

1478

YY

中华人民共和国医药行业标准

YY/T 0865.2—2018/IEC 62127-2:2013

超声 水听器 第 2 部分:40 MHz 以下超声场 用水听器的校准

Ultrasonics—Hydrophones—
Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz

(IEC 62127-2:2013, IDT)

2018-12-20 发布

2020-01-01 实施



国家药品监督管理局 发布

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	2
4 符号表	7
5 校准步骤概述	9
6 水听器校准系统的通用要求	11
7 电学要求	13
8 水听器的准备	15
9 自由场互易校准	15
10 平面扫描式自由场校准	16
11 采用光学干涉法的自由场校准	19
12 利用标准水听器的比较法校准	19
附录 A (资料性附录) 在自由场中校准水听器的测量不确定度的评估	22
附录 B (资料性附录) PVDF 聚合物传感器在高声强超声场中的特性	24
附录 C (资料性附录) 电负载的修正	27
附录 D (资料性附录) 利用平面扫描法的水听器绝对校准	28
附录 E (资料性附录) 水的特性	34
附录 F (资料性附录) 40 MHz 以下利用光学干涉法的水听器绝对校准	36
附录 G (资料性附录) 波形概念	44
附录 H (资料性附录) 时间延迟谱法的要求和简要回顾	51
附录 I (资料性附录) 水听器相位响应的测定	54
附录 J (资料性附录) 关于水听器敏感元件最大尺寸的考虑	58
附录 K (资料性附录) 两换能器互易校准方法	60
参考文献	71

前 言

YY/T 0865《超声 水听器》分为三个部分：

- 第 1 部分：40 MHz 以下医用超声场的测量和特征描绘；
- 第 2 部分：40 MHz 以下超声场用水听器的校准；
- 第 3 部分：40 MHz 以下超声场用水听器的特性。

本部分为 YY/T 0865 的第 2 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本部分使用翻译法等同采用 IEC 62127-2:2013《超声 水听器 第 2 部分：40 MHz 以下超声场用水听器的校准》。

本部分纳入了 IEC 62127-2:2007/AMD1:2013 的修正内容，这些修正内容涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直双线(||)进行了标示。

与本部分规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 2900.86—2009 电工术语 声学 and 电声学(IEC 60050-801:1994, IDT)；
- GB/T 7966—2009 声学 超声功率测量 辐射力天平法及性能要求(IEC 61161:2006, IDT)；
- GB/T 20249—2006 声学 聚焦超声换能器发射场特性的定义与测量方法(IEC 61828:2001, IDT)；
- YY/T 0865.1—2011 超声 水听器 第 1 部分：40 MHz 以下医用超声场的测量和特征描绘(IEC 62127-1:2007, IDT)；
- YY/T 0865.3—2013 超声 水听器 第 3 部分：40 MHz 以下超声场用水听器的特性(IEC 62127-3:2007, IDT)。

本部分对 IEC 62127-2:2013 仅作了极少量的编辑性修改，均不影响一致性程度。

本部分由国家药品监督管理局提出。

本部分由全国医用电器标准化技术委员会医用超声设备分技术委员会(SAC/TC 10/SC 2)归口。

本部分起草单位：中国船舶重工集团公司第七一五研究所、湖北省医疗器械质量监督检验研究院、中国科学院声学研究所。

本部分主要起草人：黄勇军、蒋时霖、牛凤岐、王世全、陈毅。

引 言

液体介质内的超声场中,声压的空间和时间分布通常用微型水听器测定。但水听器不是绝对测量设备,需要经过校准。IEC 62127 这部分的目的是在超声频段,即 20 kHz~40 MHz 频率范围内规定确定水听器响应所用的校准方法。在本部分中,水听器的主要用途是测量医用诊断设备在水中辐射的超声场。为了可靠地表征所在声场的声学参数,要求水听器在上述频率范围内发挥作用。尤其是,为了充分地表征医用超声设备,高于 15 MHz 的频段至关重要,其主要原因是非线性传播导致超声信号中的高频成分增多。此外,采用 15 MHz 以上频率的医用超声系统(尤其是腔内探头)的数量也在不断增长。近年来的情况表明,为了可靠地测量负峰值(舒张期)声压,另外还需要确定水听器在 0.5 MHz 以下频段的响应。

“水听器”这个术语可以广义地使用,但这里是作为微型压电陶瓷水听器来理解。在当今医用超声的各领域中,尤其是在定量表征医用诊断设备声场结构中所用的,就是这种类型的水听器。关于其他类型的压力传感器,例如采用光纤的,本部分的部分要求可以适用,其他的则不适用。将来,若其他类型的“水听器”在声场测量实践中的重要性提高时,本部分将修订新版本或另外发布独立标准来论述其特性和校准。

注:本部分覆盖 20 kHz~40 MHz 的超声频率范围。关于水听器特性(IEC 62127-3)和水听器使用(IEC 62127-1)的标准已完成转化并出版,上述两者均为水听器标准维护行动计划的一部分。该项计划的目的是重构和融合现有的全部水听器标准。这将最终形成覆盖整个水听器实际应用领域的统一标准。

超声 水听器

第 2 部分:40 MHz 以下超声场

用水听器的校准

1 范围

YY/T 0865 的本部分规定了:

- 水听器的绝对校准方法;
- 水听器的相对(比较)校准方法。

对本部分所覆盖频率范围内的各种相对和绝对校准方法提出了建议,并列出了可供参考的文献。

本部分适用于:

- 在水中且在 40 MHz 以下频率范围内测量所用的水听器。

注 1: 在医用超声领域,尽管一些工作在 40 kHz~100 kHz 频率范围的理疗医学应用正在不断发展,但影像诊断的主要频率范围仍保持在 2 MHz 以上。最近已经确认,即使在后一种情况下(频率在 2 MHz 以上),水听器在较低频段的响应也会影响关键声学参数的测量。

- 采用圆形敏感元件制成,设计用于测量超声设备产生的脉冲波或连续波声场的水听器。

注 2: 一些水听器可能具有非圆形的敏感元件,例如因电极结构引起的对圆形结构的轻度偏离,或者反过来,其敏感元件实际上是方形的。即便如此,本部分中的条款依然有效,但应特别关注指向性响应和通过各个旋转轴的敏感元件的有效半径。

- 带有或不带有水听器前置放大器的水听器。

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。

IEC 60050-801 国际电工术语 声学 and 电声学(International electrotechnical vocabulary—Part 801: Acoustics and electroacoustics)

IEC 60565:2006 水声 水听器 0.01 Hz~1 MHz 频率范围内的校准(Underwater acoustics—Hydrophones—Calibration in the frequency range 0.01 Hz to 1 MHz)

IEC 61161 声学 超声功率测量 辐射力天平法及性能要求(Ultrasonics—Power measurement—Radiation force balances and performance requirements)

IEC 61828 声学 聚焦超声换能器发射场特性的定义与测量方法(Ultrasonics—Focusing transducers—Definitions and measurement methods for the transmitted fields)

IEC 62127-1:2007 超声 水听器 第 1 部分:40 MHz 以下医用超声场的测量和特征描绘(Ultrasonics—Hydrophones—Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz)

修正案 1:2013

IEC 62127-3 超声 水听器 第 3 部分:40 MHz 以下超声场用水听器的特性(Ultrasonics—Hydrophones—Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz)

3 术语、定义和符号

IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 界定的以及下列术语适用于本文件。

3.1

声中心 acoustic centre

换能器上或其附近的一点,换能器从该点发射球面扩散波,且可以从远处多点观察到其发散。

3.2

声束轴 beam axis

通过两个平面声束中心点的直线,这两个平面垂直于最大脉冲声压平方积分点和换能器外表孔径中心点的连线。

注 1: 第一个平面位于包含最大脉冲声压平方积分,或包含聚焦夫琅和费区中单一主瓣的平面位置处,第二个平面的位置尽可能远离第一个平面并与之平行,且包含有两条与第一个平面中相同的正交扫描线(x 轴和 y 轴)。

注 2: 在许多情况下,上述定义中的术语脉冲声压平方积分用任何线性相关的量替代,例如:

- a) 在连续波情况下,术语脉冲声压平方积分用 IEC 61689 (YY/T 0750—2009)定义的均方声压替代;
- b) 在扫描帧的信号同步无法获得的情况下,术语脉冲声压平方积分可以用时间平均声强替代。

注 3: 见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 的图 1。

注 4: 采用 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 的定义。

3.3

声束中心点 beam centrepoint

由通过 xz 和 yz 两个正交平面的束宽中点的两条线相交确定的位置。

注: 采用 IEC 61828:2001 的定义。

3.4

声束宽度 beamwidth

w_6, w_{12}, w_{20}

与声束轴垂直的指定轴上两点之间的最大横向距离,该两点处的脉冲声压平方积分比该指定轴上的最大值低某一指定量值。

注 1: 在许多情况下,上述定义中的术语脉冲声压平方积分用任何线性相关的量替代,例如:

- a) 在连续波情况下,术语脉冲声压平方积分用 IEC 61689(YY/T 0750)定义的均方声压替代;
- b) 在扫描帧的信号同步无法获得的情况下,术语脉冲声压平方积分可以用时间平均声强替代。

注 2: 常用的声束宽度规定为低于最大值: -6 dB, -12 dB, -20 dB,分贝计算等于积分比值取对数的 10 倍。

注 3: 声束宽度的单位为米, m。

注 4: 采用 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 的定义。

3.5

束宽中点 beamwidth midpoint

一平面中若干束宽中心所在位置的线性平均。

注 1: 平均的求取在对应 -0.1 dB ~ -26 dB 范围的 20 种不同束宽水平上进行(见 IEC 61828B.2)。

注 2: 采用 IEC 61828:2001 中的定义。

3.6

波束中心 beam centre

远场中与声束轴垂直的平面上空间峰值时间峰值声压所在的点。

3.7

径向声束扫描 diametrical beam scan

沿着通过声束轴上一点的直线,在垂直于声束轴的方向上,移动水听器,所获得的一组水听器输出

电压的测量值。

注 1: 径向声束扫描可以延伸到声束轴两侧的不同距离。

注 2: 采用 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 中的定义。

3.8

指向性响应 directional response

通常以水听器响应的图形方式来表述,水听器响应是指在穿过参考中心的指定平面以及特定频率下,入射平面声波传播方向的函数。

注: 采用 IEC 60565:2006 的定义。

3.9

非聚焦超声换能器的有效半径 effective radius of a non-focusing ultrasonic transducer

a_t

理想圆形活塞超声换能器的半径,其预测的轴向声压分布近似等效于所观测的轴向声压分布,直至轴向距离超出最后一个轴向最大值。

注 1: 非聚焦超声换能器有效半径的单位为米(m)。

注 2: 采用 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 的定义。

3.10

有效水听器半径 effective hydrophone radius

a_h, a_{h3}, a_{h6}

刚性元片接收水听器的半径,其预期的指向性响应函数的角宽度等于所观测到的角宽度。

注 1: 角宽度在低于指向性响应函数峰值的某一指定数值处确定,对 3 dB 和 6 dB 的指定数值,半径分别用 a_{h3} 和 a_{h6} 表示。

注 2: 有效水听器半径的单位为米(m)。

注 3: 半径通常是频率的函数,典型的实验数据见文献[2]。

注 4: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.11

电负载阻抗 electric load impedance

Z_L

水听器组件输出连接或将连接的复数电输入阻抗(由实部和虚部组成)。

注 1: 电负载阻抗的单位为欧姆(Ω)。

注 2: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.12

电缆末端有载灵敏度 end-of-cable loaded sensitivity

水听器(或水听器组件)电缆末端有载灵敏度 **end-of-cable loaded sensitivity of a hydrophone (or hydrophone-assembly)**

$M_L(f)$

连接到指定电负载阻抗时,在水听器或水听器组件的任何一体化电缆的末端或输出接头处的瞬时电压,除以水听器移去时水听器参考中心处未受扰动的平面波自由场的瞬时声压。

注 1: 电缆末端有载灵敏度的单位为伏每帕斯卡(V/Pa)。

注 2: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.13

电缆末端开路灵敏度 end-of-cable open-circuit sensitivity

水听器电缆末端开路灵敏度 **end-of-cable open-circuit sensitivity of a hydrophone**

$M_c(f)$

在水听器的任何一体化电缆的末端或输出接头处的瞬时开路电压,除以水听器移去时水听器参考中心处未受扰动的平面波自由场的瞬时声压。

注 1: 电缆末端开路灵敏度的单位是伏每帕斯卡(V/Pa)。

注 2: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.14

换能器外表孔径 external transducer aperture

超声换能器或超声换能器基元组部件表面上向传声媒质发出超声辐射的部分。

注 1: 该表面或直接与患者接触,或通过水及其他液体途径与患者接触(见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 的图 1)。

注 2: 采用 IEC 61828:2001 的定义。

3.15

远场 far field

平面非聚焦换能器沿声束轴向 $z > z_T$ 的声场区域。

注 1: 在远场,声压从一个点或靠近辐射表面出现球面波衰减,因此,声源产生的压力近似与声源的距离成反比。

注 2: 本部分使用的术语“远场”仅考虑非聚焦源换能器,对于聚焦换能器实际辐射场的不同部分有不同的术语(见 IEC 61828)。

注 3: 假如换能器孔径的形状产生不同的发射距离,使用距离换能器最远的一个。

[IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013,定义 3.28]

3.16

自由场 free field

均匀各向同性媒质中边界影响可以忽略不计的声场。

注: 采用 IEC 60565:2006,3.13 的定义。

3.17

水听器 hydrophone

接收水中声信号并将其转换成电信号的电声换能器。

注: 采用 IEC 60050-801,32-26 的定义。

3.18

水听器组件 hydrophone assembly

水听器和水听器前置放大器的组合。

注: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.19

水听器轴 hydrophone axis

水听器敏感元件标称的对称轴。

注 1: 除非制造商另有声明(明确且定量),本部分对其理解为水听器外观形状上的几何对称轴。

注 2: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.20

水听器几何半径 hydrophone geometrical radius

水听器敏感元件的几何半径 geometrical radius of a hydrophone active element

a_g

由水听器敏感元件尺寸确定的半径。

注 1: 水听器几何半径的单位为米(m)。

注 2: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.21

水听器前置放大器 hydrophone pre-amplifier

连接到或将连接到特定水听器的有源电子装置,并降低其输出阻抗。

注 1: 水听器前置放大器需要有供电电源。

注 2: 水听器前置放大器的电压传输系数可能小于 1,也就是严格地讲,并不一定要求是电压放大器。

注 3: 采用 IEC 62127-3 的定义。

3.22

瞬时声压 instantaneous acoustic pressure

$p(t)$

在声场中特定时刻的特定点,减去环境压力后的声压。

注 1: 瞬时声压的单位是帕斯卡(Pa)。

注 2: 采用 IEC 62127-1:2007 中修正案 1:2013 的定义。

3.23

瞬时声强 instantaneous intensity

$I(t)$

声场中,特定瞬间和特定点处,沿声波传播方向上的单位时间内通过单位面积的声能量。

注 1: 瞬时声强即瞬时声压与瞬时质点速度的乘积。在超声频段,声强很难测量。如为测量目的引用本部分,并且在距离外部换能器孔径足够远的条件下(至少 1 倍的换能器直径,或者在非圆形换能器情况下至少 1 倍的等效换能器尺度),瞬时声强可以用导出的瞬时声强近似。

注 2: 瞬时声强的单位为瓦每平方米(W/m^2)。

3.24

参考中心 reference centre

水听器上或其附近的一点,声接收灵敏度即围绕它定义。

注: 除非制造商另行声明(明确且定量),本部分认为它在水听器敏感元件前表面的几何中心处。(见 IEC 60565:2006,3.25)

3.25

不确定度 uncertainty

与测量结果相关联的参数,用来表征合理地赋予被测量值的分散性。

注: 见 ISO 导则关于测量不确定度的表述^[3],2.2.3。

3.26

导出的瞬时声强 derived instantaneous intensity

瞬时声强的近似。

如为测量目的引用本部分,并且在距离换能器外表孔径足够远的条件下(至少 1 倍的换能器直径,或者在非圆形换能器情况下至少 1 倍的等效换能器尺度),瞬时声强可以用导出的瞬时声强近似:

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho c} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$p(t)$ —— 瞬时声压;

ρ —— 媒质的密度;

c —— 媒质的声速。

注 1: 如为测量目的引用本部分,导出的瞬时声强是瞬时声强的近似。

注 2: 测量不确定度变大应考虑非常靠近换能器的测量。

注 3: 导出的瞬时声强的单位为瓦每平方米(W/m^2)。

[IEC 62127-1:2007/修正案 1, 定义 3.78]

3.27

有效波长 effective wavelength

λ

传播媒质中纵波声速除以算术平均工作频率所得之值。

注：有效波长的单位为米(m)。

[IEC 61828:2001, 定义 4.2.24]

3.28

纵平面 longitudinal plane

由声束轴与指定正交轴确定的平面。

注：见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 中图 1。

[IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013, 定义 3.35]

3.29

源孔径平面 source aperture plane

最靠近换能器外表孔径并与声束轴垂直的测量平面。

[IEC 61828:2001, 定义 4.2.67]

3.30

源孔径宽度 source aperture width

L_{SA}

指定纵平面中与源孔径平面交线上的最大-20 dB 的束宽。

注 1：见 IEC 61828:2001 图 2。

注 2：源孔径宽度单位是米(m)。

[IEC 61828, 定义 4.2.68]

3.31

换能器孔径宽度 transducer aperture width

L_{TA}

沿着特定的垂直于换能器中心声束轴的换能器孔径全宽度。

注 1：见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 图 4。

注 2：换能器孔径宽度单位是米(m)。

[IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013, 定义 3.87]

3.32

过渡距离 transition distance

z_T

对于给定的纵平面,过渡距离的定义是基于换能器设计(若已知)或者基于测量。

a) 基于设计:过渡距离是超声换能器孔径宽度的等效面积除以 π 与有效波长 λ 的乘积;

b) 基于测量:过渡距离是源孔径宽度的等效面积除以 π 与有效波长 λ 的乘积。

注 1:使用方法 a),一个关于声束轴圆对称的等指长超声换能器,等效面积为 πa^2 ,其中 a 是半径。故过渡距离为 $z_T = a^2/\lambda$ 。举例 1,一个方形超声换能器的等效面积是 $(L_{TA})^2$,其中, L_{TA} 是纵平面中的换能器孔径宽度。因此,对两个包含换能器边长或者换能器孔径宽度的正交平面,过渡距离 $z_T = (L_{TA})^2/(\pi\lambda)$ 。举例 2,一个孔径宽度为 L_{TA1} 和 L_{TA2} 的矩形超声换能器,在相关纵平面内,为计算过渡距离,对于第一个线性换能器孔径宽度其等效面积为 $(L_{TA1})^2$,其中, L_{TA1} 为在该纵平面内的换能器孔径宽度。因此,该平面内的过渡距离 $z_{T1} = (L_{TA1})^2/(\pi\lambda)$ 。对于包含换能器另一个孔径宽度 L_{TA2} 的正交平面,用于计算过渡距离的等效面积为 $(L_{TA2})^2$,其中, L_{TA2} 为在该纵平面内的换能器孔径宽度。因此,该平面内的过渡距离 $z_{T1} = (L_{TA2})^2/(\pi\lambda)$ 。

注 2: 使用方法 b), 对于纵平面的测量, 源孔径宽度为 L_{SA} , 在同一个平面内, 过渡距离 $z_T = (L_{SA})^2 / (\pi\lambda)$ 。

注 3: 过渡距离单位是米(m)。

[IEC 61828:2001, 定义 4.2.75, 修订: 在定义的格式上有明显差别]

4 符号表

a_h	水听器有效半径 (a_{h3}, a_{h6} : 分别以 3 dB 和 6 dB 处定义为参考)
a_g	水听器几何半径
a_{max}	水听器指定用途时的最大有效半径
a_p	与声束轴的横向距离 (a_{pmaxE}, a_{pmaxH} : 分别考虑避免边界波和首波干涉波的最大值)
a_t	非聚焦超声换能器的有效半径
A_g	超声换能器的几何面积
B/A	Fox-Wallace 非线性参数
c	媒质(通常为水)中声速
C_H	包括接头和一体式电缆的水听器电缆末端的电容
$D(\theta)$	归一化指向性响应函数
e	自然对数的底
f	频率
f_t	用于产生非线性失真的驱动信号基频
f_u	水听器规定带宽的频率上限
I_p	假定与声压平方成比例关系的瞬时声强的量值
$\vec{I}(x, y, z, t)$	在时刻 t , (x, y, z) 点处的瞬时声强矢量
$I(x, y, z, t)$	在时刻 t , (x, y, z) 点处瞬时声强矢量沿传播方向的分量
F	聚焦换能器的几何焦距
j_{max}	扫描半径上最远扫描点的编号
k	圆周波数 ($= 2\pi/\lambda$)
L_{SA}	源孔径宽度
L_{TA}	换能器孔径宽度
\underline{M}	水听器复数灵敏度的常用符号, $M = \underline{M} $ 为其模, $\arg(\underline{M})$ 为其幅角(相角)
$M_c(f)$	电缆末端开路灵敏度
$M_L(f)$	电缆末端有载灵敏度
N_{av}	用于产生时间平均电压波形的取平均的波形数
N	径向采样数
N_{harm}	谐波数
p_0	声压幅值
p_1	换能器表面的声压幅值
$p(x, y, z, t)$	在时刻 t , (x, y, z) 点处的瞬时声压
$P(l)$	在与超声换能器距离为 l 处, 通过无限扩散平面的总超声功率
P_0	换能器发射的总超声功率
rf	射频信号

r	由超声波束中心到扫描点的距离
R	$(\lambda/\pi a_1^2)$, 换能器和水听器之间用瑞利距离 $(\pi a_1^2/\lambda)$ 衡量的归一化距离
R_{1i}, R_{2i}	由波束中心到第 i 个径向声束扫描远端的距离
s	由超声波束中心到最近扫描点的距离
t_H	最近首波的到达时间
t_{TDS}	时间延迟光谱法中自由场测量可利用的时间
TF	声传输因子
$U_L(x, y, z, t)$	在时刻 t , 参考点 (x, y, z) 处水听器电缆末端电压
$U_L'(x, y, z, t)$	在时刻 t , 参考点 (x, y, z) 处包含噪声的水听器电缆末端电压
$U_n(x, y, z)$	在参考点 (x, y, z) 处用水听器测量的均方根噪声级
U_T	超声换能器末端的电压
$\vec{v}(x, y, z, t)$	在时刻 t , 点 (x, y, z) 处的瞬时质点速度矢量
v_t	换能器平板中径向波的速度
ω_f	基频声场分量的束宽
z	水听器和超声换能器表面之间的轴向距离 (z_1, z_2, z_3, z_4 都是依据涉及边界波和首波的标准得出的特定距离值)
z_{\min}	有限尺寸水听器和换能器间的最小距离
z_{pf}	由聚焦换能器到声压焦点处的距离
z_T	过渡距离
Δz	距离差
Z_h	水听器的复数电输出阻抗
Z_L	复数电负载阻抗
α	媒质(通常是水)中的平面波幅度衰减系数
β	非线性参数, 表示为 $\beta = 1 + B/(2A)$
δ	二次谐波的幅值, 用基频声压的百分比来表述
δ_{av}	有限水听器尺寸的声压幅值修正
θ	超声传播方向与 z 轴间的夹角, 等于超声换能器中心与水听器中心的连线和传播方向之间的夹角
θ_1	超声换能器中心与水听器中心的连线和最大灵敏度方向的夹角
γ	波束半径与水听器有效半径的比值
ζ	利用光学测振仪测得的声学位移
θ	超声波入射方向与水听器轴间的夹角 (θ_3, θ_6 : 专指按 3 dB 和 6 dB 量级定义的夹角)
λ	超声波长
λ_1	光波长
ξ	$\pi/2$ 与聚焦换能器的瑞利长度 (a_1^2/λ) , 见 IEC 61828) 的乘积
ρ	测量用液体媒质(水)的密度
ρc	声特性阻抗
σ	非线性失真参数
σ_m	非线性传播参数
τ	猝发声脉冲持续时间 ($\tau_{\max E}, \tau_{\max H}$: 分别为避免边界波和首波干扰的最大值)
ω	圆频率

5 校准步骤概述

5.1 原理

声场特性的绝对测量需要水听器。与时间有关的水听器电压输出 $u(t)$ 可由下式表达：

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$p(t)$ ——压力波形；

* ——卷积；

$m(t)$ ——水听器的脉冲响应。

从傅里叶范畴考虑，如果 $U(f)$ 、 $P(f)$ 和 $M(f)$ 是相应的傅里叶变换，那么合成的电压谱 $U(f)$ 即等于 $P(f) \times M(f)$ 。量 $M(f)$ 是水听器的传递函数（灵敏度），其复数值包含实数和虚数两部分。

为与目前的测量实践相一致，本部分中将水听器看作幅值传感器，而非相位传感器。然而，有证据表明将来相位测量将会变得更为重要，特别是由于解卷积法的应用（见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013），需要水听器的复传递函数。若相位测量的重要程度确有提升，则本部分将按照相位测量所必需的更严格的要求加以修订。附录 I 提供了当前（相对）相位测量能力的汇总。

注 1：相应地，本部分通篇均将水听器灵敏度视为实数（幅值之比）。

本部分中的水听器校准步骤按照如下原理规定：

a) 采用标准换能器的校准

可以使用一个作为超声功率源的标准换能器，通过与其比较的方法校准水听器。换能器的输出功率利用 IEC 61161 给出的辐射压力天平法确定。

b) 不采用标准换能器的校准

这种类型的校准包括：

1) 互易方法校准

基于互易原理的校准，校准中至少需要一个互易换能器。

2) 物理方法校准

其原理是，首先测出如声学位移（利用光学干涉法）等与声场有关的物理参数，再由测量结果计算出水听器处的声压。

注 2：此处水听器“绝对”校准的含义是，“不以另一个水听器作为参考”。这种校准方法有时称为“一级”校准。而二级校准或称替代校准的含义则是，与已经校准的参考水听器比对。当然，参考水听器本身可能是用“绝对”方式或以另一个参考水听器为参考校准的。显然，水听器校准存在两种基本方法：一种是对水听器作绝对校准，另一种是比较两个水听器的灵敏度。第 9、第 10、第 11 章和附录 D、附录 F、附录 H 涉及的是前一种，即绝对校准方法，而第 12 章涉及的则是后一种即比较校准方法。应注意替代法校准通常包含的步骤，感兴趣的使用者可参阅第 12 章和涉及绝对校准的其他条款（在替代法校准情况下，源于基本步骤的不确定度分量对于总的校准不确定度的贡献）。

5.2 校准方法简述

下面列出了校准超声水听器的不同方法适用的频率范围以及相关方法对应的参考章节。表 1 提供了一个典型的可获得校准不确定度的表格。

a) 自由场互易校准

第 9 章

——在自由场中不使用标准水听器的校准，50 kHz~15 MHz

b) 平面扫描法自由场校准

第 10 章

——在自由场中使用标准换能器的校准，500 kHz~15 MHz

- c) 光学干涉法自由场校准 第 11 章
 ——通过对声学位移量的自由场测量进行的物理校准,200 kHz~40 MHz,
- d) 利用标准水听器的比较法校准 第 12 章
 ——与一个已校准的标准水听器进行比较的校准,50 kHz~40 MHz

表 1 本部分中规定的各种校准方法和所指频率范围内能够得到的典型不确定度值

章节	校准方法	频率范围	不确定度
9	两换能器互易法校准(9.3.4)	1 MHz~2 MHz	6%
		10 MHz 以下	10%
		15 MHz 以下	16%
	三换能器互易法校准(9.3.2)	50 kHz~100 kHz	5%
		500 kHz 以下	6%
		1 MHz 以下	10%
10	平面扫描法自由场校准(附录 D)	500 kHz~10 MHz	6%
		15 MHz 以下	18%
11	光学干涉法自由场校准(附录 F)	200 kHz ^a ~1 MHz	7%
		10 MHz 以下	7%
		20 MHz 以下	8%
		30 MHz 以下	10%
		40 MHz 以下	11%
12	利用标准水听器的比较法校准(12.5.2) (附录 G,附录 H)	50 kHz~200 kHz	9%
		1 MHz 以下	8%
		10 MHz 以下	7%
		20 MHz 以下	11%
		30 MHz 以下	12%
		40 MHz 以下	12%

^a 利用光学干涉法实施校准时,不宜取 200 kHz 作为频率下限。此时的频率下限通常由来自水槽或被校准件的反射控制。

5.3 结果报告

水听器组件的电缆末端灵敏度应用 V/Pa 或其十进倍数表述,或是以一规定灵敏度值为参考的对数级 dB 表述。应该说明,给出的灵敏度是电缆末端的开路灵敏度,或是电缆末端的有载灵敏度。在后一种情况下,为了获得规定的灵敏度,需要声明相关的电负载条件,即电负载阻抗。

注 1:“电缆末端”指带或不带水听器前置放大器时,水听器组件输出电缆的末端。

应该给出所指灵敏度的不确定度。如果灵敏度按一定的频率间隔给出,不确定度也应精确地按同样的间隔给出。假如提供了一组频率点的灵敏度,那么应该按照客户需要的频率间隔提供不确定度。

注 2:附录 A 为不确定度评定导则。

应指明所给灵敏度和所赋予的不确定度覆盖的频段。就本部分的目的,灵敏度数值和不确定度数值可以分为几个频段分别给出。频率响应既可以用绝对灵敏度形式给出,也可用以某一频率下的绝对

灵敏度为基准的相对灵敏度形式给出。在以相对灵敏度形式给出时,应指明用作基准的灵敏度值及其对应的频率。

应说明获得灵敏度及其不确定度所用的方法。

任何校准仅在校准所在的环境条件下有效,因而应说明校准时所在的环境条件,包括影响测试设备灵敏度的所有条件。记录的条件应包括:

- 校准日期;
- 水温及其不确定度;
- 水听器组件中是否包括水听器前置放大器,包括唯一性识别信息;
- 水的特性,浸泡时间长度,采用了何种浸润步骤,比如添加润湿剂;

注3:例如,单层、无电屏蔽的薄膜式水听器的灵敏度就会受到所用水媒质电导率的影响。

注4:浸没在水中时,一些水听器的响应会有变化,故须留出足够时间,待其响应稳定之后再完成校准步骤。

- 水听器相对于任何轴的取向,或标注在其本体或外壳上的准直标记;
- 发生支架布置影响水听器灵敏度时的情况,宜具体说明支架的细节;

注5:频率低于200 kHz时,设计水听器支架应特别小心,此时声波波长足够大,使用长脉冲可能会导致支架反射干扰直达波信号。可通过改变脉冲长度,观察水听器信号上的反射效果来评估影响的程度。声吸收器对于抑制这些反射可能是有用的。水听器的灵敏度还会受到水听器装夹方式的影响,这也可以通过系统研究不同的装夹方式进行评估。

- 校准过程中,接到水听器上的任何附加电缆技术特性的详细说明;
- 超声波相对于水听器的标称入射方向;

注6:最后一点非常重要,正如文献[4]中的研究发现,即使是膜片水听器,其响应也会因超声波传播方向相对于水听器的反转而改变。

- 校准过程中水听器经受的最大声压;

注7:附录B介绍了用PVDF制造的,用于表征高振幅声场的水听器的线性。

- 就待测件所作的任何假设(如水听器参考中心的位置);

假如已校准水听器的使用环境与校准时有重大差异,使用者或许要增加其测量不确定度的评估,以便将环境变化考虑在内。

5.4 建议的校准周期

建议的校准周期取决于水听器的特性,其间隔宜由制造商详细说明。

注1:在大多数情况下,校准周期取为1年是适当的(IEC 62127-3)。

对于单纯用于校准的参考水听器,建议每年校准1次。对于在声场中使用的水听器,校准的时间间隔可以缩短。

注2:对工作(声场)水听器需进行核查,其方法既可以是与第二个已校准(参考)的水听器比对,也可以是与采用附录G所述波形概念的检验源比对。在尤其关注工作水听器稳定性的极端情况下,该项核查可在测量前后进行(见IEC 62127-1:2007+修正案1:2013中的“水听器使用”)。

6 水听器校准系统的通用要求

6.1 机械定位

6.1.1 概述

换能器、水听器和反射器(第9章定义的互易方法)需要精密定位和定向,这些部件需夹持在稳定、坚固的可适当调节的支架上。建议给水听器和换能器配备一种可设置侧面位置和方向的功能,以致当由支架控制的水听器的空间位置或相对方向移动一个增量时,水听器输出信号的变化小于0.1 dB。

6.1.2 水听器轴向定位准确度

水听器参考中心与换能器间的轴向距离宜已知并可复现,偏差在 0.2 mm 内。

注 1: 为了得到校准不确定度,可以进行重复测量,包括在换能器声场中相同位置上拆卸和重装水听器。

注 2: 通过获知特定温度下的水中声速,水听器与换能器的距离可以由已知加载到换能器的电激励与声波到达水听器的时间差来估计。

聚焦换能器情况下这个要求可能需要修正,取决于其实际轴上声场的分布。

注 3: 对于工作在本部分频率范围内的聚焦换能器,定位是严格的。以下是一个关于焦距轴向距离变化的估计,即 $\Delta z = F - z$,引起压力减少 1 dB。由理论公式 $\sin[\zeta(1/z - 1/F)] / [\zeta(1/z - 1/F)] = 0.89$,二阶正弦展开得到 $\Delta z = 0.808F^2 / \zeta$,其中, $\zeta = \pi a^2 f / (2c)$ 。

注 4: 衰减是与频率相关的。在下面的示例中,如果线性振幅范围内的超声波在温度为 22 °C 的水中传播,两轴位置分开 2 mm,15 MHz 时超声波幅值衰减 0.09 dB,40 MHz 时超声波幅值衰减 0.7 dB。

6.1.3 水听器的横向定位准确度

当改变水听器的位置以保证信号最大时,应检查水听器输出电压的变化。水听器横向定位的条件是与最大值相比,输出信号衰减不能大于 0.5 dB。

注: 在理想的平面圆形活塞声源的远场中,以及在线性条件下传播的理想的聚焦换能器的聚焦平面上,幅值衰减 0.5 dB 时与声场中轴的横向距离满足 $r = 0.107cz / (fa)$,幅值衰减 1.0 dB 时与声场中轴的横向距离满足 $r = 0.151cz / (fa)$ 。

6.2 温度测量和温度稳定性

水听器的电声特性随环境温度变化。因此建议,无论在什么地方,但凡可能,水听器的校准均应置于与实际应用相同的温度条件下。如无可能,则可以依据以往的校准结果或经验证的解析模型,对水听器的灵敏度和频率响应数值进行修正。修正后的水听器灵敏度和频率响应应比未修正的数值具有更低的不确定度。

注: 基于如下两点原因需要避免温度漂移:

- a) 由于超声在水中的衰减随温度而异(参见附录 A),导致到达水听器的超声波幅度也随温度而异;
- b) 由于水中声速随温度而异(参见附录 A),导致超声信号的传播时间也随温度而异。这关系到猝发声或脉冲选通时间的调节,也关系到时间延迟光谱法选通时间的调节。

关于 a) 点,可给出如下示例。一个处于线性幅度范围的超声平面波,在约 22 °C 的温度条件下传播 15 cm,如温度相差 1 °C,则超声波幅度在 15 MHz 时相差 0.2 dB,而在 40 MHz 时相差 1.5 dB(在水中,小振幅衰减系数与频率的平方成正比。衰减系数随频率的变化参见附录 E)。

关于 b) 点,可提出下面的建议:第 12 章中规定的 II 型测量(两个或多个水听器灵敏度比对)中,应将水听器的轴向距离调节到一个固定的传播时间。

6.3 水听器的尺寸

水听器的敏感元件在其电极表面上产生一个正比于平均声压的电压。因此,如要达到足够的空间分辨力,则有效水听器半径宜小于校准所用声场中最高频率成分的波长。再者,水听器敏感元件表面的实际声压还要受到水听器本身衍射的影响^[5-7]。

注 1: 假如仔细设计水听器,使之具有已知或明确给定的敏感表面,则在给定的频率上,根据敏感元件的已知尺寸进行解卷积运算,有可能从数据中消除空间平均和衍射作用的影响。

注 2: 关于校准中空间平均的影响评估指导见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 和附录 J。

6.4 测量容器和水的特性

测量水槽宜足够大,使得在所关注的最低频率下能够建立自由场条件,并能保证换能器-水听器间

距一定程度的改变,满足测量技术的要求。

槽壁和水表面应与换能器和水听器拉开足够的距离,以确保来自这些表面的反射信号不会干扰换能器产生的第一个直达信号。再者,如果可能,这些表面应该覆以吸声材料。

确保声信号不被反射污染很重要。建议在每次测量开始时进行如下的检查:在采用猝发声或脉冲的所有情况下,均应在换能器-水听器间距变化超过几毫米时再观察水听器的输出信号,以确保接收信号中没有换能器-水听器间的多途回波。假如这些回波信号干扰了接收信号,可通过改变脉冲重复频率予以补救。

水的特性宜与水听器制造商提供的技术要求一致。

注:一些水听器的灵敏度随水媒质的电导率而异。这种情况下,需认真仔细以确保测量时的条件与校准时足够相似。

6.5 输出电压的测量

来自水听器或水听器前置放大器和任何换能器的信号,宜借助示波器、数字信号分析仪、谱分析仪或其他具有足够带宽和灵敏度的合适仪器测量。为了得到可接受的信噪比,水听器或带前放的水听器的信号可能需要额外放大。

与水听器或内置放大器连接的仪器(如示波器、数字信号分析仪、谱分析仪、放大器)宜满足以下要求:

- 在所关注的频率范围内,宜已知其复输入阻抗,以便确定电缆末端的有载灵敏度(见附录 C);
- 在 50 dB 的动态范围内,其输入信号的线性宜优于 ± 0.3 dB;
- 对于数字信号分析仪,为记录时序波形,采样速率至少宜达到 $20f$ M 样本/s,其中 f 的单位为兆赫兹(MHz)。还应调节增益,使数字化波形中至少有 7 位有效数字的比特数。

注:对于本部分中规定的 40 MHz 的上限频率,采样速率需至少达 800 MHz。

7 电学要求

7.1 信号类型

用于校准的信号既可以是连续正弦波、扫频正弦波,也可以是脉冲正弦波(猝发声)。宜选择足够数目的频率点数,以确保水听器的性能在所需要的频率范围得以较好地表征。

注:附录 G 汇总了可用于获取所关注频率范围内水听器校准信息各种波形概念。

7.2 接地

为避免与地面形成回路,换能器的电端应保持不沾水。对于水听器电缆的屏蔽层和水听器前置放大器,宜只有水听器的裸露金属部分接地。其余所有的与地面的接触均宜排除。

注:当采用音频脉冲时,若到达水听器的声信号在电激励信号结束后,本条件可以放宽。

7.3 水听器输出电压的测量

7.3.1 概述

水听器的开路电压宜在水听器电缆末端处测定。

对连续波信号,可用高阻抗的电压表进行测量。但对猝发声信号,最好采用把水听器的电压波形数字化的办法实现,例如使用数字示波器或基于计算机的模数转换器。在为建立测量通道而将放大器、衰减器或滤波器与电压表、数字化转换器配合使用的情况下,这些设备一般需进行校准。

注:附录 H 中介绍了与水听器校准技术有关的连续波信号。附录 G 中介绍了调幅波形概念。

7.3.2 测量仪器的电负载影响

测量过程中,水听器宜连接到高输入阻抗的测量仪器(放大器、电压表、示波器或数字电压表)上。在水听器阻抗偏高(例如低电容的小型压电陶瓷水听器)的情况下,宜考虑测量仪器作为水听器电负载的影响。在这类情况下,为求出开路电压,宜对测得的电压值进行电负载修正。修正可用附录 C 给出的步骤进行计算。如在特定水听器的整个校准过程中采用的是同一电负载,则可将修正应用于灵敏度而非测得的独立电压值。

注 1: 在实际应用中,如果水听器随后是与放大器、示波器等电子仪器一起使用,则整个系统的频率响应必然会受到这些附加仪器的频率响应的影响。

注 2: 应注意,与所连接的测量仪器的输入阻抗相比较,水听器/放大器的输出阻抗是否适当。

7.3.3 加长电缆的电负载影响

假如将加长的电缆接到水听器上,则该电缆将成为水听器的电负载,为获得水听器电缆末端的开路电压,宜进行修正。在电缆和水听器表现为纯容性(对电缆是如此,在远低于谐振的频率范围内,对水听器也是如此)的情况下,可由电缆和水听器的电容求出修正量。在水听器的阻抗不是纯容性(例如在谐振频率附近)的情况下,则宜利用复阻抗进行负载修正。关于上面两种情况的导则参见附录 C。假如在特定水听器的整个校准中使用了同样的加长电缆,则可将修正运用于灵敏度,而不是测得的各独立电压值。

注: 为了减轻电负载的影响,一些水听器配有尽可能就近安装的水听器前置放大器(见 7.3.6)。作为一项减轻电缆谐振影响的措施,这一点在高频下至关重要。

7.3.4 电噪声

电噪声水平会降低电学测量所具有的准确度。宜维持足够的信噪比,以便在不显著损失准确度的情况下进行测量。信号幅值最好比噪声水平高出至少 20 dB。

注 1: 利用具有足够带宽,能够让信号无失真地通过的带通滤波器,可以降低宽频带干扰噪声的水平。

注 2: 当存在电噪声时,可采用对重复信号取平均的办法改善信噪比。对于随机噪声,对 N_{av} 个信号取平均后,可使信噪比提高 N_{av} 的平方根倍。

7.3.5 电串漏(射频拾取)和声干扰

在存在干涉和串漏的情况下,采用信号平均和窄带滤波的办法通常无法带来改善。应确定问题的原因和减轻其影响所能采取的步骤。声干扰水平宜比信号水平至少低 30 dB。

在串漏伴随猝发声信号一起出现时,应注意猝发脉冲的长度是否超过声传播的延迟时间。

注 1: 在这些情况下,串扰会影响直达声信号。可以通过改变音频脉冲的长度并用示波器观察水听器波形的改变来评估串扰的影响。

在连续波信号情况下,串漏至少比信号低 40 dB。

注 2: 在换能器和水听器之间,直接放置某种材料(如展开的聚苯乙烯)的超声衰减器薄层,可以估计无线电频率 rf 或串漏的量级,这将完全压制声信号,而保留用于提取的信号。

7.3.6 内置式水听器前置放大器

在水听器配有内置前置放大器的情况下,可将灵敏度表示为电缆末端灵敏度(包括水听器放大器的性能)。在水听器配有内置前置放大器的情况下,不必对加长电缆或测量仪表造成的电负载进行修正。

8 水听器的准备

8.1 概述

在实际的校准步骤之前,必须按照下述子条款所述,对水听器作精心准备。

8.2 浸润

使用者宜保证水听器充分浸润,清除水听器和校准中主动工作面上的所有的气泡。测量结束后,宜再次检查主动工作面,如果发现有气泡,测量作废。

8.3 水听器支撑物

理想的水听器支撑底座对所测灵敏度的影响宜最小。然而,一些水听器相比其他水听器更容易受到支撑方法的影响。

在底座有影响的情况下,校准水听器时使用的底座应与利用该水听器进行声场测量时所用的一致。若底座影响所测的灵敏度,则校准结果仅在使用该类底座时有效。若水听器对支撑物/底座敏感,则应将底座的布置与校准结果一并陈述。

8.4 电缆的影响

如果因校准的需要而将水听器电缆加长,则宜单独测量加长电缆的电阻抗,以便计算其电负载的影响。关于如何考虑电负载影响的描述见附录 C。

9 自由场互易校准

9.1 概述

本章规定了在无限大水域中水听器的一级校准,即在自由场条件下利用互易原理的校准。

9.2 目的

本章规定了以可能得到的最小不确定度对实验室所用的标准水听器进行绝对校准的各种方法。这些方法覆盖的频率范围为 50 kHz~15 MHz。

9.3 通用原理

9.3.1 概述

对于一个线性、无源、可逆的电声换能器,其用作检测器时的自由场灵敏度与其电流发送响应之间存在着既定的关系。在互易系数的定义中,这一关系是针对换能器系统中各部件的特定布置表达的。

所有基于互易原理的校准,都需要一个互易换能器兼做发射器和接收器。于是,在发射和接收之间的声场中发生的变化已知的前提下,只要测出驱动电流和接收信号电压,即可直接确定换能器的发送响应和接收灵敏度。这种方法的一个明显优点是,只要测出电学量即可确定所需要的声学参数。在实践中,基于互易原理的校准可以采取几种形式,下面进行简要介绍。

9.3.2 三换能器互易校准法

海洋声学中常用的校准步骤涉及到使用三个换能器(IEC 60565:2006)。

但该方法在更高频率下可能难以实施,原因是换能器位置和方向的调节需要更高的准确度,以及数

兆赫兹频段所用换能器指向性响应的复杂性。因此,建议将这一方法用于 50 kHz~1 MHz 频段的校准。

9.3.3 自易校准法

自易校准使用一个测试换能器和一个反射板,仅需进行少量的几何调节。但这一技术一般不用于高频水听器,原因是限于尺寸,其不能为接收信号中适当的信噪比提供足够的声输出(实际换能器的最小直径约为 2 mm)。

9.3.4 两换能器互易校准法

在 1 MHz~15 MHz 频段,标准水听器可用两换能器互易的方法校准,即将水听器放置在由一个辅助换能器产生的已知声场中,该声场已通过自易法量化。这一方法能够提供准确度与为标准水听器给出的性能指标相一致的校准数据,但不涉及如三换能器法那样严苛的设备位置和方位调节。

9.4 两换能器互易校准法

注:本部分中,关于该校准技术的信息见附录 K,仅用于提供信息目的。

9.4.1 设备

反射器应用具有足够直径的不锈钢圆盘制成,以便截取任何辅助换能器在距其表面至少为 1.5 倍近场距离 N_1 处产生的整个超声波束。其中, $N_1 = a^2/\lambda$, a 是辅助换能器的有效半径, λ 为工作频率下的水中波长。

反射器也宜有足够大的厚度,以便在使用最低频率的猝发脉冲时,来自后表面的第一个反射波不会与前表面的直达波发生干涉。反射器的表面平面度宜不超过 $\pm 10 \mu\text{m}$,粗糙度宜不超过 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

9.4.2 步骤

测量时,辅助换能器校准后,移走反射器以校准水听器。

校准辅助换能器时,将反射器围绕平行于其表面,且垂直于水听器和辅助换能器声中心连线的轴转动约 10° 。

注:通过将水听器、辅助换能器和位于它们之间的反射器作共轴布置,该方法得以改进。这样做可以避免由于反射器旋转引入的误差,并使水听器和辅助换能器更容易对准,误差可降低至 0.5 dB。

10 平面扫描式自由场校准

10.1 概述

本章规定了采用平面扫描方法的水听器校准。

10.2 目的

本章的目的是规定校准水听器所用的平面扫描方法。该方法系利用一个输出功率已知的参考换能器。该换能器或声源可能是一个具有已知和可复现的输出功率的标准装置,其性能表征可溯源至国家标准,或者在实行平面扫描校准之前,已经利用辐射压力天平按照 IEC 61161 完成了校准。虽然不确定度降级之后该方法可以应用于更高频率,但适宜的频率范围为 500 kHz~15 MHz。

10.3 通用原理

如果 M_1 是参考中心位于坐标 (x, y, z) 处的水听器的电缆末端的有载灵敏度,则瞬时声压

$p(x, y, z, t)$ 与测得的电缆末端电压 $U_L(x, y, z, t)$ 的关系可表示为:

$$p(x, y, z, t) = U_L(x, y, z, t) / M_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

(x, y, z) ——声场中任意点的坐标;

t ——任意时刻。

其中, $p(x, y, z, t)$ 是水听器移去后其参考中心处的平面波声压值。

在中心位于坐标原点的换能器产生的超声场中, 某一参考点处的瞬时声强矢量 $\vec{I}(x, y, z, t)$ 由下式给出:

$$\vec{I}(x, y, z, t) = p(x, y, z, t) \cdot \vec{v}(x, y, z, t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\vec{v}(x, y, z, t)$ ——参考点处的瞬时质点速度矢量。

此处仅考虑 \vec{I} 和 \vec{v} 沿传播方向的分量, 从而把它们限制为标量 I 和 v 。

对于按照一定条件 ($a/l \leq 0.5$) 传播的行波 (其中, l 为至换能器的轴向距离), 瞬时声强由下式给出^[9]:

$$I(x, y, z, t) = [p(x, y, z, t)]^2 / (\rho c) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

ρ ——水的密度;

c ——水中声速。

(附录 E 给出了建议用作功率测量传播媒质的水的 ρ, c 和温度的关系。)

通过位于 $z=l$ 处, 垂直于 z 轴的平面的总超声功率 $P(l)$ 由下式给出:

$$P(l) = \iint I(x, y, l, t) \cos\theta \, dy \, dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$dy \, dx$ —— $z=l$ 的平面上的一个面积元;

θ —— z 轴与传播方向的夹角;

积分式表示对整个平面的积分。

注 1: 本部分中, 在距离 l (大于 a^2/λ , 其中 a , 是换能器的有效半径) 处, θ 可以看作 z 轴与换能器中心和水听器中心连线的夹角。

式(6)中的横线表示用下式对任何量 g 定义的时间平均值:

$$\bar{g} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[(1/2T) \int_{-T}^T g(t) \, dt \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

对式(5)取时间平均得:

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{p(x, y, z, t)^2} / (\rho c) \quad \dots\dots\dots (8)$$

再将式(3)代入上式得:

$$\overline{I(x, y, z, t)} = \overline{U_L(x, y, z, t)^2} / (M_L^2 \rho c) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$U_L(x, y, z, t)$ ——位于参考点 (x, y, z) 处的水听器在 t 时刻的电缆末端电压。

其中, 假设电缆末端电压平方的时间平均为导出值。由式(5)可得, 在平面 $z=l$ 处, 忽略 $\cos\theta$ 项 (参见 D.3.9), 则电缆末端有载灵敏度 M_L 由下式给出:

$$M_L = \left\{ \frac{1}{P(l) \rho c} \iint \overline{[U_L(x, y, l, t)]^2} \, dy \, dx \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

于是, 利用水听器扫描超声波束中的一个平面, 再将水听器电压信号的平方的时间平均值的积分除

以波束的总功率,即可得到水听器的电缆末端有载灵敏度。

注2: 电缆末端开路电压灵敏度 M_0 可以根据附录 C 所述的方法,通过水听器和放大器的已知电阻抗确定。

10.4 步骤的要求

10.4.1 水听器扫描

利用水听器扫描 $z=l$ 平面处的超声波束平面有多种方法。最全面的做法是,将水听器作二维栅格扫描运动从而获得采样点的矩形阵列。如换能器产生的波束剖面可以假设为近似圆柱对称形式,则可以换用另外一种扫描方法。在这种情况下,可以进行多次径向的波束扫描。这些扫描均宜经过超声波束中心,且每一扫描之后转动相同的角度。例如,如果一个平面共扫描了两次,则彼此应互成 90° 角。附录 D 是有关扫描类型选择的导则。

10.5 步骤

10.5.1 功率测量

校准中需使用一个带有平面圆形敏感元件的,已知其在某个特殊频率 f 时的输出总功率的换能器。该换能器可以是一个标准换能器^[10],在此情况下,宜已知其以具体激励电压表示的输出功率。

或者,依照 IEC 61161^[11] 中的规定,采用辐射力法测定其输出功率。

无论采用哪种方法,正弦连续波激励下频率为 f 时换能器发射的输出总功率 P_0 的测定,既可以在某一特定驱动电压 U_T 下,也可以在覆盖某一范围的不同电压下。这些测量提供的是输出功率除以电压平方的商值(见 IEC 61161)。

10.5.2 换能器的安装

将换能器固定在波束扫描水槽中,并将其声束轴调节至与扫描系统的 z 轴平行。将待校准的水听器安装在扫描水槽中,并依照 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013 中规定的步骤对准。在对准步骤完成之后,扫描系统的 z 轴宜同时平行于换能器的声束轴和水听器的最大灵敏度方向。

注:典型的安装方式通常是利用换能器和水听器的水平或垂直结构。不管使用那种方式,换能器、水听器和扫描系统的其中一轴(例如前面提到的 z 轴)均应保持在同一直线上。

10.5.3 测量条件

用包含足够振荡个数的选通正弦激励源(猝发声)驱动换能器,以保证频率 f 的稳态条件,而驱动电压既可以是特定值 U_T ,也可以是辐射力法所用范围内的某一电压值。水听器放置在换能器的远场中 $z=l$ 处,并置于峰值声压点。距离 l 需仔细选择,要综合考虑空间平均作用、指向性、衰减修正(见附录 D)以及对最大信噪比的需求。

注:处于 $a_1^2/\lambda \sim 3a_1^2/\lambda$ 之间的 l 值一般能满足要求,其中, a_1 是非聚焦超声换能器的有效半径, λ 是波长。如无法获知非聚焦换能器的有效半径 a_1 ,可用其几何半径代替。

如超声换能器无法实现猝发脉冲激励,可以改用连续波激励。这种情况下,应特别仔细,以避免来自水槽壁、水听器及其支架引起的反射和驻波的形成。

10.5.4 测量

在水听器以栅格扫描或者多次径向声束扫描方式在垂直于 z 轴的 $z=l$ 平面上扫描的同时,测量水听器输出电压的幅值。测出水听器输出电压 $U_1(x, y, l, t)$ 随水听器在超声波束中位置的变化。确定被扫描区域的范围时应考虑噪声级。沿超声波束面积对电压平方求和,求得水听器在频率 f 处的电缆末端有载灵敏度值(参见附录 D)。

10.6 修正和不确定度来源

在确定水听器电缆末端负载灵敏度时,要对总体不确定度进行最后评述。附录 D 中提供了关于评估不确定度分量的详细指导。

11 采用光学干涉法的自由场校准

11.1 概述

目前,采用光学方法的水听器自由场校准仅限于专门的实验室。本部分中,关于这类校准方法的资料见附录 F,以供参考。

11.2 原理

一般说来,这种方法涉及利用激光确定处于声场中某一位置的换能器产生的位移。这类方法是利用声场中随声位移一起运动的薄膜或薄片进行的。厚约几微米的薄片表面经金属化处理,具有反光特性。利用激光干涉法可以检测出位移。在换能器远场,位移与声压呈简单关系,因而得以确定声场中某点的声压。将水听器置于确定声压的同一位置,测定其输出电压。附录 F 中介绍了几个国家标准实验室关于该项技术已经实施过的两种方案。

12 利用标准水听器的比较法校准

12.1 概述

本章规定了两种类型的测量。

I 型——测定指向性响应;

II 型——两个或多个水听器灵敏度比对。

12.2 目标

前面提到的测量都属于“相对”测量。相对测量的意思是:其一,在几乎完全相同的条件下,对换能器的输出电压进行两次或多次测量,相关参数中只有一个在变;其二,所考虑的是测量结果的比值(或结果比值的对数)。

注:就 II 型测量而言,下面内容中假定:要比对的是两个水听器的灵敏度。这可以很容易地推广到三个或多个水听器。

12.3 原理

在 I 型测量中,被改变的参数是水听器的方位角。所考虑的是水听器处于某一角度时的输出电压与处于参考方位时输出电压的关系。当然,在实践中,会就一系列的方位角处理这种关系。该类型测量的目的是按照 IEC 62127-3 获得指向性响应和有效半径。

在 II 型测量中,水听器本身被另一个水听器取代。其中一个参考水听器,另一个是待测水听器。假如已经知道参考水听器的灵敏度(通过校准),则通过该类测量即可获得待测水听器的灵敏度;假如已经知道参考水听器的频率响应(通过校准),则通过该类测量即可获得待测水听器的频率响应。

这类相对测量具有以下共同特点:它们都是在水槽中,且在下面将要表征的换能器发射的超声场中进行的。至关重要的是,这种将两个水听器彼此相互联系的测量,应尽可能在相同的条件下进行,包括:在声场中的位置相同,激励条件(波形和幅值)相同,环境条件(例如温度)相同,等等。总体目标是在平

面波条件下进行工作。

对于 II 型测量,校准不确定度受空间平均作用的影响。12.6 规定了各种比对组合的不确定度评估方法。

12.4 步骤要求

12.4.1 声源换能器

此处规定的测量所用的超声源换能器,宜是一个在水中使用的圆形对称的超声换能器。附录 G 介绍了它们与施加于换能器的电激励、换能器类型和水听器所在位置的声波特性(线性、非线性失真)有关的各种概念。测量中既可以采用对应水听器位置概念 A、B、C 的平面非聚焦换能器,也可以采用对应水听器位置概念 D 或 E 的聚焦换能器。依靠所选择的波形概念,宜能够在关注的频率点上产生所需要的信号幅度(水听器信号中的适当信噪比)。为此还另需用于激励换能器的放大器。换能器宜具有时间稳定性,而且不宜导致水温升高超过可接受的温度漂移限制。

注:建议在每次测量开始之前进行下述的检查:在采用猝发声或脉冲信号(时间波形概念 a, b, c)的情况下,均应在换能器-水听器之间距离改变在数毫米以上时再观测水听器的输出信号,以确保接收的信号中没有换能器-水听器之间的多次回波。如果回波干扰了接收信号,可以通过改变脉冲重复频率予以补救。

12.4.2 声源换能器的激励信号

声源换能器激励信号的幅度宜稳定在±1%以内,中心频率宜稳定在±0.1%以内。

12.4.3 测量系统

测量系统应符合第 6、第 7、第 8 章中规定的要求。

12.5 步骤

12.5.1 I 型测量:测定水听器的指向性响应

按照所选择的水听器位置概念(参见附录 G),将水听器置于水槽内的声源换能器声场中,并将水听器的参考中心置于换能器的声束轴上。准备一个带有机械装置的机构,以使水听器能够围绕一个垂直于声束轴的轴旋转,且针对相互垂直的两个旋转轴能独立地实现这一要求。旋转角度宜能以等于或优于 $\theta_0/10$ 的分辨率进行测量,其中 θ_0 是 -6 dB 角度,其值可在测量之后得知,也可在测量之前利用水听器的几何半径粗略估计。

旋转水听器时,宜保证其参考中心始终处于声场中的同一位置,以符合第 6 章的定位准确度要求。

注 1:对于无背衬的膜式水听器,通过将其围绕中心旋转 180°,观察由此导致的超声波到达时间的偏移,以检查其是否确实围绕中心旋转;对于针状水听器,需用专门的夹子固定,以确保其围绕参考中心旋转。

测量可采用两种办法进行。在某一恒定频率下,测量水听器输出电压随旋转角度的变化;或者在某一定旋转角度下,测量水听器输出电压随频率的变化,但要改换几种旋转角度。在后一种情况下,须将数据重新整理,以获得某一恒定频率下水听器输出电压随旋转角度的变化。用测得的水听器输出电压除以在最大输出电压方向上测得的电压值。

注 2:为给出所需要的角度分辨率指标,可以进行下述的评估。假定水听器半径为 0.25 mm,22 °C 时水中声速为 $c=1488$ m/s,由 IEC 62127-3 中的式(2)可求得:频率为 15 MHz 时, $\theta_0=8^\circ$;频率为 40 MHz 时, $\theta_0=3^\circ$ 。

注 3:附录 E 列出了水中声速 c 的值。

利用指向性响应测量,可用下列两个表达式定义水听器敏感元件的有效半径:

$$a_{hs} = 1.62c / (2\pi f \sin\theta_3) \dots\dots\dots(11)$$

和

$$a_{\theta_6} = 2.22c / (2\pi f \sin\theta_6) \quad \dots\dots\dots(12)$$

θ_3 和 θ_6 分别是水听器信号幅度下降 3 dB 和 6 dB 时的旋转角度。

注 4: 有效水听器半径对评估空间平均作用至关重要(参见附录 J 和 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013)。对于某些类型的水听器,其有效半径可能与频率相关;而对于任一特定的水听器,则可能与选取的轴相关。关于有效水听器半径的进一步信息见 IEC 62127-3。

12.5.2 II 型测量:使用标准水听器的比较法校准

该型涉及将数个水听器交替地置于声场中的一系列测量。最小系列包括两次测量,每次放一个水听器。但建议在测完第二个水听器后,将第一个水听器再复测一遍(导致总共测量三次),以验证所施加的声场的稳定性。由五个或更多个单次测量组成的系列效果会更好。

在每一个单次测量中,均将被校准的水听器置于水槽内声源换能器的声场中,并依照所选择的水听器定位概念(参见附录 G),置于相应的位置。通过对水听器的横向和旋转调节使其输出信号最大。

被校准的水听器的参考中心,宜准确置于超声场中为这一测量系列选择的相应位置上,以符合第 6 章中的位置准确度要求。应准备一个带有机电装置的机构,以便进行这类定位。另一附加的有用步骤是,观察超声猝发或脉冲的渡越时间(传播时间),作为换能器-水听器距离的标志。

测量水听器输出电压随频率的变化,并将其结果与另一个水听器的测量结果联系起来考虑。

假如两个水听器的测量不是在相同的电负载条件下进行的,清楚地标注出来,并给出同样负载条件下计算水听器灵敏度比值的公式。

12.6 水听器的最大尺寸

在 12.5 规定的测量中,为避免因空间平均作用导致的测量误差,有效水听器半径不宜超过 a_{\max} 的极限值,如附录 J 中所述, a_{\max} 与实际测量的细节有关。

如无法遵从这一要求,则在某一具体情况下,比如在 II 型测量中,如果待比对的两个水听器具有相同的有效半径(相差在 $\pm 5\%$ 以内),可以采用更大的水听器半径。

假如这两项要求都不能满足,则在可能的情况下,可对所得结果进行理论修正,但对此宜清楚说明和解释,并宜给出关于所用公式的参考文献。

附 录 A (资料性附录)

在自由场中校准水听器的测量不确定度的评估

A.1 概述

欲使其真正有意义,校准结果宜和与其相关的不确定度一并给出。校准不确定度的评价和表达宜遵循 ISO 的《测量不确定度表达指南》(ISO GUM)^[3]。不确定度分量一般按其评估方法分类:

- A 类——用统计方法评价;
- B 类——用其他方法评价。

A.2 总的(扩展)不确定度

总不确定度应按照 ISO GUM^[3]中描述的方式由所有的不确定度分量求得。

进行不确定度分量合成时,如各分量的值是用 dB 表示的,应特别注意。在合成之前,应先将其数值表达为线性形式(如该量的百分数或单位数),而不用 dB 数。扩展不确定度的最终值,既可以采用该量的单位数、百分数,也可依据需要转换为 dB 数。

A.3 常见的不确定度来源

下面所列是水听器校准中常见不确定度来源的一个清单。该清单不能说毫无遗漏,但在评估某一校准方法的某一具体实施时,可以作为指导。随所选择的校准方法及其实施过程的不同,需要评估的将只是其中的某几项(即可能不是全部)。例如,对所有信号都采用相同的测量通道(放大器、滤波器、电压表等),且只测量幅度之比,可将来自测量仪器的误差降至最低。不过,既然并非所有的实施过程中都是如此,清单中已经包含的只是这些误差来源的成分。

自由场互易校准特有的不确定度来源有:

- 关于声场的任何假设的不准确,例如,声场为球面波声场;
- 间隔距离的测量误差;
- 声波频率值的误差;
- 水密度值的误差。

比较法校准特有的不确定度来源有:

- 参考水听器校准中的误差(比较法校准中的主要误差来源);
- 比较法校准中使用的任何参考换能器的短时不稳定性(比较法校准使用的参考换能器输出的不稳定性);
- 比较法校准中参考水听器的不稳定性(即先前经绝对校准的参考水听器灵敏度的变化);
- 与参考水听器绝对校准时所处环境条件(如:温度、浸润、水听器夹具的细节等)相比,比较法校准的环境差异,这种差异将会导致参考水听器灵敏度的变化;
- 关于参考源产生的声场的任何假设的不准确,例如,声场为球面波声场;
- 处于声场中相同点上的各个水听器的定位误差;
- 参考换能器的电驱动条件不够稳定,包括采用了与其自己绝对校准时不同的驱动信号,以致不够线性;

——与参考换能器绝对校准时相比,比较法校准中环境条件(如:温度、浸润时间长度、安装细节)的差异,这些差异将会导致参考水听器灵敏度的变化。

上述所有方法共同的不确定度来源有:

- 来自声反射的干扰,导致不能满足自由场条件;
- 声远场条件的欠缺;
- 在水听器尺寸有限和不满足完全平面波条件的情况下进行校准时,水听器的空间平均效应;
- 错位,尤其在高频时,水听器的频率响应远非全向;
- 来自水听器夹具的声散射(或是夹具接收和传递的振动);
- 接收电压的测量误差(包括电压表、数字化仪表等测量仪器的准确度);
- 所用的任何放大器、滤波器和数字化仪表增益的不准确;
- 驱动电流或电压的测量误差;
- 由于测量系统不够线性造成的误差(采用一个经校准的衰减器进行补偿,可显著减轻这种因素的影响);
- 所用的任何电信号衰减器的不准确;
- 包括接收到的射频在内的电噪声;
- 由于考虑加长电缆和前置放大器的负载作用所进行的任何电负载修正的不准确;
- 附着于换能器上的空气或气泡,这一点应通过换能器的充分湿润和浸泡降至最轻;
- 环境条件,如水温等。假如校准结果规定了条件,并声明校准仅对所称条件有效,则校准结果就无需修正。

附录 B

(资料性附录)

PVDF 聚合物传感器在高声强超声场中的特性

B.1 概述

高声强超声场常被用于生物医学超声领域。现已确认：该类声场会导致包括波形失真和传播媒质中产生谐波等非线性现象^[12-14]。现已证明：经校准的宽带薄膜或针状聚合物超声水听器最适合于高强度超声场的精确测量。该类水听器的基本参数，如频率响应、指向性响应和灵敏度等，文献[15]中均有描述。然而，有关水听器响应线性的资料相当有限。在医疗应用中，线性是一个特别重要的问题；现代的超声诊断设备能够产生 10 MPa 量级的瞬时声压^[16]，仅比体外引发冲击波发生器（碎石机）焦域中所见的幅度低一个数量级。

另外，水听器压力响应的线性对非线性校准方法^[17]的实施至为关键。

为确定利用 PVDF 聚合物所制超声水听器的线性情况，进行了下面所述的测试。文献[18]中发表了对所讨论的结果的部分介绍。

B.2 理论背景

有限振幅声学理论在水声和空气超声中有许多应用^[12]。文献[13]、[14]中指出：生物医学超声成像频段也包含有非线性传播现象。

众所周知，波形失真的程度取决于与声源的距离^[12]。这一关系为区分因非线性传播现象引起的那些波形失真究竟是所依赖的微分方程的非线性所致，还是传播介质（此处是水）的非线性所致，提供了一个实用的判据。这一实用判据使得能够将之前提及的失真与源于水听器对声压的非线性响应的波形失真，或者源于声发射器或声源对激励电压的非线性响应的波形失真区分开来。下面的测试中采用了这一判据，以确保观察到的非线性与可能的非线性电声传输函数不相关联。

B.3 测试

这里所述的所有测量都是在温度为 $21.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的除气蒸馏水中进行的。实验装置中采用了工作频率在 2.25 MHz~10 MHz 之间的不同的超声源以及包括针状和薄膜式在内的水听器^[15,19]，此外，还采用了一个能够产生冲击波的光声器件^[20-21]。超声源能够产生的声压幅度达 5.5 MPa [相当于瞬时（空间峰值时间峰值）声强达 $1\ 000\ \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]，而光声式声源能够产生的冲击波压缩期峰值声压幅度超过 10 MPa。

利用 X-Y-Z 精密控制器系统仔细地将声源和水听器对准。将水听器检测的信号馈送至谱分析仪并显示在屏幕上以确定各谐波成分。同时，在示波器上观察信号，并记录与声源轴向距离不同的若干点对应的传播波形。

在每一组测量之前，都对下述情况进行验证：波形失真由非线性传播现象，而不是因为声学端口（发射器表面）与激励电压之间的非线性依赖关系引起的。如上所述，验证检查利用了声波失真取决于到声源的距离这一事实，只牵涉到轴向不同距离上记录的发射脉冲。这些测量是利用针状和无背衬薄

膜两种水听器完成的^[15,19]。

采用了三种不同方法确定随着声压的增大水听器响应的线性情况。

在第一种方法中,检测了已校准的针状水听器的线性,具体做法是:观察随着声源换能器激励电压的增加,直径为 0.6 mm 和 1 mm 的两种针状水听器的输出电压的增加。在所用换能器的焦域范围内,且频率为 3 MHz 时,利用水听器测得的压缩期最大峰值声压为 5 MPa。

第二种方法涉及测量一给定声源产生的总声功率。利用已校准的针状和微型聚合物薄膜水听器扫描声场,然后算出总辐射功率^[22],并将测量结果与在声场中同一位置利用声辐射力天平所得测量结果进行了比较。为尽量减小因空间平均作用造成的误差,这些测量都是在 1 MHz~2 MHz 频率范围内进行的。

第三种方法涉及光声转换器的使用。关于更传统的超声外科设备的早期工作^[23-25]表明:这类装置应产生声压幅度按“距离反比定律”降低的发散声场。

注:“距离反比定律”或“距离反比特性”是指:当声源与所考虑的声场点之间的距离增大时,声压幅度随距离成反比降低。

B.4 结果

这里所述的线性测量,是利用 30 个直径为 1 mm 和 0.6 mm 的针状水听器及 10 个左右薄膜水听器进行的^[15,19]。

在前面提到的第一种方法中,对已校准的针状水听器线性的检验方法是:逐渐增加 3 MHz 声源换能器的激励电压,测量直径为 1 mm 和 0.6 mm 的针状水听器输出电压的相应增加。以激励电压与水听器信号间的关系图表示其线性关系。

在第二种方法中,用已校准的针状和微型聚合物薄膜水听器扫描声场,并计算总辐射功率。然后,将计算结果与利用辐射力天平在声场中同一位置的测量结果进行了比较。对于同样的声源(1.5 MHz 或 2.25 MHz),利用辐射力天平测得的声功率与利用平面扫描法所得结果之间相差约 22%。

第三种方法涉及在光声转换器输出端的测量。在 1 MHz~10 MHz 的频率范围内,观察声源产生的波形,发现它们呈现出与传播介质的非线性特性相关的非线性传播现象对应的形状特性。光声器件产生了类似于在商品碎石机焦域内所见的波形。实验证实了这类器件的“距离反比特性”——测得的最大声压幅度达 10 MPa 量级,与“距离反比特性”的偏差在实验的不确定度范围内(15%)^[21]。

与“距离反比定律”相比,超出总的测量不确定度的任何矛盾,均意味着水听器可能产生了非线性响应。不过,使用针状型和薄膜型水听器时,并未观察到这类矛盾。

B.5 结论

测定了多个 PVDF 聚合物水听器声压响应的线性。测量是在声压幅度为 10 MPa 量级进行的。采用了不同的测试方法,利用声学换能器获得的结果清楚地表明:观察到的非线性仅与声波传播有关。不同类型的聚合物水听器——针状的和无背衬薄膜的——所得结果极为一致。

更进一步,对于针状和薄膜水听器,均未观察到与“距离反比定律”之间有超出总的测量不确定度的矛盾。如上所述,这类矛盾意味着,随着声压的增大,声压响应出现了非线性。

在上面所述的测试中,声压幅值都限制在 10 MPa 左右。支持上面所述结果的附加证据,出现在利用水声专用 PVDF 水听器进行的测试中^[26-27]。在高达 69 MPa 的静水压下,观察到的水听器频率响应变化仅为 0.6 dB,可以忽略不计。

依据这些初步测试的结果和文献[26]、[27]中发表的资料,可以得出结论:在脉冲回波成像系统常用的声强范围内,聚合物水听器呈现出非常好的线性^[16]。

此外,在碎石机焦域内测得的压力-时间波形并未呈现出任何意料之外的特性。碎石机焦域中所见的声压幅度可达 100 MPa 量级,但当降低激励电压或液电系统中施加于电极上的电压时,测得的冲击波形状保持不变。虽然这一情况不能构成关于 PVDF 材料线性响应的严格获得的证据,但另一方面,当前尚无证据表明,一个合理设计的超声 PVDF 水听器在 70 MPa 以下的声压范围内存在非线性响应。

附 录 C
(资料性附录)
电负载的修正

C.1 概述

水听器灵敏度通常定义为电缆末端的开路电压灵敏度,这是水听器电缆末端没有连接电负载时的灵敏度。当有特定的电负载,如示波器、放大器或加长电缆用于水听器输出端时,水听器电缆末端负载灵敏度有可能以下面的方式与电缆末端的开路电压灵敏度相关。

C.2 复阻抗的修正

考虑一般情况,水听器被视作电输出复阻抗为 \underline{Z}_h 的二端网络,并与电负载复阻抗 \underline{Z}_l 相连。水听器的电缆末端负载灵敏度为 M_l ,当特定负载与之相连时,其与电缆末端开路电压灵敏度的关系见式(C.1):

$$M_l = M_c \sqrt{\frac{\operatorname{Re}(\underline{Z}_l)^2 + \operatorname{Im}(\underline{Z}_l)^2}{[\operatorname{Re}(\underline{Z}_l) + \operatorname{Re}(\underline{Z}_h)]^2 + [\operatorname{Im}(\underline{Z}_l) + \operatorname{Im}(\underline{Z}_h)]^2}} \quad \text{.....(C.1)}$$

式中:

$\operatorname{Re}()$ 、 $\operatorname{Im}()$ ——复数阻抗的实部和虚部。

通常,电负载可以用电阻 R_l 和电容 C_l 的并联关系表示。在这种情况下, $\operatorname{Re}(\underline{Z}_l)$ 和 $\operatorname{Im}(\underline{Z}_l)$ 的表达式为:

$$\operatorname{Re}(\underline{Z}_l) = \frac{R_l}{1 + \omega^2 C_l^2 R_l^2} \quad \text{.....(C.2)}$$

$$\operatorname{Im}(\underline{Z}_l) = \frac{-\omega C_l R_l^2}{1 + \omega^2 C_l^2 R_l^2} \quad \text{.....(C.3)}$$

式中:

ω ——角频率。

C.3 电容的修正

假定水听器和负载的阻抗都是容性的,则可进一步简化公式。当水听器的工作频率远远低于谐振频率,而其负载是接长电缆时,这个假设通常是有效的。这种情况下,假如 C_h 是包括任何电缆、连接器的水听器电缆末端的电容,上面的公式可简化为:

$$M_l = M_c \left[\frac{C_h}{C_h + C_l} \right] \quad \text{.....(C.4)}$$

附录 D
(资料性附录)

利用平面扫描法的水听器绝对校准

D.1 概述

本附录提供了一个详细的利用平面扫描技术校准水听器的方法。在水听器的机械扫描和评估校准不确定度的重要来源方面具有一定的指导作用。

D.2 水听器扫描方法

利用水听器扫描 $z=l$ 处的超声波束有多种方式。最通用的做法是将水听器作二维栅格扫描运动从而获得空间采样点的矩形数据阵列。这样得到式(D.1)：

$$\iint [U_l(x, y, l, t)]^2 dy dx \approx \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [U_l(x_m, y_n, l, t)]^2 \Delta y \Delta x \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

- M, N —— y 和 x 方向上的空间采样点数；
- $\Delta x, \Delta y$ —— x 和 y 方向上的采样步长。

当换能器的波束剖面假设成近似圆柱对称形时，还可以用另外一种扫描方法：多重波束径向扫描。每一次扫描都要经过超声波束中心，每个扫描之后转动相同的角度。例如，如果一个平面共扫描了两次，则两次扫描之间间隔 90° 。若扫描次数为 N ，可得式(D.2)：

$$\iint [U_l(x, y, l, t)]^2 dx dy \approx (\pi/N) \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{R_{1i}}^{R_{2i}} [U_l(l, r)]^2 r \Delta r + [U_l(l, s)]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

- r —— 每个扫描点到超声波束中心的距离，当波束中心定在 y, x 坐标系统的原点时， $r = (y^2 + x^2)^{1/2}$ ；
- Δr —— 扫描步长；
- R_{1i}, R_{2i} —— 波束中心到第 i 次扫描端点的距离；
- s —— 波束中心到最接近于波束中心的扫描点的距离。

式(D.2)等号右边的第二项是超声波束中心总积分的贡献。

注：式(D.2)中没有假设一个扫描点与波束中心相符或者所有的扫描点是从波束中心开始均匀分布的。

D.3 修正和测量不确定度来源

D.3.1 总功率

对于第 10 章所述的测量方法，水听器放置在距离换能器 $z=l$ 处，由于声传播路径引起的衰减，需要对换能器的输出总功率 P_0 (假设位于 $z=0$ 处) 作一个修正，表达式如下：

$$P(l) = P_0 \exp(-2\alpha z) \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

- P_0 —— 换能器的输出总功率；

$P(l)$ ——在水听器上的超声波束的总功率；

α ——平面波在水中的幅度衰减系数。

附录 E 提供了式(D.3)中所用的与温度和频率有关的衰减的值。

水听器上的超声波束的总功率 $P(l)$ 的值中包含有三种不确定度的来源,应对每一种不确定度来源进行评估。第一种是总输出功率 P 。测量中的系统不确定度,可能来自标准发射器或者已用辐射压力法测量输出功率的换能器(见 IEC 61161)。

第二种不确定度的来源是由波束扫描过程中换能器的实际输出总功率与标定输出功率之间的差异引起的。这种不确定度可以通过对已知换能器的稳定性来评估。对于每一个使用的换能器都要标定这一类的不确定度。

最后一项不确定度源于对水中衰减的修正。这一类不确定度既会发生在衰减系数的测定时,也会发生在换能器和水听器之间距离 l 的测量时。在所有温度(参见文献[28]、[29])下,衰减系数 α/f^2 可以认为有 1.7% 的不确定度。距离 l 的测量可以通过示波器观察换能器的激励信号和水听器接收信号之间的时间延迟来获得。

D.3.2 水听器的接收信号

可以采用示波器、数字转换器或者其他适当的系统确定水听器接收信号 $U_L(x, y, l, t)$ 的幅度。要标定在信号测量中的不确定度。这类不确定度可以依据接收信号的谐波分量、水听器的频率响应以及测定水听器接收信号的方法来确定。

在失真波形基础上的平面扫描会导致严重的校准误差^[30]。当用正峰值来测定水听器接收信号时,会导致最大的误差;当用峰峰值或者负峰值来测定时,误差会减小。

D.3.3 积分

在平面扫描技术中,要获得足够多的波束采样点。对于径向声束扫描,并假设柱对称时,可以采用与文献[28]中相似的分析方法来确定采样点数,即在声压主波束轮廓内,低于峰值 6 dB 的两个点之间至少要有 7 个采样点(包含 6 dB 的两个点);或者在声压平方轮廓内,低于峰值 6 dB 的两个点之间有 5 个点。由数值积分引起的水听器灵敏度不确定度小于 $\pm 1\%$ 。若应用光栅扫描技术,式(D.1)中的 M 和 N 要适当选择,使得 y 方向和 x 方向上过波束中心的波束扫描在低于声压波束轮廓峰值 6 dB 的两个点之间(包括这两点)都至少有 7 个点,且由数值积分引起的水听器灵敏度小于 $\pm 1\%$ 。由于采样点数有限而引起的不确定度要进行标定。

在径向声束扫描中,关于圆柱对称性的假设可以通过对每一条径向扫描数据的分析来检验,具体如下:

$$\sum_{j=0}^{j_{\max}} [U_L(l, r_j)]^2 r_j \Delta r \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

r_j ——波束中心到每一条径向扫描端点之间的距离;

j_{\max} ——一条径向扫描中最远扫描点的数目。

注:这里假设每一个径向扫描已经压缩为两个径向(或者半扫描),数据可以分别分析。

这些数据的最大和最小值之间差值的百分比需要确定。当采用径向声束扫描法时,这些数据的一半宜用来标定由于圆柱对称性的假设所引起的不确定度。

D.3.4 指向性响应

除非水听器的指向性不可预知,否则水听器指向性需要进行修正计算。对于水听器指向性不可预知的情况,每一个扫描点处宜调整水听器的角度以获得最大的输出电压。不过并没有必要在每一个扫

描点进行优化调整,尤其当采样点间隔在水听器的超声入射角度上仅有微小的改变时。修正计算步骤如下:首先,确定水听器在频率 f 上的指向性。设定归一化指向性函数 $D(\theta_1)$,其中, θ_1 表示角度方向。为了修正前面所述的测量数据,需将水听器的接收信号 $U_L(x, y, l, t)$ 除以指向性因子 $D(\theta_1)$,其中, $\theta_1 = \arctan[(x^2 + y^2)^{1/2} / l]$ 。

采用 12.5 所描述的方法确定水听器的指向性响应。

D.3.5 水听器的有限尺寸

由水听器敏感元件的有限尺寸所引起的不确定度需要评估,水听器响应对应于其有源元件上的声压积分,因此有必要考虑空间平均的修正^[5,7,31,32,2]。修正幅值量级的评估宜通过计算声场中一点的声压与水听器表面的平均声压之间的差异而获得(文献[2],IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013)。为了精确计算,采用水听器的有效面积来定义水听器表面区域。有效面积可由水听器有源元件的有效半径来确定,而有源元件的有效半径则采用 12.5 的方法确定^[6]。对平面扫描方法中的积分结果[式(10)]贡献最大的是波束中心区域,因此,仅需确定接近超声波束中心的区域的不确定度和修正系数。最可取的方法是在距离换能器 l 处进行测量,可以使得波束中心的空间平均影响小于 5%。

D.3.6 噪声

总的来说,水听器宜扫描到距离声束轴某一距离处,该处除了噪声之外应观察不到任何信号。对水听器信号平方的积分进行修正时,宜考虑计算来自噪声的贡献,首先确定噪声级。噪声级将通过重复整个扫描步骤,在换能器关闭时在每个点测量均方根噪声级来确定。均方根噪声级 $U_n(x, y, l)$ 将被从测得的信号中以下面的方式减去。如果水听器信号平方的平均值为:

$$\overline{[U'_L(x, y, l, t)]^2} \dots\dots\dots (D.5)$$

则在修正了来自噪声的贡献后,水听器信号的平均值为:

$$\overline{[U_L(x, y, l, t)]^2} = \overline{[U'_L(x, y, l, t)]^2} - U_n^2(x, y, l) \dots\dots\dots (D.6)$$

当水听器处于平面扫描极限距离时,低于噪声级的超声信号就可能出现。在这种情况下,扫描区域范围之外(在积分中被省略)贡献的幅度将通过利用超声波束的理论模型来确定。在圆形平面活塞源的远场区域中,点 R 处的声压成正比于:

$$2J_1(ka_1 \sin\theta) / (ka_1 \sin\theta) \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

- k ——圆周的波数;
- a_1 ——超声换能器的有效半径或几何半径;
- θ ——点 R 到换能器和声束轴中心连接线之间的角度;
- J_1 ——第一阶第一类贝塞尔函数。

该模型假设为一次球形的扫描,因此,忽略掉的贡献将通过由平面扫描区域边缘定义的球形区域的理论分布(平方)的积分进行确定,并与半球的积分进行比较。来自平面扫描区域范围之外的积分贡献将被假设为从球形扫描模型得到的一样。该贡献将被用于积分的修正,等同于修正的不确定度将被赋值。该不确定度通常小于其他分量的不确定度。

更可取的做法是扫描到低于超声波束中心峰值信号的某一门限,比如,10%^[26]或者 5%^[33]。在这种情况下,来自扫描区域范围之外的贡献才有意义。修正因子将通过上述同样的步骤予以确定。

注 1: 如果超声换能器的有效半径未知的话,可以用其几何半径代替。
 注 2: 噪声对积分的贡献大小取决于水听器信号的测量方法。

D.3.7 非线性传播

平面扫描技术决定了水听器在某一频率 f 的灵敏度。由于非线性传播将引入高频分量,导致超声波形畸变,所以保证波形不发生畸变是很重要的。为了估计非线性传播对平面扫描校准方法的影响,这里给出了两种方法,选择哪种方法取决于特定的测量过程和被校准的水听器。本质上,两者都假设非线性畸变引入的不确定度取决于声压波形中基频分量的幅度的损失。第一个方法假设,二次谐波幅度是基频幅度的一个特定的百分比 δ 。在这种情况下,对 $\delta < 30\%$,水听器灵敏度中的百分比误差为(参见 D.4.5):

$$\frac{1}{2} \frac{\delta^2}{100} \dots\dots\dots (D.8)$$

尽管此方法较简单,但由于基频与二次谐波或者更高频率间水听器灵敏度的变化没有考虑水中的声波衰减,要可靠的确定 δ 仍然是不可能的。

第二种方法假定,能够预测平面活塞超声换能器的非线性传播。正如 D.4.5 所示,对于连续波条件下辐射总功率为 P_0 的换能器的远场,在确定水听器灵敏度过程中的产生误差近似为:

$$P_0 (0.28R + 0.065) f^4 a_t^2 10^{-20} \dots\dots\dots (D.9)$$

有:

$$R = \lambda / \pi a_t^2 \dots\dots\dots (D.10)$$

式中:

f ——频率,单位为赫兹(Hz);

a_t ——换能器的有效半径,单位为米(m)。

如果误差小于 5%,上述关系式是精确的,同时衰减是可以忽略的(参见附录 E)。

上述的估计是基于以下假设:未检测到二次谐频的信号,且非线性传播衰减的影响很小。如果使用的水听器具有平坦的频率响应,这些影响可能会被过高估计。

通过使用上面给出的关系,可以估计水听器信号波形畸变引起误差的最高限。该误差将会小于 5%。

D.3.8 平面扫描

严格地说,从式(6)到式(10)的推导,应该指的是对以超声换能器为球心的某一球面积分。在扫描中,在某点使用平面扫描引入的误差与 $\left(\frac{1}{\cos\Theta} - 1\right)$ 成正比,其中, Θ 是超声声束轴和超声换能器中心与水听器有源元件参考中心连接线的夹角。假定在平面扫描边缘的 Θ 小于 10° ,使用平面扫描产生的不确定度是可以忽略的^[28]。当角度较大时,宜做不确定度的估计。

D.3.9 声强正比于声压平方时

式(5)假定瞬时声强与声压平方成正比。实际瞬时声强 I 和源自环形平面活塞超声换能器轴上声压平方导出的声强 I_p 之间的差异的估计可由式(9)得到:

$$\frac{I_p}{I} = \frac{2}{1 + (l/a_t) / [1 + (l/a_t)^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (D.11)$$

对在 10.5.3 中推荐的测量距离和通常能遇到的换能器直径的范围(6 mm~25 mm),该比例与单位圆的差异小于 1%。如果选择的距离小于在 10.5.3 中推荐的值,式(D.11)可用于估计来自不确定度源的贡献。

D.4 关于利用平面扫描法校准水听器的基本原理

D.4.1 概述

本条款概略地给出了平面扫描法中一些条件和公式的推导及论证。

D.4.2 水听器和换能器有效半径之间的关系

考虑一个有效半径为 a_t 的平面活塞换能器,以及离换能器距离为 l 的一个有效半径为 a_h 的水听器。

来自换能器的以一定角度入射到水听器的边缘波形在下式中给出:

$$\arcsin \left[\frac{a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \dots\dots\dots (D.12)$$

假定水听器具有以下的指向性响应:

$$2J_1(ka_h \sin\theta) / (ka_h \sin\theta) \dots\dots\dots (D.13)$$

式中, k 是圆周波数 ($=2\pi/\lambda$); θ 为入射角。边缘波应该以小于指向性响应峰值 1 dB 时对应的角度入射。对于指向性响应,要求 $ka_h \sin\theta \leq 1$, 也就是 $[2J_1(ka_h \sin\theta) / (ka_h \sin\theta)]|_{ka_h \sin\theta=1} \approx 0.88$ 。因此,这就等效于:

$$ka_h \sin\theta \leq 1 \dots\dots\dots (D.14)$$

或者:

$$\frac{ka_t a_t}{(a_t^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}} \leq 1 \dots\dots\dots (D.15)$$

D.4.3 限定 $a_t/l \leq 0.5$ 的理由

可以证明,当 $a_t/l=0.5$ 时,与平面活塞声源轴向距离为 l 处的实际声强与假定“声压平方”关系确定的声强相差约 6%。在接近于换能器的轴向位置,与真实的声强相比,“压力平方”声强迅速上升。因此,本部分中将式(5)的适用范围定为 $a_t/l \leq 0.5$ 。

D.4.4 式(D.2)的推导

考虑 R_{1i} 和 R_{2i} 之间,点 $U_i(l,r)$ 的分布,以及从波束中心到第 i 次直径扫描的极限距离。假设 s 是超声波束中心到最近扫描点的距离。考虑分布于环面上的每个点,则径向扫描的积分为:

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} \pi [U_i(l,r)]^2 r \Delta r \dots\dots\dots (D.16)$$

注:本条款中提出的求和公式不遵循通常的数学惯例,给定的限制标明了求和的最大限度。在这些极限值之间,式(D.16)中的参数 r 是对应于特定扫描点的离散值。

然而,中心点 $U_i(l,s)$ 并没有像所有其他点那样对以波束中心为中心的圆环做出贡献。在这种情况下,来自围绕中心点的两个半圆的贡献必须被分开考虑。来自点 $U_i(l,s)$ 到直径的总和的总贡献为:

$$\frac{\pi}{2} [U_i(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] \dots\dots\dots (D.17)$$

由于式(D.16)已经包含点 $U_i(l,s)$ 的项,考虑到中心点的实际贡献与式(D.16)中包含的项之间的差别,有必要对式(D.16)进行一个修正,也就是:

$$\frac{\pi}{2} [U_i(l,s)]^2 \left[\left(\frac{\Delta r}{2} - s \right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{2} + s \right)^2 \right] - \pi [U_i(l,s)]^2 s \Delta r \dots\dots\dots (D.18)$$

上式可以被简化成:

$$= \pi [U_L(l, s)]^2 \left(\frac{\Delta r}{2} - s\right)^2 \dots\dots\dots (D.19)$$

这也就是式(D.2)中的最后一项。

如果点 $U_L(l, s)$ 对应于波束中心, 则 $s=0$, 且式(D.2)中大括号(波形括号)内的部分简化为:

$$\sum_{r=R_{1i}}^{R_{2i}} [U_L(l, r)]^2 r \Delta r + [U_L(l, 0)]^2 \frac{\Delta r^2}{4} \dots\dots\dots (D.20)$$

注: 当在合计中对应声束中心点的项为零时 [$r=0$ 对应 $U_L(l, 0)$], 右边的一项对应于波束中心的贡献。

D.4.5 D.3.7 中非线性传播的影响

下面给出与非线性传播有关的式 D.9 的推导。

在距离等于或者大于归一化距离 ($R = l\lambda/\pi a_i^2$) 时, 平面活塞换能器的有限幅度声场中, 其波束剖面可以用高斯函数近似。

对少量的畸变, 在声轴上波形基频部分的幅度与无畸变时幅度的比值由文献[34]的式(1)和式(2)给出:

$$1 - \frac{\sigma^2}{8} \dots\dots\dots (D.21)$$

式中:

$$\sigma = \left(\frac{7p_1 \pi^2 a_i^2}{\lambda^2 \rho c^2}\right) 2 \sin\left(\frac{1}{2R}\right) (1 + R^2)^{\frac{1}{2}} \ln[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}}] \dots\dots\dots (D.22)$$

式中, p_1 是在超声换能器面上的声压幅度, 与之相关的换能器发出的超声总功率 P_0 为:

$$P_0 = \frac{\pi p_1^2 a_i^2}{4\rho c} \dots\dots\dots (D.23)$$

偏离轴向位置和低幅度 ($\sigma < 0.5$) 的声压幅度是通过将换能器方向性函数^[35]乘以 σ 得到的, 假设一个高斯波束剖面, 与无畸变时相关的声压平方积分的平方根为:

$$1 - \frac{\sigma^2}{16} = \frac{\left[2\pi \int \left[1 - \left(\frac{\sigma^2}{4}\right) \exp\left(-\frac{2r^2}{a_i^2(1+R^2)}\right)\right] \exp\left(-\frac{2r^2}{a_i^2(1+R^2)}\right) r dr\right]^{\frac{1}{2}}}{2\pi \int \exp\left(-\frac{2r^2}{a_i^2(1+R^2)}\right) r dr} \dots\dots\dots (D.24)$$

因此, 水听器校准时的百分比误差为:

$$100 \frac{\sigma^2}{16} = 100 \left(\frac{49\pi^2 a_i^2 P_0}{\lambda^4 \rho c^3}\right) \sin^2\left(\frac{1}{2R}\right) (1 + R^2) \{\ln[R + (1 + R^2)^{\frac{1}{2}}]\}^2 \dots\dots\dots (D.25)$$

如果 R 在 0.5~3 之间, 则上式可以用式(D.9)近似。

附 录 E
(资料性附录)
水的特性

表 E.1 水中声速 c ^[36-37] 和声特性阻抗 ρc 与温度的关系

温度 °C	声速 c $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	特性声阻抗 ρc $\times 10^6 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
15	1 465.9	1.464 7
16	1 469.4	1.467 9
17	1 472.8	1.471 0
18	1 476.1	1.474 0
19	1 479.2	1.476 9
20	1 482.4	1.479 6
21	1 485.4	1.482 3
22	1 488.3	1.485 0
23	1 491.2	1.487 5
24	1 494.0	1.490 0
25	1 496.7	1.492 3
26	1 499.4	1.494 6
27	1 501.9	1.496 7
28	1 504.4	1.498 8
29	1 506.8	1.500 8
30	1 509.2	1.502 6
31	1 511.4	1.504 4
32	1 513.6	1.506 2
33	1 515.8	1.507 8
34	1 517.8	1.509 4
35	1 519.9	1.510 8
36	1 521.8	1.512 2
37	1 523.7	1.513 6
38	1 525.5	1.514 8
39	1 527.2	1.516 0
40	1 528.9	1.517 1

水中传播的衰减系数 α 值在 MHz 频率范围与 f^2 成正比,由下面以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位的温度 T (有效范围 $0^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$) 的多项式给出^[29]。

$$\alpha/f^2 = (5.685\ 24 \times 10^1 - 3.025\ 45 \times 10^0 T + 1.174\ 16 \times 10^{-1} T^2 - 2.954\ 30 \times 10^{-3} T^3 + 3.969\ 85 \times 10^{-5} T^4 - 2.110\ 91 \times 10^{-7} T^5) \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-2} \text{ m}^{-1}$$

注:假如幅度衰减系数单位为 m^{-1} ,当改为以 dB m^{-1} 为单位时,其数值应乘以 $20\log_{10}(e) = 8.686$ 。

IEC/TS 62781 给出了制备除气水的方法。

||

附录 F (资料性附录)

40 MHz 以下利用光学干涉法的水听器绝对校准

F.1 概述

本附录描述了 15 MHz 频率以上的超声水听器特性的绝对校准方法的现状。条款 F.2 简略地描述了一些在过去已经使用的以及那些当前正在评估的方法。这些方法都基于平面波和光学干涉法的非线性传播。后一种校准(光学干涉法)尤其引人注目,这是由于其可直接溯源至长度测量的基础标准。本附录同样描述了两个国家标准实验室在实施基于激光干涉技术的绝对校准方法时的改进。条款 F.2.3.1 和条款 F.2.3.2 的方案 I 及方案 II 两种实施方法的根本差别在于声和光束的布置,在方案 II 中,与方案 I 的不同是光波束横穿声波束。

注:在这里明确水听器的“绝对”校准是指“没有参考另一个水听器”,这有时候是指“一级”校准,换句话说,实际上通常用“二级”或“替代”方法校准水听器,这意味着与一个已校准的参考水听器的比较得到灵敏度。参考水听器本身的校准可用“绝对”方法或与另一个参考水听器比较,等等。可见,执行水听器的绝对校准和比较两个水听器的灵敏度是两种最基本的方法。本附录涉及了前一种方法,而后者则在第 12 章中详述。应该注意到替代法校准通常包含两个方案,感兴趣的用户应参考第 12 章和本附录(在替代法校准中来自两种基本方法的不确定度对总的校准不确定度的贡献)。

F.2 现状

F.2.1 “选通”或基于非线性传播的方法

以前,利用“magnonic”或者“以实验为依据的非线性传播模型”法^[34,38,39,40,41,42]开展过频率高达 100 MHz 水听器的校准工作。文献[34]介绍了上述方法,它利用了平面波的非线性传播模型,以及相对大直径的活塞换能器利用合适的时间门可以将活塞边缘辐射的边缘波与平面波分量隔开这一事实。在高声压幅值的情况下,平面波幅度畸变产生丰富的谐波声场。利用理论的平面波传播模型预测声波的畸变,通过将预测值和靠近换能器表面(无畸变)以及声轴上已知距离上(由于非线性传播畸变并产生丰富的谐波)的测量值进行比较,可在每个谐振频率上获得水听器的校准。

用这一方法得到两个薄膜水听器的校准结果较理想,与理论响应也相吻合。然而,它还有一些缺点。首先,它依赖于所用的传播模型。其次,该方法也取决于产生声场的换能器的性能。由于换能器的缺陷,产生的声场将不是理想的平面波,从而导致校准有较大的不确定度。

为了克服这些缺点,使用了一个较小直径的聚焦换能器在焦平面产生谐波,在已知焦距处存在良好的主瓣波束,使得测量声场更容易复现。与平面波方法相比,聚焦换能器可以在更短的距离上提供更高的谐波声压。适宜的具有同类特性的聚焦换能器已商品化。

F.2.2 光学干涉法

基于光学干涉的校准方法中,换能器产生的声场是用一个薄的塑料薄膜检测的。薄膜的一面作金属化处理以使其反光。薄膜足够薄,可以达到透声和跟随声波同步运动的目的。使用光学干涉仪测出其位移,再利用位移推导出声压。然后用待校准水听器取代薄膜,使水听器的声中心落在声场中薄膜上激光入射点的位置,通过测量的开路电压与已知声压进行比较完成水听器的校准。

显然,切实可行的校准方法的一个重要条件是,在高达 40 MHz 的感兴趣的频率上,需要足够的声压使得水听器信号具有可接受的信噪比。然而,光学干涉仪实际上对声位移敏感,这意味着对接收信噪比有更严格的要求。对一个平面波,声压幅值 p_0 由下式给出:

$$p_0 = \rho c \omega \zeta \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

ρ —— 测量液体(水)的密度;

c —— 媒质中的声速;

ω —— 圆频率;

ζ —— 声位移幅值,声压和位移间的相位偏差可以忽略不计。

忽略声压和位移间的相位偏差意味着对于一个给定的声压位移幅值和频率是对等的,因此,在 40 MHz 及更高的频率上要产生可测量的位移需要高的声压。应该注意到,为了增加声压,下面介绍的两种实施方法都使用了聚焦换能器。

F.2.3 光学干涉法实现高频测量

F.2.3.1 方法 I

F.2.3.1.1 测量系统

光学校准技术是基于测量位于液体表面薄膜的位移(图 F.1)。声波垂直入射使薄膜产生位移,并利用迈克尔逊干涉仪对上述位移进行测量^[43-46]。干涉仪包含激光光源和用于分离、合成光学场的极化波束分束器(图 F.1)。在测量臂内,激光聚焦在薄膜上,薄膜上涂覆了铝层以便增强光的反射。为有足够的空间分辨率要确保激光聚焦成一个很小的光点。

具有带宽 $BW \approx 100$ MHz 的平衡光检测机制可以检测输出的光场。它由两个光电二极管和一个抑制幅度噪声增强光电流的差分传导阻抗放大器 A 组成。传导阻抗放大器后有一个二级放大器 V。它具有高的输入阻抗可用作水听器放大器(参见下文)。干涉仪由一个大约 100 Hz 均一增益频率的伺服回路保持通路稳定。在这种情况下,通过以下公式可从测量的光电流值推导出位移:

$$\zeta = \frac{U_s \lambda_1}{2\pi TF \hat{U}} \frac{V(f=0)}{V(f)} \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

λ_1 —— 光波长(光在真空管中的波长);

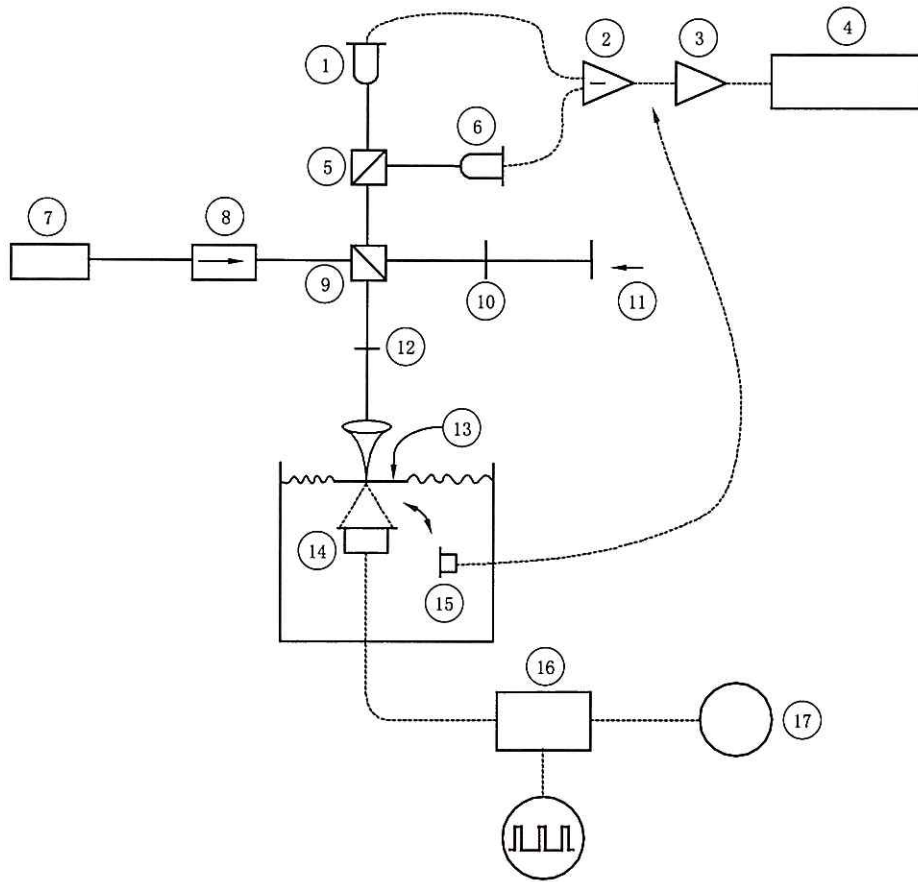
TF —— 振动位移通过薄膜时的声传递因子;

U_s —— 信号电压;

\hat{U} —— 放大器 V 的输出端测出的复干涉条纹的峰峰值电压,它的增益 $V(f)$ 与频率有关。

输出电压 U_s 由数字示波器检测,即时间域上具有很宽的带宽($BW > 100$ MHz)。为了获得足够高的信噪比,使用一个聚焦型的压电宽带换能器。发射给定频率的脉冲串,声波到达稳态立即获取测量数据,这避免了来自水槽壁反射的干扰。

利用三轴平移和两轴转动设备完成直线对准,光点调整到与声束轴垂直的焦点,焦点位置通过在距离换能器不同距离上二维声压的测量确定。通过平移调节足以判定干涉仪输出和反射声信号的最大值以及激励脉冲和输出信号间的延迟时间。调整薄膜和声传播方向之间的夹角时用准直激光束作为参考。



说明:

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1——光电二极管(PD); | 10——1/4 波盘($\lambda_1/4$); |
| 2——传输阻抗放大器(A _v); | 11——压电驱动镜(PZT-M); |
| 3——水听器放大器(V); | 12——1/4 波盘($\lambda_1/4$); |
| 4——数字示波器(D-scope); | 13——膜片(Fo); |
| 5——分光器(BS); | 14——声学换能器(Tr); |
| 6——光电二极管(PD); | 15——水听器(H); |
| 7——激光; | 16——门; |
| 8——分光器(ISO); | 17——合成器(\check{f}). |
| 9——偏振光束分光器(PBS); | |

图 F.1 干涉薄膜法的试验装置

存储参考数据之后,移走薄膜,将待检水听器固定在激光点先前同样的位置。添加一定量的水以浸没水听器。或者,简单起见,换能器可以如图 F.1 所示旋转。水听器连接到放大器 V 的输入端,在相同的测量条件下进行重复测量。

电缆末端的有载灵敏度 M_L 由式(F.3)得到:

$$M_L = \frac{1}{\omega c \rho V(f=0)} \frac{2\pi T F \hat{U}}{\lambda_1} \frac{U_H}{U_s} \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

- | | |
|--------|---------------|
| c | ——水中声速; |
| ρ | ——测量媒质(水)的密度; |
| U_H | ——水听器测量的电压; |

$\omega (=2\pi f)$ ——声场的圆频率。

在这里,放大器 V 的输入阻抗是水听器输出的电负载。

F.2.3.1.2 数据修正

电缆末端有载灵敏度 M_L 的数值受到三个系统效应的影响,需要使用下面的理论模型进行修正。

F.2.3.1.3 光斑直径

水听器和聚焦在薄膜上的激光波束不可能假设为点检测器,应考虑空间平均效应。为了定量描述这些影响^[45],考虑一个平面活塞换能器,位移分布可以由瑞利积分得到^[46],所有测量平均值与峰值声压有关^[45]。

F.2.3.1.4 薄膜的多途效应

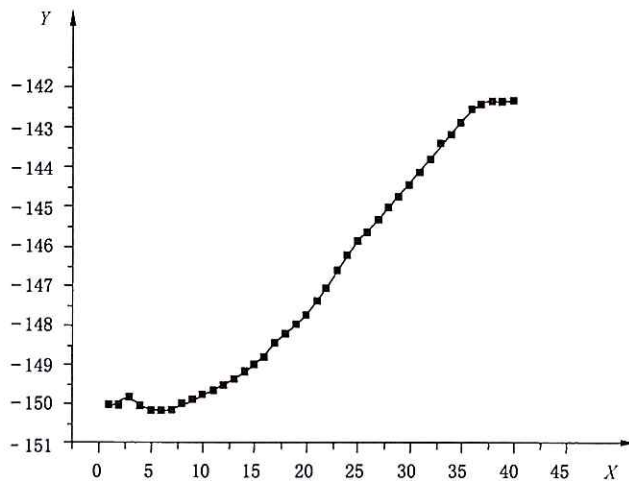
在超声焦点位置上,液体表面覆盖了一个具有涂层的薄膜以提高光学反射率。入射声场的一部分在薄膜和金属层内反射,多波束的干涉会影响膜片的位移,因为焦点处的波阵面近似于平面波,可以利用一个平面波的简单谐振模型^[45]来量化描述多途效应造成的系统误差。对位移来说,就产生一个声传输因子 TF ,见式(F.2)和式(F.3)。

F.2.3.1.5 光电检测器的频率响应

相对于两次测量中均出现的放大器增益 $V(f)$,光电检测器的频率响应会影响电缆末端的负载灵敏度 M_L 。利用光学混合振荡器可以测量传输函数,并对干涉仪数据进行修正。

F.2.3.1.6 结果

示例(图 F.2)给出了一个涂层厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 的共面薄膜水听器的电缆末端开路电压灵敏度 M_c 。



说明:

X —— 频率(MHz);

Y —— M_c (dB re 1V/Pa)。

图 F.2 共平面薄膜水听器的电缆末端开路电压灵敏度 M_c 。

测量的不确定度是与频率有关系的,在包含因子 $k=2$ 和包含概率为 95% 情况下,1 MHz~5 MHz 时的不确定度为 9.5%,5 MHz~20 MHz 时为 8.0%,在 30 MHz 时增加到 10%,而在 40 MHz 时为 12%。

F.2.3.2 方法 II

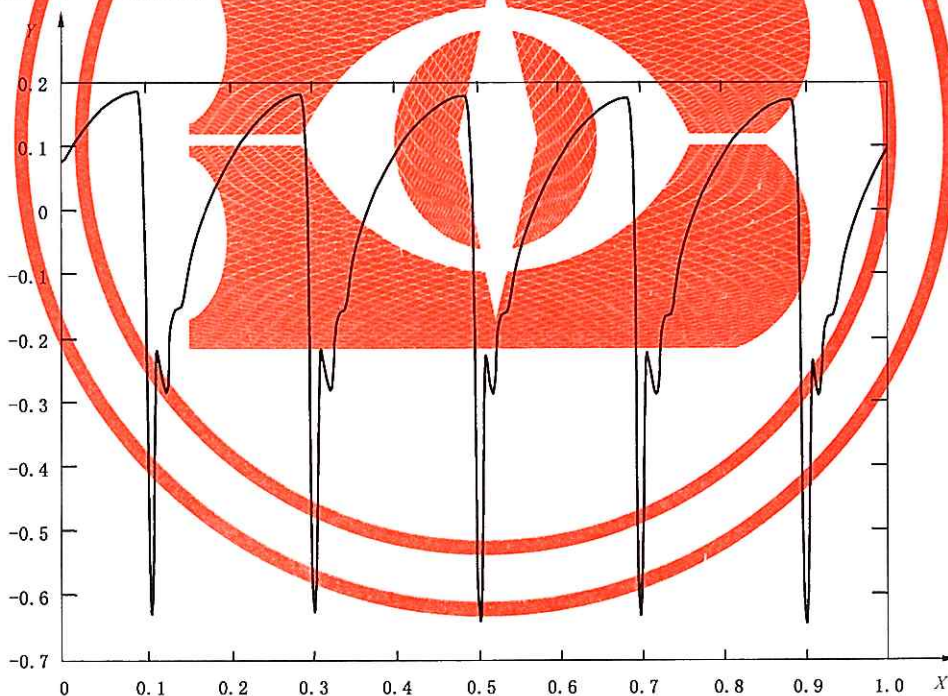
F.2.3.2.1 测量系统

光学干涉法已发展为 500 kHz~20 MHz 频段内超声水听器校准的首要标准方法,在前面^[47]已有详细的描述,这里仅作简单介绍。在高于 500 kHz 的频率上,该技术已经通过国家标准实验室之间的国际比对进行了确认,并且已经建立了基准。对校准不确定度的来源有了进一步的理解,在 95% 的置信水平上,频率到 20 MHz 时,典型的总不确定度为 3% 或 4%。

用于测量的膜片是厚度为 3.5 μm ~5 μm 的聚乙烯对本二酸盐胶片膜片,涂敷有 25 nm 的金层。这种布置下光波束横贯声波束时,存在两个波束相互干涉的可能。这种相互作用是由于声波的压缩和稀疏变化引起了媒质中局部密度的改变从而改变了折射率。这就是 F.2.3.2.4.4 介绍的声光相互作用。

F.2.3.2.2 声场

使用一个标称中心频率为 5 MHz 的聚焦换能器完成校准。为了调查研究与校准有关(声光、空间平均)的一些系统不确定度,选用了两种焦距的换能器。换能器的标称焦点位置分别是 50 mm 和 150 mm,用足够幅值脉冲串驱动换能器,在声场的焦点位置产生较强的非线性失真波。图 F.3 示范了 0.5 mm、9 μm 共面膜片水听器,检测到接收水听器波形的谐波频率高达 100 MHz。波形近似于理想的锯齿波,谐波幅度分布近似于 $1/n$,其中 n 是谐波数。聚焦换能器用于产生足够的声压,使用时需要修正,尤其是空间平均,谐波频率越高声束宽度越窄(见 F.2.3.2.4.3)。



说明:

X ——时间(ms);

Y ——幅值(V)。

图 F.3 9 μm 共平面薄膜水听器产生的波形,水听器位于 5 MHz 换能器的焦点上(焦距 51 mm)

F.2.3.2.3 校准

图 F.4 给出了薄膜在 5 MHz 换能器的焦点上(焦距 51 mm)产生的位移波形,注意到波形有非常清晰的畸变现象。图 F.5 中两条曲线中较低的一个(位移波形)FFT 变换的计算证实了这个现象。通过位移谱的求导得到如图 F.5(求导位移谱)所示的压力谱,高至 60 MHz 的频率成分清晰可见。通过与

声场中同一位置处水听器输出的薄膜谱的导数相比较,可以在感兴趣的频率上对水听器进行校准。图 F.6 给出了有效元件为 0.2 mm 的 9 μm 双面膜片水听器的校准结果,校准结果中可以清楚看出频率响应的理论谐振为 55 MHz。图表给出的不确定度为随机不确定度,在频率高至 40 MHz 以上,它随着膜片信噪比的降低而降低。

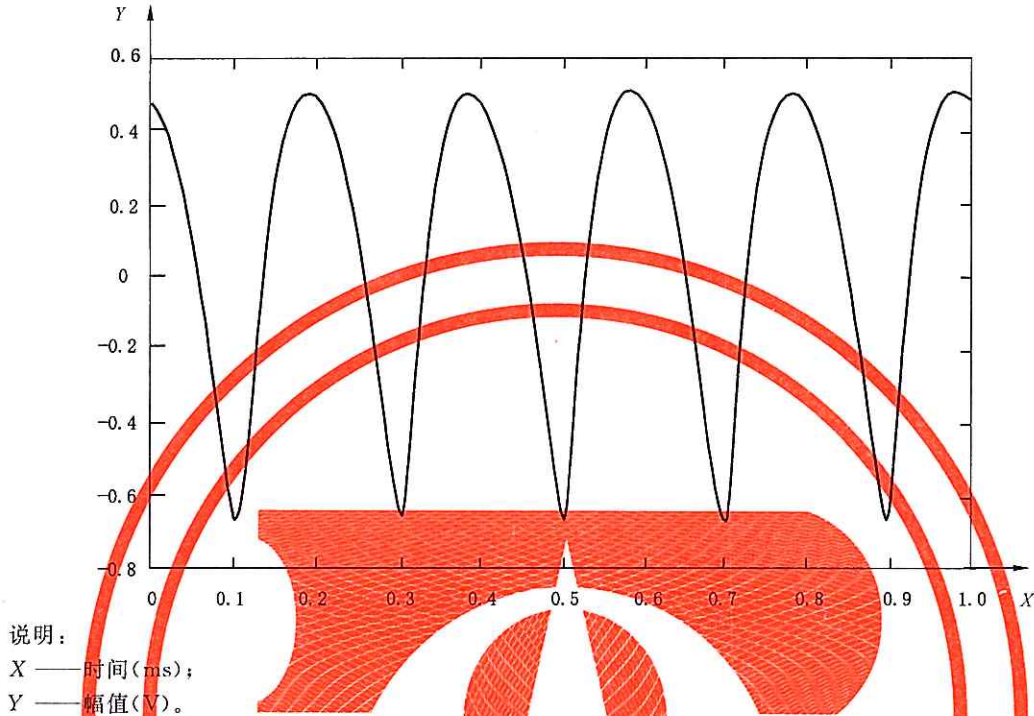


图 F.4 薄膜位于在 5 MHz 换能器的焦点上(焦距 51 mm)产生的位移干涉波形

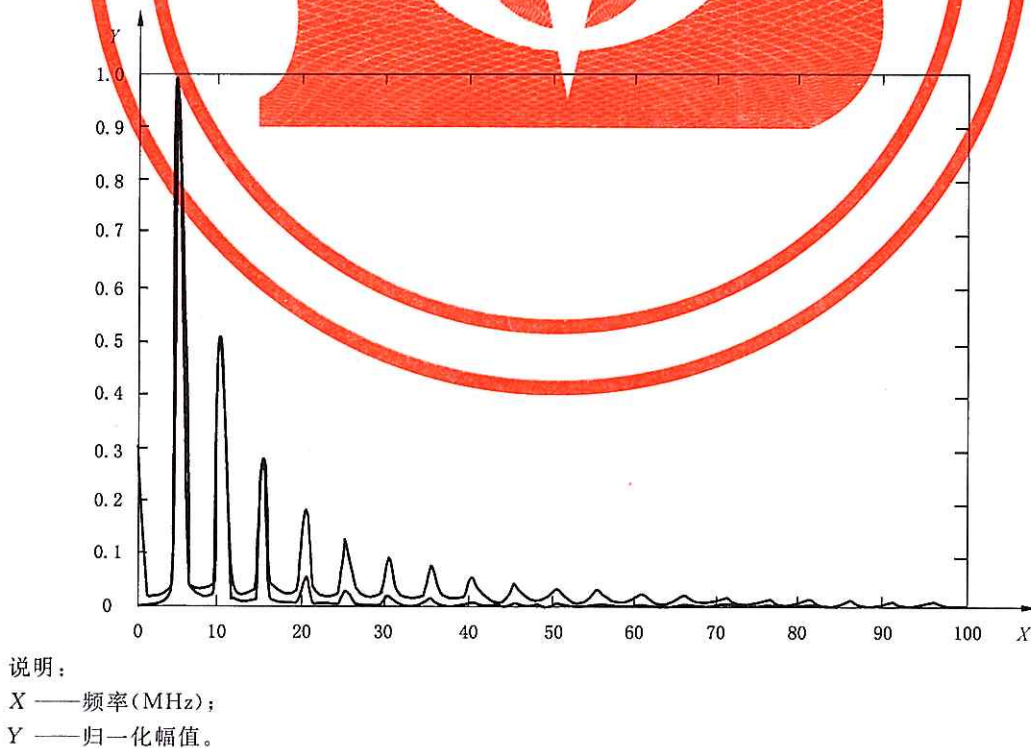
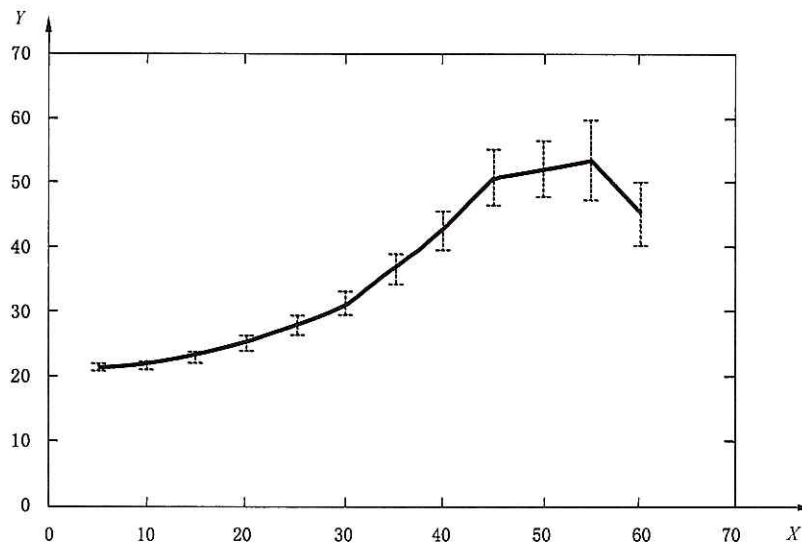


图 F.5 位移波形的频谱(上面曲线)和位移波形的微分(下面曲线)



说明:

X —— 频率(MHz);

Y —— 灵敏度(nV/Pa)。

图 F.6 在 5 MHz~60 MHz 范围内,
以 5 MHz 为间隔检测到的直径 0.2 mm、厚 9 μm 双层薄膜水听器的灵敏度

F.2.3.2.4 校准的修正和测量不确定度来源

在这里,简单介绍与校准有关的测量不确定度的主要来源。

F.2.3.2.4.1 干涉仪的频率响应

干涉仪的频率响应本质上是雪崩光电二极管和放大器的频率响应。过去,1 kHz~20 MHz 的频率响应是使用特制的频率响应校准仪进行测量的^[49]。干涉仪的工作频率范围扩展到 60 MHz,要求对频率响应校准仪进行改进。使用改造后的频率响应校准仪,可以确定干涉仪高达 100 MHz 的频率响应,频率响应校准的不确定度变化范围从 3.5%(20 MHz)到 4.3%(40 MHz)。

F.2.3.2.4.2 薄膜透射系数

校准结果必须就薄膜的透射性能进行修正,修正推导有两种方法:理论方法和实验方法。通过运用不同材料层中传播平面波的简单声学理论,建立模型去计算与频率有关的薄膜的透射系数。假定 25 nm 厚金膜中声波束的衰减可以忽略不计,更进一步,以替代法为基础,用 2 MHz 基频换能器产生的非线性畸变声场,设计一个测定 2 MHz~60 MHz 透射系数的实验方法。薄膜位于换能器和水听器之间(薄膜非常靠近水听器),确定薄膜的透射系数。通过理论和测量相结合,建立频率与修正量之间的关系,不确定度在 5 MHz 时为 1%,40 MHz 时为 2%。

F.2.3.2.4.3 就空间平均的修正

由 5 MHz 聚焦换能器产生的谐波的窄波束使得必须对水听器有效元件上的声压分布的空间平均进行修正。利用有效元件直径为 0.2 mm 的 9 μm 双面膜片水听器绘制换能器焦点位置波束曲线,进行 FFT 变换得出谐波声束宽度,完成空间平均的实验研究。假设 0.1 mm 直径的激光点不需要空间平均修正,那么空间平均修正引入的不确定度 5 MHz 为 1%,40 MHz 为 6%。

F.2.3.2.4.4 声光干涉

实验中光束横穿声束,两种波束有机会产生干涉。这意味着由干涉仪测出的位移不是膜片的真实位移,由于膜片运动和沿光波束路径上折射系数的变化,光程将会变化。考虑到这个影响,需要对测量的位移进行较大的修正,主要是水的有效折射系数。修正的准确性已经在利用线性平面波低频校准中得到验证^[47]。但在高振幅非线性聚焦场,折射系数会导致不确定度增大。声光效应是一个需要继续评价的问题,但已完成的工作表明,在感兴趣的频率范围上,折射系数变化在不确定度中的贡献不超过1%。非平面波贡献的影响估计5 MHz时为0.5%,40 MHz时为3%。

F.2.3.2.5 总的测量不确定度

高频校准光学干涉方法的不确定度的描述已经发表^[50]。估计的测量的扩展不确定度变化范围为7%(20 MHz)~11%(40 MHz)。

附录 G
(资料性附录)
波形概念

G.1 概述

水听器校准依赖于给定的稳定超声场。给定声场的特性可能会随施加于换能器的电信号波形、换能器的形式(平面的或者聚焦的)以及进行校准时所选择的超声场中的位置等因素变化。可能应用到各种概念,这些概念在 G.1~G.5 中有详细描述,表 G.1 是其汇总。

表 G.1 附录 G 中描述的时间波形和水听器位置概念

时间波形概念		水听器位置概念	
a	窄带猝发声	A	位于近场
b	经非线性传播之后由窄带猝发声产生的宽带波形	B	位于远场
c	宽带脉冲	C	位于具有长传播路径(为达到非线性失真)的远场
d	利用时间延迟谱法进行的连续波频率扫描	D	位于聚焦型声源换能器产生的几何球焦点处(线性传播)
e	利用时间门控频率分析法(TGFA)的连续波频率扫描	E	位于聚焦型声源换能器产生的几何球焦点处(非线性传播)

另外,G.5 描述了当校准在靠近平面型换能器表面时进行的特殊考虑(G.4.1 中描述了水听器位置概念 A。)

G.2 时间波形、频率概念和采用比较法校准水听器时的水听器位置

根据本条款所获得的所有结果指的是特定的超声频率。这些结果被认为是频率的函数,可以理解成是频率谱中的幅度。

与时间波形和频率识别有关的概念有:

- a. 窄带猝发声;
- b. 经非线性传播之后,由窄带猝发声产生的宽带波形;
- c. 宽带脉冲;
- d. 采用时间延迟谱法(TDS)的连续波频率扫描(参见附录 H);
- e. 采用时间门控频率分析法(TGFA)的连续波频率扫描^[39];

关于水听器在超声场中位置的概念有:

- A. 位于近场;
- B. 位于远场;
- C. 位于特指长传播路径(为达到非线性失真)的远场(与时间波形概念 b 有关);

假设有一个平面圆形换能器,一般可以说其声场由平面直达波和非平面边缘波组成。依据水听器位置概念 A,水听器处于相当靠近换能器的地方,此处两种波具有不同的声程长度,故二者的成分可以彼此分离。通过选择合适的选通时间门,能够检出直达的平面超声脉冲。另一方面,依据水听器位置概念 B 和 C,将水听器置于在远场的声轴上,在这一区域,两种波成分之间只有较小的路径差,故二者将不可避免地相互干涉,但是最终的声场特征几乎是平面波,主要的限制因素在于声场主瓣的有限直径。

D. 位于聚焦型声源换能器的几何球焦点处(小振幅或者线性激励);

E. 位于聚焦型声源换能器的几何球焦点处(大振幅激励)。

在水听器位置概念 D 或者 E 中,声源换能器是聚焦型的,因而其几何焦点处的波束形状与非聚焦型换能器远场的波束相同。对水听器位置概念 D,利用聚焦换能器作为声源的好处在于,在线性激励条件下,在较短的声程上可以获得类似于水听器位置概念 B 的条件,从而减小了衰减的影响。对水听器位置概念 E,聚焦换能器在几何焦点处的声场被用于通过高振幅电压激励获得非线性畸变。水听器位置概念 E 的好处在于,由于声程短,声压波形的基频和高次谐波分量的衰减都降低了,此时的非线性失真主要是由于换能器聚焦增益引起的声压幅度增加所致。

注:文献中更倾向于时间波形概念和水听器位置概念的某些组合(尽管到目前为止,绝大部分还是在 15 MHz 或更低的频率以下)。这些组合有 aB^[51],bC^[52-53],cA^[54]和 dB^[55,56,22]。其他的组合也有可能。

G.3 时间波形和频率范围的概念

G.3.1 采用窄带猝发声(概念 a)

这里应用的是一个固定频率为 f 、持续时间为 τ 的矩形正弦猝发声脉冲。水听器的输出电压通常并不呈现明显的矩形猝发声形式,而是一个包含有起始和结束瞬态的信号,且在理想情况下,包含恒定幅度的中央部分。为便于获得恒定的水听器信号幅度,猝发声应足够长。可借助已校准的示波器等测量恒定信号的幅度,得到的结果仅针对所选的特定频率。

这一概念具有下面的特征:

- 这是一个单频方法,假如需要几个频率的结果,应在这些频率点上重复进行测量。这涉及到更换换能器和重订方案,需要花费时间。
- 声源换能器的频率范围应覆盖所需要的频带,实际采用的,应为带阻尼的宽带换能器,以适应所关注的频率范围。
- 考虑到传播路径上的超声衰减,换能器应产生明显高于水听器噪声的超声波幅度。
- 假如用宽带仪器测量水听器的输出电压,应检查信号的谐波分量,谐波分量应比基频低 30 dB。

注:假如信号的谐波分量大于-30 dB,为了只分析基频分量,可以采用基频信号的带通滤波,或信号的谱分析,以消除二阶或更高阶谐波成分的影响。

G.3.2 采用经非线性传播之后由窄带猝发声产生的宽带波形(概念 b)

对换能器施加一个高电压的正弦猝发声脉冲。超声信号传播一个很长的距离,直到在水听器处于概念 C 或概念 E 的位置上时,水听器测量到一个高度不对称的时间波形。这一畸变波形的特征是,压缩的半周期呈峰值,舒张的半周期变低矮,谱的谐波成分包含取基波频值整数倍的等间距频率,幅值大体按 $1/n$ 的比率衰减(n 是谐波序号)。接收信号既可以馈入谱分析仪,也可以送到快速傅里叶变换(FFT)计算单元,于是就可得到一系列离散频率的测量结果。

超声源本身可以是一个频率明显低于关注范围的窄带、谐振换能器。但其频率也不应太低,因为要

产生足够高的谐波幅度的谐波频率不应离基频太远。针对本部分所指的频率范围,和鉴于 IEC 62127-3 中为测定频率-灵敏度间关系而提出的要求,这类换能器的基频应在 1 MHz 左右。换能器应能产生在 MPa 级幅度的声压而不产生太多的热量,因为生热会影响测量水槽温度的稳定(见 6.2),并导致换能器辐射电导的不稳定。这些问题可通过采用适当的占空比使之间断工作的办法来解决。

G.3.3 采用宽带脉冲(概念 c)

声源换能器产生一个持续时间为 τ 的短暂宽带脉冲。依然是将水听器的输出信号送至谱分析仪。在这种情况下,频谱幅度的频率分辨率等于被浏览带脉冲所占时间间隔的倒数,频谱覆盖的频率范围取决于产生的脉冲。

声源换能器既可以是一个带阻尼的谐振换能器,其脉冲频谱的主要成分处于由厚度决定的谐振频率附近,谐振频率应低于本部分的频率;也可以是一个利用高压短路法获得的电火花激励的厚换能器。在后一种情况下,达到本部分中所定频率范围的主要问题是实现高压和电流的快速通断。后一种情况下,换能器厚度决定换能器后表面辐射的压力脉冲到达时间的延迟,而延时太短会干扰测量。

G.3.4 采用基于时间延迟谱法的连续波频率扫描(概念 d)

采用连续波信号,该信号是采用线性频率法在所关注的频率范围、以恒定的扫描速率获得的。水听器输出信号通过一个窄带(跟踪)滤波器,该滤波器与其同步扫描,但有一个与发生器的频率相关的频率抵消。这个频率抵消根据换能器到水听器的传播时间调整,传播时间由换能器-水听器间距离和与水温有关的声速决定。这一方法可以抑制反射信号(严格说来,是在传播时间上与直达信号有显著差异的所有信号)的潜在影响。

这种情况下,电子设备的主要成分就是能够进行所述全部相关操作的特殊的频谱分析仪。所获得的是随频率连续变化的水听器输出电压。电子设备,尤其是频谱分析仪,应工作在所关注的频率范围内。

对换能器频率和幅度要求与 G.3.1 中一样。

G.3.5 采用基于时间门控频率分析法(TGFA)的连续波频率扫描(概念 e)

文献[39]中可查得时间选通频率分析法(TGFA)的细节。

G.4 水听器定位概念

G.4.1 水听器位于近场(概念 A)

在声轴方向上,水听器距离换能器的位置相当近,通过调整时间门,从水听器输出信号中检出直达的猝发声或脉冲。

换能器的适用性,应通过观察沿侧向移动水听器时的输出信号进行检查。在理想情况下,假如换能器表面所有部分均以相同的幅度和相位振动,则水听器输出信号与侧向位置无关(在可用的近轴范围内,参见 G.5.2)。关于距换能器表面近处的校准事项见 G.5。

假如 τ 是猝发声或脉冲的持续时间,可以如下面这样评估这类测量可用的几何区间。

G.4.2 水听器位于远场(概念 B)

注:这一位置仅适用于与时间波形概念 a、c、d 和 e 相关联的情况。对于水听器位置类型与时间波形概念 b 相关联的情况,参见 G.4.3。

将水听器置于换能器远场的声轴上。远场始于最后一个轴上最大值位置,应在所关注的最高频率上确定。这种情况下,这一距离被认为是水听器所处的最小距离。

对于理论上的平面圆形活塞声源,最后一个轴上最大值位于距离 $z = a_1^2 f/c$ 处。该距离与频率成正比,故在本部分所指的频率范围内,可以根据换能器的半径求出距离的数值。然而,为了尽可能避免超声衰减的影响,传播声程一般不应超过几分米,故在这种情况下宜选择直径足够小的声源换能器。

G.4.3 位于具有长传播路径(为达到非线性失真)的远场(概念 C)

在 G.3.2 中所给的与时间波形概念 b 相关联的情况下,传播途径应足够长,从而既让波形能够达到显著的非线性失真,又能使声压分布足够宽广,以便将空间平均效应保持在某一指定水平以下(参见附录 J)。这一目的可通过使用近场距离($a_1^2 f/c$)在 200 mm~400 mm 之间,直径相当大的平面活塞换能器达到^[52]。水听器所在位置的非线性的失真程度可以用非线性失真参数 σ 表征,其值依赖于源点的声压幅度(p_0),对于平面波,其值由下式给出:

$$\sigma = 2\pi \frac{\beta p_0 f_i z}{\rho c^3} \dots\dots\dots (G.1)$$

式中:

$\beta = 1 + B/(2A)$ ——水的非线性参数(例如,文献[57]给出的 Fox-Wallace 福克斯-华莱士非线性参数 B/A 的值约为 3.5);

f_i ——用于产生非线性失真的驱动信号的基频部分;

z ——传播距离,即水听器和超声换能器之间的距离;

ρ ——测量液体(水)的媒质密度。

为达最佳比对条件, σ 值应取为 3,即对应基波幅度非线性损失 6 dB 的情况^[58]。对这一 σ 值,波形呈现经典的锯齿形,频谱中的谐波幅度按 $1/n$ 比率变化,其中, n 是谐波序号。这些特性对于评价高频产生的声压幅度非常有用,因为这将影响校准的准确度。假定 $\sigma = 3$ 这一状态得以保持(即场点中的声压幅度为声源处声压幅度 p_0 的 50%),则很容易导出,在水听器频带上限(f_u)处产生的声压幅度为 $p_0 f_i/f_u$ (实质上, f_i/f_u 的比值与 $1/n$ 等效,其中, n 是对应水听器频带上限的谐波序号)。

注:水温 22 °C 时,由式(G.1)得出 $\sigma = 6.7 p_0 f_i z$ 。

其中, p_0 单位为 MPa; f_i 单位为 MHz; z 单位为 m。

这些近似表达式是为导则准备的,其中假定为平面波和无衰减传播。为提供更准确的处理,可以把活塞式声源的自聚焦能力考虑进去。在参数 $\sigma/(\alpha z) \gg 1$ 的前提下,无损耗传播条件是成立的,其中 α 是测量媒质(水)中的小信号平面波幅度衰减系数,其值与频率的平方成正比(数值参见附录 E)。在较低的基频如 1 MHz 或 2 MHz 时,这一临界更是普遍满足。在较高的频率,即 $\sigma/(\alpha z) \approx 1$ 时,基频的小信号衰减将限制失真,从而减少声场中的谐波成分。

在这一方法的任何实施过程中,都建议研究一下换能器轴向非线性声场的频率分量,以确立于条款中建议的最优比对位置。这些位置将使 f_u 以下频率的信噪比达到最大。

G.4.4 位于聚焦型声源换能器产生的几何球焦点处(低电压或线性激励)(概念 D)

注:本条的做法仅与时间波形概念 a、c、d 和 e 相关联。与时间波形概念 b 相关联的水听器位置类型见 G.4.3。

水听器位于聚焦型声源换能器几何球焦点处的声束轴上^[59]。假如换能器的几何焦距 F 未知,可以通过聚焦型换能器至声压焦点(声束轴上最大脉冲声压平方所在的位置)的距离 z_{pf} 用下式求出:

$$F = \left(\frac{1}{z_{pf}} - \frac{c}{f a_1^2} \right)^{-1} \dots\dots\dots (G.2)$$

对于线性传播条件,聚焦型换能器的非线性传播参数 σ_m (见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013) 应小于 1。

G.4.5 位于聚焦型声源换能器产生的几何球焦点处(为达到非线性失真而采用高电压激励)(概念 E)

水听器位于聚焦型声源换能器几何球焦点处的声束轴上。假如换能器的几何焦距 F 未知,可以通过 G.4.4 中所述线性激励条件下声压焦点的位置求出。为达到足够的非线性失真,非线性传播参数 σ_m 应为 3 或更大。

G.5 靠近换能器表面校准时的特殊考虑

G.5.1 通用要求

水听器与超声换能器表面之间的轴向距离 z 应为

$$z \geq \frac{c\tau}{2} \dots\dots\dots (G.3)$$

这样,由水听器反射到声源以及水听器背后的任何脉冲都不会对起初入射到水听器上的脉冲尾部产生干扰。

G.5.2 边缘波的影响

考虑一个半径为 a_t 的平面圆形声源换能器和与换能器的轴向距离为 z , 与声轴的侧向距离为 a_p 的声场点 P (见图 G.1)。直达平面波的声程长度为 z 。边缘波的最短声程长度为 $\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2}$, 即图 G.1 中的 r 。基本要求是, τ 不应大于边缘波与直达平面波之间的声程差。这一要求导致了下面的不等式:

$$\tau < \tau_{\max E} = \frac{\sqrt{z^2 + (a_t - a_p)^2} - z}{c} \dots\dots\dots (G.4)$$

该式可修改为

$$a_p \leq a_{p\max E} = a_t - \sqrt{(c\tau)^2 + 2c\tau z} \dots\dots\dots (G.5)$$

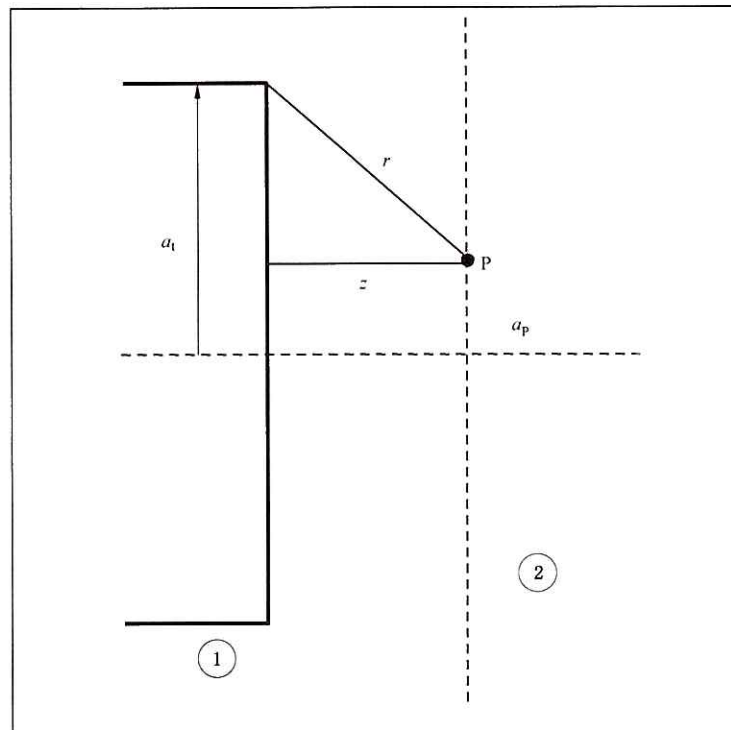
这就是定义可使用的近轴区域的不等式。

注: 根据实际设置的一组参数值, 不等式 (G.5) 有可能无解 (意思是, 形式上有一个负解), 在那种情况下, 这种类型的测量是不可能的。补救办法是缩短发声或脉冲的持续时间 τ 或者/和水听器距离 z 。式 (G.5) 中的不等式具有正解 (意味着这种类型的测量是可能的) 的条件可以列为如下的不等式:

$$z < z_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a_t}{c\tau} \right)^2 - 1 \right] c\tau \dots\dots\dots (G.6)$$

G.5.3 首波的潜在影响

靠近换能器的平面波声场还可能受到另一种类型的波的干扰。这些波就是由径向模式引起的首波, 它们在激发脉冲的过程中就可能存在于换能器中。假如换能器的径向波始于换能器的边缘, 并以速率 v_r 向内运动, 假定这个速率大于传播液体中的声速 c , 首波的声场辐射到液体里, 到达水听器并产生一个与水听器位置有关的干扰输出信号, 如文献 [60]、[61] 中的实例所述, 细节主要取决于 v_r 。因为通常没有关于这个量的先验知识, 故无法提出通用的建议。应各自通过实验研究其细节 (见文献 [60])。下面的处置提供了类似于式 (G.4) 和式 (G.5) 的评估公式, 如果 v_r 已知, 该式是非常有帮助的。



说明：

- 1 —— 换能器；
- 2 —— 水听器测量平面；
- a_1 —— 平面圆形换能器半径；
- z —— 距离换能器轴向距离，直达波路径长度；
- P —— 场点；
- a_p —— 波束轴横向距离；
- r —— 边缘波传输路径长度。

图 G.1 半径为 a_1 的平面圆形声源换能器近场中声场点 P 的坐标

G.5.4 靠近换能器的首波的处理

根据图 G.1, 考虑一个半径为 a_1 的平面圆形声源换能器, 考虑一个锥形区域(关于声束轴对称), 其底部是圆形换能器的表面、顶点是声轴上的点。

$$z = z_2 = a_1 \sqrt{\left(\frac{v_1}{c}\right)^2 - 1} \quad \dots\dots\dots (G.7)$$

式中：

v_1 —— 换能器平板中的径向波的速度。

该正圆锥的母线是：

$$a_p = a_1 - \frac{z}{\sqrt{\left(\frac{v_1}{c}\right)^2 - 1}} \quad \dots\dots\dots (G.8)$$

对于该区域内的点 (z, a_p) , 将会出现两列首波, 一列始发于声源周边上最近的那点, 另一个始发于声源周边上最远的那点^[60-61]。两列首波在声轴上叠加。在锥形区域的所有点上, 最近的首波都比边缘波更快地到达, 故应考虑对可用的几何区域的影响。与边缘波不同, 首波不会出现在声场中所有的点上。在锥形区域之外, 首波既不会存在, 也不会比边缘波更晚到达, 故在本部分中不必考虑。

在前面定义的锥形区域中,考虑首波的基本要求与边界波相同,即猝发声和脉冲的持续时间 τ 不应大于最近的首波与平面波分量的传播时间差。最近首波到达的时刻 t_H 为:

$$t_H = \frac{a_i - a_p + z \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1}}{v_i} \dots\dots\dots (G.9)$$

因此,类似于等式(G.4)和(G.5),条件为:

$$\tau \leq \tau_{\max H} = \frac{a_i - a_p - z \left\{ \frac{v_i}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1} \right\}}{v_i} \dots\dots\dots (G.10)$$

式中

$$a_p \leq a_{p\max H} = a_i - v_i \tau - z \left\{ \frac{v_i}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1} \right\} \dots\dots\dots (G.11)$$

假如满足下面的条件,则式(G.11)所列不等式有正解:

$$z < z_3 = \frac{a_i - v_i \tau}{\frac{v_i}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1}} \dots\dots\dots (G.12)$$

G.5.5 考虑边界波和首波贡献时,在靠近水听器位置情况下,有效的近轴平面波区域

假定水听器位于至平面圆形声源换能器的轴向距离为 z 处,该换能器的半径为 a_i (依据图 G.1),发射的猝发声或脉冲的持续时间为 τ 。随着与四个参考值有关的 z 的不同,关于传播时间的限定导致了下面的陈述。四个参考值中,前三个已在式(G.6)、式(G.7)和式(G.12)分别以 z_1 、 z_2 、 z_3 给出,第四个定义为:

$$z_4 = \frac{a_i \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1}}{\frac{v_i}{c} - \sqrt{\left(\frac{v_i}{c}\right)^2 - 1}} - c\tau \dots\dots\dots (G.13)$$

下面给出不同情况下的完整设置。

- a) 假如 $z \geq z_1$,这种测量类型是不可能的,因为违背了边界波渡越时间条件;
- b) 假如 $z < z_1$ 并且 $z \geq z_2$,这种测量是可能的,其近轴区域由式(G.5)描绘的不等式给出;
- c) 假如 $z < z_1$, $z < z_2$ 且 $z \geq z_3$,这种测量是不可能的,因为违背了首波渡越时间条件;
- d) 假如 $z < z_1$, $z < z_2$, $z < z_3$ 且 $z \geq z_4$,这种测量是可能的,其近轴区域由式(G.5)描绘的不等式给出;
- e) 假如 $z < z_1$, $z < z_2$, $z < z_3$ 且 $z < z_4$,这种测量是可能的,其近轴区域由式(G.11)描绘的不等式给出。

要注意水听器整个敏感区域应在有效近轴区域,以便 R 包括水听器半径,可能的话,加上声束轴到水听器中心的横向距离。

要注意前面的所有陈述都要遵从式(G.3)中所列不等式的通用要求。

附录 H

(资料性附录)

时间延迟谱法的要求和简要回顾

H.1 概述

时间延迟谱(TDS)法最开始提出是用于声学反射环境中扬声器性能的分析。随后,建议用作兆赫兹频率范围的水听器的校准^[55]。TDS法综述分析^[63]回顾并且深入考虑了TDS法的实现所需要的仪器。TDS法和互易^[56]法已经联合用于水听器的绝对校准,并提供了大量的实验数据^[64],还从频率分辨率方面考虑了品质因数。

本附录中,简要回顾了TDS法最重要的要求和相关的参数。

H.2 利用TDS法的超声水听器校准和性能评价

H.2.1 超声场参数测量

利用TDS法测量的基本参数是声压。声压幅度与水听器终端的电压同时记录。电压与相应的声压的比值为电缆末端频率连续函数的有载灵敏度。

H.2.2 TDS法适用的超声频率范围

该方法用于可听声时范围从20 Hz开始,用于生物医学超声时范围在1 MHz~40 MHz。该方法还成功地应用在100 kHz~1 MHz频率范围内。

局限性在于:

- a) 能够找到的测量设备的频率范围;
- b) 在采用替代法校准时,已校准的水听器在在所关注的频率范围内的可用性。

注:改进后的TDS法使校准带宽扩展到了至少60 MHz^[39]。

H.2.3 TDS法适用的声场类型

平面波(连续波和扫频波)。

H.2.4 空间分辨率

输出信号表示测量的时间信号的频率谱。距离分辨率依赖于滤波器带宽与扫频速率的比值。测量的频率分辨率的不确定度,一般说来,可以表示为:

$$f = 1/t_{\text{TDS}} \quad \dots\dots\dots (\text{H.1})$$

式中:

f ——频率,单位为赫兹(Hz);

t_{TDS} ——TDS法测量中可用的自由场时间,单位为秒(s)。

频率响应和指向性图都可以利用TDS法获得;参见文献[55]、[56]、[57]、[63]、[64]、[65]范例。

H.2.5 TDS法的灵敏度

该技术的灵敏度依赖于被测水听器的输入信号。声压幅度低至1 kPa时,典型的信噪比可以达到

近似 50 dB。最大可以达到的信噪比在 75 dB 的量级。典型地,可以检测到电缆末端有载灵敏度的变化约 0.2 dB。

H.2.6 灵敏度的可测量范围

电缆末端负载灵敏度或者电缆末端开路灵敏度低至近似 $-300 \text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$, ($1 \times 10^{-9} \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}$), 很容易测量。

H.2.7 复现性

灵敏度大于 $3 \text{ nV}/\text{Pa}$ 时,典型的复现性在小于 $\pm 5\%$ 的范围(在 $0.1 \text{ MHz} \sim 10 \text{ MHz}$ 范围内),可获得的复现性近似为 2% 。

H.2.8 脉冲响应

如果记录了 TDS 信号的相位,脉冲响应可以由频率响应的傅里叶变换得到。冲击响应的分辨率与记录的频率范围相同^[66]。

H.2.9 实施测量的步骤

典型的测量布置请参考文献[22]、[55]、[56]、[63]、[64]、[66]。H.3 和 H.4 简要给出了测试步骤。

H.3 测量步骤(灵敏度相互比对)

- a) 将换能器(发射器)和接收器(之前校准过的水听器^[15,66,67])置于装有除气蒸馏水的水域中并对准,水温控制在 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。
- b) 在选定的频率范围测量对数谱。
- c) 在内存中存储测量的频谱(频率响应)。
- d) 利用待测水听器替换已知的(参考)超声水听器;
- e) 重复步骤 a), b) 和 c)。

注 1: 定位可以如下进行:可以通过两种方式核实待校水听器与参考水听器是否在声场中相同位置:a) 脉冲激励换能器(发射器),调整轴向距离使得脉冲传播延迟对于两个水听器都相同,然后横向移动待校准水听器,使得信号最大;b) 设置 TDS 时间延迟与参考水听器相同,定位待校准水听器使得信号最大。

- f) 画出两个对数谱的差。(如果参考水听器频率响应平坦,差值表示待校准水听器的频率响应)。详见文献[22]、[55]、[56]、[62]、[63]、[64]。

注 2: TDS 法可以用来完成灵敏度的比较校准和绝对(互易)校准,详见文献[22]、[56]。然而,对于灵敏度比较法,需要一个具有已知响应是频率连续函数的参考水听器。

H.4 测量步骤(互易校准)

互易校准需要使用很复杂的测量装置和特殊设备。更具体地说,需要一个宽带电桥来解耦发射和接收信号,并需要一个宽带传感器虚拟负载。如果不用等效负载,可以用两个相同的发射器,详见文献[22]、[56]。有报告显示,TDS 法和互易校准测量过程的结合,其测量不确定度在 $2 \text{ MHz} \sim 15 \text{ MHz}$ 频率范围小于 10% ; 2 MHz 以下、 15 MHz 以上的不确定度增加到近似 20% ,主要是由于可用的信噪比。

H.5 局限性

TDS 法的一个基本限制是,假定传播媒质是非频散的。这并无任何实际困难,因为水听器校准是在除气的去离子水中进行的。

附 录 I
(资料性附录)
水听器相位响应的测定

I.1 概述

高频或者非线性失真波形的测量经常受到水听器的不理想的传递特性的影响。通过利用频率域内检测线的复数传递函数对测量波形解卷积可以得到修正的结果(参见 IEC 62127-1:2007+修正案 1:2013)。这个过程除了校准中确定水听器的幅度灵敏度外还需要确定水听器的相位响应^[76-78]。本附录描述了可以确定水听器相位响应的当前的技术状态。

一般地,电缆末端有载灵敏度和电缆末端开路灵敏度都是复数量,可以表示为幅度和相位。多年以来,幅度灵敏度可以利用各种已知的不同校准技术得到(例如,参见第五章)。相位灵敏度的确定要求测量的两种特性:第一,需要在测量过程中获取幅度和相位的相干检测过程;第二,需要一个具有平的或者至少公认的相位响应的相位标准,其相位灵敏度经过一级校准或者相位响应是作为先验已知的,用于相位校准。

注:“绝对”相位校准有很多实际的和技术上的难度,对于很多应用情形不是必要的。某种意义上,“绝对”在这里理解为,指的是具有理想平坦相位响应的标准源。

为了确定水听器的相位响应,成功应用到幅度校准的技术可以扩展到相干检测中。然而,在环境条件和调整水听器和换能器距离时的苛刻条件,使相位灵敏度出现了额外的困难。在频率为 20 MHz 时,10 mK 的水温变化会导致在 100 mm 的长度上 10°的相位变化。由于水温很难长时间保持不变,就要求测量技术能在数秒内获得所有数据。逐点的获取机制,比如,互易法或者光学干涉法,由于测量周期很长,是不能采用的。另外,沿着声传播方向 2 μm 的移动在 20 MHz 时会导致相位变化 10°,说明在调节精度上的难度很大。

在下面的章节中,叙述了三种在不同实验室成功应用到相位校准的技术。首先,给出了工作原理和结果范例,其次,讨论了不确定度和局限性。

I.2 相干时间延迟谱法

I.2.1 工作原理

TDS 法是利用超声波在媒质中的有限传播时间保证在校准过程中具备自由场条件^[56,62,63,68]。换能器发射的声压波需要一定的时间到达水听器,由此导致的接收信号的瞬时频率偏移为:

$$\Delta = \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{t_s} \frac{l}{c} \dots\dots\dots (I.1)$$

式中:

t_s —— 扫频时间;

l —— 水听器和换能器之间的距离;

c —— 媒质(通常是水)中的声速;

该式是就施加于换能器的发射电压的频率在 f_{start} 和 f_{stop} 之间扫过而言。如果用于产生发射电压和检测水听器信号的分析单元能够在两个信号之间有频率偏移,那么一个窄的 IF 滤波器就可选取声

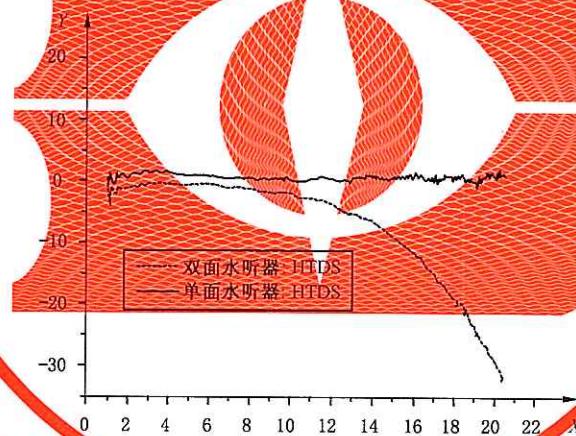
路径上的信号长度。如果频率偏置设置为 Δ ，就选取了发射器和水听器之间的直达路径，来自水池的混响就被滤掉了。

在实施相干检测技术时，曾经利用一个网络分析仪产生和检测信号。为了确保发射和接收信号之间具有固定的相位关系，采用了利用关闭相位锁定回路的单独混频器的外差方案[外差时间延迟谱法(HTDS)^[69]]。网络分析仪工作在频率偏置模式，本地振荡频率设定为 $f_{LO}=50$ MHz。第二个混频器提供发射信号输入到换能器。两次测量，一次使用参考水听器，一次使用待测水听器，测量在相同的激励条件下进行，水听器频率响应通过结果比较获得。

另外一项技术用在时域而不是用在频域，利用信号的不同传播时间^[39,69]，从测量信息中分离出无用的信号。第一步，确定换能器-水听器传输线的频率响应，换能器用连续扫频电压激励其频率从 f_{start} 增加到 f_{stop} 。然后，获得的与频率有关的信号电压利用反FFT算法转换到时域。直达声和混响信号以及其他干扰等以其各自传播时间上的信号表示。在时间位置 $t'=c/l$ 处设置一个门，所有的无用信号的贡献就消除了。

1.2.2 结果举例

相干 TDSS 法能够应用于所有常用的水听器。图 I.1 给出了两个敏感元件直径 1 mm、膜厚 25 μm 的薄膜水听器的测量结果。幅度灵敏度的增加是由于在 40 MHz 和 22 MHz 时薄膜厚度谐振引起了相位的变化造成的。



说明：

X —— 频率(MHz)；

Y —— 角度(°)。

图 I.1 两个薄膜水听器电缆末端开路灵敏度的相位

该结果是利用外差时间延迟谱法(HTDS)获得的。点线表示双面水听器，连续线表示单面水听器。

1.2.3 不确定度

不确定度依赖于很多测量参数，但其中最关键的是换能器和水听器之间距离的测定。其主要是受调节不确定度的影响和测量过程中温度起伏的影响。表 I.1 给出了针状水听器校准的代表值。

表 I.1 采用 HTDS 法校准直径为 0.2 mm 的针状水听器相位不确定度
(其中包含因子 $k=2$, 包含概率 95%) 的案例

频率范围 MHz	不确定度 (°)
2~5	15.9
5~12	8.8
12~20	13.0
20~30	19.1
30~40	25.0

注：双面水听器的整个膜片厚度为 50 μm ，单面水听器具有单层 25 μm 厚的 PVDF 膜。

注：绝对相位不确定度的意义到目前为止还不是十分明确。对于解卷积过程，常数和线性频率关系的相位改变是无关系的，感兴趣的值是其二阶导数。

I.2.4 局限性

基于 TDS 的方法可以应用到所有的常见水听器。利用适当的声源，可以获得足够的信噪比。由于这是一种二级校准方法，对于幅度和相位的绝对校准需要一个相位标准。

I.3 利用多层光学水听器的脉冲校准方法

I.3.1 工作原理

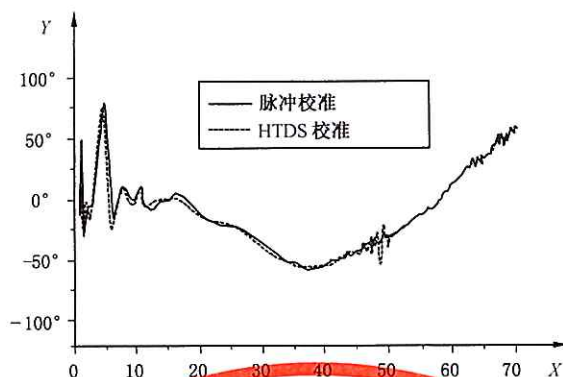
基于 TDS 的方法提供的灵敏度是相对于参考水听器的。为了获得绝对值，相位标准要求是一级校准或者相位是预先已知的。多层光学水听器具有良好的平坦幅度频率响应，并被期望具有一样平坦的相位响应。多层光学水听器适合用做要求的相位标准。

多层光学水听器包含涂覆了非传导性光学涂料的玻璃基质^[70-72]，这些涂料构成了一个显微干涉仪，其光学反射对于层的厚度以及光学指数的变化非常敏感。如果声波入射到水听器，声压使得层发生形变并且光学反射的变化可以简单地利用 He-Ne 激光、两个透镜和一个光电检测器组成的检测装置测量出来。基质被倾斜照亮以匹配光学谐振，即，传感器的工作波长匹配激光波长。由于玻璃基质的厚度有限，限定了时间窗使得测量不被来自后面的声反射所影响，用于声学激励的应为短脉冲。

一个快速电脉冲产生器驱动一聚焦换能器产生非线性畸变的短脉冲激励多层光学水听器。光电检测器的输出电压正比于声压，信号可以由采样示波器获取并存储在计算机中。将信号进行 FFT 得到其频谱。在不同的发射器和信号源匹配条件下重复测量，在较高的信号强度下，稍微改变脉冲的基波频率和谐波频率以覆盖测量的整个频率范围。注意到基波和谐波都不是窄带谱线而是宽带频率表示很多谱分量。频率响应由两次测量得到，第一次以光学水听器为基准水听器，第二次以待校准的水听器为基准水听器。

I.3.2 结果举例

作为一个例子，使用多层光学水听器利用脉冲技术测定了一个直径 0.2 mm 的针状水听器的相位。为了比较，给出了利用同样的参考水听器的 HTDS 法测量结果。



说明:

X —— 频率(MHz);

Y —— 角度($^{\circ}$)。

图 I.2 直径 0.2 mm 的针状水听器的电缆末端开路灵敏度的相位

图中,点线表示 HTDS 校准结果,连续线表示脉冲校准结果。

I.3.3 不确定度

由于很多影响被数字过程掩盖了,所以不确定度的评估主要受到 FFT 过程的影响。对于 TDS 法,不确定度评估的主要贡献,主要来自于水听器 and 换能器之间距离的确定。数值与表 I.1 中给出的不是完全相同。利用互相关法^[72]可以最小化线性相位项(尽管对于解卷积过程无关)。

注:关于相位不确定度值的意义,参见 I.2.3 的注。

I.3.4 局限性

由于玻璃基质的厚度有限,应当采用短的脉冲声来激励多层光学水听器。这就限制了应用范围在低频限约为 500 kHz。为了获得更高的频率用于解卷积过程,需要有强聚焦非线性脉冲,并限制水听器的敏感元件直径小于 0.5 mm。与 HTDS 法结合起来,能够建成覆盖常用压电和光学水听器整个频谱的校准服务条件。

I.4 非线性脉冲传播建模

I.4.1 工作原理

I.2 和 I.3 的技术利用与已知的标准(或参考)设备比较来确定相位响应。也可以用理论计算的已知的声场作为参考。然而,不管哪一种方式,应该保证实验的声场与理论求解的声场相一致。

一种可能的实现是利用非线性脉冲传播^[73]。一个单元件换能器发射短的声脉冲在很长距离上聚焦。在非线性传播过程中,会产生数个与基波有相位关系的谐波,这可以通过理论模型计算出来。如果测量得到谐波的相对相位,与理论模型进行对比可以得到测量系统的相位响应(而不是单独水听器的相位响应)。

I.4.2 局限性

脉冲传播法要得到的是整个检测链的相位响应。只有当其余所有因素的响应都已经知道时,才能求得水听器的相位响应。应利用适当的声传播模型,该模型应施加于水听器的实验声场仔细验证。

附录 J

(资料性附录)

关于水听器敏感元件最大尺寸的考虑

J.1 近场情况下的最大水听器尺寸(附录 G——水听器位置概念 A)

根据附录 G,如果选择了水听器近场位置概念,最大的水听器半径,理论上来说,在 G.4.1 的意义上只受限于可用的近轴区域半径。然而,如果推荐的侧向位移检查显示有幅度的变化,在所有的侧向方向上水听器位移等于有效水听器半径,这些变化应小于±1 dB。

J.2 远场情况下的最大水听器尺寸(附录 G——水听器位置概念 B)

为了评定需要,基于平面活塞声源远场线性传播的简单近似可以给出:

$$a_{\max} = \frac{cz}{8fa_1} \dots\dots\dots (J.1)$$

注 1: 严格来讲,只有 $z \gg a_1$, 并且 $z \ll 20fa_1^2/c$ (参见文献[2])才能应用这个公式,但是在测量中这通常都是满足的。

注 2: 在文献[2]中,已经推导了理论的修正过程,将测量声压幅度乘以 $(1+\delta_{av})$ 以获得真实的声压幅度,其中, $\delta_{av} = [\pi a / (16a_{\max})]^2$, a_{\max} 由式(J.1)给出。这只能应用于参考水听器方向,即,水听器表面垂直于声轴。

注 3: 式(J.1)也可以用于水听器位置概念 D(参见附录 G)的情形。

J.3 为达到非线性失真而置于长传播路径的远场时的最大水听器尺寸(附录 G——水听器位置概念 C)

用于相互比对的场点处的时间波形包含很多谐波频率。每个谐波频率的声压分布需要足够宽,以保证水听器单元的空间平均不会降低所提供的校准精度。谨慎地选择换能器的直径和传播距离,可以在整个水听器的有效接收孔径上近似得到平面波条件。

由于高次谐波的声束宽度随着频率的提高不断减小,在水听器的频带限的上限频率 f_u 处,空间平均会更重要。通过利用参数 γ 考虑最高频率的谐波的声束宽度,空间平均的影响可以估计出来,由下式给出:

$$\gamma = (f_u \text{ 分量} \text{ 的 } -6 \text{ dB 波束宽度}) / (\text{水听器有效直径}) \dots\dots\dots (J.2)$$

注 1: 表达式中的声束宽度指的是测量值,并且如果 $\gamma > 2$,测量值和真值的声束宽度可以认为相等。 $\gamma = 2$ 的条件相当于 7.5% 的空间平均修正。

空间平均误差小于 3.5% 要求 $\gamma > 3$,允许的误差减小到 2% 时需要 $\gamma > 4^{[74]}$ 。

注 2: 推荐的水听器最大半径由 $a_{\max} = cz / (8fa_1)$ 给出,考虑到 $z = a_1^2 f / c$,这相当于 γ 值近似为 2.8。

可以推导简单的方针确立实验条件以限定空间平均效应在推荐水平。分析过程中要作两个假设:

——在用于相互比较的在非线形条件下,基频分量的声束宽度与线性传播条件下得到的声束宽度相同。

注 3: 随着 σ 值的不断升高,声压分布出现变化。这导致单个谐波的波束剖面变宽^[36]。因此,当前的分析代表了最坏的情形下的描述。

——谐波声束宽度由 w_f / \sqrt{n} 给出,其中 w_f 是基频波的声束宽度, n 是谐波数^[75]。

——如果 f_f 是信号的基础驱动频率用于产生非线性畸变, f_u 是用于校准的水听器的频带的上限频率,那么,假设一个理想的平面活塞换能器和水听器满足保持空间平均影响小于推荐水平。 z_{\min} 的表达式

对于较大 ka_i 值是有效的:

$$z_{\min} = 0.451 \gamma a_h k a_i \sqrt{\frac{f_u}{f_l}} \dots\dots\dots (J.3)$$

式中:

a_h ——水听器有效半径;

$k = 2\pi f_f / c$ ——波数;

a_i ——发射超声换能器的有效半径。

这个方程可以用来推导 z_{\min} 的近似值, 尽管由于非线性展宽, 实际上使用的是更短的距离。 ||

在 bC 概念方法(参见附录 G)的任何实施方案中, 均应研究各个离轴位置波形的频率成分, 以验证声压分布特征。

注 4: 式(J.3)还可用于求解给定距离 z 处的最大水听器半径 a_h 。

附 录 K
(资料性附录)
两换能器互易校准方法

K.1 概述

在查询技术文献时,会介绍许多关于声场参数的绝对检测方法。使用一个已校准的水听器可完成声场中某一点声压幅值的绝对检测。水听器校准技术的选择可从得到的合成不确定度和应用方法的便利性等方面来考虑。例如,附录 F 中介绍的光学干涉法,提出一种直接的基准方法,具有最低的校准不确定度。但它对设备性能相当苛刻,很难建立起来。关于其他的水听器校准方法,使用最多的是互易法和平面扫描法(参见附录 D)这两种,后者还涉及总功率的测量以及使用水听器进行声束剖面测量。

互易技术涉及另一个换能器(两换能器法),或者甚至是产生声场的换能器的测量(自易法),相对于光学干涉法和平面扫描法,互易技术需要的实验设备相对简单,而且不涉及复杂的测量步骤,任何实验室皆可建立用于日常超声测量。所涉及的测量都与电有关,因此可称为绝对技术,又是间接法,因其不涉及声压的实现。不过,所有数据必须进行电声修正,同时结果分析相当复杂。

已经作废的标准 IEC 60866:1987 介绍了互易校准的详细步骤,基于上面提到的原因,有必要在本部分中包含 IEC 60866 描述的有效内容。

K.2 新增的术语、定义和符号

下列术语和定义仅适用于本附录。

K.2.1

可逆换能器

既可作为发射器又可作为水听器的换能器。

[IEC 60565:2006,定义 3.26]

K.2.2

互易换能器

线性、无源的可逆换能器。

[IEC 60565:2006,定义 3.24]

K.2.3

水听器的开路电压

U

没有电流通过终端时,水听器电端呈现出来的电压。

注:水听器开路电压的单位为伏特(V)。

[IEC 60565:2006,定义 3.19]

K.2.4

水听器的自由场灵敏度

M

水听器的开路电压与水听器移走后无干扰自由场中水听器参考中心位置处的声压的比值。

注 1:声压是正弦变化的。

注2: 有时候用“灵敏度”代替术语“响应”。

注3: 水听器自由场灵敏度的单位为伏每帕斯卡(V/Pa)。

[IEC 60565:2006, 定义 3.15]

K.2.5

发射器的发送电流响应

S

在给定的频率上, 声场里没有干扰影响的特定点上的声压与流过发射器电端的电流的比值。

注: 发射器的发送电流响应的单位为帕斯卡每安培(Pa/A)。

K.2.6

互易常数

J

任何系统里互易换能器用作发射器和接收器时, 换能器自由场电压灵敏度 M 与其发送电流响应 S 的比值。当发射声波近似为平面波时, 互易常数称为平面波互易常数, 约等于 $2A/\rho c$ 。

注1: 在平面波传播中应用平面波互易常数。在换能器的实际远场, 没有使用 K.5.6 描述的纯粹的远场条件。为了解决这个问题, K.4.4 描述的修正因子包含了来自于平面波条件的一个允许偏差。

注2: 互易常数的单位为瓦特每二次方帕斯卡(W/Pa²)。

K.2.7

电缆末端的漏电阻

R_l

水听器电缆末端电负载两端的电压与穿过负载端的直流电流的比值。

注1: 应说明确定 R_l 期间所使用的电压。

注2: 电缆末端的漏电阻单位为欧姆(Ω)。

K.2.8

水听器基元的机械 Q 值

水听器的谐振频率与带宽的比值。该带宽是谐振点处动生阻抗的 $1/\sqrt{2}$ 倍处所对应频率的间隔。

K.3 本附录所用符号列表

A_1	辅助换能器的有效面积
a	有效水听器半径
a_1	辅助换能器的有效半径
a_u	使参考电压 U_{ref} 减少至与电压 U 相等的系数
a_{u1}	使参考电压 U_{ref} 减少至与电压 U_1 相等的系数
a_{11}	使参考电压 U_{ref} 减少以便通过阻抗 R_0 的驱动电流为 I_1 的系数
c	媒质(通常是水)中声速
d	水听器和反射器之间的距离
d_1	辅助换能器和反射器之间的距离
G_1	仅有辅助换能器衍射损失时的修正系数
G_2	辅助换能器和水听器衍射损失的修正系数
G_c	某一测量条件下, G_1 和 G_2 共同作用时的修正系数
I_1	通过辅助换能器的电流
I_k	辅助换能器短路时的电流
J	互易常数

J_p	$\{=2A/\rho c\}$, 平面波互易常数
k_{u1}	辅助换能器开路电压的修正
k_u	水听器开路电压的修正
M	水听器的自由场灵敏度
M^*	在假设理想自由场平面波测量条件下,水听器的表观自由场灵敏度
N	近场距离
p	声源声压
p_1	在辅助换能器的平面波场里被忽略的声源声压
R_0	与精密衰减器的特性阻抗相等的标准负载阻抗
R_{l1}	水听器电缆末端的漏电阻
r	反射器-水界面处的幅值反射系数
s	$\{(d_1+d)\lambda/a_1^2\}$, 辅助换能器和水听器之间的归一化距离
S	发射器的电流发送响应
S_1	辅助换能器的电流发送响应
S_1^*	在假定理想平面波测量条件下,辅助换能器的表观电流发送响应
U	水听器的开路电压
U_1	辅助换能器的开路电压
U_{ref}	参考电压
v	换能器辐射面的振速
z	沿着换能器声轴的距离
α	媒质(水)中平面波的幅值衰减系数
λ	超声波长
ρ	测量液体(水)的密度

K.4 两换能器互易法原理

K.4.1 概述

依据 K.4.2 到 K.4.4 介绍的原理,推荐以下的校准步骤。

K.4.2 通过自易法获得发送电流响应

首先通过自易法(参见 K.9)校准一个平面、互易换能器(下标 1 定义的相关的参数)。在假设的理想平面波测量条件下,测量出电流 I_1 和接收信号电压 U_1 ,利用式 K.1 可得到表观发送电流响应 S_1^* :

$$S_1^* = \frac{p_1}{I_1} = \left(\frac{U_1}{I_1 J_p} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (K.1)$$

同时

$$J_p = \frac{2A_1}{\rho c} \dots\dots\dots (K.2)$$

式中:

- p_1 ——换能器 1 发射的平面波场中的声压;
- J_p ——平面波的互易系数;
- A_1 ——换能器 1 表面的有效面积;
- ρ ——传播媒质(水)的密度;
- c ——传播媒质中的声速。

已知换能器 1 发射的平面波场中的声压与电流有确定的函数关系。

K.4.3 置换后的自由场电压灵敏度

待校准的水听器浸没在换能器 1 产生的已知声场中,测出其输出的开路电压 U ,则在假定理想平面波测量条件下,表观自由场电压灵敏度由式(K.3)给出:

$$M^* = \frac{U}{p_1} = \frac{U}{I_1} \left(\frac{I_1 J_p}{U_1} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (K.3)$$

K.4.4 非平面波条件的修正

由于换能器的实际尺寸与声波波长相当,同时这些频率在水中具有相当高的声吸收,因此在这里讨论的超声频率一般不能满足平面(或球面)互易条件。实际上,可以使用一个辅助条件并允许与频率相关的变化,比如,影响发射器和接收器之间声传播的衍射和衰减。这种允许体现在计算校准结果 $M = M^* K$ 时,采用了修正系数 K 。这个修正系数是基于平面、圆形活塞声源发散声场的大量的声压分布理论模型,辐射源上任意点、任意时刻的振速都是相同的(见 K.11)。

注:两换能器互易法原理在 K.12 参考文献[1]中有详细介绍。

K.5 校准测量条件

K.5.1 实验准备概述

图 K.1 是校准方法所需的实验准备,图 K.2 给出了最简单构成方式的电路连接图。水槽里一个厚的不锈钢反射器反射辅助换能器 1 重复发射的 10~20 周期的纯音脉冲。在辅助换能器的自易校准中,调整换能器的位置使其发射的超声声束轴垂直于反射表面;对于第二步水听器的校准,倾斜反射器使水听器落在反射声场的中心,布置好换能器和水听器,以便在第二步中所用到的反射角小于 10° ,避免反射系数的值与标准入射时有较大的偏离。

K.5.2 辅助换能器

辅助换能器应具有平面、圆形有效表面,直径至少为所用换能器水中声波长的 10 倍,同时为适于使用互易校准步骤应满足 K.5.4 列出的条件。此外,所选择换能器辐射的声场应尽可能与平面、活塞式声源的理论预期相一致。

注:作为选择合适的辅助换能器的一个导则,建议通过实验测出的有效半径的值 a_1 (参见 K.5.3)与选择的任何换能器的敏感元件的真实物理半径的偏差不要超过 $+2\% \sim -5\%$ 。

虽然辅助换能器有能力满足一个有限范围的工作频率,但通常需要一组换能器来覆盖整个校准带宽。

K.5.3 辅助换能器的有效半径

辅助换能器的有效半径 a_1 是等效活塞源的半径,等效活塞源在远场声压幅值的空间分布与换能器本身极为相似。有效半径由声轴上水听器测出的声压幅值和位置的关系图来确定(K.10.1 详细描述了为确定有效半径而推荐的实验方法)。

K.5.4 在互易步骤中使用,要检查换能器的适宜性

实际上,用下面的方法便足以检查互易校准步骤中专用换能器的适用性。对换能器进行成对检查,一个作发射器另一个作接收器。在位置保持不变的情况下,发射器和接收器互换,比较接收器的开路输出电压与发射器的输入电流之比值,两个值的偏差应不超过 10%,如果偏差太大,至少其中一个换能器

是不令人满意的,把这两个换能器与第三个可逆换能器进行比较就可找出发生故障的换能器。

注:如果换能器结构相同,用上述的测试其可能具有相似的线性或非线性,看起来是互易的,因此这些测试在假定第一个换能器适用互易校准步骤之前,第二个换能器应选用不同的类型。参见 K.12 参考文献[2]。

K.5.5 反射器

反射器是足够直径的不锈钢圆盘,在距离辅助换能器表面至少 1.5 倍的近场距离 N_1 ($N_1 = a_1^2/\lambda$, a_1 是换能器有效半径, λ 是工作频率的水中波长)上,能够收集辅助换能器的所有超声波束。反射器的厚度应在使用最低脉冲频率时后表面的第一个反射不会影响到前表面的直达波。反射器的平坦度优于 $\pm 10 \mu\text{m}$,表面粗糙度优于 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

K.5.6 声路径

校准过程中,对于具体使用的换能器,建议从换能器的背面通过反射器返回到换能器的总声程(图 K.1 中的 $2d$),以及换能器到水听器的声程($d+d_1$)应落在近场距离的 1.5~3 倍处。

注:总声程位于近场距离的 1.5~3 倍处便于确定修正系数(参见 K.4.3)。5 MHz 以上的频率,若测量距离较大,要考虑传播媒质中的声衰减,对结果进行修正。在近场距离上完成的测量会由于声场中难以避免的结构干扰,而使不确定度变大。

K.5.7 测试水槽

测试水槽应足够大,确保辅助换能器和反射器之间的距离至少为所用换能器的近场距离的 1.5 倍。换能器和水听器距水槽壁应有足够的距离,使这些表面反射的任何信号与主要的直达波信号之间的时间延迟不少于最低使用频率的猝发周期。此外,如若可能,表面应铺设如橡胶、致密形毛毯等吸声材料,反射器自身至少倾斜 10° 。

水槽要充满新鲜的蒸馏水或除气水,由于不断地从大气中吸收空气,48 h 内就应该更换。

注:可将水置于不超过 2 kPa 的气压条件下除气,或将水在 80°C 持续加热 1 h 进行除气(见 IEC/TR 62781)。

K.5.8 对准

换能器、水听器和反射器要精密定位和定向,因此这些部件需安装在可适当调节的稳固、精密的支架上。建议水听器和换能器定位装置的横向精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,声中心各方向的调节精度不低于 $\pm 0.05^\circ$ 。反射器应能沿着平行于它表面并垂直于水听器和辅助换能器声中心连线的轴大约旋转 10° (见图 K.1)。

K.6 实验方法

经校准的电压、电流表不能直接用于猝发脉冲信号的测量,为了避免使用它们,建议借助输出阻抗等于 R_0 的精密衰减器,利用参考电压 U_{ref} 、已知电阻 R_0 来测量 I_1, U_1 和 U 。那么:

$$U_1 = a_{u1} U_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots (\text{K.4})$$

$$U = a_u U_{\text{ref}} \quad \dots\dots\dots (\text{K.5})$$

$$I_1 = \frac{a_{i1} U_{\text{ref}}}{R_0} \quad \dots\dots\dots (\text{K.6})$$

式中:

a_{u1}, a_u, a_{i1} —— 比例常数。

把式(K.4)、式(K.5)和式(K.6)代入式(K.3),得到:

$$M^* = \frac{a_u}{a_{i1}} \left(\frac{R_0 a_{i1} J_p}{a_{u1}} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (\text{K.7})$$

在 U_{ref} 未知的情况下,测量周期中设定的 U_{ref} 剩余的常数和设定的绝对值 R_0 是已知的,通过式(K.7)就可得到水听器自由场灵敏度的绝对值。建议在使用频率范围内, R_0 的值为 $\pm 1\%$ 。

K.10.2 详细给出了确定 a_{u1} 、 a_u 和 a_{f1} 的实验步骤。

K.7 结果计算

K.7.1 修正系数 k

在计算校准测量结果时,必须考虑引用式(K.7)所假设的理想边界条件和实际使用中的任何差别。如 K.4.3 中描述,引入修正系数 k 后,水听器真实的自由场灵敏度由 $M^* k$ 给出。

K.11 对修正系数进行了全方位的评估。然而,在某些特定条件下,与本部分建议的校准步骤保持一致时,修正系数可得到很大的简化,这些条件为:

- a) 辅助换能器与水听器的直径之比大于 5,且
- b) 所有测量,其总声程长度落在辅助换能器近场距离的 1.5 倍~3 倍之间。

定义一个归一化距离 s , s 为辅助换能器和水听器间的声传播距离除以近场距离的值,条件 b) 可简化为:

$$1.5 < \frac{2d_1 \lambda}{a_1^2} < 3 \quad \dots\dots\dots (K.8)$$

和

$$1.5 < s < 3 \quad \dots\dots\dots (K.9)$$

式中:

$$s = (d_1 + d) \lambda / a_1^2$$

满足这些条件情况下, k 可由式(K.10)给出:

$$k = G_c \frac{k_{u1}^{1/2}}{k_f} e^{a'a} \quad \dots\dots\dots (K.10)$$

式中:

G_c —— (仅为 s 的函数)对接收信号传播过程中衍射效应的修正,由于超声作为波束并不是无限大平面波,会使真实的系统偏离推导 J_p 时假设的平面波条件,在校准过程中可使用 $J_p G_c^2$ 作为互易系数。图 K.3 给出了 G_c 与 s 的关系曲线。

a' —— 纯净的除气水、温度为 23 °C 时的幅值衰减系数,其值为:

$$a' = 2.2 \times 10^{-14} f^2 \text{ Hz}^{-2} \text{ m}^{-1} \quad \dots\dots\dots (K.11)$$

k_{u1} —— 辅助换能器作为接收器时必须与其输出的信号电压相乘的一个系数,乘积为等效开路电压。假如发射与接收间的电负载条件(如:脉冲发生器输出阻抗)没变,测量 I_k 就可得到 k_{u1} , I_k 是换能器短路时的电流,那么:

$$k_{u1} = \frac{I_k}{I_1} \quad \dots\dots\dots (K.12)$$

注:假如发射脉冲后即时用电控门把信号发生器与换能器隔绝开来,并使用了一个高阻抗的检测电路, k_{u1} 的值可当作 1。

k_u —— 与水听器接收电压相乘的一个系数,乘积为等效开路电压。通常,被校水听器的电负载在实际应用时也要使用,就不必对开路电压灵敏度进行修正。

参阅 K.12 的参考文献[4]到[10]。

K.8 精度

建议的校准步骤和简化的修正系数提供了一种校准 0.5 MHz~15 MHz 频率范围内水听器的方

法,可使电压灵敏度级总的系统不确定度小于±1.5 dB。这种技术在测量中能够达到的不确定度远小于±1.5 dB。

参阅 K.12 的参考文献[3]。

K.9 平面波互易法

互易换能器应满足机电互易条件:

$$\left| \frac{V}{I} \right| = \left| \frac{U}{F} \right| \dots\dots\dots (K.13)$$

式中,(发送状态下) V 是输入电流为 I 时,换能器辐射表面的均匀振速;(接收状态下) U 为假设换能器表面是刚性的条件下,在换能器上作用力 F 产生的开路电压。

根据换能器发送电流响应的定义(见 K.2.5)和水听器的自由场灵敏度(见 K.2.4):

$$S = \left| \frac{p_{tr}}{I} \right| \quad M = \left| \frac{U}{p_{rec}} \right| \dots\dots\dots (K.14)$$

式中:

p_{tr} ——当输入电流为 I ,且无干扰影响情况下,发射换能器前端声波的声压;

p_{rec} ——在无干扰平面波自由场中,接收器声中心位置处的声压。若移走水听器,将得到开路电压 U 。

对于平面波来说,发射器前端的声压与均匀表面振速有以下关系:

$$p_{tr} = \rho c v \dots\dots\dots (K.15)$$

式中:

ρ ——传播媒质的密度;

c ——媒质中声速。

如果现在假定发射与接收之间的声传播没有损失或衍射影响,例如在无损失自由媒质传播的无限大平面波中

$$p_{tr} = p_{rec} = p \dots\dots\dots (K.16)$$

作用在面积为 A 的接收器表面上的力,由式(K.17)给出:

$$F = 2Ap \dots\dots\dots (K.17)$$

因此,在假设平面波边界条件下,比值

$$\frac{M}{S} = \frac{UI}{p^2} = \frac{2A}{\rho c} = J_p \dots\dots\dots (K.18)$$

平面波互易参数 J_p 的定义仅决定于换能器面积,若已知,测量 U 和 I 后就可直接确定 p ,以及 S 和 M 。

注:如果 I_1 和 U_1 分别是实际换能器发射的输入电流和在水中经过水/金属界面反射后接收的猝发脉冲信号,那么:

$$\frac{M_1^*}{S_1^*} = \frac{U_1 I_1}{p^2} = J_p \dots\dots\dots (K.19)$$

式中:

M_1^* , S_1^* ——在假设的理想平面波测量条件下,换能器的表观自由场电压灵敏度和表观发送电流响应。

因此,利用等式(K.3)和(K.19),有:

$$S_1^* = \left(\frac{U_1}{I J_p} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (K.20)$$

在考虑到频率的任何实际测量计划中,都无法实现真正的平面波条件,必须容许 p_{tr} 和接收器有效

平面上平均值 p_{rec} 的差异。

K.10 所推荐实验步骤的详细介绍

K.10.1 估计辅助换能器的有效半径

当换能器工作在连续波方式时,辅助换能器的有效半径 a_1 由声轴方向上声压幅值随距离变化的曲线确定;在脉冲声场里,使用未校准的水听器也可以完成曲线的测量,所使用水听器有效元件的直径至少要小于辅助换能器的 $1/10$,同时,为建立起稳态条件,脉冲串应足够长。用实验方法确定的声场分布与理想活塞声源的预期声场相比较,也就是说,在辐射面以空间振速 v 均匀移动的声场里,可通过调节理论声源的半径 a_1 ,使实验数据与声场模型达到最优吻合。活塞声源的理论分布由式(K.21)给出:

$$\frac{p}{p_{ir}} = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} [(z^2 + a_1^2)^{1/2} - z] e^{-\alpha' z} \right| \quad \dots\dots\dots (K.21)$$

式中:

- p ——沿声轴方向距离换能器为 z 处的声压幅值;
- p_{ir} ——平面波声压幅值, $p_{ir} = \rho c v$
- λ ——声波波长;
- a_1 ——声源的半径;
- α' ——水在 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 的幅值衰减系数。

实际上, p_{ir} 和 a_1 的值都调整到使实验与理论数据达到最优吻合。

注:获得最优吻合的一个方法如下:假如 $Y_i(z_i)$ 定义为 $20 \log_{10} U_i$, 其中 U_i 是水听器在距离换能器 z_i 处输出的信号电压幅值, $Y'(z_i)$ 定义为:

$$20 \log_{10} \left| 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} [(z_i^2 + a_1^2)^{1/2} - z_i] e^{-\alpha' z_i} \right| \quad \dots\dots\dots (K.22)$$

参数

$$\sum_{i=1}^n X_i^2 \quad \dots\dots\dots (K.23)$$

其中

$$* X_i = Y_i(z_i) - Y'_i(z_i) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n Y_i(z_i) - \sum_{i=1}^n Y'_i(z_i) \right] \quad \dots\dots\dots (K.24)$$

取 a_1 时有最小值,这个调整方法仅对处于 $1.5z_m < z < 3z_m$ 的距离适用, z_m 是指在规定的 a_1 下,最大声压位置与换能器表面的距离 z 。一个成功的模式是通过估计 $X_m(z_m)$ 来检查真实的声场, $X_m(z_m)$ 的幅值小于 0.5 dB 表明模型是令人满意的。

K.10.2 估计电压衰减系数

在参考电压源和已知的标准负载 R_0 之间运用一个精密衰减器就可确定所用的电压衰减系数 a_{u1} 、 a_u 和 a_{11} (见图 K.2)。

对于 a_{u1} ,示波器可有选择地显示 R_0 两端的电压 U_1 ,设置衰减器以检验信号值与幅值一致。通过这种方法,便可得出 a_{u1} ,即衰减器的设置值,类似地,通过比较 R_0 两端的 U 就可确定 a_u 。

设置衰减器也能确定 a_{11} ,但这时比较并调整到相等的两个信号是流过换能器和 R_0 的电流。让其有选择地通过电流探头进行检测,输出电流显示在示波器上,不需要对电流探头进行校准。

注1:图 K.2 所示的简单电路中,换能器用相同的纯音发生器来驱动得到 U_{ref} 。假如实际中也这样安排,就会发现在开关 SW A 和换能器间放置一个衰减器后,调节与 U_{ref} 无关的驱动电流就会变得方便了。

运用图 K.2 所示的电路结构框图,需要详细的实验步骤:

- i) 当反射器把发射信号反射回辅助换能器,而且开关 SW B 和 SW C 都在位置 1 时, a_{11} 的值由衰

减器的设置来确定,此时开关 SW A 在两个位置监视的信号电压是相等的。

ii) 保持反射器和开关 SW B 的设置如 i) 所述,SW C 拨动到位置 2,此时开关 SW A 在两个位置的信号是相等的,衰减器的设置就是 a_{u1} 的值。

注 2: 这种情况下,位置 1 的监视信号是 U_1 ,当然,相对于源脉冲,它有一个与在水槽中脉冲的传播时间相等的延迟时间,因此需要一个适当的延迟触发。

iii) 按照 i) 和 ii) 所述的详细步骤,把反射器调整到对准水听器的反射声场的中心,通过运用式 (K.7) 平方根项的值 a_{11} ,给出了 a_{11} 及对应的 a_u 值的另一种测量方法。在调整反射器的过程中参考电压 U_{ref} 不必保持常数。

为确保反射波束对准换能器[步骤 i) 和 ii)]或水听器中心[步骤 iii)],获得最大的检测信号,仔细地调节这些组成部分的位置是很重要的。设备的调节应该在垂直于发射声波传播的平面上和其声中心方向上进行。调节的精度应至少为波长和 0.05° 。

K.11 修正系数 k 的估计

比 K.7 更通用的修正公式由下式给出:

$$k = \left(\frac{k_{u1} G_1}{r} \right)^{1/2} \cdot \frac{e^{\sigma'd}}{k_u G_2} \dots\dots\dots (K.25)$$

式中:

G_1 —— 在辅助换能器的自易校准中,考虑到发射和接收之间声波的变化所必须的修正;

G_2 —— 在辅助换能器产生的已知声场中,考虑水听器校准中的等效变化必须的修正;

r —— 反射器/水界面的幅值反射系数,在 K.7 定义了其他的参数。

G_1 或 G_2 的值适用于任何实验系统,其等于接收器(水听器)表面的平均声压与平面波场中(无干扰情况下)发射器表面的瞬时声压之比,是与声程长度有关的函数。K.12 的参考文献 [7] 给出了理想活塞型声源在不同的接收器/发射器直径比情况下,理论推导的归一化距离与比值 $|p/p_0|$ 的对数曲线关系图。结果如图 K.4 所示(归一化距离是距换能器表面的距离除以近场距离)。 G_1 的值与既是发射器又是接收器的辅助换能器有关,可从图上直径比值为 1 的对应曲线上获得; G_2 与辅助换能器发射和水听器接收的声波有关,需要使用图上与直径比值相对应的曲线,本部分建议,任何情况下这个比值应小于 0.2。

对于水/不锈钢界面, $1/r$ 的值是 1.033。

在 K.6 中,包含了修正系数中使用的其他术语。

注 1: 图 K.4 中给出的比值 $|p/p_0|$,单位为 dB。

注 2: 当把水听器放在其他媒质中进行校准,需要额外的修正项。

K.12 参考文献

[1] BEISSNER, K. Free-field Reciprocity Calibration in the Transition Range between Near Field and Far Field. *Acustica*, 1980, 46, p.162.

[2] BRENDL, K., LUDWIG, G. Calibration of Ultrasonic Standard Probe Transducers. *Acustica*, 1976, 36, p.203.

[3] GLOERSEN, W. B., HARRIS, G. R., STEWART, H. F., LEWIN, P. A. A Comparison of Two Calibration Methods for Ultrasonic Hydrophones. *Ultrasound Med. Biol.*, 1982, 8, p.545-548.

[4] YAGHJIAN, A. D. Generalized or Adjoint Reciprocity Relations for Electroacoustic Transducers. *J. Res. Nat. Bur. Stand. (U.S.)*, 1975, 79B, p.17.

[5] BRENDL, K., LUDWIG, G. Korrekturen bei der Kalibrierung von UltraschallSonden-

mikrofonen. Fortschritte der Akustik, DAGA '76; VDI-Verlag Düsseldorf, 1976, p.393.

[6] GITIS, M. B., KHIMUNIN, A. S. Diffraction Effects in Ultrasonic Measurements (Review).Sov. Phy.-Acoust., 1969, 14, p.413.

[7] FAY, B. Numerische Berechnung der Beugungsverluste im Schallfeld von Ultraschallwandlern. Acustica, 1976, 36, p.209.

[8] KHIMUNIN, A. S. Numerical Calculation of the Diffraction Corrections for the Precise Measurement of Ultrasound Absorption. Acustica , 1972, 27, p.173.

[9] BRENDDEL, K., LUDWIG, G. Measurement of Ultrasonic Diffraction Loss for Circular Transducers. Acustica, 1975, 32, p.110.

[10] PINKERTON, J. M. M. A Pulse Method for the Measurement of Ultrasonic Absorption in Liquids Results for Water. Nature , 1947, 160, p. 128.

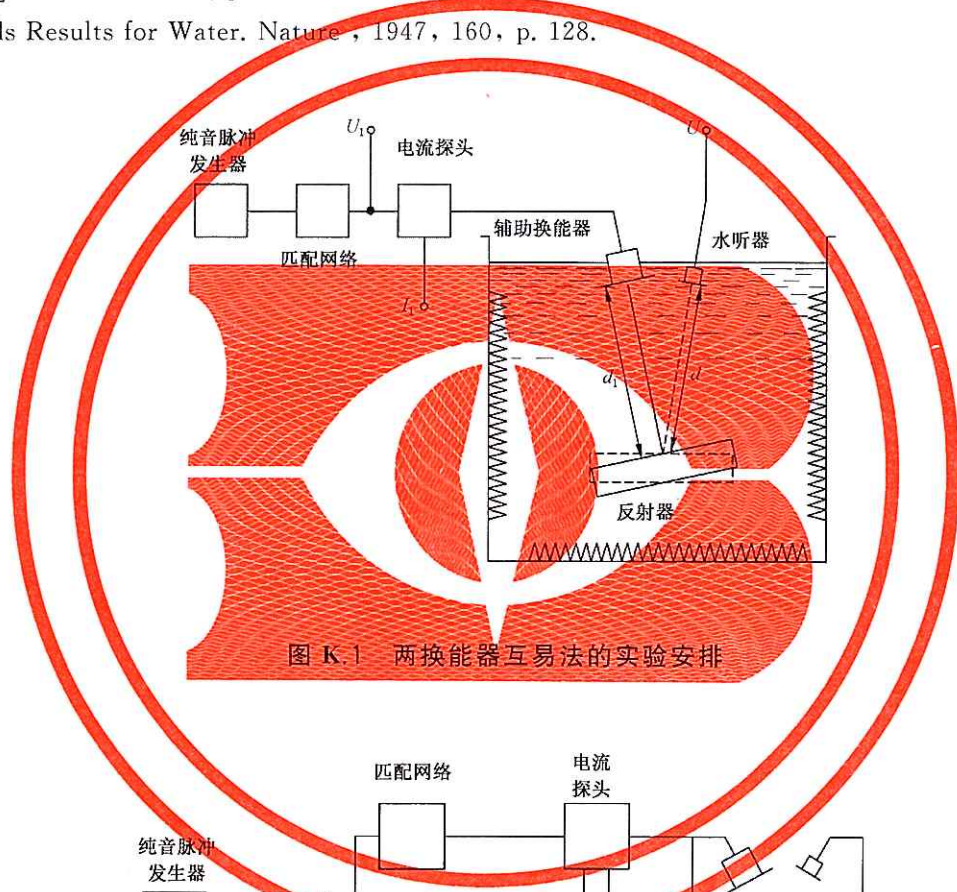


图 K.1 两换能器互易法的实验安排

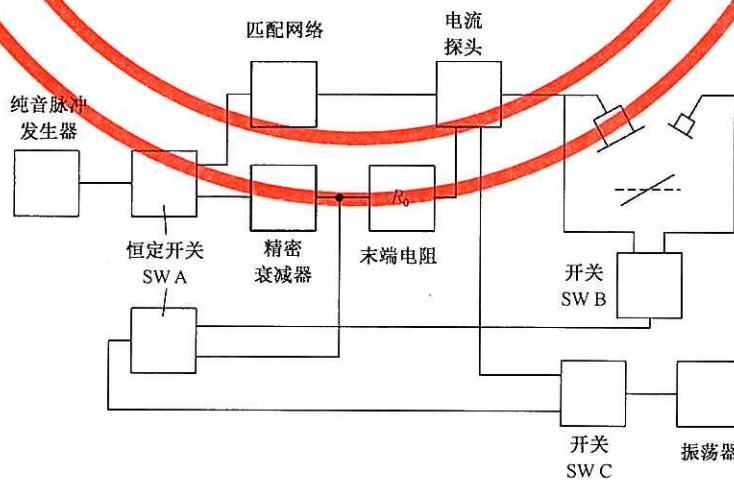


图 K.2 两换能器互易法的原理框图

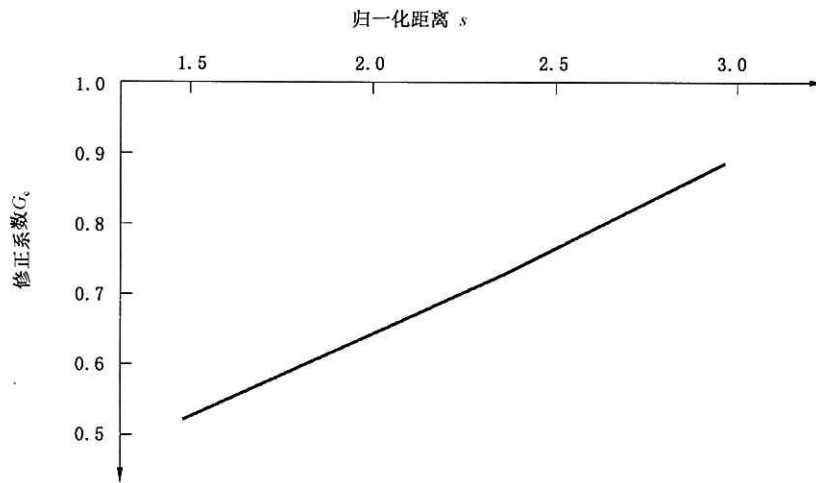


图 K.3 (修正系数 k 的一部分) G_e 的值与归一化距离的关系图

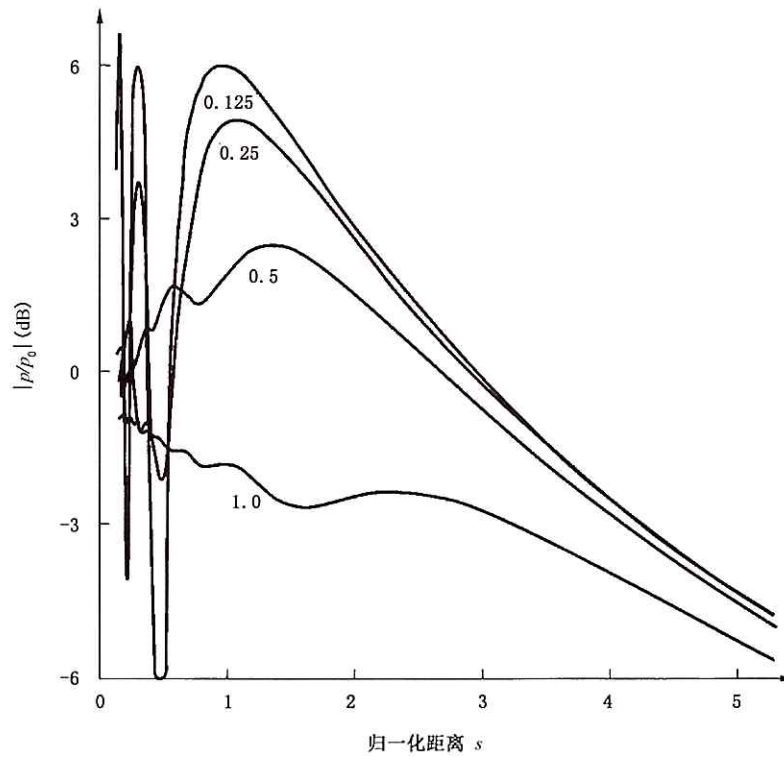


图 K.4 平均声压与不同尺寸换能器归一化距离的关系图,图中参数为接收换能器与发射换能器的直径比(参照 K.12 参考文献[7])

参 考 文 献

- [1] HARRIS, GR. Are current hydrophone low frequency response standards acceptable for measuring mechanical/cavitation indices? *Ultrasonics*, 1996, vol. 34, iss. 6, p. 649-654.
- [2] BEISSNER, K. Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements. *Acustica*, 1985, vol. 59, p. 61-66.
- [3] ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement. Geneva, Switzerland, 1995.
- [4] FAY, B., LEWIN, PA., LUDWIG, G., SESSLER, GM., YANG, G. The influence of spatial polarization distribution on spot poled PVDF membrane hydrophone performance. *Ultrasound Med. Biol.*, 1992, vol. 18, No. 6-7, p. 625-635.
- [5] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A., BERGER, WA. The influence of finite aperture and frequency response of ultrasonic hydrophone probes on the determination of acoustic output. *Ultrasonics*, 2004, vol. 42, iss. 1-9, p. 367-372.
- [6] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., NOWICKI, A., BERGER, WA. Hydrophones' effective diameter measurements as a quasi-continuous function of frequency. *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, iss. 8, p. 635-641.
- [7] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A. Probing acoustic fields of clinically relevant transducers: the effect of hydrophone probes' finite apertures and bandwidths. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 2004, vol. 51, iss. 10, p. 1262-1270.
- [8] HARRIS, GR., GAMMELL, PA., RADULESCU, EGR., LEWIN, PA. Interlaboratory evaluation of hydrophone sensitivity calibration from 0.1 to 2 MHz via time delay spectrometry. *Ultrasonics*, 2004, vol. 42 iss. 1-9, p. 349-353.
- [9] BEISSNER, K. On the plane-wave approximation of acoustic intensity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 71, p. 1406 - 1411.
- [10] BEISSNER, K. Radiation force and force balances. In ZISKIN, MC., LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exosimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, p. 127-142.
- [11] FICK, SE. The NIST power reference source. In ZISKIN, MC., LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exosimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 6, p. 169-183.
- [12] BEYER, RT. *Nonlinear Acoustics*. U.S. Government Printing Office, 1975.
- [13] CARSTENSEN, EL., MUIR, TG. The role of nonlinear acoustics in biomedical ultrasound. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 3, p. 57-79.
- [14] BJORNO, L., LEWIN, PA. Measurement of B/A parameter in tissues. In GREENLEAF, J., ed., *Ultrasound Tissue Characterization*. Boca Raton: CRC Press, 1986, Ch. 6, p. 141-163.
- [15] LEWIN, PA. Practical implementations and technology of measurement devices. In ZISKIN, MC., LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exosimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 7, p. 185-215.
- [16] DUCK, FA., MARTIN, K. Exposure values for medical devices. In ZISKIN, MC., LEWIN, PA., eds., *Ultrasonic Exosimetry*. Boca Raton: CRC Press, 1992, Ch. 11, p. 315-344.
- [17] BACON, DR. Characteristics of a PVDF membrane hydrophone for use in the range 1-100 MHz. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1982, vol. SU-29, no. 1, p. 18-25.
- [18] LEWIN, PA. Linearity of the polymer probes. *Proc. WFUMB*. Sydney, Elmsford, NY:

Pergamon Press, 1985, p. 537.

[19] KRAYNAK, T., SCHAFER, ME., KRAKHMAN, V. Development of a cost-effective shock wave hydrophone. 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1994, p. 1805-1808.

[20] DODICK, JM. Surgical instrument with input power transducer. US Patent No. 5324282.

[21] LEWIN, PA., BHATIA, R., ZHANG, Q., DODICK, J. Characterization of optoacoustic surgical devices. IEEE Ultrasonics Symposium, 1995.

[22] SCHAFER, ME. Techniques of hydrophone calibration. In ZISKIN, MC., LEWIN, PA., eds., Ultrasonic Exosimetry. Boca Raton; CRC Press, 1992, Ch. 8, p. 217-255.

[23] TRIER, HG. Ultrasonic devices for surgery (cataract removal and vitrectomy) in ophthalmology. J. d'Echographie Med. Ultrasonore, 1985, vol. 1, p. 17-23.

[24] BEISSNER, K. Schallfelduntersuchungen an ophthalmologisch-chirurgischen Ultraschallgeräten. In Fortschritte d. Akustik-DAGA '80, Berlin; VDE Verlag, 1980, p.567-570.

[25] SCHAFER, ME., BROADWIN, A. Acoustical characterization of ultrasonic surgical devices. 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1994, p. 1903-1906.

[26] MEEKS, S., TING, R. The evaluation of static and dynamic stress on the piezoelectric and dielectric properties of PVDF. J. Acoust. Soc. Am., 1984, vol. 75, p. 1010.

[27] TANCRELL, RH., WILSON, DT., RICKETTS, D. Properties of PVDF polymer for sonar. 1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1985, p. 624-627.

[28] HERMAN, BA., HARRIS, GR. Calibration of miniature ultrasonic receivers using a planar scanning technique. J. Acoust. Soc. Am., 1982, vol. 72, p. 1357-1363.

[29] PINKERTON, JMM. The absorption of ultrasonic waves in liquids and its relation to molecular constitution. Proc. Phys. Soc., 1949, vol. 62, p. 129-141.

[30] CORBETT, SS. The influence of nonlinear fields on miniature hydrophone calibration using the planar scanning technique. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 1988, vol. 35, iss. 2, p. 162-167.

[31] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., GOLDSTEIN, A., NOWICKI, A. Hydrophone spatial averaging corrections from 1-40 MHz. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 2001, vol. 48, iss. 6, p. 1575-1580.

[32] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., NOWICKI, A. 1-60 MHz measurements in focused Acoustic fields using spatial averaging corrections. Ultrasonics, 2002, vol. 40, iss.1-8, p. 497-501.

[33] AIUM/NEMA. Safety standard for diagnostic ultrasound equipment. (AIUM/NEMA Standard Publication No. UL 1-1981). Laurel, MD; American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM); Rosslyn, VA; National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

[34] BACON, DR. A new method for ultrasonic hydrophone calibration. 1982 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1982, p. 700-704.

[35] LOCKWOOD, JC., MUIR, TG., BLACKSTOCK, DT. Directive harmonic generation in the radiation field of a circular piston. J. Acoust. Soc. Am., 1973, vol. 53, p. 1148-1153.

[36] DEL GROSSO, VA., MADER, CW. Speed of sound in pure water. J. Acoust. Soc. Am., 1972, vol. 52, p. 1442-1446.

[37] BILANIUK, N., WONG, GSK. Speed of sound in pure water as a function of temperature. J. Acoust. Soc. Am., 1993, vol. 93, p.2306.

[38] RADULESCU, EG., WÓJCIK, J., LEWIN, PA., NOWICKI, A. Nonlinear propagation model for ultrasound hydrophones calibration in the frequency range up to 100 MHz. Ultrasonics,

2003, vol. 41, iss. 4, p. 239-245.

[39] RADULESCU, EG., LEWIN, PA., WÓJCIK, J., NOWICKI, A. Calibration of ultrasonic hydrophone probes up to 100 MHz using time gating frequency analysis and finite amplitude waves. *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, iss. 4, p. 247-254.

[40] BLEEKER, HJ., LEWIN, PA. A new method of ultrasonic hydrophone calibration using KZK wave modeling. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 103 p. 2962.

[41] BLEEKER, HJ., LEWIN, PA. A novel method for determining calibration and behavior of PVDF ultrasonic hydrophone probes in the frequency range up to 100 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1354-1362.

[42] LEWIN, PA., UMCHID, S., SUTIN, A., SARVAZYAN, A. Beyond 40 MHz frontier: the future technologies for calibration and sensing of acoustic fields. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2004, vol. 1, p. 38-43.

[43] REIBOLD, R., MOLKENSTRUCK, W. Investigation of pulse-excited hydrophones for ultrasonic field measurements using laser interferometry. *Ultrasonics*, 1987, vol. 25, iss. 2, p. 114-118.

[44] SCRUBY, CB., DRAIN, LE. *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Bristol: Adam Hilger, 1990.

[45] KOCH, Ch., LUDWIG, G., MOLKENSTRUCK, W. Calibration of an interferometric fiber tip sensor for ultrasound detection. *Ultrasonics*, 1997, vol. 35, iss. 4, p. 297-303.

[46] KOCH, C., MOLKENSTRUCK, W. Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1999, vol. 46, iss. 5, p. 1303-1314.

[47] BACON, DR. Primary calibration of ultrasonic hydrophone using optical interferometry. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* 1988, vol. 35, iss. 2, p. 152-161.

[48] BACON, DR., ROBINSON, SP. Intercomparison of 1 mm hydrophone calibrations in the frequency range 0.5 to 15 MHz. (Report EUR 13525 EN). Bureau Communautaire de Référence, Commission of the European Communities, 1991.

[49] ROBINSON, SP., BACON, DR., MOSS, BC. The measurement of the frequency response of a photodiode and amplifier using an opto-mechanical frequency response calibrator. *Meas. Sci. Technol.*, 1990, vol. 1, p. 1184-1187.

[50] ESWARD, TJ., ROBINSON, SP. Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1999, vol. 46, iss. 3, p.737-744.

[51] PRESTON, RC., BACON, DR., LIVETT, AJ., RAJENDRAN, K. PVDF membrane hydrophone performance properties and their relevance to the measurement of the acoustic output of medical ultrasonic equipment. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1983, vol. 16, p. 786-796.

[52] SMITH, RA., BACON, DR. A multiple-frequency hydrophone calibration technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, p. 2231-2243.

[53] BACON, DR. Nonlinear acoustics in ultrasound calibration and standards. In HAMILTON, MF., BLACKSTOCK, DT., eds., *Frontiers of nonlinear acoustics*, 12th ISNA. Elsevier, 1990, p. 3-19.

[54] HARRIS, GR., SHOMBERT, DG. A pulsed near-field technique for measuring the directional characteristics of acoustic receivers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1985, vol.

32, no. 6, p. 802-808.

[55] LEWIN, PA. Calibration and performance evaluation of miniature ultrasonic hydrophones using time delay spectrometry. 1981 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1981, p.660-664.

[56] LUDWIG, G., BRENDEL, K. Calibration of hydrophones based on reciprocity and time delay spectrometry. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 1988, vol. 35, iss. 2, p. 168-174.

[57] BEYER, RT. Parameter of nonlinearity in fluids. J. Acoust. Soc. Am., 1960, vol. 32, p. 719-721.

[58] MUIR, TG., CARSTENSEN, EL. Prediction of nonlinear acoustic effects at biomedical frequencies and intensities. Ultrasound Med. Biol., 1980, vol. 6, no. 4, p. 345-357.

[59] SELFRIDGE, A., LEWIN, PA. Wideband spherically focused PVDF acoustic sources for calibration of ultrasound hydrophone probes. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 2000, vol. 47, iss. 6, p. 1372-1376.

[60] HARRIS, GR., CAROME, EF., DARDY, HD. An analysis of pulsed ultrasonic fields as measured by PVDF spot-poled membrane hydrophones. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1983, vol. SU-30, no. 5, p. 295-303.

[61] BABOUX, JC., LAKESTANI, F., PERDRIX, M. Theoretical and experimental study of the contribution of radial modes to the pulsed ultrasonic field radiated by a thick piezoelectric disk. J. Acoust. Soc. Am., 1984, vol. 75, p. 1722-1731.

[62] HEYSER, RC. Acoustical measurements by time delay spectrometry. J. Audio Eng. Soc., 1967, vol. 15, p. 370.

[63] PEDERSON, PC., LEWIN, PA., BJORNO, L. Application of time-delay spectrometry for calibration of ultrasonic transducers. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 1988, vol. 35, iss. 2, p. 185-205.

[64] CHIVERS, RC. Time-delay spectrometry for ultrasonic transducer characterization. J. Phys. E. Sci. Instrum., 1986, vol. 19, p. 834-843.

[65] GAMMELL, PM. Time and frequency domain measurements of materials with high ultrasonic attenuation using time domain spectroscopy. In THOMPSON, DO., CHIMENTI, DE., eds, Review of Progress in Quantitative NDE. Plenum Press, 1986, vol.5, p. 759-656.

[66] LEWIN, PA. Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes. Ultrasonics, 1981, vol. 19, iss. 5, p. 213-216.

[67] LEWIN, PA., SCHAFER, ME. Ultrasonic probes in measurement practice. Medical Device and Diagnostic Industry, 1986, vol. 8, no. 5, p. 40-45.

[68] GAMMELL, PM., HARRIS, GR. Time delay spectrometry for hydrophone calibrations below 1 MHz. J. Acoust. Soc. Am., 1999, vol. 106, L41-6.

[69] KOCH, C. Amplitude and phase calibration of hydrophones by heterodyne and timegated time-delay spectrometry. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., 2003, vol. 50, iss. 3, p. 344-348.

[70] WILKENS, V. Characterization of an optical multilayer hydrophone with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz. J. Acoust. Soc. Am., 2003, vol. 113, p. 1431-38.

[71] WILKENS, V., KOCH, C. Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping. Opt. Lett., 1999, vol. 24, no. 15, p. 1026-1028.

[72] WILKENS, V., KOCH, C. Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70

MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, vol. 115, p. 2892-2903.

[73] HUMPHREY, VF., COOLING, MP., DUNCAN, TM., DUCK, F. Measurement of the phase response of a membrane hydrophone and its application to ultrasonic field characterisation. *Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine (AMUM) conference*, Teddington, UK, 2004.

[74] ZEQRIRI, B., BOND, AD. The influence of waveform distortion on hydrophone spatial averaging corrections—Theory and measurement. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, vol. 92, p. 1809-1821.

注：[74]中的 γ 意指 α 。

[75] DU, G., BREAZEALE, MA. Harmonic distortion of a finite amplitude Gaussian beam in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, vol. 80, p. 212-216.

[76] WEAR K., GAMMELL P., MARUVADA S., LIU Y., HARRIS G. Time-delay spectrometry measurement of magnitude and phase of hydrophone response. *IEEE Trans UFFC*. 11/2011; 58(11):2325-33.

[77] BLOOMFIELD P., GANDHI G., LEWIN P. Membrane hydrophone phase characteristics through nonlinear acoustics measurements. *IEEE Trans UFFC*. 11/2011; 58(11):2418-37.

[78] BLOOMFIELD P., GANDHI G., LEWIN P. Nonlinear acoustics determination of phase characteristics of PVDF membrane hydrophones. *J. Phys: Conf. Ser.* 279 012001.

IEC 相关文献

IEC 60050-802, International Electrotechnical Vocabulary—Part 802: Ultrasonics. 国际电工术语 第 802 部分:超声.

IEC/TS 62781, Ultrasonics—Conditioning of water for ultrasonic measurements. 超声 超声测量的水条件.

中华人民共和国医药
行业标准
超声 水听器
第2部分:40 MHz 以下超声场
用水听器的校准

YY/T 0865.2—2018/IEC 62127-2:2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

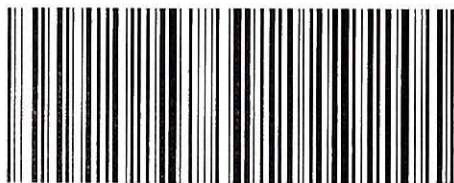
*

开本 880×1230 1/16 印张 5 字数 153 千字
2019年1月第一版 2019年1月第一次印刷

*

书号:155066·2-33782 定价 78.00 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)68510107



YY/T 0865.2-2018