

基于超声波传播特性的液态食品质量检测系统研制

刘东红¹, 叶兴乾¹, 周向华¹, 吴昭同²

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029; 2. 浙江大学机械与能源学院, 杭州 310027)

摘要: 研制了一个适用于液态食品超声波传播特性检测的装置, 利用超声脉冲发射和接收测定液态食品的超声传播速度、声衰减和声阻抗。声速检测采用比较法, 相对误差小于0.5%。利用声传播途径通过方程计算声衰减和声阻抗, 计算中考虑了传播过程的声反射和声透射, 结果具有一定的准确性。利用该装置研究发现苹果汁饮料中原果汁浓度与声速有良好的线性相关, 具较好的实用性, 可以应用于食品质量的超声检测。

关键词: 超声波; 检测装置; 声速; 声衰减; 声阻抗

中图分类号: TP559; TS207

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0182-04

0 引言

食品工业中存在大量的液态形式的原料、成品及半成品, 在生产过程中需要对其物理化学特性进行检测和控制, 而传统的检测分析方法对各种成分的物理化学特性检测通常采用化学试剂法, 这些方法检测速度慢, 需要准备大量样品或破坏食品成分, 无法适应在线检测的需要。超声检测技术是利用超声波在媒质中传播时, 声传播速度、声衰减和声阻抗等超声量和媒质特性及状态有关的特性进行测定, 通过测量这些声学量, 可以了解被测媒质的特性和成分的变化, 判断材料内部的物理化学性质^[1]。与其他检测方法相比, 超声检测有其独特的优势: 非破坏性、精确、设备廉价, 而且能够对高浓度食品和光不透明性材料进行检测; 近几年正成为国内外倍受关注的研究方向; 目前的研究成果已表明, 超声波技术不仅可以应用于对液体食品中掺假检测和质的研究^[2,3], 同时对食品成分和颗粒大小的检测^[4-6]和监测食品加工过程的相变^[7]也具有实用性。

利用媒质的超声特性对液态食品的成分和品质特性进行分析具有巨大的优越性和发展潜力, 但目前国内在超声液态食品特性方面的研究开展较少, 也缺乏相应的研究装置, 因此本文研制了一种能应用于液态食品超声传播特性的检测系统, 可以应用于液态食品的超声传播特性研究, 为超声检测技术在食品品质检测中的应用打下基础。

1 系统组成

超声波检测技术在金属和混凝土等物质的缺陷检测中已经得到了广泛的应用, 同时也有了相关的成熟检测产品, 但由于液态食品与固体物质有着不同的超声波传播特性, 因此本文设计了适用于液态食品的超声特性

检测装置。

系统的原理框图如图1所示, 由测试池、脉冲发生电路、I/O接口电路、整形放大电路、A/D转换电路、计算机组成。两个超声换能器用环氧树脂相向粘贴在方形玻璃测试池的两侧, 一个为发射平面, 一个为接收平面。换能器由来自脉冲发生器的电子尖脉冲触发, 产生一个超声宽频脉冲, 经测试池器壁和样品中传播, 以及在器壁反射后被接收换能器所接收。接收的超声信号经整形放大和A/D转换后通过软件记录分析。所有检测过程都由微机进行控制。超声换能器由中国船舶总公司715所提供, 中心频率为2MHz, -6dB带宽为20%, A/D转换卡采用中国科学院电子所的20-8B型高速数据采集卡, 转换速率为50MHz, 测试池在测试过程中用恒温水浴保持温度, 温度误差为±0.1。

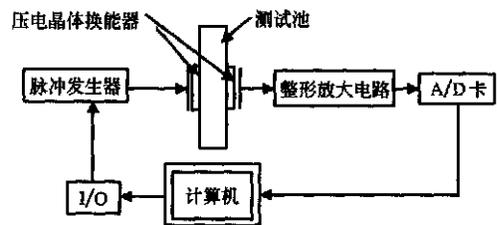


图1 液态食品超声波传播特性检测系统原理框图

Fig 1 Configuration of ultrasonic measurement system for liquid food

2 测试原理

换能器产生的超声脉冲的传播途径和接收波形分别如图2、3所示, 其中波1为超声经器壁—样品—器壁传播的波形, 波2、3为反射回波的接收波形。因此根据接收信号, 可以计算出超声波在样品中的传播特性。

1) 声速的确定

超声波在媒质中传播时, 其传播速度取决与媒质内部成分组成及其相互作用和媒质所处的外部环境因素(如温度、压强等)。大多数食品溶液及有机混合溶液中声速与溶液浓度具有良好的线性关系, 因此可以通过测量声速来测量溶液中成分的含量。

收稿日期: 2004-03-18 修订日期: 2004-07-09

基金项目: 科技部“十五”科技攻关奶业重大专项项目“乳品质量安全监测关键技术研究与应用”资助项目(2002BA518A06)

作者简介: 刘东红, 副教授, 杭州市凯旋路268号 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310029。Email: dhliu@zju.edu.cn

通讯作者: 吴昭同, 教授, 博士生导师, 杭州市玉泉路 浙江大学机械与能源学院, 310027

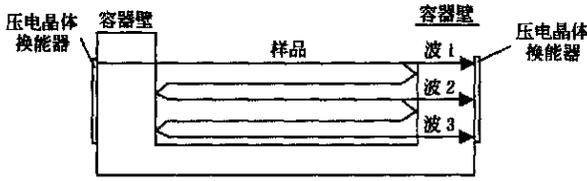


图 2 超声脉冲的传播途径

Fig 2 Transmission route of ultrasonic pulse

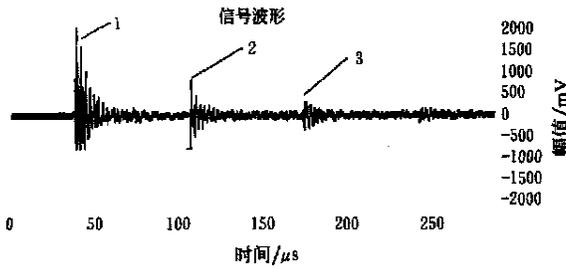


图 3 换能器接收波形

Fig 3 Typical wave signals received by the transducer

根据传播路径, 脉冲传播时间 t 为

$$t_1 = \frac{2x}{c_b} + \frac{l}{c_s} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{2x}{c_b} + \frac{3l}{c_s} \quad (2)$$

因此可以根据接收脉冲的时间差来计算出超声波在样品中传播的时间, 从而计算出声速

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l}{c_s} \quad (3)$$

$$c_s = \frac{2l}{\Delta t} \quad (4)$$

式中 x, l ——容器壁厚度和样品测试池长度; c_b, c_s ——容器壁和样品中的声速。

根据已知的蒸馏水声速(20℃, 1483 m/s) 标定测试池长度 l , 即可根据接收脉冲间的时间差计算出声速。或也可将样品中传播声时与蒸馏水中传播的声时比较即可计算出超声在需检测的样品中的传播速度

$$c_s = \frac{\Delta t_w}{\Delta t_s} c_w \quad (5)$$

式中 $\Delta t_w, \Delta t_s$ ——在蒸馏水和样品中的声时。

2) 声阻抗和声衰减的确定

超声波在媒质中传播时, 其振幅随着传播距离的增大而逐渐减小的现象称为声衰减。衰减的主要来源是媒质对超声的吸收和颗粒结构对超声波的散射。吸收源于媒质的粘性、热传导、边界摩擦和各种迟豫现象等等, 使得声能转化为其他形式的能量。散射的产生则是由于媒质本身的晶粒结构、媒质中的悬浮粒子、杂质和气泡等造成的, 它将超声波不同方向散射, 造成接收方向超声波能量的降低。介质在两不同物质中传播时, 在界面处就会发生反射现象, 反射波的强度决定于声波在两物质中的阻抗差异大小, 声波在媒质中的阻抗与媒质密度和微观结构密切相关。因此媒质中的声阻抗和声衰减反映

出介质的分子水平的性质和相互作用, 这在研究非均匀体系特性时是非常重要的参量。

在本装置中, 超声脉冲在容器壁、样品和容器壁间是以垂直入射形式进行传播的, 因此在容器壁和样品界面上有透射和反射现象, 在容器壁和样品中传播会逐渐衰减。具体传播途径如图 2 所示, 根据传播途径, 接收波的幅值分别为

$$A_1 = A_0 T_{bs} T_{sb} e^{-2\alpha_b x} e^{-\alpha_s l} \quad (6)$$

$$A_2 = A_0 T_{bs} T_{sb} R_r^2 e^{-2\alpha_b x} e^{-3\alpha_s l} = A_1 R_r^2 e^{-2\alpha_s l} \quad (7)$$

式中 T ——透射系数; R_r ——反射系数; α ——衰减系数; 下标 s ——样品; 下标 b ——容器壁; 下标 c ——已知参数的标定液。

根据反射系数和透射系数与媒质声阻抗的关系^[18]

$$T_{bs} = \frac{2Z_s}{Z_s + Z_b}$$

$$T_{sb} = \frac{2Z_b}{Z_s + Z_b}$$

$$R_r = \frac{Z_b - Z_s}{Z_s + Z_b}$$

以及超声波在样品和已知参数的标定液中的传播特性可得

$$\frac{A_{2c}}{A_{1c}} = \left(\frac{Z_b - Z_c}{Z_b + Z_c} \right)^2 e^{-2\alpha_c l} \quad (8)$$

$$\frac{A_{2s}}{A_{1s}} = \left(\frac{Z_b - Z_s}{Z_b + Z_s} \right)^2 e^{-2\alpha_s l} \quad (9)$$

$$\frac{A_{1c}}{A_{1s}} = \left(\frac{Z_b + Z_s}{Z_b + Z_c} \right)^2 \frac{Z_c}{Z_s} e^{(\alpha_s - \alpha_c) l} \quad (10)$$

因此, 根据式(8), 利用标定液接收波的幅值 A_{1c}, A_{2c} 和标定液已知的声阻抗 Z_c 、声衰减 α_c , 可以求出容器的声阻抗 Z_b 。再联立方程(9)和(10), 可得如下三元三次方程

$$Z_s^3 + (K + Z_b)Z_s^2 + (K \cdot Z_b - Z_b^2)Z_s - Z_b^3 = 0 \quad (11)$$

其中: $K = \frac{(Z_c + Z_b)^2}{Z_c} \cdot \frac{A_{1c}}{A_{1s}} \cdot \sqrt{\frac{A_{2s}}{A_{1s}}} \cdot e^{\alpha_c l}$

利用计算的容器壁声阻抗 Z_b , 已知的标定液声阻抗 Z_c 、声衰减 α_c , 超声在样品和标定液中传播的接收波幅值 A_{1s}, A_{2s}, A_{1c} , 解方程取其中一合理的实根即可求出样品的声阻抗 Z_s , 再将结果代入(9)式即可求出声衰减 α_s 。

3 检测精度

利用装置对不同温度蒸馏水以及 20℃ 条件下对不同的液体进行测定, 测得数据如表 1。

表 1 和表 2 表明该装置用于声速测量值与参考值相比较相对误差小于 0.5%, 这是由于声速检测过程中采用的计算方法是比较法, 因此计算结果精度等同于参考值的精度。同时由于声时的检测能精确到 0.02 μs, 因此用该装置的测试精度较高, 可以用于绝对声速的检测。

表 1 不同温度条件下蒸馏水超声传播特性参数值比较

Table 1 Comparison of ultrasonic properties of distilled water at different temperatures

温度 /	测量值			参考值		
	声速/m · s ⁻¹	声阻抗/kg · (s · m ²) ⁻¹	声吸收/10 ⁻¹⁷ s ² · cm ⁻¹	声速/m · s ⁻¹	声阻抗/kg · (s · m ²) ⁻¹	声吸收/10 ⁻¹⁷ s ² · cm ⁻¹
20	1482.72	1.4820	25.30	1482.7	1.480	25.3
35	1520.19	1.5235	16.38	1520.1	1.511	17.0
40	1528.94	1.5387	14.30	1528.4	1.516	15.5
45	1539.19	1.5565	14.01	1536.7	1.522	13.2
50	1546.26	1.6358	13.68	1542.9	1.524	12.0

表 2 20 条件下常见液体超声传播特性值比较

Table 2 Comparison of ultrasonic properties of different liquids at temperature of 20

液体名称	测量值			参考值		
	声速/m · s ⁻¹	声阻抗/kg · (s · m ²) ⁻¹	声吸收/10 ⁻¹⁷ s ² · cm ⁻¹	声速/m · s ⁻¹	声阻抗/kg · (s · m ²) ⁻¹	声吸收/10 ⁻¹⁷ s ² · cm ⁻¹
纯水	1483.36	1.4820	25.30	1483.0	1.48	25.3
甲醇	1509.58	0.8501	30.85	1509.40	0.887	33.7
酒精	1169.31	0.9125	55.69	1166.0	0.9219	55.1
甘油	1918.38	2.2729	914.5	1923.0	2.425	2700
乙二醇	1667.03	1.8320	214.2	1666.0	1.854	550

注: 参考值来自文献[9]。

从表 2 可以看出声吸收和声阻抗有一定的误差, 这主要是由于超声波在媒质中传播时, 在媒质中同时存在沿正向传播的压缩波和负向传播的反射波, 两个波会发生相互迭加现象, 而在计算过程中, 只考虑了理想状态, 忽略了入射波与反射波的相互作用, 因此给测试计算结果带来一定的误差。另外, 由于声衰减具有频率依赖性, 而参考值的测试频率与装置的测试频率有所不同, 因此也使得甘油、乙二醇的声吸收有较大差异。但从整个趋势看, 测试的吸收值和阻抗值和参考值有着相同的变化趋势, 因此在某些应用场合中仍有参考价值。

4 应用研究

在果汁和水果饮料生产工业中, 为了生产不同口味的产品, 生产部门常将鲜榨出来的原果汁加水稀释成不同比例的中间产品, 然后根据需要加入蔗糖、风味添加剂等制成果汁、果露等饮料。利用该装置对果汁饮料进行研究发现, 超声声速与原果汁含量之间存在良好的线性关系。将苹果原汁以蒸馏水稀释成不同比例, 测其声速, 原果汁浓度与声速关系如图 4 所示, 结果表明苹果原汁含量与溶液中的声速呈线性相关。因此, 超声检测法能够在水果饮料生产线上实时检测水果原汁的稀释程度, 检测精度高, 速度快, 能够满足在线监测的需要。

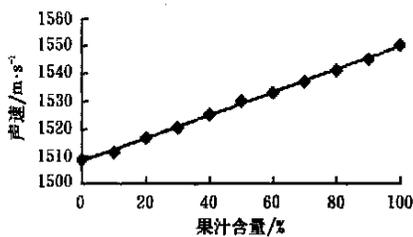


图 4 苹果汁饮料中果汁含量与声速关系

Fig 4 Juice content vs ultrasonic velocity in apple juice drink

5 结论与展望

1) 研究表明, 设计的装置利用超声脉冲接收波形, 可以精确地测定超声在媒质中传播的声速、声衰减和声阻抗, 利用装置和相关的数学处理方法, 可以一次性获得较全面的超声参量信息。

2) 目前, 绝大多数的超声测试装置在对超声速检测过程中主要是检测声时, 而对声速绝对值的测量缺乏较高的精度, 该装置标定后直接可以用于绝对声速的检测, 具有较高的精度, 因此具有一定的实用性。

3) 通过改进装置减少侧壁反射对波传播的影响, 以及在计算过程中引入反射迭加因子, 可以进一步提高声阻抗、声衰减的测试精度。

4) 利用该装置对苹果汁饮料进行研究, 表明声速与原果汁浓度呈良好的线性相关, 因此在果汁及果汁饮料生产中具有应用前景。

5) 国外的研究已利用超声波检测牛奶中脂肪含量和非脂固形物含量^[1,2]、检测食品中总糖、酒精含量^[5,6]等。因此, 该装置的开发为国内开展超声检测技术在液态食品中的应用研究打下了基础。

[参 考 文 献]

[1] Povey M J W, Mason T J. Ultrasound in food processing [M]. Blackie Academic & Professional, 1998

[2] Asher R C. Ultrasonics in chemical analysis [J]. Ultrasonics, 1987, 25, 17- 19

[3] 杨瑞科, 陈启敏. 乳液状食品的超声频谱分析(2)——牛奶变质过程的定量实验分析[J]. 声学技术, 1995, 14, 33- 34

[4] Miles C A, Fursey G A J, Jones R C D. Ultrasonic estimation of solid/liquid ratios in fats, oils and adipose tissue [J]. Journal of Science of Food and Agriculture, 1985, 36: 215- 228

[5] McClements D J. Ultrasonic characterization of foods and

- drinks: principles, methods, and applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1997, 37(1): 1-46
- [6] Forrest I Using sound to measure alcohol in-line during distillation[J]. *Brew Distill Int*, 1992, 23, 34-42
- [7] Hussin A B B H. An investigation into the use of ultrasonics to monitor phase changes and dilation in fats and oils[D]. Ph. D. dissertation, University of Leeds, 1982
- [8] Henning B, Daur P, Prange S, et al In-line concentration measurement in complex liquids using ultrasonic sensors[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38, 799-803
- [9] 同济大学声学研究所. 超声工业测量技术[M]. 上海: 上海人民出版社, 1977.

Experimental measurement equipment for monitoring the liquid foods based on the ultrasonic transmission properties

Liu Donghong¹, Ye Xingqian¹, Zhou Xianghua¹, Wu Zhaotong²

(1. *College of Bio-system Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;*

2. *College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)*

Abstract: An experimental equipment for measuring the ultrasonic transmission properties in liquid foods was developed. The equipment is based on pulse-echo technique, which can be used to measure the ultrasonic velocity, attenuation coefficient and specific acoustic impedance of liquid food samples. The relative error of the velocity is less than 0.5%. Measurements of attenuation coefficient and acoustic impedance are based on the ultrasonic transmission route and the acoustic reflection and transmission so that the accuracy is same fine. The equipment was used to research the relationship between ultrasonic velocity and raw cyrup concentration in malic juice. The result indicates that they have good correlation. Therefore, the equipment is practical and can be used for measurement of food quality.

Key words: ultrasound; measurement equipment; ultrasonic velocity; acoustic attenuation; acoustic impedance