文章编号 2095-1531(2019)04-0826-07

应用最小偏向角法的液体折射率精密测试

孙一书[1],陈 怡[1*],韩 冰[2],袁 理[2]
(1. 吉林大学 原子与分子物理研究所,吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 质检中心,吉林 长春 130033)

摘要:本文提出了一种自研盛装器皿以提高液体折射率的测试精度。该器皿由金属框架与等厚玻璃窗口组成,其制造工艺相对简单,减少了透射反射面面型精度及窗口等光程因素带来的系统误差,提高了测试精度。本文采用的测试方法为最小偏向角法。最小偏向角法主要用于固体折射率的测试,较少应用于液体折射率的测试。主要因为需要制作特殊的盛装器皿,制造工艺难度大,难以控制面型精度及透射窗口的等光程,对测试结果造成较大影响。经过理论分析可知,采用本文设计的盛装器皿可以满足 10^{-6} 数量级的液体折射率测试需求。采用 0.2″高精度转台进行实验,耦合器皿带来的系统误差和测试系统的理论测量精度达 10^{-6} 数量级。对某离子液在 546.08 nm 特征谱线下实际测量的标准差为 1.42×10^{-6}。自研器皿满足液体折射率的精密测试需求。

关 键 词:液体折射率;最小偏向角法;误差分析
中图分类号:O431; O435 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191204.0826

Precision test technology of liquid refractive index using the method of minimum deviation angle

SUN Yi-shu[1], CHEN Yi[1*], HAN Bing[2], YUAN Li[2]
(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Changchun* 130012, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Quality Inspection Center, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yichen@jlu.edu.cn*

Abstract: A self-developed container made up of a metal frame and a glass window of equal thickness is proposed to improve the test accuracy of liquid refractive index. It improves test accuracy as the manufacturing process is relatively simple, which reduces the systematic error that arises due to the transflective surface and the equal optical path of the glass window. The test method in this paper uses the minimum deviation angle method, which is mainly used for testing solid refractive index but is less frequently applied to test liquid refractive index. Because a special container is needed, the manufacturing process is more complex, and the equal optical path length of transmission glass windows are difficult to control, which will greatly affect the test

收稿日期:2018-12-12;**修订日期**:2019-01-18
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61675198);吉林省科技发展计划项目(No. 20180201061SF)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61675198); Jilin Province Science and Technology Development Plan Project(No. 20180201061SF)

results. Using the container designed in this paper, theoretical test accuracy of liquid refractive index can reach the order of magnitudes 10^{-6}. In the experimental case of 0.2″ high-precision turntable, the systematic error brought by the coupled container and the theoretical measurement accuracy of the test system can satisfy the demands in the order of magnitudes 10^{-6}. The standard deviation of the actual measurement of an ionic liquid under the characteristic spectral line of 546.08 nm is 1.42×10^{-6}. The self-developing container meets the precise testing needs of the liquid refractive index.

Key words: liquid refractive index; the method of minimum deviation angle; error analysis

1　引　言

折射率是表征物质重要物理属性的参数,在光学、材料、化工、食品、医疗、石油等领域都有重要应用。折射率反映了物质的内在性质,对于探索物质结构、光学设计等有着不可替代的指导作用。借助折射率可以探索物质的光学性能、浓度、纯度、导电性,辨别混合物内部比例,鉴别物质真伪等。因此物质折射率的精密检测对于科学研究与工业生产等至关重要。相关高精度传感器的研究成为前沿课题,但是鉴于研发周期长、成本高,实验论证成功的例子少,目前没有被广泛应用于液体折射率测试实验中[1-6]。

液体折射率测试方法较多,从理论上一般可分为两类:一类是基于几何光学理论,以斯涅尔定律为代表,通过测量光线通过介质的偏折角度作为输入量,与作为输出量的折射率一一对应,构成函数关系。一类是基于光的波动理论,电磁波通过不同介质,相位发生改变;相位的改变作为输入量,与作为输出量的折射率一一对应,构成函数关系[7]。国内通常采用的测试方法有:最小偏向角法、V 棱镜法、全反射临界角法、光纤杨氏干涉法、激光照射法、衍射光栅法、CCD 测量法等。这些方法中有的要求对测试样品进行高精度的加工,有的需要对标准样品的折射率进行标定,有的需要配制特定测试液,有的需要复杂的结构来支撑实验[1-8]。国外,液体折射率测量精度也不高,对于较高精度液体折射率测试方案也十分稀少或者成本太高。加拿大 Military University of Technology 的 R. Zawisza 等人通过光纤、光谱分析仪等搭建了液体折射率测试设备,其测试精度仅达到 10^{-4}[9]。阿塞拜疆科学院的 Humbat Nasibov 等人基于机器视觉技术利用激光光源所做的液体折射率测试实验,精度比 R. Zawisza 等人的设备高一个数量级,但是测试设备的成本更高、对实验平台的稳定性要求更加苛刻、数据重复性不高[10]。

针对国内外液体折射率测试精度大多依赖于高精尖设备或测试环境要求苛刻这一问题。本文提出一种基于最小偏向角法的液体折射率精密测试技术。此项研究采用的是金属框架配合等厚玻璃窗口特制的盛装器皿,用以解决液体高精度折射率测试问题。

2　测量原理

按照经典传统理论公式推导测试原理[11],测试原理图如图 1 所示,单色平行狭缝光射入棱镜后,沿棱镜另一侧射出,入射光与出射光夹角 δ 为偏向角。当 $i_1 = i_4$, $i_2 = i_3$ 时,此时偏向角 δ 最小,称作最小偏向角 δ_0。当样品处于最小偏向角位置时有:

$$i_2 = \frac{A}{2},\ i_1 = \frac{\delta_0 + A}{2}. \tag{1}$$

由斯涅尔定律 $\sin I_1 = n \sin I_2$,求得光学玻璃的折射率为:

$$n = \frac{\sin \dfrac{A + \delta_0}{2}}{\sin \dfrac{A}{2}}. \tag{2}$$

当光源稳定、棱镜等腰面面型波像差 PV 值优于 1/10λ、材料特性满足要求时,测量精度为 $\pm 2 \times 10^{-6}$。然而经典的最小偏向角法推导的公式是在将实际空气折射率近似为 1 的情况下推导出来的[12]。空气的实际折射率与真空的折射率

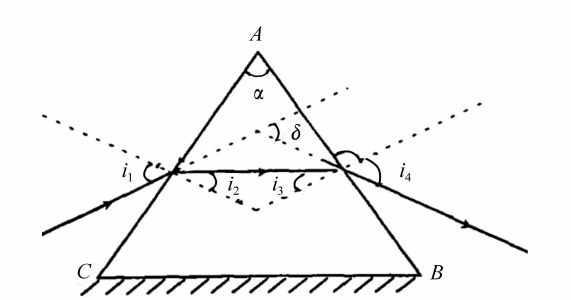


图 1 最小偏向角法测折射率原理图

Fig. 1 Schematic diagram of refractive index measurement by method of minimum deviation angle

差值在 10^{-4} 数量级,对于本文要求的液体折射率精度达到 10^{-6} 数量级的精密测试来说,必须进行修正。

设空气的实际折射率为 n_r,公式(2)修正为:

$$n = \frac{n_r \cdot \sin\frac{A+\delta_0}{2}}{\sin\frac{A}{2}}. \tag{3}$$

计算空气折射率的经验公式是 Edlen 于 1965 年推导出的,其准确度可达 $\pm 5\times10^{-8}$。将计算得出的不同温度下的空气折射率作为修正系数,这样液体折射率的测试可以达到 10^{-6} 数量级。如表 1 所示。

表 1 几种特定温度下空气折射率

Tab. 1 Air refractive indexes at several specific temperatures

T	15 ℃	18 ℃	20 ℃	22 ℃	25 ℃
n_r	1.000 277 1	1.000 274 3	1.000 272 4	1.000 271 5	1.000 267 8

以上计算出的空气折射率仅在第四部分误差分析中作为修正值采用,实验测试所修正的值采用传感器采集的数据进行软件算法自修正,其中的算法采用吴炳阳等人为中国计量科学院对 Edlen 公式进行修改后的公式[10]。

3 盛装器皿设计

本文所述盛装器皿有别于以往基于最小偏向角法设计的液体折射率的器皿,这也是本文的创新点之一。李明溪、温建平等人都论证了制定样品池利用最小偏向角法测量液体折射率的可行性,但是他们是以假定两个透射玻璃面等厚为前提进行论证的[13-14]。而在实际工作中,在高精度液体折射率测试下,两块玻璃等厚的程度已经不可以忽略。由于文献中所述盛装器皿制造工艺限制,易发生液体外漏现象;同时液体载体密封性与等厚性难以兼顾。光学加工精度将直接影响测试精度,难以满足 10^{-6} 数量级的高精度测试要求。

盛装器皿的设计是液体折射率测试有别于其他方法的关键。这样设计的盛装器皿使得传统固体折射率测试的最小偏向角法在液体折射率的测试中可以实现,并且精度可以达到 10^{-6}。此种测试方法具有高精度、数据稳定、易操作等优势。

如图 2 所示,盛装器皿采用金属框架配合等厚玻璃窗口制成。三角棱体主体由不锈钢 304 制作,顶部留有倒换液体的空心区域,不锈钢框架塔差不大于 30″。等腰的两侧留有处处等厚的玻璃窗口。窗口玻璃的选材要求条纹度 1 类 A 级、应力双折射 1 类、光学均匀性 1 类、气泡度 A_0 级。李明溪同时论证了两个等腰面玻璃的折射率不会影响液体折射率的测量误差,但是两个窗口应采

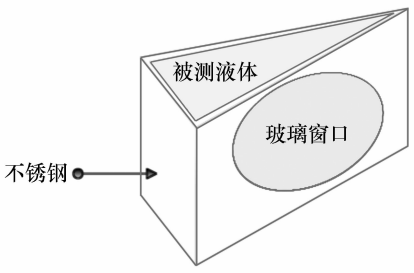


图 2 盛装器皿示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the vessel

用同一批次玻璃进行加工。窗口的加工要求各部分等厚,等光程波像差 RMS 值一般要求优于 1/35λ。器皿的 3 个边长按照 50 mm 加工,不锈钢等腰面中心尽可能大镂空。镂空处进行光学攻丝处理,将等厚玻璃窗口用压圈压紧。这样可以保证对特殊腐蚀性液体依然可以测试。图 3 为测量光路示意图。

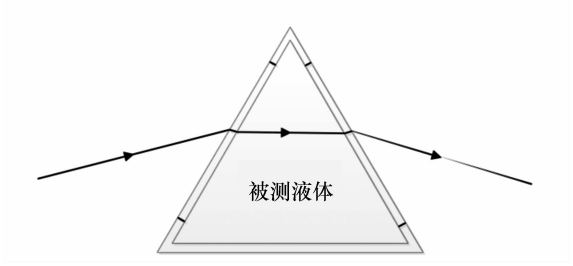


图 3　测量光路示意图

Fig. 3　Schematic diagram of measuring optical path

4　误差分析

根据式(3)可知折射率 $n=f(A,\delta_0)$ 是顶角 A 与最小偏向角 δ_0 的函数,因此只需要考虑玻璃窗口对 A 与 δ_0 的误差就可以计算整个测试方法的测试误差[15]。

4.1　玻璃窗口等光程误差与转角误差的合成

玻璃窗口等光程带来的误差是与固体最小偏向角法折射率测试的最大不同点。按照李明溪的理论分析是没有误差的,但这是在光程差为 0 的理想情况下论证的[13]。然而对于 10^{-6} 数量级的精密测试,光程差是必须考虑的因素,因此由玻璃窗口带来的误差必须考虑进去。

一般要求单片等光程 RMS 波像差优于 1/35λ,为了计算极限误差,玻璃窗口的最大直径设置为 25 mm,计算得出对顶角的系统误差为 ±0.15″。

本文实验采用的转台转角标准差为 0.2″。按照单次测量标准差合成:

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{s}u_i^2+\sum_{i=1}^{q}\sigma_i^2}\ , \tag{4}$$

其中,单项未定系统误差 s 个,单项随机误差 q 个,它们的标准差分别为:

$$u_1,u_2,\cdots,u_s$$

$$\sigma_1,\ \sigma_2,\cdots,\ \sigma_q$$

将数值代入可得:

$$\sigma_{\mathrm{A}}=\sqrt{2\times 0.15''^2+0.2''^2}=0.29''. \tag{5}$$

4.2　玻璃窗口等光程误差与最小偏向角误差的合成

由几何关系与斯涅耳定律,推导可得:

$$\delta_0=2i_1-A. \tag{6}$$

设由玻璃折射进入液体的入射角为 i'_1,玻璃窗口等厚标准差与两个面法线夹角标准差相同,同样入射角 i_1 的标准差为

$$\sigma_{i_1}=0.15''\ , \tag{7}$$

最小偏向角的标准差为

$$\sigma_{\delta_0}=\sqrt{\left(\frac{\partial\delta_0}{\partial i_1}\right)^2\sigma_{i_1}^2+\left(\frac{\partial\delta_0}{\partial A}\right)^2\sigma_A^2}\ , \tag{8}$$

将式(5)、式(6)、式(7)代入式(8)中可得:

$$\sigma_{\delta_0}=0.42''. \tag{9}$$

4.3　液体折射率误差分析

液体折射率测量的标准不确定度为:

$$\sigma_n=\sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial A}\right)^2\sigma_A^2+\left(\frac{\partial n}{\partial\delta_0}\right)^2\sigma_{\delta_0}^2}\ , \tag{10}$$

而由式(3)可得:

$$\frac{\partial n}{\partial A}=\frac{1}{2}n_{\mathrm{r}}\cdot\frac{\cos\dfrac{A+\delta_0}{2}\cdot\sin\dfrac{A}{2}-\sin\dfrac{A+\delta_0}{2}\cdot\cos\dfrac{A}{2}}{\left(\sin\dfrac{A}{2}\right)^2}\ , \tag{11}$$

$$\frac{\partial n}{\partial\delta_0}=\frac{n_{\mathrm{r}}}{2\sin\dfrac{A}{2}}\cdot\cos\left(\frac{A+\delta_0}{2}\right). \tag{12}$$

令 $A=60°$,$\delta_0=50°$,在实验室温度为 20 ℃时,代入式(11)、(12),则

$$\frac{\partial n}{\partial A}=-0.848\ , \tag{13}$$

$$\frac{\partial n}{\partial\delta_0}=0.575\ , \tag{14}$$

将式(5)、式(9)、式(13)、式(14)代入式(10)得:

$$\sigma_n = 1.67 \times 10^{-6}. \quad (15)$$

4.4 折射率的修正

仪器配有温度、气压、相对湿度传感器，会实时采集转台附近实验环境条件。按照国标 GB/T 7962.1-2010 中 8.2 要求进行空气折射率修正[16]。

$$n_{ks} = [8\,432.13 + 2\,406\,030(130 - \sigma^2)^{-1} + 15\,997(38.9 - \sigma^2)^{-1}] \times 10^{-8}, \quad (16)$$

式中，σ 为真空中波数，$\sigma = \lambda^{-1}$；n_{ks} 为 Edlen 公式给出的空气折射率。

接下来测试环境空气折射率对温度 T 和气压 P 的修正，按照式(17)计算。

$$(n)_{T,P} = n_{ks} \times \frac{0.001\,388\,2P}{1 + 0.003\,671T}, \quad (17)$$

式中，$(n)_{T,P}$ 为测试环境温度和气压条件下对应的折射率。加上空气湿度修正后，变为

$$(n_k)_{T,P,H} = (n)_{T,P} - f(5.722 - 0.045\,7\sigma^2) \times 10^{-8}, \quad (18)$$

其中，$(n_k)_{T,P,H}$ 为测试环境温度、气压和空气湿度 f 条件下的空气折射率。

液体折射率温度系数 dn/dt 的修正值为实验修正值，需要大量的实验数据分析获得，因此无法修正，此误差一般为 $10^{-6} \sim 10^{-8}$。该误差可在实验建立数据库后再进行修正。综上所述，温度系数带来的影响对于此测试技术的研究可忽略。

设垂直于玻璃窗口法线方向为 x，同时垂直于顶角棱与底角棱方向为 y。热应力变化公式为：

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T, \quad (19)$$

其中，Δl 为玻璃轴向长度变化量，α 为线膨胀系数，ΔT 为温度变化量。根据式(19)可知，x、y 方向的 Δl 均对窗口玻璃等光程波像差没有影响。检测环境为光学材料恒温检测实验室，温度为(20±2) ℃，8 h 内变化小于 0.5 ℃，洁净度 10 万级。在测试时间内，实验中所用的材料不锈钢框架因温度变化引起的应变可以忽略不计，即对玻璃窗口不会产生影响。

对于金属框架塔差对测试结果造成的影响，可以依据等腰面的自准直瞄准信息，通过载物台的俯仰调整装置进行补偿，此项不予修正。

此种测试方法仅研究对空气相对湿度、温度、大气压强的修正。这 3 个因素也是主要的影响因素。其他环境因素，例如二氧化碳浓度等虽然也会影响测试误差，但影响数量级仅为 10^{-8}[17]。对于 10^{-6} 数量级的折射率测试实验可以忽略。

5 实验与理论误差分析的对比

液体折射率实验采用的是德国 Trioptics SpectroMaster HR 折射率测量仪，此仪器采用国家计量院计量校准做对比测试，测试数据可信。实验室为恒温实验室，样品测试前按照国标 GB/T 7962.1-2010 中 7.1.2 要求恒温 12 h 以上。光源采用具有相应光谱的光谱灯通过窄带滤光片进行筛选。图 4、图 5 所示为未盛装液体与盛装液体的实际情况。

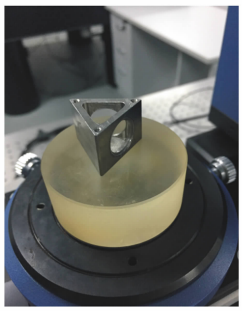


图 4 未盛装液体的样块

Fig. 4 Sample without the liquid

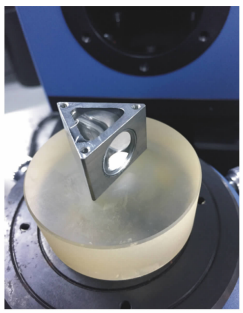


图 5 盛装液体的样块

Fig. 5 Sample containing the liquid

测试谱线为平行狭缝光，探测采集到能量后根据软件算法精准定位其绝对角度值。顶角 A

的测试值见表 2。软件测出最小偏向角后,直接运用软件算法算出折射率 n,测出某离子液的液体折射率数据见表 3。

表 2　顶角 A 测试值

Tab. 2　Test value of head angle A

测试次数	1	2	3	4	5	标准差
顶角	60.007 20°	60.007 17°	60.007 21°	60.007 20°	60.007 20°	1.37e-5

表 3　某离子液在 Hg 光谱灯 546.08 nm 特征谱线下的测试数据

Tab. 3　Test data of ionic liquid under the characteristic line of 546.08 nm of Hg spectrum lamp

测试次数	1	2	3	4	5	标准差
折射率值	1.366 802 2	1.366 799 1	1.366 801 5	1.366 801 5	1.366 798 7	1.42e-6

离子液名义值为 1.366 8,与测量值平均值 1.366 801 0 的相对误差为 7.32×10^{-7}。实验数据与理论误差分析精度吻合,证明此种盛装器皿与该测试方法可以稳定地进行液体折射率的精密测试。

6　结　论

本文采用了一种比传统三棱杯更容易加工的盛装器皿,采用该器皿进行液体折射率测试具有数据稳定可靠、测试精度高、光学加工易保证精度等优点。

本文所研究的液体折射率测试方法中,采用了国标要求的空气折射率修正和对于玻璃窗口的等厚误差分析,从而确定了此种测试方法的测试精度。此测试方法为 10^{-6} 数量级液体折射率的精密测试提供了可靠保障。实验数据与理论分析误差精度吻合,证明了此研究方法可靠、稳定。为研究液体性质、激光作用物质特性、物质光学特性等基础科学研究与工程设计提供了可靠数据。

参考文献:

[1] 辛督强,朱民,解延雷,等. 测量液体折射率的几种方法[J]. 大学物理,2007,26(1):34-37.
XIN D Q,ZHU M,XIE Y L,*et al*.. Several measuring methods of the refractive index of liquid[J]. *College Physics*,2007,26(1):34-37. (in Chinese)

[2] 周凯宁,肖宁,陈棋,等. 3 种测量三棱镜折射率方法的对比[J]. 实验室研究与探索,2011,30(4):22-25,90.
ZHOU K N,XIAO N,CHEN Q,*et al*.. Comparing of three prism refractive index measuring methods[J]. *Research and Exploration in Laboratory*,2011,30(4):22-25,90. (in Chinese)

[3] 张凤云,曹文,张利巍. 测量液体折射率的几种光学方法的实验研究[J]. 大学物理实验,2013,26(4):33-34,43.
ZHANG F Y,CAO W,ZHANG L W. Experimental study on measuring liquid refractive index by optics methods[J]. *Physical Experiment of College*,2013,26(4):33-34,43. (in Chinese)

[4] 王文生,徐斌,张军. 最小偏向角法 V 棱镜法测量折射率的原理公式误差[J]. 长春光学精密机械学院学报,1995,18(1):5-10.
WANG W SH,XU B,ZHANG J. The principle formula error of measuring the refractive index by the method of minimum deviation angle and the method of V-prism[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*,1995,18(1):5-10. (in Chinese)

[5] 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):16-17,112.
CHEN Y X,MA ZH B. Research on the refractive index of NaCl solution by minimum angle of deviation[J]. *Experiment Science and Technology*,2010,8(6):16-17,112. (in Chinese)

[6] 戴一帆,张志伟,张文静,等. 光纤传感测量液体折射率的方法研究[J]. 光学仪器,2016,38(6):476-480.

DAI Y F, ZHANG ZH W, ZHANG W J, *et al*.. Method for measuring the refractive index of liquid by optical fiber sensing [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(6): 476-480. (in Chinese)

[7] 汪晓春, 杨博文, 何冬慧. 一种基于迈克尔逊干涉仪测量透明液体折射率的方法[J]. 光学仪器, 2012, 34(5): 1-4.
WANG X CH, YANG B W, HE D H. A method to measure refractive index of transparent liquid based on michelson interferometer[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(5): 1-4. (in Chinese)

[8] 杨春章, 薄晓红. 最小偏向角法测量光学玻璃的折射率[J]. 计量技术, 1991(2): 12-13, 45.
YANG CH ZH, BO X H. Measuring the refractive index of optical glass by the method of minimum deviation angle[J]. *Measurement Technique*, 1991(2): 12-13, 45. (in Chinese)

[9] ZAWISZA R, EFTIMOV T, MIKULIC P, *et al*.. Dual-resonance long-period grating in fiber loop mirror structure for liquid refractive index measurement[J]. *Opto-Electronics Review*, 2018, 26(1): 24-28.

[10] NASIBOV H, KHOLMATOV A, MEHMETBEYLI I. A method for a precise and instantaneous measurement of a refractive index[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1886-1896.

[11] 杨志文, 牟达, 刘智颖, 等. 光学测量[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011.
YANG ZH W, MU D, LIU ZH Y, *et al*.. *Optical Measurement*[M]. Beijing: Weapon Industry Publishing House, 2011. (in Chinese)

[12] 吴炳阳, 于晋龙, 王菊, 等. 小型化空气折射率测量装置的精度修正[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040102.
WU B Y, YU J L, WANG J, *et al*.. Accuracy correction of miniaturization device for air refractive index measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040102. (in Chinese)

[13] 李明溪. 用最小偏向角法测量液体折射率[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2000(2): 117-121.
LI M X. Measurement of refraction rate of liquids by using the least deflection angle[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2000(2): 117-121. (in Chinese)

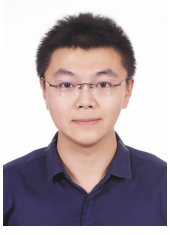
[14] 温建平, 唐运爱, 钟远军, 等. 最小偏向角法测液体折射率实验的研究[J]. 实验室科学, 2014, 17(2): 20-23.
WEN J P, TANG Y A, ZHONG Y J, *et al*.. Measurement of refraction rate of liquids by using the least deflection angle [J]. *Laboratory Science*, 2014, 17(2): 20-23. (in Chinese)

[15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2017. (in Chinese)

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7962.11-2010 色光学玻璃测试方法 第 11 部分: 可见折射率精密测试[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 7962.11-2010 Test method for colourless optical glass-Part 11: Precise test method for refractive index in the visible wave band[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2011. (in Chinese)

[17] 金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
JIN Q F. Study on factors affecting atmospheric refractive index[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

作者简介:



孙一书 (1990—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: sunyishu@yeah.net 。

陈 怡 (1977—), 女, 吉林长春人, 博士, 副教授, 2009 年于韩国仁荷大学获得博士学位, 主要从事光和物质相互作用方面的研究。E-mail: yichen@jlu.edu.cn。