

# 河北省地方计量技术规范

JJF(冀)215—2023

## 跨孔超声波检测仪校准规范

Calibration Specification for Cross-hole Ultrasonic Detectors

2023-08-02 发布

2023-11-01 实施

河北省市场监督管理局 发布



# 跨孔超声波检测仪校准规范

Calibration Specification for Cross-hole  
Ultrasonic Detectors

JJF(冀)215-  
2023JJF(冀)215—2023

归口单位：河北省市场监督管理局

主要起草单位：河北省计量检测技术中心

参加起草单位：河北省计量监督检测研究院

**本规范主要起草人：**

王 茜（河北省计量检测技术中心）

阎海锋（河北省计量监督检测研究院）

周建林（河北业巨计量检测有限公司）

**参加起草人：**

宫宏智（河北省计量监督检测研究院）

张建桥（河北省计量监督检测研究院）

# 目 录

引言	( 11 )
1 范围	( 1 )
2 引用文件	( 1 )
3 术语和定义	( 1 )
4 概述	( 1 )
5 计量特性	( 1 )
5.1 声时测量相对误差	( 1 )
5.2 幅值测量级线性	( 2 )
5.3 发射电压幅值稳定度	( 2 )
6 校准条件	( 2 )
6.1 环境条件	( 2 )
6.2 校准标准器及其它设备	( 2 )
7 校准项目和校准方法	( 2 )
7.1 校准项目	( 2 )
7.2 校准方法	( 3 )
8 校准结果的表述	( 6 )
9 复校时间间隔	( 7 )
附录 A 水中超声速度随温度的变化	( 8 )
附录 B 校准原始记录参考格式	( 9 )
附录 C 校准证书内页格式	( 11 )
附录 D 跨孔超声波检测仪声时测量误差不确定度评定示例	( 13 )

# 引 言

本规范依据国家计量技术规范JJF 1071--2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编制。

本规范参考了JJG990《声波检测仪检定规程》、GB/T7965《声学 水声换能器测量》、GB/T12604.1《无损检测术语 超声检测》等文件的基础上，结合国内跨孔超声波检测仪的质量控制现状制定。

本规范为首次制定。

# 跨孔超声波检测仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于跨孔超声波检测仪（以下简称超声波检测仪）的校准，凡带平面测试换能器和径向换能器的超声波检测仪均适用于本规范。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 990 《声波检测仪检定规程》

GB/T 7965 《声学 水声换能器测量》

GB/T 12604.1 《无损检测术语 超声检测》

GB/T 23900-2009 《无损检测 材料超声速度测量方法》

CECS21: 2000 《超声法检测混凝土缺陷技术规程》

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 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 声时 time of transmitted sound

声波在介质中传播的时间。

### 3.2 声速 sound field

在非频散介质中声波沿传播方向行进的相速度或群速度。

## 4 概述

跨孔超声波检测仪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。带径向换能器的超声波检测仪则主要用于跨孔透射法检测混凝土灌注桩桩身完整性和大体积混凝土的缺陷。

## 5 计量特性

### 5.1 声时测量相对误差

#### 5.1.1 电信号测量相对误差

电信号测量相对误差应不大于 $\pm 0.5\%$ 。

#### 5.1.2 声信号测量相对误差

平面换能器测量相对误差应不大于 $\pm 1.0\%$ ，径向换能器测量相对误差应不大于 $\pm 2.0\%$ 。

## 5.2 幅值测量级线性

每6dB优于 $\pm 0.9\text{dB}$ ，总线性范围不低于产品技术指标要求。

## 5.3 发射电压幅值稳定度

每小时应不大于 $\pm 5\%$ 。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

#### 6.1.1 温度与湿度

室温： $(20\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ ；水温： $(20\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$

相对湿度：不大于85%。

#### 6.1.2 供电电源

电源电压： $(220\pm 11)\text{ V}$ 。

电源频率： $(50\pm 0.5)\text{ Hz}$ 。

#### 6.1.3 其他

周围无影响校准正常工作的机械振动。

### 6.2 校准标准器及其它设备

#### 6.2.1 信号发生器

频率范围1kHz~100MHz，失真小于1%，输出电平的频响优于 $\pm 0.5\text{dB}$ ，可输出猝发音信号。

#### 6.2.2 数字示波器

频率范围DC~100MHz，幅值测量误差：50V以下常规幅值测量优于 $\pm 1.5\%$ ，50V以上高电压测量优于 $\pm 5\%$

#### 6.2.3 衰减器

频率范围0Hz~30MHz，量程：0~80dB，准确度： $\pm 0.5\% A + 0.02\text{dB}$ ）。

#### 6.2.4 运动控制装置

行程600mm，定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ，负载（包括换能器及安装夹具及运动滑块） $\geq 5\text{kg}$ 。

#### 6.2.5 消声水箱

消声水箱能满足两种换能器间距离的远场条件。

#### 6.2.6 温度计

常用范围： $(0\sim 50)\text{ }^\circ\text{C}$ ，分度值 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 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 校准项目一览表

序号	校准项目	技术要求条款	校准方法条款
1	声时测量相对误差（电信号方法）	5.1.1	7.2.2
2	平面换能器声时测量（声信号方法）	5.1.2	7.2.3
3	径向换能器声时测量（声信号方法）	5.1.2	7.2.4
4	幅值测量级线性	5.2	7.2.5
5	发射电压幅值稳定度	5.3	7.2.6

## 7.2 校准方法

### 7.2.1 外观及工作正常性检查

超声波检测仪表面无划伤、裂纹和变形现象；各按键及开关操作灵活无卡涩；显示器显示清晰，无缺陷；铭牌标识清晰完整。

### 7.2.2 声时测量的相对误差（电信号方法）

按图 1 方式接线。调节信号发生器，使频率调至换能器的标称频率，波数为 10。调节猝发音延迟，每延迟 100 $\mu$ 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，使屏幕中的时间可以完全读出。分别读取超声波检测仪的声时和信号发生器的延迟时间，计算得到的电信号声时测量相对误差。

声时相对误差公式：

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{t_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$t_1$  ——超声波检测仪读出的声时， $\mu$ s

$t_2$  ——信号发生器的延迟时间， $\mu$ s

$\Delta t$  ——电信号声时相对误差，%。

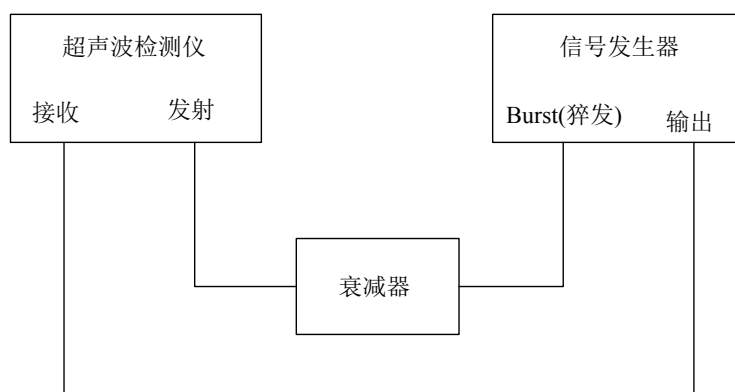


图 1 超声波检测仪声时测量（电信号方法）校准接线示意图

### 7.2.3 平面换能器的声时测量相对误差（声信号方法）

按图2方式接线。超声波在空气中的声时相对稳定，只是会随着温度的变化有些改变，考虑在空气中检测平面换能器状态的声时，首先将运动控制装置调整到起始位置，将两个

换能器的辐射面相对并在同一轴线上，测量出零声时并予以消除，并依次运动间距为60mm、120mm、180mm、240mm、300mm，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 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，由声时测量值与理论值计算值计算声时测量相对误差。

声时理论计算公式：（2）

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

式中：

331.4 —— $0^{\circ}\text{C}$ 时空气的声速，m/s；

$T$  ——空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$d$  ——两换能器之间相对距离，m；

$t$  ——声时的理论计算值，s。

声时相对误差计算公式：

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{t_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

$t_1$  ——声时实测值， $\mu\text{s}$ ；

$t_2$  ——声时理论值， $\mu\text{s}$ ；

$\Delta t$  ——平面测试换能器声信号的声时误差，%。

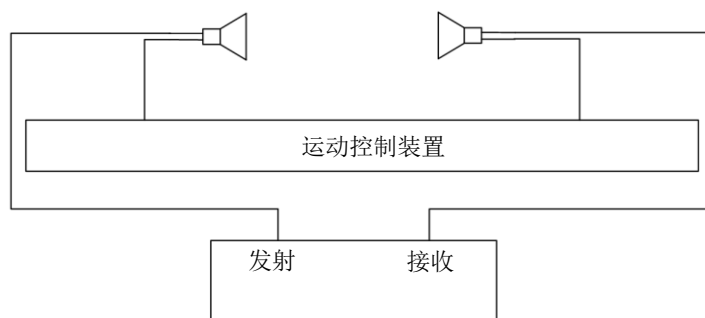


图2 平面换能器声时测量相对误差（声信号）校准接线示意图

#### 7.2.4 径向换能器的声时测量相对误差（声信号方法）

按图3方式接线。将两个径向换能器保持其轴线相互平行，置于消声水箱同一水平高度，两个换能器轴线间距先后调节在 $L_1$ 、 $L_2$ ，分别读取相应的声时值 $t_1'$ 、 $t_2'$ 。由超声波检测仪、换能器及其高频电缆所产生的零声时 $t_0$ 。

$$t_0 = \frac{L_1 \times t_2' - L_2 \times t_1'}{L_1 - L_2} \quad (4)$$

将径向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  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 其声时测量值与理论计算值计算声时测量相对误差。

声时理论计算公式:

$$t = \frac{d}{v} \quad (5)$$

式中:

$d$  ——两换能器中心轴线间距, m;

$v$  ——水中的声速, m/s;

$t$  ——声时的理论计算值, s。

声时相对误差按 (3) 式计算。

注:  $v$  是查附录A所得。

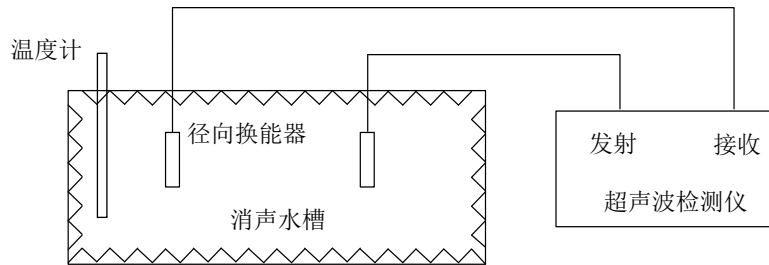


图3 径向换能器测量相对误差（声信号）校准接线示意图

### 7.2.5 幅值测量级线性

按图4方式接线。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调至适当位置,调节超声波检测仪接收信号为满屏的80%,并记录其显示幅值。依次按6dB增加或减少衰减器的输出值,每次测量均需调节超声波检测仪接收信号为满屏的80%,并记录显示幅值,测量不少于4次,超声波检测仪显示幅值的改变值与衰减改变值之差即为测量级线性误差。

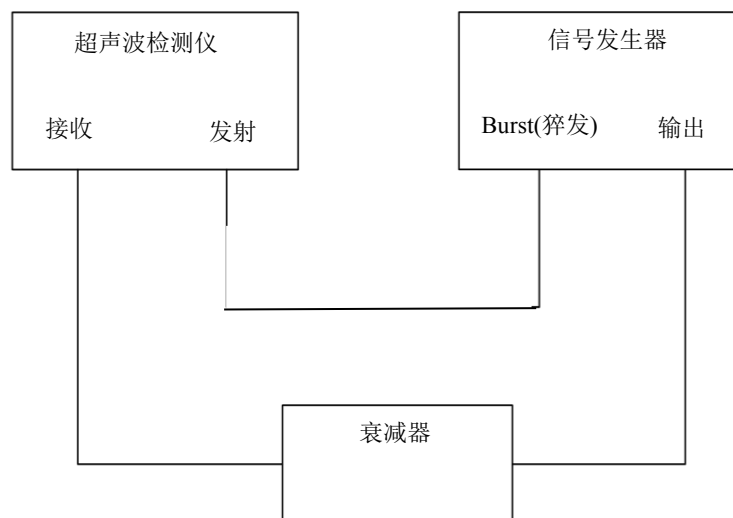


图4 幅值测量级线性校准接线示意图

### 7.2.6 发射电压幅值稳定度

按图5方式接线。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5次，记录其最大值与最小值之差相对于平均值的幅值变化。

电压幅值稳定度公式（6）

$$s = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{\bar{V}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

$\bar{V}$ ——5次测量电压的平均值，V；

$V_{\max}$ ——电压最大值，V；

$V_{\min}$ ——电压最小值，V；

$s$ ——电压稳定度，%。

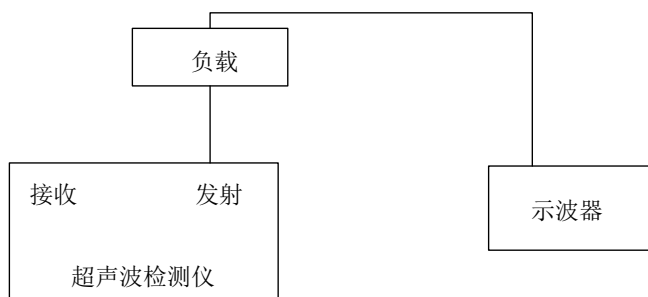


图5 发射电压幅值稳定度校准接线示意图

## 8 校准结果的表述

校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果不在实验室内进行校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用计量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；

- l) 校准结果及测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为一年。由于复校时间间隔的长短是由使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间间隔。

## 附录 A

## 水中超声速度随温度的变化

表 A.1 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/T 23900-2009《无损检测 材料超声速度测量方法》

## 附录 B

## 校准原始记录参考格式

## B.1 外观检查:

表 B.1 外观检查

外观检查	
------	--

## B.2 声时测量相对误差（电信号）

表 B.2 声时测量相对误差（电信号）

序号	标准声时 (us)	测量声时 (us)	误差 (%)
1			
2			
3			
4			
5			
6*			

## B.3 平面换能器声时测量（声信号）

表 B.3 平面换能器声时测量（声信号）

序号	移动距离 (mm)	声速 (m/s)	标准声时 ( $\mu$ s)	测量声时 ( $\mu$ s)	误差 (%)
1					
2					
3					
4					
5					

## B.4 径向换能器声时测量（声信号）

表 B.4 径向换能器声时测量（声信号）

序号	移动距离 (mm)	声速 (m/s)	标准声时 ( $\mu$ s)	测量声时 ( $\mu$ s)	误差 (%)
1					
2					
3					
4					
5					

## B.5 幅值测量级线性

表 B.5 幅值测量级线性

声波检测仪 幅值 (dB)	声波检测仪 幅值衰减 (dB)	衰减器衰减 (dB)	幅值测量级线性 误差 (dB)

## B.6 发射电压幅值稳定度

表 B.6 发射电压幅值稳定度

时间					
电压值					



## 附录 C

## 校准证书内页格式

## C.1 外观检查:

表 C.1 外观检查

外观检查	
------	--

## C.2 声时测量相对误差（电信号）

表 C.2 声时测量相对误差（电信号）

序号	标准声时 ( $\mu\text{s}$ )	测量声时 ( $\mu\text{s}$ )	误差 (%)
1			
2			
3			
4			
5			
6*			

## C.3 平面换能器声时测量（声信号）

表 C.3 平面换能器声时测量（声信号）

序号	移动距离 (mm)	声速 (m/s)	标准声时 ( $\mu\text{s}$ )	测量声时 ( $\mu\text{s}$ )	误差 (%)
1					
2					
3					
4					
5					

## C.4 径向换能器声时测量（声信号）

表 C.4 径向换能器声时测量（声信号）

序号	移动距离 (mm)	声速 (m/s)	标准声时 ( $\mu\text{s}$ )	测量声时 ( $\mu\text{s}$ )	误差 (%)
1					
2					
3					
4					
5					

## C.5 幅值测量级线性

表 C.5 幅值测量级线性

声波检测仪 幅值 (dB)	声波检测仪 幅值衰减值 (dB)	衰减器衰减值 (dB)	幅值测量级线性 误差 (dB)

## C.6 发射电压幅值稳定度

表 C.6 发射电压幅值稳定度

时间					
电压值					

## 附录 D

## 跨孔超声波检测仪声时测量误差不确定度评定示例

## D.1 平面换能器声时测量

## D.1.1 测量模型

本规程采用与已知距离的空气声时测量值与计算值比较法，校准声波检测仪声时测量误差。数学模型如下：

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

式中： $\Delta t$ ——被检声波检测仪声时测量误差，s；

$t_1$ ——被检声波检测仪声时测量值，s；

$d$ ——两换能器之间的距离，m；

$T$ ——空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

## D.1.2 方差及灵敏系数

由于  $f(t_1, d, T)$  中的  $t_1, d, T$  互不相关，故其合成估计方差为：

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

式中灵敏度系数为：

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

$$c(d) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(d)} = -1 / (331.4 \sqrt{1 + 0.00367T}) = -0.0029 \quad (\text{取 } T=20^{\circ}\text{C})$$

$$c(T) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(T)} = -d / 331.4 \times (-1/2) \times (1 + 0.00367T)^{-3/2} \times 0.00367 = 0.3 \times 10^{-6}$$

( $T=20^{\circ}\text{C}$ ， $d=0.06\text{m}$ )

## D.1.3 标准不确定度

现以规程中规定的 60mm 距离声时测量为例，分析声波检测仪声时测量误差的不确定度。不确定的来源有：测量重复性引入的不确定度分量，60mm 距离测量误差、温度测量误差及温度允许变化范围引入的不确定度分量。

## 1) A 类标准不确定度

通过对声波检测仪 60mm 声时值进行 10 次测量，计算重复性引入的不确定度  $u(t_1)$ 。测量数据见表 A.1。

表 D.1 表重复性引入的不确定度

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/ $\mu\text{s}$	173.4	173.4	173.3	173.2	173.5	173.4	173.6	173.3	173.4	173.5

由重复性引入的不确定度  $u(t_1)=s_1=0.12\mu\text{s}$

2) B类标准不确定度

2.1) 60mm 距离测量引入的不确定度为  $U=0.05\text{mm}$ ,  $k=2$ , 则

$$u(d) = U / k = 0.05 / 2 = 0.025 \times 10^{-3} \text{m}$$

2.2) 温度允许变化范围引入的不确定度, 规程要求温度最大允许变化范围为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , 取  $k=\sqrt{3}$ , 则

$$u(T_1) = U / k = 0.5 / \sqrt{3} = 0.289^\circ\text{C}$$

2.3) 温度测量引入的不确定度为  $U=0.2^\circ\text{C}$ ,  $k=2$ , 则

$$u(T_2) = U / k = 0.2 / 2 = 0.1^\circ\text{C}$$

其中  $u(T_1)$ 、 $u(T_2)$  分量独立无关, 合成不确定度为

$$u(T) = \sqrt{u^2(T_1) + u^2(T_2)} = 0.31^\circ\text{C}$$

#### D.1.4 合成标准不确定度汇总表(见表D.2)

表 D.2 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	不确定度分量
测量重复性 $u(t_1)$	0.12 $\mu\text{s}$	$C(t_1)$ : -1	0.12 $\mu\text{s}$
60mm距离测量不准确 $u(d)$	$2.5 \times 10^{-5} \text{m}$	$C(d)$ : -0.0029	0.072 $\mu\text{s}$
温度测量不准确及允许变化范围 $u(T)$	0.31 $^\circ\text{C}$	$C(T)$ : $0.3 \times 10^{-6}$	0.093 $\mu\text{s}$

#### D.1.5 合成标准不确定度

以上分量独立无关, 且数值相差不是很大, 可以直接合成。

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

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{(0.12)^2 + 0.072^2 + 0.093^2} = 0.17 \mu\text{s}$$

#### D.1.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则扩展不确定度:

$$U = ku_c(\Delta t) = 2 \times 0.17 = 0.34 \mu\text{s}$$

#### D.1.7 相对扩展不确定度

$$U_r = \frac{0.34}{173.4} \times 100\% = 0.20\%$$

## D.2 径向换能器声时测量

### D.2.1 测量模型

采用与已知距离的水声时测量值与计算值比较法，校准声波检测仪声时测量误差。数学模型如下：

$$\Delta t = t_1 - d / [1470.6 + 2.5 \times (T - 15)] 1470.6$$

式中： $\Delta t$ ——被检声波检测仪声时测量误差，s；

$t_1$ ——被检声波检测仪声时测量值，s；

$d$ ——两换能器之间的距离，m；

$T$ ——空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

### D.2.2 方差及灵敏系数

由于  $f(t_1, d, T)$  中的  $t_1, d, T$  互不相关，故其合成估计方差为：

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

式中灵敏度系数为：

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

$$c(d) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(d)} = -1 / [1470.6 + 2.5(T - 15)] = -0.00067 \quad (\text{取 } T = 20^{\circ}\text{C})$$

$$c(T) = \frac{\partial(\Delta t)}{\partial(T)} = d \times (1433.1 + 2.5T)^{-2} \times 2.5 = 0.068 \times 10^{-6} \quad (T = 20^{\circ}\text{C}, d = 0.06\text{m})$$

### D.2.3 标准不确定度

现以规程中规定的 60mm 距离声时测量为例，分析声波检测仪声时测量误差的不确定度。不确定的来源有：测量重复性引入的不确定度分量，60mm 距离测量误差、温度测量误差及温度允许变化范围引入的不确定度分量。

#### 1) A 类标准不确定度

通过对声波检测仪 60mm 声时值进行 10 次测量，计算重复性引入的不确定度  $u(t_1)$ 。测量数据见表 A.1。

表 D.3 表重复性引入的不确定度

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/ $\mu\text{s}$	40.4	40.4	40.3	40.4	40.4	40.3	40.5	40.4	40.3	40.4

由重复性引入的不确定度  $u(t_1) = s_1 = 0.064\mu\text{s}$

2) B类标准不确定度

2.1) 60mm 距离测量引入的不确定度为  $U=0.05\text{mm}$ ,  $k=2$ , 则

$$u(d) = U / k = 0.05 / 2 = 0.025 \times 10^{-3} \text{ m}$$

2.2) 温度允许变化范围引入的不确定度, 规程要求温度最大允许变化范围为  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , 取  $k=\sqrt{3}$ , 则

$$u(T_1) = U / k = 0.5 / \sqrt{3} = 0.289^\circ\text{C}$$

2.3) 温度测量引入的不确定度为  $U=0.2^\circ\text{C}$ ,  $k=2$ , 则

$$u(T_2) = U / k = 0.2 / 2 = 0.1^\circ\text{C}$$

其中  $u(T_1)$ 、 $u(T_2)$  分量独立无关, 合成不确定度为

$$u(T) = \sqrt{u^2(T_1) + u^2(T_2)} = 0.31^\circ\text{C}$$

D.2.4 标准不确定度分量汇总表 (见表D.4)

表 D.4 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	不确定度分量
测量重复性 $u(t_1)$	0.064 $\mu\text{s}$	$C(t_1)$ : -1	0.064 $\mu\text{s}$
60mm距离测量不准确 $u(d)$	$2.5 \times 10^{-5} \text{ m}$	$C(d)$ : -0.00067	0.017 $\mu\text{s}$
温度测量及允许变化范围 $u(T)$	0.31 $^\circ\text{C}$	$C(T)$ : $0.068 \times 10^{-6}$	0.021 $\mu\text{s}$

D.2.5 合成标准不确定度

以上分量独立无关, 且数值相差不是很大, 可以直接合成。

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

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{0.064^2 + 0.017^2 + 0.021^2} = 0.069 \mu\text{s}$$

D.2.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ , 则扩展不确定度:

$$U = k u_c(\Delta t) = 2 \times 0.069 = 0.14 \mu\text{s}$$

D.2.7 相对扩展不确定度

$$U_r = \frac{0.19}{40.3} \times 100\% = 0.35\%$$