JJF(浙)

浙江省地方计量技术规范

JJF（浙）1174-2021

0.5MHz-15MHz 超声声场特性校准规范

Calibration Specification for Acoustic Performance of Ultrasonic Field in the Frequency Range 0.5MHz to 15MHz

2021-03-05 发布　　2021-06-05 实施

浙江省市场监督管理局发布

0.5MHz-15MHz 超声声场特性校准规范

JJF（浙）1174-2021

Calibration Specification for Acoustic Performance of Ultrasonic Field in the Frequency Range 0.5MHz to 15MHz

归 口 单 位：浙江省市场监督管理局

主要起草单位：浙江省计量科学研究院

中国计量大学

本规范主要起草人：

俞醒言（浙江省计量科学研究院）

高申平（浙江省计量科学研究院）

姚　磊（浙江省计量科学研究院）

郑慧峰（中国计量大学）

参加起草人：

吴德林（浙江省计量科学研究院）

李　娜（浙江省计量科学研究院）

李凤鸣（中国计量大学）

目录

引言.....II
1 范围 1
2 引用文件 1
3 术语和计量单位 1
4 概述 2
5 计量特性 2
6 校准条件 3
7 校准项目和校准方法 4
8 校准结果表达 7
9 复校时间间隔 7
附录 A 校准记录的内容.....8
附录 B 测量不确定度评定示例.....11

引言

本规范依据 JJF1071－2010《国家计量校准规范编写规则》所给出的规则和格式编制。

本规范参照了 GB/T 16540－1996《声学在 0.5~15MHz 频率范围内的超声场特性及其测量水听器法》、GB/T 19890－2005《声学高强度聚焦超声(HIFU)声功率和声场特性的测量》和 JJF 1650－2017《超声探伤仪换能器声场特性校准规范》等相关资料。

本规范为首次发布。

0.5MHz-15MHz 超声声场特性校准规范

1 范围

本规范适用于0.5MHz~15MHz频率范围内水中聚焦换能器的声场特性校准，其他频率范围的换能器超声声场特性校准可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1034 声学计量术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1650－2017 超声探伤仪换能器声场特性校准规范

GB/T 3102.7 声学的量和单位

GB/T 16540－1996 声学 在 0.5~15MHz 频率范围内的超声场特性及其测量水听器法

GB/T 19890－2005 声学高强度聚焦超声(HIFU)声功率和声场特性的测量

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

JJF 1001 和 JJF 1034 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 声焦距 pressure focal length

聚焦换能器有效辐射面至声压焦点的距离。一般可用声压焦点处水听器接收到的声压信号与聚焦换能器的发射信号之间的声程差来表示。

3.2 焦域 focal region

聚焦声场中包含焦点并具有下列性质的所有点构成的连续空间：在这些点处，时间平均声强(或声压有效值平方)大于或等于时间平均声强(或声压有效值平方)最大值的一个指定的百分数。对-3dB 焦域 、-6dB 焦域、 -10dB 焦域，时间平均声强分别对应的百分数是 50%、25%、10%，声压有效值分别对应的百分数分别是 70.7%、50%、31.6%。

3.3 -3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸 full width at 70.7%（or 50% /31.6%）of (pressure) maximum

-3dB (或-6dB/-10dB）焦域在垂直于声束轴方向上和声束轴方向上的最大尺

寸，即声压焦平面内的最大-3dB (或-6dB/-10dB）声束宽度和声束轴上的声压-3dB (或-6dB/-10dB）最大长度。

3.4 声重复周期 acoustic repetition period

非自动扫描系统的脉冲重复周期或自动扫描系统的扫描重复周期。对于连续波系统为相邻两周期间的时间间隔。

3.5 正峰值声压 peak- positive acoustic pressure

声场中声重复周期的正瞬时声压的最大值。

3.6 负峰值声压 peak- negative acoustic pressure

声场中声重复周期中的负瞬时声压绝对值的最大值。峰值负声压用正数表示。

3.7 空间峰值声强 spatial peak intensity

声场中脉冲持续时间的平均声强的最大值。

3.8 -10dB 辐射声功率 acoustic radiation power of the transducer at 31.6% of (pressure) maximum

换能器在单位时间内，-10dB 焦域在声压焦平面区域内的声能。

4 概述

聚焦换能器广泛应用在超声医疗诊断、治疗和工业超声等领域，聚焦换能器的声场特性是换能器的重要参数，可以通过水听器测量与分析获得。

5 计量特性

5.1 声焦距

声焦距的偏差一般不超过标称值的±15%。

5.2 -3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸

-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸的偏差一般不超过标称值的±25%。

5.3 正峰值声压和负峰值声压

正峰值声压和负峰值声压的偏差一般不超过标称值的±25%。

5.4 空间峰值声强

空间峰值声强的偏差一般不超过标称值的±30%。

5.5 -10dB 辐射声功率

-10dB 辐射声功率的偏差一般不超过标称值的±35%。

注：由于校准无需作出合格与否的判定，因此上述技术指标仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

室温：（15~30）℃；

水温：（23±3）℃。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 信号发生器及功率放大器

具备调制脉冲信号产生的波形发生器，频率范围至少覆盖（0.5~15）MHz。功率放大器能够放大信号，并驱动换能器工作，带宽至少覆盖（0.5~15）MHz，总失真不大于 2%。

6.2.2 测量水听器及其前置放大器

在频率响应范围覆盖 0.5MHz~15MHz。

水听器敏感元件有效半径与四分之一声波波长可比拟或小于四分之一波长，或其最大有效半径按公式（1）计算：

$$a_{\max} = \frac{\lambda_{awf}}{8a_1}(l^2 + a_1^2)^{1/2} \qquad (1)$$

式中：

λ_{awf}——与声工作频率相对应的声波长，单位为毫米（mm）；

a_1——超声换能器或换能器阵的有效半径，或其最大尺寸的一半，单位为毫米（mm）；

l——水听器与超声换能器表面间的距离，单位为毫米（mm）。

注：能实现同等技术指标的水听器均可用于该测量系统。

6.2.3 精密坐标测量装置

精密坐标测量装置由测量用水槽和自由度调节机构组成。测量用水槽满足声场扫描范围的需求，水槽内空间尺寸应不小于 0.5m×0.5m×0.5m，具备至少两个自由度调节机构用于调节超声换能器的位置和姿态。夹持调节机构具有 X、Y、Z 的空间定位，以及调节水平偏转和垂直俯仰功能，其中 X、Y、Z 的空间定位精度应优于 50μm，水平偏转和垂直俯仰旋转角度分辨力优于 0.05°。

6.2.4 信号采集装置

工作频率上限不低于 100MHz，采样率应高于 200MHz；不少于两个通道，具备时间延迟测量和幅值测量功能，采样精度要求，A/D 位数不低于 8 位。

6.2.5 温度测量设备

测量范围（20±5）℃，最大允许误差优于±0.1℃。

6.2.6 溶解氧测量设备

溶解氧测量设备能够测量水中溶解氧量，最大允许误差±0.5mg/L。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

超声声场特性的校准项目见表 2。

表 2　超声声场特性校准项目一览表

序号	项目名称	技术要求的条款号	校准方法的条款号
1	声焦距	5.1	7.2.1
2	-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸	5.2	7.2.2
3	正峰值声压和负峰值声压	5.3	7.2.3
4	空间峰值声强	5.4	7.2.4
5	-10dB 辐射声功率	5.5	7.2.5

7.2 校准方法

7.2.1 声焦距

声焦距的测量装置如图 1 所示，水槽中注入纯净水或经过净水处理之后的自来水，必须经过除气处理，含氧量≤4mg/L，温度保持在（23±2）℃。

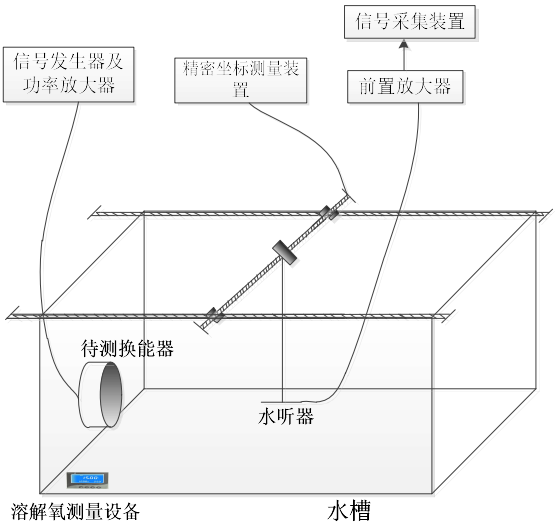

图 1　超声声场特性校准装置的示意图

调整水听器和待测换能器，使水听器置于待测换能器的声场声轴线上。设定信号发生器的工作频率，采用调制脉冲模式，确保水听器的输出达到稳定状态，且不受反射波等干扰。

通过自由度调节机构带动水听器定位到换能器的声轴位置，沿声轴方向进行纵向声压扫描，扫描步进间隔一般设置为不超过工作频率所对应波长的一半，得到待测换能器声轴上声压分布（如图 2 所示）。将水听器沿声轴移动到声压最大值位置（即为焦点位置），用示波器测定发射电脉冲前沿与水听器输出的直达声脉冲信号前沿的时间间隔 Δt 。按公式（2）计算声焦距：

$$F_{pres} = c\Delta t \qquad (2)$$

式中：c——水中的声速，单位为米每秒（m/s）。

注：测量扫描起始和结束时的水槽中的水温，以平均温度作为参考值，查询当前参考值温度下的去离子水声速值。

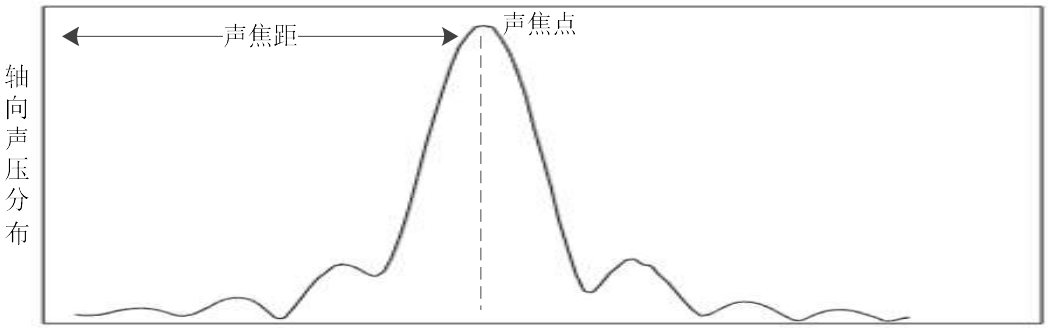

图 2 待测换能器声轴上声压分布及声焦距测量示意图

7.2.2 -3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸

通过多自由度调节机构带动水听器对待测换能器焦平面（焦距处垂直于声轴的平面）进行辐射声场扫描，得到声压—位置的二维云图。在此二维云图中找到声压最大值与对应位置，在该位置周围寻找声压级-3dB (或-6dB/-10dB）的位置点，拟合所有位置点成封闭圆，该圆的直径即为焦平面内-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸 L_1。

按照 7.2.1 沿声轴方向移动水听器，得到待测换能器声轴上的声压分布图（如图 2 所示），在焦点位置沿声轴方向找到最大声压级-3dB (或-6dB/-10dB）的两个位置点，两位置点之间的距离即为声束轴上的-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸 L_2。

7.2.3 正峰值声压和负峰值声压

按照 7.2.1 得到的待测换能器焦点位置，将水听器置于焦点位置处，信号发生器发生信号，同步触发示波器采集水听器输出的电压信号，得到如图 3 的时域波形图。通过水听器灵敏度 M_L 与示波器电压示值 U_+、U_-，按照公式（3）、（4）计算得到焦点处正峰值声压 p_+ 和负峰值声压 p_-：

$$p_+ = |U_+| / M_L \tag{3}$$

$$p_- = |U_-| / M_L \tag{4}$$

$U_{+/-}$——声焦点处水听器输出电压信号电压正/负峰值，单位为伏（V）；

M_L——水听器在声工作频率处的自由场电缆端有载灵敏度，单位为伏每帕（V/Pa）。

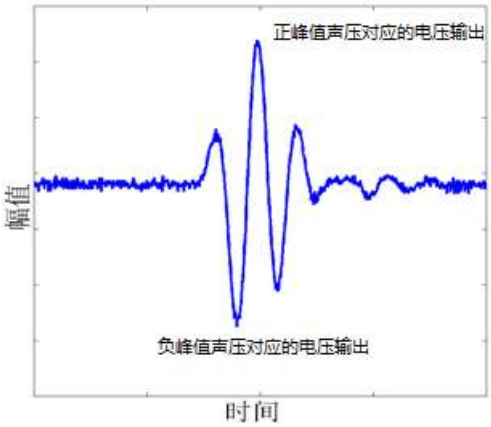

图 3　焦点处正/负峰值声压对应的电压输出示意图

7.2.4　空间峰值声强

在声焦点处，按照 7.2.3 步骤测量脉冲持续周期内水听器输出正峰值电压 U_+ 和负峰值电压 U_-。按照公式（5）计算导出空间峰值声强 I_{sp}：

$$I_{sp} = \frac{(U_+^{\ 2} + U_-^{\ 2})}{4\rho c M_L^2} \tag{5}$$

式中：

ρ——水的密度，单位为千克每立方米（kg/m^3）；

7.2.5　-10dB 辐射声功率

按 7.2.2 得到焦平面-10dB 焦域。在-10dB 焦域内，参照 7.2.4 的方法，依次

改变水听器位置，得到每个扫描网格面积上的空间声强I_{spi}，对I_{spi}进行面积积分，得到待测换能器-10dB 辐射声功率。

8 校准结果表达

8.1 校准数据处理

所有的数据应先计算后修约，测量不确定度保留两位有效数字。

8.2 校准证书

超声换能器经校准后出具校准证书，校准证书应包括的信息及推荐的校准证书内页格式见附录 A。

8.3 校准结果的测量不确定度评定

测量不确定度评定按 JJF 1059.1—2012 进行，其测量不确定度评定示例见附件 B。

9 复校时间间隔

超声声场特性的复校时间间隔建议为一年。然而，复校时间间隔的长短取决于仪器的使用情况（环境条件、使用频率、测量对象等）、使用者、仪器本身质量等诸多因素，因此，可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

附录 A

校准记录的内容

A.1　校准证书至少应包括以下信息:

a) 标题，如“校准证书”;

b) 证书的编号、页码及总页数;

c) 校准实验室的名称和地址;

d) 进行校准的日期;

e) 进行校准的地点（如果与校准实验室的地址不同）;

f) 客户的名称和地址;

g) 被校测试声源的型号、规格及出厂编号;

h) 本技术规范的名称及代号;

i) 本次校准所用测量标准溯源性及有效性的说明;

j) 校准环境的描述;

k) 校准结果及其测量不确定度的说明;

l) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期;

m) 校准结果仅对被校对象有效的声明;

n) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

A.2 推荐的超声声场特性校准证书的内页格式见表 A.1

表 A.1 校准证书的内页格式

证书编号××××××－××××

校准的技术依据 JJF (浙)1174－20121　0.5MHz-15MHz 超声声场特性校准规范				
校准环境条件及地点				
室温	℃	水温	℃	
地点				
校准使用的计量（基）标准装置				
名称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	计量（基）标准证书编号	有效期至
校准使用的标准器				
名称	测量范围	不确定度 /准确度等级 /最大允许误差	检定/校准证书编号	有效期至

第×页共×页

校准结果

一、基本概括

超声换能器基本概况描述，包括发射频率、材质、尺寸大小等。

二、校准结果

1、声焦距

焦距为　　mm，U=　%（k=2）

2、-3dB（或-6dB/-10dB）焦域尺寸

焦平面内-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸 L_1=　，U=　%（k=2）

声束轴-3dB (或-6dB/-10dB）焦域尺寸 L_2=　，U=　%（k=2）

3、正峰值声压和负峰值声压

焦点处，正峰值声压　Pa，负峰值声压　Pa，U= %（k=2）

4、空间峰值声强

空间峰值声强 I_{sp} 为　　U= %（k=2）

5、-10dB 辐射声功率

-10dB 辐射声功率为　　U= %（k=2）

第×页共×页

图 A.1　校准证书内页的格式

附录 B

测量不确定度评定示例

B.1 测量方法

本规范以超声声场特性的焦平面内-10dB 焦域尺寸参数为范例，进行测量不确定度的评定。

通过多自由度调节机构带动水听器对待测换能器焦平面（焦距处垂直于声轴的平面）进行辐射声场扫描，得到声压—位置的二维云图。在此二维云图中找到声压最大值与对应位置，在该位置周围寻找声压级-10dB 的位置点，拟合所有位置点成封闭圆，该圆的直径即为焦平面-10dB 焦域尺寸。

B.2 测量模型

焦平面内-10dB 焦域尺寸是基于步进扫描系统开展的，其测量模型为：

$$a_m = N \times l \qquad \text{（B.1）}$$

式中：

a_m ---测量的焦平面-10dB 焦域尺寸，mm；

N ----步进数；

l ----当前状态下的扫描步进长度，mm。

B.3 标准不确定度的 A 类评定

B.3.1 测量重复性引入的不确定度分量

对被校换能器进行焦平面-10dB 焦域尺寸测量，可在重复性条件下，通过连续测量十次得到测量结果，得到的实验标准偏差作为重复性所引入的标准不确定度分量 u_1。数据如下表 B.1：

表 B.1　焦平面-10dB 焦域尺寸测量重复性

次数	长轴尺寸（mm）
1	3.36
2	3.30
3	3.39
4	3.27
5	3.36
6	3.27
7	3.24
8	3.45
9	3.36
10	3.27
标准偏差 s（mm）	0.07
标准不确定度（%）	2.1

B.4　标准不确定度的 B 类评定

B.4.1　多自由度调节机构引入的标准不确定度分量u_2

实验所用的空间定位机构的精度主要是步进电机精度，考虑外接环境影响及安装精度和长时间扫描等特殊情况，在扫描期间其重复定位精度优于$50\mu m$。以最小声场参数2.0 mm为例，扫描定位引起的测量误差不大于±3.0%，按照均匀分布取 $k=\sqrt{3}$，则标准不确定度为：u_2=3%/1.73=1.7%

B.4.2　水听器引入的标准不确定度分量u_3

声场扫描过程中，待校换能器的声场特性主要通过水听器进行信号采集，水听器引入的标准不确定度主要是因为水听器的灵敏度不确定度及指向性引起的。根据相关文献，水听器的灵敏度不确定度U=10%，k=2，换算成标准不确定度为5%。同时因为水听器和待校换能器的声轴并不始终重合，因此必须考虑水听器指向性带来的影响。根据多自由度调解机构的运动方式，我们可以估算水听器和待校换能器的声轴夹角不超过5°，根据实验数据对声压幅值损失最大为5%，按照均匀分布，换算成标准不确定度为5%/(2×1.73）=1.44%。合成上述两方面的影响，水听器对声压幅值影响的标准不确定度为5.2%，即0.46dB，通过声压—位

置的二维云图估算，大致在0.12mm，即3.6%，因此，水听器引入的标准不确定度分量u_3=3.6%

B.4.3　拟合算法引入的标准不确定度分量u_4

在实际测量过程中，因超声换能器非理想垂直或水平夹持，以及测量过程中噪声干扰，扫描机构行进过程中的振动干扰，声场的形态往往不是非常理想，焦平面内声焦域尺寸需要利用算法拟合得到。经实验验证，拟合算法引入的误差一般不超过±3.0%，假设满足均匀分布，因此$k=\sqrt{3}$，则标准不确定度为：

u_4=3%/1.73=1.7%

B.4.4　声场不理想引入的标准不确定度分量 u_5

在进行超声声场扫描过程中，超声换能器辐射出的声场不严格垂直于探头表面，导致扫描得到的用于计算声焦域平面与探头表面很难严格平行，而且辐射声场本身也并不非常理想对称，多次实验表明，声场不理想引入的最大偏差一般不超过±4.0%，因此$k=\sqrt{3}$，则标准不确定度为：　u_5=4%/1.73=2.4%

B.4.5　信号采集装置的测量引入的标准不确定度分量u_6

根据信号采集装置的溯源证书，其测量误差不超过±0.2%，按照均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$，则信号采集系统测量误差引入的标准不确定度为 u_6=0.2%/1.73=0.12%

B.4.6　信号发生器及功率放大器引入的标准不确定度分量 u_7

信号发生器及功率放大器的信号幅值误差一般不低于±0.2%，稳定性也非常好，因此其引入的标准不确定度为　u_7=0.2%/1.73=0.12%

B.5 合成标准不确定度

B.5.1　影响焦平面-10dB 声焦域尺寸的各输入量互相独立，不确定来源和相

对合成标准不确定度如表 B.2 所示。

表 B.2　测量不确定度来源汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	相对标准不确定度值/%
u_1	测量重复性	2.1
u_2	多自由度调节机构	1.7
u_3	水听器	3.6
u_4	拟合算法	1.7
u_5	声场干扰	2.4
u_6	信号采集装置	0.12
u_7	信号发生器及功率放大器	0.12

B.5.2　超声换能器焦平面-10dB 焦域尺寸测量结果，合成标准不确定度 u_c 的计算。

合成标准不确定度计算式为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \ldots + u_7^2} = 5.4\%$$

B.6 扩展不确定度

取包含因子 k=2，则扩展测量不确定度 $U=ku_c$=2×5.4%=11%

本次在测量超声换能器焦平面-10dB 焦域尺寸时，扩展不确定度为：

U=11%　　k=2