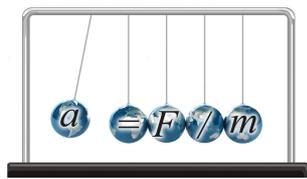


文章编号:1005-4642(2025)07-0009-04



普通物理实验

基于超声光栅测量液体浓度和声速

郭永利^a, 童童^a, 王红理^a, 常凯歌^a, 朱鹏羽^b, 王智辉^c
(西安交通大学 a. 物理学院; b. 能动学院; c. 电信学部, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于超声光栅研制了测量液体浓度和声速的实验装置, 该装置避开了测量超声光栅与光屏之间的距离, 并使用 CCD 相机拍摄图像测量条纹间距. 利用 Python 开发了集数据计算、数据拟合、数据输出为一体的配套软件, 以实现实验结果的快速输出. 本装置制作简单, 成本较低, 容易操作, 此外其原理简单易于理解, 数据处理结果还可以进行数字化显示. 利用该装置还可以研究温度对声速的影响规律.

关键词: 液体浓度; 声速; 超声光栅

中图分类号: O657.5; O422.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.002

声速测量是大学物理实验中的基本内容. 目前, 测量液体中声速的方法有很多, 例如共振干涉法^[1]、相位比较法^[1-2]、时差法^[3]等. 基于声光效应超声光栅测量超声波在液体中的传播速度, 因其精度高而在物理实验教学中广泛应用^[4-5], 但该方法常使用测微目镜来测量衍射条纹间距, 易导致实验者眼睛不适, 而且需要处理大量数据. 因此, 本文引入了现代化的测量技术和数据处理方法, 设计了基于超声光栅测量液体浓度和声速的实验装置, 利用 CCD 相机将衍射图像传输到电脑. 在调节光路过程中, 学生可直接在电脑上观察衍射条纹的变化情况, 这有助于学生深入理解光的波动性. 该装置不仅可以在电脑上用专用软件直接测量条纹间距, 还开发了相对应的数据处理软件进行数据记录和数据拟合, 同时还设计了可视化窗口, 使数据处理结果数字化显示. 此外, 利用该装置还可以开设液体浓度测量实验, 将其应用在创新物理实验教学中, 可提高学生的动手实践能力和创新能力.

1 基本原理

1.1 超声光栅原理

超声波在液体中以弹性纵波的形式传递, 使

得液体的密度在超声波传播方向上发生周期性变化, 从而使液体的折射率也发生周期性变化. 当光线垂直于声波传播方向通过液体时, 不同位置的光波经历的光程不同, 使原来是平面波的光波变为弯曲的非平面波, 如图 1 所示. 这种对光的作用过程与相位光栅对光的作用过程类似, 因而光线通过超声光栅时会发生光栅衍射, 这种衍射被称为声光衍射. 超声光栅的光栅常量是液体折射率在空间变化的周期, 即超声波的波长^[6]. 超声光栅的应用较为广泛, 可以用于测量液体密度和弹性模量等^[7-8].

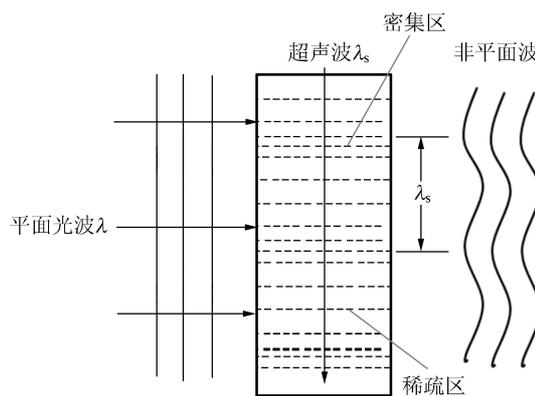


图 1 超声光栅原理^[6]

收稿日期: 2024-11-11; **修改日期:** 2025-01-14

基金项目: 2024 年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项项目 (No. 24SJZX03); 2024 年西安交通大学物理学院本科教改项目; 2024 年西安交通大学第二批产学研合作协同育人项目 (No. 24CXHZ027)

作者简介: 郭永利 (1969—) 女, 陕西扶风人, 西安交通大学物理学院高级工程师, 硕士, 主要从事大学物理实验教学. E-mail: g. y. l. 89307@mail. xjtu. edu. cn

通信作者: 童童 (1993—) 女, 陕西西安人, 西安交通大学物理学院工程师, 硕士, 主要从事大学物理实验教学. E-mail: tongtong. phy@xjtu. edu. cn

当满足声光拉曼-奈斯衍射条件 $\frac{2\pi\lambda Z}{\lambda_s} \ll 1$ (Z 为水槽宽度) 时, 这种衍射近似于平面光栅衍射, 可得如下光栅方程:

$$\lambda_s \sin \theta_k = k\lambda, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中, k 为衍射级数, θ_k 为第 k 级衍射条纹的衍射角, λ 为入射光波长, λ_s 为超声波波长. 若 λ 和超声波频率 f 已知, 根据式(1), 只要知道 $\sin \theta_k$, 即可计算出 λ_s , 进而得到声速 v .

图2为超声光栅实验仪器的原理图, 根据图中的几何关系可得

$$\sin \theta_k \approx \tan \theta_k = \frac{D_k}{2L}, \quad (2)$$

其中, L 为超声光栅到衍射屏的距离, D_k 为2个 $\pm k$ 级衍射条纹之间的距离. 结合式(1)和式(2)可得超声波在该液体中的传播速度为

$$v = \lambda_s f = \frac{2k\lambda f L}{D_k}, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

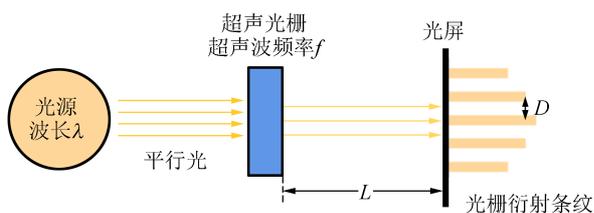


图2 超声光栅实验仪原理图

当 $k=1$, 光源不变, 保持超声光栅到光屏的距离一定, 即 λ 和 L 均为定值时, 此时 $v \propto \frac{f}{D_1}$. 将 D_1 记作 d , 此时式(3)可改写为

$$v = \mu \frac{f}{d}, \quad (4)$$

其中, $\mu = 2\lambda L$ 为换算常数.

实验时, 先测量得到已知频率的超声波在纯水中的1级条纹间距 d , 查出在该温度下超声波在纯水中的传播速度 v , 从而计算出 μ . 根据式(4)可知, 只需保持超声波频率 f 不变, 测量 d , 即可计算出液体中声速. 该方法无需测量超声光栅到光屏之间的距离 L , 从而减小了误差.

1.2 液体浓度和声速的关系

液体中超声波的传播速度受液体浓度和温度的影响, 液体浓度越大, 声速越大, 且液体中声速与浓度一般成线性关系^[9-11], 这是因为浓度增加会使溶液的密度增加, 而声速与介质密度相关, 当

溶液密度增加时, 声速增加. 即

$$v = ac_n + b, \quad (5)$$

式中, a 和 b 为与溶质和温度有关的常数, c_n 为溶液的摩尔浓度.

2 实验装置

将带有狭缝的平行光管、载物台、超声光栅液槽平台、望远镜、工业相机置于可进行位置调节的光具座上, 并集中在箱体中, 为光线传输营造了黑暗的环境, 避免杂光对实验现象的影响, 如图3和图4所示. 调节各部件, 使得观测条纹成像到最清晰状态.

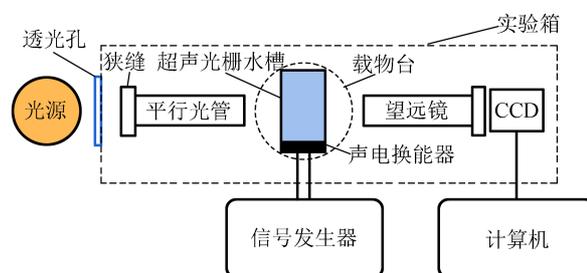


图3 实验装置示意图

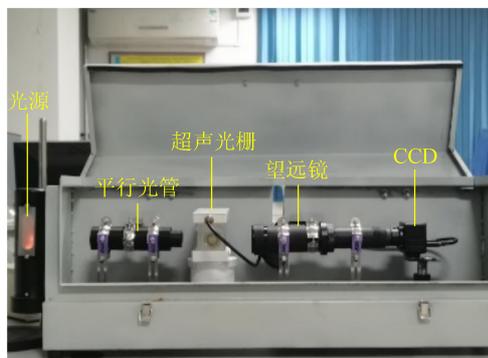


图4 实验装置实物图

3 实验数据的测量与处理

3.1 1级衍射条纹间像素距离的测量

固定超声光栅水槽、望远镜和摄像机的位置, 保持水槽到光屏(观测点)的距离不变. 调节超声波频率, 使成像最清晰后, 保持频率不变; 配制不同浓度的溶液, 置于水槽中; 待溶液稳定、图像清晰后, 使用摄像机拍摄条纹图像, 并传输到电脑, 如图5所示. 用S-EYE软件中的专用测量工具(功能键第2排第5个)直接测量1级衍射条纹的像素间距 d .

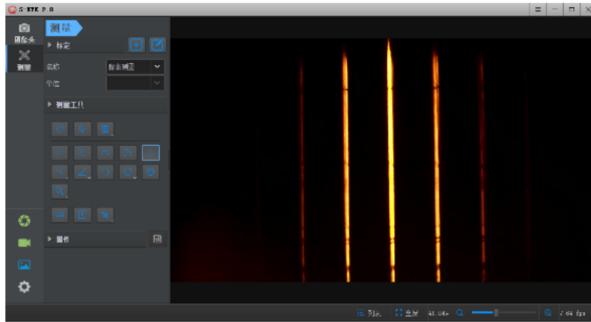


图 5 1 级衍射条纹间距自动测量界面

3.2 数据处理

使用 Python 编写数据处理程序,用于实现数据记录、数据计算、数据拟合等功能,简化了数据处理流程. 数据处理软件的功能包括计算 μ 、绘制拟合曲线并输出拟合函数、计算并输出待测液体浓度 c 和声速 v 等.

数据处理界面如图 6 所示,左上部分为数据记录部分,记录不同液体浓度 c 对应的 1 级衍射条纹间的像素间距 d 和固定的超声频率 f (MHz).

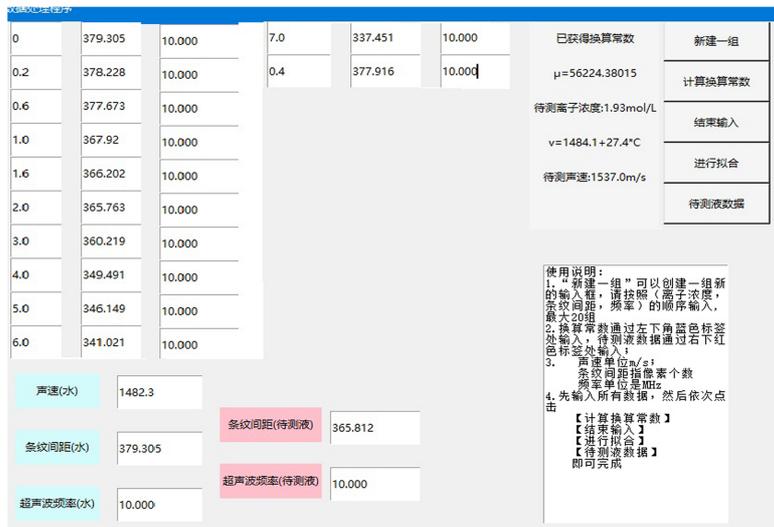


图 6 开发软件的数据处理界面

3.2.1 计算换算常量 μ

根据式(4),输入 20 °C 的纯水中超声波的声速 v ^[12]、超声波频率 f 以及测得的 1 级衍射条纹间距 d ,点击数据处理界面“计算换算常数”按钮,直接输出换算常数 μ ,如图 7 所示.



图 7 换算常数的计算界面

3.2.2 拟合函数,并画出直线

换算常数 μ 计算完成后,输入多组液体浓度、超声波频率与 1 级衍射条纹间距,根据式(4)计算不同液体中超声波的声速,再根据式(5)拟合浓度-声速曲线,点击数据处理界面中的“进行拟合”按钮,进行图像输出与函数输出.

3.2.3 测量未知液体浓度

输入待测液体的超声波频率与 1 级衍射条纹间距,根据式(4)计算声速,再根据拟合函数计算液体浓度. 点击数据处理界面中的“待测液数据”按钮,输出待测液体浓度和超声波在待测液体中的传播速度.

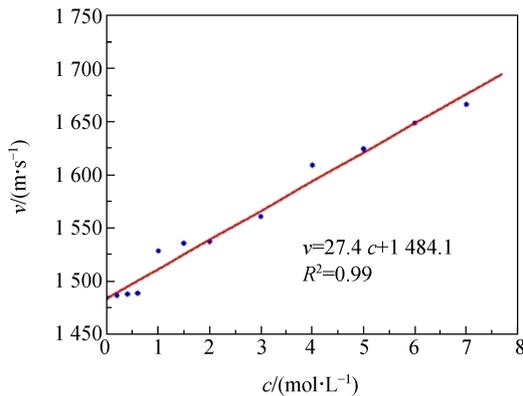
4 实验结果

选择 $f = 10.000$ MHz 的超声波(该频率下图像最清晰),记录温度 20 °C,配制不同浓度的 NaCl 溶液,测量 1 级衍射条纹间距 d ,结果如表 1 所示.

表 1 不同浓度下 1 级衍射条纹间距测量结果

$c/$ (mol · L ⁻¹)	d/pixel			平均值
	1	2	3	
0	378.995	379.754	379.167	379.305
0.20	378.553	378.024	378.108	378.228
0.40	378.052	377.535	378.160	377.916
0.60	377.553	378.102	377.363	377.673
1.00	367.275	368.261	368.225	367.920
1.50	365.978	366.154	366.475	366.202
2.00	365.903	365.776	365.610	365.763
3.00	360.003	359.997	360.656	360.219
4.00	350.723	348.972	348.777	349.491
5.00	345.787	346.275	346.384	346.149
6.00	340.953	340.734	341.377	341.021
7.00	338.066	337.253	337.034	337.451

根据表 1 数据,拟合直线如图 8 所示. 由此可得超声波在纯水中的声速为 1484.1 m/s,相对偏差为 0.12%.

图 8 NaCl 溶液浓度 c 和声速 v 的关系

用此函数方程测量不同浓度的 NaCl 溶液中的声速,测量结果如表 2 所示.

表 2 溶液浓度和声速测量结果

$c/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$		E_r	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
配制值	测量值		
2.00	1.93	3.5%	1537.0
3.50	3.64	4.0%	1583.8
4.80	4.76	0.8%	1614.5
6.50	6.75	3.8%	1669.0

从表 2 中可以看出:用基于超声光栅测量溶液浓度和声速的实验装置,测量 NaCl 溶液的浓

度结果准确,相对偏差小于 5%,符合实验要求,说明改进后的实验装置可行.

5 结束语

本文利用超声光栅对光的衍射作用,自制了测量液体浓度和超声波声速的实验装置. 使用 Python 编写了数据处理程序,该程序功能包括计算换算常数 μ 、绘制拟合曲线并输出拟合函数、计算并输出待测液体浓度和超声波在液体中的传播速度. 本实验旨在引导学生进一步理解声光效应和光的波动性,体验数据处理的智能化. 实验操作简单,数据处理便捷高效,可作为创新物理实验项目开设.

参考文献:

- [1] 仲玥,周诗韵. 水中声速测量实验的模型修正[J]. 物理实验,2020,40(8):40-45.
- [2] 石明吉,郭新峰,李波波,等. 全自动相位差法声速测量实验数据的处理[J]. 物理实验,2018,38(8):17-20.
- [3] 杨文健,何慧颖,熊举峰. 声速测量演示实验的设计[J]. 物理实验,2022,42(1):60-63.
- [4] 刘会彬,罗锻斌,张孟. 基于声光效应的声速实验测量和理论模拟计算[J]. 物理与工程,2022,32(4):156-160.
- [5] 丁冠阳,唐军杰,王爱军. 超声光栅测声速实验方法的探索[J]. 大学物理实验,2014,27(6):64-66.
- [6] 吴世春,彭华. 超声光栅的原理和制作[J]. 大学物理实验,2012,25(2):10-12.
- [7] 李聪,侯志栋,周丽霞. 超声光栅法测量液体的体积弹性模量[J]. 物理实验,2018,38(6):56-59.
- [8] 王锁明,侯彬,朱二旷. 基于超声光栅衍射的液体密度测试[J]. 物理实验,2013,33(4):41-43.
- [9] 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.
- [10] 乔凯,李晓娜,潘艳菲,等. 基于超声光栅法测定电解质溶液浓度的研究[J]. 大学物理实验,2018,31(2):54-56.
- [11] 杨燕婷,王敏,周莹,等. 超声光栅测量溶液中超声声速与浓度关系研究[J]. 实验技术与管理,2011,28(7):32-35.
- [12] 高博,张沛,张俊武,等. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2023:300-301.

(下转 18 页)

High-precision measurement of ice thermal conductivity

ZHANG Qian, LI Jiale, SONG Yifan, ZHANG Xuanqi,
ZHU Haotian, GAO Bo, ZHANG Junwu

(School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The physical mechanisms of the quasi-one-dimensional heat transfer process on the ice surface was explored. And a new method to measure the thermal conductivity of ice was designed, which realized the infinite differential slicing for the ice cube in one-dimensional direction over the process of melting by using numerical simulation. The new theoretical model was established by digitalizing the temperature of the thin slice, position, time and other elements, as well regarding the ice cubes as a series of structures array ice. This model simplifies mathematical problems of traditional ice heat transfer models that were complex and difficult to solve. According to the theoretical model, the experimental platform was constructed to realize high-precision measurement of the thermal conductivity of ice. And the intelligent monitoring could be achieved digitally and visally. Compared with the hot wire method, our experimental platform take many advantages, such as simple circuits and stable and reliable perform, and real-time temperature measurement would not be required.

Key words: ice; thermal conductivity; melting heat transfer; high-precision measurement

[编辑:龙玉梅]

(上接 12 页)

Measuring solution concentration and sound velocity based on ultrasonic grating

GUO Yongli^a, TONG Tong^a, WANG Hongli^a,
CHANG Kaige^a, ZHU Pengyu^b, WANG Zhihui^c

(a. School of Physics; b. School of Energy and Power Engineering;

c. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper developed a solution concentration and sound velocity measurement device based on the ultrasonic grating. The device avoided measuring the distance between the ultrasonic grating and the light screen, and used a CCD camera to capture images and measure the stripe spacing. A set of supporting software integrating data calculation, data fitting, and data output was developed using Python to achieve rapid output of experimental results. This device was simple to manufacture, low in cost, easy to operate, and its principle was easily understood. The data processing results could also be digitally displayed. This device could also be used to study the effect of temperature on sound velocity.

Key words: solution concentration; sound velocity; ultrasonic grating

[编辑:龙玉梅]