

# 提高测量声时精度的“过零检测数字平均法”

朱士明 刘镇清 魏墨鑫 卢杰

(同济大学声学研究所)

本文介绍了一种新颖的脉冲回波技术,它是用过零点测回波间的声时间隔,并将时间间隔内的时标计数值作多次平均,这样得到的声时测量精度可达毫微秒水平,甚至更高。而且这种方法非常适合于测量连续变化的声时,具有很强的抗干扰能力,在工业量超声检测方面有广阔的应用前景。

## 一、引言

声速的精密测量实际上包括声时与声程的精密测量,声时的测量方法有多种,其中常用的有脉冲回波计数法、脉冲回鸣法、脉冲回波迭加法和脉冲重合法。后两者在特定条件下能非常精密地测量介质的绝对声时,常常用于实验室的科研工作中。前两者简便易行、实施成本低,被广泛地应用于各种超声式工业检测仪器中。而回鸣法虽具有结构简单,能够得到较高声时测量灵敏度的优点,但要获得“真正声时”值时,就很难对这种方法所得的结果作各种声时修正。而且在实际应用中,回鸣法又容易误触发,要高灵敏地测量需耗费颇长的测量时间。

普通的回波计数测时法能直接快速给出声时测量值,它的测量精度在很大程度上受计数时标间隔的制约。为了提高声时测量精度,同济大学声学研究所曾提出了一种改进的回波测时方法——精测尾时法<sup>[1,2]</sup>,它实质上是一种模拟式的声时平均方法,获得的声时测量精度可达内部计数时标间隔的百分之一,这一技术在国内已被广泛采用。限于元器件的速度与精度,精测尾时法的测量精度一般很难超过10ns。

本文介绍的“过零检测数字平均法”,以所需两个回波中相应过零点的时间间隔作为声时,将多次声时的测量结果由单片机作数字平均化处理,在计数时标周期为40ns时,其声时测量精度可达优于毫微秒(ns)数量级。

## 二、原理

Lach与Daniel曾用实验证明了数字平均法可达到很高的声时测量灵敏度<sup>[3]</sup>,但文中所采用的回波触发电平为给定的某一比较电平,当媒质衰减系数不同时还要做调节,否则将造成误差。Aindow等人则对数字平均法能达到的测量精度作了简述<sup>[4]</sup>。本文在总结了国外学者工作基础上,提出了一种适合于工业超声检测的简单易行的过零检测数字平均法,其原理见图1。

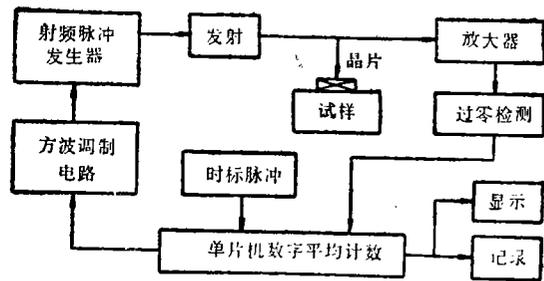


图1 过零检测数字平均法原理图

工作时,在单片机控制下,发射电路向换能器输出一串方波调制脉冲,超声回波信号经过放大后送至过零检测电路,过零检测电路提取出所需两个回波中的某一给定交流过零点,并以此向单片机控制的计数器输出允许计数的时间间隔信号,计数器则在过零检测电路提供的时间门内以时标频率计数,等到回波信号在试样中几乎衰减完后重复上述过程。单片机将多次计数值累加存储,并

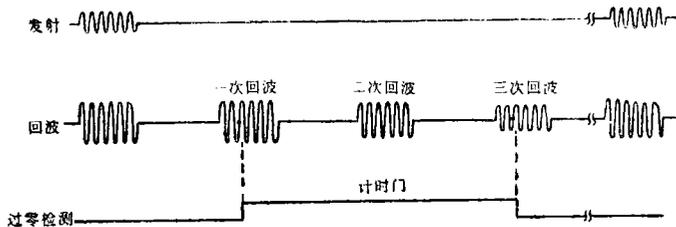


图2 过零检测工作时序图

在给定的次数后作平均处理，那么输出给显示器的数字即为多次平均处理后的声时值，其时序见图2。

本文所用的声时时间间隔不是从发射到第一次回波，而是采用第一次回波到第二次回波（也可以是第  $n$  次回波， $n > 2$ ），这样可以消除一些诸如电路等引起的声时测量的系统误差。由于将回波的过零点作为测超声波渡越时间的基准，一方面大大减少了衰减对声时测量的影响，另一方面提高了计时时间间隔作为超声波渡越时间的可信度，在波形无畸变的情况下相当于两次回波的正确重合。过零检测时间门的翻转选择在回波的中间部位，避免了回波前沿和后沿的畸变等因素造成的测量误差。

用数字平均减小标量化误差的影响则要求每次计数为随机的独立事件，亦即保证时间间隔门开放（或关闭）的时间与计数时标脉冲之间具有真正的随机特性。随机计数时，时标发生器的形式为图3，它是利用噪声源对振荡脉冲进行随机相位调制，以使时标脉冲有随机的相位抖动来达到的。

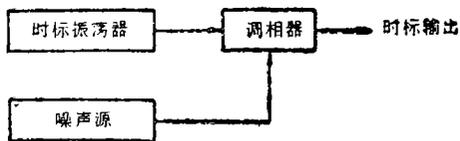


图3 时标发生器原理

对于单次的两个回波间的时间间隔数字

测量，我们可以认为在开始与结束计数时都存在着  $\pm 1/2$  个时标周期的不确定性，其值可大可小，可正可负，但某一个误差值的出现对于所有的单次测量来说其概率是均等的，即其分布是均匀的。显然，由于这种误差单次出现的随机性，在多次测量的情况下，其平均值必然随着测量次数的无限增多而趋于零。若测量的随机误差  $y$  的各次出现值分别为  $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ ，则其数学期望为：

$$E = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \rightarrow 0 \quad (1)$$

这时，对起点与结束点来说，它的方差均为<sup>[5]</sup>：

$$D_1 = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} (y - E)^2 \times \frac{1}{\tau} dy = \frac{\tau^2}{12} \quad (2)$$

$\tau$  是时标脉冲的周期。由于声时时间间隔的起始与结束时都有这一误差，那么整个声时测量的方差  $D$  为：

$$D = 2D_1 = T^2/6 \quad (3)$$

我们把每次测量的声时时间宽度看作为不变的量，各次时标计数则是相互独立的事件。这样根据统计理论，经过  $N$  次平均后，且  $N$  足够大时，其平均值的误差服从正态分布<sup>[5]</sup>。那么声时测量平均值的标准差为：

$$STD(\bar{x}) = \tau \sqrt{6/N} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

由此可见，经过多次数字平均后量化效应带来的误差可以降低，平均次数越多，

测量结果越准确。但是次数越多，测量时间越长，测量时间增加到诸如温度漂移等引起的实际声时变化不容忽视后，再盲目增加平均次数就失去意义了。

与脉冲重合法相似，用这种方法得到的声时测量值 $T_m$ 是由真正的声波渡越时间 $\delta$ 和由耦合层与衍射引起的两项增量组成<sup>[6]</sup>：

$$T_m = P\delta - (P\gamma/2\pi f) - (\Delta\varphi/2\pi f) \quad (6)$$

其中 $f$ 为射频频率， $P$ 为被测量的两次回波间的声波在试样中的来回渡越次数， $\gamma$ 为换能器与试样之间的耦合层引起的反射相移， $\Delta\varphi$ 为第 $n$ 次回波与第 $n+p$ 次回波间的衍射相移，因而声波在试样中的真正渡越时间为：

$$\delta = (T_m/P) + (\Delta\varphi/2\pi fp) + (\gamma/2\pi f) \quad (7)$$

关于耦合层相移与衍射相移已有大量文章作了严密推算<sup>[7-9]</sup>，本文不再重复。

### 三、实验结果

#### 1 重复性实验

我们根据过零检测数字平均原理研制了一台以MCS-51单片机为核心的智能化声速

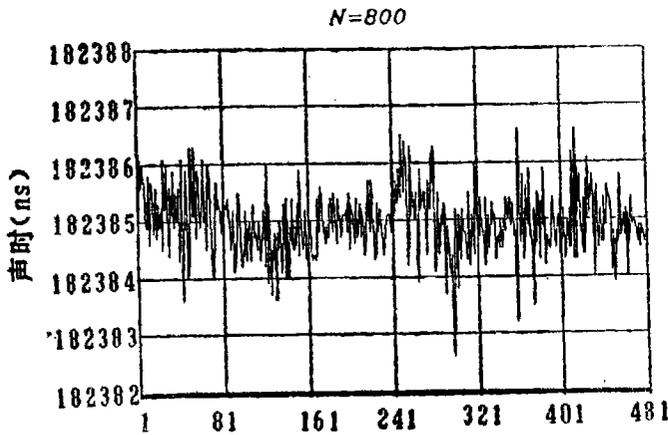


图4 N = 800 时的测量结果

由于耦合层引起的附加相移就变成某一固定量，它一般为毫微秒量级，可按文献<sup>[9]</sup>作修正。由式(7)可知，考验声时测量值 $T_m$ 能否

仪。所用的计数时标周期 $T = 40\text{ns}$ ，当平均次数 $N = 800$ 及 $N = 4000$ 时分别对圆钢棒试样进行重复测量，并自动记录。重复测量的次数 $M = 480$ ，选择第一次与第三次回波为声时时间间隔，其结果见图4与图5。实验中，钢试样的长度 $L = 280\text{mm}$ ，截面直径 $\phi = 80\text{mm}$ ；换能器的中心频率为 $2.3\text{MHz}$ ，换能器直径 $\phi = 18\text{mm}$ 。为了防止耦合层变化引起测量误差，将换能器晶片用环氧树脂粘合固定于试样端面。

由于试样在 $N = 800$ 与 $N = 4000$ 时分别控制在不同的温度条件下，所以测得的声时值在两种情况下有所不同。声时实际测量的标准差，在 $N = 800$ 时为 $0.58\text{ns}$ ；在 $N = 4000$ 标为 $0.27\text{ns}$ 。而根据式(4)， $N$ 为800与4000标的理论标准差分别为 $0.58\text{ns}$ 和 $0.26\text{ns}$ 。理论计算与实际测量吻合得很好，而且这种方法对外界引起的噪声信号也有很强的抑制作用，提高了测量的可靠性，这点在超声工业的实际测量中十分重要。

由此可见，用过零检测数字平均法可以达到很高的声时测量精度，在 $N = 4000$ 时实际测量的相对误差为 $1.5 \times 10^{-6}$ 。一般来说，在实验条件比较好的情况下，诸如：能长时间保持试样温度恒定、两次回波间在试样中的渡越次数再多一些，那么声时的测量精度还可有较大的提高。

#### 2. 绝对声时的测量

如前所述，要获得声波真正渡越时间 $\delta$ ，必须作衍射修正及耦合层修正。在短时间实验条件下，耦合层的性质和厚度（一般极薄）都可看作不变的量，这时

用作获得真正声时值的修正量只有衍射修正了。

作者用 $\text{LiPbO}_3$ 晶片对长度 $L = 50\text{mm}$ 、

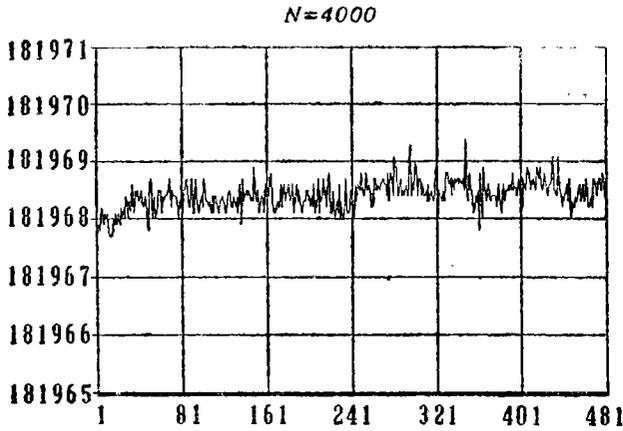


图5 N = 4000时的测量结果

表1 选用两个不同回波时的测量数据

m-n	E(m-n) (ns)	E'(m-n) (ns)
2-1	16500.56	16504.25
3-2	16495.87	16502.84
4-3	16494.14	16500.51
5-4	16497.41	16501.84
6-5	16499.21	16502.36
7-6	16504.35	16506.68
8-7	16506.00	16507.79
	STD(E <sub>mn</sub> )	STD(E' <sub>mn</sub> )
	4.02(ns)	2.45(ns)

为衍射修正后的声时值。在作了衍射修正后<sup>[8]</sup>，第一到第八次回波声时的标准差为2.45 ns，就是说，在5MHz的工作频率时，这种方法的精度约为射频周期的八十分之一，与普通的脉冲重合法相仿<sup>[10]</sup>。

作者认为，选用两个不同回波时造成绝对声时测量误差的主要原因主要有列几点：1. 衍射修正带来的误差，因为所用的衍射修正公式是按换能器作活塞辐射时计算的，而实际的换能器很难按严格的活塞辐射形式振动<sup>[11]</sup>；2. 后几次回波已受到侧壁反射的影响<sup>[6]</sup>；3. 试样两端的平行度与平整度不太理想。

值得注意的是绝对声时准确度虽然无法

直径 $\phi = 80\text{mm}$ 的圆钢试样作了试验。试验中，射频频率 $f = 5\text{MHz}$ ，超声晶片直径 $\phi = 11\text{mm}$ ，调制方波发射14个周期的射频信号，回波提取时检测第6周后的过零点，数字平均次数 $N = 4000$ ，每次显示记录时间约10秒。测量结果见表1。

考虑到接受幅度大小，回波次数大时侧壁影响加剧等因素，本文只测量第一到第八次回波。

表1中 $E_{mn}$ 为实际声时测量值 $E'_{mn}$ 做到很高(最高约为射频周期的五百分之一)，但选定两次回波后的声时相对测量精度(用以反映声时的变化)却可做得很高，按图5的结果来计算，相对误差仅约 $1.5 \times 10^{-6}$ 。

## 四、结 论

1 理论与实验都表明了过零检测数字平均法可以达到较高的声时测量精度，且测量精度与时标周期，平均次数间有简单的数字关系。本文给出的4000次平均的实际测量相对误差为 $1.5 \times 10^{-6}$ 。

2 盲目增加平均次数是无益的，因为这必定要延长测量时间，当延时到温度起伏等因素引起的声时变化就不容忽视了。实际工作中可根据不同情况选择平均次数，以达到最佳效果。

3. 从声时测量的正确性来说，由于衍射修正的效果有限<sup>[11]</sup>，本项方法的测量准确度约 $10^{-4}$ 。耦合层修正在较好的情况下也只能修正到 $10^{-5}$ <sup>[9]</sup>它会影响到各仪器测量结果的一致性。但工业测量中着重的是用声时的变化来反映待测参量的变化，因此可以把衍射修正与耦合修正都当作固定误差，而充分利用本法提供的高精度测量( $10^{-6}$ 数量级)来研究待测参量的变化。

# 轿车车身内噪声的声强测量

郑 郎

(第二汽车制造厂技术中心)

## 一、前 言

轿车舒适性的主要标准之一,是车内噪声水平。车内噪声的来源有两部分,一部分噪声是由壳体发生,它们来自发动机和变速箱,通过支承和支架传到和车身相连的结构件上,再从车身大面积地辐射出来的固体声。另一部分是从发动机室和排气系统辐射出来并返回到车内的空气噪声。在高速行驶下,还有轮胎和气流噪声。它们也是由壳体传递和空气传播的途径传到车内的。

为了降低车内噪声级,必须首先找出壳体和空气噪声通往汽车车内的主要途径及其辐射噪声的部位。以便采取措施降低车内噪

声。为此,作者对国外某轿车样车车身内部的噪声进行了测量,对隔声漏声状况作了分析,得出了一些有益的结论。这为今后我国轿车设计生产水平的提高提供了可靠的依据。

由于轿车车身内部的声反射比较严重。而且传统的声压值是个标量。在离反射面较近和混响较严重的声场中,使用声压法很难测出声场分布和车内声能流向。另外,还由于与车身毗邻的平面上声传播的近场效应,而得不出最大噪声辐射位置的直接结论。这是因为在一般轿车用钢板厚度下,辐射噪声远在其弯曲振动极限频率以下。它处于部分地相互干扰噪声的明显作用的邻场内。

有一种测量原理为大家熟知,但只是近

4.本文叙述的方法简单易行,不需人工调节,微机还对所得信号作各种处理,而且所用的元器件也无过高的要求,便于检修,因而在工业测量技术领域内可有广泛的应用前景。我所最近研制的“智能化超声式双氧水在线检测仪”中就利用了这一声时测量方法,有关这一仪器的研制详细情况当在今后另文发表。

## 参考文献

- [1] 魏墨鑫,朱士明,同济大学学报1979年第一期,55—69
- [2] Zhu Shiming, Wei Moan, Technical Papers of West Pacific 1988, 211—214
- [3] L.L. Lacy, A.C. Daniel, J.A.S.A.,

52(1972)

- [4] J.D. Aindow, R.C. Chivers, J.A.S.A., 73(1983), 1833—18
- [5] 罗南星, 测量误差及数据处理, 计量出版社, 1984
- [6] 魏墨鑫, 朱士明, 超声工业测量技术, 上海人民出版社, 1977, 92—99
- [7] H.J. Meskimen et al, J.A.S.A., 34(1962), 609
- [8] A.S. Khimunin, Acoustica, 32(1975), 192
- [9] 查济璇, 声学学报, 11(1986), 267
- [10] E.P. Papadakis, J.A.S.A., 52(1972), 843
- [11] R.C. Chivers et al, J.A.S.A., 68(1980), 80—84