

# 基于双暗环效应的折射率的测量装置

湛高超 刘 炜 黄彦媚 李三锋 刘朝辉

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510000)

(收稿日期:2017-04-13)

**摘要:**本实验装置利用全反射形成的双暗环效应,分析得出两个圆形暗环直径之比与待测物体折射率的数学解析关系,以激光笔、玻璃容器、智能手机等为主要测量装置进行测量,建立了测量液体折射率的新方法,经实验证明,此方法操作简便可行、精确度和稳定性高.将此原理结合手机 APP,使折射率的测量更加简便快捷.人们可用此装置测量食用油的纯度或果汁等食品的可溶性固形体的含量,由此为生产技术或社会生活带来便利.

**关键词:**暗环效应 全反射 折射率 非接触测量

暗环效应是由于光的全反射在散射面形成一暗环的现象,常用于测量固液体的折射率.由于该现象图像清晰、容易拍摄,因此非常适合使用手机进行识别和处理.使用摄像头进行测量普遍都需要固定摄像头到成像面的距离,计算得到暗环的真实半径,而本文利用改进的双暗环效应,实现了使用比例进行测量而无需知道暗环真实的直径大小.

基于双暗环效应,本文设计了一种光学装置,结合手机摄像头,利用手机 APP 对采集到的图像进行分析,实现对透明液态食品折射率的自动快速测量,并与同类食品数据进行比对,利用正常食品与劣质食品折射率的差异,实现食品品质的鉴别.本装置成本低廉、可重复性好、操作简单易行,在测量过程中样品无损耗.用户通过手机自主拍摄与样品折射率相关的光学图像(暗环),再由手机 APP 处理图像信息,测量数据同步获取的功能.本装置测量精度较高,可用于对生产生活中液体折射率非高精度的检测,具有可预见的应用价值,值得推广.

## 1 装置原理

### 1.1 测量原理

实验装置原理图如图 1 所示.

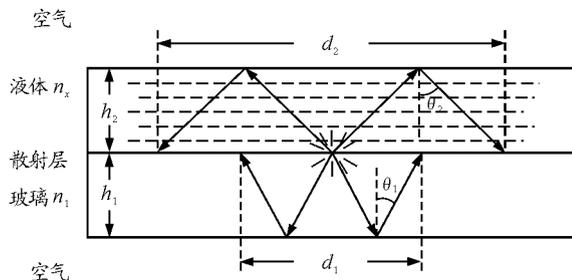


图 1 装置原理图

取一个厚度为  $h_1$  的玻璃容器,内表面底部喷漆(图 2 为局部放大图),装入厚度为  $h_2$  的待测液体.将一束激光入射至散射层,发生散射,形成点光源,光向四周发散,分别进入玻璃和液体,如图 1 所示.

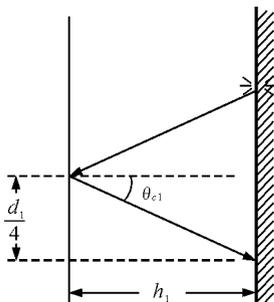


图 2 玻璃容器厚度为  $h_1$ ,内表面底部喷漆

进入玻璃的散射光到达玻璃-空气界面时,将出现两种情况:

(1) 入射角小于玻璃-空气的全反射角,光大部分折射到空气中;

(2) 入射角大于玻璃-空气的全反射角,光发生全反射,再次照射到散射层发生散射.

由于散射光来源于一点,因此最终会在散射层形成一个外面亮中间暗的暗环,而且暗环的直径  $d_1$  与玻璃的厚度  $h_1$ , 参见图 2, 满足以下的几何关系<sup>[1~4]</sup>

$$\sin \theta_{c1} = \frac{\frac{d_1}{4}}{\sqrt{\frac{d_1^2}{4} + h_1^2}} \quad (1)$$

结合全反射的性质,可知

$$\sin \theta_{c1} = \frac{n_{\text{空气}}}{n_1} = \frac{1}{n_1} \quad (2)$$

结合两式可得

$$n_1 = \frac{\sqrt{16h_1^2 + d_1^2}}{d_1} \quad (3)$$

同理得液体的折射率为

$$n_x = \frac{\sqrt{16h_2^2 + d_2^2}}{d_2} \quad (4)$$

若已知玻璃的折射率  $n_1$ , 同时考虑液体与空气由于全反射产生的暗环以及玻璃容器壁与空气由于全反射产生的暗环. 两个暗环的直径的比例关系与其折射率的比值有关. 此时可根据空气的折射率固定来判断待测液体的折射率.

将式(3)与式(4)分别平方再减去1,得

$$n_1^2 - 1 = \frac{16h_1^2 + d_1^2 - d_1^2}{d_1^2} = \frac{16h_1^2}{d_1^2} \quad (5)$$

$$n_x^2 - 1 = \frac{16h_2^2 + d_2^2 - d_2^2}{d_2^2} = \frac{16h_2^2}{d_2^2} \quad (6)$$

两式相除,化简得

$$n_x = \sqrt{1 + (n_1^2 - 1) \frac{d_1^2 h_2^2}{d_2^2 h_1^2}} \quad (7)$$

对于一个已经制作好的装置,  $n_1, h_1, h_2$  均可确定, 根据此公式, 只需要知道两个暗环直径的比值, 便可得到待测液体的折射率. 这样做的好处是在拍摄图像处理时不需要控制摄像头到暗环的距离, 不需要知道暗环的真实大小, 只需要知道两者的比例即可, 测量上更加便利.

### 1.3 消除光斑误差

现实中由于激光笔不能当作真正的点光源, 如图 3 所示.

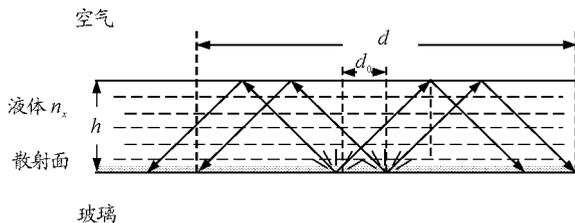


图3 实验产生的误差和消除

实际观察到的直径会比理论上的小  $d_0$ , 经测量, 激光光点的线度为 2.46 mm. 由于测量装置不能做得太大, 若选用长度 5 cm 的装置, 忽略激光笔的线度将造成至少 4.92% 的误差. 因此需要对公式进行修正, 得到如下公式.

测量折射率公式修正

$$n_1 = \frac{\sqrt{16h^2 + (d + d_0)^2}}{d + d_0} \quad (8)$$

固液体双暗环测量折射率公式修正

$$n_x = \sqrt{1 + (n_1^2 - 1) \frac{(d_1 + d_0)^2 h_2^2}{(d_2 + d_0)^2 h_1^2}} =$$

$$\sqrt{1 + (n_1^2 - 1) \left( \frac{1}{\frac{d_2'}{d_1'} + \frac{d_0}{d_1}} + \frac{1}{\frac{d_2'}{d_1'} \frac{d_0}{d_1} + 1} \right)^2 \frac{h_2^2}{h_1^2}}$$

其中  $d_1', d_2'$  为任意坐标系下暗环直径的相对大小, 例如利用软件在照片上放置一坐标系来测量其大小. 而  $d_0, d_1, h_1, h_2$  也可以为任意坐标系下的大小, 但由于  $d_0, d_1, h_1, h_2$  在装置制作好后便可确定, 因此可以提前测量出真实大小装载到 APP 中, 不需要使用时测量. 消除误差后同样可以只利用  $d_1', d_2'$  之间的比值来确定折射率.

## 2 测试装置的设计与实现

### 2.1 前置光学装置结构

我们首先制作了一个底部玻璃厚度为 0.5 cm 的圆形玻璃皿, 半径为 5 cm, 能盛装的液体厚度为 1 cm, 放置在一个防漏装置上, 避免液体溢出污染桌面. 选择玻璃厚度为 0.5 cm 是由于玻璃的厚度越

大,内暗环的直径也会越大,能够更清晰地判断暗环半径,减少误差.但由于外暗环的直径与液体的厚度有关,液体太薄,会受到很大的环境的扰动,液体太厚又导致测量过程中液体的浪费.为了同时实现两个暗环均较大,又相距一定的距离,并且外暗环不能太大,减少浪费,通过反复测试,选择0.5 cm的厚玻璃,1 cm的液体厚度,测量的效果最佳.由于手持激光笔照射时,手容易抖动,导致拍摄的图像边界不够清晰,因此在下方留有空间固定激光笔,装置结构如图4所示.

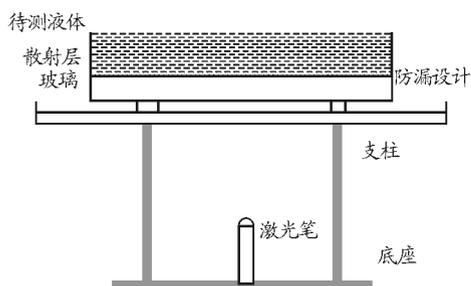


图4 装置结构

然后通过对玻璃皿内表面的底部喷漆,形成散射层.喷涂过程中所使用的涂料为白色喷漆<sup>[4]</sup>.

## 2.2 测试与分析软件的设计

### 2.2.1 图像的导入及处理

我们制作了一个支持光学装置的APP,如图5所示.

这个APP读取图像的方法有两种,一种是通过APP调用手机摄像头进行拍摄.另一种方法是手机拍摄好的照片调入软件.

软件可以画出图片的亮度特性曲线.导入之后,软件后台会对图片进行二值处理,定出圆心.在定好圆心之后,过其作一条直线,然后对该直线上的点取亮度值,进而画出亮度特性曲线.用户可以通过亮度曲线按钮调用此功能,增大测量精度.

软件还可以通过灰化按钮调用经过灰度化处理的图片,以便更好地确认边界.

### 2.2.2 内外直径的读取及数据处理和保存

我们在手机应用的界面上放置了一个内置的坐标系,并显示4条线段.移动线段与两个暗环的边界相切,获取中间两条直线在程序内置的坐标系中的距离,以及外侧两条直线之间的距离,然后通过公式计算得到结果,并用List将数据显示在列表上.本应用可以实现存储、查阅的功能.

使用时,为了减少误差,需要至少5次的测量次数,并对同一张图片进行旋转,多次测量.利用误差分析中的贝塞尔公式、t分布和误差传递公式,计算得出折射率的误差公式.程序能够实时显示出此次测量的不确定度和相对不确定度.应用中还使用Android本地SQLITE存储数据,记录此次测量的折射率,方便查询.

公式中仅需要两个距离的比值,我们通过计算获得两个暗环直径的比值,从而在测量过程中实现了从现实坐标系到内置坐标系的转换,克服了不同拍摄距离暗环大小不一致的困难.

### 2.2.3 测量结果的查询及显示

将从权威机构或论文里的油品的折射率作为标准油品折射率表保存到APP.当测量大于5次,程序自动将测到的折射率平均值与油品标准折射率表进行比较,将与测得的折射率最相近的数值对应的油品显示在屏幕上.

当测得的油品的折射率为不在正常油品的范围内,应用会提示“此油品有可能为地沟油,请谨慎食

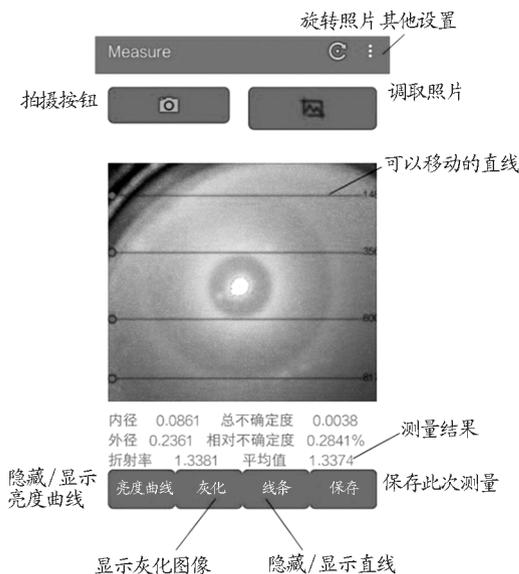


图5 APP界面

用。”

### 3 应用与测试结果分析

操作步骤:

(1) 加入待测样品至充满容器.

(2) 将激光笔固定,使激光入射到容器中间,散射面出现两个有明显分界线的同心暗环.

(3) 拍摄图像.手机 APP 界面中的拍照按钮可调用本机摄像头,或拍摄完成后将图片导入 APP.

(4) 在 APP 界面上移动 4 条直线,使其分别与内外暗环相切.

(5) 点击灰化/亮度曲线按钮,微调直线至准确边界.

(6) 点击保存,旋转照片再次测量,重复测量 5 次,测量结果填入表 1 中.

(7) 应用显示此次测量所得到的折射率的平均值、相对误差以及对油种类的判断.

表 1 测量自来水和调和油的折射率

项目	水折射率	油折射率
测量 1	1.339 8	1.483 8
测量 2	1.328 7	1.471 1
测量 3	1.326 8	1.472 4
测量 4	1.311 7	1.472 9
测量 5	1.307 8	1.481 5
平均值	1.323	1.476
总不确定度	0.007	0.004
相对不确定度 / %	0.51	0.22

厚度  $h_2$  为 0.005 10 m,  $n_1$  为 1.55.

使用该装置分别对自来水和市面上一款调和油的折射率进行测量.测量结果显示,该软件能较为准确地测量出待测液体的折射率.

### 8 结论

本文改进了暗环效应测量折射率的原理,将原本的一个暗环增加为两个暗环,避开了测量暗环真实直径的大小,转为测量两个直径之间的比值,使利用手机软件测量折射率成为可能.同时考虑中心光点的线度造成的误差,进一步提高了测量的精确度.辅助装置集成了一个普通玻璃皿、激光笔和支架,利用普及率很高的手机摄像头代替通常测量需要的 CCD 摄像头,并利用 APP 代替复杂的图像处理.由于不同液体的折射率是不同的,例如正常的食品油和掺入了地沟油的食品油就会有折射率的差异.通过测试得到的数据与常规数据的对比<sup>[5]</sup>,便可实现对食用油品质的检验<sup>[6]</sup>.

实验证明,本装置对液态食品品质的检验结果达到设计需要.随着人们对食品安全的关注和智能手机的普及,利用附加低成本光学装置实现的液态食品品质鉴别的 APP 具有广阔的推广空间.

### 参考文献

- 苗润才,朱京涛,杨宗立.液体表面的遮光效应及其应用.光子学报,2002,31(4):489~491
- 高美玲.遮光效应的研究及应用:[硕士学位论文].西安:陕西师范大学,2011
- 袁剑辉,周烈生.用激光散射方法测量透明板的折射率.物理实验,1985(2):62~63
- 任俊鹏.透明容器中液体折射率非接触实时测量:[硕士学位论文].西安:陕西师范大学,2015
- 辛莉,施江.食用油品种及含量与油脂折射率关系的探究.食品工业科技,2012,33(15):317~321
- 常冬琦,李艳丽,王洋,等.红外光谱法与折光率法在地沟油检测中的应用.北京化工大学大学生创新创业论坛,2012.266~268

(下转第 93 页)

- 17 胡显奎,林少全,刘振兴. 聚合物基无机纳米粒子复合材料的制备技术及应用展望. 材料导报,2000,14(10): 62 ~ 63
- 18 王春艳. 聚合物 / 无机纳米复合材料的发展及应用. 化学工程师,2001(6):21 ~ 22
- 19 Matsen M. W, Schick M. Microphases of a Diblock Copolymer with Conformational Asymmetry. Macromolecules,1994(27):4 014 ~ 4 015

## Monte Carlo Simulation Study on the Effect of Stiffness Coefficient $K_{\text{bend}}$ on the System in Semi Flexible Polymers

Xiao Liyong Ji Denghui

(School of Electrical engineering of Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004)

**Abstract:** The semi-flexible polymer system has been investigated used by the Monte Carlo simulation method based on the Ideological and theoretical of Particle representation to Density field representation in self-consistent field theory. The Hamiltonian of the system include the bond energy, the volume repulsion energy and the bending elastic energy, which can be expressed by the elastic energy, the density of polymer segments, the elasticity  $K_{\text{bend}}$ , respectively.

The results of computer simulation indicates that : 1. For the dilute solution of single-chain increase of elasticity  $K_{\text{bend}}$ . 2. For the high concentration of polymer systems, the Cyclotron polymer system, the Cyclotron radius ( $R_g$ ) and end-to-end distance ( $R_0$ ) increases with the radius and the end-to-end distance does not vary with the change of elasticity  $K_{\text{bend}}$ , the projected length ( $L_s$ ) increases with coefficient of elasticity increasing. 3. The projected length is proportional to  $aN$ , and  $K_{\text{bend}}^b, a \approx b \approx 0.4 \pm 0.45$ . 4. The projected length has nothing to do with the concentration of the polymer.

**Key words:** semi flexible polymer; field representation; projection length; monte carlo simulation

(上接第 88 页)

## Measurement Device of Refractive Index Base on Double Dark Ring Effect

Zhan Gaochao Liu Wei Huang Yanmei Li Sanfeng Liu Zhaohui

(South China Normal University, School of Physic and Telecommunications Engineering, Guangzhou, Guangdong 510006)

**Abstract:** With the double dark ring effect due to the total reflection, this device analyze the mathematical relationship between the specific value of the two circular dark rings' diameter and the refractive index of the substance. This is a new method for refractive index measuring. The main measurement devices are laser, glass container, and smart phone. Proved by experiment, this method is not only easy and simple to handle, but also with high precision and strong stability. With this method, we designed a household device and developed a supporting application. Applying to cellphone even make the measure more convenient and fast. People can measure substances with this device, like the purity of cooking oil or the solid content in fruit juice, etc.

**Key words:** dark ring effect; total reflection; refractive index; non-contact measurement