

# 超声波速度的精密测量理论及其应用

王寅观

(同济大学声学研究所)

## 一、引言

超声波在媒质中的传播速度是一个重要的物理量。在各种声速测量方法中,脉冲回波重合法(PEO)<sup>[1]</sup>测量声速绝对值的精度较高,因而受到重视,已成为实验室中测量材料的声速和弹性常数的标准方法<sup>[2-5]</sup>。我们采用脉冲回波重合法制成的TA—060型超声波速度测量仪<sup>[6]</sup>,测量精密优于万分之二,还能够测出材料由于受外界各种因素引起的声速微小变化(例如高温,低温,高压,电磁场,应力,硬度等)。脉冲回波重合法测量声速的精度较高,是因为它可能实现精确的衍射修正,耦合层修正,以及取得较长的

量的影响将更明显,测量误差也会进一步降低。

G\*对于PZT换能器,由于其表面的粗糙不平会造成声波的漫散射以及材料的不均匀性将使其声波辐射形式与活塞辐射有一定的差异。因此我们建议,在固体衰减测量中,尽量使用石英换能器,在低衰减材料的超声检测中,这点尤其应加以重视。

## 参考文献

- [1] W.P.Mason 《Physical Acoustics》 Vol. XI P152~212 Academic Press (1975)
- [2] I.D.Calder “Calculation of the effect of nonparallelism on measu-

声程。

本文叙述了用于超声波速度精密测量的理论,并应用这一理论,对钢试样的纵波声速的绝对值进行了实验测量。

## 二、实验装置

测量装置的方框图如图1所示。虚线框内的各部分组成TA—060型超声波速度测量仪,频率计和示波器为通用设备。该装置的工作频率为5MHz。由于该系统是利用通用示波器的触发扫描单元来实现回波重合,所以测量时调整方便,水平扫描的线性良好。详细的工作原理参见文献<sup>[6]</sup>。

rement of ultrasonic attenuation and velocity” J. A. S. A. Vol. 63, No. 3 P967~973

- [3] Shung-Lien Chuang “Acoustic wave scattering from a fluid-solid periodic rough surface” J. A. S. A. Vol. 71, No. 6 P1368~1374
- [4] 徐晓群等“温度场对衰减精密测试的影响”《声学技术》 Vol. 5, No. 3.
- [5] 吴万春、梁昌洪《微波网络及其应用》国防工业出版社(1980)
- [6] P.M. 莫尔斯、K.V. 英格特著《理论声学》吕如榆、杨训仁译 科学出版社(1984)

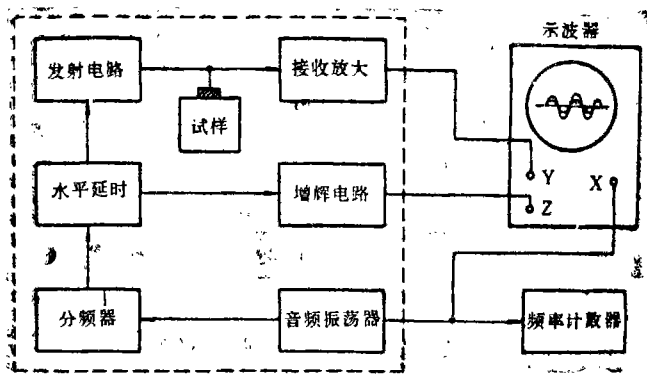


图1 脉冲回波重合法测量系统

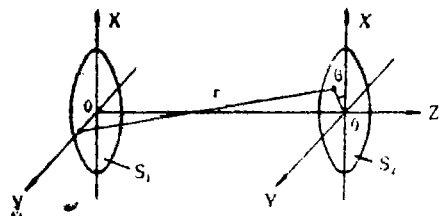


图2 超声测量系数示意图

### 三、衍射修正的计算

在使用压电换能器的脉冲回波重合法测量系统中，计算声速时使用衍射修正理论。通常假设声波发射面的振速均匀分布，收到的声信号相应于接收换能器表面的平均声压在整个电极面上的平均值<sup>[7,8]</sup>。超声回波测量系统可用图2表示，发射和接收换能器

都是半径为a的图片，彼此平行共轴，相隔距离为Z。考虑到声场的对称性，以发射换能器中心为坐标原点，Z轴为对称轴，设发射面的振速是均匀的，且为

$$u = u_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

式中 $\omega$ 为振动角频率， $u_0$ 为振速振幅。当被测试样各向同性且其横向尺寸比换能器直径足够大时，接收换能器上的平均声压可表示为

$$\bar{P} = \rho c u_0 e^{j(\omega t - kz)} - \frac{4\rho c u_0 e^{j\omega t}}{\pi} \int_0^{\pi/2} e^{-jk\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta}} \sin^2 \theta d\theta \quad (2)$$

而在理想平面波的情况下，接收换能器上的平均声压为

$$P_0 = \rho c u_0 e^{j(\omega t - KZ)} \quad (3)$$

两者之比为

$$\frac{\bar{P}}{P_0} = 1 - \frac{4}{\pi} e^{jkz} \int_0^{\pi/2} e^{-jk\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta}} \sin^2 \theta d\theta = A + jB \quad (4)$$

$$\text{其中 } A = 1 - \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\pi/2} \cos k\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta} \sin^2 \theta d\theta \cdot \cos kz + \int_0^{\pi/2} \sin k\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta} \sin^2 \theta d\theta \cdot \sin kz \right] \quad (5)$$

$$B = \frac{4}{\pi} \left[ \int_0^{\pi/2} \sin k\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta} \sin^2 \theta d\theta \cdot \cos kz - \int_0^{\pi/2} \cos k\sqrt{Z^2 + 4a^2 \cos^2 \theta} \sin^2 \theta d\theta \cdot \sin kz \right] \quad (6)$$

由式(4)可求得由于衍射引起的接收信号的相位偏移。接收信号比理想的平面波信号超

前了相位 $\varphi$ ,

$$\varphi = \arctg(B/A) \quad (7)$$

以归一化距离  $S = Z\lambda/a^2$  为变量, 对参数  $ka$  的几个不同的数值, 作了衍射相移的数值计算, 本文将最常用的计算结果列于表1, 用表

1数据可对超声测量系统的测试值作衍射修正。

设两个被测回波距声源的距离分别为  $S^1$

表1 使用压电换能器时的衍射相位超前量  $\varphi$  (单位: rad)

S	Ka			S	Ka		
	30	60	100		30	60	100
0.05	0.0584	0.0523	0.0538	1.60	0.3522	0.3553	0.3560
0.10	0.0819	0.0753	0.0765	1.70	0.3539	0.3560	0.3566
0.15	0.0991	0.0956	0.0962	1.80	0.3611	0.3617	0.3620
0.20	0.1084	0.1094	0.1097	1.90	0.3725	0.3727	0.3728
0.25	0.1291	0.1243	0.1275	2.00	0.3890	0.3884	0.3884
0.30	0.1380	0.1366	0.1398	2.10	0.4089	0.4089	0.4077
0.35	0.1572	0.1505	0.1547	2.20	0.4315	0.4302	0.4298
0.40	0.1581	0.1673	0.1625	2.30	0.4558	0.4541	0.4538
0.45	0.1793	0.1714	0.1751	2.40	0.4812	0.4792	0.4788
0.50	0.1920	0.1862	0.1828	2.50	0.5068	0.5049	0.5045
0.55	0.1909	0.2022	0.2024	2.60	0.5326	0.5307	0.5304
0.60	0.1991	0.2016	0.2041	2.70	0.5582	0.5564	0.5559
0.65	0.2186	0.2093	0.2084	2.80	0.5833	0.5815	0.5812
0.70	0.2370	0.2287	0.2264	2.90	0.6079	0.6053	0.6057
0.75	0.2453	0.2455	0.2446	3.00	0.6318	0.6302	0.6298
0.80	0.2455	0.2521	0.2535	3.50	0.7399	0.7384	0.7384
0.85	0.2443	0.2514	0.2531	4.00	0.8295	0.8286	0.8283
0.90	0.2474	0.2510	0.2521	4.50	0.9033	0.9028	0.9025
0.95	0.2567	0.2555	0.2560	5.00	0.9649	0.9641	0.9640
1.00	0.2712	0.2668	0.2663	5.50	1.0164	1.0156	1.0157
1.05	0.2883	0.2825	0.2814	6.00	1.0601	1.0599	1.0595
1.10	0.3061	0.2999	0.2986	6.50	1.0974	1.0792	1.0791
1.15	0.3215	0.3167	0.3156	7.00	1.1299	1.1298	1.1298
1.20	0.3345	0.3314	0.3305	7.50	1.1584	1.1583	1.1583
1.25	0.3443	0.3427	0.3422	8.00	1.1835	1.1833	1.1834
1.30	0.3505	0.3508	0.3507	8.50	1.2057	1.2056	1.2055
1.35	0.3542	0.3555	0.3557	9.00	1.2255	1.2254	1.2254
1.40	0.3554	0.3578	0.3582	9.50	1.2433	1.2430	1.2432
1.50	0.3539	0.3573	0.3579	10.00	1.2594	1.2593	1.2593

$S(Ka > 10)$	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi(\text{rad})$	1.4145	1.4667	1.4930	1.5091	1.5198	1.5274	1.5334	1.5379	1.5416

和 $S_2$ ，由表1查得对应的衍射相位偏移值为 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ，则声时衍射修正量

$$T_D = (\varphi_2 - \varphi_1) / 2\pi f p \quad (8)$$

式中 $p$ 为声波往返次数， $f$ 为声波频率

#### 四、耦合层修正的计算

设在试样来回反射的回波是一束单频的超声波。试样的一端悬空，另一端粘结有换能器。换能器在共振时，厚度是半个波长，其粘结层只有有限的厚度。换能器无背衬。图3表明换能器通过耦合层与试样的联系。图4定义了与反射波和入射波相位有关的相角 $\gamma_1$ (即反射相移)。

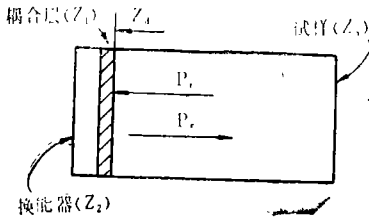


图3 换能器与试样的耦合

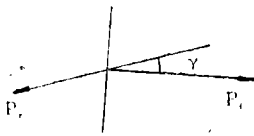


图4 声波的反射相移

耦合层与压电换能器的厚度，特征声阻抗和波数分别为 $l_1, Z_1, K_1$ 和 $l_2, Z_2, K_2$ 。试样的声阻抗为 $Z_s$ 。由传输线理论得到

$$Z_d = jZ_s = jZ_1 \left[ \frac{(Z_1/Z_2) \operatorname{tg} k_1 l_1 + \operatorname{tg} k_2 l_2}{(Z_1/Z_2) - \operatorname{tg} k_1 l_1 \cdot \operatorname{tg} k_2 l_2} \right] \quad (9)$$

入射波与反射波的声压之比

$$P_r/P_i = (Z_d - Z_s) / (Z_d + Z_s) \quad (10)$$

由于 $Z_d$ 是虚数，于是得到反射相移

$$\gamma = -\operatorname{arctg} [ZZ_s Z_s / (Z_s^2 - Z_s^2)] \quad (11)$$

在上述公式中，实际上只有一个未知量(耦合层厚度 $l_1$ )和一个游动变量(超声频率

$f$ )。通过改变 $f$ ，我们将变化 $K_1$ 和 $K_2$ ，其中 $K_1$ 和 $K_2$ 分别是 $2\pi f/C_1$ 和 $2\pi f/C_2$ 。

我们测得的声时 $T_M$ 是由真正的声时 $T$ 和某些增量组成的：

$$T_M = PT - (P\gamma/2\pi f) + (n/f) \quad (12)$$

式中 $p$ 是测量过程中声波往返的次数， $n$ 是两次回波重合时射频周期的失配数。

令 $f_R$ 为换能器的共振频率， $f_L = 0.9f_R$ ，在几个可能正确重合的周期上测得一系列的 $T_R$ 和 $T_L$ 值

$$T_R = pT - (p\gamma_R/2\pi f_R) + (n/f_R) \quad (13)$$

$$T_L = pT - (p\gamma_L/2\pi f_L) + (n/f_L) \quad (14)$$

$$\Delta T = T_L - T_R = (n - p\gamma_L/2\pi)/f_L - (n - p\gamma_R/2\pi)/f_R \quad (15)$$

式中， $\gamma_R$ 和 $\gamma_L$ 分别表示当射频频率为 $f_R$ 和 $f_L$ 时耦合层所引起的反射相移。通过计算得到 $\Delta T$ 与 $k_1 l_1$ 的关系曲线和 $\gamma_R, \gamma_L$ 与 $k_1 l_1$ 的关系曲线，再由 $\Delta T$ 的实验结果推得耦合层相移 $\gamma_R$ 。

#### 五、实验

使用本超声测量系统，对钢试样的声速进行精密测量。被测试样除了要求表面平整外，还要求表面有良好的平行度。试样选用的材料为45号钢，试样长度 $L = 0.02986$ 米(20°C)，端面平行度优于 $2 \times 10^{-5}$ 米。换能器为X切割石英晶片，耦合剂为硅油，各材料的密度和声阻抗见表2。

表2 几种材料的密度和声阻抗

材料名称	硅油	X切割石英	45号钢
参数			
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1070	2650	7840
声阻抗 $Z$ (10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> s)	1.47	15.11	46.58

利用公式(9)和(10)，计算得到压电换能器处于共振频率时的相移 $\gamma_R$ 和偏离共振频率时的相移 $\gamma_L$ ( $f_L = 0.9f_R$ )以耦合层厚度 $k_1 l_1$ 为自变量的关系曲线，如图5所示。利用公式

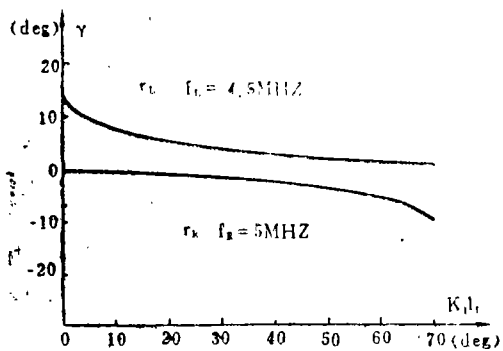


图5  $\gamma - k_1 l_1$  曲线

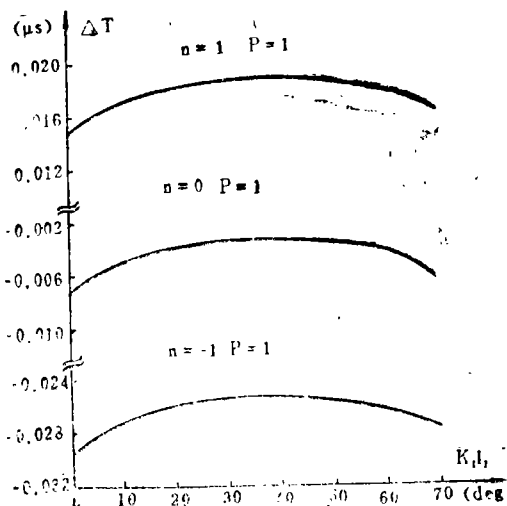


图6  $\Delta T - k_1 l_1$  曲线

(15), 计算得到压电换能器处于共振频率 $f_R$ 和偏离共振频率 $f_L$ 时, 声波在试样内的传播时间之差 $\Delta T$ 与耦合层厚度 $k_1 l_1$ 的关系曲线, 如图6所示。

测量时, 一面观察示波器的波形, 一面精确地微调超声测量仪内的音频振荡器的周期, 使两次回波的每一周期都正确重合, 这时与示波器X轴相联的数字频率计中所测得的音频振荡器的周期恰等于超声波在试样中往返一次的时间。在不同频率 $f_R$ 和 $f_L$ 的情况下, 用培辉脉冲逐一对准声波的第1, 2次回波, 第1, 3次回波, ……第q, p+q次回波, 调节扫描信号的周期, 使各对回波都正确重合(图7是回波正确重合的波形照片)。测量结果见表3。

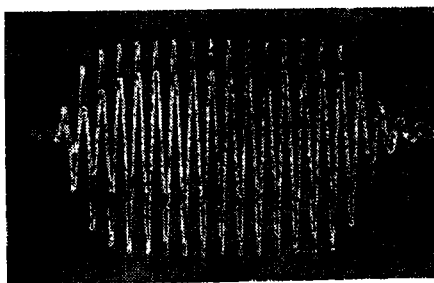


图7 回波正确重合的波形

表3. 45号钢纵波声速的测量结果

q	p+q	$T_R$ ( $\mu s$ )	$T_L$ ( $\mu s$ )	$\Delta T = T_L - T_R$ ( $\mu s$ )	$\varphi(S_{p+q})$ (rad)	$T_D \frac{\varphi(S_{p+q}) - \varphi(S_q)}{2\pi f_R \cdot p}$ ( $\mu s$ )	$T_{RD} = T_R + T_D$ ( $\mu s$ )
1	2	10.0338	10.0235	-0.0103	0.7141	0.0114	10.0452
1	3	10.0359	10.0269	-0.0090	0.9783	0.0099	10.0458
1	4	10.0377	10.0293	-0.0084	1.1060	0.0080	10.0457
1	5	10.0384	10.0334	-0.0050	1.2057	0.0068	10.0452
1	6	10.0407	10.0363	-0.0044	1.2594	0.0058	10.0465
1	7	10.0418	10.0399	-0.0019	1.3071	0.0051	10.0469
1	8	10.0437	10.0428	-0.0009	1.3400	0.0045	10.0482
1	9	10.0447	10.0442	-0.0005	1.3657	0.0040	10.0487
1	10	10.0454	10.0442	-0.0012	1.3862	0.0036	10.0490
1	11	10.0460	10.0435	-0.0025	1.4030	0.0033	10.0493
平均值		10.0408	10.0364	-0.0044	0.9323	0.0062	10.0471

表中  $ka = 34.4^\circ$ ,  $\varphi(s_1) = 0.3545(\text{rad})$ ,

由  $\overline{\Delta T} = -0.0044$  查图6的  $\Delta T - k_1 l_1$  曲线, 查得耦合层厚度  $k_1 l_1 = 12.5^\circ$ , 再由图5的  $\gamma - k_1 l_1$  曲线, 查得耦合层反射相移  $\gamma_R = -0.805^\circ$ , 于是真实声时为

$$T = \frac{\gamma_R}{2\pi f_R} + \overline{T}_R^D = 10.0467(\mu\text{s})$$

声速  $C = 2L/T = 5944(\text{米/秒})$ 。由表3可知, 整个实验的声速测量绝对误差为  $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。

## 六、结 论

1. 精密地测量媒质的超声波传播速度, 必须对由于声波衍射(即声束扩散)所引起的相位变化进行修正, 同时还必须对于耦合层所引起的反射相移进行修正。

2. 采用脉冲回波重合法的声速测量系统, 由于仪器的声波发射周期相隔很长, 即仪器的每一次发射, 都要等到上一次发射所产生的声波回波全部衰减完以后才发射下一次声脉冲, 两列声波之间不会产生相互干涉, 因此可以对测量结果进行精密的衍射修正和耦合层修正。修正后的测量结果, 可以认为是被测媒质的绝对声速。

3. 声波衍射所引起的声时差要比耦合层反射相移所引起的误差大一个数量级。因此, 在计算测量结果时, 衍射相移的影响不容忽视。在脉冲回波重合法声速测量系统中, 耦合层的影响往往可以忽略。

本工作得到魏墨鑫教授的热情指导, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] E. P. Papadakis, Rev. Sci. Instr., 47, (1976), 806
- [2] J. W. Williams and J. Lamd, J. A. S. A. 30, (1958), 308
- [3] H. J. Meskimen, J. A. S. A. 33, (1961), 12
- [4] J. E. May, IRE. Nat. Conv. Rec., (1958), 134
- [5] E. P. Papadakis, J. Appl. Phys. 35, (1964), 1474
- [6] 王寅观, 实验技术与管理, 3—2, (1986), 24
- [7] A. O. Williams, J. A. S. A. 23, (1951), 1
- [8] R. Bass, J. A. S. A. 30, (1958), 602

(上接第4页)

- [12] Mellen, R. H., Browning, D. G. and Simmons, V. P. J. Acoust. Soc. Am, 70(1981), 143.
- [13] 袁辛方, 蒋济良, 万世敏, 声学学报, 9—1(1984), 21.
- [14] Kibblewhite, A. C. and Hampton, L. D, J. Acoust. Soc. Am, 67(1980), 147.

(上接第12页)

- on fluid saturated porous structures: An experimental verification of Biot's slow wave in the quasistatic limit", J. Acoust. Soc. Am., 70(1), 116-121(1981)。
- [8] 乔文孝, 硕士研究生毕业论文 (1-988)