

福建省地方计量技术规范

JJF (闽) 1036-2010

非金属超声波检测仪校准规范

Calibration Specification for Non-metallic ultrasonic detector

2010-12-10 发布

2010-12-10 实施

福建省质量技术监督局 发布

非金属超声波检测仪校准规范

JJF (闽) 1036-2010

本规范经福建省质量技术监督局于 2010 年 12 月 10 日批准，并自 2010 年 12 月 10 日起实施。

归口单位：福建省质量技术监督局

主要起草单位：福建省计量科学技术研究院

参加起草单位：北京市康科瑞工程检测技术有限公司

本规范由归口单位负责解释

本规范主要起草人：

徐峰 (福建省计量科学技术研究院)

李群 (福建省计量科学技术研究院)

参加起草人：

孙刚柱 (北京市康科瑞工程检测技术有限责任公司)

徐雅东 (北京市康科瑞工程检测技术有限责任公司)

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 声时测量相对误差	(2)
5.2 幅值测量级线性	(2)
5.3 径向换能器谐振频率	(2)
5.4 发射电压幅值稳定度	(2)
5.5 通道隔离度	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 标准器及其设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(10)
9 复校时间间隔	(10)
10 资料性附录	(11)
附录 A 水中声速变化表	(10)
附录 B 非金属超声波检测仪校准记录(参考格式)	(11)
附录 C 校准证书(内页内容)	(13)
附录 D 非金属超声波检测仪误差的校准结果不确定度评定(实例)	(14)

非金属超声波检测仪校准规范

1 范围

本规范适用于非金属超声波检测分析仪（以下简称超声波检测仪）的校准，带平面测试换能器和圆管径向辐射换能器的非金属超声波检测仪均适用于本规范。

2 引用文献

本规范引用下列文献：

GB/T7965—2002《声学 水声换能器测量》

GB/T12604.1—2005《无损检测术语 超声检测》

GB/T23900—2009《无损检测 材料超声速度测量方法》

JJG 185—1997《500Hz~1MHz 测量水听器》

JJG 990—2004《声波检测仪检定规程》

JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》

JJF 1071—2000《国家计量校准规范编写规则》

CECS21：2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》

使用本规范时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语与定义

3.1 声时 time of transmitted sound

声波在介质中传播的时间。

3.2 波幅 amplitude

超声脉冲波通过介质后，由接收换能器接收，并由超声波检测仪显示的首波信号幅度。

3.3 衰减 attenuation

超声脉冲波在混凝土中传播时，随着传播距离的增大，由于散射、吸收和声束扩散等因素引起的声压减弱。

3.4 主频 main frequency

在被接收的超声脉冲波各频率成分的幅度分布中，幅度最大的频率值。

3.5 级线性误差 Level linearity error

在规定频率上，指示信号级与期望信号级之差。

注：级线性误差用分贝(dB)表示。

4 概述

超声波检测仪是通过向待测试件发射声脉冲，使其穿过试件，然后接收穿过试件后声脉冲信号，并测量声脉冲信号穿过试件的时间、幅值及频率变化等，以完成对待测试件的无损检测。

带平面测试换能器的超声波检测仪主要用于检测混凝土强度、内部缺陷、裂缝深度等。带圆管径向辐射换能器的超声波检测仪则主要用于跨孔声波透射法检测混凝土灌注桩桩身完整性的检测和大体积混凝土的缺陷检测。

5 计量特性

5.1 声时测量相对误差

5.1.1 平面测试换能器

电信号测量误差应不大于 $\pm 0.5\%$ ，声信号测量误差应不大于 $\pm 1.0\%$ 。

5.1.2 圆管径向辐射换能器

电信号测量误差应不大于 $\pm 0.5\%$ ，声信号测量误差应不大于 $\pm 2.0\%$ 。

5.2 幅值测量级线性

每 10dB 误差应不大于 ± 1.5 dB，总线性范围不低于产品技术指标要求。

5.3 圆管径向辐射换能器发射谐振频率

径向换能器谐振频率与标称频率的偏差应在 $\pm 10\%$ 范围之内。

5.4 发射电压幅值稳定度

每小时应不大于 $\pm 5\%$

5.5 通道隔离度

对于多通道的超声波检测仪，在换能器标称频率处应大于 40dB

6 校准条件

6.1 环境条件

室温：(15~35) °C；

水温：(15~25)℃；

相对湿度：小于 85%RH。

6.2 标准器及其设备

6.2.1 信号发生器

在测试的频率范围内，能产生连续波信号和猝发音信号。幅值准确度优于 0.1dB，谐波失真小于 0.5%，测试期间的幅度稳定度优于 0.1 dB。

6.2.2 数字示波器

采样频率应高于测量频率的 8-10 倍，最大的允许误差应不大于±0.1%。

6.2.3 直尺

分度值不大于 1mm。

6.2.4 水听器

在测量消声水槽自由场区域、声压反射因数和水池环境噪声的过程中，水听器在所要求的测试频率范围内，基本无方向性，采用球形水听器或小型圆柱型水听器（70 KHz 以下自由场电压灵敏度应大于-190 dB），保证信噪比大于 30 dB，在测试期间的水听器自由场灵敏度的稳定度优于±0.02dB。

6.2.5 衰减器

频率范围 DC~30MHz；每 10 dB 误差不超过±0.2dB。

6.2.6 消声水槽

能满足两换能器间距离的远场条件。

6.2.7 温度计

最大允许误差不大于±0.2℃。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

超声波检测仪声学特性的校准项目见表 1。

表 1 超声波检测仪校准项目一览表

序号	项目名称	技术指标
1	声时测量相对误差（电信号方法）	±0.5%
2	平面测试换能器声时测量（声信号方法）	±1.0%
3	圆管径向辐射换能器声时测量（声信号方法）	±2.0%
4	幅值测量级线性	±1.5 dB

5	圆管径向辐射换能器的发射谐振频率	±10%
6	发射电压幅值稳定度	±5%
7	通道隔离度	>40dB

7.2 校准方法

7.2.1 声时测量的相对误差（电信号方法）

7.2.1.1 校准装置如图 1 所示。

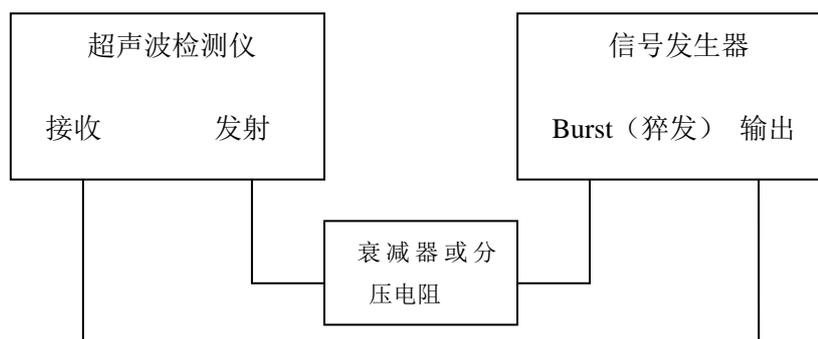


图 1 超声波检测仪声时测量（电信号方法）校准装置示意图

7.2.1.2 调节信号发生器，使频率调至换能器标称频率，波数为 10。调节猝发音延迟每 100 μ s 超声波检测仪做一次声时测量，直至超声波检测仪的测量上限，随着延迟时间的增加，可适当减少波数，以使屏幕中的时间可以完全读出。由电信号方法得到的声时测量相对误差应符合 5.1 要求。

误差计算公式如下：

$$L = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中： T_1 -----从超声波检测仪上读出的声时， μ s

T_2 -----信号发生器的延迟时间， μ s

L -----电信号的声时误差，%

如：500V 的发射电压最好应加衰减 40dB 的衰减器。

7.2.2 平面测试换能器的声时测量相对误差（声信号方法）

7.2.2.1 平面测试换能器声时测量校准装置如图 2 所示。

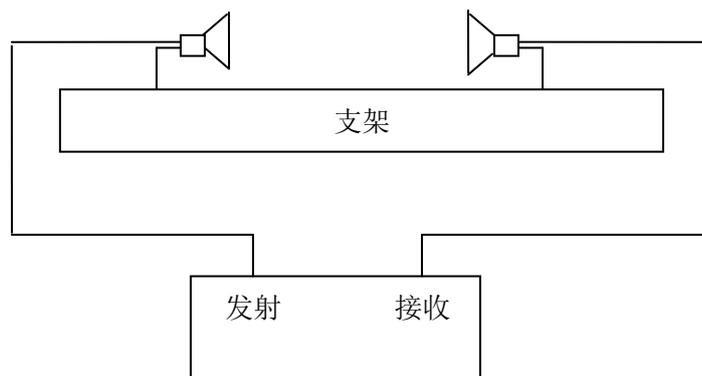


图2 平面测试换能器声时测量相对误差（声信号方法）的校准装置示意图

7.2.2.2 将超声波检测仪的发射和接收换能器用耦合剂相连，确保两个换能器之间没有空气和间隙，或按超声波检测仪说明书要求的方法测量出零声时并予以消除（若模拟式超声波检测仪则取 50mm 所测声时为其零声时）。将两个换能器的辐射面相互对准，使两个换能器的轴线在同一直线上，以间距为 100mm、200mm、300mm、400mm、500mm 分别对声时进行测量。测量过程中，应保持整体波形为满屏显示的 2/3，空气温度变化应不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其声时计算测量值与理论计算值误差不应超过 5.1 要求。声时理论计算公式如下：

$$t = d / (331.4 \sqrt{1 + 0.00367T}) \quad (2)$$

式中：331.4 -----0℃时空气的声速，m/s；

T-----空气温度，℃；

d-----两换能器之间的距离，m；

t----- 声时的理论计算值，s。

声时误差计算公式如下：

$$L = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中：T₁-----声时实测值，μs

T₂-----声时理论值，μs

L-----平面测试换能器声信号的声时误差，%

7.2.3 圆管径向辐射换能器的声时测量相对误差（声信号方法）

7.2.3.1 圆管径向辐射换能器声时测量校准装置如图 3 所示：

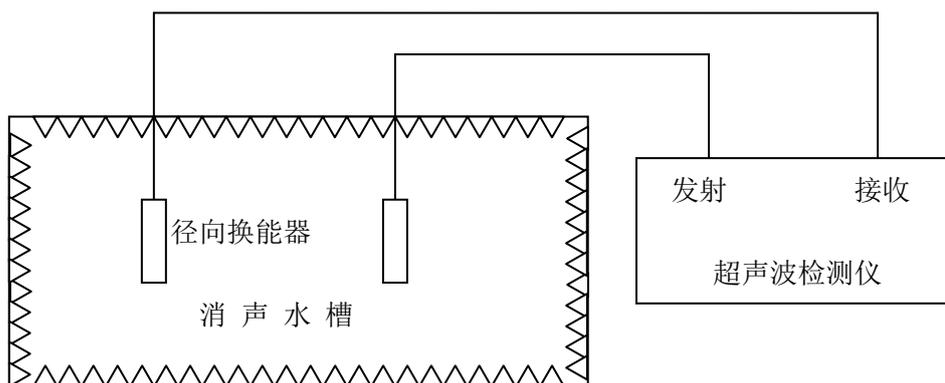


图3 圆管径向辐射换能器声时测量相对误差（声信号方法）的校准装置示意图

7.2.3.2 将两个圆管径向辐射换能器保持其轴线相互平行，置于消声水槽同一水平高度，两个换能器内边缘间距先后调节在 L_1 、 L_2 ，分别读取相应声时值 t_1 、 t_2 。由超声波检测仪、换能器及其高频电缆所产生的零声时 t_0 应按下式计算：

$$t_0 = (L_1 \times t_2 - L_2 \times t_1) / (L_1 - L_2) \quad (4)$$

式中： L_1 、 L_2 及其差值均不小于 100mm， L_1 、 L_2 测量误差应不大于 1%

7.2.3.3 将圆管径向辐射换能器放置于消声水槽并全部浸没于水中，两个换能器应处于同一水平面上，消去零声时后，每 60mm 测量一次声时，共测量 5 次。测量过程中水中温度变化应不超过 ± 0.5 °C，其声时测量值与理论计算值误差不应超过 5.1.2 要求。（水中声速见附录 A。）

声时理论计算公式如下：

$$t = d / v \quad (5)$$

式中： d -----两换能器内边缘间距，m；

v -----水中的声速，m/s；

t -----声时的理论计算值，s。

$$\text{声时误差计算公式：} L = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中： T_1 -----声时实测值， μs ；

T_2 -----声时理论值， μs ；

L -----圆管径向辐射换能器声信号的声时误差，%。

7.2.4 幅值测量级线性

7.2.4.1 幅值测量级线性校准装置如图 4 所示：

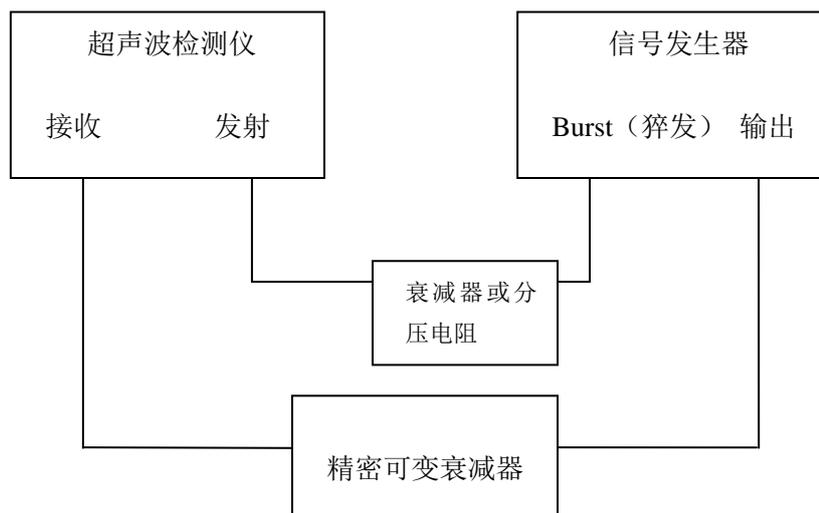


图4 幅值测量级线性校准装置示意图

7.2.4.2 调节信号发生器的频率为换能器的标称频率，信号发生器输出幅度及衰减器调至适当位置。依次按 10dB 增加或减少衰减器的输出值，每次测量应调节超声波检测仪接收信号为满屏的 80%，不少于 4 次，超声波检测仪幅值测量功能显示的幅值与衰减器改变值之差即为测量级线性的误差。其误差应符合 5.2 的要求。

7.2.5 圆管径向辐射换能器的发射谐振频率

7.2.5.1 校准装置如图 5 所示：

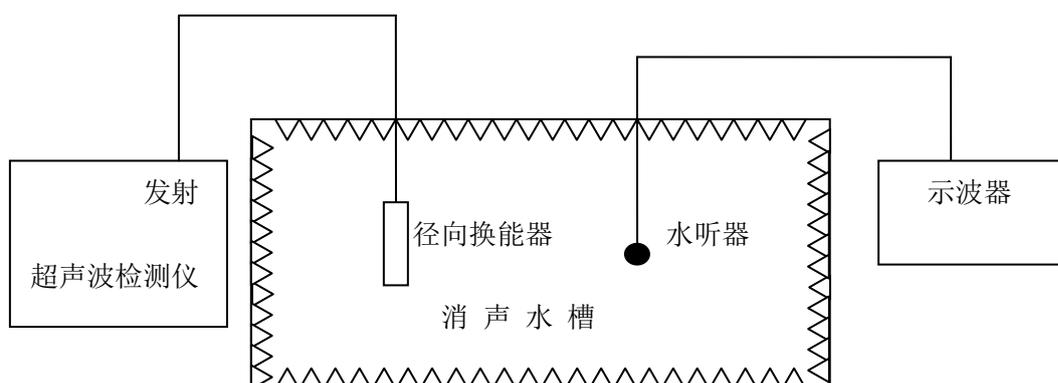


图5 圆管径向辐射换能器的谐振频率校准装置示意图

7.2.5.2 将超声波检测仪的发射电压、采样频率等参数设置在某一档并保持不变，用水听器接收最大声信号所对应的频率，即为径向换能器的谐振频率。调节示波器至适当位置，将光标调至首波前半个周期的波谷（或波峰），读取声时值 t_1 ，再将另一光标调至相邻的波谷（波峰），读取声时值 t_2 ，按下式计算出径向换能器的谐振频率 f_1 （有

些示波器可自动计算和显示出两个光标间的声时差值和频率值)。测量得到的频率值与标称值之差应符合 5.3 的要求。

$$f_1 = 1000 / (t_2 - t_1) \quad (7)$$

式中: t_1 -----前半周期的波谷(或波峰)的声时值, μs ;

t_2 -----与 t_1 相邻的波谷(波峰)的声时值, μs ;

f_1 ----- 径向换能器的发射谐振频率, Hz 。

$$\text{误差计算公式: } L = \frac{f_1 - f_2}{f_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中: f_1 -----实测频率, kHz ;

f_2 -----标称频率, kHz ;

L -----圆管径向辐射换能器的发射谐振频率误差, %。

7.2.6 发射电压幅值稳定度

7.2.6.1 发射电压幅值稳定度校准装置如图 6 所示:

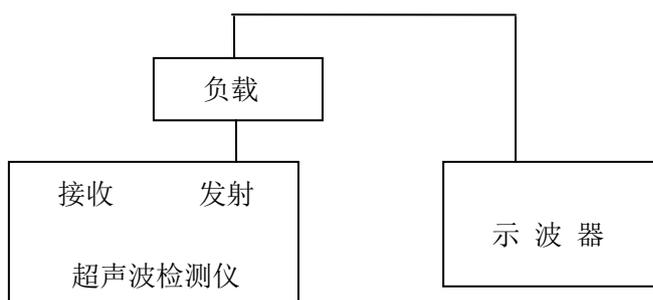


图 6 发射电压幅值稳定度校准装置示意图

7.2.6.2 将超声波检测仪的发射端经负载与示波器相连, 调节超声波检测仪的电压, 用示波器记录下每一档电压的幅值。每隔 15min 测量一次, 共测量 5 次, 其最大值至最小值相对平均值的幅度变化范围应符合 5.4 的要求。

$$\bar{V} = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) / 5 \quad (9)$$

$$A = (V_{\max} - V_{\min}) / \bar{V} \quad (10)$$

式中: \bar{V} -----5 次测量的平均值, V ;

V_{\max} -----电压最大值, V ;

V_{\min} -----电压最小值, V ;

A ----- 电压稳定度, % 。

7.2.7 多通道超声波检测仪的通道隔离度

7.2.7.1 多通道超声波检测仪的通道隔离度校准装置如图 7 所示：

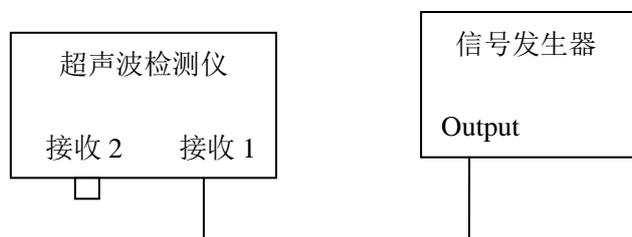


图 7 多通道超声波检测仪的通道隔离度校准装置示意图

7.2.7.2 调节信号发生器的频率为换能器的标称频率，并设置信号发生器的输出为最大，调节超声波检测仪，使通道 1 增益最大，并且接收的信号为满屏的 80%。通道 2 对地短路，记录下超声波检测仪的幅值 A_1 ， A_2 ，通道隔离度应满足 5.5 的要求。通道隔离度计算公式如下：

$$A = A_1 - A_2 \quad (11)$$

式中： A_1 -----通道 1 的幅值，dB；

A_2 -----通道 2 的幅值，dB；

A -----通道隔离度，dB。

8 校准结果表达

超声波检测仪经校准后出具校准证书，推荐的校准证书的内页格式见附录 B

9 复校时间间隔

超声波检测仪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（使用部位的重要性、环境条件、使用频率）、使用者、仪器本身质量等诸多因素，因此，客户可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

附录 A

(资料性附录)

水中超声速度随温度的变化

温度 ℃	声速		温度 ℃	声速	
	m/s	$\times 10^3$ in/s		m/s	$\times 10^3$ in/s
15.0	1470.6	57.89	20.2	1483.6	58.40
15.2	1471.1	57.91	20.4	1484.1	58.42
15.4	1471.6	57.93	20.6	1484.6	58.44
15.6	1472.1	57.95	20.8	1485.1	58.46
15.8	1472.6	57.97	21.0	1485.6	58.48
16.0	1473.1	57.99	21.2	1486.1	58.50
16.2	1473.6	58.01	21.4	1486.6	58.52
16.4	1474.1	58.03	21.6	1487.1	58.54
16.6	1474.6	58.05	21.8	1487.6	58.56
16.8	1475.1	58.07	22.0	1488.1	58.58
17.0	1475.6	58.09	22.2	1488.6	58.60
17.2	1476.1	58.11	22.4	1489.1	58.62
17.4	1476.6	58.13	22.6	1489.6	58.64
17.6	1477.1	58.15	22.8	1490.1	58.66
17.8	1477.6	58.17	23.0	1490.6	58.68
18.0	1478.1	58.19	23.2	1491.1	58.70
18.2	1478.6	58.21	23.4	1491.6	58.72
18.4	1479.1	58.23	23.6	1492.1	58.74
18.6	1479.6	58.25	23.8	1492.6	58.76
18.8	1480.1	58.27	24.0	1493.1	58.78
19.0	1480.6	58.29	24.2	1493.6	58.80
19.2	1481.1	58.31	24.4	1494.1	58.82
19.4	1481.6	58.33	24.6	1494.6	58.84
19.6	1482.1	58.35	24.8	1495.1	58.86
19.8	1482.6	58.37	25.0	1495.6	58.88
20.0	1483.1	58.38			

注：引自 GB/T23900—2009《无损检测 材料超声速度测量方法》

附录 B

(资料性附录)

非金属超声波检测仪校准记录 (参考格式)

表 B.1 校准证书内页格式

共 2 页 第 1 页					
1. 使用的校准设备					
名称	型号规格	检定或校准机构	检定或校准证书		
2. 声时测量 (声信号)					
2.1 平面测试换能器					
距离 (mm)	100	200	300	400	500
标准值 (μs)					
实测值 (μs)					
误差 (%)					
2.2 径向换能器					
距离 (mm)	60	120	180	240	300
标准值 (μs)					
实测值 (μs)					
误差 (%)					
3. 声时测量 (电信号)					
延迟 (μs)	100	200	300		
实测值 (μs)					
误差 (%)					
4. 径向换能器的谐振频率					
标称频率 (Hz)					
实测频率 (Hz)					
误差 (%)					

5. 幅值测量级线性

幅值 (dB)	100	110	120	130
实测值 (dB)				

起始点以上间隔 10dB 最大误差 _____ ;

6. 电压幅值稳定度

电压稳定度每小时误差不超过 _____ ;

7. 多通道隔离度

多通道声波检测仪在换能器标称频率处的隔离度大于 _____ ;

附录 C

(资料性附录)

不确定度分析实例

非金属超声波检测仪测量结果的评定，主要就是评定平面测试换能器和圆管径向辐射换能器声时测量结果的不确定度。

C.1 平面测试换能器

C.1.1 数学模型

$$\Delta t = t_1 - d / (331.4 \sqrt{1 + 0.00367T}) \quad \text{C1}$$

式中： Δt —— 超声波检测仪的声时测量误差，s；

t_1 —— 超声波检测仪声时测量值，s；

d —— 两换能器之间的距离，m；

T —— 环境温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

式 (C1) 中， t_1 、 d 、 T 之间互为独立，其灵敏系数与方差分别为

$$u_c^2(\Delta t) = c^2(t_1)u^2(t_1) + c^2(d)u^2(d) + c^2(T)u^2(T)$$

$$c(t_1) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(t_1)} = 1$$

$$c(d) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(d)} = -1 / (331.4 \sqrt{1 + 0.00367T}) = -0.0029$$

$$c(T) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(T)} = \frac{-d \times (-1/2) \times (1 + 0.00367T)^{-3/2} \times 0.00367}{331.4} = 0.5 \times 10^{-6} \quad (\text{取})$$

$T=20^{\circ}\text{C}$, $d=0.1\text{m}$)

C.1.2 标准不确定度分量的来源与评定

以校准规范中规定的 0.1m 距离声时测量为例，对超声波检测仪的声时测量误差进行分析。

C.1.2.1 A 类标准不确定度

对平面测试换能器的声时值做 10 次独立重复测量，在超声波检测仪上读取 10 次显示值。

表 C.1

测 量 次 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测 量 值 (μs)	291.5	291.6	292.0	291.7	291.8	291.6	291.4	291.4	291.6	291.7

根据

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

计算其单次测量实验标准偏差为 $u(t_1) = s(x) = 0.18\mu\text{s}$ 。

C.1.2.2 B 类标准不确定度

1) 直尺本身的不确定度为 0.1, $k=2$, 则

$$u_1 = U/k = 0.1/2 = 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}$$

2) 测量 100mm 距离引入的不确定度为 0.2mm, $k=2$, 则

$$u_2 = U/k = 0.2/2 = 0.1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

u_1 , u_2 分量独立无关, 合成不确定度为

$$u(d) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.11 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3) 温度计本身的不确定度为 0.2°C , $k=2$, 则

$$u_1 = U/k = 0.2/2 = 0.1^\circ\text{C}$$

4) 温度测量引入的不确定度为 0.2°C , $k=2$, 则

$$u_2 = U/k = 0.2/2 = 0.1^\circ\text{C}$$

u_1 , u_2 分量独立无关, 合成不确定度为

$$u(T) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.14^\circ\text{C}$$

C.1.3 合成标准不确定度

以上分量独立无关, 所以合成不确定度为

$$u_c^2(\Delta t) = c^2(t_1)u^2(t_1) + c^2(d)u^2(d) + c^2(T)u^2(T)$$

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{(0.18)^2 + 0.319^2 + 0.07^2} = 0.37 \mu s$$

C.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U = ku_c(\Delta t) = 2 \times 0.37 = 0.74 \mu s$$

C.2 径向换能器

C.2.1 数学模型

$$\Delta t = t_1 - d/v \quad C2$$

式中： Δt —— 超声波检测仪的声时测量误差，s；

t_1 —— 超声波检测仪声时测量值，s；

v —— 声波在水中的声速，m/s；

d —— 两径向换能器的内边缘的间距，m。

式 (A1) 中， t_1 、 d 、 v 之间互为独立，其灵敏系数与方差分别为

$$u_c^2(\Delta t) = c^2(t_1)u^2(t_1) + c^2(d)u^2(d) + c^2(v)u^2(v)$$

$$c(t_1) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(t_1)} = 1$$

$$c(d) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(d)} = -1/v = 0.67 \times 10^{-5} \quad (\text{水中温度参照附录 A, 这里取 } 25^\circ\text{C} \text{ 时的声速}$$

$$v=1495.6\text{m/s})$$

$$c(v) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(v)} = \frac{-d}{v^2} = 0.27 \times 10^{-9} \quad (\text{取 } d=0.06\text{m}, v=1495.6\text{m/s})$$

C.2.2 标准的不确定度分量的来源与评定

以校准规范中规定 0.06m 的测量距离为例，对径向换能器在水中的声时测量误差进行分析。

C.2.2.1 A 类标准不确定度

对径向换能器的声时值在消声水槽中做 10 次独立重复测量，在超声波检测仪上读取 10 次显示值。

表 C.2

测 量 次 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测 量 值 (μs)	40.2	40.1	39.8	40.3	40.1	40.6	40.4	40.3	40.4	40.5

根据

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

计算其单次测量实验标准偏差为 $u(t_1) = s(x) = 0.23 \mu\text{s}$ 。

C.2.2.2 B 类标准不确定度

1) 直尺本身的不确定度为 0.1m , $k=2$, 则

$$u_1 = U/k = 0.1/2 = 0.05 \times 10^{-3} \text{m}$$

2) 测量 60mm 距离引入的不确定度为 0.3mm , $k=2$, 则

$$u_2 = U/k = 0.3/2 = 0.15 \times 10^{-3} \text{m}$$

u_1 , u_2 分量独立无关, 合成不确定度为

$$u(d) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.16 \times 10^{-3} \text{m}$$

取水中的温度 25°C 时的声速 $v=1495.6 \text{ m/s}$, 故不确定度分量 $c^2(v)u^2(v)$ 及温度的不确定度可忽略不计,

C.2.3 合成标准不确定度

以上分量独立无关, 所以合成不确定度为

$$u_c^2(\Delta t) = c^2(t_1)u^2(t_1) + c^2(d)u^2(d)$$

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{(0.23)^2 + 0.001^2} = 0.23 \mu\text{s}$$

C.2.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度:

$$U = ku_c(\Delta t) = 2 \times 0.23 = 0.46 \mu\text{s}$$

