

控制超声测量用换能器首次波幅度比的方案

应崇福 李明轩 钟高琦 刘献铎 杨玉瑞

(中国科学院声学研究所)

1980年5月15日收到

提 要

超声可用于测量一些非声学特性。在这些应用中,需要准确测量超声波的渡越时间。为此,不应漏测接收信号到达时的前一两个波,这要求首波的幅度等于或大于次波的幅度。本文分析了发射和接收换能器的瞬态特性,包括双探头的和单探头的,从而证明,如果增加换能器背衬的声阻率,首次波幅度比可以从小于1加大到1或大于1。这是对轻负载讲的。如果负载相当重,首次波幅度比自动地比较大。

一、引 言

利用超声波在介质中传播时间的测量,可以测量材料、工件和工程的某些参量,例如,弹性模量、工件厚度、流体流速、岩体所受应力等,这是超声的一项重要应用。在这类测量中,接收换能器所输出的电压脉冲信号,其第一个波(首波)的幅度大小与下一个波(次波)的幅度大小之比(下面简称首次波幅度比),是影响测试精度的一个重要因素。为了防止测量时漏测前一两个波,从而错估传播时间,一般希望这个幅度比大,最好大于1。我们在研究厚度模压电换能器暂态特性^[1,2]的基础上,对这一问题作了一些分析。理论和实验证明,在轻负载情况下,通过适当选择换能器的背衬,可以控制输出电信号的首次波幅度比。

二、双探头穿透法

在超声传播时间测量中,通常采用的两种工作方式:一种是双探头穿透法;一种是单探头反射波。

先讨论双探头穿透法中的幅度比问题。

1. 发射换能器所辐射声信号的首次波幅度比

换能器发射声信号的波形,受到换能器背衬、负载和激励电源(波形和内阻)的影响。在 δ 脉冲电压激励(内阻为零)下,根据换能器表面换能的原理,声信号的声压为^[3]

$$p(t) = \frac{1}{2} \phi V_0 t_{TF} \left\{ \delta(t) - \sum_{n=1}^{\infty} (r_{TB} \cdot r_{TF})^{n-1} \left[t_{BT} \cdot \delta \cdot \right. \right.$$

$$\left(t + \frac{L}{c_T} - 2n \frac{L}{c_T} \right) + t_{FT} r_{TB} \delta \left(t - 2n \frac{L}{c_T} \right) \Bigg\} \Bigg\}, \quad (1)$$

式中 V_0 为 δ 脉冲电压的幅值; ϕ 为压电片的机电耦合系数; L 为压电片厚度; c_T 为压电片中的声速; 而 t_{TF} , r_{TF} , r_{TB} 分别为声波从压电片到负载的透射系数, 反射系数以及对背衬的反射系数; t_{BT} 和 t_{FT} 分别为声波从背衬和负载到压电片的透射系数. 从上述的 $p(t)$ 的表达式可得这时首次波幅度之比为

$$\alpha = \frac{p(0)}{p\left(\frac{2L}{c_T}\right)} = -\frac{1}{t_{FT} \cdot r_{TB}}. \quad (2)$$

α 与背衬声阻率 R_B 和负载声阻率 R_F 的关系如表 1 所示, 表 1 中 R_T 为压电片的声阻率.

表 1

α R_F	R_B	$> \frac{1}{3} R_T$	$\frac{1}{3} R_T$	$\frac{1}{7} R_T$	0
0		> 1	$= 1$	< 1	< 1
$\frac{1}{2} R_T$		> 1	> 1	$= 1$	< 1
R_T		> 1	> 1	> 1	$= 0$
$> R_T$		> 1	> 1	> 1	> 1

从表 1 中可见, 当背衬声阻率大于 $(1/3)R_T$ 时, 不论负载轻重如何, $\alpha > 1$, 即声信号第一个波的幅度总是大于第二个, 或者说声信号的前几个波是先大后小; 当负载声阻率大于压电片声阻率时, 不论背衬声阻率如何, 声信号也都是先大后小.

我们按照文献[3]的方法, 另推算了激励电压为正弦指数衰减脉冲

$$V(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, \\ V_0 e^{-\beta t} \sin \omega_0 t & t \geq 0 \end{cases}$$

时负载介质中的声压:

$$\begin{aligned} p(t) = & \frac{1}{2} \phi V_0 t_{TF} \left\{ e^{-\beta t} \sin \omega_0 t - \sum_{n=1}^{\infty} \left[(r_{TF} \cdot r_{TB})^{n-1} \right. \right. \\ & \cdot \left(t_{BT} e^{-\beta \left(t + \frac{L}{c_T} - 2n \frac{L}{c_T} \right)} \cdot \sin \omega_0 \left(t + \frac{L}{c_T} - 2n \frac{L}{c_T} \right) \right) \\ & \left. \left. + (t_{FT} \cdot r_{TB}) e^{-\beta \left(t - 2n \frac{L}{c_T} \right)} \cdot \sin \omega_0 \left(t - 2n \frac{L}{c_T} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

这时首次波幅度比为

$$\alpha = \frac{1}{e^{-2\beta \frac{L}{c_T}} + t_{BT} e^{-\beta \frac{L}{c_T}} - t_{FT} r_{TB}}. \quad (4)$$

若 $\beta \rightarrow \infty$, α 变为前面 δ 脉冲的结果. 若 $\beta \rightarrow 0$, 即激励电压为中途施加的正弦电压时, 这时如果 $t_{BT} > t_{FT} \cdot r_{TB}$, 则 $\alpha \leq 1$; 如果 $t_{BT} < t_{FT} \cdot r_{TB}$ (即要求 $R_B - R_F > 2R_T$), 则 $\alpha > 1$. 后一种情况对于压电陶瓷材料所制换能器在实际上是很难实现的, 故 $\beta \rightarrow 0$ 时通

常得不到先大后小的声信号。对于中间情况,比如采取 β 为 10^7 ,对厚度为0.87毫米、声速为4350米的PZT-5压电片,可算得 α 与 R_F 、 R_B 的关系(见表2)。从表2中可见,接近或大于压电片声阻率的负载,都要求具有接近于压电片声阻率的背衬,才可能得到先大后小的声波。

当用阶跃恒电压的脉冲来激励时,在大量具体计算中^[4]发现,在几乎所有背衬和负载的情况下,都会发射先大后小的声信号。由于篇幅关系,这里不准备举例。这个结论应当也可以用上述普遍的分析方法得出。

表 2

α R_F	R_B	$>0.90R_T$	$0.90R_T$	$0.80R_T$	$0.78R_T$
0		> 1	$= 1$	< 1	< 1
$\frac{1}{2}R_T$		> 1	> 1	$= 0$	< 1
R_T		> 1	> 1	> 1	$= 1$
$> R_T$		> 1	> 1	> 1	> 1

2. 接收换能器所输出电信号的首次波幅度比

如果接收换能器所收到的声信号是先小后大,原则上讲,这个换能器是不可能输出先大后小的电信号。因此,在双探头的工作方式中,只分析入射声信号是先大后小的情况。接收换能器所输出电信号的首次波幅度比,随背衬轻重而变化,下面将讨论水负载情况下的一个例子。

设有正弦指数衰减声脉冲入射,假定水中的接收换能器,其材料为PZT-5, $R_T = 33 \times 10^6$ 千克/(米²·秒),直径为20毫米,厚度为0.87毫米(相当于2.5兆赫频率)。采用文献[1]所用的理论分析和实验验证的方法,我们计算和测量了不同背衬声阻率时,换能器所输出的电压脉冲。图1给出入射的声压脉冲波形,图2给出 R_B 有改变时理论的电压脉冲波形,图3给出实测电压脉冲波形的两个例子。

根据图2,把首次波幅度比与背衬声阻率的关系综合画于图4,并把实验验证结果同时示于图中。比较图4中的理论和实验结果,基本相符。从图4中曲线可见,背衬声阻率越大,幅度比越大;当背衬声阻率 $R_B \approx 24 \times 10^6$ 千克/(米²·秒)时,首次波幅度比即达到1;背衬声阻率再大,电压脉冲信号就会先大后小。顺便指出,这里并没有附带考虑改变背衬声阻率时对波形其它因素的影响,比如对首波幅度的影响,而这个影响在图2中是明显的。另外,图3的实验波形中,最前面有负向的小波包出现,其原因尚不完全清楚,有待进一步探讨^[4]。

三、单探头反射法

对于又发又收的单探头,控制首次波幅度比的基本原理同一发一收的双探头相同,为

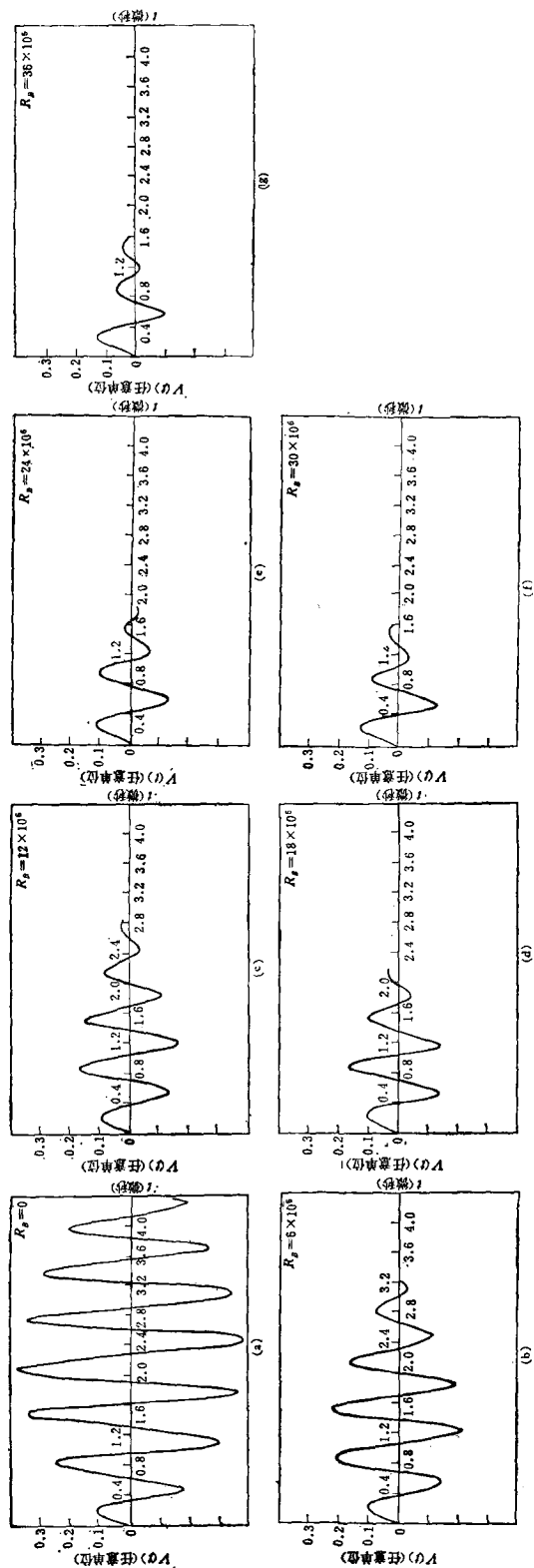


图 2 接收换能器所输出的电压脉冲波形随背衬声阻率 R_B 的变化(理论值) 入射声波波形如图 1, 传播介质为水

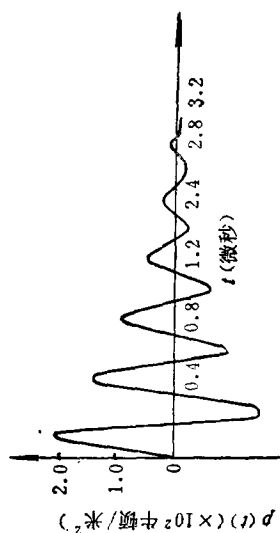
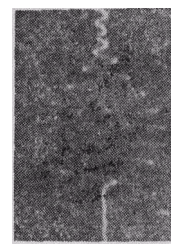
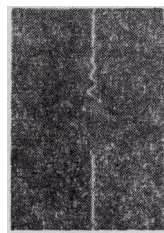


图 1 入射声脉冲的波形



(a) 背衬为空气, $R_B = 0$, 比较图 2(a)



(b) 背衬为铜, $R_B = 36 \times 10^4$ 千克/(米² · 秒), 比较图 2(g)

图 3 两个不同 R_B 时接收换能器所输出的电压脉冲波形(实验值)

得到定量的结果,我们同样沿用文献[1]的计算方法. 在文献[1]中计算和观察了这样一种情况: 将阶跃式电压加到换能器上,使换能器向水中辐射,然后让声波从水里的平行刚性界面反射回到换能器,再测量换能器输出的电信号. 假定压电片材料仍然是 PZT-5, 电源的电压为 200 伏,内阻为 100 欧,并忽略声波在水中的传播损耗. 计算所得首次波幅度比随背衬声阻率的变化关系如图 5 所示. 实测结果同时表现在图 5 中. 从图 5 可以看出,同双探头穿透法一样,当背衬声阻率逐渐加大时,首次波幅度比逐渐由小于 1 增大到大于 1. 在目前所讨论的特例中,在 $R_B = 9 \times 10^6$ 千克/米²·秒时,幅度比约为 1.

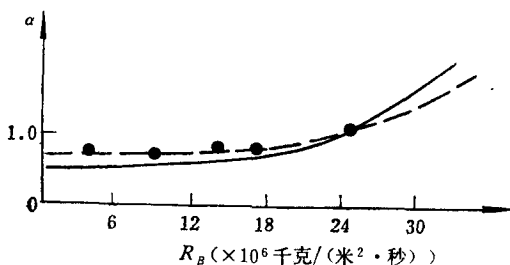


图 4 正弦指数衰减声脉冲入射时,接收电信号首次波幅度比与换能器背衬声阻率的关系曲线. 图中实线为理论曲线;虚线为实验曲线. 分析情况如图 1 至图 3, $R_T = 33 \times 10^6$ 千克/(米²·秒)

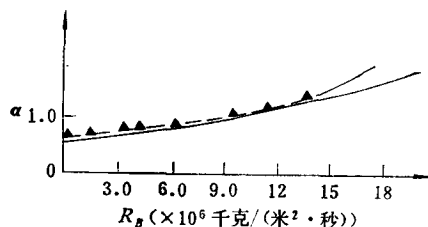


图 5 电信号的首次波幅度比与换能器背衬声阻率的关系曲线. 加到换能器的电压是阶跃电压,负载介质为水, $R_T = 33 \times 10^6$ 千克/米²·秒

这里加的电压是阶跃形的,但可以推测,如果所加电压是其它形式脉冲,上面所反映的规律(背衬越重,首次波幅度比越大)是有效的,只不过具体的背衬声阻率数字会不同. 另一方面,这里只计算了负载为水的特例. 从文献[1]中的大量计算来看,上述规律适用于所有轻负载($R_B < R_T$)的情况. 在以钢为例的重负载情况给出的电信号通常都是先大后小的波形. 因而关于重负载时背衬对首次波幅度比的影响,可以不作专门的讨论.

比较图 5 和图 4,似乎可以得到这样一个印象: 在双探头穿透法中,如果选用适当的激励电压(比如阶跃式),使发射探头辐射适当波形的声脉冲,也可降低接收探头的最低背衬声阻率,而仍保持幅度比为 1 (假使采用与接收一样结构的发射探头,实际上与单探头反射法相同),这样将会简化接收探头的制作.

四、讨论和结论

利用超声可以测量介质或其指定部份的某些特性、状态或质量. 这些性能主要是非声学的. 为了提高测量精度,本文计算和观察了超声换能器的背衬声阻率,对于换能器在接收时所产生的电脉冲信号的首次波幅度比,可能施加的影响. 分析着重于轻负载($R_B < R_T$)的情况. 结果表明,换能器的背衬声阻率应适当地大. 当声阻率由小增大时,接收电信号会从“先小后大”逐渐转变为“先大后小”,从而避免错测到达时间的机遇. 换能器背衬的声阻率并不需要大到和压电片的声阻率很相接近,这对换能器的制作是有利的. 文中分析结果还表明,换能器背衬声阻率同样会影响换能器在发射时所辐射声信号的首次波幅度比,而这个幅度比也影响接收换能器所产生的电信号的首次波幅度比. 文中又提出推测,发射换能器所辐射声信号的波形,也可能影响接收换能器所产生的电信号的首次波幅

度比。由于前者依赖于激励电压的波形,所以选择适当的激励发射换能器的电压波形,有可能进一步降低对换能器背衬声阻率的要求。需要探讨这种推测是否合理和有无实用意义。

在目前通常的设计中,为提高发射效率和接收灵敏度,一般采用轻的背衬。看来这种设计对于测量的精度是不利的。目前激励电路中又通常采用并联电感来产生正弦指数衰减的脉冲激励,这也是对测量精度不利的。另一方面,本文所提到的控制方案,没有同时照顾到最好能增大首波幅度的需要,在一定程度上降低了发射效率和接收灵敏度。近两三年来国外在发展液体负载在换能器的前端加用复合匹配层的方案^[4,5],也许值得综合考虑

参 考 文 献

- [1] 应崇福、李明轩、钟高琦、刘献铎、杨玉瑞,声学学报, (1980), No. 4, 249—257.
- [2] 应崇福、李明轩, Proc. 9th World Conference on Nondestructive Testing, (1979), Paper 4H-15.
- [3] E. C. Cook, IRE-Convention Record, Vol 4 part 9, p.61 (1956).
- [4] C. S. Desiets, J. D. Franser & G. S. Kino, *IEEE*, SU-25 (3) (1978), 115.
- [5] J. F. de Belleval, D. Lecuru, 1978, Ultrasonics Symposium Proceedings, 122, (1978).

A SCHEME TO CONTROL THE FIRST-SECOND CYCLE AMPLITUDE RATIO OF TRANSDUCERS FOR ULTRASONIC MEASUREMENTS

YING CHONG-FU LI MING-XIAN ZHONG GAO-QI
LIU XIAN-DUO YANG YU-RUI
(*Institute of Acoustics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In the ultrasonic applications of measuring non-acoustic characteristics, it is important that the time of flight of the ultrasound be measured with accuracy. One significant step to achieve this is to ensure that the first few cycles of the received ultrasonic signal should not be missed. This in turns asks for the amplitude of the first cycle being as large as, or greater than, that of the second. By studying the transient responses of the transmitting and receiving transducers, either separated or two united in one, it is shown that the first second cycle amplitude ratio can be increased from less than one to one or more of the specific acoustic resistance of the transducer backing is enhanced to a sufficiently high value, but not necessarily as high as the specific acoustic resistance of the piezoelectric plate. This holds for the case of light loading. For the case of heavy loading, the amplitude ratio is found to be inherently large.