

文章编号:1007-2934(2018)03-0015-05

利用超声光栅测量液体声速的影响研究

廖子莹, 向文丽*

(楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

摘 要: 根据声光效应原理, 利用分光计和超声光栅对生活中几种常见液体(蒸馏水、75%乙醇、食用油、5%NaCl 溶液、30%葡萄糖溶液)中的声速进行了测量, 同时测量了不同浓度葡萄糖溶液中的超声波声速, 并利用 Origin 软件对其进行数据拟合分析, 结果显示: 不同液体介质和同种液体不同浓度对超声波声速的测量均有一定程度的影响。在几种常见的液体中, 葡萄糖溶液中测量的声速误差最小; 超声波在葡萄糖溶液中传播的速度在一定浓度范围内线性增大, 而在浓度为 32% 葡萄糖溶液中的声速的拟合残差最小, 该浓度下测量的超声波声速精确度最高, 可作为测量超声波在葡萄糖溶液中传播速度的有效浓度。

关键词: 超声光栅; 声速; 液体介质; 浓度; 葡萄糖溶液

中图分类号: O 4-34

文献标志码: A

DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2018.03.005

1922 年布里渊(L· Brillouin)曾预言, 当高频超声波在液体中传播时, 如有可见光横向的通过该液体, 则可见光将产生衍射现象。这一假说在十年后得到了证实, 此现象被称为声光效应^[1]。近年来, 随着科技的不断发展和成熟, 声光相互作用已是现代高新设备中必不可缺的技术, 在医学、电气工程等方面得到日益广泛的应用^[2]。由于超声波是一种纵向应力波, 其声压会使液体分子在时间和空间上作周期性变化, 从而液体的折射率亦作周期性变化, 形成疏密波。当平行光沿垂直于超声波传播方向通过液体时, 平行光就像通过了一个普通的透射光栅, 光栅间距等于声波波长, 平行光通过这个光栅时会发生衍射现象。因此这种由超声波在液体中传播所形成的液体光栅就称之为超声光栅^[3,4]。

超声波在液体介质中会发生反射、折射、衍射、散射等传播现象, 其传播的速度与介质的弹性有着紧密的联系^[5]。目前已有肖安琪^[3]、王晓颖等^[6]人研究过液体介质的温度、超声频率、光源等对超声波在液体中传播速度的影响, 并得出很好的数据拟合。但其研究主要针对单种液体去讨论, 没有对不同种类的液体进行分析比较。为了分析不同种类的液体自身折射率对超声波在其间传播速度的影响, 本文运用了控制单一变量的思想, 通过超声光栅衍射实验对生活中常见的蒸馏

水、75%乙醇、食用油、5%NaCl 溶液、30%葡萄糖溶液中的声速进行了测量, 并与相应的理论值进行比对。同时, 本文不仅分析不同液体介质对超声波传播速度的影响, 而且测量了不同浓度葡萄糖溶液中的超声波声速, 并应用 Origin 分析研究了浓度对葡萄糖溶液中超声波传播速度的影响。

1 超声光栅测量声速的装置及原理

本实验采用 HLD-SCY-I 型声光衍射仪(工作电压为 220 V 50 Hz, 频率可连续调节范围是: 0.00~10.00 MHz), 该装置由超声信号源、液体槽、锆钛酸铅陶瓷片、高频信号连接线等组成, 如图 1、图 2 所示, 在调节好的 JJY 分光计上放置装有 PZT 晶体的液槽, 用波长为 λ 的单色光源与可调狭缝(S)及平行光管中的会聚透镜(L_1)组成平行光系统, 如图 3 所示。

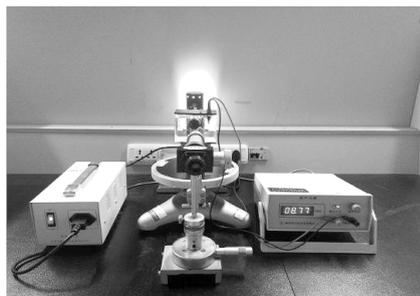


图 1 超声光栅衍射装置实物图(正视图)

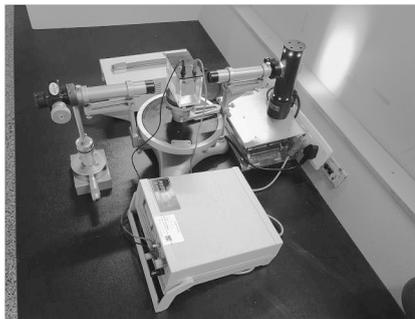


图2 超声光栅衍射装置实物图(侧视图)

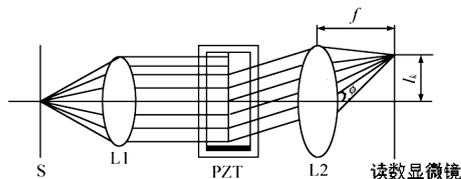


图3 超声光栅衍射光路图

让平行的光束垂直通过装有锆钛酸铅陶瓷片(PZT晶片)的玻璃液槽,在玻璃槽的另一侧,用自准直望远镜中的物镜(L_2)和测微目镜组成的测微望远系统来观察。若振荡器使PZT晶片发生超声振动,形成稳定的驻波,则在测微目镜中即可观察到清晰的衍射光谱^[3,7],如图4所示。

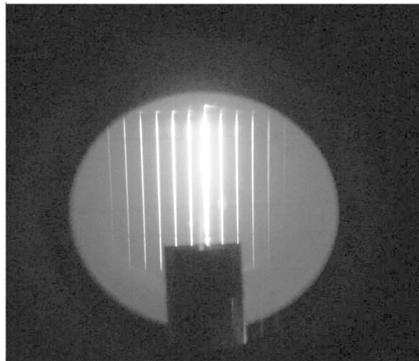


图4 读数显微镜中观察到的衍射条纹

表1 读数显微镜中衍射条纹位置读数, $t=16\text{ }^\circ\text{C}$ $f=170\text{ mm}$, $\lambda=589.3\text{ nm}$ $\nu=8.74\pm 0.02\text{ MHz}$

溶液介质	谱线位置/mm					
	1	2	3	4	5	6
蒸馏水	2.374	2.986	3.600	4.204	4.817	5.431
75%乙醇	1.854	2.534	3.218	3.902	4.590	5.271
5%NaCl溶液	2.471	3.055	3.631	4.222	4.805	5.389
30%葡萄糖溶液	2.652	3.209	3.775	4.331	4.899	5.456
食用油	1.917	2.538	3.160	3.770	4.390	5.002

2.2 实验数据处理与结果分析

用逐差法计算出各谱线衍射条纹的平均间距 Δ_k ,然后利用超声波在液体中传播的速度公式求出其声速,并与之相应理论值进行比对计算分析^[9],见表2。(表中括号内的数据为该测量值的相对误差)。

根据图3中的几何关系可以看出,当 φ_k 很小时,有

$$A \sin \varphi_k = \frac{l_k}{f} \quad (1)$$

其中 A 为超声波波长, l_k 为 k 衍射光谱至零级衍射光谱的距离; f 为透镜的焦距(JJY分光计 $f=170\text{ mm}$),并可认为各级衍射条纹是等间距分布的。

$$\text{由光栅方程}^{[8]} \quad A \sin \varphi_k = k\lambda \quad (2)$$

$$\text{可得超声波的波长} \quad A = \frac{k\lambda}{\sin \varphi_k} = \frac{k\lambda f}{l_k} \quad (3)$$

超声波在液体中传播的速度

$$\nu = A\nu = \frac{\lambda f \nu}{\Delta_k} \quad (4)$$

式中的 ν 为振荡器和锆钛酸铅陶瓷片的共振频率(频率显示器上可读出) λ 为被测光波波长(钠黄光 $\lambda=589.3\text{ nm}$), Δ_k 为相邻的两条衍射条纹间距。

2 不同液体介质对声速的影响探究

2.1 实验设计

采用钠黄灯($\lambda=589.3\text{ nm}$)作为光源,利用超声光栅对超声波在生活中常见液体(蒸馏水、75%乙醇、食用油、5%NaCl溶液、30%葡萄糖溶液)中传播的速度进行测量,调节超声波的共振频率为 $8.74\pm 0.02\text{ MHz}$ 并保持不变,以满足单一变量,通过读数显微镜逐级读出黄色谱线的相对位置读数,其测量数据见表1。

通过计算及相对误差的分析,显而易见,几种不同液体介质对声速的测量都会造成一定程度的影响,且不同的液体介质对其造成的误差影响不同,从数据的对比可以得知在这几种常见的液体中,葡萄糖溶液相对误差最低,具有进一步进行研究的实验价值。

表 2 衍射条纹间距及声速的计算对比

溶液介质	平均间距 $\Delta l_k / \text{mm}$	声速 (m/s)	相对理论 (m/s)	相对 误差/%
蒸馏水	0.610 2(0.20%)	1 434.91	1 482	3.177
75%乙醇	0.684 1(0.14%)	1 279.90	1 180	8.466
5%NaCl 溶液	0.584 3(0.24%)	1 498.51	1 545	3.009
30%葡萄糖溶液	0.561 1(0.26%)	1 560.47	1 588	1.734
食用油	0.616 3(0.25%)	1 420.71	1 472	3.484

3 不同浓度的葡萄糖溶液对液体声速的影响研究

由上述讨论得出生活中几种常见液体中,超声波在葡萄糖溶液中传播速度误差最小,然而液

表 3 不同浓度的葡萄糖溶液测量数值及对应的声速计算,其中

$t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ $f = 170 \text{ mm}$ $\lambda = 589.3 \text{ nm}$ $\nu = 8.80 \pm 0.01 \text{ MHz}$

百分比浓度 /%	谱线位置/mm						平均间距 $\Delta l_k / \text{mm}$	声速 (m/s)
	1	2	3	4	5	6		
0	2.618	3.226	3.846	4.459	5.080	5.700	0.6166(0.25%)	1 429.76
2	2.253	2.855	3.468	4.082	4.700	5.312	0.613 1(0.27%)	1 437.93
4	2.868	3.475	4.087	4.696	5.306	5.913	0.609 4(0.10%)	1 446.66
6	2.920	3.522	4.128	4.733	5.342	5.952	0.606 3(0.14%)	1 454.50
8	2.275	2.877	3.482	4.083	4.688	5.287	0.602 7(0.12%)	1 462.74
10	2.452	3.050	3.652	4.249	4.852	5.450	0.599 7(0.12%)	1 470.06
12	2.532	3.129	3.730	4.322	4.918	5.518	0.596 3(0.17%)	1 478.43
14	2.950	3.538	4.134	4.721	5.319	5.919	0.593 0(0.27%)	1 486.66
16	1.979	2.563	3.155	3.749	4.331	4.924	0.589 6(0.25%)	1 495.24
18	2.467	3.054	3.642	4.226	4.815	5.401	0.586 5(0.09%)	1 503.15
20	2.018	2.604	3.184	3.769	4.350	4.937	0.583 3(0.14%)	1 511.39
22	2.501	3.066	3.640	4.225	4.810	5.392	0.580 0(0.40%)	1 520.00
24	2.502	3.067	3.644	4.225	4.802	5.378	0.576 9(0.28%)	1 528.16
26	2.028	2.609	3.181	3.754	4.327	4.901	0.573 8(0.17%)	1 536.41
28	2.501	3.073	3.643	4.213	4.784	5.353	0.570 4(0.05%)	1 545.57
30	2.249	2.817	3.388	3.950	4.517	5.090	0.567 0(0.14%)	1 554.84
32	2.110	2.674	3.238	3.801	4.364	4.931	0.563 8(0.08%)	1 563.66
34	1.700	2.260	2.821	3.380	3.942	4.504	0.560 6(0.06%)	1 572.59
36	1.701	2.260	2.818	3.374	3.932	4.489	0.557 3(0.05%)	1 581.90
38	2.807	3.364	3.918	4.470	5.026	5.581	0.554 2(0.07%)	1 590.75
40	2.655	3.205	3.754	4.308	4.858	5.409	0.551 2(0.09%)	1 599.41
42	2.810	3.359	3.906	4.453	5.002	5.554	0.548 2(0.10%)	1 608.16

3.2 实验数据处理与结果分析

利用 Origin 软件对以上数据进行拟合分析,如图 5 所示,发现葡萄糖溶液的浓度(0%~42%之间)与超声波在其中传播的速度趋于——对应关系,单调性极佳,即声速随葡萄糖溶液浓度的增大而线性增大,同时还得到定量的拟合方程为:

体的压缩系数与浓度有着紧密的联系,浓度的高低亦会影响液体分子的数目、运动以及分子间的碰撞次数,从而影响液体的折射率^[10]。为了更加精确量化分析,本文对葡萄糖溶液的浓度进行梯度配比,探究了液体浓度对声速的影响。

3.1 实验设计

采用与前面实验相同的装置和方法,对不同浓度(0%~42%)的葡萄糖溶液进行测量和研究,调节超声波的共振频率为 $8.80 \pm 0.01 \text{ MHz}$,进而探索不同浓度的葡萄糖溶液对液体声速的影响。测量结果见表 3(表中括号内的数据为该测量值的相对不确定度)。

$\nu = 1\ 428.069 + 424.338c$ (c 为葡萄糖溶液的百分比浓度)。拟合的线性相关系数 R^2 达到了 0.999 73,置信概率极高,由此,液体的浓度亦是影响超声波在其中传播速度的一个重要因素。从图 6 的拟合残差图中我们可以看出,浓度为 32%的葡萄糖溶液相对残差值是最小的,该浓度可作为测量超声

波在其传播速度的有效参考值。

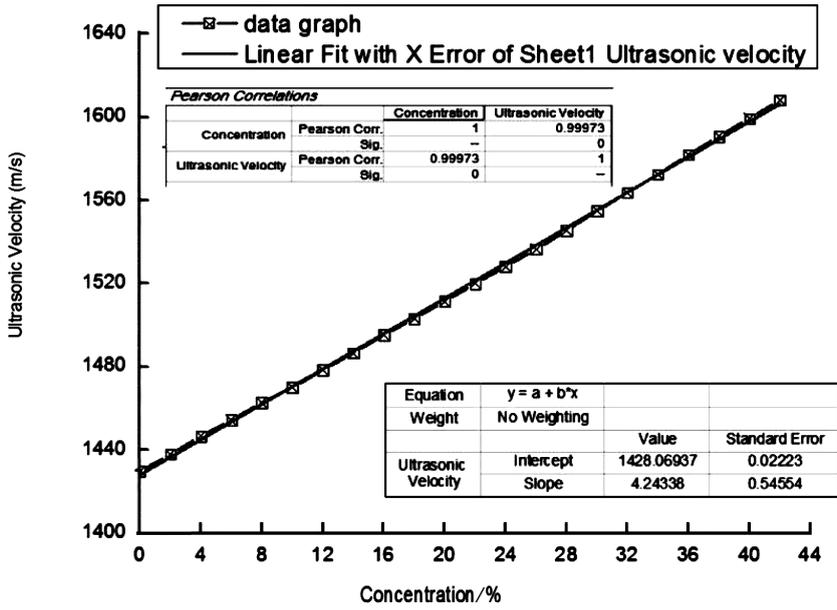


图 5 不同浓度葡萄糖溶液的速度拟合图

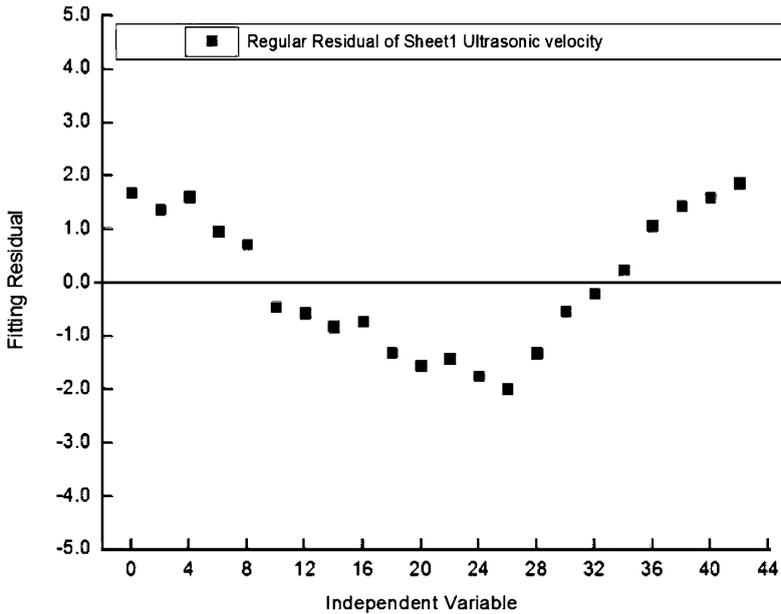


图 6 不同浓度葡萄糖溶液的拟合残差图

4 结论

本文运用了控制单一变量的思想,通过超声光栅衍射实验对生活中常见液体(蒸馏水、75%乙醇、食用油、5% NaCl 溶液、30% 葡萄糖溶液)中的声速进行了测量,同时对不同浓度葡萄糖溶液中的声速进行了研究,并应用 Origin 软件进行数据拟合分析,得出结论:

(1) 不同液体介质对超声波声速传播具有一定程度的影响,几种液体中,30% 葡萄糖溶液中的声速测量误差(1.734%)最小,75% 乙醇的测量误差最大;

(2) 葡萄糖溶液的不同浓度对超声波声速测量具有一定程度的影响,通过 Origin 软件对一定范围浓度下葡萄糖溶液中的声速进行拟合,拟合线性相关系数 R^2 高达 0.999 73,置信概率极高,其中浓度为 32% 葡萄糖溶液中声速的拟合残差

最小,该浓度下测量的声速精确度最高,可作为测量超声波在葡萄糖溶液中传播速度的有效浓度;

(3)利用超声光栅测量液体中的声速,是大学物理实验的一个重要内容,本实验测量了超声波在几种常见液体中的传播速度,对于大学物理传统实验的拓展具有一定的实验参考价值,同时本实验补充了葡萄糖溶液中声速与浓度的关系,充实了大学物理实验的内容,32%葡萄糖溶液对于学生来说也是比较容易获得的一种液体,可以进一步推广采纳。

参考文献:

- [1] 翁存程,林冬松.行波与驻波超声光栅衍射的对比研究[J].大学物理实验,2015,28(6):65-68.
- [2] 吴庚柱,王建华.超声光栅测液体声速原理和实验[J].大学物理实验,1999,12(4):4-8.
- [3] 肖安琪,刘烈.超声光栅研究声速与溶液浓度及温

度的关系[J].实验室研究与探索,2012,31(3):44-47.

- [4] 罗懿宸,高也,武晓忠,等.利用超声光栅研究声速与液体性质[J].大学物理,2017,36(8):76-81.
- [5] 张卫华.用超声法测量葡萄糖溶液浓度[J].青海大学学报:自然科学版,2011,29(4):23-25.
- [6] 王晓颖,王涛,李武军.超声光栅实验中声致折射率变化的研究[J].大学物理,2012,31(5):50-53.
- [7] 梅振林,隋成华.超声光栅测量声速的研究及仪器化实现[J].大学物理实验,2004,17(1):28-31.
- [8] 王昆林,岳开华.普通物理实验[M].西南交通大学出版社,2014(8):248-249.
- [9] 徐金荣,张荣.超声光栅理论与实验研究[J].安徽建筑工业学院学报,2010,18(1):83-86.
- [10] 赵彩霞,刘小利.液体的压缩系数与浓度的关系[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2013,31(5):765-769.

Influence Study on Measurement of Sound Velocity in Liquids by Ultrasonic Grating

LIAO Zi-ying, XIANG Wen-li *

(ChuXiong Normal University, Yunnan Chuxiong 675000)

Abstract: According to the principle of acousto-optic effect, the velocities of ultrasonic waves in the several common liquids (distilled water, 75% ethanol, edible oil, 5% NaCl solution and 30% glucose solution) were measured by spectrometer and ultrasonic grating. The concentrations of different qualities of glucose solution were measured too, and the data were analyzed by origin software fitting. The results show that the different liquid medium and the different concentrations of the same liquid medium had a certain degree influence on the measurement of ultrasonic velocity. The error of glucose solution is the smallest of the several common liquids. The velocity of ultrasonic wave propagation in glucose solution increases linearly in a certain concentration range. The fitting residual error of the sound velocity in the concentration of 32% glucose solution is the smallest and the highest accuracy, and this concentration can be used as an effective one for measuring the velocity of ultrasonic wave propagation in glucose solution.

Key words: ultrasonic grating; sound velocity; liquid medium; concentration; glucose solution