# PS-1 型精密超声声速测试仪

陆玲珍　吴贵玉
（中国科技大学声学教研室）

根据脉冲回波叠加(pulse superposition)原理，本文叙述一种其发射脉冲重复周期受低频调制的精密超声声速测试仪，它是自动声速测试系统中的主机部分。该仪器主要用于测量超声波在材料中的传播速度受外界条件的变化(如温度、压力等)而发生的微小变化。文中对E-01等延迟玻璃中超声纵波的传播时间及其温度系数进行了测量，表明该仪器的灵敏度为1ns。

## 一、引　　言

精密测量超声波在材料中的传播速度，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Si、Ge、熔石英、钯一硅一银非晶态合金材料等）随外界条件的变化(例如温度、压力、磁场等)而发生的微小变化，从而可以研究物质微观结构变化。因此精密测量声速的方法及其专用测量设备，在固体物理、材料科学的研究中有着广泛的应用。

精密测量固体中超声波传播的速度及其微小的变化，通常采用脉冲回波重合法[1]，和脉冲回波叠加法[2~4]，这两种方法的共同特点是测量精度较高，尤其后者能实现声速的自动测量。

该仪器将发射、接收、调频、检相回路、显示电路都组装在一个机箱内，成为一个完整的仪器，这样使得操作简单，使用方便，减少了一些不必要的连线，因而性能也较稳定可靠，该仪器能在手控状态下逐点进行测量，如改用可编程频率综合代作为主控信号，并加上适当的接口电路，即能构成自动测试系统，对于连续测量和记录，具有重要意义。

## 二、测量原理及仪器方框简介

如图1所示的测试组合，在换能器上加一个射频脉冲，压电换能器经过耦合剂向试样发射超声射频脉冲，此时在试样两平行面之间产生如图2中的一系列回波$V_1$、$V_2$、$V_3$。

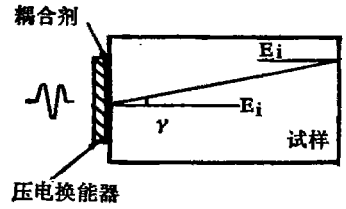


图1　测试组合

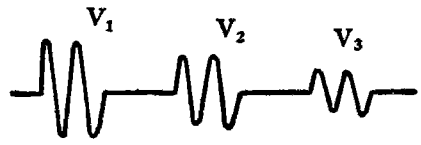


图2　回　波　列

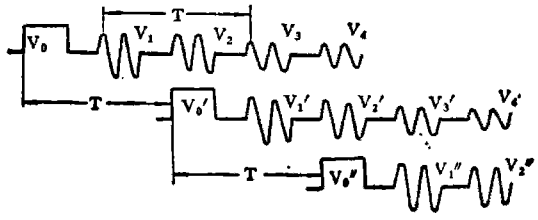


图3　试样中的回波

当射频脉冲的重复周期等于超声脉冲在试样中传播一周所需时间的两倍时($P=2$ 时)，样品中将产生如图 3 所示的各次发射的一系列回波的叠加，当满足同相条件时，在换能器上各相应回波所叠加的幅度达到最大。图4(*a*)中的照片为发射脉冲和回波叠加脉冲。图4(*b*)如采用了门信号，只让回波叠加的脉冲信号通过，示波管上只显示出回波叠加脉冲[3]，回波叠加脉冲的振幅和发射重复频率 $f$ 有关，当改变发射重复频率使同时到达换能器的各次回波的相位恰好同相时，各次回波

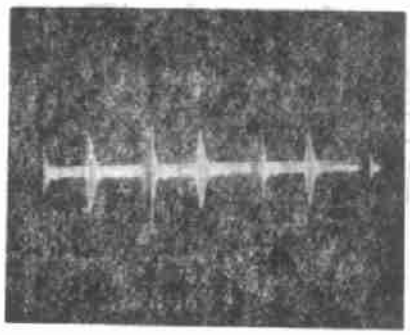

图 4 (*a*) 发射脉冲与回波叠加脉冲

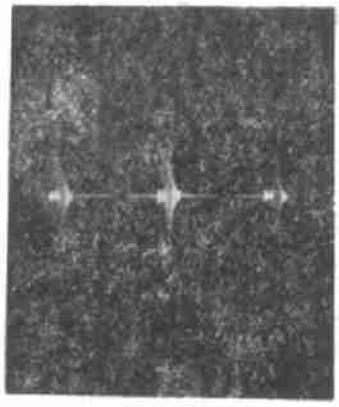

图 4 (*b*) 回波叠加脉冲

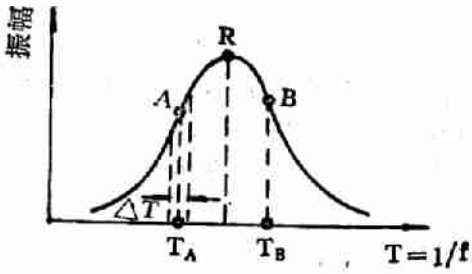


图 4 (*c*) "共振"曲线

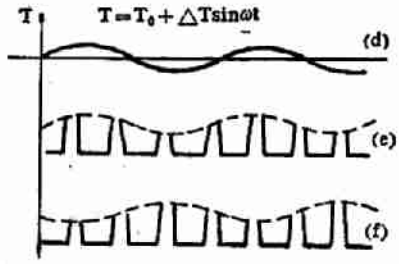


图4(*d*,*e*,*f*) 回波叠加信号及其包络曲线

就直接相加，振幅最大，高于或低于这个频率，叠加信号幅度就降低。上述情况可由图4(*c*)中的"共振"曲线表示。若用一个低频信号调制发射脉冲的重复频率，使发射周期在基本周期的附近，以$T=T_0+\Delta T\sin\omega t$形式周期性地变化，(见图4(*d*))，如果基本周期$T_0$相应于图 4(*c*) 中的 $T_A$ 点，则回波叠加信号及其包络曲线如图 4(*e*)所示，如果基本周期 $T_0$ 相应于 $T_B$，则可得到图 4(*f*)所示的图形。用包络检出电路检出回波叠加信号的包络，即低频调制信号。在"共振"频率时，包络线近似为直线。发射重复频率高于或低于"共振"频率时，包络线的幅度增大而且相位恰好相反，这些相位相反现象可用相敏检波电路转换成不同极性的电平，用电表指示来表示。正是利用这些现象，可以精确地调节脉冲发射的重复频率达到"共振"这时的发射脉冲重复周期，就是超声波在试样中传播往返两次(一周)所需的时间，偏离于这个"共振"频率时相敏检波电路的输出电平，即是实现声速自动测试中的控制量。

**1. 仪器方框图简介**

图 5 为仪器方框图，主控信号源和频率计是测试系统的外接仪器。本系统中采用自制的 PZS-1型频率综合仪[1]，因此可以保证主控信号的频率稳定度。其它所有方框组装在一个机箱内，其中扫描电路，$Z$ 放大器、显示电路都是一般通用示波器中常见电路，故从略。

1) 射频脉冲发射电路：

此电路由整形延迟、门控和射频脉冲发

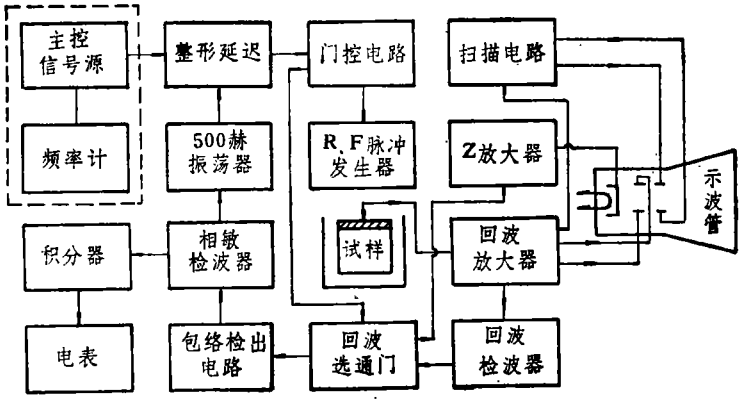


图5 仪器方框图

生器三部分组成，图6是其电路原理图。BG2-1～2组成司密脱触发器，来自频率综合仪的主控信号与来自500赫正弦波振荡器讯号经由跟随器同时加在司密脱触发器的输入端。由于低频正弦信号的存在，使司密脱触发器的翻转时间随低频信号的频率而变，因而其整形后的输出

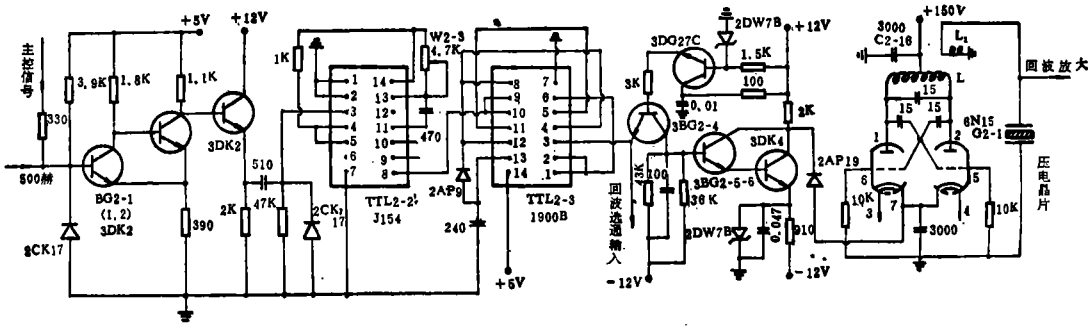


图6 射频脉冲发射电路原理图

方波的重复频率受低频信号调制。TTL2-2是单稳触发器，使BG2-3的输出得到适当的延迟。TTL2-3是用与非门组成脉冲的取沿电路，它截取输入方波的前沿，从而获得宽度为1μs左右的矩形窄脉冲，此脉冲即作为门控信号加到由BG2-4、BG2-5、BG2-6组成门控电路。当没有正脉冲时，TTL2-3输出低电平，BG2-4导通，BG2-5、BG2-6截止，输出为高电平。当有正向窄脉冲到达时，TTL2-3输出高电平，BG2-4截止，BG2-5、BG2-6导通。由于它们的发射极接至－12V电源，所以BG2-5、BG2-6导通时的集电极的输出电平为负电平。G2-1为一双三极管，它组成推挽式振荡器。由于G2-1的阴极连接到BG2-5～6的集电极，所以当这两个晶体管截止期间，输出高电平时，G2-1板流无法流通不能起振。在BG2-5～6导通期间输出低电平时，G2-1的板流流通，振荡器起振，产生宽度约2μs的射频脉冲，经由耦合线圈输至换能器，射频振荡频率由L和C2-12决定。

2）回波放大器

图7是回波放大器的电原理图。集成运放XFG-79用作宽带前置放大器，二极管D4-1、D4-2用于单换能器自发自收工作状态时保护运放不受强发射脉冲的损坏。XFG-79的对称输出送到由二级差分放大器组成主放大器，它将发射脉冲连同由换能器接收到的回波脉冲放大后加至示波管的Y偏转板上。调节W4-1可以改变示波管显示波形的幅度，放大器的一路输出经由C4-17耦合到检波二极管D4-5，它将射频脉冲检波成为视频脉冲，但这些视频脉冲中既有回波脉冲，还有不需要的发射脉冲，因此要利用回波选通门，选出所需的回波脉冲，抑制发射脉冲。

3）回波选通门和包络检出电路

回波选通门电路包括模拟开关和控制信号产生电路，图2-8是其电路原理图。CMOS3-1是模拟开关，检波后的视频脉冲加在它

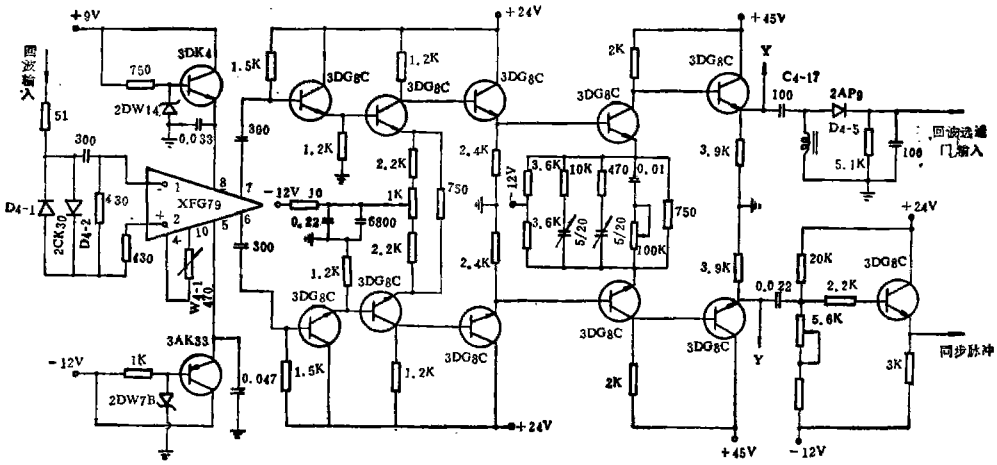


图7 回波放大与检波电路图

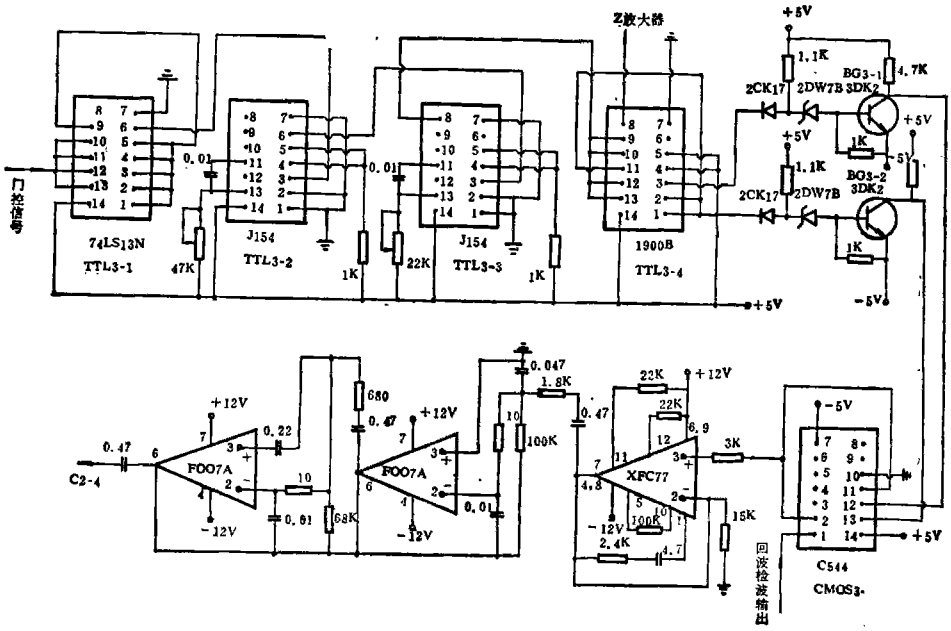


图8 回波选通门及包络检出电路图

的输入端，只有当加在开关控制端上的信号电平为正时，开关闭合，输入端上的信号通过开关出现在输出端上，所以选取控制信号出现的时间可将所需的回波脉冲选出，并将发射脉冲抑制。产生控制信号的电路由TTL 3-1、TTL3-2、TTL3-3、TTL3-4和BG3-1、BG3-2组成，来自发射门控电路的门控信号，由TTL3-1整形后，触发单稳触发器TTL3-2，其输出再去触发另一个单稳触发器TTL3-3，它们的作用是调节控制信号的延迟时间和信号宽度，以保证在测量传播时间不同的试样时能正确地选通回波脉冲，TTL3-4用来产生两个极性相反的门控信号，再由BG3-1、BG 3-2作电平变换后加到CMOS3-1的控制端。

回波选通门的输出信号是一列回波脉冲，由于射频脉冲的重复频率受500赫正弦信号调制，所以根据上述“共振”原理，回波叠加脉冲列的幅度是受500赫正弦波调制的，

即回波叠加脉冲列的包络是 500 赫正弦波。XFC-77是跟随器，其输出加到二级串接的低通滤波器，滤去高频成份后，在输出端得到500赫正弦信号，此正弦信号与调制射频脉冲的正弦信号的相位差代表不同的叠加情况。

4) 相敏检波器

相敏检波器由 500 赫振荡器(F2-1)、运放 F2-2 F2-3 和与非门 TTL2-1 和模拟开关 CMOS2-1 组成，F2-2 为移相器，能改变参考信号的相位，提高检波效率，F2-3 为过另比较器，产生参考信号，TTL2-1 将参考信号转变成二个极性相反的信号，控制相敏检波器的 CMOS2-1，检波后的输出经由积分器(F2-4)接至另点在中间的直流电压表，电表的指示表示不同的相位差，图 9 是其电路原理图。

相敏检波器的输出经积分器 F2-4 积分后，能用不同的直流电平表示参考信号与输入信号的相位差，操作者可以根据电表指示判断正确同相叠加。如通过适当的接口电路，将此电平变化信息反馈至可编程频率综合仪，即可使整个测量系统实现自动化。

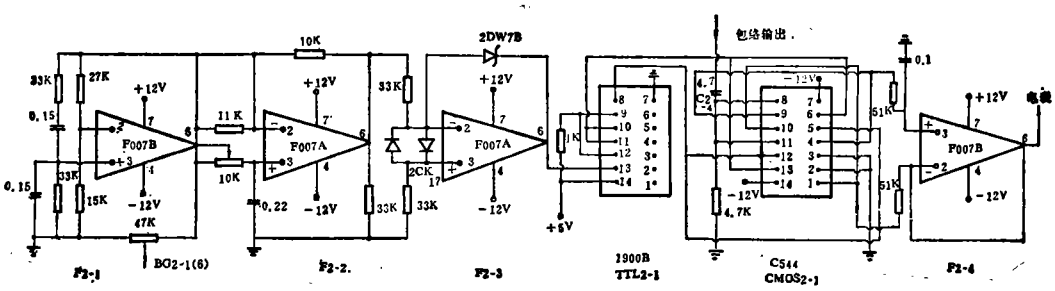


图 9 相敏检波电路图

5) 电源部分

该仪器的电源包括直流稳压电源 +150 V、+45V、+24V、±12V、+5V。示波管供电由高频(约 22KHz)振荡器产生，升压后分三路高压整流输出 +10KV、-1000V 和 -1150V 及交流～6.3V。这些电路均为一般通用示波器中电路，不再重复。

## 三、测试方法及测试实例

用本仪器对 E-01超声延迟线材料(上海新沪玻璃厂生产) 测量了超声纵波的传播时间(声程为 3.099×2cm)，用 X-切割石英晶片作换能器，工作频率为 11.348 兆赫，用硅油与试样耦合。根据测试原理，在换能器的共振频率 $f_R$ 和 $f_L=0.9f_R$的频率上进行两次测量，当满足同相叠加条件时，相敏检波器的输出为0，记下电表指示为 0 时的相应的主控信号的频率，再算出试样中超声波传播时

表 3-1 E-01 中超声纵波传播时间测试数据

| P=2 | | | P=3 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | $T_R/2$ μs | $\Delta T$ μs | $n$ | $T_R/3$ μs | $\Delta T$ μs |
| -1 | 14.830 | -0.011 | -1 | 14.848 | -0.014 |
| 0 | 14.877 | -0.007 | 0 | 14.878 | -0.012 |
| +1 | 14.924 | -0.004 | +1 | 14.908 | -0.007 |
| +2 | 14.971 | 0 | +2 | 14.940 | -0.002 |
| +3 | 15.016 | +0.005 | +3 | 14.971 | 0 |
| +4 | 15.064 | +0.008 | +4 | 15.002 | +0.004 |

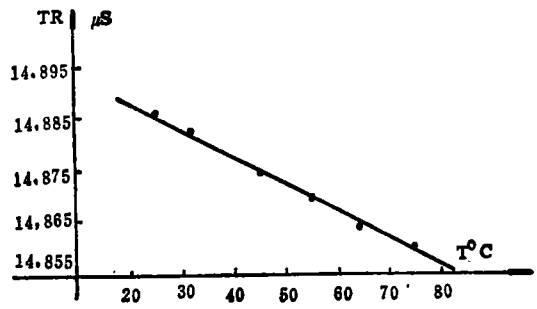


图 10 E-01的声时温度测试曲线

(下转第49页)

# 第十一届国际声学会议观感

魏墨盦
(同济大学)

第11届国际声学会议包括主会(1983年7月18日至27日在巴黎召开)和两个卫星会议(7月15日至16日分别在里昂和都鲁斯召开)。教育部组成由本人为团长的三人代表团参加会议。7月13日到法国后，应特邀参加了以"振动结构的声辐射"为主题的里昂卫星会议，然后参加巴黎的主会。会议前后和会议期间还参观了里昂、巴黎和波尔多三个地区的十余个高校和科研单位，并与有关学者进行了联系、交流和讨论。

里昂会议参加者约二百余人，我国仅本团三人参加。巴黎主会则规模极大，论文近千篇，参加者约一千一百人，来自四十多个国家。会议有综合报告，专题圆桌会议和分成十大组的论文宣读，尚有不少论文举行版面展出，还组织各种技术参观、书报仪器展览等。我国参加主会共20人，提出论文二十余篇。我团三人共宣读论文五篇，本人还应邀主持了第一、二大组的四次会议。

从会议论文可以看到当前声学研究的动向。(1)能反映近年来生产或生活上迫切需要的，例如降噪隔振研究等，发展就特别迅速。(2)信号处理技术在声学各个领域的应用已普遍受到重视。(3)声学与其他学科的交叉处(如声电、光声、声光、光纤维声传感器等)是探索研究者最感兴趣的。而声学基础研究则仍是声学界共同关心的问题。

结合会外参观讨论情况，可以认为我国在声学理论分析和声学测量方法等方面的研究大体可与国际水平相当。但在实验装备特别是信号处理手段方面则差距颇大，这一点值得国内各方面领导同志重视，要努力急起直追。此外，法国理科四年制大学毕业后，正常情况下，再需三年便能得到博士学位，在人才培养的时间上比我国为短，似亦值得我们参考。法国在研究机构的设置上也灵活多变，亦有其优点。

这次会议的东道主是法语声学专家学会，对我团的态度很友好，礼遇较优厚，在经济上和技术参观的安排上都给我团不少方便。此次会议使中法声学工作者间的联系和友谊得到了进一步加强。

(上接第48页)

间 $T_R$ 及 $T_L$，又令 $\Delta_T=T_L-T_R$，测试数据列入表3-1中，其中 $P$ 为回波脉冲传播次数，$n$ 为整数，$n=0$ 为正确叠加，$-n$ 为超前叠加，$+n$ 为泄后叠加。根据 McSkimin[2] 判断正确叠加的方法，选择 $n=0$ 时真正传播时间。图3-1为 E-01 的声时温度测试曲线。

## 参 考 文 献

[1] 吴贵玉、陆玲珍、钟德元、张国柱："PEO 型精密超声声速测试仪"。〈应用声学〉，No4,1983，待发表。

[2] McSkimin, H. J., "Pulse superposition method for measuring ultrasonic wave velocities in solids" J. A. S. A. 33, No.1, (1961), 12-16.

[3] McSkimin, H. J., "Variations of the ultrasonic pulse-superposition method for increasing the sensitivity of delay-time measurements", J. A. S. A. 37, No.5, (1965), 864-871.

[4] Yogurtcu, Y. K..... "An apparatus for high precision measuremenets of ultrasonic wave velocity Ultrasonic" 18, No.4. (1980) 155-159.