

固体板背覆薄层特性的低频超声反演方法研究^{*}

王 杨 毛 捷 李明轩 王小民

(中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

2008 年 5 月 5 日收到

2008 年 9 月 12 日定稿

摘要 研究了应用低频超声的反射频谱对固体板厚度及背覆薄层的各特征参数(包括厚度、声速、密度、衰减、声阻抗率、声时)进行反演的方法。从灵敏度函数、目标函数及误差传递方程的角度,对应用反射频谱的谐振频率或幅度谱反演模型系统的单参数和双参数的方法进行了分析讨论。实验使用中心频率为 7MHz 的探头检测铝板/聚合物薄层样品,在同样的条件下,谐振频率法和幅度谱法反演的单参数反演效果相当,谐振频率方法的双参数反演效果优于幅度谱方法,前者薄层声阻抗率和声时同时反演的平均误差为 3.4% 和 4.7%,而后者没有得到结果。

PACS 数: 43.35, 43.60

Research on two inverse methods for characterization of an inaccessible thin film under a plate by low-frequency ultrasound

WANG Yang MAO Jie LI Mingxuan WANG Xiaomin

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

Received May 5, 2008

Revised Sept. 12, 2008

Abstract Two ultrasonic methods for determining the parameters of a composite consisting of a soft thin film attached to a hard plate substrate were studied, by resonance spectra in low frequency region, using its resonant frequencies and amplitude spectra, respectively. An analysis of the sensitivity function, the objective function and the error transfer function was presented for discussing the effect of the two methods for both one parameter and two-parameter inversion. In experimental study, the two techniques were employed to characterize a composite consisting of a film attached beneath to an Al plate substrate with a broadband 7 MHz center frequency transducer. It was observed that the two methods' results were similar for one parameter inversion and the method based on resonant frequencies got better result for two-parameter inversion under the same experimental condition. The relative errors of the method based on resonant frequencies for inverting acoustic impedance and time-of-flight were 3.4% and 4.7%, respectively, and the method based on amplitude spectra got no results.

引言

应用超声对薄层结构的各项特征参数进行检测在工业中具有重要的意义,例如对表面保护性涂层的检测,对材料和元器件的氧化层、腐蚀层的检测等。

近几十年来,针对不同的具体结构、对象,产生了多种超声检测方法。其中有代表性的工作包括 Haines 和 Bell^[1] 提出的基于宽带换能器反射波的相位谱测量半无限大空间中薄层的特征参数的方法,并给出

了使用 1~30 MHz 的宽带换能器检测铝下 185 μm 氧化层厚度的结果;曹东旭、李明轩^[2] 等人利用频谱法对铝内 100~420 μm 厚环氧树脂薄夹层进行了检测;Kinra 和 Zhu^[3] 等人分别从板面和覆层面推导了声波传递方程,在已知薄层四个特征参数(厚度、声速、密度、衰减)中任意三个的前提下反演出另外一个特征参数,并给出了铝板上 50~100 μm 有机玻璃涂层厚度与声速的检测结果;Lavrentyev 和 Roklin^[4] 等人利用超声波在覆层面双角度入射,采用谱方法分二步反演得到薄覆层的多个特征参数,并给出了

^{*} 国家自然科学基金资助项目(10474113)

钢板上 51 μm 厚涂层的检测结果;毛捷、王小民、李明轩^[5-7]等人,从理论上研究了板背覆薄层的超声反射频谱谐振频率随薄层厚度或物性的改变而产生变化的规律,在此基础上提出了利用板的谐振频率漂移量进行板底薄层厚度检测的方法,并给出了铝板下 54~324 μm 厚度薄层的检测结果,后来又给出了铝板和背覆层厚度同时反演的检测结果。

以上方法对半无限介质中薄层的检测或位于基体材料正表面覆层的检测都得到了令人满意的结果,但对固体介质背覆层,尤其是多个特征参数的同时检测,还存在着很大的困难,而背覆薄层的特性检测对诸如石油化工压力容器、管道等产品质量及使用安全评估具有重要意义。

本文从反演的灵敏度函数、目标函数以及误差传递方程入手,讨论应用低频超声反射频谱的谐振频率和幅度谱对固体板下薄覆层进行单参数和双参数反演,并对反演效果进行了分析和比较,又从实际应用出发,尝试将板层厚度作为一个待反演参数加以考虑。这里的低频指的是所用超声的波长远大于薄层厚度。

1 方法分析

1.1 反射频谱

本文讨论的系统模型,由上至下分别为水、铝板、聚合物薄层及空气,铝板和聚合物薄层完全粘好,各层分别由下标 0, 1, 2, 3 标识,各层的厚度、声速、密度、衰减、声阻抗率及声时分别由 d_i , c_i , ρ_i , α_i , Z_i , t_i ($i = 0, 1, 2, 3$) 表示。考虑到衰减 α_i 的影响, c_i 为复数, $c_i = c_{i0}/(1 + j\alpha_i)$, 其中 c_{i0} 为理想声速。这里的声阻抗率指的是介质的特性阻抗,即 $Z_i = \rho_i c_{i0}$, 声时指的是声波垂直透过层状介质所用的时间,即 $t_i = d_i/c_{i0}$ 。水层和空气层看做是半无限大介质,所有介质均为各向同性,频率为 f 的单位振幅平面纵波从水中垂直入射到固体板的顶面,则系统的反射频谱可以表示为^[5]:

$$R(f) = r_{01} + \frac{(1 - r_{01}^2)R_L(f) \exp[j4\pi f t_1(1 + j\alpha_1)]}{1 + r_{01}R_L(f) \exp[j4\pi f t_1(1 + j\alpha_1)]}, \quad (1)$$

其中:

$$R_L(f) = r_{12} - \frac{(1 - r_{12}^2) \exp[j4\pi f t_2(1 + j\alpha_2)]}{1 - r_{12} \exp[j4\pi f t_2(1 + j\alpha_2)]} \quad (2)$$

是来自聚合物薄层的反射频谱, $r_{ij} = (Z_j - Z_i)/(Z_j + Z_i)$ 为介质 i 与 j 分界面上的反射系数。

反射频谱的幅度谱经常被用来对材料参数进行反演^[4,8-12],幅度谱的表达式 $|R|$ 为对式 (1) 取模,

而我们先前的研究表明^[5],当频率在公式 (2) 所表示的范围内,

$$0 \leq f < \frac{1}{2\pi t_2} \arctan\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) \quad (3)$$

系统谐振频率,即幅度谱极小值点所对应的频率点可表示为式 (4),其中 n 为谐振频率的阶数:

$$f_n = \frac{1}{2t_1(1 + j\alpha_1)} \left\{ n - \frac{1}{\pi} \arctan\left[\frac{Z_2}{Z_1} \tan(2\pi f t_2(1 + j\alpha_2))\right] \right\}. \quad (4)$$

以下对幅度谱和谐振频率的讨论均限定在式 (3) 的频率范围内,此时薄层的厚度远小于入射声波波长。式 (1) 和式 (4) 表明,若仅采用垂直入射反射频谱,无论是谐振频率还是幅度谱方法,都无法同时反演薄层的全部参数。本文重点讨论系统的单参数反演,以及对薄层一个参数连同固体板厚度,或薄层任意两个参数组合的双参数反演,假设模型系统的其它参数为已知。

本文的理论和实验研究针对铝板 / 聚合物薄膜系统,所用的各层参数如表 1 所示。

表 1 各层参数值

层序	物质	密度 (g/cm ³)	纵波声速 (mm/ μ s)	厚度 (mm)	衰减
0	水	0.998	1.48		
1	铝	2.77	6.424	6.232	0.0023
2	聚合物	0.93	1.58	0.054	0.0531
3	空气	1.21×10^{-3}	0.344		

1.2 灵敏度函数、目标函数和误差传递方程

(1) 灵敏度函数分析

灵敏度函数是测量误差对反演误差的影响程度,即误差的传递,定义如下^[10]:

$$S_{M,p} = \left| \frac{p}{M} \frac{\partial M}{\partial p} \right|, \quad (5)$$

其中 M 代表反射波谱的特征量,本文中指系统的谐振频率和幅度谱, p 代表待反演参数,本文中指铝层厚度和背覆薄层的各特征参数。 $S_{M,p}$ 代表了 p 发生单位变化时引起 M 的单位变化。则 p 的相对误差 ε_p 可用 M 的相对误差 ε_M 及灵敏度函数 $S_{M,p}$ 表示为 $\varepsilon_p = \varepsilon_M / S_{M,p}$, $S_{M,p}$ 越大,反演误差 ε_p 受测量误差 ε_M 的影响越小。因此反演应选择灵敏度高的谐振频率和幅度谱区间,以降低测量误差对反演精度的影响。

通过计算, 谐振频率对系统各特征参数的灵敏度函数如图 1 所示, 各图的横坐标为谐振频率的阶数 n , 纵坐标为系统谐振频率关于各待反演参数的灵

敏度。在式(3)所表示的有效频率^[5]范围内, 对板层厚度 d_1 , 谐振频率阶数越高灵敏度越小, 但各阶差别不大; 而对薄层的各个特征参数则相反, 灵敏度随着

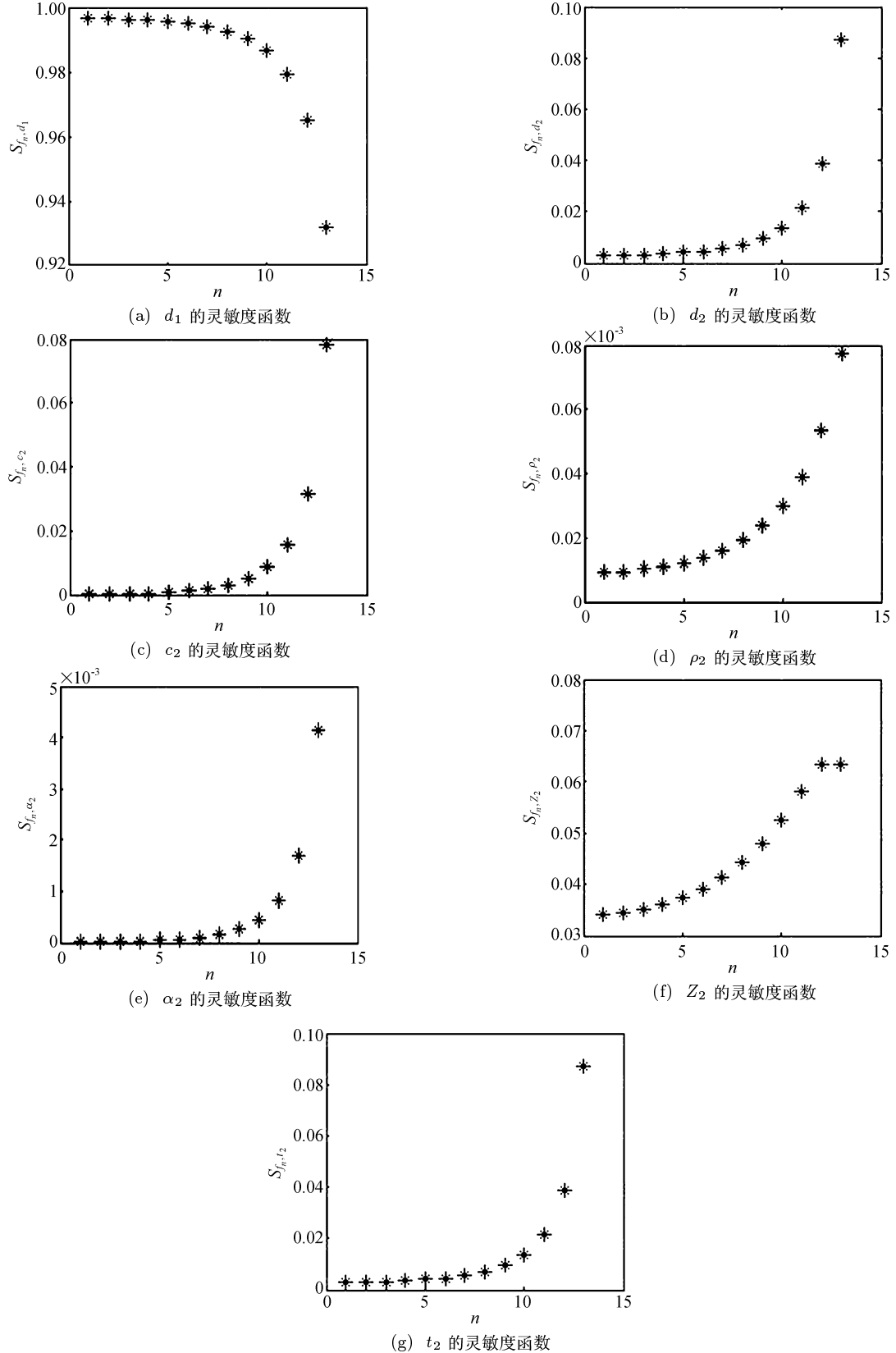


图 1 谐振频率方法对 d_1 , d_2 , c_2 , ρ_2 , α_2 , Z_2 , t_2 的灵敏度函数。

横坐标 n 为谐振频率的阶数, 纵坐标为谐振频率对各待反演参数的灵敏度函数值。

谐振频率阶数升高而增大, 而且 ρ_2, α_2 的灵敏度数量级很小。因此对谐振频率方法应选择高阶谐振频率反演, 且 ρ_2, α_2 的反演相对困难。

系统反射回波幅度谱对薄层特性阻抗 Z_2 的灵敏度函数如图 2 所示, 幅度谱的灵敏度函数在各阶谐振频率附近取局部极大值, 在第 9 阶谐振频率处取全局最大值。其它参数分析的结果与之相似, 因此从灵敏度函数角度考虑, 应选择第 9 阶谐振频率附近的幅度谱值进行反演。图 3 为其它特征参数的第 9 阶谐振频率附近幅度谱的灵敏度函数, 各图的横坐标为频率, 纵坐标为系统幅度谱关于各待反演参数的灵敏度。很明显板层厚度的灵敏度远大于背覆层各

特征参数的灵敏度, 而薄层衰减的灵敏度最小, 不易反演。

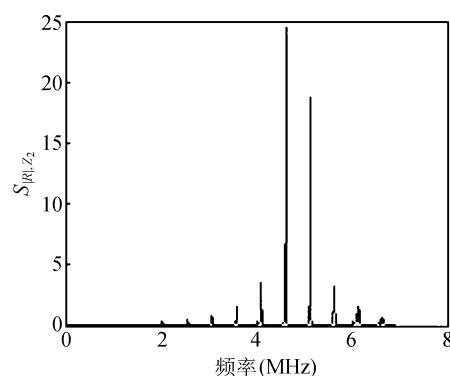


图 2 幅度谱方法对 Z_2 的灵敏度函数

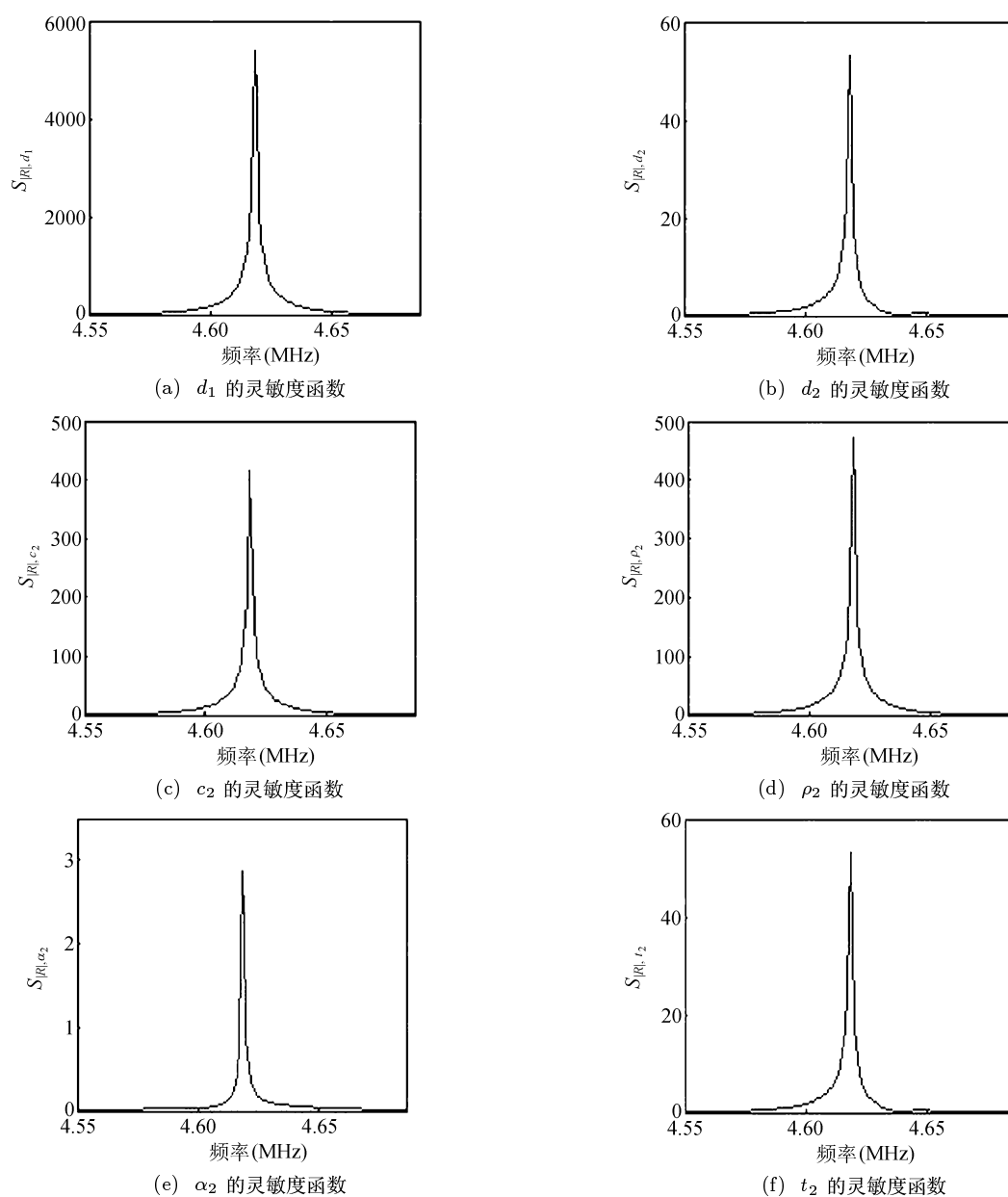


图 3 幅度谱方法对 $d_1, d_2, c_2, \rho_2, \alpha_2, t_2$ 的灵敏度函数。

横坐标为频率, 纵坐标为幅度谱对各待反演参数的灵敏度函数值。

以上的分析表明了不同区域的特征量对待反演参数的灵敏程度, 应当指出的是, 对利用同一类的特征量 (这里指谐振频率或幅度谱) 进行反演来说, 灵敏度分析方法可以指导我们选用灵敏度函数较大区域的特征量进行反演, 以减少测量误差对反演结果的影响。但是对不同的特征量反演方法来说, 灵敏度函数值大的特征量未必能带来好的反演结果, 二者之间没有很好的可比性, 因为反演精度更加依赖于所用特征量的测量精度。

综合比较, 以下的讨论和实验将选取第 8—12 阶的谐振频率进行反演, 幅度谱则取 9 阶谐振频率附近的 41 个频率对应的幅度值, 频率分辨率为 1 kHz。

(2) 目标函数分析

用 M 代表反射频谱特征量的理论值, M_e 代表实

验值, 则反演的过程就是通过 M_e 和 M 求参数 p 的过程, 根据均方误差最小原则, 定义目标函数式 (6):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^{N_2} |M^{(n)}(p) - M_e^{(n)}|^2, \quad (6)$$

令式 (6) 取得最小值的 p 即为反演结果。

目标函数是否收敛、收敛的速度及运算量决定了反演的有效性及速度。通过计算, 谐振频率和幅度谱方法的反演目标函数如图 4 所示, 各图的横坐标为各待反演参数的变化范围与其真实值的比值, 其中 p_{i0} 为 p_i 的真实值, 例如 d_{10} 代表 d_1 的真实值, 图中取值范围为板材厚度真实值的 $\pm 5\%$ 及背覆薄层各特征参数真实值的 $\pm 50\%$, 纵坐标为反演的目标函数。

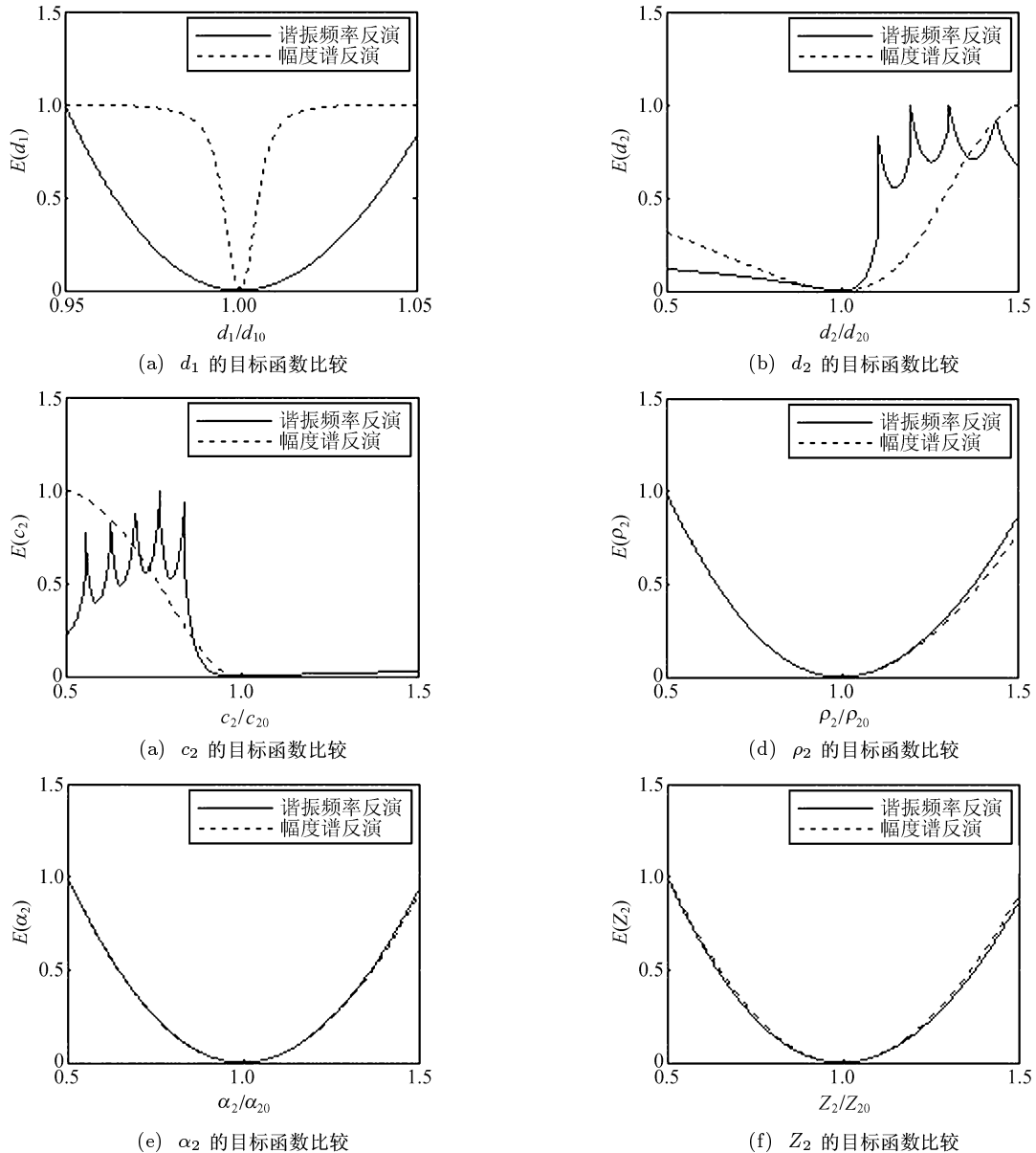


图 4

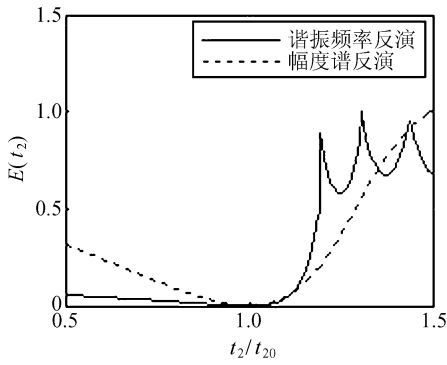
(g) t_2 的目标函数比较

图 4 谐振频率和幅度谱方法的反演目标函数。横坐标是各待反演参数的相对变化范围, 纵坐标为反演目标函数值。

可见, 两种方法的反演目标函数都收敛, 即都能对各特征参数进行反演。 d_1 的幅度谱方法比谐振频率方法收敛快; d_2, c_2, t_2 的谐振频率方法和幅度谱方法的收敛速度需要在不同的区域分别比较, 而且谐振频率方法有很多局部最小值点; 而 ρ_2, α_2, Z_2 的两种反演方法的收敛速度差别不大。

将各特征参数两两组合分析其二维反演目标函数。通过计算可知对任意组合, 幅度谱方法的目标函数在讨论范围内有唯一的全局最小值点, 而谐振频率方法对包含 d_2, c_2, t_2 的参数组合的反演目标函数具有多个局部极小值点, 因此要注意反演算法和迭代初始值的选择。

(3) 误差函数分析

在参数反演算法中, 除了待反演参量外, 其它的参量都作为已知量应用在反演过程中, 然而这些已知参量同样是通过其它的方法测量得到的, 存在着一定的测量误差, 在反演过程中有必要对已知参量测量误差的影响进行估计。下面以 Z_2 和 t_2 为例讨论测量误差对反演结果的影响。

简单地, 我们假设各已知参数的测量彼此独立, 忽略材料衰减, 则可得 Z_2 和 t_2 的误差传递方程^[13]。谐振频率方法的误差传递方程分别为式 (7) 和式 (8), 幅度谱方法分别为式 (8) 和式 (10)。

$$\Delta Z_2 = \frac{\partial Z_2}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial Z_2}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial Z_2}{\partial t_2} \Delta t_2 + \frac{\partial Z_2}{\partial f_n} \Delta f_n, \quad (7)$$

$$\Delta t_2 = \frac{\partial t_2}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial t_2}{\partial Z_2} \Delta Z_2 + \frac{\partial t_2}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial t_2}{\partial f_n} \Delta f_n, \quad (8)$$

$$\Delta Z_2 = \frac{\partial Z_2}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial Z_2}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial Z_2}{\partial t_2} \Delta t_2 + \frac{\partial Z_2}{\partial f_n} \Delta f_n + \frac{\partial Z_2}{\partial |R|} \Delta |R|, \quad (9)$$

$$\Delta t_2 = \frac{\partial t_2}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial t_2}{\partial Z_2} \Delta Z_2 + \frac{\partial t_2}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial t_2}{\partial f_n} \Delta f_n + \frac{\partial t_2}{\partial |R|} \Delta |R|, \quad (10)$$

其中 $\Delta Z_1, \Delta t_1, \Delta Z_2, \Delta t_2, \Delta |R|$ 以及 Δf 分别为各自参量的测量误差, 前面的系数则为各自的误差传递系数。经推导与计算得到的部分误差传递系数如表 2 和表 3 所示。

通过误差传递系数, 可以根据测量误差粗略估计反演误差, 同时也可以根据实际应用中反演精度的要求来设计实验控制测量误差的范围。例如, 当 f_n 测量的相对误差为 0.05% 时, 引起幅度谱反演 Z_2 的相对误差为:

$$\varepsilon_{Z_2} = 0.05\% \frac{\partial Z_2}{\partial f_n} \frac{f_n}{Z_2} = 0.05\% \times 72.39 \times \frac{4.618}{1.47} = 11.4\%, \quad (11)$$

如果将 Z_2 的反演误差平均分配到 5 个直接测量参量中, 当要求 Z_2 反演的误差范围为 20% 时, f_n 的测量相对误差需要小于:

$$\varepsilon_{f_n} = \frac{20\%}{5} \frac{Z_2}{\frac{\partial Z_2}{\partial f_n} f_n} = \frac{20\%}{5} \frac{1.47}{72.39 \times 4.618} = 0.018\%. \quad (12)$$

从表 2 和表 3 中可以看出, 除了幅度谱反演需要用到幅度谱值外, 两种方法包含了其它相同的直接测量参数, 如 Z_1, t_1, t_2, f_n , 或 Z_1, t_1, Z_2, f_n , 且各

表 2 基于谐振频率及幅度谱反演 Z_2 的各直接测量参数的误差传递系数

反演方法	误差传递系数				
	$\frac{\partial Z_2}{\partial Z_1}$	$\frac{\partial Z_2}{\partial t_1}$	$\frac{\partial Z_2}{\partial t_2}$	$\frac{\partial Z_2}{\partial f_n}$	$\frac{\partial Z_2}{\partial R }$
谐振频率 ($n = 8$)	0.095	381.42	88.33	90.76	
谐振频率 ($n = 9$)	0.093	342.95	104.57	72.77	
谐振频率 ($n = 10$)	0.090	299.08	126.30	57.39	
谐振频率 ($n = 11$)	0.089	251.44	167.50	44.30	
谐振频率 ($n = 12$)	0.087	200.65	237.29	33.05	
幅度谱 ($f = 6.418$ MHz)	0.096	341.51	114.34	72.39	4.09

表 3 基于谐振频率及幅度谱反演 t_2 的各直接测量参数的误差传递系数

反演方法	误差传递系数				
	$\frac{\partial t_2}{\partial Z_1}$	$\frac{\partial t_2}{\partial Z_2}$	$\frac{\partial t_2}{\partial t_1}$	$\frac{\partial t_2}{\partial f_n}$	$\frac{\partial t_2}{\partial R }$
谐振频率 ($n = 8$)	0.0011	0.014	4.62	1.10	
谐振频率 ($n = 9$)	0.00090	0.011	3.31	0.70	
谐振频率 ($n = 10$)	0.00070	0.0085	2.33	0.45	
谐振频率 ($n = 11$)	0.00051	0.0061	1.43	0.25	
谐振频率 ($n = 12$)	0.00035	0.0042	0.80	0.13	
幅度谱 ($f = 6.418$ MHz)	0.00097	0.0079	2.93	0.62	0.021

自的误差传递系数在两种方法中差别不大, 测量误差的影响应当相当。幅度谱反演由于还受到幅度谱 $|R|$ 的测量误差的影响, 虽然误差传递系数很小, 但由于实际应用中 $\Delta|R|$ 通常很大, 将导致幅度谱的反演效果不是很理想。此外, 不论是谐振频率还是幅度谱反演, 用于 Z_2 反演的各误差传递系数都远大于 t_2 的, 因此 t_2 的反演精度应高于 Z_2 。

以 Z_2 和 t_2 为例的分析过程可以推广到其他各特征参数的误差传递分析中。

2 实验验证

采用如图 5 所示的实验装置对铝板 (6.232 mm)/聚合物薄膜 (0.054 mm) 样品进行垂直入射的超声检测, 各层样品参数如表 1, 选用带有延迟水层的宽带复合压电换能器, 其中心频率为 7 MHz, 6 dB 带宽为 3 MHz, 通过 Panametrics-5052UA 超声分析仪进行超声波的激励、接收和放大, 来自样本的超声回波信号经 Tektronix TDS3012B 数字示波器以 500 MHz 的采样速率送入计算机, 在 Matlab7.0 语言环境下进行处理, 频谱变换后的频率分辨率为 1 kHz。根据上文分析结论, 选取 8—12 阶谐振频率和 9 阶谐振频率附近的 41 个频率点对应的幅度值进行反演。实验结果取 20 次独立实验的平均值。

实验得到的谐振频率和幅度谱波形如图 6 所示, 其中 8—12 阶谐振频率的实验值与理论值的平均误差为 0.063%, 而幅度谱的实验值与理论值的误差较大, 有些可以达到 50% 以上, 这主要是由于幅度谱的测量受到耦合等因素的影响较大, 同时已知参量的“真实值”与实际值必定存在一定的偏差, 从灵敏度的分析可知, 这些偏差将会带来更大的幅度谱测量误差。

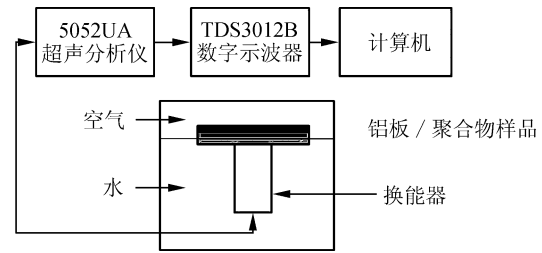
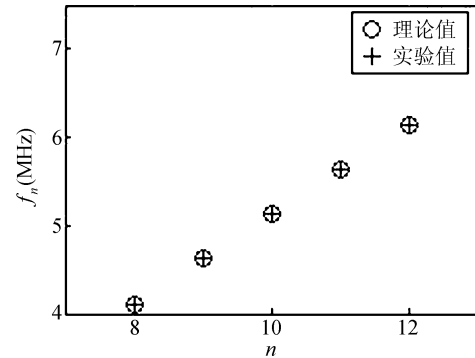
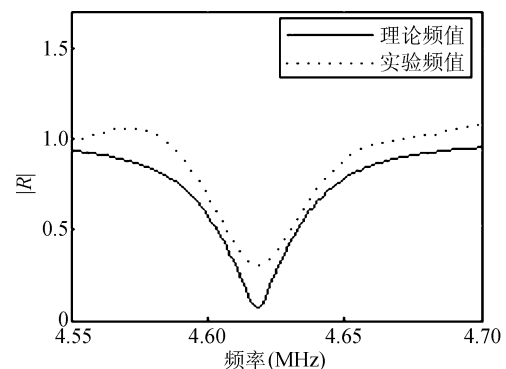


图 5 实验装置示意图



(a) 谐振频率比较



(b) 幅度谱比较

图 6 反射波谐振频率及幅度谱理论值与实验值的比较

实验反演结果如表 4 所示。

对于单个参数的反演, 在我们选择的谐振频率和幅度谱区间两种方法都能得到很好的结果, 幅度谱方法的效果略好, 这与对灵敏度函数的分析相符。

谐振频率方法中 ρ_2 及与 ρ_2 相关的 Z_2 反演误差较大, 跟灵敏度函数分析的结果相符。

两种方法都没有反演出 α_2 , 从灵敏度的分析可以看出, 两种方法对 α_2 的灵敏度函数较其它薄层参量来说均很小, 即特征量的很小的测量误差都会对反演结果产生较大的影响, 使之难以收敛得到反演结果。

对于双参数反演, 谐振频率方法对任意的双参数组合均获得了令人满意的结果, 幅度谱方法成功反演了参数 d_1 与 d_2 和 d_1 与 c_2 , 其它的双参数反演均不收敛。

表 4 铝板 / 薄层参数反演结果

参数	真值	基于谐振频率的反演			基于幅度谱的反演		
		搜索范围	反演结果	误差	搜索范围	反演结果	误差
d_1	6.232	$\pm 5\%$	6.237	0.08%	$\pm 5\%$	6.231	0.016%
d_2	0.054	$\pm 50\%$	0.056	3.7%	$\pm 50\%$	0.052	3.7%
c_2	1.58	$\pm 50\%$	1.52	3.8%	$\pm 50\%$	1.73	9.5%
ρ_2	0.93	$\pm 50\%$	1.07	15%	$\pm 50\%$	0.89	4.3%
α_2	0.0531	$\pm 50\%$	—	—	$\pm 50\%$	—	—
Z_2	0.147	$\pm 50\%$	0.169	15%	$\pm 50\%$	0.140	4.8%
t_2	0.0342	$\pm 50\%$	0.0354	3.5%	$\pm 50\%$	0.0330	3.5%
$d_1 \& d_2$	6.232	$\pm 5\%$	6.233	0.016%	$\pm 5\%$	6.254	0.35%
	0.054	$\pm 50\%$	0.056	3.7%	$\pm 50\%$	0.052	3.7%
$d_1 \& \rho_2$	6.232	$\pm 5\%$	6.222	0.16%	$\pm 5\%$	—	—
	0.93	$\pm 50\%$	1.325	42%	$\pm 50\%$	—	—
$d_1 \& c_2$	6.232	$\pm 5\%$	6.231	0.016%	$\pm 5\%$	6.1914	0.65%
	1.58	$\pm 50\%$	1.51	4.4%	$\pm 50\%$	1.11	29.7%
$d_2 \& c_2$	0.054	$\pm 50\%$	0.057	5.6%	$\pm 50\%$	—	—
	1.58	$\pm 50\%$	1.62	2.5%	$\pm 50\%$	—	—
$d_2 \& \rho_2$	0.054	$\pm 50\%$	0.056	3.7%	$\pm 50\%$	—	—
	0.93	$\pm 50\%$	0.925	0.54%	$\pm 50\%$	—	—
$\rho_2 \& c_2$	0.93	$\pm 50\%$	0.975	4.8%	$\pm 50\%$	—	—
	1.58	$\pm 50\%$	1.54	2.5%	$\pm 50\%$	—	—
$Z_2 \& t_2$	0.147	$\pm 50\%$	0.152	3.4%	$\pm 50\%$	—	—
	0.0342	$\pm 50\%$	0.0358	4.7%	$\pm 50\%$	—	—

注 1: 各参数单位分别为: $d_1(\text{mm})$, $d_2(\text{mm})$, $c_2(\text{mm}/\mu\text{s})$, $\rho_2(\text{g}/\text{cm}^3)$, $Z_2(\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{s}))$, $t_2(\mu\text{s})$

注 2: “—” 表示反演不收敛

注 3: 双参数反演, 与 α_2 相关的组合均得不到结果。

3 结论

对于板底背覆薄层结构, 通过以上的方法分析和实验验证, 可知在低频范围内有:

第一, 反射频谱的谐振频率和幅度谱这两个特征量均可以对板层厚度及其背覆薄层的单个特征参数进行反演, 得到很好的反演结果; 而对于模型系统的双参数反演, 谐振频率方法可以对任意组合获得反演结果, 大部分效果良好, 特别地薄层特性阻抗和声时的反演平均误差分别为 3.4% 和 4.7%。幅度谱方法对大部分组合不能得到结果, 能得到结果的组合误差也很大。

第二, 可以参照灵敏度函数选择反射频谱特征量的区间, 以达到更好的反演精度, 如文中选择了灵敏度更高的 8 — 12 阶谐振频率用于基于谐振频率的

反演, 选择了 9 阶谐振频率附近的幅度谱用于基于幅度谱的反演, 并都取得了较好的结果;

第三, 可以参照误差传递方程粗略判断反演结果的误差范围, 也可以根据对反演的精度要求设计实验控制直接测量参数的测量误差范围。

第四, 无论是用谐振频率还是幅度谱方法反演, 都需要测得较宽频率范围内反射频谱的特征量, 而且要求直接测量参数的精度达到一定的要求, 因此在实际应用中, 应在条件允许的范围内选择宽带测量系统, 改善实验条件, 以达到满意的反演精度。

参 考 文 献

- 1 Haines N F, Bell J C, McIntyre P J. The application of broadband ultrasonic spectroscopy to the study of layered media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1978; **64**(6): 1645—1651

- 2 Cao Dongxu, Li Mingxuan, Yang Yurui *et al.* Detection of thin layer of foreign material in plates by ultrasonic frequency spectra. *Chinese Journal of Acoustics*, 1984; **3**(4): 323—332
- 3 Kinra V K, ZHU Changyi. Ultrasonic nondestructive evaluation of thin (sub-wavelength) coatings. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993; **93**(5): 2454—2467
- 4 Lavrentyev A I, Rokhlin S I. An ultrasonic method for determination of elastic moduli, density, attenuation and thickness of a polymer coating on a stiff plate. *Ultrasonics*, 2001; **39**(2001): 211—221
- 5 LI Mingxuan, WANG Xiaomin, MAO Jie. Thickness Measurement of a Film on a Substrate by Low-Frequency Ultrasound. *Chin. Phys. Lett.*, 2004; **21**(5): 870—873
- 6 毛 捷, 王小民, 廉国选, 李明轩. 板底薄层的超声频谱谐振检测分析. *声学学报*, 2005; **30**(2): 149—152
- 7 MAO jie, LI Mingxuan, WANG Xiaomin. Thickness determination for a two-layered composite of a film and a plate by low-frequency ultrasound. *Chinese Physics Letters*, 2007; **24**(3): 755—758
- 8 钱 明, 万明习. 应用恢复函数的超薄层弹性材料低频超声定征方法. *声学学报*, 1999; **24**(1): 71—80
- 9 Vikram K, Kinra, Vasudevan R I. Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part I: the forward problem. *Ultrasonics*, 1995; **33**(2): 95—109
- 10 Vikram K, Kinra, Vasudevan R I. Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part II: the inverse problem. *Ultrasonics*, 1995; **33**(2): 111—122
- 11 Wang L, Xie B, Rokhlin S I. Determination of embedded layer properties using adaptive time-frequency domain analysis. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002; **111**(6): 2644—2653
- 12 YAO Guijin, ZHANG Hairong, WANG Kexie. A calculation approach for acoustic impedance and time-of-flight of an embedded elastic thin layer by ultrasonic. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006; **39**(2006): 4643—4650
- 13 程曙霞. 工程试验理论. 安徽科学技术出版社 (第一版), 1992: 109—110

声学消息

中国声学学会六届三次理事会议在上海召开

中国声学学会六届三次理事会议于 2008 年 10 月 21 日在上海召开, 理事和理事代表 72 人参加了会议。学会办公室主任罗燕列席了会议。

会议由杨德森副理事长主持, 张春华秘书长传达了中国科协的文件精神和冯长根书记关于学会学术会议的重要讲话。钱梦骅副理事长对马大猷声学奖的设立、章程的产生、名额的设定、资金的来源、选举过程、选举结果作了说明。宗健副理事长汇报了学会办公室的工作。

张春华秘书长强调, 冯长根书记在讲话中要求我们要解放思想, 推进改革, 做强学会。要充分重视科技社团在中国特色社会主义建设中的作用, 要注意学会改革发展中的结构性问题, 要关注科技社团的文化建设, 重视非物质科技成果的作用, 重视学术论文在推动科技进步中的重要作用。代表们对冯长根书记的讲话进行了热烈的讨论, 并结合声学学会的学术活动, 如何提高学术论文质量, 办好学会期刊发表了积极的建议。

宗健副理事长向理事们介绍了声学学会会徽的产生、使用, 声学工作的进展, 声学规划、网站建设、会员发展工作和近期的学术活动安排, 理事们对今年的工作表示满意, 对会员的发展情况表示了极大关心。

今年我会的会员发展工作有很大起色, 通过为会员减收会议费、设立优秀论文奖、通过刊物和网络为会员提供有关信息, 吸引了大批青年工作者积极入会, 现有会员达到 3992 人。

(中国声学学会办公室 罗燕)