JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1556—2016

超声仿组织模体校准规范

Calibration Specification for Ultrasound Phantoms

2016-03-03 发布　　2016-06-03 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

超声仿组织模体校准规范

Calibration Specification for

Ultrasound Phantoms

JJF 1556—2016

归 口 单 位：全国声学计量技术委员会

起 草 单 位：中国计量科学研究院

吉林省计量科学研究院

河南省计量科学研究院

深圳市计量质量检测研究院

本规范委托全国声学计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

杨　平（中国计量科学研究院）

朱　岩（中国计量科学研究院）

房法成（吉林省计量科学研究院）

朱卫民（河南省计量科学研究院）

闫有余（吉林省计量科学研究院）

张国庆（深圳市计量质量检测研究院）

目　　录

引言 ……（Ⅱ）
1　范围……（1）
2　引用文件……（1）
3　术语和计量单位……（1）
3.1　声速……（1）
3.2　衰减系数……（1）
4　概述……（1）
5　计量特性……（1）
5.1　材料的声速……（1）
5.2　材料的衰减系数……（1）
5.3　几何参数……（2）
6　校准条件……（2）
6.1　环境条件……（2）
6.2　标准器及主要配套设备……（2）
7　校准项目和校准方法……（2）
7.1　校准项目……（2）
7.2　测量原理……（3）
7.3　校准前检查……（4）
7.4　声速……（4）
7.5　衰减系数……（5）
7.6　几何参数……（6）
8　校准结果表达……（6）
8.1　校准数据处理……（6）
8.2　校准证书……（6）
8.3　校准结果的不确定度评定……（6）
9　复校时间间隔……（6）
附录A　校准证书的内容 ……（7）
附录B　测量不确定度评定示例 ……（9）
附录C　衍射修正 ……（13）
附录D　去离子水的声速随温度变化表（摘自IEC 62127-2-2007） ……（17）

引　言

本规范依据JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》所给出的规则和格式进行编制。

本规范采用了：

IEC 61391-1-2006《超声—脉冲回波扫描仪—第1部分：校准空间测量技术及系统点扩散函数响应测量》（Ultrasonics—Pulse-echo scanners—Part 1：Techniques for calibrating spatial measurement systems and measurement of system point-spread function response）；

IEC 61391-2-2010《超声—脉冲回波扫描仪—第2部分：最大探测深度及局部动态范围测量》（Ultrasonics—Pulse-echo scanners—Part 2：Measurement of maximum depth of penetration and local dynamic range）；

IEC TS 61895-1999《超声—脉冲多普勒诊断系统—测试性能的测试步骤》（Ultrasonics—Pulsed Doppler diagnostic systems—Test procedures to determine performance）；

IEC 61685—2001《超声—流体测量系统—流体测试装置》（Ultrasonics-Flow measurement systems-Flow test object）中规定的材料声学参数范围；

参照了GB/T 15261—2008《超声仿组织材料声学特性的测量方法》中描述的测量方法。

本规范为首次发布。

超声仿组织模体校准规范

1 范围

本规范适用于评价超声诊断仪所用的超声仿组织模体的校准，该模体内部主体仿组织材料只有一种且分布均匀，四周封装外壳厚度均匀相同，耦合面光滑。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1034—2005 声学计量名词术语及定义

GB/T 3102.7—1993 声学的量和单位

GB/T 15261—2008 超声仿组织材料声学特性的测量方法

IEC 61685—2001 超声—流体测量系统—流体测试装置（Ultrasonics—Flow measurement systems—Flow test object）

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

本规范采用 JJF 1001 和 JJF 1034 中有关的术语及定义。

本规范采用 GB/T 3102.7—1993 中规定的量和单位。

3.1 声速 sound velocity

声波在媒质中传播的速度。

3.2 衰减系数 attenuation coefficient

声波在媒质中传播时，其传播系数的实数部分。

4 概述

超声仿组织模体（也称超声仿组织体模，以下简称模体），一般由超声仿组织材料（包括固体超声仿组织材料和仿血液）、靶线及仿病灶结构经适当的封装而成，广泛应用于超声诊断设备的质量控制与性能评价。封装后模体中仿组织材料声学特性参数的稳定与否，靶线及仿病灶结构的几何参数准确与否，直接决定了对超声诊断设备的质量控制与评价水平。模体中材料的声速、衰减系数是最重要的两个声学参数，而模体内部靶线及仿病灶的位置、尺寸则是重要的几何参数。

5 计量特性

5.1 材料的声速

5.2 材料的衰减系数

5.3 几何参数

6 校准条件

6.1 环境条件

温度：(18～28)℃；

相对湿度：＜80%。

6.2 标准器及主要配套设备

6.2.1 信号源及功率放大器

具备猝发音、同步输出功能的任意波形发生器，频率范围高于 20 MHz；

如果信号源的输出幅度较低，考虑采用功率放大器来驱动信号。功率放大器的带宽应高于 20 MHz。

6.2.2 发射脉宽可调的超声发射/接收机

脉宽调节步长应小于 50 ns，最小脉宽应不大于 50 ns。

6.2.3 数字示波器

带宽至少 20 MHz；采样率应高于 100 MHz。

至少应有两个通道，具备时间延迟测量、幅值测量功能。

6.2.4 谐振式超声换能器

具备发射/接收功能的谐振式超声换能器，频率范围一般应能覆盖（1～10）MHz。

6.2.5 靶线参考试件

靶线参考试件采用坚固外壳，靶线间距最大允许误差小于±0.1 mm，靶线参考试件置于去离子水中。当水温控制在 26.3 ℃时，其声速为 1 500 m/s，以满足超声诊断仪中声速设定值。也可通过温控设置去离子水的声速为超声诊断仪中可以设定的其他声速值。

6.2.6 医用超声诊断仪

具有成像与几何测量功能的超声诊断仪，应使用较高频率的探头，以便提供较高空间分辨力的图像，空间尺寸测量分辨力应优于 0.1 mm。

6.2.7 多自由度调节机构

调节机构应具备最少两个夹持调节机构用于夹持及调节超声换能器的位置和姿态。

6.2.8 卡尺或其他几何尺寸测量设备

最大允许误差±10 μm，测量范围应满足所测量模体的尺寸要求。

6.2.9 温度计

示值误差应优于 0.1 ℃。

6.2.10 恒温水槽

温度调节范围应至少满足 20 ℃～30 ℃，温度控制精度优于 0.1 ℃。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1　超声仿组织模体校准项目一览表

序　号	项目名称	校准方法
1	声　速	7.4
2	衰减系数	7.5
3	几何参数	7.6

7.2　测量原理

超声仿组织模体中材料声速、衰减系数的测量原理如图 1 所示。

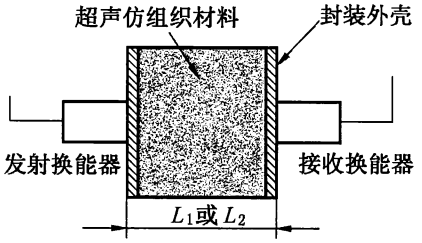


图 1　模体声速、衰减系数测量示意图

1）声速的测量原理

将两个换能器以共轴状态布置，其中一个用来发射信号，另一个用来接收信号。当厚度不同的被测模体置于发射与接收换能器之间时，声波的传播时间会发生改变，如图 1所示。当传播距离分别为 L_1和 L_2时，在封装外壳厚度相同的情况下，其厚度差仅为超声仿组织材料的厚度差，而传播时间差仅是内部超声仿组织材料引起的时间差。当传播距离为 L_1时，声波的传播时间为 t_1；当传播距离为 L_2时，声波的传播时间为 t_2，则该模体中超声仿组织材料的声速可由公式（1）给出。

$$c_P = \frac{|L_2 - L_1|}{|t_2 - t_1|} \tag{1}$$

式中：

c_P——待测模体中材料的声速，m/s；

L_1，L_2——不同传播路径的长度，mm；

t_1，t_2——模体不同传播路径置于换能器之间时，所引起的传播延迟时间，s。

2）衰减系数的测量原理

如图 1 所示，当传播距离分别为 L_1和 L_2时，由于传播路径上经过的界面相同，仅超声仿组织材料的厚度不同，因此反射行为、透射行为的影响可以相互抵消。仅直接测定直达波下降的分贝数 N_1和 N_2，当不考虑衍射效应时，衰减系数可由公式（2）获得：

$$\alpha_P = \frac{|N_2 - N_1|}{|L_2 - L_1|} \tag{2}$$

当考虑衍射效应时，衰减系数可由公式（3）获得：

$$\alpha_P = \frac{|N_2 - N_1| - 20 \times \lg\left(\frac{G_2}{G_1}\right)}{|L_2 - L_1|} \tag{3}$$

式中：

α_P——待测模体中材料的衰减系数，dB/cm；

L_1，L_2——不同传播路径的长度，mm；

N_1，N_2——不同传播路径时对应的接收换能器电压幅度，mV；

G_1，G_2——不同传播路径时，衍射修正系数。

7.3 校准前检查

检查模体的外观，应符合以下要求：

1）待测模体封装外壳应无明显变形。

2）模体应能为共轴布置的发射/接收换能器提供两个长度不同的传播路径，如图1所示，且保证两个传播路径有明显的长度差异。

7.4 声速

声速测量可采用短猝发音激励法和脉冲激励法。

7.4.1 短猝发音激励法

将信号源、功率放大器及示波器按照图2连接，设置信号源的输出为猝发音方式，并将信号源的同步信号输出到示波器的一个通道作为时间参考信号。

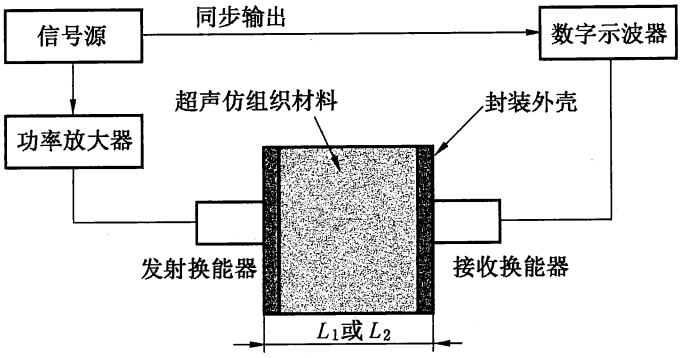


图2 短猝发音激励法声速、衰减系数测量示意图

将模体的某个传播路径，如图2中的L_1路径，固定放置在发射换能器与接收换能器之间。调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，记录此时的延迟时间t_1。

更换传播路径为图2中的L_2路径，调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，记录此时的延迟时间t_2。

根据公式（1）计算得到模体内材料的声速。

注：对于一般材料来讲，声速与频率之间并无直接依赖关系。由于延迟时间的读取，是通过观察波形的某个位置，因此所选用探头的频率与声速测量结果有直接关系。一般来说，在接收换能器信噪比足够好的情况下，应选择频率尽可能高的探头。

7.4.2 脉冲激励法

在模体尺寸较大，或者频率较高时传播路径中衰减较大，上述短猝发音激励法无法获得较好的接收信噪比情况下，可以选用图3所示的脉冲激励法来进行测量。

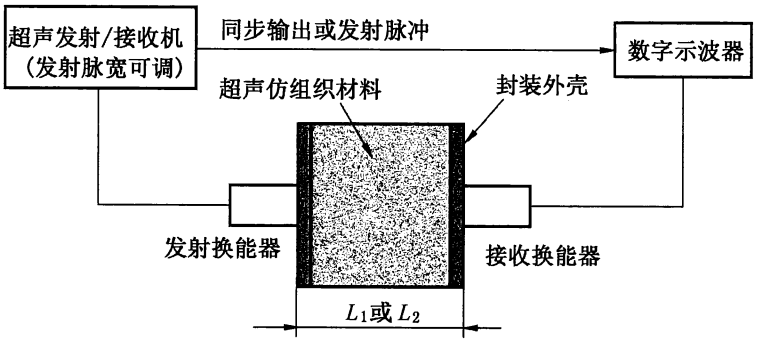


图 3　脉冲激励法声速、衰减系数测量示意图

将超声发射/接收机及示波器按照图 3 连接，设置超声发射/接收机仪的工作模式为双通道模式（亦称为“透射”模式），发射通道的发射脉冲经过适当的电阻分压后，输出到示波器的一个通道作为时间参考信号。

超声发射/接收机的发射脉宽需根据超声探头的标称频率来设置，一般来说，当发射脉宽设置为探头标称频率对应周期的一半时，发射出的超声波能量最大、频率最接近探头的标称频率。

将模体的某个传播路径，如图 3 中的 L_1路径，固定放置在发射换能器与接收换能器之间。调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，记录此时的延迟时间 t_1。

更换传播路径为图 3 中的 L_2路径，调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，记录此时的延迟时间 t_2。

根据公式（1）计算得到模体内材料的声速。

同样，在接收换能器信噪比足够好的情况下，应选择频率尽可能高的探头来进行声速的测量。

7.5　衰减系数

7.5.1　短猝发音激励法

将信号源、功率放大器及示波器按照图 2 连接，设置信号源的输出为猝发音方式，同步信号输出到示波器的一个通道作为时间参考信号。

将模体的某个传播路径，如图 2 中的 L_1路径，固定放置在发射换能器与接收换能器之间。调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，读取示波器显示的直达波幅度 N_1。

更换传播路径为图 2 中的 L_2路径，调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，读取示波器显示的直达波幅度 N_2。

将 L_1、L_2以及 N_1、N_2所对应的分贝数代入公式（2），计算得到当前频率下的衰减系数。

更换不同频率的超声换能器组，完成不同频率下模体内材料衰减系数的测量。

7.5.2　脉冲激励法

对于模体尺寸较大，或者频率较高时传播路径中衰减较大，短猝发音激励法无法获

得较好接收信噪比的情况下，可以选用图 3 所示的脉冲激励法来进行测量。

将超声发射/接收机及示波器按照图 3 连接，设置超声发射/接收机的工作模式为双通道模式（亦称为“透射”模式），发射通道的发射脉冲经过适当的电阻分压后，输出到示波器的一个通道作为时间参考信号。

将模体的某个传播路径，如图 3 中的 L_1路径，固定放置在发射换能器与接收换能器之间。调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，读取示波器显示的直达波幅度 N_1。

更换传播路径为图 3 中的 L_2路径，调节发射、接收换能器的空间位置、姿态及耦合情况，使得接收换能器接收到的直达波幅度最大，读取示波器显示的直达波幅度 N_2。

将 L_1、L_2以及 N_1、N_2所对应的分贝数代入公式（2），计算得到当前频率下的衰减系数。

更换不同频率的换能器组，完成不同频率下模体内材料衰减系数的测量。

7.6 几何参数

7.6.1 用靶线参考试件校准超声诊断仪成像中的几何测量功能

将靶线参考试件置于去离子水域中，并将水域温度调节到水的声速与超声诊断仪中的某个设定值相同。对靶线参考试件中的靶线进行成像，并在合适的时机冻结图像。利用超声诊断仪的距离测量功能，对图像中已知距离的靶线进行测量，评估超声诊断仪距离测量的不确定度。

7.6.2 用超声诊断仪校准待校模体的靶线及仿病灶的几何参数

利用超声诊断仪对待校模体进行成像，并在合适的时机冻结图像。利用超声诊断仪的距离测量功能，对模体图像中的靶线组及仿病灶几何参数进行测量并给出测量结果。

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，出具的校准数据中，声速至少保留一位小数，衰减系数应保留两位小数，不确定度保留两位有效数字。

8.2 校准证书

模体内部材料声学参数、模体内部组件几何参数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 校准结果的不确定度评定

测量不确定度评定按 JJF 1059.1—2012 要求，其不确定度评定示例参见附录 B。

9 复校时间间隔

校准时间间隔的长短取决于其使用情况，如环境条件、使用频率、测量对象等，因此，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。建议复校时间间隔为两年。

附录 A

校准证书的内容

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（如果不在实验室内进行校准）；

f）送校单位的名称和地址；

g）被校模体的描述；

h）校准所依据的技术规范的名称及代号；

i）校准所用计量标准的名称、技术参数及有效期；

j）校准时的环境条件；

k）校准结果；

l）校准结果的测量不确定度；

m）复校时间间隔的建议；

n）校准人签名、核验人签名、批准人签名；

o）校准结果仅对被校对象有效的声明；

p）未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

A.2　推荐的模体校准证书的内页格式见图 A.1。

校 准 结 果　　共 页 第 页

一、声速

频率点/MHz	
声速值/（m/s）	

不确定度：　　%（k=2）

二、衰减系数

频率点/MHz			
衰减系数（dB/cm）			

不确定度：　　%（k=2）

三、几何参数

序号	组件描述	测量结果/mm

不确定度：　　%（k=2）

校准的环境条件：

室温：_____℃。

图 A.1　校准证书的内页格式

附录 B

测量不确定度评定示例

B.1　声速测量的不确定度评定

B.1.1　不确定度评定测量模型

被测超声模体中材料的声速可由公式（B.1）给出：

$$c_P = \frac{|L_2 - L_1|}{|t_2 - t_1|} \tag{B.1}$$

式中：

c_P——待测模体中材料的声速，m/s；

L_1，L_2——不同传播路径的长度，mm；

t_1，t_2——模体不同传播路径置于换能器之间时，所引起的传播延迟时间，s。

B.1.2　不确定度的 A 类评定

测量不同传播路径的长度 L_1、L_2，延迟时间 t_1、t_2后，代入公式（B.1）计算得到模体中材料的声速值 c_P（单位：m/s）：1 559.93，1 556.08，1 559.22，1 557.70。

单次测量的不确定度：$u(c_k) = s(c_k) = \sqrt{\dfrac{\sum_{k=1}^{n}(c_k - \bar{c})^2}{(n-1)}}$

n 次测量平均值的标准不确定度：$\sqrt{\dfrac{1}{n(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(c_k - \bar{c})^2}$

如以 $n=4$ 次平均值 $\bar{c}=1\ 558.23$ m/s 为测量结果，则重复性引起的（标准）不确定度为：

$$u(\bar{c}) = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{n(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(c_k - \bar{c})^2}}{\bar{c}} \times 100\% = 0.055\% \text{ 。}$$

B.1.3　不确定度的 B 类评定

B 类不确定度包括以下分量：

1）模体厚度引入的分量

卡尺的分辨力为 0.02 mm，当测量厚度＞ 50 mm 的样块时，其引起的最大误差为 0.01 mm，假设为矩形分布，引起的相对标准不确定度不超过 0.02%；

2）示波器采样速率引入的分量

示波器采样速率直接决定了时间延迟量的测量精度。

当所用示波器的采样速率＞100 MHz，采样间隔为 10 ns，其引起的最大误差为 5 ns。发射换能器与接收换能器之间的距离满足一定条件时，比如声波在 150 mm 长度的模体中的传播时间约为 100 μs，由于采样间隔引起的误差 5 ns 远小于声波的传播时间 100 μs，由采样引起的不确定度可以忽略。

3）外壳在耦合压力下的尺寸变化

在不同耦合压力下，表面贴膜及有机玻璃会有小的形变，变化量不超过 0.1 mm，模体尺寸大于 50 mm 时，假设为矩形分布，引起的相对标准不确定度不超过 0.115%；

B.1.4 合成标准不确定度

对于模体中材料声速的测量值，不确定度来源及相对合成标准不确定度如下：

表 B.1 测量不确定度来源汇总表

序号	不确定度来源	相对标准不确定度/%
1	重复性	0.055
2	模体厚度引入的分量	0.012
3	示波器采样速率引入的分量	忽略
4	外壳在耦合压力下的尺寸变化	0.115
	合成标准不确定度	0.128%

B.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$，其扩展测量不确定度：

$$U=2\times 0.128\%=0.256\%$$

适当放大，取 $U=0.30\%$（$k=2$）。

B.2 衰减系数测量的不确定度评定

B.2.1 不确定度评定测量模型

当不考虑衍射效应时，衰减系数可由以下公式计算得到：

$$\alpha_P=\frac{|N_2-N_1|}{|L_2-L_1|} \tag{B.2}$$

当考虑衍射效应时，衰减系数可由以下公式计算得到：

$$\alpha_P=\frac{|N_2-N_1|-20\times\lg\left(\frac{G_2}{G_1}\right)}{|L_2-L_1|} \tag{B.3}$$

式中：

α_P——待测模体中材料的衰减系数，dB/cm；

L_1，L_2——不同传播路径的长度，mm；

N_1，N_2——不同传播路径时对应的接收换能器电压幅度，mV；

G_1，G_2——不同传播路径时，衍射修正系数。

B.2.2 不确定度的 A 类评定

测量不同传播路径的长度 L_1，L_2、不同传播路径对应的接收电压幅度 N_1、N_2，并考虑衍射系数 G_1、G_2，代入公式（B.3）计算得到模体中材料的衰减系数 α_P（单位：dB/cm）：0.718 3，0.706 2，0.758 7，0.717 4。

如以单次测量值为测量结果，相对标准不确定度为 3.18%。

B.2.3 不确定度的 B 类评定

其他不确定度来源主要包括示波器量化电压幅值、衍射修正等；待校准模体外壳厚

度的不严格相同、所用超声换能器的标称频率与实际频率的偏差等可以归到其他来源中。

考虑到示波器的采集位数为8位（平均后为12位），电压幅值量化误差带来的最大相对误差不超过0.4%，假设为矩形分布，其相对标准不确定度为0.29%。

衍射修正的最大误差不超过2.50%，假设为矩形分布，相对标准不确定度为1.45%。

其他因素，包括材料界面非理想耦合等，带来的最大偏差应不超过6.00%，假设矩形分布情况下，其相对标准不确定度为3.50%。

B.2.4 合成标准不确定度

衰减系数测量中的不确定度来源及其标准不确定度汇总表如B.2。

表B.2 衰减系数测量不确定度来源汇总表

序号	不确定度来源	相对标准不确定度/%
1	重复性	3.18
2	示波器量化电压幅值	0.29
3	衍射修正	1.45
4	材料界面非理想耦合等其他因素	3.50
5	激励系统稳定性	可忽略
	合成标准不确定度	4.95

B.2.5 扩展不确定度

取包含因子$k=2$，其扩展测量不确定度：

$$U=2\times 4.95\%=9.90\%$$

取$U=10.00\%$ $(k=2)$。

B.3 几何参数测量的不确定度评定

B.3.1 A类不确定度的评定

利用超声诊断仪成像中的距离测量功能，对待校准超声模体中的标称距离为30.00 mm的靶线进行成像并进行距离测量，测量结果如下（单位：mm）：30.04，30.02，30.04，30.37，30.00，30.40。

如以单次测量值为测量结果，相对标准不确定度为0.70%。

B.3.2 B类不确定度的评定

几何参数测量的其他不确定度来源主要包括：去离子水声速的设定值、靶线参考试件提供的标准距离、利用靶线参考试件校准医用超声诊断仪图像距离测量功能。

水介质温度的设定值优于0.1 ℃，在（23～29）℃之间，0.1 ℃的变化对水介质声速的改变不超过0.3 m/s，相对于约1 500 m/s的声速来说，其最大相对偏差不超过0.02%，可以忽略。

靶线参考试件靶线间距标称为10 mm并经过校准，其最大偏差不超过0.05 mm，假设为矩形分布，其相对标准不确定度不超过0.289%。

利用靶线参考试件校准医用超声诊断仪图像距离测量功能（也可称参考靶线校准B超），考虑到成像时的不严格垂直等因素，其最大偏差不超过0.3 mm，假设为矩形分布，其相对标准不确定度不超过1.732%。

B.3.3 合成标准不确定度

几何参数测量不确定度来源汇总如表B.3。

表B.3 几何参数测量的不确定度来源汇总表

序号	不确定度来源	相对标准不确定度/%
1	重复性	0.700
2	靶线参考试件	0.289
3	参考靶线校准B超	1.732
4	水介质声速设定	可忽略
	合成标准不确定度	1.891

B.3.4 扩展不确定度

取包含因子$k=2$，其扩展测量不确定度：

$$U=2\times 1.891\%=3.782\%$$

取$U=4.00\%$ （$k=2$）。

附录 C

衍射修正

当待校准模体两个测量方向的归一化距离差别较大时，需引入衍射修正。

发射换能器表面上的声压可表示为 $P_0=\rho c v_0 \exp[i(\omega t-kz)]$，其中 ρ 为介质密度，c 为介质声速，v_0 为换能器面元振动速度，ω 为角速度，k 为波数，z 为接收器到发射换能器的距离。

由于声束扩散，在声场中距离发射换能器 z 位置的声压实际上表示为：

$$\overline{P}=\rho c v_0 e^{-ikz}-\frac{4\rho c v_0}{\pi}\times\int_0^{\pi/2}\exp[-ik\ (z^2+4a^2\cos^2\theta)^{1/2}]\sin^2\theta d\theta$$

衍射修正系数经化简，经数值计算可得 $G=\left|\frac{\overline{P}}{P_0}\right|=(A^2+B^2)^{1/2}$，

其中的 $A=1-C\frac{4}{\pi}\cos kz-D\frac{4}{\pi}\sin kz$；

$B=D\frac{4}{\pi}\cos kz-C\frac{4}{\pi}\sin kz$；

$C=\int_0^{\pi/2}\cos[k\ (z^2+4a^2\cos^2\theta)^{1/2}]\sin^2\theta d\theta$；

$D=\int_0^{\pi/2}\sin[k\ (z^2+4a^2\cos^2\theta)^{1/2}]\sin^2\theta d\theta$。

当发射/接收换能器有效半径相等，衍射修正系数 G 随归一化距离 S 和 ka 的变化经数值计算后得衍射修正表 C.1。

表 C.1 衍射修正表格

S	ka										
	10	15	20	25	30	40	60	100	200	400	1 000
0.80	0.846 1	0.827 1	0.813 1	0.809 8	0.809 7	0.811 1	0.812 8	0.814 0	0.814 6	0.814 7	0.814 7
0.81	8 443	8 278	8 134	8 093	8 086	8 094	8 108	8 117	8 122	8 123	8 123
0.82	8 425	8 284	8 139	8 090	8 077	8 074	8 088	8 096	8 099	8 100	8 100
0.83	8 405	8 288	8 142	8 091	8 073	8 067	8 072	8 077	8 081	8 082	8 082
0.84	8 384	8 294	8 151	8 092	8 070	8 060	8 059	8 061	8 064	8 064	8 064
0.85	8 363	8 297	8 158	8 096	8 069	8 052	8 048	8 049	8 048	8 050	8 050
0.86	8 341	8 299	8 168	8 100	8 071	8 051	8 041	8 041	8 040	8 039	8 040
0.87	8 320	8 300	8 173	8 105	8 074	8 049	8 037	8 033	8 032	8 032	8 031
0.88	8 297	8 299	8 180	8 111	8 079	8 051	8 034	8 029	8 027	8 027	8 027
0.89	8 273	8 298	8 186	8 120	8 085	8 054	8 036	8 027	8 024	8 025	8 025
0.90	8 250	8 296	8 192	8 127	8 092	8 058	8 038	8 028	8 024	8 024	8 024

表 C.1（续）

S	ka										
	10	15	20	25	30	40	60	100	200	400	1 000
0.91	8 226	8 291	8 198	8 135	8 098	8 065	8 041	8 031	8 027	8 025	8 026
0.92	8 202	8 286	8 202	8 142	8 106	8 071	8 044	8 035	8 031	8 030	8 030
0.93	8 175	8 278	8 205	8 148	8 113	8 078	8 053	8 041	8 036	8 035	8 034
0.94	8 152	8 270	8 208	8 153	8 120	8 085	8 059	8 047	8 040	8 041	8 041
0.95	8 129	8 262	8 207	8 158	8 127	8 092	8 068	8 054	8 049	8 046	8 048
0.96	8 104	8 250	8 207	8 162	8 132	8 099	8 074	8 062	8 056	8 055	8 054
0.97	8 080	8 237	8 205	8 165	8 136	8 105	8 082	8 069	8 063	8 061	8 061
0.98	8 055	8 224	8 201	8 168	8 140	8 111	8 088	8 076	8 070	8 070	8 069
0.99	8 031	8 209	8 196	8 166	8 143	8 116	8 094	8 082	8 077	8 076	8 076
1.00	8 007	8 194	8 190	8 165	8 144	8 119	8 097	8 088	8 083	8 082	8 082
1.05	7 893	8 102	8 139	8 136	8 129	8 117	8 106	8 099	8 096	8 095	8 095
1.10	7 789	7 996	8 056	8 047	8 077	8 079	8 077	8 076	8 074	8 074	8 074
1.15	7 702	7 884	7 956	7 985	7 997	8 008	8 014	8 016	8 018	8 017	8 017
1.20	7 632	7 774	7 847	7 882	7 899	7 915	7 927	7 930	7 933	7 933	7 933
1.25	7 576	7 675	7 740	7 770	7 792	7 811	7 823	7 829	7 832	7 832	7 832
1.30	7 541	7 591	7 642	7 671	7 690	7 706	7 717	7 724	7 727	7 727	7 727
1.35	7 520	7 523	7 558	7 579	7 595	7 608	7 618	7 624	7 626	7 627	7 628
1.40	7 513	7 474	7 490	7 503	7 514	7 525	7 532	7 536	7 538	7 538	7 539
1.45	7 517	7 442	7 440	7 446	7 450	7 457	7 463	7 466	7 467	7 467	7 467
1.50	7 531	7 425	7 409	7 408	7 409	7 410	7 412	7 413	7 413	7 413	7 413
1.55	7 551	7 422	7 394	7 386	7 383	7 380	7 379	7 378	7 378	7 378	7 378
1.60	7 577	7 422	7 393	7 379	7 373	7 366	7 362	7 361	7 358	7 360	7 360
1.65	7 604	7 449	7 403	7 384	7 375	7 366	7 360	7 357	7 356	7 356	7 356
1.70	7 633	7 473	7 421	7 399	7 388	7 377	7 369	7 366	7 364	7 364	7 364
1.75	7 661	7 500	7 453	7 422	7 408	7 395	7 387	7 383	7 381	7 381	7 381
1.80	7 689	7 529	7 473	7 448	7 428	7 421	7 411	7 407	7 405	7 404	7 404
1.85	7 714	7 557	7 502	7 476	7 462	7 448	7 439	7 434	7 431	7 431	7 430
1.90	7 736	7 586	7 531	7 505	7 491	7 478	7 468	7 463	7 461	7 460	7 461
1.95	7 751	7 612	7 559	7 534	7 520	7 507	7 497	7 492	7 490	7 489	7 489

表 C.1（续）

S	*ka*										
	10	15	20	25	30	40	60	100	200	400	1 000
2.00	7 769	7 635	7 584	7 560	7 547	7 534	7 525	7 520	7 518	7 517	7 517
2.05	7 780	7 655	7 607	7 585	7 572	7 559	7 550	7 545	7 543	7 543	7 543
2.10	7 786	7 670	7 626	7 604	7 592	7 581	7 573	7 568	7 566	7 565	7 565
2.15	7 783	7 681	7 641	7 620	7 609	7 598	7 590	7 586	7 586	7 584	7 584
2.20	7 787	7 689	7 652	7 633	7 622	7 613	7 605	7 601	7 599	7 599	7 599
2.25	7 781	7 690	7 658	7 640	7 632	7 622	7 616	7 606	7 604	7 604	7 603
2.30	7 772	7 691	7 660	7 647	7 636	7 627	7 621	7 618	7 616	7 617	7 616
2.35	7 759	7 686	7 658	7 644	7 636	7 628	7 623	7 620	7 618	7 618	7 618
2.40	7 740	7 677	7 652	7 639	7 630	7 625	7 620	7 618	7 616	7 616	7 615
2.45	7 722	7 665	7 642	7 630	7 623	7 618	7 613	7 610	7 604	7 609	7 609
2.50	7 699	7 648	7 628	7 617	7 612	7 606	7 602	7 600	7 599	7 599	7 599
2.55	7 673	7 628	7 611	7 601	7 596	7 591	7 588	7 586	7 585	7 585	7 585
2.60	7 645	7 605	7 590	7 582	7 577	7 573	7 570	7 568	7 567	7 568	7 567
2.65	7 613	7 580	7 566	7 559	7 555	7 551	7 549	7 547	7 542	7 548	7 546
2.70	7 580	7 551	7 540	7 533	7 530	7 527	7 525	7 523	7 523	7 522	7 522
2.75	7 545	7 521	7 511	7 505	7 498	7 500	7 497	7 496	7 496	7 496	7 496
2.80	7 508	7 488	7 479	7 474	7 472	7 470	7 468	7 467	7 464	7 466	7 466
2.85	7 469	7 449	7 445	7 441	7 440	7 438	7 436	7 435	7 435	7 435	7 435
2.90	7 429	7 415	7 409	7 407	7 405	7 403	7 406	7 398	7 401	7 397	7 401
2.95	7 387	7 377	7 372	7 370	7 368	7 367	7 366	7 365	7 365	7 365	7 365
3.00	7 341	7 336	7 333	7 331	7 330	7 329	7 328	7 328	7 327	7 327	7 327
3.25	7 115	7 115	7 118	7 118	7 118	7 118	7 117	7 118	7 118	7 118	7 118
3.50	6 972	6 881	6 884	6 883	6 886	6 887	6 886	6 887	6 887	6 888	6 888
3.75	6 626	6 638	6 643	6 644	6 646	6 646	6 647	6 646	6 646	6 646	6 646
4.00	6 380	6 394	6 399	6 406	6 404	6 403	6 406	6 406	6 406	6 406	6 406
4.25	6 146	6 156	6 163	6 164	6 167	6 168	6 169	6 168	6 168	6 168	6 168
4.50	5 915	5 929	5 934	5 936	5 937	5 939	5 938	5 941	5 941	5 941	5 941
4.75	5 696	5 710	5 714	5 716	5 717	5 719	5 721	5 721	5 721	5 721	5 721
5.00	5 488	5 501	5 504	5 507	5 508	5 511	5 511	5 512	5 512	5 512	5 512

表 C.1（续）

S	ka										
	10	15	20	25	30	40	60	100	200	400	1 000
5.25	5 290	5 302	5 308	5 309	5 309	5 312	5 312	5 313	5 313	5 313	5 313
5.50	5 105	5 117	5 120	5 121	5 122	5 124	5 125	5 125	5 125	5 125	5 125
5.75	4 927	4 939	4 943	4 943	4 945	4 947	4 947	4 948	4 948	4 948	4 948
6.00	4 762	4 772	4 775	4 776	4 778	4 779	4 780	4 780	4 780	4 780	4 780
6.25	4 605	4 613	4 618	4 618	4 620	4 621	4 621	4 621	4 622	4 622	4 622
6.50	4 456	4 466	4 468	4 469	4 470	4 471	4 472	4 472	4 472	4 472	4 472
6.75	4 316	4 324	4 327	4 328	4 329	4 330	4 330	4 331	4 331	4 331	4 331
7.00	4 184	4 191	4 194	4 195	4 196	4 196	4 196	4 197	4 198	4 198	4 197
7.25	4 059	4 065	4 068	4 069	4 069	4 070	4 070	4 071	4 071	4 071	4 071
7.50	3 940	3 947	3 949	3 949	3 950	3 950	3 950	3 951	3 951	3 951	3 951
7.75	3 828	3 833	3 835	3 837	3 837	3 838	3 838	3 838	3 838	3 838	3 838
8.00	3 722	3 726	3 728	3 729	3 729	3 729	3 730	3 731	3 731	3 731	3 731
8.25	3 620	3 625	3 627	3 627	3 627	3 627	3 628	3 629	3 629	3 629	3 629
8.50	3 523	3 529	3 530	3 530	3 531	3 531	3 531	3 532	3 532	3 532	3 532
8.75	3 432	3 436	3 438	3 438	3 438	3 439	3 439	3 440	3 440	3 440	3 440
9.00	3 345	3 348	3 350	3 351	3 351	3 351	3 351	3 352	3 352	3 352	3 352
9.25	3 261	3 266	3 267	3 268	3 267	3 268	3 268	3 269	3 269	3 269	3 269
9.50	3 183	3 186	3 188	3 188	3 188	3 188	3 188	3 189	3 189	3 189	3 189
9.75	3 107	3 110	3 111	3 112	3 112	3 112	3 113	3 113	3 113	3 113	3 113
10.00	3 035	3 037	3 038	3 039	3 039	3 039	3 040	3 040	3 040	3 040	3 040

附录 D

去离子水的声速随温度变化表(摘自 IEC 62127-2-2007)

表 D.1　不同温度下的去离子水声速

温度/℃	声速/(m/s)
15	1 465.9
16	1 469.4
17	1 472.8
18	1 476.1
19	1 479.2
20	1 482.4
21	1 485.4
22	1 488.3
23	1 494.2
24	1 494.0
25	1 496.7
26	1 499.4
27	1 501.9
28	1 504.4
29	1 506.8
30	1 509.2
31	1 511.4
32	1 513.6
33	1 515.8

中 华 人 民 共 和 国
国 家 计 量 技 术 规 范
超声仿组织模体校准规范
JJF 1556—2016
国家质量监督检验检疫总局发布
*
中 国 质 检 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 1.5 字数 40 千字
2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月第一次印刷
*
书号:155026·J-3116 定价 24.00 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

JJF 1556-2016

打印日期:2016年7月12日 F009B