不确定度为：

$$u(x_{61}) = 0.04\text{dB}$$

——水听器检测装置的不确定性引起的测量结果不确定度

根据水听器检测装置上级证书，给出其不确定度为：

$$u(x_{62}) = 0.20\text{dB}$$

以上两个分量相互独立，则：

$$u(x_6) = \sqrt{\sum \left[\frac{\partial L_W}{\partial x_{6j}} u(x_{6j}) \right]^2} = 0.20\text{dB}$$

E.2.6 合成标准不确定度

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \dots \dots \dots (E.14)$$

根据公式 (E.14) 计算混响声场测定水下声源辐射声功率的合成标准不确定度如表 E.7 所示。

表 E.7 混响声场测定水下声源辐射声功率的合成标准不确定度

中心频率 /Hz	合成标准不确定度 μ_c /dB
315	1.11
400	0.46
500	0.60
630	1.03
800	0.96
1000	1.02
1250	0.81
1600	0.54
2000	0.30
2500	0.40
3150	0.30
4000	0.28
5000	0.27
6300	0.24
8000	0.26
10000	0.29

E.2.7 扩展不确定度

取包含因子 $k_p = 2$ ，则混响声场测定水下声源辐射声功率的扩展不确定度为：

$$U = k_p u_c = 2.22\text{dB} \dots \dots \dots (E.15)$$

所以，混响声场测定水下声源辐射声功率的测量拓展不确定度不超过 2.22dB ($k_p = 2$)。

附录 F
(资料性)
测量不确定度分析示例

F.1 概述

本附录对混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度进行了分析，选择 3829-17k 球型发射换能器作为待测声源，测量频率范围为 2kHz~12kHz。

只考虑 A 类不确定度，采用线阵并沿垂直水池跨度方向移动平均，空间测点数量不少于 200，在截止频率以上测量的标准不确定度小于 1.5dB；采用面阵或体积阵，基于 384 个点进行空间平均测量不确定度小于 1.0dB，同时分析了固定阵空间平均点数与测量不确定度的关系。

F.2 混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度分析

进行测量不确定度与测量点数之间关系的分析，测量结果见表 F.1。测量结果表明：混响水箱中采用混响法测定水下声源辐射声功率的测量不确定度见表 F.2，测量结果见图 F.1~F.2。

表 F.1 实验测量数据记录表

测试混响水池：	水声技术重点实验室水池（9.3m×3.1m×1.7m）
测试条件：	室温：25℃，水温：18℃
日期：	2014年3月3日
测量声源名称：	3829-17k发射换能器
测量频率范围：	2kHz~10kHz
测试内容：	混响法测定水下声源辐射声功率

表 F.2 在大水箱不同点数空间平均测量结果的不确定度 单位为 dB

点数	4	6	8	16	24	32	48	64	96	128	256	384
误差	8.0	5.0	4.0	3.5	3.0	2.5	1.2	2.1	2.0	1.5	1.3	1.0

a) 采用线阵并沿水池跨度方向移动平均 200 次的混响法测量结果，不确定度小于 1.5 dB；

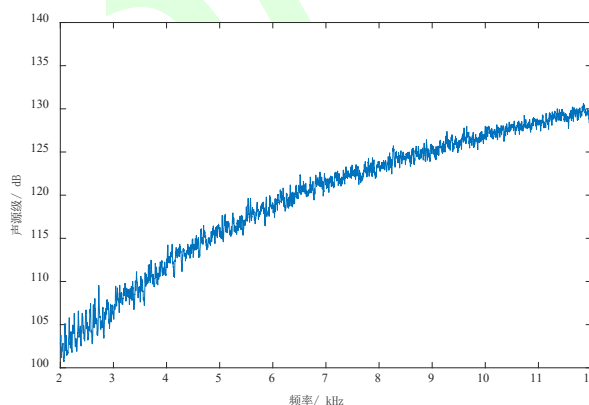


图 F.1 基于线阵移动平均 200 次的混响法声源级测量结果

b) 固定点平均混响法测量结果，如图 F.2，水听器固定 384 个点测量，不确定度小于 1.0dB。

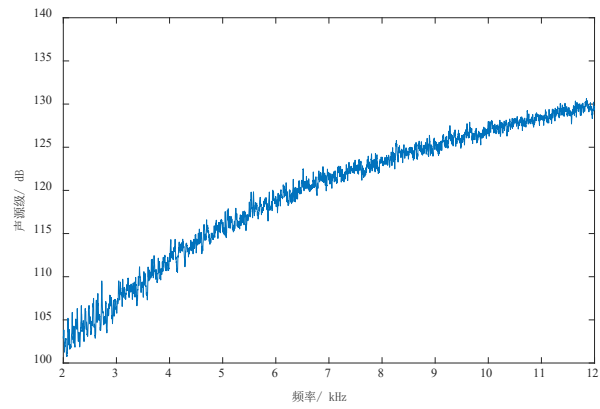


图 F.2 基于固定 384 个点平均的声源级测量结果

SASC

附录 G (资料性)

“混响法测定电火花瞬态声源辐射声能量”示例

G.1 概述

现要测量一个电火花声源的辐射声能量。电火花声源放电电极为尖锥形电极，电极间距为 0.5cm，测试工况为电火花声源在一定电压驱动下产生的瞬态声能量。遵照本文件，测量该声源所产生的瞬态噪声辐射声能量。

G.2 测量前的准备

- 测量电火花声源产生的瞬态声能量，按照 4.2 瞬态声测量原理。
- 选择适合的混响水池。所选混响水池的尺寸为长 15m、宽 9m、水深 6m，水池体积远大于声源体积，满足混响水池尺寸要求。
- 按照附录 B 中混响水池混响时间的测量方法测量实验用水池的混响时间。测试得到的混响时间如表 G.1 所示。

表 G.1 混响时间测量结果

中心频率/Hz	混响时间/s
315	0.20
400	0.23
500	0.27
630	0.29
800	0.42
1000	0.71
1250	1.06
1600	1.28
2000	0.71
2500	0.62
3150	0.27
4000	0.43
5000	0.42
6300	0.29
8000	0.32
10000	0.22

- 按照 7.1 所规定的待测声源安装要求布放电火花声源。电火花声源通过绳索吊放在水池中，声源距离池壁短边 3.0m、距离池壁长边 4.0m、距离水面 2.5m，如图 G.1 所示。
- 按照 8.1 所规定的要求安装水听器阵列，共四条阵 120 个阵元。每条水听器阵列通过浮体吊放，均布在水池混响控制区内，如图 G.1 所示。

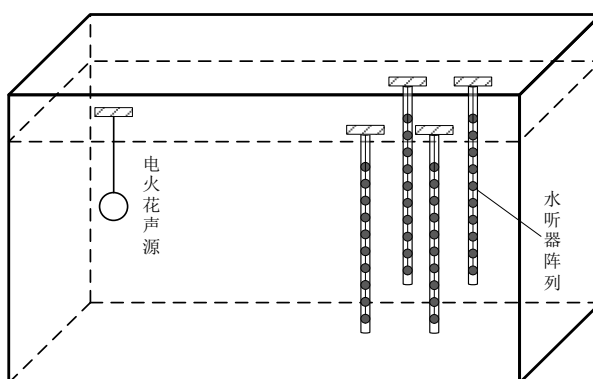


图 G.1 电火花声源和水听器阵列安装示意图

G.3 测量过程

- 按照电火花声源的工作规范做好发射准备，设置击穿电压为 9kV。
- 按照体积阵的运行方式，信号采集器同步测量水听器阵元信号。
- 在规定的待测声源测量工况条件下，待测声源开启，测量瞬态声。
- 截取完整的瞬态声信号，某通道截取的瞬态声信号如图 G.2 所示。

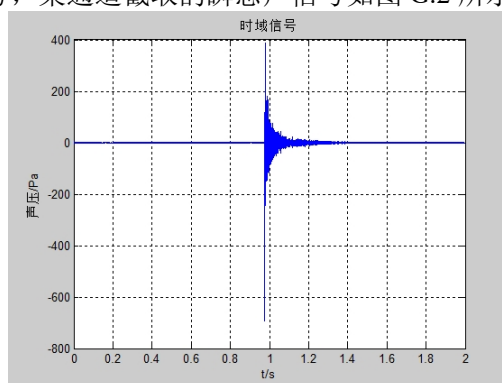


图 G.2 某阵元采集到的电火花瞬态噪声时域波形

- 用公式 (10) ~ (12) 计算出瞬态声能量。
- 保持测量工况不变，进行 6 次独立测量。

G.4 测量结果

测量结果如表 G.2 所示。

表 G.2 电火花瞬态声能量测量结果

	瞬态声能量级 /dB
第一次测量	158.4
第二次测量	157.2
第三次测量	157.3
第四次测量	157.8
第五次测量	159.8
第六次测量	159.7
平均	158.4

对测量结果进行测量不确定度的 A 类评定，电火花瞬态声能量级的测量不确定度为 0.47 dB。

仪器测量精度及读数误差、声传播速度误差、水听器灵敏度校准等引起的标准不确定度 B 类评定不超过 0.80 dB。

合成不确定度评定为 0.93 dB。

参 考 文 献

- [1] GB/T 20247-2006 声学 混响室吸声测量.
- [2] GB 5265-2009 声学 水下噪声测量.
- [3] 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.
- [4] 唐锐. 水下壳体结构低频声辐射预报方法与试验测试技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 66-73.
- [5] Davy, J. L. The relative variance of the transmission function of a reverberation room. *J. Sound and Vib.*, 77(4), 455- 479, 1981.
- [6] Chu, W. T. Room response measurements in a reverberation chamber containing a rotating diffuser. *J. Acous. Soc. Am.*, 77 (3) , 1252- 1256, 1985.
- [7] Mailing G. C.. Jr. Determination of sound power in reverberation rooms. *Noise Control Engineering Journal*, 25(2), 66-75, 1985.
- [8] R. V. Waterhouse. Statistical properties of reverberant sound fields, *J. Acous. Soc. Am.*, 43, 1436-1443, 1968.
- [9] D. Lubman. Spatial Averaging in a Diffuse Sound Fields. *J. Acous. Soc. Am.*, 46(3): 532-534, 1969.
- [10] R. V. Waterhouse. Noise Measurement in Reverberant Rooms. *J. Acous. Soc. Am.*, 54(4): 931-934, 1973.
- [11] F. Jacobsen. The diffuse sound field: Statistical considerations concerning the reverberant field in the steady state, The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report No. 27, 1979.
- [12] D. Y. Maa. Sound Power Emission in Reverberation Chambers, *J. Acous. Soc. Am.*, 83(4), 1414-1419, 1988.
- [13] H. G. Andres. The Spatial Variations of Noise Levels in Rooms and Applications for Sound Power Measurements. *Acustica*, 16: 279-294, 1965.
- [14] Tang Rui, Yu Xinyue, Shang Dajing, Li Qi. A new application for reverberation tanks: measurement of underwater impulsive sound characteristics. *Measurement science and technology*, 30(7), 2019.
-