

流体声速高精度相位法测量研究

潘 雯, 马青玉

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 利用流体中的声速进行溶液浓度的测量是无损检测的一种重要方法,但是声速很小的变化范围限制了浓度的精确测量.介绍了一种流体声速高精度相位测量新技术,从被测流体的声速范围出发选择合适的测量距离,使设定的最高声速和最低声速传播的相位差为 2π ,分析测量距离和声速比以及测量频率的关系,通过 AD 转换测量电压并计算出声速.此方法被应用到牛奶浓度的声速测量中,实验结果证明本方法进行流体声速测量快速精确,在酸碱以及其他溶液浓度的检测中具有广阔的应用前景.

[关键词] 相位检测,流体声速测量,牛奶浓度测量

[中图分类号] O 422.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)03-0079-04

Investigation on Acoustic Velocity Precise Measurement for Liquid Using Phase Detection Technique

Pan Wen, Ma Qingyu

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract The solution concentration measurement with the acoustic velocity in liquid is an important technique in Non-destructive Examination (NDE). The precise measurement of acoustic velocity for liquid using phase detection technique is proposed in the paper. Based on the velocity range, the sound propagation distance is confirmed to make the phase difference from 0 to 2π between the set values of the maximum and minimum velocities. The relations among the distance, the velocity ratio and the sound frequency are analyzed and the velocity can be calculated with AD detection. The technique was applied in milk concentration measurement, the favorable results proved that the proposed technique provides the accurate and rapid measurement of acoustic velocity and suggests the prosperous future in the concentration measurement for the acid and alkali or the other solutions.

Key words phase detection technique; acoustic velocity measurement for liquid; milk concentration measurement

由于超声波具有无损伤、无污染、价格低廉等优点,被广泛应用于临床医学(B超)和工业检测(超声测距、超声探伤)领域.近年来,超声测量和分析技术逐渐地应用于酸碱等腐蚀性物质以及食品生产和鉴别中,实现浓度和质量的无损快速检测.声波是在媒质中以一定速度传播机械波,声速是声传播的重要参数,它和媒质的粘连性、强度和弹性模量等物理参数有关,因此声速的测量对于媒质的特性定征具有十分重要的意义.流体的浓度和成分对声速和声衰减等声学参量有一定的影响,它们存在某种对应关系,因此通过测量液体中的声参量就可以测量液体的浓度和成分,尤其对于单一成分溶液的测量比较准确.声强和声衰减^[1]比较容易测量,但受流体的不均匀性和散射等因素的影响而不容易测量准确.声速是一种比较稳定的声学参量,与溶液的浓度有单调变化的关系,因此可以通过声速来进行溶液浓度的计算,在无损检测中得到应用.传统的声速测量方法是脉冲回波法,将超声波入射到一定长度的被测样品中,通过过零检测回波信号的传播时间来计算声速,要想提高测量精度可以通过脉冲回波反馈触发增加测量次数^[2],达到延长传输距离的目的,但是信号中的噪声降低了过零检测的准确性和声速测量的精度,尤其对于速度变化范围很小的溶液,测量精度难以保证.另外还有脉冲回波谱分析测量技术^[3,4]、共振干涉法^[5]、相位比较法^[6]和时差法^[7]等方法进行声速的测量,但是他们的测量精度和测量时间不能完全满足实时测量的需要.

收稿日期: 2009-02-27

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (2008102SBJ0154) 资助项目.

通讯联系人: 马青玉,博士,副教授,研究方向: 声信号处理与生物医学电子技术应用. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

本文根据声传播基本理论^[8], 针对声速度变化范围较小的溶液利用相位检测技术进行声速的测量实现溶液浓度的测量, 设计了一种短距离, 高精度, 高速度的测量技术, 对不同浓度牛奶中进行声速和浓度的检测, 取得良好的测量效果.

1 测量原理

通过文献检索或实验测量可以获得不同浓度流体的速度最大值 V_{max} (最浓溶液) 和最小值 V_{min} (最稀溶液), 略微扩展声速测量范围, 设定被测溶液的速度最大值 $v_{max} (> V_{max})$, 最小值 $v_{min} (< V_{min})$, 测量距离 X , 测量信号的频率为 f . 在相同频率条件下, 由于 v_{max} 速度高, 波长长, 传播相同距离后的相移小. 选择合适的测量距离 X 使 v_{max} 的相位移动为 ϕ_{min} , v_{min} 的相位移动为 ϕ_{max} , 使二者相位差 2π , 则:

$$\begin{aligned}\phi_{min} &= 2\pi X / \lambda_{max} = 2\pi X f / v_{max} = 2\pi n \\ \phi_{max} &= 2\pi X / \lambda_{min} = 2\pi X f / v_{min} = 2\pi n + 2\pi\end{aligned}\tag{1}$$

因此声波的距离为 $X = nv_{max} / f$, $\phi_0 = 2\pi n$ 是二者共同相移, 得到 $nv_{max} / v_{min} = (n + 1)$, 令速度比值 $k = v_{max} / v_{min}$, 经过代换得到速度比值 k 和共同相移的关系为:

$$k = 1 + 1/n\tag{2}$$

可见在 k 的取值较大 (速度范围较大) 时, 测量所需要的共同相移较小.

根据被测速度的比值 k 由公式 (2) 计算出共同相移 ϕ_0 和 n , 如当 $k = 2, 1.200, 1.100, 1.026$ 3 时, 分别得到 $n = 1, 5, 10, 38$. 根据公式 $X = nv_{max} / f$ 可知在使用不同的信号频率 f 和共同相移 ϕ_0 时, 测量距离 X 也不同. 图 1 是在 n 的取值为 $2, 5, 10, 50$ 时 (假定最大声速 1560 m/s), 测量距离 X 和频率 f 的关系图. 可以看出使用同一信号频率时, n 越大, 测量距离越长; 在 n 确定时, 频率越低, 测量距离越长. 图 2 是频率 f 分别为 $40\text{ KHz}, 100\text{ KHz}, 1\text{ MHz}$ 时测量距离 X 和 n 的关系图. 在 n 相同的情况下频率越低, 测量距离越长.

当声波经过一段距离的传播, 在相距 X 的距离上用相同的换能器接收两个信号, 经过放大和整形后得到如图 3 中所示的方波 a 和 b . 由于被测量液体中的速度在 v_{max} 和 v_{min} 之间, 因此存在相位差 ϕ , 并且在 0 到 2π 之间. 两个信号经过相位检测后, 得到频率为 f 的脉宽调制信号 c . 其中低电平信号时间 $T_L = \phi / (2\pi f)$, 反映相位差的大小. 一般可以通过脉宽检测来测量相位差. 但是由于信号频率 f 较高, 时间的精确测量比较困难, 因此将脉宽调制信号通过低通滤波器转变成直流信号, 输出电压和脉宽调制信号中低电平信号时间呈线性关系, 所以可以通过测量电压来测量相位差.

如图 3(b) 所示两个信号的相位差和输出检测电压的关系, 当相位差为 0 时, 测量电压 V_m ; 相位差为 2π 时, 测量电压 0 . 相位差为 ϕ_x 时, 测量电压 V_x , 计算被测量的相位差为 $\phi_x = 2\pi (V_m - V_x) / V_m$. 将计算的相位差 ϕ_x 代入最小相位和被测量相位的公式中, 得到: $\phi_{min} = 2\pi X f / v_{max} = 2\pi n$ 和 $\phi_x = 2\pi X f / v_x = 2\pi n + 2\pi (V_m - V_x) / V_m$, 代入测量 X 计算得到被测量的声速为:

$$v_x = \frac{nV_m v_{max}}{(n + 1)V_m - V_x}\tag{3}$$

假设某一溶液 $v_{max} = 1560\text{ m/s}$ 测量的最高电压 $V_m = 5\text{ V}$, 测量电压 V_x , 图 4 显示在不同的 n 情况下测量电压和计算速度关系. 可见 n 越大, 测量范围越小, 曲线趋向于线性关系.

假设溶液 $v_{max} = 1560\text{ m/s}$ 时, 取 $n = 5, k = 1.2$ 则 $v_{min} = 1300\text{ m/s}$ 声速的变化范围为 300 m/s . 如果使用

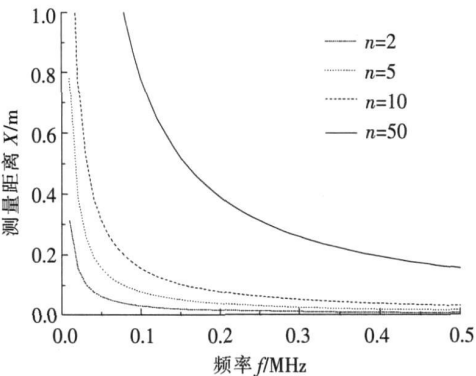


图 1 不同共同相移 $2\pi n$ 时测量距离 X 和频率 f 的关系曲线
Fig.1 Relations between the measuring distance X and the frequency f at various common phase shifts $2\pi n$

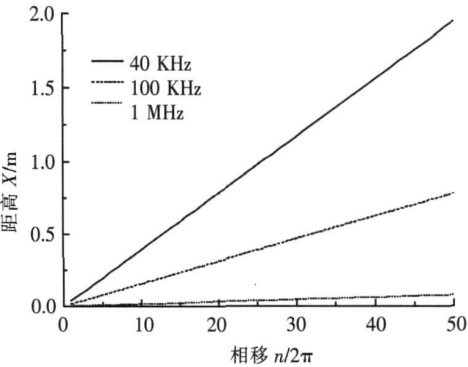


图 2 不同声波频率时测量距离 X 和共同相移 $2\pi n$ 的关系曲线
Fig.2 Relations between the measuring distance X and the common phase shift $2\pi n$ at various frequencies f

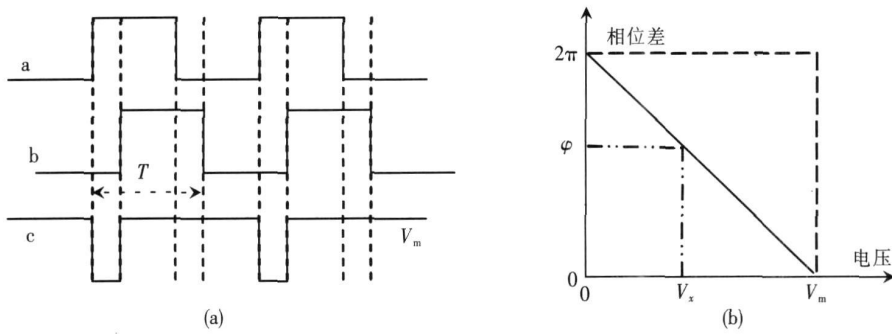


图3 信号相位检测波形示意图(a)和低通滤波后相位与电压的关系曲线(b)

Fig.3 Sketch map of the waveforms of the signal phase detection (a) and the relation between the voltage and the phase after the low pass filter (b)

16位 AD转换器对电压进行采样, 则测量声速的平均最小分辨率为 $(1\,560 \sim 1\,300)/65\,535 = 0.004\text{ m/s}$ 如取 $n = 38$ $k = 1.026\,3$ 则 $v_{\text{min}} = 1\,520\text{ m/s}$ 声速的变化范围为 40 m/s 在同样采样条件下, 声速的平均最小分辨率为 $(1\,560 \sim 1\,520)/65\,535 = 0.000\,61\text{ m/s}$ 对比其它超声声速测量方法的测量精度 0.5% ^[11], 其测量精度提高了大约 300倍. 本方法对于速度范围越小的流体, 需要使用较大共同相移 φ_0 就能有效提高测量分辨率和测量精度; 同时要提高频率, 才能减小测量距离; 在测量频率和距离确定后, 需要提高 AD转换器的转换精度, 因此在声速范围、频率选择、测量距离确定以及 AD转换器的选择需要综合考虑.

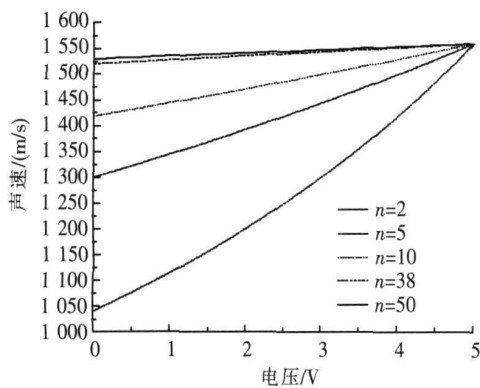


图4 不同共同相移 $2\pi n$ 时测量声速 v_x 和测量电压 V_x 的关系曲线
Fig.4 Relations between the acoustic velocity v_x and the detected voltage V_x at various common phase shifts $2\pi n$

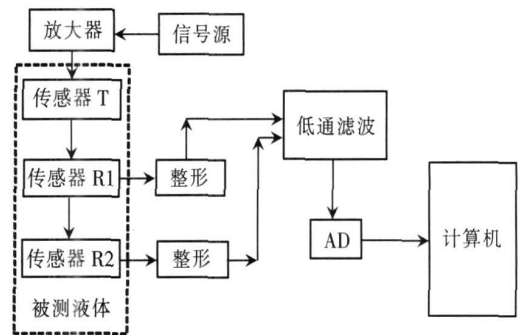


图5 测量系统结构框图

Fig.5 Illustration of the measuring system

2 实际测量与应用

本实验系统结构如图 5所示, 可编程任意波形发声器 (Agilent 33250)输出连续的正弦信号, 频率 $f = 1\text{ MHz}$ 信号经过宽带功率放大器放大后激励输出换能器, 输出声压 0.5 MPa , 声波被相距 X 的两个相同的换能器接收. 接收信号经过放大, 滤波和整形后得到两个方波信号, 经过相位检测输出脉宽调制信号并且滤波后输出直流电压, 由计算机中的采集卡实现 AD转换得到电压值 ^[9 10], 并且通过计算得到被测液体的声速.

声速和牛奶中的脂肪、蛋白质、非脂固体物以及含水量有直接的关系 ^[12 13], 通过测量超声波在牛奶中的声速就能计算出牛奶中各种成分的含量, 可以作为牛奶成分分析的一种快速测量方法. 由文献查得脂肪含量为 3.1% 鲜牛奶在 24°C 时的声速约为 $1\,555\text{ m/s}$ 水的声速是 $1\,529\text{ m/s}$ 取 $v_{\text{max}} = 1\,560\text{ m/s}$ $v_{\text{min}} = 1\,520\text{ m/s}$ 被测速度在 v_{max} 和 v_{min} 之间, $k = 1.026\,3$ 则 $n = 38$, 信号频率 $f = 1\text{ MHz}$ 测量距离 $X = n v_{\text{max}}/f = 0.059\,3\text{ m}$, 通过水的声速 (已知) 进行距离的校准和微调, 测量的最高输出电压 $V_m = 5\text{ V}$, 则测量电压为 V_x 时的声速为:

$$v_x = \frac{nV_m v_{\text{max}}}{(n + 1)V_m - V_x} = \frac{296\,400}{195 - V_x} \quad (4)$$

将该牛奶稀释水释成不同的浓度 ($0\% \sim 100\%$), 测量的声速和浓度的关系如图 6所示. 可以看出不同的牛奶浓度和声速基本呈现线性关系, 测量的声速和文献结论 ^[12] 基本一致.

3 结论

本文研究流体声速的相位测量法,通过对被测流体的声速范围和衰减情况进行分析,合理选择声波信号的频率,并且通过计算确定声波的传播距离,将相位检测输出的脉宽调制信号滤波后输出电压直流电压,由计算机 AD 转换检测电压而实现对声速的准确测量。相位法声速测量法可以用在酸碱溶液以及其他液体浓度的测量,尤其用于声速变化范围小的液体,更加能体现准确性和优越性。本方法可以替代化学方法,用来测量溶液的浓度和成份,测量速度快,准确度高,使用的溶液少,测量损耗小,并且可以推广到其他的流体或气体的测量。

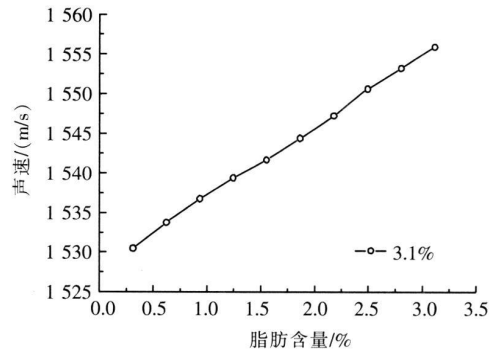


图 6 脂肪含量为 3.1% 的牛奶按照不同浓度稀释后的测量声速
Fig.6 Measured acoustic velocities of the diluted solutions at various concentrations for milk with fat content of 3.1%

[参考文献] (References)

[1] Takaaki M, Ushijima Jun-ichi, Taniguchi M. Measurement of sound intensity using a single moving microphone[J]. Applied Acoustics, 2005, 66: 579-589.

[2] 王寅观, 邵良华. 超声波盐酸浓度计的研制[J]. 声学学报, 1996, 21(2): 182-188.
Wang Yinguan, Shao Lianghua. Development of ultrasonic HCL concentration meter[J]. Acta Acustica, 1996, 21(2): 182-188 (in Chinese).

[3] 刘艳平, 王寅观. 脉冲回波谱分析法测声速[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 176-177.
Liu Yanping, Wang Yinguan. Spectral analysis technique of ultrasonic pulse-echo in measuring sound velocity[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5), 176-177. (in Chinese).

[4] 刘镇清, 陈广. 超声无损检测中的谱分析技术[J]. 无损检测, 2001, 23(2), 85-88.
Liu Zhenqing, Chen Guang. Spectral analysis for ultrasonic nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 2001, 23(2): 85-88 (in Chinese).

[5] 隋成华, 施建青. 大学基础物理实验教程[M]. 杭州: 浙江电子音像出版社, 2001.
Sui Chenghua, Shi Jianqing. Experimental Course of College Basic Physics[M]. Hangzhou: Zhejiang Electronic Audio-Video Press, 2001. (in Chinese).

[6] 曹建庆, 江兴方. 相位比较法在声速测量中的应用[J]. 江苏石油化工学院学报, 2001, 13(4), 62-64.
Cao Jianqing, Jiang Xingfang. The application of method of phase in measuring velocity of sound[J]. Journal of Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, 2001, 13(4): 62-64 (in Chinese).

[7] 童建平, 隋成华, 魏高尧, 等. 时差法声速测量仪的研制[J]. 传感器技术, 2004, 23(1), 28-29.
Tong Jianping, Sui Chenghua, Wei Gaoyao, et al. Development of equipment for measuring sound velocity with time difference method[J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(1): 28-29. (in Chinese).

[8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
Du Gonghuan, Zhu Zhenmin, Gong Xiufen. Fundamentals of Acoustics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001. (in Chinese).

[9] 朱松盛, 黄凤鸣, 高玉. 可在线编程的多功能单片机实验板[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2006, 6(2): 42-45.
Zhu Songsheng, Huang Fengming, Gao Yu. In-Circuit programmable MCU board with multi-function[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2006, 6(2): 42-45 (in Chinese).

[10] 方红, 丁敏. 惯性仪表数据采集模块的设计与实现[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(4): 22-25.
Fang Hong, Ding Min. The design and realization of a data sampling module for inertial sensors[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(4): 22-25 (in Chinese).

[11] 王寅观, 杨海涛, 孙庆德, 等. 超声波 H₂O₂ 在线式浓度计的研制[J]. 化工学报, 2001, 52(2), 158-161.
Wang Yinguan, Yang Haitao, Sun Qingde, et al. Development of on-line ultrasonic H₂O₂ concentration meter[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(2), 158-161. (in Chinese).

[12] Bhatti SS, Bhatti R, Singh S. Ultrasonic testing of milk[J]. Acustica, 1986, 62(2): 96-99.

[13] 陈培侨. 非脂乳固体和脂肪含量影响酸牛乳粘度的研究[J]. 食品科学, 1998, 19(7): 9-10.
Chen Peiqiao. Studies on the influences of NFS and fat content to the viscosity of yoghurt[J]. Food Science, 1998, 19(7): 9-10 (in Chinese).

[责任编辑: 刘 健]