



中华人民共和国医药行业标准

YY/T 0163—2005
代替 YY/T 0163—1994

医用超声测量水听器特性和校准

Characteristics and calibration of hydrophones for medical ultrasonic fields

2005-12-07 发布

2006-12-01 实施



国家食品药品监督管理局 发布

前 言

本标准的附录 A 是资料性附录。

本标准由国家食品药品监督管理局提出。

本标准由全国医用超声设备标准化分技术委员会归口。

本标准由上海交通大学、国家武汉医用超声波仪器质量监督检测中心负责起草。

本标准主要起草人：寿文德、段世梅、顾欣、白德念。

医用超声测量水听器特性和校准

1 范围

本标准规定了 0.5 MHz~10 MHz 频率范围内,采用压电传感元件测量医用超声设备在水中产生的脉冲的或连续波超声场的水听器的术语和定义、产品分类、要求和校准方法。

本标准适用的水听器是一种已知灵敏度且具有高频宽频带频率响应的水下声接收器。它由圆片形的压电传感元件,声学结构件,外壳,电缆和插头组成。有针形和薄膜形两种主要结构形式。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 3947 声学名词术语

3 术语、定义及符号

3.1 术语和定义

GB/T 3947 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

声中心 acoustic centre

换能器上或接近换能器的一点,从远离换能器的空间点处可以观察到换能器是从该点发射呈现出发散状态的球面波。

3.1.2

水听器 hydrophone

对水中的声信号发生响应并产生相应的电信号的一种换能器。

注:用于测量高频超声场的水听器通常由一个薄圆盘形的压电元件作为灵敏元件,被安装在一个针状探头的顶端或成为一个绷紧的塑料薄膜的一部分而构成的。灵敏元件通常直径小于 1 mm。本标准中所用的“水听器”一词,即指上述两种微型灵敏元件的水听器。对于大换能器作水听器用时,则称为“接收器”。

3.1.3

可逆换能器 reversible transducer

一个既可用作水听器亦可用作发射器的换能器,后者是一种将电信号转换为声信号的装置。

3.1.4

互易换能器 reciprocity transducer

线性,无源,可逆并满足互易原理的换能器。

3.1.5

水听器开路电压 open-circuit voltage at a hydrophone

无电流通过状态下水听器的电端出现的电压。

符号: U

单位:V

3.1.6

水听器自由场(电压)灵敏度 free-field sensitivity of a hydrophone

水听器输出端开路电压,与声场中引入水听器前存在于水听器的声中心位置处的未扰动的声压的比值。

符号: M

单位: V/Pa

注1:自由场电压灵敏度是对一个平面行波而言的。水听器相对于平面波传播的方向,输出端和频率都应指明。

注2:自由场电压灵敏度常用“级”来表示,单位为分贝,dB。自由场电压灵敏度级是由自由场电压灵敏度与其基准值之比值以10为底的对数乘以20。常用基准值在水中为 $1 V/\mu Pa$ 。

3.1.7

发射器的发送电流响应 transmitting response to current of a projector

在某一指定频率下,在发射器的无干涉效应的声场中的指定某一点处(或某一面上)声波的声压(或该面上的平均声压)与流过发射器电端的电流的比值。

符号: S

单位: Pa/A

3.1.8

互易常数 reciprocity coefficient, reciprocity constant

满足电声互易原理的电声换能器,其互易常数为用作水听器时的自由场(电压)灵敏度 M 与用作发射器时的发送电流响应 S 的比值。在发送的声波近似为平面波的情况下,互易常数近似为 $2A/\rho c$,称为平面波互易常数。式中 A 为换能器的有效面积, ρ 为传声媒质的密度, c 为媒质中的声速。

符号: J

单位: W/Pa^2

注:平面波互易常数适用于平面波传播。但本标准所述的校准方法中,真正的平面波并未实现。为此提出了一个对声场偏离平面波条件作出修正的修正系数。

3.1.9

水听器的指向性响应 directional response of a hydrophone

在指定频率下在通过水听器的声中心的指定平面内。水听器响应作为入射声平面波的传播方向的一个函数的描述,常用图线表示。

3.1.10

电缆端漏电阻 end-of-cable leakage resistance

水听器电缆末端的电端所施加的电压与流过该端的直流电流的比值。

符号: R_l

单位: Ω

3.2 符号表

A_l	辅助换能器的有效面积, m^2 ;
a	水听器的有效半径, m ;
a_l	辅助换能器的有效半径, m ;
a_u	必须用来减少参考电压 U_{ref} 使之等于电压 U 的因数;
a_{ul}	必须用来减少参考电压 U_{ref} 使之等于电压 U_l 的因数;
a_{ll}	为驱动一个流过阻抗 R_o 的电流等于 I_l ,而用以减少参考电压 U_{ref} 的因数;
c	水中的声速, m/s ;
d	水听器与反射器间的距离, m ;
d_l	辅助换能器与反射器间的距离, m ;

f_{\max}	最大测量频率, Hz;
G_1	单独用辅助换能器情况下, 对衍射损失的修正因数;
G_2	使用辅助换能器和水听器情况下, 对衍射损失的修正因数;
G_c	只有在某些测量条件下可应用的把 G_1 和 G_2 结合起来的修正因数;
I_1	流过辅助换能器的电流, A;
I_k	流过在辅助换能器处引入短路的电流, A;
J	互易常数, W/Pa^2 ;
J_p	平面波互易常数 $\{J_p = 2A/\rho c\}$, W/Pa^2 ;
k_{ul}	为得到辅助换能器的开路电压的修正因数;
k_u	为得到水听器的开路电压的修正因数;
M	水听器的自由场(电压)灵敏度, V/Pa ;
M^*	在假定理想平面波测量条件下, 水听器的表观自由场(电压)灵敏度, V/Pa ;
N	近场距离 $\{N = a_1^2/\lambda\}$, m;
P	声压, Pa;
P_1	辅助换能器发射的平面波声压, Pa;
R_0	等于精密衰减器的特性阻抗的标准负载阻抗, Ω ;
R_1	水听器电缆末端的漏电阻, Ω ;
r	在反射器与水的界面上的声压(幅度)反射系数;
s	从辅助换能器到水听器的归一化距离 $\{s = (d_1 + d)\lambda/a_1^2\}$, m;
S_1	辅助换能器发射电流响应, Pa/A ;
S_1^*	在假定理想的平面波测量条件下, 辅助换能器的表观发送电流响应, Pa/A ;
U	水听器的开路电压, V;
U_1	辅助换能器的开路电压, V;
U_{ref}	参考电压, V;
v	换能器辐射面的振速, m/s;
z	沿换能器的声轴的距离, m;
α'	水中声压幅度衰减系数, Np/m ;
λ	水中的声波长, m;
ρ	水的密度, kg/m^3 。

4 产品分类

用于标准化测量目的的水听器, 分为针形(Z型)和薄膜形(M型)两类。按照其主要应用规定分为A级和B级:

- A级水听器: 为已校准的精密水听器, 满足 10 MHz 以内频率分量的超声场特性的定量化测量要求, 它们应能测量在任何声场条件下在一点处的瞬态声压。这种声场条件多半可在大多数类型的医用超声换能器的焦区或靠近焦区处观察到。
- B级水听器: 为普通的测量水听器, 仅用于相对测量的而不是定量的测量时, 例如测量声场的空间特性。

5 要求

5.1 灵敏度

5.1.1 灵敏度级

5.1.1.1 Z型水听器

A级与B级二者的自由场(电压)灵敏度应足以用高于6 dB的信噪声比对 3×10^3 Pa声压进行测量。

5.1.1.2 M型水听器

A级与B级二者的自由场(电压)灵敏度应足以用高于6 dB的信噪声比对 3×10^4 Pa声压进行测量。

5.1.2 线性度

对A级与B级二者,要求在 3×10^3 Pa(Z型)或 3×10^4 Pa(M型)至 3×10^5 Pa的动态范围内,水听器的输出电压应在 $\pm 10\%$ 的容限内对自由场声压是线性的。在对照自由场声压的输出电压的曲线图上,通常以原点至 3×10^4 Pa对应的电压值的直线作为理论拟合直线,在这动态范围内的实际测得值与拟合直线之差不应大于 $\pm 10\%$ 。

5.1.3 频率响应

在0.5 MHz~10 MHz频率范围内,覆盖至少2.5个倍频程的注明频带内,自由场灵敏度级对A级在 ± 2 dB容限内为常数,对B级在容限 ± 4 dB内为常数。在标明的频带内,对不连续的频率的灵敏度数据,相邻频率间隔内灵敏度变化小于 ± 1.5 dB。

5.1.4 温度稳定性

在 $16^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 温度间,A级水听器的灵敏度级偏离 23°C 时值不应大于 ± 1 dB;在 $30^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 时,灵敏度级偏离 23°C 时的值不大于 ± 2 dB。

5.1.5 时间稳定性

A级水听器在一年时间内,灵敏度级变化不大于 ± 2 dB。因此在不长于1年的时间内水听器应重复校准。

5.2 指向性

5.2.1 6 dB波束宽度

在工作频率为3.5 MHz处,在过最大灵敏度方向的两个相互垂直的平面内,测得的两个 -6 dB指向性开角的平均值 $\theta_{-6\text{dB}}$ 。

对 $\phi 1$ mm的灵敏度元件的水听器:Z型 $\theta_{-6\text{dB}} > 30^\circ$;M型 $\theta_{-6\text{dB}} > 6^\circ$ 。

对 $\phi 0.6$ mm的灵敏度元件的水听器:Z型 $\theta_{-6\text{dB}} > 40^\circ$;M型 $\theta_{-6\text{dB}} > 10^\circ$ 。

5.2.2 轴偏差

最大灵敏度方向和几何轴之间的偏差 $< 3^\circ$ 。

5.3 电特性

5.3.1 应给出在 $16^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间的某一温度处灵敏元件电容量的计算值。

5.3.2 应给出电缆长度 < 1.5 m时电缆末端的电容量。

5.3.3 电缆末端的漏电阻应 > 100 k Ω 。

5.3.4 水听器可作发声器用时,应给出最大的激励电压 U_{pp} 与占空比 D 。

5.4 机械和环境方面

5.4.1 应给出灵敏材料类型。

5.4.2 应给出灵敏元件和水听器的主要尺寸。

5.4.3 已安装好的水听器的基本厚度共振频率 $f_0 > 2f_{\text{max}}$ 。

5.4.4 应给出外露材料的类型。

5.4.5 应给出不相容材料的限制。

5.4.6 应给出机械应力方面的限制。

6 校准方法

6.1 双换能器互易法校准原理

本标准推荐用双换能器方法来校准标准水听器。水听器是在一个辅助换能器的已知声场中校准的；该声场预先用自互易法定量标定。在自易校准中，使用单一频率的正弦波群(猝发音)信号，得到的校准数据仅与一个频率相关。因此，必须逐点地获得一个完全的频响曲线。

6.1.1 用自互易法测定辅助换能器的发送电流响应

首先用一个平面的互易换能器(与之相关的参量使用下标号 1 注明)作为辅助换能器进行自易校准。

如图 1 所示，测量激励电流 I_1 和调整辅助换能器的方向，使来自反射器 R 反射的第一回波信号电压 U_1 达到最大值，测定假设理想平面波测量条件下它的表观发送电流响应，按式(1)计算 S_1^* ：

$$S_1^* = p_1 / I_1 = \sqrt{\frac{U_1}{I_1 J_p}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{和 } J_p = \frac{2A_1}{\rho c}$$

式中：

- p_1 ——辅助换能器 T 发射的平面波声压, Pa;
- J_p ——平面波互易常数, W/Pa²;
- A_1 ——辅助换能器 T 表面的有效面积, m²;
- ρ ——传声媒质(水)的密度, kg/m³;
- c ——传声媒质(水)中的声速, m/s。

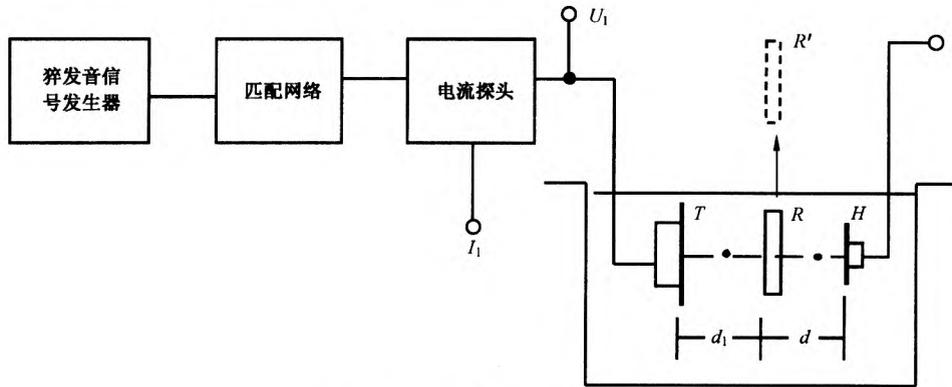


图 1 互易法测量示意图

6.1.2 用代换法得到自由场电压灵敏度

移去反射器，让待校准的水听器 H 浸没在辅助换能器 T 的已知声场中，测定它的开路输出电压 U，则假设理想平面波测量条件下的表观自由场电压灵敏度由式(2)给出：

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \sqrt{\frac{I_1 J_p}{U_1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中 M^* , U , U_1 , I_1 , J_p , p_1 见 3.2。

6.1.3 对非平面波条件的修正

考虑到换能器的衍射和吸收，以及反射器的声压反射系数 r 等的影响，采用修正系数 K ，对校准结果加以修正。则水听器的自由场电压灵敏度 M 、修正系数 K 由式(3)和式(4)计算：

$$M = M^* K \dots\dots\dots (3)$$

$$K = \sqrt{k_{ul} G_1 r e^{\alpha d}} / (k_u G_2) \dots\dots\dots (4)$$

式中 M^* , k_{ul} , G_1 , r , α' , d , k_u , G_2 见 3.2。

6.2 试验仪器、设备及其要求

6.2.1 总的测量装置和条件

图 2 示出实际的相关测量电路。在猝发音信号发生器的激励下。辅助换能器 T 辐射含有 10~20 个周期的重复正弦波“群”到一个水槽中,在水槽中它被一块厚不锈钢反射器 R 反射。换能器调整到使声束轴垂直于反射器平面;在第二步水听器校准时,移去反射器,调整水听器位置与方向,使它的最大灵敏度方向与辅助换能器的声束轴处于声学共轴状态。

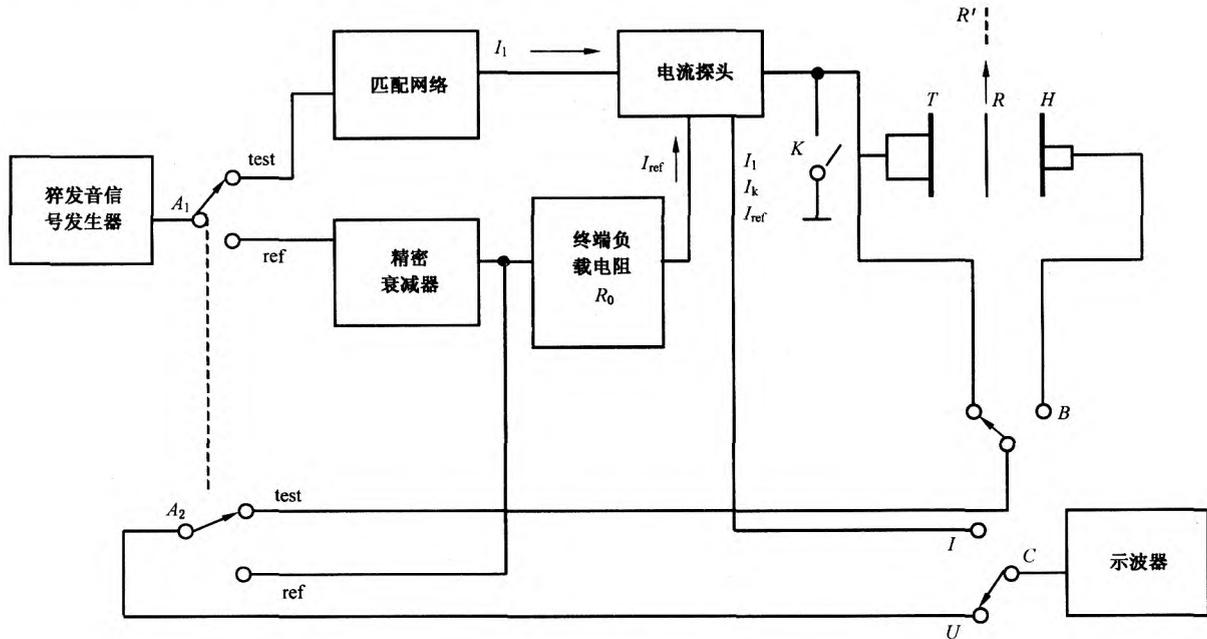


图 2 测量电路

6.2.2 测量仪器

6.2.2.1 猝发音信号发生器

工作频率:0.5 MHz~10 MHz 连续可调。

最大输出幅度: $U_{omax} > 30 \text{ V}(50 \Omega)$, $f_0 < 7 \text{ MHz}$ 。

$U_{omax} > 20 \text{ V}(50 \Omega)$, $7 \text{ MHz} \leq f_0 < 10 \text{ MHz}$ 。

每个波群含有正弦波个数:12~20(调整为 18 个)。

输出幅度变化范围: $U_{omax}/U_{omin} > 2$ 连续可调。

频率计时基频率 10 MHz, 稳定度优于 $\pm 10^{-5}$ 。

6.2.2.2 精密衰减器输出阻抗 $R_0 = 50 \Omega$ 或 75Ω , 精度 0.1 dB, 频率范围:0~30 MHz。

6.2.2.3 通用示波器, 频响至少 20 MHz, 输入阻抗 $1 \text{ M}\Omega//30 \text{ pF}$ 。

6.2.2.4 标准无感电阻 R_0 误差 $\pm 1\%$ 。

6.2.3 辅助换能器的要求

6.2.3.1 应有一个直径大于所使用的频率的水中声波长的 10 倍的圆形平面换能元件, 辅助换能器对水听器的直径之比大于 5。

6.2.3.2 具备互易性。辅助换能器与另一换能器组成的发射换能器接收换能器排列对时, 测定其正向的换能器转移阻抗(接收器的开路输出电压对发射器的输入电流的比值), 和逆向的换能器转移阻抗(将发射器与接收器的作用互换而不改变其位置)。两者相差不应大于 $\pm 10\%$ 。

6.2.3.3 换能器的有效半径 a_1 应在换能元件实际半径的 95% 到 102% 之间, 测定 a_1 的方法参见

附录 A。

6.2.4 反射器

反射器用一个可以容纳整个超声束的有足够大的直径(8倍 a_1)的不锈钢圆盘构成。其厚度应使其反面第一反射波不与直接从前表面的反射波相干涉。前表面平直到 $10\ \mu\text{m}$, 表面光洁度优于 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 。

6.2.5 试验水槽

试验水槽应足够大, 足以保证换能器 T 与水听器 H 间距 $(d_1+d) \geq 3a_1^2/\lambda$ 。

槽壁和水面应离开换能器与水听器一个足够的距离 Z , $Z > 0.5c\tau_{\text{max}}$, τ_{max} 为最低频率正弦波“群”脉宽。

校准时应使用新蒸馏的或除气水。每隔 48 h 要换水一次。水的除气方法是置于减压到 2 000 Pa 的空气中或加热到 80°C 达 1 h。

6.2.6 调整机构

换能器, 水听器和反射器应安装在稳定的, 刚性的并可作适当调整的机构上。水听器和换能器横向定位精度达到 $\pm 0.1\ \text{mm}$, 绕它们的声中心的独立的定向调整精度为 $\pm 0.05^\circ$ 。

6.3 试验程序

6.3.1 按图 2 所示安排仪器设备, 调整 T 与 R 之间的距离 d_1 , 使其满足

$$1.5 < 2d_1\lambda/a_1^2 < 3$$

6.3.2 联动开关 A 置于 test 位置, 开关 B 置于 U_1 位置, 开关 C 置于 U 的位置。调整 T 的方位, 使从反射器来得第一回波达到最大。通过改变联动开关 A 的位置, 使 R_0 两端的参考电压 U_{ref} 和 U_1 交替显示在示波器上, 调整精密衰减器的衰减量, 使二者相等。由衰减器的读数 a_1 按式(5)可求得比值 a_{u1} :

$$a_{u1} = U_1/U_{\text{ref}} = 10^{-0.05a_1} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中 a_{u1} , U_1 , U_{ref} 见 3.2。

6.3.3 开关 C 置于 I 位置, 通过改变联动开关 A , 使 I_1 信号与流经 R_0 的电流 $I_{\text{ref}} = U_{\text{ref}}/R_0$ 信号交替显示在示波器上。调整精密衰减器的衰减量, 使二者相等。由衰减器读数 a_2 按式(6)可求得比值 a_{i1} :

$$a_{i1} = I_1/I_{\text{ref}} = 10^{-0.05a_2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中 a_{i1} , I_1 , I_{ref} 见 3.2。

6.3.4 移去反射器, 调整辅助换能器 T 与水听器 H 之间的距离 (d_1+d) , 使之满足:

$$1.5 < (d_1+d)\lambda/a_1^2 < 3 \quad (\text{常取 } d = d_1)$$

6.3.5 联动开关置于 test 位置, 开关 B 置于 U 位置, 开关 C 置于 U 位置, 再反复调整二者的横向位置和方位, 使二者处于声学公轴状态, 此时水听器的输出 U 达到最大值。改变联动开关 A 的位置, 使 U 信号与 U_{ref} 信号交替显示在示波器上, 调整精密衰减器, 使二者相等, 由衰减器的读数 a_3 , 可按式(7)求得比值 a_u :

$$a_u = U/U_{\text{ref}} = 10^{-0.05a_3} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中 a_u , U , U_{ref} 见 3.2。

6.3.6 联动开关置于 test 位置, 开关 C 置于 I 位置, 反复闭合开关 K (短路) 和开断开关 K (开路), 使 I_k 信号与 I_1 信号轮流地出现在示波器上。调整精密衰减器, 使二者相等。由衰减器的读数 a_4 , 可按式(8)求得比值 k_{u1} :

$$k_{u1} = I_1/I_k = 10^{-0.05a_4} \quad \dots\dots\dots(8)$$

k_{u1} , I_1 , I_k 见 3.2。

6.4 试验结果的计算

水听器表观自由场电压灵敏度 M^* 和修正系数 K 可按式(9)和式(10)计算:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{i1}} \sqrt{\frac{R_0 a_{i1} J_p}{a_{u1}}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$K = \sqrt{k_{ul}G_1 r} \frac{e^{d'}}{k_u G_2} \dots\dots\dots(10)$$

在满足

$$1.5 < 2d_1\lambda/a_1^2 < 3$$

$$1.5 < (d_1 + d)\lambda/a_1^2 < 3$$

$$a_1/a > 5$$

的条件下,修正系数 K 可按式(11)简化:

$$K = 0.942G_c \frac{\sqrt{k_{ul}}}{k_u} e^{d'} \dots\dots\dots(11)$$

式中: G_c ——仅为归一化距离 S 的函数。用于修正因超声束传播过程中发生衍射效应,而不是无限平面波所引起接收信号的改变。这些效应表示实际系统从在 J_p 的推导中假定平面波条件的偏差。 $J_p G_c^2$ 可看作互易常数。图 3 中示出作为 s 的函数的 G_c 值的曲线。

其中假设 $d=d_1$, 则 $s=2d_1\lambda/a_1^2=(d_1+d)\lambda/a_1^2$ 。

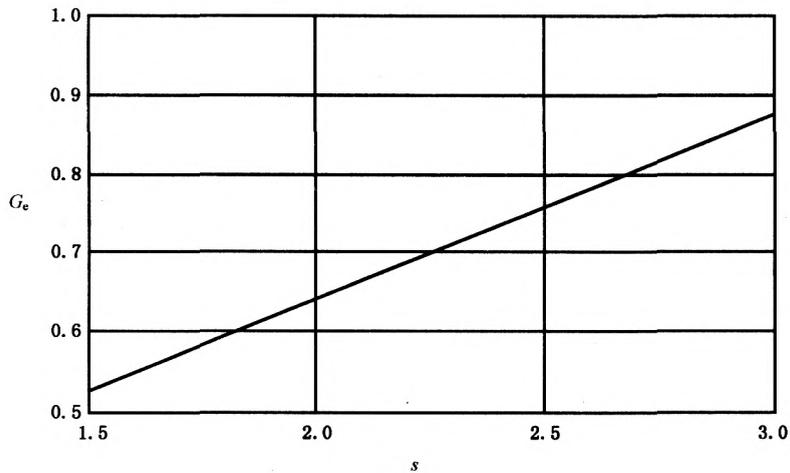


图 3

超声在纯净的除气水中的声压幅度衰减系数 α' , 在 23℃ 时按式(12)计算:

$$\alpha' = 2.2 \times 10^{-14} f^2 \text{ Np/m} \dots\dots\dots(12)$$

式中:

f ——频率, Hz。

由于水听器的电负载已规定为 $1 \text{ M}\Omega // 30 \text{ pF}$, 在校准与使用时都相同, 所以取 $k_u=1$ 。

6.5 校准的不确定度

本标准推荐的方法和简化的修正因数提供了一个在 0.5 MHz~10 MHz 频带内校准水听器的方法, 其电压灵敏度级的综合不确定度小于 $\pm 1.5 \text{ dB}$ 。本技术能获得的测量中的统计学不确定度比 $\pm 1.5 \text{ dB}$ 小得多。

附录 A

(资料性附录)

辅助换能器的有效半径的估计

辅助换能器的有效半径 a_1 , 是根据换能器工作在连续波条件下, 其声束轴上的声压幅度随距离变化曲线图, 与理想活塞声源的声场的比较来加以确定的。使用一个灵敏元件直径至少小于辅助换能器直径的 $\frac{1}{10}$ 倍的未校准水听器, 在辅助换能器的猝发音声场的声轴上, 在离换能器 $1.5Z_m$ 至 $3Z_m$ 的范围选取 n ($n \geq 6$) 个位置, 测定 Z_i 处水听器产生的信号电压幅度 U_i 。 Z_m 为换能器声轴上离开换能器表面最远的声压最大值位置的距离。

$$\text{令} \quad Y_i(Z_i) = 20 \log_{10} U_i$$

$$Y'_i(Z_i) = 20 \log_{10} [2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \{ (Z_i^2 + a_1^2)^{1/2} - Z_i \} \right| e^{-\alpha Z_i}]$$

$$X_m(Z_m) = Y_m(Z_m) - Y'_m(Z_m) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{i=n} Y_i(Z_i) - \sum_{i=1}^{i=n} Y'_i(Z_i) \right]$$

选取不同的 a_1 值, 代入上式计算 $X_m(Z_m)$, 直到满足 $X_m(Z_m) \leq 0.5$ dB 时, 所代入的 a_1 值, 可取为辅助换能器的有效半径。

中华人民共和国医药
行业标准
医用超声测量水听器特性和校准
YY/T 0163—2005

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.bzcbs.com

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

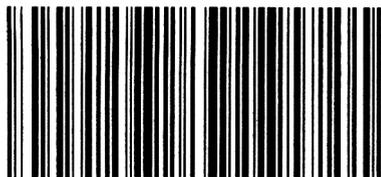
*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 18 千字
2006年2月第一版 2006年2月第一次印刷

*

书号:155066·2-16673 定价 12.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



YY/T 0163-2005