

文章编号 1004-924X(2016)10-2408-09

封闭玻璃管道内液体折射率的非接触测量

张宗权^{1*}, 徐 铭², 任俊鹏³, 姚 志³, 苗润才²

(1. 陕西师范大学 基础实验教学中心, 陕西 西安 710062;

2. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062;

3. 西安航空学院 理学院, 陕西 西安 710077)

摘要:为了实时、原位和非接触测量工业生产过程中封闭管道系统内透明、半透明液体折射率,提出了一种简单的基于玻璃管壁光学特性的液体折射率测量方法。该方法通过涂覆在玻璃管壁外表面上的透射散射层,将入射激光束转换为进入玻璃管壁的大角度分布的透射散射光;透射散射光到达玻璃管壁与液体的界面上后,符合全反射条件的散射光反射到透射散射层上,自动形成与玻璃管内液体折射率值相关的椭圆形暗斑图像。根据椭圆形暗斑长轴长度与液体折射率之间的解析关系,即可实现玻璃管内液体折射率的原位、非接触测量。对几种常见的透明、半透明液体的折射率进行了实验测量,结果表明:该测量方法的准确性与目前商用数字阿贝折射仪相当($\pm 2 \times 10^{-4}$ RIU)。该测量方法具有成本低、稳定性好、抗干扰且光源稳定等优点,而且在处理与液体折射率相关的光学图像时无需调试,光照即显,有望用于封闭管道在非常温、非常压状态下液体折射率的实时、自动和非接触在线监测。

关键词:非接触测量;液体折射率;折射率测量;玻璃管道;光学暗斑

中图分类号:O661;TP216.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2408

Non-contact measurement for liquid refractive index in a closed pipe

ZHANG Zong-quan^{1*}, XU Ming², REN Jun-peng³, YAO Zhi³, MIAO Run-cai²

(1. *Experimental Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;*

2. *School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;*

3. *School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zsq@snnu.edu.cn*

Abstract: To measure the Refractive Index (RI) of transparent liquid and translucence liquid in industrial process in real-time, in situ and non-contact, a simple method for measuring liquid RI was proposed based on the optical property of glass pipe wall is presented in this paper. By coating a transmission-scattering layer on the outer wall surface of a glass pipe, the incident laser beam was transformed into a wide-angle distributed transmitted scattering light in the glass wall. After the scattered light reached the interface between the pipe wall and the liquid, the scattered light satisfying the condition of total internal reflection was reflected to the transmission-scattering layer to form automatically an oval dark pattern related to the RI of the liquid in the pipe. The method to measure the RI of the liq-

收稿日期:2016-06-24;修订日期:2016-07-15.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. GK261001069)

uid in the glass pipe in situ and non-contact could be implemented according to the analytic relation between the long axis length of the oval dark pattern and the liquid RI in the glass pipe. Several RIs of transparent liquid and translucency liquid were measured. The experimental results show that the accuracy of this apparatus is the same as that of an Abbe refractometer ($\pm 2 \times 10^{-4}$ RIU (refractive index unit)). It concludes that the method is characterized by simple configuration, lower cost, anti-interference and higher robustness. It is suitable for the optical images relative to liquid refractive indexes, and is expected to monitor the liquid RIs of a closed pipe at an abnormal temperature and an abnormal pressure in real-time, in situ and non-contact.

Key words: non-contact measurement; liquid refractive index; glass pipe; oval dark pattern

1 引言

不同液体的理化参数,如浓度、密度、温度、电磁特性、溶质物质等重要参数的变化,都会引起自身折射率的变化。因此,基于液体折射率测量同步获取液体其他理化参数的方法,已在化工、医药、食品饮料、生物监测、化学污染物分析等领域得到广泛应用^[1-6]。液体折射率的测量方法和仪器已有很多,主要的测量方法有阿贝折射仪法、椭圆光度法、分光计法、毛细管法、干涉仪法等经典方法^[3,7-11],也有近几年来受到广泛关注的表面等离子体共振 (SPR) 法和光纤传感器测量法等^[12-15]。这些方法有各自的突出优势,也存在各自的局限性。阿贝折射仪等经典测量方法虽然能精确测量液体折射率,但在测量中通常需要从待测液体中取样,并置于仪器的确定位置上,这改变了液体原有的存在状态(位置、温度、压力等),不能满足工业生产中原位、实时、非接触检测液体折射率的需要。SPR 法可实时监测待测液体的折射率变化,灵敏度高、响应速度快,但其成本高、原理复杂,影响待测量的因素较多,导致测量难度大^[12],因而难以应用于工业生产中。折射率光纤传感器测量法可原位获取液体的折射率,具有耐高温、抗电磁干扰及防腐蚀的优点^[13-14],但在测量中光纤传感头必须浸入液体中,否则无法获取液体的折射率。然而在工业生产过程中,液体更多地处在封闭的管道系统中,并且往往处于非常压或非常温的状态,液体不能取出也无法接触,但又需要实时监测液体折射率的变化,以此同步获取液体的其他理化参数。折射率光纤传感器测量法

显然无法满足这种需要。已有文献提出了几种利用透明管壁的光学和几何形状,基于斯涅耳定律的原位、非接触测量管道内液体折射率的方法^[1,16-18]。但在测量中激光束必需透过液体,只适用于管道内透明液体折射率的测量,很难对管道中光吸收率较大的半透明液体的折射率进行测量。这种测量需求是化工、医药、食品饮料以及材料制备等领域经常遇到的。

本文提出了一种简单、新颖的原位、非接触测量玻璃圆管内液体折射率的方法。该方法可满足工业生产和科学研究等领域封闭管道系统中透明、半透明液体折射率的实时、自动、非接触测量的需求。

2 测量原理

图 1 所示为非接触测量玻璃圆管内液体折射率的测量原理。在充满液体的玻璃圆管外表面的局部位置涂覆一层光的透射散射层。激光束垂直入射在透射散射层上,将产生回射散射光与透射散射光,测量用到的是透射散射光,因此图 1(b) 中未标出回射散射光。在激光束穿过透射散射层后,在管壁中形成以入射光点为发光点的大角度发散的透射散射光。透射散射光透过玻璃管壁到达管壁与液体的界面后,在管壁与液体界面上的入射角等于、大于临界角的透射散射光将发生全反射,反射到玻璃管壁表面的透射散射层上,形成如图 1(c) 所示的以激光束入射光点为中心,边界清晰的椭圆形暗斑图像。椭圆形暗斑的长轴长度 L 、管壁厚度 h 、管壁折射率 n_2 与管道内液体折射

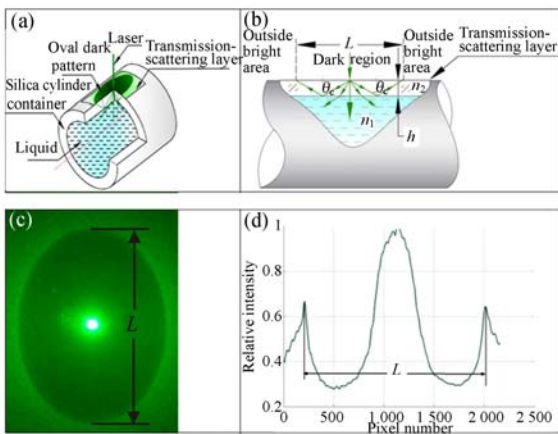


图 1 (a) 传感原理示意图; (b) 测量原理图; (c) 椭圆形暗斑图像; (d) 椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线

Fig. 1 (a) Schematic diagram of measuring principle. (b) Principle of forming oval dark pattern. (c) Oval dark pattern. (d) An example of intensity distribution curve of oval dark pattern along a long axis.

率 n_1 之间满足如下关系:

$$\sin \theta_c = n_1 / n_2, \quad (1)$$

$$n_1 = \frac{n_2 L}{\sqrt{16h^2 + L^2}}. \quad (2)$$

由式(2)可以看出,当玻璃管壁的厚度 h 和折射率 n_2 已知时,通过测量椭圆形暗斑长轴的长度 L ,就可以获得玻璃圆管中液体的折射率 n_1 。

为了获得椭圆形暗斑的长轴长度 L ,这里利用图像传感器采集图 1(c) 所示的椭圆暗斑图像,并利用 MATLAB 编程、计算机处理数据,获得图 1(d) 所示的椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线,光强分布曲线中左、右肩的距离即为椭圆形暗斑的长轴长度 L 。计算机根据式(2)处理数据,获得玻璃圆管内液体的折射率 n_1 。

由测量原理可知,在玻璃圆管参数确定的情况下,折射率的测量精度仅取决于椭圆形暗斑的长轴长度 L 的测量精度。但需要指出的是,椭圆形暗斑的长轴长度 L 的测量精度除与图像传感器的分辨率有关外,还与石英玻璃管外表面上涂覆的透射散射层的厚度以及激光束在透射散射层上入射光点的尺寸等因素有关,因此需要对这些参数进行优化。此外,本文还研究了激光功率的

变化对椭圆形暗斑长轴长度 L 测量精度的影响。

3 参数优化

3.1 透射散射层材料与厚度的优化选择

透射散射层是本测量方法的核心构成之一。它兼具两种功能:其一,将垂直入射激光束转换为大角度分布的透射散射光;其二,圆管管壁和圆管内待测液体界面上的全反射光反射到透射散射层上,形成与玻璃管中液体折射率相关的椭圆形暗斑图像,即透射散射层又是成像层。多篇关于白色油漆层对入射光束透射散射作用的报道^[19-21]指出,白色油漆组分中 TiO_2 颗粒的折射率为 2.55~2.76,粒径为 0.2~0.5 μm ,在波长为 560 nm 的绿光照射下,粒径为 0.2 μm 的金红石型 TiO_2 颗粒的相对散射力达到 0.90^[19],即白色油漆层对透过的绿光具有很高的透射散射能力。同时,白色油漆层具有成本低、涂覆工艺简单的优点。基于这些特点,这里选择白色油漆层作为光的透射散射层。将白色油漆涂覆在玻璃圆管外壁的部分表面,实验显示,白色油漆层的厚度太小或太大,都会降低椭圆形暗斑边界处的对比度,进而影响椭圆形暗斑长轴长度的测量精度。根据图 1(b) 所示的原理以及通过式(2)的计算可知,椭圆形暗斑是由透射散射光中发散角较大的光线形成的。例如,当采用折射率 $n=1.460\ 07$ 的石英玻璃圆管作为液体容器,圆管内充满折射率 $n_0=1.333\ 0$ 的蒸馏水时,形成的椭圆形暗斑长轴的光线在玻璃管壁与蒸馏水界面上的全反射临界角大于 65° ,即形成椭圆形暗斑长轴的散射光的散射角大于 130° 。因此,白色油漆层的厚度选择应该以获得合适的透射光强和大角度分布的透射散射光为目的。

已有研究表明,含有微小固体颗粒介质的厚度对透射光强和透射散射光的角度分布有明显影响^[22]。本文在外径为 80 mm、管壁厚度 h 为 4.3 mm,折射率 $n_2=1.460\ 07$ 的石英玻璃管外壁的局部位置上先后涂覆厚度为 20~100 μm 的白色油漆层,在一端封闭的石英玻璃管中充入蒸馏水,以功率为 30 mW、波长为 532 nm、发散角 <1.2 mrad 的激光束通过光阑,入射在石英玻璃管外壁

的透射散射层上。在激光束入射的一侧采用 CMOS 图像传感器采集白色油漆层上形成的椭圆形暗斑图像。根据与不同厚度的白色油漆层相对应的椭圆形暗斑在长轴方向(与图 1(d)相似)的光强分布曲线中左、右肩的相对高度,判定椭圆形暗斑长轴边界处光强的相对大小,得到椭圆形暗斑长轴边界处光强的相对大小与白色漆层厚度之间的关系曲线,如图 2 所示。

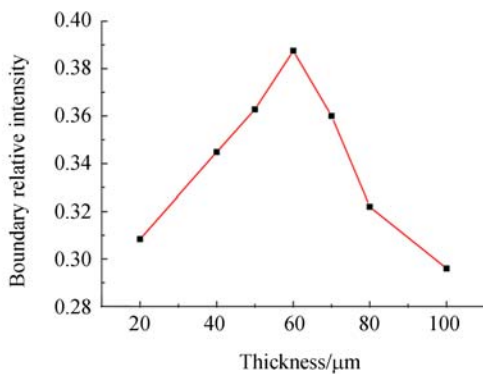


图 2 白色漆层厚度与椭圆形暗斑长轴边界处光强的关系

Fig. 2 Boundary relative intensity of oval dark pattern as a function of thickness of white paint layer

图 2 显示,在入射激光功率确定的情况下,随着白色油漆层厚度的增大,椭圆形暗斑长轴边界处的相对光强经历了由小到大,再由大到小的过程。这与文献[22]报道的结果是相似的。实验结果表明,白色油漆层的厚度并不需要为一个确定值,50~70 μm 的厚度就能满足在椭圆形暗斑的长轴边界处获得相对较高的透射光强和对比度。

3.2 白色油漆层上入射光点尺寸对椭圆形暗斑边界清晰度的影响

激光束在白色油漆层上入射光点的尺寸,是影响椭圆形暗斑长轴长度 L 测量精度的又一个重要参数。这里选择了 3 种光阑孔径,对应的椭圆形暗斑图像如图 3(a)、3(b)、3(c)所示,椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线如图 3(d)所示。

从图 3(a)、3(b)和 3(c)中可以看出,随着光阑孔径的增大,图中的椭圆形暗斑的边界逐渐模糊。图 3(d)显示,孔径光阑越小,光强分布曲线中左、右两个肩越尖锐,相应的椭圆形暗斑的边界

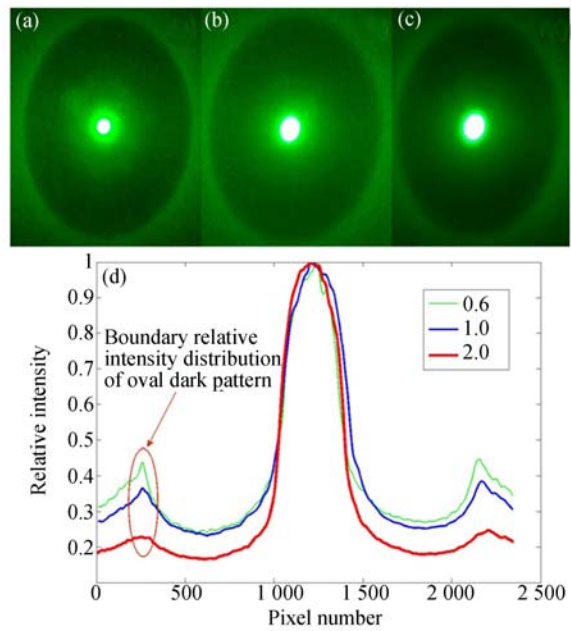


图 3 (a)(b)(c)分别是激光通过孔径光阑 0.6、1.0 和 2.0 mm 形成的椭圆暗斑图样。(d)是与之对应的中椭圆形暗斑在长轴方向上形成的相对光强分布曲线

Fig. 3 (a), (b) and (c) are oval dark patterns formed after laser passes through diaphragm of apertures of (a)0.6 mm, (b)1.0 mm, and (c)2.0 mm respectively; (d) Relative intensity distribution curves of oval dark patterns in long axis direction accordingly

就越清晰,椭圆形暗斑长轴长度 L 的测量精度就越高。实验结果表明,0.6~0.8 mm 的光阑孔径就可以满足椭圆形暗斑长轴长度测量精度的要求。

3.3 白色油漆层上入射光强对椭圆形暗斑边界清晰度的影响

实验采用 3 种不同透射率的中性密度衰减片,改变白色油漆层上激光束的入射光强,得到相应的椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线如图 4 所示。图 4 显示,白色油漆层上入射激光光强的变化明显影响椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线的左、右两个肩部的相对光强,但对左、右两个肩部的尖锐度影响较小,即可以忽略椭圆形暗斑长轴长度测量精度的影响。这一结果表明,相比于其它基于激光调制的折射率方法而言,本文提出的方法几乎不受激光光强波动的影响,这也是本方法的优点之一。

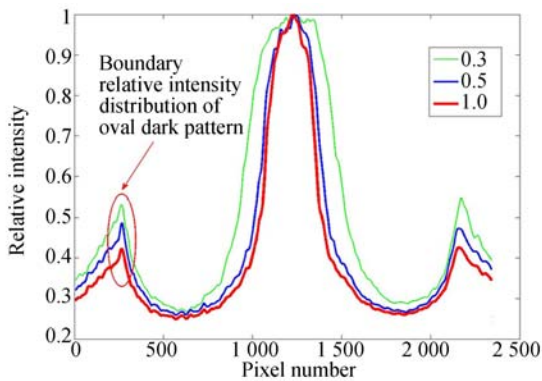


图 4 激光束通过 3 种中性密度衰减片后椭圆形暗斑图样长轴方向上的相对光强分布曲线

Fig. 4 Relative intensity distribution curves of oval dark patterns in long axis direction with lasers of different incident intensities passing through three kinds of neutral density attenuators

4 测量系统设计与调试

基于上述原理和相关参数的优化结果构造的测量系统如图 5 所示。

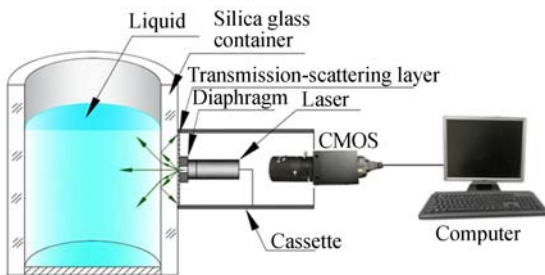


图 5 封闭玻璃管内液体折射率非接触测量系统的结构
Fig. 5 Configuration of no-contact measuring system for liquid refractive index in closed pipes

这里选择在化工、医药、食品等工业生产管道系统中广泛使用的用于观察管道内液体形态的基本构件——石英玻璃视管,作为实验用的玻璃圆管。石英玻璃管的外径为 80 mm、管壁厚度 h 为 4.3 mm,折射率 $n_2 = 1.460\ 07$ 。实验中将石英玻璃管的下端封闭,将待测液体加入石英玻璃管中。在石英玻璃管外壁的局部位置涂覆厚度为 50~70 μm 的白色油漆层,光阑孔径选择 0.8 mm;将半导体激光器和光阑密封粘结在石英玻璃管外表面的白色油漆层上,屏蔽了白色油漆层的反射散射光,保证暗盒中的暗场环境。半导体激光器的功

率为 30 mW、波长为 532 nm、发散角 < 1.2 mrad;利用固定半导体激光器后侧的 CMOS 图像传感器(深圳明士威公司生产,分辨率为 1000 万像素,配有焦距为 6~12 mm 的镜头,通光孔径 $F = 1.6$),采集白色油漆层上椭圆形暗斑的图像数据。上述器件封闭在内径为 60 mm 的圆筒状暗盒内,保证了本测量系统可在非暗室的环境下使用。

需要指出的是,在图 5 所示装置的组装与调试过程中,确保 CMOS 图像传感器镜头的光轴与激光束在透射散射层上的入射光点同轴,是保证本方法测量精度的又一个重要因素。其调试过程如下:在玻璃管中注入蒸馏水,观察计算机屏幕上 CMOS 图像传感器采集的如图 6(a)所示的椭圆形暗斑图像,调整 CMOS 图像传感器的位置,使椭圆形暗斑图像中激光器阴影成为标准的圆形黑斑(圆形黑斑的水平方向直径与垂直方向直径相等),则 CMOS 图像传感器镜头的光轴与激光束在透射散射层上的入射光点完全同轴。这时固定 CMOS 图像传感器的位置,即调试完成。

测量时,椭圆形暗斑长轴位置的确定、图像边缘即长轴两个端点的确定,是精确获取椭圆形暗斑长轴长度的关键。而椭圆形暗斑中心点的确定是其长轴长度获取的关键。对于 CMOS 图像传感器采集的椭圆形暗斑图像的处理,首先采用 MATLAB 编程,通过质心提取法确定椭圆形暗斑图像中激光器圆形阴影(图 6(a)中椭圆形暗斑中部的圆形黑斑)的中心点位置,这个中心点就是激光束在透射散射层上的入射点。由本方法的原理可知,这个中心点也就是椭圆形暗斑的中心点,通过中心点的竖直线即为椭圆形暗斑长轴的所在位置。椭圆形暗斑的长轴位置确定之后,计算机就可扫描得到如图 6(b)所示的椭圆形暗斑长轴方向上的相对光强分布曲线。由图 6(a)可知,椭圆形暗斑长轴上两个端点处的光强最大,在光强分布曲线上对应椭圆形暗斑长轴两个端点处即形成左、右两个肩,读取左、右肩之间的像素数,即为椭圆形暗斑长轴长度对应的像素数。根据测量系统的标定结果,就能获得被测量液体形成的椭圆形暗斑的长轴长度。实验表明,这种方法简单可行,且能够达到较高的测量精度。

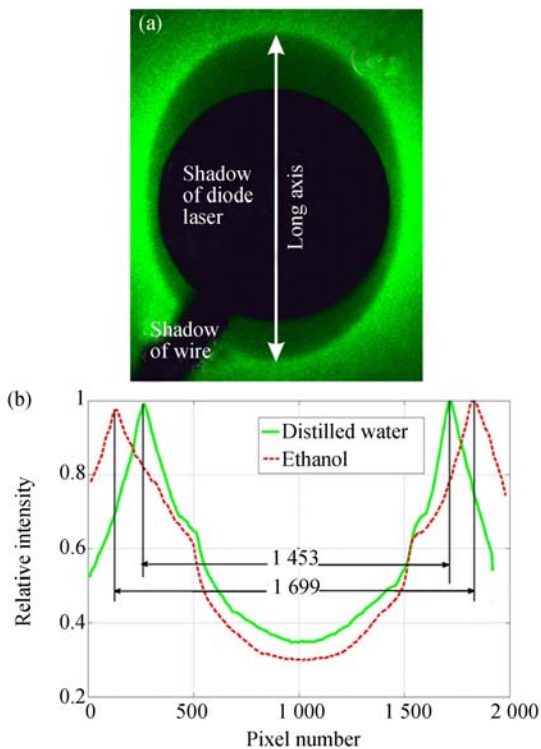


图 6 (a)蒸馏水形成的光学暗斑图像;(b)蒸馏水和无水乙醇形成的椭圆暗斑长轴方向的光强分布曲线

Fig. 6 (a) Oval dark pattern formed by distilled water. (b) Relative intensity distribution curves of patterns in long axis direction formed by distilled water and ethanol

5 实验结果及分析

该测量系统的使用方法如同许多液体折射率测量设备一样(参考文献 1, 8-11),首先通过在图 5 中的玻璃圆管内充满已知折射率的标准液体标定测量系统。根据式(2),当已知玻璃圆管中液体的折射率时,理论上椭圆形暗斑的长轴长度为:

$$L = \frac{4n_1h}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}} \quad (3)$$

根据式(3)计算出标准液体形成的椭圆形暗斑长轴长度 L 的理论值,再根据标准液体在白色油漆层形成的如图 6 所示的椭圆形暗斑长轴长度对应的像素数,计算出一个像素对应的椭圆形暗

斑长轴上的长度值,即为本测量系统的标定值。这一标定值与被测量液体形成的椭圆形暗斑长轴长度对应的像素数的乘积,即为被测量液体形成的椭圆形暗斑长轴长度 L 的实际值。由计算机完成测量系统的标定、换算与计算,根据式(1)处理数据,实时获得玻璃管内液体的折射率 n_1 。

在 $(22 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的环境温度下,利用图 5 所示的测量系统,实验测量了几种透明液体和半透明液体的折射率。首先以蒸馏水为标准液体($n=1.3330$)标定测量系统。由式(3)得蒸馏水所形成的椭圆形暗斑长轴长度的理论值为 38.4854 mm 。用 CMOS 图像传感器采集如图 6(a)所示的蒸馏水形成的椭圆形暗斑,得到椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线,如图 6(b)所示。曲线左右两肩之间的距离为 1453 个像素,此即蒸馏水形成的椭圆形暗斑长轴长度 L 对应的像素数。由此得到,本测量系统中每个像素在椭圆形暗斑长轴长度上对应的长度为 0.0265 mm ,即为本测量系统测量和计算其它液体折射率的标定值。

对比图 6(a)、6(b)与图 1(c)、1(d)可以看出,图 6(b)中光强分布曲线中部下凹,是由图 6(a)中半导体激光器的阴影形成的。这更有益于提高椭圆形暗斑边界处的对比度。

实验测量了无水乙醇的折射率,并与数字阿贝折射仪(Shjingmi Model WYS-2S, China)的测量结果进行比较。无水乙醇形成的椭圆形暗斑长轴方向的光强分布曲线由图 6(b)中的虚线所示,该曲线左右两肩之间的距离为 1699 个像素,此即无水乙醇形成的椭圆形暗斑长轴长度 L 对应的像素数。计算机根据式(1)处理数据,获得无水乙醇的折射率。图 6(b)中,虚线左、右肩的高度差异是由于白色油漆层的厚度不均匀造成的,但实验结果表明,该差异对折射率的测量精度没有影响。

此外,实验还测量了几种常见的透明、半透明液体的折射率,结果如表 1 所示。

表 1 本装置测量得到的几种常见液体的折射率及其与阿贝折射仪结果的对比

Tab. 1 Several common liquid RI measured by proposed apparatus compared with Abbe refractometer

待测液	阿贝折射仪测量值	本文测量方法	绝对误差	相对误差/%
酒精	1.364 0	1.363 8	0.000 2	0.015
甲醇	1.333 0	1.333 2	0.000 2	0.015
丙酮	1.360 1	1.360 0	0.000 1	0.0007
6% 浓度 NaCl	1.343 3	1.343 5	0.000 2	0.015
可口可乐饮料	1.348 7	1.348 6	0.000 1	0.007
橙汁饮料(百事美年达)	1.354 0	1.354 2	0.000 2	0.015

由表 1 可以看出,与阿贝折射仪的测量结果相比,本文方法的测量精度均在 $\pm 2 \times 10^{-4}$ RIU (折射率单位)之内,表明该方法是可行的。

在室温 (22 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 的恒温条件下,实验测量了 NaCl 溶液浓度从 4.76% 到 25.93% 的折射率,并对实验数据进行了曲线拟合,结果如图 7 所示。图 7 显示,盐溶液浓度与折射率在测量范围内具有很好的线性关系,这与文献[23]的报道是相同的。

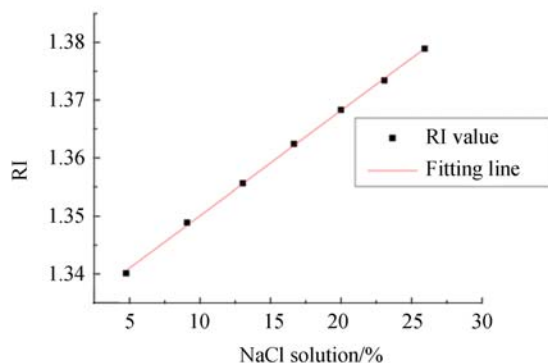


图 7 盐溶液浓度与折射率的关系

Fig. 7 NaCl solution with different concentration as a function of its RI

如前文所述,本文所述方法的测量误差主要来源于椭圆形暗斑长轴长度 L 的测量精度。这里以无水乙醇的测量为例,分析了本方法的测量误差。由式(3)得到:

$$\frac{\partial n_1}{\partial L} = \frac{16 n_2 h^2}{\sqrt{(16 h^2 + L^2)^3}} \quad (4)$$

根据本实验系统的标定结果:一个像素对应的椭圆形暗斑长轴长度 L 的实际长度为 0.026 5

mm。根据式(2)计算得到椭圆形暗斑长轴长度的理论值为 45.041 3 mm。将 $L=45.041 3$ mm、 $h=4.3$ mm、 $n_2=1.460 07$ 代入式(4),得到 $\frac{\partial n_1}{\partial L} = 0.003 8$,即当椭圆形暗斑长轴长度 L 的读取误差为一个像素,也就是椭圆形暗斑长轴长度的测量误差为 0.026 5 mm 时, n_1 的测量误差为 $1.021 3 \times 10^{-4}$ RIU。由此表明,本文方法具有较高的灵敏度。

6 结 论

本文提出了一种玻璃圆管内液体折射率的非接触测量方法。与液体折射率相关的椭圆形暗斑图像是由在玻璃圆管管壁与玻璃圆管内液体界面上符合全反射条件的透射散射光自动形成的,由于形成椭圆形暗斑图像的全反射光不通过液体,因此液体是否透明并不影响折射率的测量结果。同时,椭圆形暗斑图像的形成不需调试、光照即显,这一特点使其可用于玻璃圆管内液体折射率的实时、自动和非接触监测。此外,本方法可以忽略激光光强变化的影响,这是本方法区别于其它基于光强调制原理的液体折射率测量方法的优点之一。实验装置的测量准确度与目前商用的数字阿贝折射仪相当($\pm 2 \times 10^{-4}$ RIU)。实验结果表明,本文装置中 CMOS 一个像素点对测量结果的影响为 1.0213×10^{-4} ,若更换更高分辨率的 CMOS,则可进一步减小测量误差。该测量系统还具有结构简单、成本低以及测量过程的抗干扰性和高稳定性的特点,有望应用于工业生产领域封闭管道中处于非常温、非常压状态液体折射率的实时、自动和非接触在线监测。

参考文献:

- [1] JIMÉNEZ-MÁRQUEZA F, VÁZQUEZA J, JUBEDAB J, *et al.*. Low-cost and portable refractive optoelectronic device for measuring wine fermentation kinetics[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 178: 316-323.
- [2] YANG S Y, CHEN Y F, HORNG H E, *et al.*. Magnetically-modulated refractive index of magnetic fluid films[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81: 4931-4933.
- [3] MICHAL P, HANS A. In situ monitoring of metal surfaces exposed to milk using total internal reflection ellipsometry [J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 94: 247-252.
- [4] KRISHNA V, FAN C H, LONGTIN J P. Real-time precision concentration measurement for flowing liquid solutions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71: 3864-3868.
- [5] SALGADO A M, FOLLY R O M, VALDMAN B. Biomass monitoring by use of a continuous on-line optical sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 75: 24-28.
- [6] 袁博宇,李威,罗成名. 溶液浓度变化实时检测系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 18-23.
YUAN B Y, LI W, LUO CH M. Design of real-time measurement system for solution concentration changes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 18-23. (in Chinese)
- [7] 余文芳,黄佐华,周进朝,等. 用全反射法测冰醋酸和酒精的折射率[J]. *激光技术*, 2014, 38(2): 161-164.
YU W F, HUANG Z H, ZHOU J CH, *et al.*. Measurement of the refractive indexes of glacial acetic acid and alcohol by means of total reflection [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 161-194. (in Chinese)
- [8] 邢曼男,白然,普小云. 精确测量微量液体折射率的新方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 18(7): 1996-1201.
XING M N, BAI R, PU X Y. Novel measuring method for refractive index of micro-quantity liquid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 18(7): 1996-1201. (in Chinese)
- [9] SINGH H K, CHAMUAH N, SARKAR D, *et al.*. Non-intrusive technique for measuring refractive index of clear and transparent liquids[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(2): 313-314.
- [10] 傅海威,闫旭,邵敏,等. 纤芯失配的光纤 Mach-Zehnder 折射率传感器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2285-2291.
FU H W, YAN X, SHAO M, *et al.*. Optical fiber core-mismatched Mach-Zehnder refractive sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2285-2291. (in Chinese)
- [11] 叶骏伟. 基于光学临界角法的铅酸蓄电池电池液的密度测量研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
YE J W. *Research on Liquid Density Measurement of Lead-acid Batteries by Optical Critical Angle Method*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] 王弋嘉,张崇磊,王蓉,等. 差分干涉表面等离子体共振传感器的优化与验证[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 673-679.
WANG Y J, ZHANG C L, WANG R, *et al.*. Optimization and validation of differential interferometric surface plasmon resonance sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 673-679. (in Chinese)
- [13] PEVEC S, DONLAGIC D. Nanowire-based refractive index sensor on the tip of an optical fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(213114): 1-4.
- [14] ZHAO Y, CAI L, HU H F. Fiber-optic refractive index sensor based on multi-tapered SMS fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11): 6348-6353.
- [15] 童峥嵘,郭阳,杨秀峰,等. 基于多模-单模-多模结构和光纤布拉格光栅同时测量温度和折射率 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 921-926.
TONG ZH R, GUO Y, YANG X F, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on MSM structure combined with FBG[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 921-926. (in Chinese)
- [16] SHOJIRO N. Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6690-6694.
- [17] ALEJANDRO M R, JESUS M M, ROMEO S A, *et al.*. Method for measuring the refractive index of liquids using a cylindrical cell[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7): 074101-1-074101-6.

- [18] VILITIS O, SHIPKOV S P, MERKULOV D. Determining the refractive index of liquids using a cylindrical cuvette [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(11): 117001.
- [19] 邓捷, 吴立峰, 乔辉, 等. 钛白粉应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 65-67.
DENG J, WU L F, QIAO H, *et al.*. *Titanium Dioxide Application Handbook*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 65-67. (in Chinese)
- [20] WEI Y H, SHEN J Q, YU H T. Numerical calculation of multiple scattering with the layer model [J]. *Particulology*, 2009, 7: 76-82.
- [21] LEXANDER A K, REINER W, MICHAEL H, *et al.*. Angular spectrum of light transmitted through turbid media: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(16): 2595-5600.
- [22] VARGAS W E, GREENWOOD P, OTTERSED T J E, *et al.*. Light scattering in pigmented coatings: experiments and theory[J]. *Solar Energy*, 2000, 68(6): 553-561.
- [23] 陈余行, 马振斌. 最小偏向角法测量 NaCl 溶液浓度与折射率[J]. *实验科学与技术*, 2010, 8(6): 16-18.
CHEN Y H, MA ZH B. Research on the refractive index of NaCl solution by minimum angle of deviation[J]. *Experiment Science & Technology*, 2010, 8(6): 16-18. (in Chinese)

作者简介:



张宗权 (1959—), 男, 陕西凤翔人, 高级工程师, 1982 年于陕西师范大学获得学士学位, 主要从事图像信息处理、光电检测与光学仪器设计等方面的研究。E-mail: zzq@snnu.edu.cn



徐 铭 (1991—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事光学测量和图像处理方面的研究。E-mail: xuming@snnu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)