

“干涉逼近法”测量液体折射率

李天初

谭小地

(中国计量科学研究院长度处光电室, 北京 100013) (西安工业学院仪器系, 西安 710032)

提 要

提出了一种高精度测量液体折射率的新方法——“干涉逼近法”。这种方法可以在测量过程中监视被测液体温度不均匀性给测量带来的误差。由于受温度测量的限制, 其测量液体折射率的不确定度在 1×10^{-6} 到 4×10^{-5} (2σ) 之间, 具体值取决于液体折射率的温度系数。

关键词 液体折射率, 干涉测量。

液体折射率及其温度系数是表征液体性质的重要参数⁽¹⁾。传统的测量方法有许多, 其中的干涉计量在液体折射率及温度系数的高精度测量方面蕴藏着巨大的潜力⁽²⁾。1966年 Kinder 曾用改进的瑞利干涉仪测量液体折射率, 其分辨率可达 1×10^{-7} ⁽³⁾。近两年相继提出了一些新的, 较复杂的干涉仪测量液体折射率^(2, 4)。虽然这些方法测量的分辨率都很高, 但它们均没有讨论温度均匀性对测量精度的影响。本文提出的“干涉逼近法”是直接观察液体中的干涉场, 由温度不均匀性引起的折射率变化可以通过干涉条纹的分布体现出来。

1 基本原理

在平面干涉仪下观察图 1 中所示的充满被测液体的阶梯室, 可以看到如图右边所示的干涉条纹组。每个液体台阶的光程差表示为

$$nL = (N + \epsilon)\lambda/2, \quad (1)$$

式中 n 为液体的折射率, L 为台阶几何高度, N 、 ϵ 为干涉条纹干涉级的整数和小数部分, λ 为真空中的波长。显然, 只要知道了干涉级次和几何高度, 利用(1)式就可以求出折射率 n 。如果先用精度较低的测量方法粗测液体的折射率, 其不确定度 dn 与干涉测量中条纹读数的不确定度 $d(N + \epsilon)$ 之间的关系可由(1)式微分得到

$$d(N + \epsilon) = 2Ldn/\lambda, \quad (2)$$

在经典的小数重合法测量中, 已经严格地分析了干涉读数唯一的原则: 由于在干涉测量中, 只

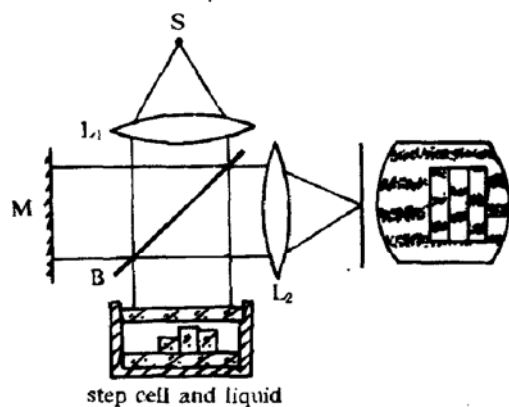


Fig. 1 The instrument of "IAM" measurement

能准确地读出条纹小数,所以要求初测误差引起的干涉条纹不确定性必须小于半个整数条纹⁽⁵⁾.若选择适当的 L 值,可以保证由 dn 引起的干涉条纹读数不确定度小于半个整数条纹,即 $dN = 0$, $(d\epsilon)_{\max} < 0.5$.在此条件下,可从(2)式得出台阶高度:

$$L = \lambda(d\epsilon)_{\max}/2dn, \quad (3)$$

只要我们测出了干涉条纹的小数部分 ϵ ,利用折射率的预测值求出干涉条纹的整数部分 N ,液体的折射率 n 就可以通过(1)式计算出来.这样得到的折射率其误差仅仅取决于测量干涉级次的读数误差 $d\epsilon$.用激光做光源,由于干涉图的对比度比较好,对于稍有经验的人可以保证读出 $1/20$ 个条纹的精度,而一般人均能达到 $1/10$ 个条纹,取条纹读数误差为 $d\epsilon < 0.1$,由此引起折射率测量误差为

$$dn' = \lambda d\epsilon/2L. \quad (4)$$

由(3)、(4)式可得

$$dn/dn' = (d\epsilon)_{\max}/d\epsilon \approx 5 \text{ (倍)}$$

可见,一个台阶能将折射率测量精度提高约 5 倍.若将此精度的测量结果再做为预测值并增加一个满足(3)式的台阶,又能将测量精度进一步提高.若有一系列这样的台阶,测量精度就可以按几何级数增加.其递推关系如下:

$$\left. \begin{aligned} L_i &= \lambda d\epsilon/2dn_{i-1}, & (i = 1, 2, \dots) \\ dn_i &= \lambda d\epsilon/2L_i, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

综上所述,这种方法将折射率测量转化为长度测量,其绝对误差是一个常数,而相对误差会随着测量长度的增大而减小.这就是“干涉逼近法”提高测量精度的基本思想.

2 实验及误差分析

若用经过改造并定标的商品阿贝折射仪给出任意温度下液体折射率的预测值.在测温不确定度为 0.05°C ,液体温度系数为 4×10^{-4} 时,其不确定度 $(2\sigma)dn_0 = \pm 6 \times 10^{-4}$.按照(5)式给出的关系,可以得到图 1 中三个台阶的高度和各自的测量不确定度〔为保证 $(d\epsilon)_{\max} < 0.5$,实际的台阶高度比理论值稍小些〕

$$\begin{aligned} L_1 &= 0.24 \text{ mm}, & dn_1 &= 1.3 \times 10^{-4} \\ L_2 &= 1.10 \text{ mm}, & dn_2 &= 2.9 \times 10^{-5} \\ L_3 &= 4.90 \text{ mm}, & dn_3 &= 6.5 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

说明经过三个台阶的干涉测量,可以将折射率的测量精度提高到 6.5×10^{-6} ,即提高了近两个数量级.

在实际测量中,还要考虑下列三个因素对测量精度的影响:台阶高度的测量误差,波长误差和温度测量误差.

将空液体室在科氏干涉仪下用小数重合法(不确定度 $(2\sigma) \pm 0.01 \mu\text{m}$)测出几何高度,用 Edlen 公式换算到真空状态.并用中国计量院研制的单波长摄像量块干涉仪进行复合,其测量不确定度 $\pm 0.009 \mu\text{m}$ (2σ).由台阶几何高度误差引入的误差为 $(dn)_L = 3 \times 10^{-6}$.为了避免温度变化对高度的影响,台阶选用熔石英制成.并在其反射表面镀铝和二氧化硅保护层,以便在充入液体后仍有足够的反射率.

光源波长误差对折射率的测量也会带来一定的影响.对于自然运转的 He-Ne 激光,其波长相对不确定度小于 2×10^{-6} ,对折射率测量的影响是 $(dn)\lambda = 3 \times 10^{-6}$.

温度对液体折射率的测量精度影响极大,以至限制了测量精度的进一步提高.由于干涉测

量仅与光程差有关,唯一影响测量精度的就是液体室的温度分布均匀性.尽管在实验中采用了园柱形液体室,整个测量装置放在恒温罩中,测温的铂电阻温度计浸泡在待测液体里,但仍然能够看到由于液体的温度分布不均匀所导致的干涉条纹弯曲.因此,在测量时,尽量保证在干涉条纹平直的时候进行测量.实验采用的铂电阻温度计的测温不确定度为 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ (2σ),若 $\alpha = -4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,由此引入的液体折射率不确定度是 $(dn)_r = 1.6 \times 10^{-5}$.

上述各项误差合成出“干涉逼近法”实测某个温度下液体折射率的总不确定度为:

$$(dn)_{\text{总}} = \sqrt{(dn)^2 + (dn)_L^2 + (dn)_I^2 + (dn)_r^2} \approx 1.89 \times 10^{-5}$$

用“干涉逼近法”测量了几种液体的折射率,全部计算过程均由计算机完成,其中两种的折射率测量重复性如下,并与阿贝折射仪的测量结果进行比较(如表 1 所列).表 1 中,1#,2# 代表两种被测液体;Abbe 表示用阿贝折射仪测量的结果;IAM 表示用干涉逼近法测量的结果.

Table 1

1#	Abbe	“IAM”	2#	Abbe	“IAM”
n (20°C)	1.4657	1.46614	n (20°C)	1.4756	1.47606
α	-3.80×10^{-4}	-3.79×10^{-4}	α	-3.65×10^{-4}	-3.64×10^{-4}
Residual	5.50×10^{-5}	1.20×10^{-5}	Residual	1.02×10^{-4}	1.18×10^{-5}

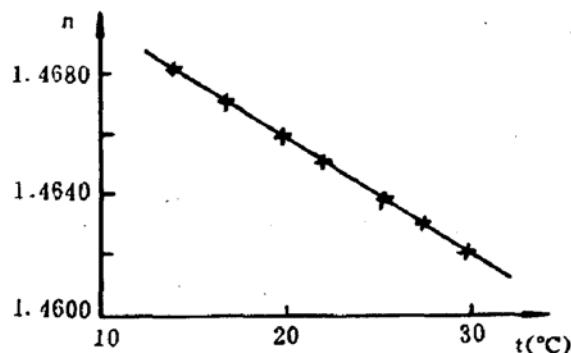


Fig. 2 Result of measurement

图 2 是用“干涉逼近法”在不同温度下测出的一组折射率值以及拟合出的直线.

3 结 论

“干涉逼近法”测量液体折射率精度高、装置简单.由于液体室呈轴对称的园柱形,有利于被测液体的温度均恒.同时,在测量中,从干涉条纹的弯曲可以直接监视被测液体温度的分布均匀程度.

“干涉逼近法”在目前已应用于中国计量科学研究院研制的“光纤折射率分布及几何参数测量标准装置”中,为该装置测量光纤匹配液的折射率及其温度系数^[6].

需要说明的是,本文提出的“干涉逼近法”最终的液体折射率测量不确定度并不是一个绝对数.由于温度对液体折射率的影响,测量液体折射率精度的进一步提高就取决于测量温度的精度.本文所用的液体其折射率温度系数是 $-3.8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,在测温精度为 0.04°C 的条件下,其折射率测量不确定度的极限也就是 1.5×10^{-5} .推而广之,无论采用什么方法测量液体的折射

率,其精度最终都要受到测温精度的限制.当然,若测量温度系数小的液体,不确定度将会随之提高.

在使用“干涉逼近法”测量液体折射率的实验中,从干涉条纹的弯曲发现被测液体的温度不均匀分布严重地限制了测量精度.对实验中采用的 $\alpha = -3.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 的液体,若条纹弯曲了十分之一一个条纹间隔,相应的温度差就是 0.017°C .因此只有在条纹完全平直的时候进行测量才能彻底避免温度分布不均匀的影响.“干涉逼近法”采用的液体室形状是最有利于温度均匀分布的园柱形,而且把液体室整个放入干涉仪的保温箱中恒温,充分保证了在测量时的温度均匀分布.“干涉逼近法”是以干涉计量作为测量手段,在测量过程中可实时监测温度分布的均匀性,有效地避免了温度分布不均匀的影响.

作者非常感谢中国计量科学研究所的王民明工程师在实验中给予的帮助和支持.感谢曹维贵、王燕、朱磊等同志提供了测试条件.

参 考 文 献

- [1] N. Bauer, K. Fajans, Z. Lewin, *Refractometry Techniques of Organic Chemistry Vol. 1, Physical Methods of Organic Chemistry Part I*. Aed. A Weissberger, New York: Interscience, 1960:1139
- [2] T. H. Barnes, K. Matsumoto, T. Eiju *et al.*, *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7):745~751
- [3] W. Kinder, *Optik Stuttgart*, 1966, **24**:323~334
- [4] C. Sainz, J. E. Calatroni, G. Tribillon, *Meas. Sci. Tech.*, 1990, **1**:356~361
- [5] 赵达尊,张怀玉 编, *波动光学*. 北京:宇航出版社,1988
- [6] T. Li, Y. Fang, X. Tan *et al.*, Standard apparatus at the measurements of geometric parameters and refractive index profile of optical fiber at NIM. in *Proc. IMEKO X I*, 1991:1~62

Interferometric approach method for measuring refractive index of liquid samples

LI Tianchu

TAN Xiaodi

(National Institute of Metrology, Beijing 100013) (Xian Institute of Technology, Xian 710032)

(Received 10 March 1992; revised 1 June 1992)

Abstract

A new interferometric technique for measuring liquid refractive index (RI) with high accuracy has been developed, which is directly traceable to the wavelength of He-Ne laser. The accuracy of this method is improved by increasing the optical path of step. The experiment revealed that the temperature distribution nonuniformity in the liquid limits the practical uncertainty of liquid RI measurement from 1×10^{-6} to 4×10^{-5} (2σ) depending on its temperature coefficient although much finer resolution can be easily achieved with this method.

Key words refractive index of liquid, interferometric measurement.