

文章编号 1004-924X(2001)06-0565-03

一种新型 Lamb 波微量液体密度传感器的研制

施文康, 韩 韬, 马伟方, 侯 毅

(上海交通大学 信息检测技术与仪器系, 上海 200030)

摘要: 密度是表征物质性质的一个重要物理参数。介绍了一种新型液体密度传感器的研制。有别于目前沿用的振动式、超声波式液体密度传感器, 这种基于 Lamb 波的传感器具有灵敏度高、响应快、所需试样量少等优点。本文详细叙述了该传感器的基本工作原理、所采用的相位差测量原理、检测系统和实验, 取得了理想的结果, 展示出良好的应用开发前景。

关键词: 密度测量; 微量液体; Lamb 波; 相位检测; 密度传感器

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

1 引 言

密度是表征物质性质的一个重要物理参数。在生物医学领域, 人们通过测量体液密度和粘度, 来研究人体的各种生命行为, 了解人体健康状况。准确测量的血液密度结合其它指标, 可用来判别血液里是否含有爱滋病病毒^[1]。

目前, 测定密度的仪器有浮子式密度计、振动式密度计、放射性同位素式密度计和超声波密度计等, 但这些密度计存在着这样那样的问题, 有的不能实现在线测量、有的测量的精度比较低、或者价格高、响应慢、试样需求量比较大、有的对人体健康有害等等^[2]。随着声学技术的深入研究, 各种声学传感器以其特有的体积小、灵敏度高等优点展现出良好的应用前景。由于瑞利波模式的声表面波在传播过程中介质粒子沿基片表面法线方向上有一个振动分量向液体内部辐射能量, 导致衰减严重。人们利用其它模式的表面波, 如: 乐甫 (Love) 波、剪式水平声板波 (SH-APM Wave)、Lamb 波等尝试测量液体密度等参数, 以保持优点并克服缺点。就灵敏度而言, Lamb 波传感器的最高^[3]。但目前的 Lamb 波密度传感器对基片加工要求较高。主要表现在基片表面需要 ZnO 的导层, 该导层的厚度和均匀性都对器件影响很大^[4]。基于这些考虑, 本文借鉴板波的结构^[5], 研究应用 Lamb 波^[6]的新型结构的液体密度传感器, 取得了较好的效果。

2 传感器基本原理

该传感器的结构如图 1 所示, 采用的 LiNbO₃ 压电晶片的上、下表面经精细抛光加工并相互平行。晶片的上表面为被测液体。而下表面为一对叉指换能器。其中叉指换能器 IDT₁ 激发 Lamb 波, 而 IDT₂ 用于接收激发叉指换能器传来的声波。在压电晶体上, 激发叉指换能器激发出瑞利波、浅表体波和在板内传播的 Lamb 波。声表面波沿着激发的表面传播, 而浅表体波则从表面向晶体内部传播, 但由于传播角度比较小, 它没有达到有液体的表面。这样在激发过程中, 这两种声波与液体的性质的改变没有关系。而 Lamb 波则是经过压电晶片上、下表面的几次反射后传到接收叉指换能器上, 且反射角与液体的性质有关。所以当液体性质发生变化时, Lamb 波的特性将发生变化。在本设计中, 由于叉指换能器不与液体直接接触, 有效地克服了衰减和腐蚀性液体对叉指的影响。

Lamb 波是板波的一种, 其传播特性随着压电晶片切向、归一化厚度、基片的边界条件等因素而改变。对于反对称型的 Lamb 波而言, 其相速度、群速度、群延迟、插损等将发生变化。如果晶片/液体界面的液体密度发生变化, 改变了晶片的边界条件, 最终导致了 Lamb 波相速度的变化, 即:

$$v_l = v_l(\varphi) \quad (1)$$

这就是应用 Lamb 波检测液体密度的机理。

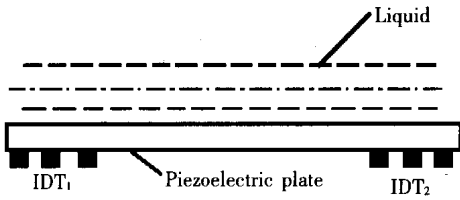


Fig. 1 Principle of Lamb wave based liquid density sensor.

3 检测系统设计

在进行相位差的检测中,一般采用的是硬件方法,这种方法的检测精度完全取决于硬件,这样在一定程度上限制了传感器的测量精度。这里采用了软件锁相方法来高精度地测量相位差,从而得到延迟时间量的变化。传感器的检测系统如图 2 所示。系统包括信号发生系统,给 IDT₁ 提供足够功率的高频正弦激励;信号采集、调理系统, IDT₂ 接收的信号经放大、滤波输入 A/D 转换;信号处理系统, A/D 转换信号经微处理器预处理后,传至 PC 机进行相位算法运算,得到测量结果。相位检测的基本原理如下:

加在叉指换能器 IDT₁ 上的激励信号为标准正弦信号:

$$y(t) = B \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

Lamb 波经过传播,到达接收叉指换能器 IDT₂ 后转换成电信号为带有噪声 $N(t)$ 干扰的同频正弦信号 $s(t)$, 有:

$$S(t) = x(t) + N(t) = A \cdot \sin(\omega t + \theta + \varphi) + N(t) \quad (3)$$

其中的 φ 就为激发到接收转换后的两个电信号的相位差。假设 $N(t)$ 为高斯干扰信号。

以激励信号相位超前 90° 所得到的信号作为参考信号,其可写为:

$$y'(t) = B \cdot \sin(\omega t + \theta + 90^\circ) = B \cdot \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

根据相关原理,对它们在延时 $\tau = 0$ 的情况下分别计算接收信号 $S(t)$ 、激励信号 $y(t)$ 和参考信号 $y'(t)$ 之间的互相关函数。

$$R_{sy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t)y(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T N(t)y(t)dt$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{T} \int_0^T A \sin(\omega t + \theta + \varphi) \cdot B \sin(\omega t + \theta) dt \\ &= \frac{1}{2} AB \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{xy'}(0) &= \frac{1}{T} \int_0^T S(t)y'(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y'(t)dt + \frac{1}{T} \int_0^T N(t)y'(t)dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T A \sin(\omega t + \theta + \varphi) \cdot B \cos(\omega t + \theta) dt \\ &= \frac{1}{2} AB \sin \varphi \end{aligned}$$

式中 T 为正弦信号周期。

同时考虑到在传感器系统中的一些噪声信号一般都是随机信号,这样其与正弦信号 $y(t)$ 、 $y'(t)$ 和 $x(t)$ 之间没有相关性,即其互相关函数为 0。

从上面两式可以得到:

$$\tan \varphi = \frac{R_{sy'}(0)}{R_{sy}(0)}$$

相位差 φ 的值可由互相关函数 $R_{sy'}(0)$ 和 $R_{sy}(0)$ 的值和符号确定,以此来反映出液体的密度。

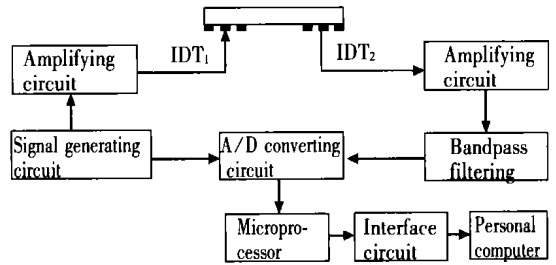


Fig. 2 Schematic diagram of the Lamb wave sensing system.

4 实验结果

在综合考虑机电耦合系数、归一化厚度的情况下,所制作传感器的参数为:

压电晶片材料: YZ- LiNbO₃

归一化厚度: 0.9

Lamb 波相速度: 1305.06m/s

机电耦合系数: 1.6%

在实验中,以水作为基准,并在水中加入无水酒精来改变溶液的密度。实验结果如图 3 所示。从图中可以看出当液体密度在微小范围内变化时,相位差与密度之间成良好的线性特性,传感

器的灵敏度为 $-1.05^\circ(\text{g}/\text{cm}^3)$,而其理论灵敏度为: $-1.1575^\circ/(\text{g}/\text{cm}^3)$ 可以看出,实际实验的结果和理论值具有较好的一致性。

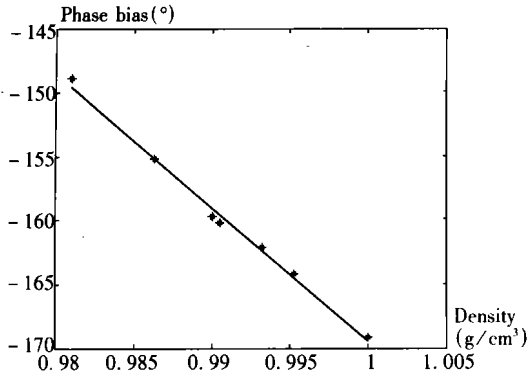


Fig. 3 Relationship between the phase bias and the liquid density.

参考文献:

- [1] Benes E. Sensor based on piezoelectric resonators[J]. Sensors & Actuators, 1995, A48: 11- 21.
- [2] Puttmer A, Hauptmann P, Henning B. Ultrasonic density sensor of liquids[J]. IEEE. Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr, 2000, 47(1): 85- 92.
- [3] Vellekoop M J. Acoustic wave sensor and their technology[J]. Ultrasonics, 1998, 36: 7- 14.
- [4] Vellekoop M J, Lubking G W, Sarro P M, et al. Evaluation of liquid properties using a silicon Lamb wave sensor[J]. Sens. Actuators, 1994; A43: 175- 180.
- [5] Andle J C, Vetelino J F, Lec R, et al. An acoustic plate mode immunosensor[J]. Sensor & Actuators 1990; B18: 82- 85.
- [6] WU Yi hui, JIA Hong guang, JU Hui. Lamb waves generated by laser[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(4): 299- 303.

Study of a Novel Lamb wave Based Liquid Density Sensor

SHI Wen kang, HAN Tao, MA Wei fang, HOU Yi

(Department of Instrumentation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Density is one of the important physical parameters of materials. The paper introduces research work concerned with a novel sensor for measuring liquid density. Different from the traditional instruments used today, such as vibrating tubes, ultrasonic based sensors, the new one based on Lamb wave possesses many advantages, such as high sensitivity, fast response, little sample required, etc. This paper presents a basic principle of the sensor and the phase shift measuring method used in this project. The measuring system and satisfactory experiment results are shown.

Key words: density measurement; minim liquid; Lamb wave; phase shift measurement; density sensors

作者简介: 施文康(1942-),男,江苏省启东人,上海交通大学电子信息学院教授,博士生导师,长期从事自动检测系统、机电一体化和新型传感器的教学和科研。曾出版教材、专著三本,发表论文100余篇。

5 结 论

实验的结果表明 Lamb 波液体密度传感器的可行性。用 Lamb 波器件检测液体密度的微小变化具有精度高、响应快、试样少等优点。在现有传感器结构的基础上,考虑体液、血液的粘度的影响,可设计成用于生物医学工程领域中的血液、体液密度测量;也可以在数据融合技术,设计集成并行测量体液密度和粘度的 Lamb 波声传感器检测系统。