

利用牛顿环干涉测量透明液体浓度的探究

王晶晶^{*}, 朱泽宇, 张梁伟, 张彬

中国石油大学(北京)克拉玛依校区文理学院, 新疆 克拉玛依 834000

DOI:10.61369/ETI.2025120020

摘 要 : 基于大学物理实验光学实验等厚干涉原理, 我们采用牛顿环装置(目镜采用 CCD 摄像头)测量不同浓度透明液体的折射率, 进而探究了透明液体浓度与折射率的定量关系。实验中分别测量多次 10 份不同质量分数的 NaCl 溶液的折射率, 采用最小二乘法拟合, 分析发现折射率与浓度呈现线性相关, 与理论分析结果相近。该实验为透明液体浓度的测量提供了一种新的思路, 具有较高的精确度和较强的可行性。

关 键 词 : 等厚干涉; 牛顿环; 浓度; 折射率; CCD 摄像头

Research on the Measurement of the Concentration of Transparent Liquids Using Newton's Ring Interferometry

Wang Jingjing^{*}, Zhu Zeyu, Zhang Liangwei, Zhang Bin

College of Arts and Sciences, Karamay Campus, China University of Petroleum (Beijing), Karamay, Xinjiang 834000

Abstract : Based on the principle of equal thickness interference in college physics experiments and optical experiments, we used a Newton ring device (with a CCD camera as the eyepiece) to measure the refractive index of transparent liquids of different concentrations, and then explored the quantitative relationship between the concentration of transparent liquids and their refractive index. In the experiment, the refractive indices of 10 NaCl solutions with different mass fractions were measured multiple times respectively. The least square method was used for fitting. The analysis found that the refractive index was linearly correlated with the concentration, which was similar to the theoretical analysis results. This experiment provides a new approach for measuring the concentration of transparent liquids, featuring high accuracy and strong feasibility.

Keywords : equal thickness interference; Newton's rings; concentration; refractive index; CCD camera

透明液体的性质检测在各行各业中有着举足轻重的地位, 例如: 交通运输行业中液体的检测能够保障运输过程中的安全稳定; 食品领域对于酒类、饮料等液体含量的检测在一定程度上影响到本行业的发展, 确保消费者们的健康^[1,2]。在透明溶液浓度的检测方面, 各类方法层出不穷, 有基于化学性质的渗透压法, 也有浮球测液体的比重法, 还有基于光吸收、溶液导电性质、声速差等物理方法进行确定。其中, 化学分析法具有检测准确的特点, 同时存在周期长、操作不便的缺点。目前, 常用的近红外光谱分析法虽然操作简单, 但是灵敏度较低、相对误差较大。

本实验利用牛顿环等厚干涉原理, 采用 CCD 目视摄像头实时拍摄不同浓度的 NaCl 透明液体的干涉图样, 通过可视化处理图像, 分析了 NaCl 液体折射率与浓度的关系, 与理论结果线性关系吻合较好, 说明牛顿环装置测量透明液体浓度切实可行, 也可作为大学物理拓展实验, 提高学生创新应用意识。

一、实验原理

将一块曲率半径较大的平凸透镜置于一块平玻璃板上, 形成了薄膜干涉的牛顿环装置, 放在透明液体中形成触点到边缘位置逐渐增厚的介质薄膜。当光垂直入射到平凸透镜的上表面时, 入射的光分别在薄膜上下表面相继反射, 所得到的两束相干光将发

生相干叠加, 获得一系列明暗交替的同心圆环。

$$\delta = 2nh_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

当波长为 λ 的光线垂直入射到透明液体薄膜, 平凸透镜、液体薄膜和平玻璃板的介质折射率满足一定条件时, 透明液体上下表面反射光相干叠加形成暗环的条件为:

基金项目: 本文由以下经费支持: 中国石油大学(北京)克拉玛依校区本科教学研究与改革重点项目, 新疆维吾尔自治区“天山雪松人才计划”及新疆克拉玛依市“油城名师”计划等。

作者简介: 王晶晶(1987.12-), 女, 河北卢龙人, 学历, 博士, 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 职称, 教授, 研究方向: 双星物理, 大学物理及实验课程教学。

式子中, k 则表示干涉形成暗纹的级次, n 表示透明液体薄膜的折射率, h_k 则表示 k 级暗环所对应的薄膜厚度。在牛顿环干涉图样中, 我们看到一系列以触点为中心且内疏外密的同心圆。设 r_k 表示为 k 级暗环的条纹半径, R 为曲率半径, 当薄膜厚度 h_k 远小于曲率半径 R 时, 则有:

$$r_k^2 \approx 2h_k R \quad (2)$$

将 (2) 式带入到 (1) 式中, 可得到:

$$r_k^2 = \frac{kR\lambda}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

在实际测量中, 考虑圆心确定存在一定困难, 因此取 p 、 q 两级次暗环的直径 D_p 、 D_q 进行分析, 可得到平凸透镜曲率半径为:

$$R = \frac{n(D_p^2 - D_q^2)}{4\lambda(p - q)} \quad (4)$$

当介质为空气时, 折射率为 $n_0 \approx 1$; 当介质为透明溶液时, 折射率为 n 。若观察空气与溶液出现暗环的级次差相等 $p_0 - q_0 = p - q$ 时, 我们可以得到溶液折射率为:

$$n = \frac{D_{p_0}^2 - D_{q_0}^2}{D_p^2 - D_q^2} \quad (5)$$

显然, 只要分别测量空气介质下 p_0 、 q_0 级暗环与透明液体介质中 p 、 q 级暗环的直径^[1,3], 就可得到折射率 n 。

液体的折射率 n 与浓度 c 呈现一定的关系, 其中 Tan^[4] 等人对 NaCl 溶液浓度与折射率、温度等相关因素的测量以及分析得到溶液折射率随浓度、温度变化的经验公式为:

$$n = 1.3373 + 1.7682 \times 10^{-3}c - 5.8 \times 10^{-6}c^2 - 1.3531 \times 10^{-4}T - 5.1 \times 10^{-8}T^2 \quad (6)$$

其中, n 表示液体的折射率, c 表示液体浓度, 单位为 mol/L; T 为温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。在一定温度下, 液体的浓度与折射率呈现线性相关, 并通过实验进行了验证, 误差均保持 0%~2% 的范围内。张志伟、尹卫峰^[2]等基于洛伦兹电子论、朗伯定律以及比尔定律提出了一种用来描述溶液浓度以及折射率线性关系的理论模型。当入射溶液的光为单色光, 溶液折射率 n 与浓度 c 数学线性关系可表示为:

$$n = kc + a \quad (7)$$

传统实验多聚焦于牛顿环干涉的理论验证与数据测量, 而本设计在此基础上, 引导学生拓展探究方向。实验中, 学生可借助 CCD 成像系统精准捕捉不同浓度待测液体环境下的牛顿环干涉条纹, 通过分析条纹直径等参数的变化获得液体折射率, 进而探究溶液浓度与折射率之间是否存在线性关联。在生活生产实践中, 依托牛顿环干涉及 CCD 成像搭建快速浓度检测方案, 为化工生产、食品检测等场景提供低成本且精准的浓度监测手段。

二、实验内容

(一) 实验仪器

实验仪器包含两部分组成, 一部分是溶液配置部分的分析天

平、药勺、100ml 烧杯、玻璃棒、50ml 量筒、胶头滴管、去离子水、NaCl 药剂瓶等; 一部分是进行实验的 HG-GP20Na\Hg 钠光灯、JCD3 显微镜、数据转接线、C2COMS05100KPA 摄像头以及计算机一台。其中, 钠光灯波长取 $\lambda = 589.3\text{nm}$, 需要提供较为稳定的电源; CCD 摄像头通过数据转接线直接连接到电脑上, 进行数据记录以及图像的可视化处理。

(二) 实验操作

本实验操作与大学物理实验课程中牛顿环干涉实验要求相近。

①调整测量装置, 提前安装好 CCD 摄像机, 并通过数据线连接到电脑。借助屏幕观察成像质量, 确定无污渍、损坏和成像完整清晰;

②开启钠光灯, 提前预热几分钟时间, 确保灯光发出明亮的黄光;

③调整半反射镜的角度约为 45° 倾角, 并转动反光镜, 移动显微镜的位置, 直至图像清晰, 所观察的视场中灯光明亮、均匀充满;

④将牛顿环装置放置于合适的位置上, 通过调焦手轮进行焦距的调节, 注意自下而上缓慢地移动, 避免损伤物镜以及牛顿环装置;

⑤借助图像软件观察所得成像, 待调整出现完整、清晰的牛顿环干涉图样后进行拍摄工作;

⑥通过计算机进行图像的截取拍摄, 并借助图像信息进行数据分析测量不同级次对应的牛顿环直径。

⑦在牛顿环装置进行拆卸添加液体时, 通过控制螺钉的旋转圈数减少添加液体过程中产生的曲率半径变化。

(三) 数据记录

液体薄膜牛顿环显像发现: 牛顿环图像的清晰度会因为明暗条纹的光强差发生变化, 导致现象不明显, 从而降低了实验结果的准确度。因此, 通过 CCD 摄像头可拍摄各浓度下 NaCl 溶液的牛顿环干涉图像后, 调节对比度、饱和度、亮度以及灰度值等对图像进行处理, 提高牛顿环的清晰度^[4]。利用软件中三点成圆的工具进行直径、半径的测量。具体操作上来说, 通过在图像上取三个点位, 基于选取的点位进行圆的生成, 并提供相关的直径、半径、圆心位置等。在本方案中, 我们通过测量多次取平均值的办法减少误差。

三、结果与讨论

(一) 数据记录

我们分别进行了不同浓度溶液牛顿环直径的测量两次, 为尽量减少误差, 选择的级次均离中心较远并且保持级次差相同, 详见表 1 所示。

表 1 两组数据记录及分析结果

溶液浓度 (%)	第一组实验数据			折射率 (n)	相对误差 (%)	第二组实验数据			折射率 (n)	相对误差 (%)
	q-p	D _q (像素)	D _p (像素)			q-p	D _q (像素)	D _p (像素)		
2	5	2032.85	1544.30	1.3308	-0.16	7	2410.81	3302.12	1.3320	-0.36
4	5	2069.39	1593.89	1.3352	-0.05	7	2147.55	3114.07	1.3337	0.12
6	5	2025.08	1538.04	1.3402	-0.05	7	2523.44	3381.12	1.3393	0.04
8	5	2026.86	1543.32	1.3441	0.01	7	2329.38	3235.60	1.3449	-0.06
10	5	2026.86	1543.32	1.3475	0.08	7	2350.02	3248.74	1.3479	0.05
12	5	2040.01	1562.2	1.3512	0.10	7	2378.97	3267.24	1.3523	0.05
14	5	2025.22	1546.37	1.3599	-0.04	7	2455.66	3321.47	1.3560	0.11
16	5	2015.76	1535.55	1.3638	-0.04	7	2367.01	3402.39	1.3601	0.13
18	5	2029.91	1555.96	1.3685	-0.01	7	2391.10	3268.61	1.3657	0.04
空气	5	2391.66	1844.23	1.0000	-0.10	7	2614.37	3690.18	1.0000	0.11

的牛顿环进行直径测量时产生一定的误差；再者，是添加溶液时对牛顿环装置进行拆卸引入的误差，这一误差主要通过改变曲率半径影响到折射率；最后是进行三点成圆的操作时，点位的选取同样会引入一定的误差。因为牛顿环产生的干涉图像，暗环存在一定的宽度，使得在进行绘测时出现偏差。

四、结论

利用大学物理实验室现有设备，通过针对性改装与功能拓展，结合光线在不同浓度溶液中折射率的变化规律，设计出一套简洁易行的透明液体浓度测量方法。经对 CCD 图像处理分析发现，溶液浓度与折射率之间呈现出良好的线性关联，这一测量结果与理论分析结论吻合。此次实验装置的改进，不仅是对传统牛顿环干涉实验装置的功能扩充，更是对大学物理光学实验教学内容的有效拓展，打破了传统实验只聚焦理论验证的局限。在教学实践中，该实验能引导学生从理论学习转向实践探究，在动手改装、数据采集与分析的过程中，全方位提升其创新思维、实验设计能力与科学探究素养。

此外，CCD 成像装置的性能仍存在较大提升空间。待技术方案进一步完善后，可基于该实验的折射率测量原理，研发出便携式液体浓度检测设备，将其应用于机场、高铁站等人员密集的公共场所安检环节，快速识别液体的浓度。

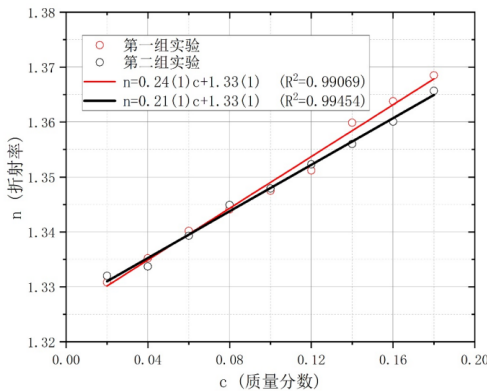


图2 折射率 n 与浓度 c 的关系

(二) 折射率—浓度曲线拟合

利用最小二乘法线性拟合折射率—浓度（质量分数）曲线，如图1圆圈和实线分别代表了第1组以及第2组数据点和所得拟合曲线，呈现出较强的线性趋势，且拟合结果较优。

我们计算了两组实验与理论值存在的相对误差，如表1所示。本实验误差来自于多方面，使两组数据在不同程度上出现偏差。虽然在测量上避免了目测时的绝大多数问题，但同时也引入了新的问题。首先，是来自摄像头装置的畸变问题。在当前的装置中，并未考虑到畸变产生的图像变形等因素，从而在对不同级次

参考文献

[1] 刘敏. 牛顿环干涉实验在液体折射率测量中的应用 [J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(05): 381-382+387.
[2] 张志伟, 尹卫峰, 温廷敦, 等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2009, 30(3): 281-285.
[3] 籍明毅, 马希, 王伟. 液体折射率的测量 [J]. 科技创新与应用, 2017, (31): 83-85.
[4] 吉晓瑞, 杨晓红, 孟广伊, 等. 物理实验教学中引导学生提高实践和创新能力 [J]. 沈阳工程学院学报 (社会科学版), 2017, 13(01): 122-125.