

# 测量超声波速度的相位谱方法

刘镇清

(同济大学声学研究所 上海·200092)

许多超声检测都是通过测量声波传播速度来实现的。本文报道了一种基于脉冲回波相位谱的超声波速度测量方法,并给出了它的详细理论推导过程。若干模拟计算结果显示了这种方法对频散及非频散介质的声速测量都适用。

关键词: 超声波速度 相位谱 快速付利叶变换

## A phase spectrum method for determination of ultrasonic wave velocity

Liu Zhenqing

(Acoustics Institute, Tongji University, Shanghai 200092)

Ultrasonic sensor measurements are mostly based on the determination of the propagational speeds of waves. This paper presents the development of a pulse-echo measurement method, based on the use of a phase spectrum to determine the ultrasonic wave velocity. A detailed description of the theory is given. Some simulated results have been shown that the method can be used to measure the speeds of waves in nondispersive and dispersive medium.

Keywords, ultrasonic wave velocity phase spectrum FFT

### 1 引言

声速是超声研究与应用的一个重要手段。目前常用超声脉冲方法测量声速,其中主要有:脉冲回波重合法<sup>[1,2]</sup>,脉冲回波计数法<sup>[3]</sup>等,它们的测量精度都很高,但这些声速测量方法都要求被测介质是低衰减及非频散的。随着科学技术的进步,各种新型材料不断涌现,其中许多材料的声学特征是高

衰减和频散的,这对传统的声速测量方法就遇到了困难。另一方面,现代超声研究在某些场合希望得到被测介质的声速谱,采用单频逐点测量方法既费时又费力,测量过程中被测介质的各种状态还可能发生变化,导致测量结果不可靠。

本文介绍了一种相位谱方法,即:根据相位谱来求得对应频率的超声波速度,能够

收稿日期: 92-12-25

一次性给出声速谱。这种方法预计对声频散及非频散介质都适用,可实现声速谱的自动测量。计算机模拟给出的若干结果证实可理论分析的正确性。

## 2 理论

半无限介质中的平面超声波可表示为:

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) \cdot \exp[i(\omega t - kx - \phi)] \exp(-\alpha x) d\phi \quad (2)$$

当 $x=0$ 时,式(2)可化为:

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) \cdot \exp(-i\phi) \cdot \exp(i\omega t) d\phi \quad (3)$$

运用付利叶变换及其逆变换,有:

$$u(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} u(0, t) \cdot \exp(-i\omega t) \cdot \exp(i\omega t) dt \quad (4)$$

比较式(3)与式(4),  $u(0, t)$ 的付利叶变换可表示为:

$$F[u(0, t)] = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) \cdot \exp(-i\phi) d\phi \quad (5)$$

因此式(2)又可写成:

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F[u(0, t)] \cdot \exp(-ikx - \alpha x) \cdot \exp(i\omega t) d\omega \quad (6)$$

显然,  $u(x, t)$ 的付利叶变换是:

$$F[u(x, t)] = F[u(0, t)] \cdot \exp(-ikx - \alpha x) \quad (7)$$

通常付利叶变换结果为复数,由此可令:

$$F[u(0, t)] = |F[u(0, t)]| \cdot \exp(i\phi_0) \quad (8)$$

式中 $\phi_0$ 是 $u(0, t)$ 的相位,将式(8)代入式(7)可得:

$$F[u(x, t)] = |F[u(0, t)]| \cdot \exp(-\alpha x) \exp[-i(kx + \phi_0)] \quad (9)$$

这时便得到了 $u(x, t)$ 的相位谱:

$$\phi(\omega) = kx + \phi_0 \quad (10)$$

实际工作中较难直接测得所激发的初始超声波,往往是测量传播不同距离的超声波信号,然后求其声速。令传播距离为 $x_1$ 、 $x_2$ 后( $x_2 > x_1$ )的超声波相位谱分别为 $\phi_1(\omega)$ 与

$$u(x, t) = A \cdot \exp[i(\omega t - kx - \phi)] \cdot \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

式中 $A$ 是被激发超声波的初始幅度, $\omega$ 、 $\phi$ 分别是波的角频率与相位, $k$ 、 $\alpha$ 分别是超声波在介质中传播时的波数与衰减系数, $x$ 、 $t$ 分别是超声波的传播距离与时间。若超声波是宽频带的,当它通过线性介质时,根据叠加原理<sup>[4]</sup>,有如下表达式:

$\phi_2(\omega)$ , 那末相位谱之差为:

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega) = k(x_2 - x_1) \quad (11)$$

由于声波的波数 $k$ 与声速 $c$ 的关系为 $k = \omega/c$ ,根据式(11)可得声速(相速度)为:

$$c(\omega) = \frac{\omega(x_2 - x_1)}{\phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)} \quad (12)$$

由此给出了用相位谱测声速的理论表达式。从理论上讲,这一表达式对频散及非频散介质都适用,而且不受声衰减大小的约束,能够一次性给出所需的声速谱。

通常超声波传播距离,即声程( $x_2 - x_1$ )可事先精确测得,因此得到超声波传播所需时间(声时)便可知声速,而与频率有关的声时可表示为:

$$\Delta t(\omega) = \frac{\phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)}{\omega} \quad (13)$$

### 3 计算机模拟与结果

本文中计算机模拟的第一个波形代表距声源 $x_1$ 处的超声信号,第二个波形代表距声源 $x_2$ 处的超声信号。对两声信号用1024点的快速付利叶变换(FFT)分别求相位谱 $\phi_1(\omega)$ 和 $\phi_2(\omega)$ ,然后根据式(13)求得声时 $\Delta t(\omega)$ 。声时-频率关系图中,用经历采样点数代表声时值,频率数值是相对采样频率的归一化频率。

当介质为非频散时,若向其中发射方波调制的正弦脉冲串,那末接收到的超声波信号仍是同样形状结构的,只是信号幅度随距离的增大而有所减小。计算机模拟波形如图1(a)所示,两波形间延迟了350个采样点。通过计算得到的声时谱如图1(b)所示,显然其声时几乎不随频率而变化,表现出良好的非频散声学特征。此时本方法类似一种自动的脉冲回波重合声速测量方法。

若向非频散介质中发射一定带宽的脉冲式平面超声波,接收到的声信号频谱结构也应该是不随距离改变的,即与激发声信号波形相同。模拟波形如图2(a)所示,两波形间同样延迟了350个采样点,其信号频谱范围在 $0.04\pi \sim 0.1\pi$ 。经计算得到的声时谱如图2(b)所示。理论上预计,由于介质的非频

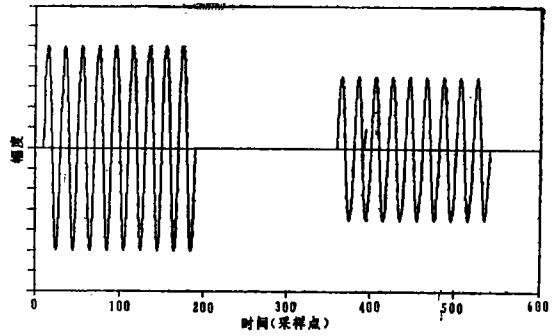


图1(a) 模拟超声波接收信号

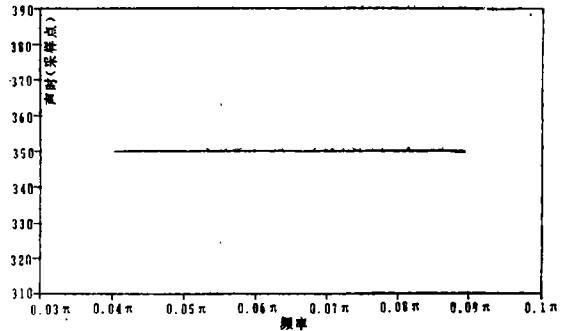


图1(b) 声时-频率关系

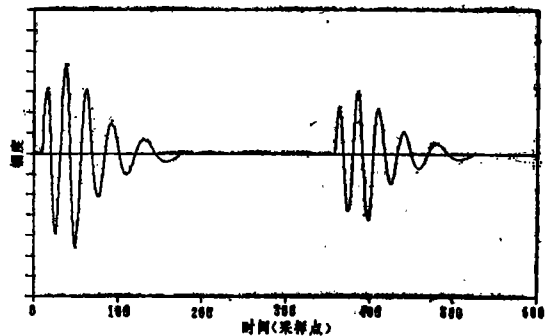


图2(a) 模拟超声波接收信号

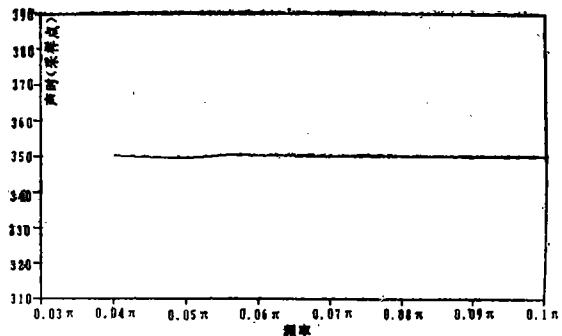


图2(b) 声时-频率关系

散,声时值应不随频率变化。图2(b)显示了,在频率为 $0.04\pi\sim 0.1\pi$ 范围内的声时值变化很小,仅在低频时有小的起伏现象,起伏的落差在 $\pm 0.5$ 个采样点之间,这可能是低频段信号能量较小,加上FFT离散化计算引进的误差。如果本方法在实际声速测量中的误差也能达到0.5个采样点间隔左右,这就已是个相当高精度的测量结果。

超声波在高衰减、频散介质中传播时,往往高频部分衰减得较多,低频部分衰减得较少。另外,由于介质对声波的作用,常常有低频超声信号随传播距离增大而丰富的现象,从时域上看即波形的“尾巴”增长了。对这种条件下的模拟波形见图3(a),两脉冲信号的波首间隔为293个采样点,信号频谱范围是 $0.01\pi\sim 0.1\pi$ ,且后一个信号的低频成份比较丰富;在靠近 $0.01\pi$ 频率处,第2个波较第1个波滞后了363个采样点。理论上预计,这里的低频波声时较长,而高频部分时差应在293个采样点附近。根据式(13)计算得到的声时谱如图3(b)所示,显然这一结果与理论预计相符,表现出声频散特性。

必须指出,脉冲超声波信号的频谱往往是连续谱,本文的理论结果也是基于这一条件得到的。而用离散FFT计算会导致信号能量重新集中分配在一些离散频率点上,由此将造成计算结果的偏差。图3(b)显示的结果比前两个模拟计算结果误差大,在整个频谱范围内相位谱计算出的频散曲线与设定的频散量最多相差了约2个采样点,这可能就包含了FFT离散化计算的因素。

## 4 结论

(1)理论证明了,通过信号付利叶变换的相位谱可严格求得超声波的声速。这种方法对高衰减、频散以及低衰减、非频散介质都适用,可自动给出一定频率范围的声速谱,是一种简单、实用的声速测量方法。

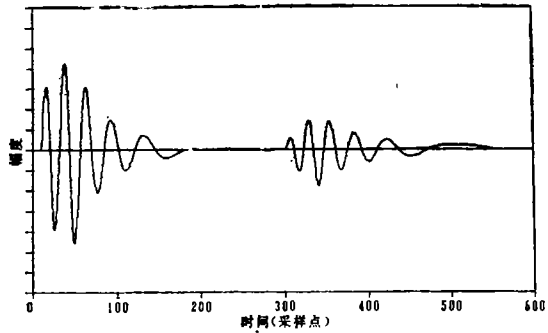


图3(a) 模拟超声波接收信号

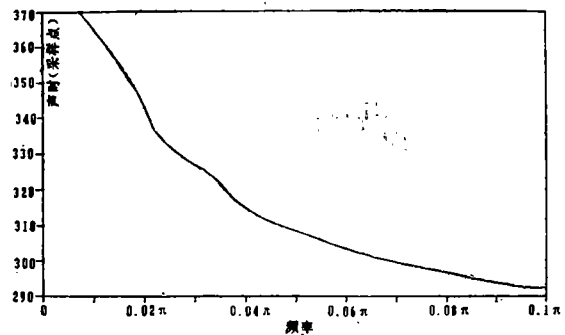


图3(b) 声时-频率关系

(2)当介质为非频散时,计算机模拟计算结果表明,本方法具有很高的声速测量精度。实际工作中,只要有较高的信噪比,同样能得到较好的声速测量精度。

(3)对高衰减、频散介质模拟计算的结果与理论预计相符,实际的测量精度有待于对试样测试并作进一步研究。由于脉冲超声波信号的频谱是连续谱,FFT离散化计算可能成为本方法误差的一个重要来源,这也是本项研究需要改进的方面。

本项工作得到魏墨童教授的指导与帮助,特致以衷心的感谢。

## 参考文献

1. H. J. Mcskimin and P. Andreatch, J. Acoust. Soc. Am., 1967, 42(5), 1045~1051
2. 刘镇清, 魏墨童, 声学技术, 1992, 11(4), 14~18
3. 朱士明, 刘镇清等, 声学技术, 1990, 9(3), 36~40
4. W. Sachse and Y. H. Pao, J. Appl. Phys., 1978, 49(8), 4320~4327