

高阶模式兰姆波色散特性测量研究

邓秀慧¹,周纯冰²,林 玮²

(1. 南京工程学院 计算机工程学院, 江苏 南京 211167; 2 南京航空航天大学 应用物理系, 江苏 南京 210106)

摘 要: 由于设计超高频兰姆波微传感器的需要, 该文测量并分析了通过叉指换能器激发高阶模式兰姆波的传播特性。在建立测量系统的基础上, 通过时域频域转换法获得了高阶模式兰姆波的色散特性。该系统可自动测量兰姆波的幅频响应与相频响应。再通过反傅里叶变换, 获得器件的脉冲响应特性。进而在频域中区分不同模式, 并通过傅里叶变换获得兰姆波色散曲线。由于高阶模式兰姆波的相速度远大于表面波的速度, 因此基于此设计的振荡器频率更高, 传感器更灵敏。

关键词: 高阶模式兰姆波; 频域法; 色散曲线

中图分类号: TM812; O426.9

文献标识码: A

Study on Measurement of Dispersive Characteristics of Higher Order Mode Lamb Waves

DENG Xiuhui¹, ZHOU Chunbing², LIN Wei²

(1. College of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167, China;

2. Dept. of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210106, China)

Abstract: The dispersive characteristics of higher order mode Lamb waves (HOMLW) excited by inter-digital transducers (IDT) were measured and analyzed, which were necessary for designing micro-sensor in ultrahigh frequency (VHF). A measurement system was set up, in which dispersive characteristics of HOMLW were obtained by the method of transform between frequency and time domains. The characteristics of amplitude-frequency and phase-frequency of Lamb wave were auto-measured by the system. By IFFT, the pulse response of the IDT device was obtained. Different modes were separated in time domain and dispersive curve of each mode was calculated by FFT. The phase velocity of HOMLW is greater than the surface wave (SAW) velocity and an oscillator in higher frequency could be made, so the absolute sensitivity of micro-sensor could be increased.

Key words: higher order mode Lamb wave; time domains method; dispersive curve

0 引言

兰姆(Lamb)波的主要特点是多模和色散性。在一些激发的频率中, 不仅存在最低阶对称(S_0)和反对称(A_0)模式, 同时也有高阶对称和反对称模式存在, 且这些模式的相速度随频率的变化, 即存在色散特性。随着技术发展的需要, 当前对于 Lamb 波的研究, 微型传感器的应用研究逐渐成为热点问题。这主要是由于 Lamb 波传感器具有小尺寸, 低功耗和高灵敏度等优点, 它在物理化学、生物化学和环境监测等需要实时检测微量变化的领域得到广泛应用。White, Wu, Zhu 等研究并分析了 Lamb 波的理论, 并进行了微型传感器实验^[1-4]。

因为相同条件下高阶模式 Lamb 波相速度远高于零阶模式, 近年来高阶模式 Lamb 波的特性和应用研究越来越被关注^[5-6]。在相同尺寸下, 采用高阶模式 Lamb 波压电叉指换能器的工作频率可高于使用其他模式的器件。因此它可被广泛地应用于超高频微传感器。但设计该种传感器必须掌握其色散特性。

常见的 Lamb 波测量方法有时域法、小波变换法、二维傅里叶变换法。它们各有自己的优缺点, 适用于不同的领域。

1) 时域法。这是最常用的方法, 其优点是如果各个模式可区分开来的话, 其测量精度是最高的。

收稿日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51101086)

作者简介: 邓秀慧(1979-), 女, 江苏南京人, 讲师, 博士生, 主要从事声信号信息处理的研究。E-mail: Dengxhnjit@163.com。

但由于时域法采用的是脉冲或是载波发射,带宽较大,故而各个模式区分开来较难^[7]。

2) 小波变换法。通常用来测量 Lamb 波的群速度,而不是相速度^[8]。

3) 二维傅里叶变换法。其优点是可同时测量出信号的相速度与幅度。其缺点是必须采用光探针或机械方式在 Lamb 波的传播方向逐点进行采样,这给实时测量带来了不便^[9]。

本文采用的频域法的优点是可对频段进行选择,进而对模式进行选择,这对于制造 Lamb 波传感器是大有好处的。同时通过测量仪器与计算机间的接口可方便地实现自动化测量。

1 频域法原理

一个线性时不变系统(LTI)的输入输出关系、传输特性可用脉冲响应完整的描述分析。而时域的脉冲效应可用频域的响应获得,因为时域分析与频域分析可互换。他们通过傅里叶变换互相联系起来,即

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

式中: $F(\omega)$ 为 $h(t)$ 的傅里叶变换; $h(t)$ 为 $F(\omega)$ 的傅里叶逆变换; ω 为角频率; t 为时间。

根据信号处理的时域运算法则: n 个信号 $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, ..., $h_n(t)$ 相加可构成一个新的信号 $H(t)$,即

$$H(t) = h_1(t) + h_2(t) + h_3(t) + \dots + h_n(t) \quad (3)$$

同样可时域分解: $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, ..., $h_n(t)$ 在时域上相互独立或在实际情况下,存在一定的误差,允许部分重叠,则 $H(t)$ 可分解为 $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, ..., $h_n(t)$ 的独立分量。当信号 $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, ..., $h_n(t)$ 在时域有重叠时,必须选取信号能量的主要部分,这样就可达到减少处理误差,再辅之以其他的信号处理方法,从而最大限度地提到处理精度。

基于上述原理,可采用频域法对 Lamb 波色散曲线进行测量。其思路是由信号源发出连续波信号,测量由此激发出的 Lamb 波在通带附近的频率-幅度特性和频率-相位特性,从而得到其频率响应,将其作反傅里叶变换即为其时域的脉冲响应曲线。由于 Lamb 波各模式的速度不同,延迟时间也不同,

故会形成有间隔的多个包络,每一个包络对应一个模式。同时因为可把脉冲信号看成是频带无限宽的多个信号的叠加,所以可把某个包络看成是某种模式各个频率信号叠加的结果。重新将这个包络中的信号进行傅里叶变换就可得到该模式每一个频率在频域的特性,而从其频率-相位特性即可推出该模式的色散特性。

2 实验测量

2.1 实验系统

本实验采用叉指换能器激发 Lamb 波。其实验系统如图 1 所示,Lamb 波器件基片选用 127.86° LiNbO₃,片厚 $h=0.4$ mm,叉指换能器周期 $p=0.425$ mm, $h/\lambda=0.94$,孔径 $w=15p$,边缘切成 700 斜角涂以吸声橡胶。用 HP865 频率合成器由电脑控制,通过 GPIB 总线生成的连续正弦波信号,HP8405A 矢量电压表测量 Lamb 波延迟线的频率响应,测得的数据通过数据采集卡送入计算机进行数据处理。

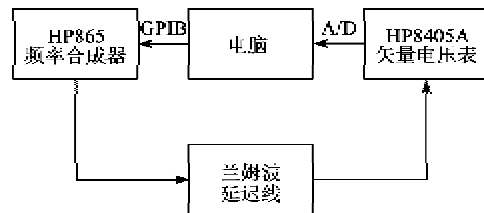


图 1 实验系统框图

2.2 数据处理

由于叉指换能器中心频率和带宽的限制,实验的测量范围为 $42\sim 50$ MHz,在该频段范围内仅有 A₁₃ 模式,从而很好地屏蔽了其他模式对于测量的干扰。但仍有以下几个问题需要解决:

1) 反傅里叶变换的起始频率应为 0,而本实验实际起始频率为 42 MHz。考虑到傅里叶变换的频移特性,这一情况将导致的测量结果与实际不吻合。

2) 测量的最高频率是 50 MHz。基于时域精度(T_s)和截止频率(f_s)间的傅里叶变换关系($T_s = 1/f_s$),时域精度为 $T_s = 20$ ns。由于脉冲响应的包络线的长度为几微秒,时域精度过低,不能满足测量要求。

为了解决起始频率和时域精度问题,测量必须扩展频段。由于带外信号能量远小通道内,近似可忽略,因此可采用在测量频带外补零的方法予以解决。在本实验中,补零范围为 $0\sim 1$ GHz,从而使时

域精度达到 1 ns,从而较好的反应了包络特性。

3 实验结果

测量得到的 Lamb 波幅频和相频响应曲线如图 2、3 所示。该测量范围为 42~50 MHz,频率精度为 500 Hz。Lamb 波延迟线的脉冲响应为

$$X(f) = Ae^{j\phi(f)} = A(f)[\cos \phi(f) + j\sin \phi(f)] \quad (4)$$

式中: X 为器件的脉冲响应; A 与 ϕ 为通过矢量电压表测得的器件幅频和相频响应。

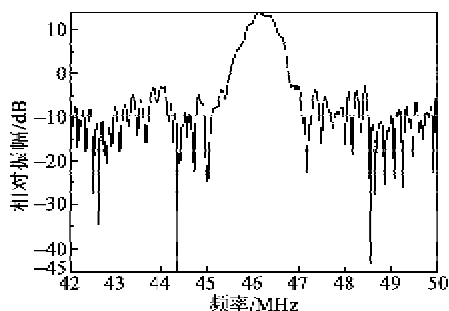


图2 Lamb波延迟线幅频特性

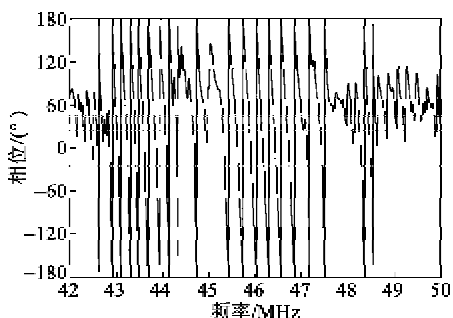


图3 Lamb波延迟线相频特性

此外,在频率响应上添加采用海明窗抑制旁瓣干扰。通过反傅里叶变换,将器件频率响应转化为其脉冲响应,如图 4 所示。

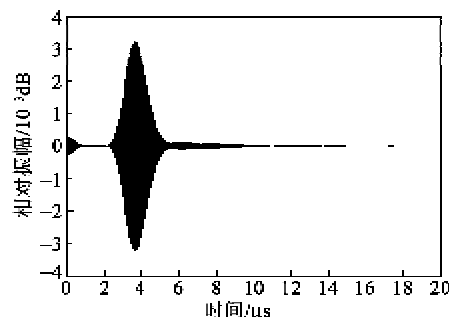


图4 Lamb波延迟线脉冲响应

从图 2 在延迟线中心频带附近可发现 A_{13} 模式的幅度远高于其他模式。因此选择 A_{13} 模式作为工作模式计算色散曲线,则有

$$\tau = \phi / \omega = \phi / (2\pi f) \quad (5)$$

$$c = l / \tau = (2\pi l f) / \phi \quad (6)$$

式中: τ 为器件的相延时; ϕ 可从图 4 的器件脉冲响应做傅里叶变换获得;叉指换能器中心距离 $l = 15$ mm。由此获得了 A_{13} 模式的色散曲线,如图 5 所示。

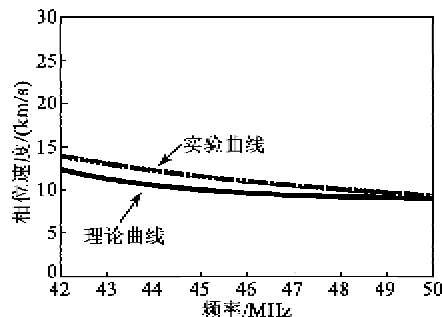


图5 A_{13} 模式 Lamb 波色散曲线

4 结果分析

由于 Lamb 波衍射、边缘反射、指间反射的二阶效应的影响,理论曲线和通过实验得到的色散曲线有一定的偏差。但从设计参数振荡器和微传感器角度考虑,这些边界条件必须要考虑,因此由边界条件影响而获得的色散曲线比理论曲线更接近真实情况。基于该曲线,我们设计了一个 A_{13} 模式闭环振荡器,其框图如图 6 所示,振荡频谱如图 7 所示。该振荡器中心频率为 46.477 03 MHz,根据色散曲线可知,此时的 A_{13} 模式相速度为 19 652 m/s。其振荡频率为同样条件下声表面波器件的 5.30 倍,从而极大地提高了以此为基础设计的传感器的精度。

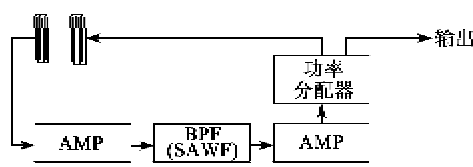


图6 高阶模式兰姆波振荡器系统框图

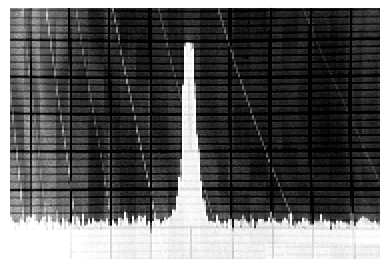


图7 高阶模式兰姆波振荡器频谱图

5 结束语

本文通过频域法,采用时频转换思路测量了高阶模式兰姆波 A_{13} 的色散特性,得到的实验曲线与理论曲线基本一致。基于该色散曲线,设计了一个

工作在 VHF 频段的高阶模式兰姆波振荡器,这为研制高灵敏度兰姆波传感器奠定了基础。相对于传统测量方法,频域法具有自身的特点,如可进行模式选择,测量高阶模式等。

参考文献:

- [1] WHITE R M, WENZEL S W. Fluid loading of a Lamb-wave sensor[J]. Appl Phys Lett, 1988, 52(20): 1653-1655.
- [2] WU JR, ZHU Z M. The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid [J]. J Acoust Soc Am, 1992, 91(2): 861-867.
- [3] 赵晓亮,朱哲民,杜功焕. 有粘滞液层负载时薄板中类 Lamb 波的传播[J]. 声学学报, 1998, 23(6): 545-554.
ZHAO Xiaoliang, ZHU Zheming, DU Gonghuan. The propagation of Lamb waves in a plate with one viscous liquid layer loading[J]. Acta Acoustic, 1998, 23(6): 545-554.
- [4] 严萍,朱哲民,杜功焕. 有液层负载时各向异性薄板中 Lamb 波的传播[J]. 声学学报, 2001, 26(5): 429-434.
YAN Ping, ZHU Zheming, DU Gonghuan. The propagation of Lamb waves in an anisotropic plate bordered with liquid layers[J]. Acta Acoustic, 2001, 26(5): 429-

434.

- [5] JOSHI S G, JIN Y. Excitation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates[J]. J Appl Phys, 1991, 59(8): 8018-8024.
- [6] JIN Y, JOSHI S G. Excitation of higher order ultrasonic Lamb wave modes in piezoelectric plates [J]. J Acoust Soc Am, 1992, 92(3): 914-919.
- [7] 刘镇清,黄瑞菊. 薄板声-超声检测超声传播模式的实验研究[J]. 声学学报, 2000, 25(3): 268-273.
LIU Zhenqing, HUANG Ruiju. Experiment analysis of acousto-ultrasonic propagation mode in thin plate[J]. Acta Acoustic, 2000, 25(3): 268-273.
- [8] ALLEYNE D, CAWLEY P A. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. J Acoust Soc Am, 1991, 89(3): 1159-1168.
- [9] 行鸿彦,刘照泉,万明习. 基于小波变换的超声多模式兰姆波参量时延估计[J]. 声学学报, 2001, 26(3): 239-246.
XING Hongyan, LIU Zhaoquan, WAN Mingxi. Parameter and time delay estimation of ultrasonic multi-mode Lamb waves based on wavelet transform [J]. Acta Acustica, 2001, 26(3): 239-246.

(上接第 526 页)

桁架结构振动控制算例验证建模过程和算法。结果表明,通过最优振动控制可使结构振动快速衰减,1.5 s 后振幅基本衰减为 0,达到振动抑制的效果。

参考文献:

- [1] MOITA J M S, CORREIA V M F, MARTINS P G, et al. Optimal design in vibration control of adaptive structures using a simulated annealing algorithm[J]. Composite Structures, 2006, 75(1): 79-87.
- [2] MUC A, KEDZIORA P. Optimal design of smart laminated composite structures[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(4): 272-280.

- [3] 李东旭. 大型挠性空间桁架结构动力学分析与模糊振动控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 聂润兔,邵成勋,邹振祝. 智能桁架机电耦合动力分析与振动控制[J]. 振动工程学报, 1997, 10(2): 119-124.
NIE Runtu, SHAO Chengxun, ZOU Zhenzhu. Mechanical coupling dynamic analysis and vibration control of intelligent truss structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 1997, 10(2): 119-124.
- [5] 司洪伟. 大挠性航天桁架结构动力学建模及其主动模糊控制研究 [D]. 北京: 国防科学技术大学, 2006.
- [6] 刘豹,唐万生. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.