

一种高精度测量超声波速度的装置

王寅观 魏墨鑫

(同济大学声学研究所)

一、引言

精密测量超声波在媒介中的传播速度，对于研究物质结构具有极其重要的意义，特别是对于某些固体材料如单晶随外界条件的变化(如温度，应力，磁场等)而发生的微小变化，从而可以研究物质微观结构的变化。因此，研究高精密度的声速测量方法及设备，在固体物质，材料科学的研究中有着广泛的应用。

脉冲迭加法〔1〕、〔2〕、〔3〕、〔4〕广泛地用于测定超声波脉冲的传播时间的微小变化，测量精度高，测量过程自动化。本文将报道用集成电路制成的一套自动的脉冲迭加系统，它与以前的设备相比，稳定可靠，费用较低，测量声时微小变化的灵敏度达 $\pm 2 \times 10^{-7}$ 。本系统能广泛用于高精度的脉冲超声学，例如测量雷达和彩电中使用的超声延迟线材料的声时温度系数。

二、基本原理

高精度地测量声速微小变化的脉冲迭加法的基本原理是：将一石英晶片粘至固体试样的一端，作为自发自收的压电换能器。开始有一短周期的射频脉冲进入试样，结果将产生一系列回波 V_1 、 V_2 、 V_3 ……，等等。当发射周期 T 近似地等于声波在试样中往返传播时间 δ 的 p 倍时(一般取 $p=2$)，设试样的声衰减系数不太大，那么第一次发射的回波

还没有完全衰减，第二次发射就开始了，接着第三次发射又开始了，依此类推。这样，在试样中就同时存在着多次反射的声波及回波，这些波将在换能器上迭加。当 $p=2$ 时，所有的奇次回波均以相同的时间间隔出现。精确地调节 T ，使回波迭加之幅值为最大，则声波真正的传播时间 δ 由下式给出

$$T = P\delta - (P\gamma/360f) + n/f \quad (1)$$

式中 γ 是由于超声波在换能器与试样界面的反射所产生的相位角， n 代表射频脉冲不匹配的周期数目，当 $n=0$ 时就取得了周期匹配。由于回波迭加之幅值达到最大值时，在换能器上的各次回波的相位基本相同，各次回波就直接相加，这点就称为发射周期的“共振点”。当发射周期高于或低于这个“共振”周期时，回波迭加的幅值就降低。通过对发射周期进行低频调制，对迭加的回波脉冲进行低频解调，利用“共振”关系进行相敏检波，通过一个闭环调节回路就可实现具有自动频率控制(AFC)的声速测量。

图1为我们所研制的高精度脉冲迭加法声速测量装置的原理方框图。图中虚线框内为脉冲迭加法声速测量部分，虚线框外为我们研制的发射部分和放大检波部分。它的工作过程是：频率为360Hz的参考振荡器产生正交的正弦波和余弦波信号。正弦波信号经过调制深度调节电路后送往低频调制器。调制器是一个调频单元，它将压控振荡器产生的周期信号转变成具有360Hz弱调制的调频信号，再经过时序逻辑电路后产生两个矩形脉冲。一个送往发射部分内的同步脉冲发生

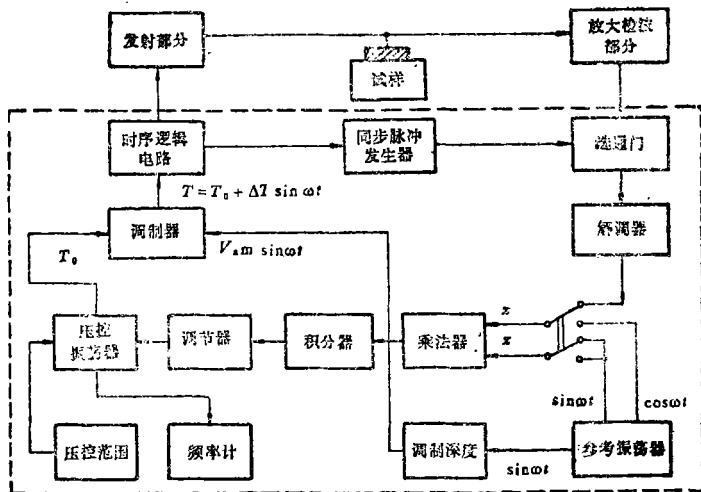


图1 脉冲迭加法声速测量装置方框原理图

器，使之产生高压调制方波，继而激励射频脉冲振荡器产生一系列的射频脉冲。另一个矩形脉冲送往虚线框内的同步脉冲发生器，使之产生选通方波，控制选通门只让试样中的声波回波通过，阻止强大的发射脉冲。选通后的信号经过解调还原成低频信号。在“共振”时，信号的幅度最小，而频率恰好是参考频率的两倍。当压控振荡器的频率高于或低于“共振”频率时，就分别产生相位相反的同频率低频信号，解调信号和参考信号同时送到由模拟乘法器和积分器组成的检相电路。当回波正确迭加时，解调信号 \$V_y\$ 为参考信号 \$V_x\$ 的倍频，即

$$V_x(t) = V_{xm} \sin \omega_0 t \quad (2)$$

$$V_y(t) = V_{ym} \sin(2\omega_0 t + \varphi_1) \quad (3)$$

此时，检相电路的运算结果为

$$V(t) = \int V_x(t) \cdot V_y(t) dt = 0 \quad (4)$$

当系统偏离“共振”时，解调信号恢复为参考信号的基频，即

$$V_y(t) = V_{ym} \sin(\omega_0 t + \varphi_2) \quad (5)$$

此时，检相器输出电压的幅度和极性随着 \$\varphi_2\$ 的改变而改变。调节器根据检相器的输出状态，自动地调节压控振荡器的频率达到“共

振”频率。在声速的自动测量过程中，调节器应始终维持检相器的输出为零。压控振荡器与频率计相联，频率计所显示的周期 \$T\$ 就是声波在试样中的传播时间。

三、装置的研制

在高精度声速测量装置的研制过程中，考虑到仪器要有较强的通用性，因而把这一装置分为脉冲迭加法声速测量，发射和放大检波三个独立的部分，再配上示波器构成整个测量系统。在仪器的线路设计时，除功率驱动部分采用晶体管和电子管外，其它电路尽量采用集成元件。仪器外壳采用装配式标准机箱，内部印刷电路板全部采用针形接插件，声时的测量采用数字显示。

1) 时序逻辑电路：

时序逻辑电路由存储电路和组合逻辑电路两个部分组成(图2)。CP为输入信号，\$Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_{DW}\$为存储电路的输出信号，\$z_i (i=1, \dots, 6)\$为输出信号，\$z_1, z_2\$为 \$p=2\$ 时的发射和选通信号，\$z_3, z_4, z_5, z_6\$

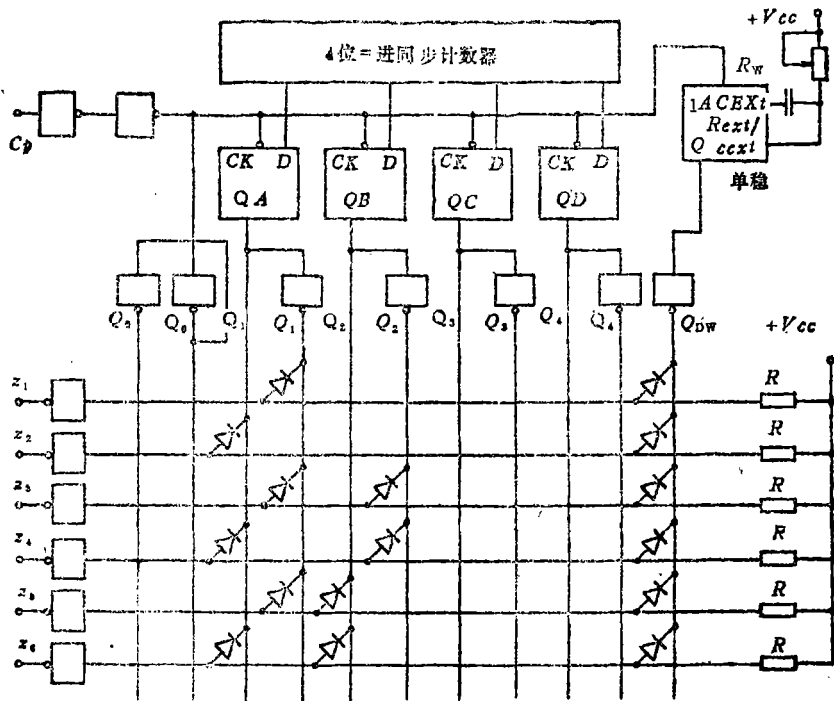


图2 时序逻辑电路

为 $p=4$ 时的发射和第一, 二, 三次回波的选通信号。电路全部采用LSTTL高速组件。

2) 调制器电路

调制器的作用是压控振荡器的输出信号进行频率调制。调频后输出的发射信号的周期 T 在基本周期 T_0 的附近, 以如下的形式作周期性的变化

$$T = T_0 + \Delta T \sin \omega_0 t \quad (6)$$

式中, ω_0 为参考振荡器的输出信号的角频率。解调后回波包络线的频率恰好比参考频率高一倍。调制器电路仅采用一块集成电路 (74LS123——双单稳多谐振荡器)。单稳1的输入端1A受压控振荡器的负跳脉冲触发, 一旦触发后, 输出端1Q便独立于输入端作进一步的跃变, 输出脉宽与计时元件 R_{ext} , C_{ext} 以及加接在调频电阻 R_M 与计时元件中点的低频调制电压有关。由计时网络的等效电路, 我们得到输出脉宽 T_w 与低频调制电压 $V(t)$ 之

间的关系

$$T_w = R \cdot C_{ext} \cdot \ln \left[\frac{V(t) - V_{OL}}{V(t) - V_T} \right] \quad (7)$$

$$V(t) = V_{CC} - [V_{CC} - V_0 \sin \omega_0 t \cdot$$

$$R_{ext} / (R_M + R_{ext})] \quad (8)$$

$$R = R_M / R_{ext} \quad (9)$$

经过多次试验后确定 $R_{ext} = 1K$, $R_M = 10K$, $C_{ext} = 4700PF$, $V_{CC} = +5V$, 输出低电平 $V_{OL} = 0.35V$, 阈值电平 $V_T = 2.03V$, 于是得到了输出脉宽 T_w 的近似表达式

$$T_w \approx 2.07 [1 - 0.03 V_0 \sin \omega_0 t] \quad (10)$$

3) 参考振荡器电路

作为低频调制频率的参考振荡器采用正交振荡器的形式。设计频率 $f_0 = 360Hz$ 以避免50Hz工频。取 $C_0 = 0.01\mu F$, 则 $R_0 = 1/2 \pi f_0 C_0 = 47k\Omega$ 。输出波形 $V_1 = A \cos \omega_0 t$, $V_2 = V_3 = A \sin \omega_0 t$ 。

4) 解调器电路

回波信号的解调电路由低通滤波器组成。由两个二阶滤波器构成一个四阶滤波器。单级滤波器的传递函数

$$H(p) = \frac{-\frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3}}{P^2 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \frac{P}{C_2} + \frac{1}{R_3 R_4 C_2 C_3}} \quad (11)$$

与典型的二级低通滤波器的传递函数相比较

$$H(P) = \frac{H_0 \omega_0^2}{P^2 + \frac{\omega_0}{Q} P + \omega_0^2} \quad (12)$$

于是得到角频率 ω_0 ，通常增益 H_0 和选择性因子 Q 的表达式

$$\omega_0 = \left(\frac{1}{R_3 R_4 C_2 C_3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$H_0 = -R_4 / R_2 \quad (14)$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{C_3}{C_2}} \left(\sqrt{\frac{R_4}{R_3}} + \sqrt{\frac{R_3}{R_4}} + \sqrt{\frac{R_3 R_4}{R_2}} \right) \quad (15)$$

我们设计 $f_0 = 500\text{Hz}$ ， $H_0 = 140\text{dB}$ ，具体性

能见指标表1，

表1 两级二阶低通滤波器的技术性能表

技术参数	第一级	第二级
$f_0(\text{Hz})$	384.2	543.3
$H_0(\text{倍})$	-5128	-2564
Q	0.172	0.286

5. 压控振荡器电路

我们设计了用CC4023B构成的压控振荡器控制电压由F007运算放大器输入(图3)。用瞬时频率 $f_V(t)$ 与控制电压 $V_0(t)$

之间的关系来表征压控振荡器的特性

$$f_V(t) = f_0(t) + k_0 V_C(t) \quad (16)$$

式中 f_0 是当控制电压 $V_0(t) = 0$ 时的固有频率， k_0 为压频率。实则当 $f_0 = 60\text{KHz}$ 时， $K_0 = 800\text{KHz/V}$ ，该振荡器的上限压控频率 $f_{V_{max}} = 250\text{KHz}$ ，下限压控频率 $f_{V_{min}} = 7\text{KHz}$ ，频率稳定度 $\sigma = 8.6 \times 10^{-5}$ 。

四、测试实例

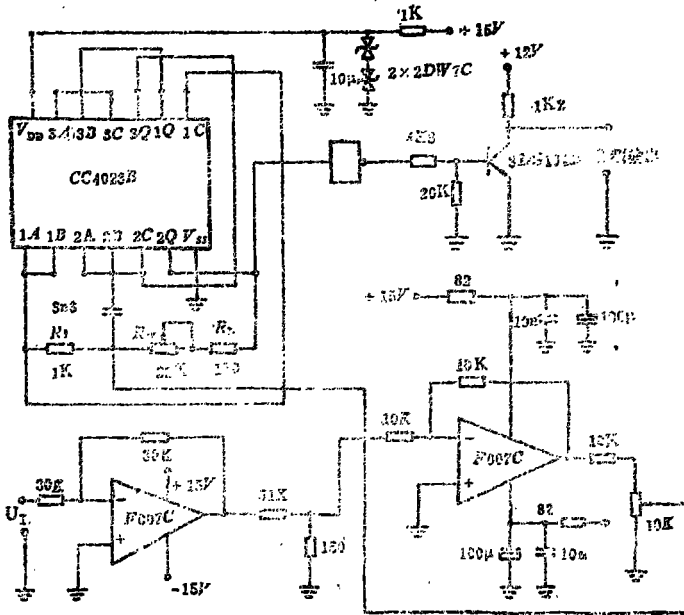


图3 压控振荡器电路

用本装置测量了FO5超声延迟线材料的声时温度系数。试样由上海新沪玻璃厂提供，这种材料被上无一厂和上无二十八厂制成多重反射体波延迟线。试样的端面平行度优于0.021毫米，声程长度为39.18毫米(20℃)，截面积为19×18毫米²。

在测量材料的纵波声速时，采用x切割石英晶片，耦合剂为英国产的MIDLAND硅油。在测量材料的横波声速时，采用y切割石英晶片，耦合剂为上海益民一厂产的蜂蜜。两种石英晶片的电极半径均为a=6.5毫米，谐振频率为f₀=5MHz。在测量过程中，试样被置于501型超级恒温器中，先升温半

小时，再恒温1小时，恒温器的恒温精度为0.1℃。本测量装置能够自动地跟踪声时的微小变化，测量结果说明，FO5超声延迟线玻璃的纵波声时温度系数 $\beta_L = -3.30 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，横波声时温度系数 $\beta_T = -4.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。声时温度系数包含了线胀系数和声速温度系数两项内容。与此同时，我们还测量了这一脉冲透加法声速测量装置的自身稳定度，测量时间为1小时，测量结果见图4。实测仪器的稳定度优于 $\pm 2 \times 10^{-7}$ 。

本工作得到我所谭金星等同志的大力帮助，在此表示感谢。

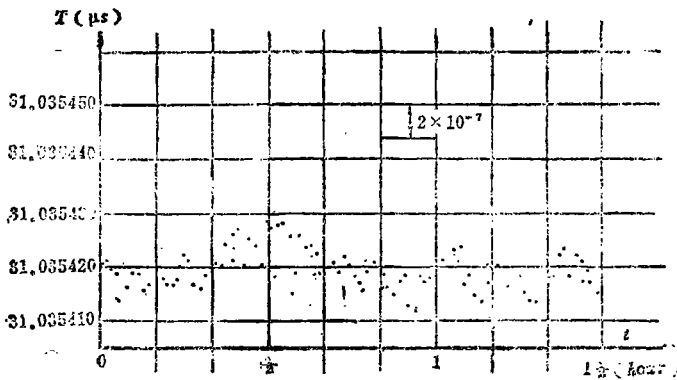


图4 脉冲透加法装置的稳定度

参 考 文 献

- (1) H.J.Meskimin(1961) J.A.S.A. 33 (12-16)
 (2) H.J.Meskimin(1965) J.A.S.A. 37 (864-871)
 (3) H.J.Meskimin(1969) J.A.S. A.41 (1052-1057)
 (4) J.E.Holder (1970) Rev.Sci Instrum.41 1355-1356

(上接第45页)

委员会领导下进行的。这里尤需指出的是：大会所取得的巨大成绩还与中科院声学所许多同志全力以赴地忙碌了半年的功劳分不开的。

中国科协国际会议中心的精心安排和热

情服务，博得中外代表的一致好评。

下届会议inter-noise将于1988年8月在法国名胜城市Avignon举行。

(王季卿)。