

研究和技术简报

声速测量中换能晶片的反射对超声脉冲时延的影响*

查 济 璇

(中国科学院物理研究所)**

超声传播速度和衰减值的测量,作为超声基本量的测量和超声技术的一些应用,都有着重要的意义。多次脉冲反射法是目前超声测声速、声衰减等工作中最常用的方法,尤其对体积不大的固体材料的测量中,用得更多。用这类方法测声速时,都需要测定超声脉冲在被测样块内往返一次所经历的时间。而对这一时延值的确定,目前来说,有着两种方案,即当超声脉冲往返一次反射后,或者依据它的包络的相应时延直接确定;或者依据它的射频相位的比较来推算确定。前者测量方法和设备较简单,后者测量结果的精度较高。

当超声脉冲在被测样块与换能晶片的界面上反射时,它的包络就要引起附加时延。这一现象应该与其它已被研究过的有关现象一样,成为这类测声速方法的修正量之一。它对直接依据脉冲包络来定时的测量方案,是一个必须直接加以修正的量,对于象脉冲重叠法那样依据射频相位比较来定时的方案^[1],则可帮助较容易地判定测时值的应有范围。这个现象在一些文献^[1]中早已被提出来,它对某些测量方案^[2]的测量结果,似乎将引进不应有的而且是相当大的测量误差。

对这个附加时延的严格分析计算是比较困难的。最近文献^[3]采用无限次反射叠加的近似方法,得出了一种结果。而本文作者则利用频谱分析的方法,并采用适当近似处理,推导出反射脉冲的表达式,从而获得此附加时延的简明公式,可供较方便地进行修正量的计算。

如图1所示, $\rho_0 c_0$ 与 ρc 分别为换能晶片与被测材料的声特性阻抗,换能晶片的厚度为半波长。当有一脉冲平面声波从被测材料内垂直

入射到换能晶片的界面上时,将在此界面上产

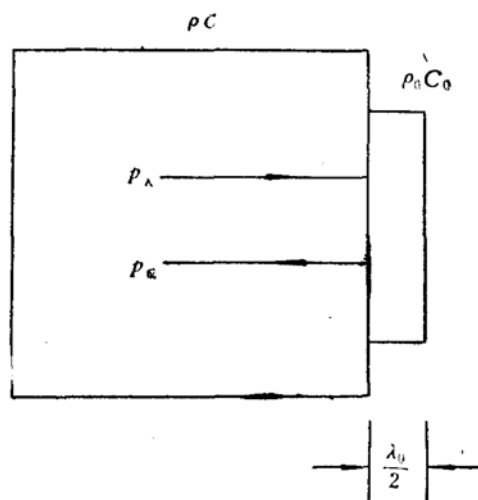


图1 超声脉冲在被测试块与换能晶片界面处的反射

生反射。设入射超声脉冲的波形为:

$$p_{\lambda}(t) = \frac{a^2}{a^2 + t^2} e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

其中 ω_0 为载波的角频率, a 为常数。则入射脉冲的频谱密度为:

$$P_{\lambda}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\lambda}(t) e^{-j\omega t} dt = a\pi e^{-a|\omega - \omega_0|} \quad (2)$$

超声波在此界面上的反射系数为:

$$K(\omega) = -\frac{1 - jh \operatorname{tg}\left(\pi \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)}{1 + jh \operatorname{tg}\left(\pi \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)} = -e^{-j2\theta} \quad (3)$$

其中:

$$h = \frac{\rho_0 c_0}{\rho c} \quad (4)$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[h \operatorname{tg} \frac{\pi(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \right] \quad (5)$$

从而反射脉冲的波形为:

* 1978年10月19日收到。

** 现在中国科学院声学研究所。

$$p_{\text{R}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\text{A}}(\omega) \cdot K(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

$$= -\frac{a}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-a|\omega-\omega_0|} \cdot e^{-j2\theta} \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (6)$$

为了进行上述积分,我们把(5)式中 θ 与 ω 的函数曲线予以折线近似。首先把反正切函数的宗量近似成直线,即令 $\theta = \text{tg}^{-1}[h\pi(\omega-\omega_0)/\omega_0]$,这是因为在实际工作中,频谱都不会太宽,因而是完全可取的。其次再把反正切函数以它的三段切线来代替之,如图2所示。

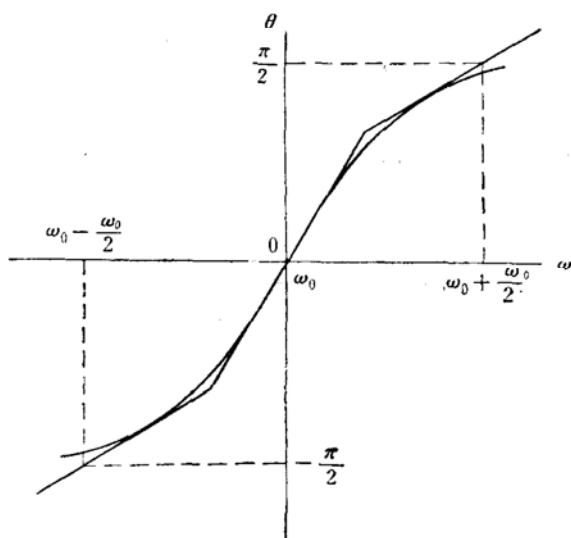


图2 反射系数的相移 θ 与频率 ω 的关系

各切线的取法是使中间段切线通过 $\omega=\omega_0$ 与 $\theta=0$ 的点,两侧段切线分别通过 $|\omega-\omega_0|=\omega_0/2$ 与 $\theta=\pm\pi/2$ 的点。这样选取以后,当

$h=1$ 时,三段切线的斜率相等,重合在一起,并且 $\theta=\pi(\omega-\omega_0)/\omega_0$,正好满足严格的关系。经过这样折线近似以后,就可以分段进行积分,而得出反射脉冲波形的表达式。结果,当 $0 < h < 2-3$ 时(这里实际上包括了绝大多数固体材料试样的数值范围),可以近似地得出反射脉冲的表达式为:

$$p_{\text{R}}(t) = -\frac{a^2}{a^2 + (t - hT_0)^2} e^{j\omega_0 t} \quad (7)$$

从而可以看出反射脉冲包络的时延值为 $\Delta t = hT_0$,其中 T_0 为载波的周期。

作者曾作了一部分实验,所得结果与计算值基本相符,如表1所列。

表1 ($f_0 = 5.0\text{mc/S}$, $T_0 = 0.200\mu\text{S}$)

材 料	$h = \rho_0 c_0 / \rho c$	附 加 时 延	
		实测值	理论值(hT_0)
钢	0.33	$0.059\mu\text{S}$	$0.066\mu\text{S}$
硬铝	0.90	0.175	0.180
熔石英	1.17	0.204	0.234

参 考 文 献

- [1] Papadakis, E. P., *J. Acous. Soc. Am.*, 42(1967), 1045—1051.
- [2] Laey, L. L., Damial, A. C., *J. Acous. Soc. Am.*, 52(1972), 189—195.
- [3] Kittininger, E., *Ultrasonics*, 15(1977), 30—32.

INFLUENCE UPON THE ULTRASONIC PULSE TIME DELAY IN VELOCITY MEASUREMENTS BY THE REFLECTION ON TRANSDUCER INTERFACE

Cha Ji-xuan

(Institute of Physics, Academia Sinica)*

* Now, at the Institute of Acoustics, Academia Sinica.

脉冲频谱法水声换能器低频校准

朱 厚 卿

(中国科学院声学研究所)

一、引 言

由于建造一个测试水声换能器的消声水池费用昂贵,而且消声效果很难低于1kHz,因此目前国内外的一般未消声水池几乎都用脉冲法测量。但在水池脉冲法校准水声换能器时,由于要求换能器信号达到稳态后才能进行,所以校准的频率范围受水池尺寸的很大限制。如一个 $5 \times 7.5 \times 7.5\text{m}^3$ 的水池一般在4kHz频率以上进行校准。因此,水声换能器的低频校准,特别是水声换能器的低频发射响应都是在开阔水域中进行校准,如水库、港湾、海上。为此,我们研究了脉冲信号在水声测量中的应用问题。

本文介绍脉冲频谱法进行水声换能器的低频校准,仍在 $5 \times 7.5 \times 7.5\text{m}^3$ 的水池内将换能器校准的低频限由4kHz扩展到0.5kHz。

二、校准原理

$$f(t) = 0$$

当 $t < -\frac{\tau}{2}$ 和 $t > \frac{\tau}{2}$ 时,

其傅立叶频谱为:

$$f(\omega) = \frac{A\tau}{T} \frac{\sin \omega \frac{\tau}{2}}{\omega \frac{\tau}{2}} \cos \varphi$$

$$+ \frac{A\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\Omega - \omega) \frac{\tau}{2}}{(n\Omega - \omega) \frac{\tau}{2}} \cos(n\Omega t + \varphi)$$

$$+ \frac{A\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\Omega + \omega) \frac{\tau}{2}}{(n\Omega + \omega) \frac{\tau}{2}} \cos(n\Omega t - \varphi)$$

当 $\varphi = 0$ 时,

$$f(t) = \frac{A\tau}{T} \cos \omega t$$

$$+ \frac{A\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\Omega\tau}{2}}{\frac{n\Omega\tau}{2}} \cos(\omega + n\Omega)t$$

$$+ \frac{A\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\Omega\tau}{2}}{\frac{n\Omega\tau}{2}} \cos(\omega - n\Omega)t$$

式中 A 为高频振荡的幅度, ω 为高频振荡的角频率, τ 为脉冲宽度, T 为脉冲重复周期, $\Omega = 2\pi/T$ 。

对上述脉冲系列,水听器接收,只要使直达

直达声脉冲进行频谱分析,测量出发射换能器和接收水听器的转移阻抗值,从而进行水声换能器的绝对校准。由于这方法无稳态的条件和利用了谱分析技术,所以大大地扩展了在一般未消声水池内水声换能器校准的低频限。

本方法可以说是等效于一个消声水池的低频连续波校准,而且无高频限制。本方法对校

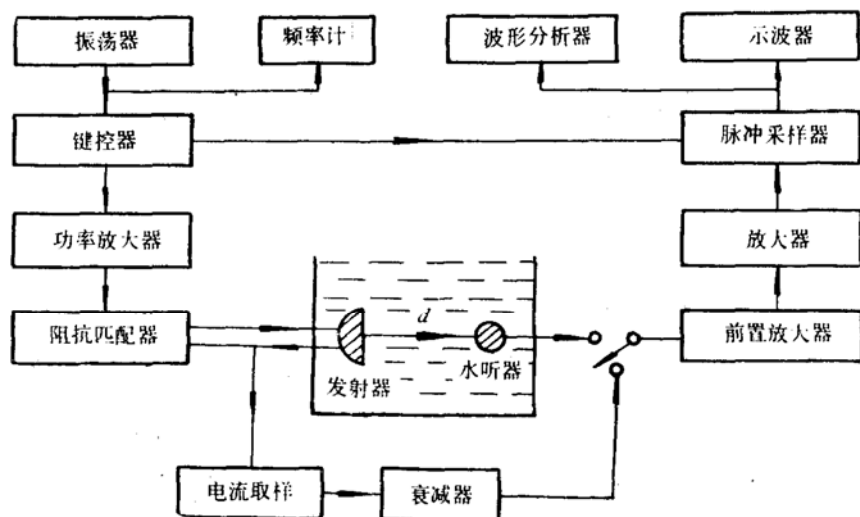


图 1 脉冲频谱法换能器校准装置

准水声换能器的低频发射响应特别有意义。

析器,如图 1 所示。

三、校准装置

脉冲频谱法校准换能器的校准装置是在自由场互易方法校准装置的接收系统里插入一个脉冲采样器和在终端与示波器并接一个波形分

四、校准结果及讨论

应用本方法校准了一些水声换能器的低频

表 2 弯张型换能器的转移阻抗测量值
(接收水听器 $M = -95\text{dB}$)

$f(\text{kHz})$	转移阻抗 $\alpha(\text{dB})$	
	脉冲频谱法	脉冲稳态法
0.7	40	
0.8	35.5	
1.0	37.0	
1.5	27.5	
1.8	12.0	
2.0	9.0	
2.2	9.0	
2.5	14.0	
3.0	19.5	
3.3	7.0	
3.5	4.0	
3.7	4.0	
4.0	7.5	7.0
5.0	8.0	6.5
6.0	8.0	8.0
7.0	19.0	18.5
8.0	20.0	20.0
10.0	33.0	33.0
12.0	23.5	24.0
13.0	3.0	3.0
15.0	20.5	20.0

表 1 弯曲圆盘换能器的转移阻抗测量值
(接收水听器 $M = -95\text{dB}$)

$f(\text{kHz})$	转移阻抗 $\alpha(\text{dB})$	
	脉冲频谱法	脉冲稳态法
0.5	36	
0.8	35	
1.0	33	
1.3	17.5	
1.5	12.0	
1.7	1.5	
1.8	9.5	
1.9	13.0	
2.0	14.0	
3.0	21.0	
4.0	23.0	
5.0	28.0	27.0
6.0	26.3	26.5
7.0	37.0	波形不好
8.0	10.0	11.0
10.0	18.0	20.0
12.0	17.0	17.0
15.0	17.5	17.5

发射响应。表 1 为一弯曲圆盘换能器的转移阻抗测量值, 表 2 为一弯张型换能器的转移阻抗测量值。表中还列出了常规的脉冲稳态法测量换能器的转移阻抗值。图 2 为根据测量的转移阻抗值计算的这二个水声换能器的发射电流响应。

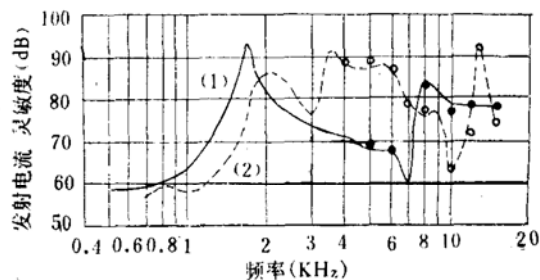


图 2 脉冲频谱法和脉冲稳态法二种测量结果的比较

- (1) 弯曲圆盘换能器的发射电流响应
 —— 脉冲频谱法 ● 脉冲稳态法
 (2) 弯张型换能器的发射电流响应
 —— 脉冲频谱法 ○ 脉冲稳态法

五、讨 论

1. 脉冲频谱法和脉冲稳态法, 在频率覆盖部分, 校准结果是一致的, 而脉冲频谱法的低频限却大大扩展了, 由稳态法的 4kHz 扩展到频谱法的 0.5kHz。

2. 脉冲频谱法与常规的脉冲稳态法比较, 在个别频率上差别有 2dB, 其原因是常规的脉冲稳态法是将幅度直接进行比较的, 而在这些频率上脉冲波形不好, 不易确定其稳态幅度值。相反, 脉冲频谱法却不受波形的影响, 从这个意义上讲, 频谱分析法比常规的稳态幅度比较法更准确。

3. 利用 FFT, 脉冲频谱法校准换能器能实现数字化和自动化。

本工作得到任树初等同志热心的讨论和帮助, 作者表示衷心感谢。

CALIBRATION OF UNDERWATER TRANSDUCER AT LOW FREQUENCIES BY THE METHOD OF PULSE SPECTRUM

Zhu Hou-qing

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

+35°Y LiNbO₃ 单晶的生长*

中国科学院物理研究所 12 室**

北京崇文无线电元件一厂

LiNbO₃ (简称 LN) 晶体是 60 年代发展起来的新材料。它是铁电体, 具有压电、电光、声光等多种效应, 且易于用提拉法在 *c* 轴方向生长出大块单晶, 故应用颇为广泛。由于其压电性, 它在超声领域中也占有重要地位^[1]。尤其 LN + 35°Y 切板, 具有机电耦合系数较高、频率常数较高、介电常数较低以及高温性能好等多种优点。很适宜于作高频和高温超声检测器的压电元件。因此, 常希望采用此种晶体切板。但是, 从一块以 *c* 轴方向提拉出来的梨晶上切取 LN + 35°Y 切板, 手续上较麻烦, 晶体利用率也低。为了适应超声工作方面的需要, 我们研制成功了直接从 +35°Y 方向提拉 LN 晶体。长出单晶压电性能良好。这样, 在制备圆板时, 大大简化了加工工序, 并提高了晶体利用率。

+35°Y 切板是绕 X 轴旋转切割的晶体板, 它的主平面的法线 Y' 轴和 X 轴垂直, 和 +Y 轴成 35° 角, 和 +Z 轴成 55° 角。如图 1 所示。

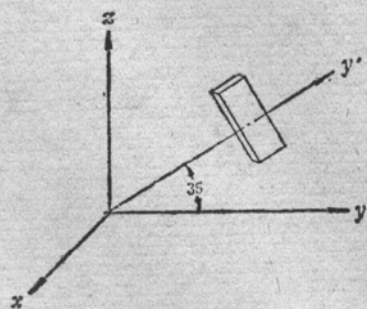


图 1 +35°Y 切板

从 +35°Y 方向提拉 LN 晶体, 就是用 +35°Y 方向的 LN 籽晶提拉晶体。籽晶的方向借助 X 光定向设备严格校准。我们用的籽晶大小为 $3 \times 3 \times 20 \text{ mm}^3$ 。

我们采取同成分点配料, 即 Nb₂O₅ 与 Li₂CO₃

的克分子比等于 51.4/48.6。配料搅拌混合后, 放在铂坩埚中熔化。用 FTD-2 型浮力提拉单晶炉拉制晶体。拉速每小时 4—5mm, 晶转每分钟 12—20 转。晶体通常被拉成 $\phi 25 \times 80 \text{ mm}^3$ 的大小, 拉晶最后, 快速拉脱, 以每小时 200°C 的速度降温, 长成的晶体无色透明, 无宏观缺陷。然后, 按照通常 LN 晶体退火的控温程序进行退火处理。图 2 所示为此晶体的实物照片。

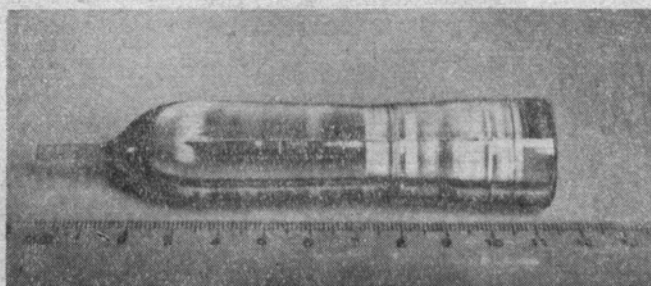


图 2 +35°Y LN 晶体

垂直提拉轴切割 +35°Y LN 晶体, 即得 LN + 35°Y 切板。经测试, 所得压电、介电、机械性能列在表 1 中。为了对比, 表中同时列出了通常的从 *c* 轴提拉的 LN 晶体上斜切出来的 LN + 35°Y 切板的性能。由表可见: 从两种 LN 晶体上切得的 +35°Y 切板, 其压弹介性能

表 1 LN: +35°Y 切板的机电性能

	从 <i>c</i> 轴晶体上切下的板	从 +35°Y 晶体上切下的板
密度 ρ	$4.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$4.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
机电耦合系数 K_t	0.49	0.47
介电常数	$\epsilon^S = 39$	$\epsilon^T = 66$
频率常数 N	$3700 \text{ MHz} \cdot \mu\text{m}$	$3350 \text{ MHz} \cdot \mu\text{m}$
机械阻抗 Z_0	$34.8 \times 10^6 \text{ kg/S} \cdot \text{m}^2$	$31.1 \times 10^6 \text{ kg/S} \cdot \text{m}^2$

* 1978 年 10 月 28 日收到。

** 现在中国科学院声学研究所。

略有差异. 这可能是由于+35°Y LN 晶体没有进行单畴化处理以及晶片定向的误差和其他因素不同所造成的. 对于超声检测器来说, 这些差异影响不大. 顺便指出: 根据我们对于多次生长的 LN 晶体所作的观察和测量表明, 提拉长成的 LN 晶体, 总是一种畴占很大优势, 因而也有很大的并且是大体一致的压电性. 这才使得有可能对 +35°Y LN 晶体不进行单畴化处理. 因为 +35°Y 切板主要用于超声检测器的压电元件, 所以我们主要关心的是它的压电性质, 电畴组态对机械性质和介电性质的影响, 相对来说是较少受到注意的. 总之, 从实用的角度看, 从 +35°Y 方向提拉 LN 晶体, 从而切割

LN + 35°Y 切板, 可以方便地获得性能较好的压电晶片, 是可取的.

LN + 35°Y 切板的缺点是质点的振动方向和主平面的法线方向不完全吻合, 而是约有 2° 的偏差. 但是, 除了某些要求特别严格的换能器外, 对大多数超声换能器是可以适用的. 我们从 +35°Y LN 晶体切取 LN+35°Y 切板, 已成功地用在某些超声检测器上, 性能满足需要.

参 考 文 献

- [1] Mattiat, O. E., *Ultrasonic Transducer Material*, (Plenum Press, New York-London, 1971) 136—148.

GROWTH OF +35°Y LiNbO₃ CRYSTAL

12th Laboratory, Institute of Physics, Academia Sinica*

Chongwen Works of 1st Radio Elements, Beijing

* Now, at the Institute of Acoustics, Academia Sinica.