

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107739

基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率 测量误差分析与补偿*

杨 晔, 严利平, 陈本永, 楼盈天

(浙江理工大学纳米测量实验室 杭州 310018)

摘要:为了解决基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量中透光窗片倾斜和真空腔内残余气压对测量精度的影响,本文分析了真空腔拉伸过程中透光窗片倾斜引入的误差,并提出了透光窗片倾斜误差检测和补偿方法,同时研究了真空腔内残余气压的测量和补偿方法。为了验证所提出方法的可行性,搭建了基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量系统,测量结果与 Edlén 公式结果进行对比。实验结果显示,本系统测量结果与 Edlén 公式结果具有较好的一致性,在 2.2 h 和 20 min 内,两者之间偏差的标准偏差分别为 2.34×10^{-8} 和 2.89×10^{-8} ,这表明本文所提出的空气折射率测量误差补偿方法是可行和有效的,可应用于激光干涉精密位移测量中空气折射率的实时补偿。

关键词: 激光干涉;空气折射率测量;长度可变真空腔;Edlén 公式;误差补偿

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Analysis and compensation of the measurement error of air refractive index using a laser interferometer with a variable length vacuum cavity

Yang Ye, Yan Liping, Chen Benyong, Lou Yingtian

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To solve the influences of the tilt of optical windows and the residual air pressure in the vacuum cavity on the measurement accuracy in the laser interferometric air refractive index measurement based on the variable length vacuum cavity, this paper analyzes the error caused by the optical window tilt when the vacuum cavity is pulled. And a method for detecting and compensating the tilt error of windows is proposed. In addition, the method of measuring and compensating the air residual pressure in the vacuum cavity is studied. To verify the effectiveness of the proposed method, a laser interferometric air refractive index measurement system based on the variable length vacuum cavity is constructed, the measurement results with proposed method are compared with the results obtained by Edlén equation. Experimental results show that, the measurement results of the two method are in good agreement. In 2.2 h and 20 min, the standard deviations of the differences between the measurement results of the proposed method and that of the Edlén equation are 2.34×10^{-8} and 2.89×10^{-8} , respectively. This indicates that the proposed measurement error compensation method of air refractive index is feasible and effective, which can be applied to the real-time compensation of air refractive index in laser interferometric precision displacement measurement.

Keywords: laser interferometry; air refractive index measurement; variable length vacuum cavity; Edlén equation; error compensation

0 引 言

以激光波长为长度基准的激光干涉位移测量技术是目前位移测量领域的主流技术,广泛应用于各种精密测

量领域^[1-3]。由于激光干涉位移测量大多在空气中进行,而激光在空气中的波长值与空气折射率密切相关,因此空气折射率测量的准确性是提高激光干涉位移测量精度的关键因素^[4-5]。

通常,有两类获取空气折射率的方法。一类称为间

收稿日期:2021-04-10 Received Date: 2021-04-10

* 基金项目:国家自然科学基金(51875530, 51475435)、浙江省自然科学基金(LZ18E050003)项目资助

接测量方法,先通过传感器确定温度,压力,湿度和 CO_2 含量等环境参数,再利用 Edlén 公式计算空气折射率。自从 1966 年提出 Edlén 公式以来,研究者们已经提出了不同的修正公式来提高计算精度^[6-10]。这类方法的测量精度主要受到传感器和公式自身精度的影响。

另一类是以两端装有透视窗片的真空腔为敏感单元,通过激光干涉法直接测量空气折射率。真空腔可分为长度不变和长度可变两种。当真空腔长度不可变时,可以通过真空腔内交替产生真空和大气条件时导致的干涉相位变化确定空气折射率^[11-14]。在这种测量方法中,抽气过程将导致气压和温度的快速不均匀变化,以及真空腔的变形和振动,这会引入干涉信号的失真并带来额外的噪声。因此有了将不同长度的永久真空腔交替放入测量光路来产生相位变化的测量方法^[15-19]。预先抽空的密闭腔不需要抽气程序,避免了抽气过程的相关干扰。但是这种测量方法只能测量特定范围的空气折射率。

为了扩大空气折射率的测量范围,长度可变的真空腔被应用于空气折射率测量系统^[20-22]。通过拉伸真空腔可改变测量光路在真空中和空气中的光程(光程是把光在介质中传播的路程折合为光在真空中传播的相应路程)。在数值上等于介质折射率乘以光在介质中传播的路程),并产生连续的相位变化,进而可测得空气折射率。采用这种方法,空气折射率的测量范围不受限制。但是在拉伸真空腔的过程中,透光窗片的倾斜将影响实际光程的变化,此外,腔内残留空气也会影响空气折射率测量结果。

在本文中,我们提出了一种补偿长度可变真空腔透光窗片倾斜误差和腔内残留气压误差的激光干涉空气折射率测量方法,设计和搭建了测量系统,进行了实验验证。

1 激光干涉空气折射率测量原理

基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量原理如图 1 所示。激光器(Laser)、分光镜(BS_1)、参考角锥棱镜(M_1)和测量角锥棱镜(M_2)构成迈克尔逊干涉仪,由透光窗片 W_1 、 W_2 和波纹管构成的长度可变真空腔置于干涉仪测量臂,光电探测器(PD_1)用于接收干涉信号。当窗片 W_1 从 B 点拉伸至 A 点,真空腔长度变化 L_V 时,干涉仪测量臂光程随之变化 $2(n_a - n_0)L_V$ (n_a 和 n_0 分别真空腔外的空气折射率和真空腔内的真空折射率),则干涉信号的相位变化量 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \frac{2(n_a L_V - n_0 L_V)}{\lambda_0} \times 2\pi = \frac{4\pi L_V (n_a - n_0)}{\lambda_0} \quad (1)$$

其中, λ_0 是激光真空波长。

当腔内真空折射率 $n_0 = 1$, 且测得 $\Delta\varphi$ 和 L_V 时,可算得空气折射率 n_a 为:

$$n_a = 1 + \frac{\Delta\varphi \lambda_0}{4\pi L_V} \quad (2)$$

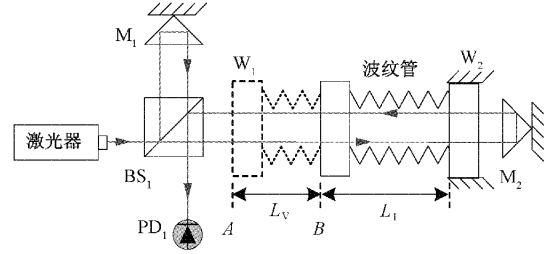


图 1 基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量原理

Fig. 1 Scheme of air refractive index measurement using the laser interferometer with a length-variable vacuum cavity

2 空气折射率测量误差分析和补偿方法

从式(2)可知,影响空气折射率测量精度的主要因素是真空腔的拉伸长度 L_V 的定位精度和干涉信号相位变化量 $\Delta\varphi$ 的测量精度。此外,拉伸真空腔时,透光窗片存在的微小倾斜将影响 L_V 和 $\Delta\varphi$ 的测量精度;真空腔内残留气体引起的腔内真空折射率 $n_0 \neq 1$ 也会对 $\Delta\varphi$ 的测量引入误差。

2.1 透光窗片倾斜误差分析和补偿

1) 透光窗片倾斜误差分析

图 1 中,透光窗片 W_2 的底部固定,透光窗片 W_1 的底部安装在线性运动平台的滑块上。当滑块带动 W_1 拉伸真空腔时两窗片将发生倾斜,如图 2(a)所示。窗片的倾斜使拉伸后的真空光程变小,同时窗片内的光程变大。图 2(b)是单个透光窗片倾斜误差分析图。设窗片高度为 H (窗片直立时激光光束从其二分之一高处水平穿过),厚度为 T ,倾斜角度为 α 。窗片倾斜使真空腔内真空光路减少 $2\Delta l$:

$$2\Delta l = H \cdot \tan\alpha \quad (3)$$

激光光束在单个透光窗片中多走的距离 Δl_1 为:

$$\Delta l_1 = l - T = T(\cos^{-1}\alpha - 1) \quad (4)$$

则两窗片内光程增加导致的干涉相位变化 $\Delta\varphi_c$ 为:

$$\Delta\varphi_c = \frac{8\pi T(n_a - n_q)}{\lambda_0} \cdot (\cos^{-1}\alpha - 1) \quad (5)$$

其中, n_q 是窗片折射率。

因此,为了提高空气折射率测量精度,需要对 $\Delta\varphi_c$ 和 $2\Delta l$ 进行补偿。

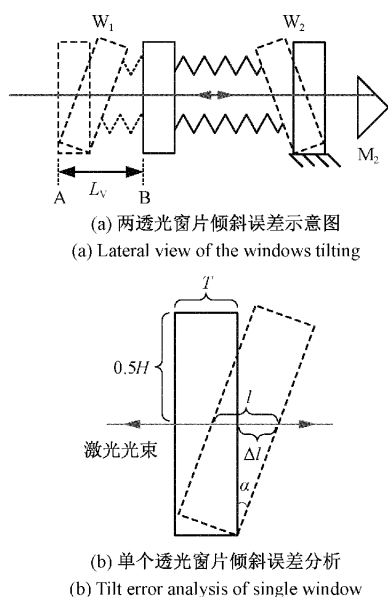


图2 真空腔拉伸时透光窗倾斜误差示意图
Fig. 2 Windows tilt error when pulling the cavity

2) 透光窗片倾斜误差补偿

为了补偿透光窗片倾斜误差对空气折射率的影响,构建了如图3所示的补偿光路。激光光束1和激光光束2分别从真空腔内部和外部水平穿过,构成测量干涉仪和补偿干涉仪。真空腔拉伸过程中,测量干涉仪用于测量空气折射率,补偿干涉仪用于检测透光窗片倾斜引起的相位变化。从图3可以看出,窗片倾斜时光束1和光束2在透镜内部光程变化相同,因此用补偿干涉仪测得的相位变化量来计算和补偿透光窗的倾斜误差。

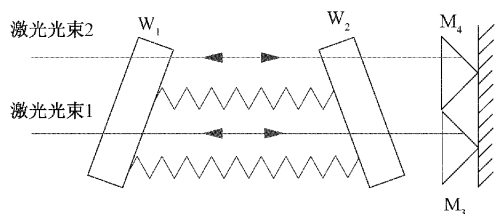


图3 透光窗倾斜误差补偿示意图
Fig. 3 Compensation schematic of the tilt error

根据式(5),测得 $\Delta\varphi_c$ 后,可计算得到窗片倾斜角 α :

$$\alpha = \arccos \left[\frac{8\pi T(n_a - n_q)}{\Delta\varphi_c \lambda_0 + 8\pi T(n_a - n_q)} \right] \quad (6)$$

将式(6)代入式(3),得到光束1在真空光路中的光程减少量 $2\Delta l$ 。

$$2\Delta l = H \cdot \tan \left\{ \arccos \left[\frac{8\pi T(n_a - n_q)}{\Delta\varphi_c \lambda_0 + 8\pi T(n_a - n_q)} \right] \right\} \quad (7)$$

2.2 真空腔内残留气压误差分析和补偿

在图1所示真空腔拉伸过程中,腔内残余空气压强会对空气折射率测量带来影响。假设透光窗 W_1 处于位置 B 和 A 时残留气体的空气折射率分别为 n_1 和 n_2 ,则真空腔拉伸前后测量臂光程变化引起的干涉信号相位变化量为:

$$\Delta\varphi_s = 4\pi \frac{L_V n_{as} + L_1 n_1 - (L_V + L_1) n_2}{\lambda_0} \quad (8)$$

式中: L_1 是透光窗 W_1 处于位置 B 时真空腔的长度, n_{as} 为实际空气折射率, n_1 和 n_2 可根据真空腔内气体的残余压强、温度等参数和 Edlén 公式计算。

从而得到实际空气折射率 n_{as} 为:

$$n_{as} = \frac{\lambda_0 \Delta\varphi_s}{4\pi L_V} + n_2 - \frac{L_1}{L_V} (n_1 - n_2) \quad (9)$$

比较式(2)和(9),可得真空腔残留气压引起的折射率测量误差 Δn 为:

$$\Delta n = (n_2 - 1) - \frac{L_1}{L_V} (n_1 - n_2) \quad (10)$$

在计算真空腔内的空气折射率时,首先使用与真空腔相连的真空计获得拉伸前后的真空腔内气压,其次因为真空腔由金属构成,金属优良的导热性使真空腔内外温度相同,所以使用腔外环境温度代替真空腔内气体温度。最后,实验条件下真空腔内残留气压可控制在 100 Pa 以下, CO_2 含量不大于约 0.05%。根据 Edlén 公式^[23],算得在低压干燥空气环境下真空腔内残留气体的空气折射率,进而得到 Δn 用于补偿。

2.3 空气折射率测量和补偿光路设计

为了补偿真空腔透光窗片倾斜误差和腔内残留气压误差对空气折射率测量的影响,设计了图4所示的空气折射率测量和补偿光路。由固定窗片 (W_2)、活动窗片 (W_1) 和真空波纹管构成的可变长度真空腔放置在分光镜 BS_2 、 BS_1 和角锥棱镜 M_3 、 M_4 之间。 W_1 安装在线性移动平台上,移动平台在测量过程中拉伸真空腔,真空计测量真空腔内的气压,温度计放置于真空腔附近测量环境温度。稳频激光器输出的单频激光被分光镜 (BS_3) 和反光镜 (R) 分为平行的两束激光 (光束1、光束2),分别作为测量干涉仪和补偿干涉仪的光源。其中测量干涉仪由 BS_1 、电光相位调制器 (EOM_1)、两个角锥棱镜 (M_1 、 M_3) 构成,测量干涉信号由光电探测器 (PD_1) 探测。激光光束1往返于真空腔内部用于测量真空腔拉伸导致的干涉相位变化 $\Delta\varphi_m$ 。补偿干涉仪则由 BS_2 、 EOM_2 、 M_2 、 M_4 和压电陶瓷驱动器 (PZT) 构成, PD_2 测得补偿干涉信号。激光光束2往返于真空腔外部,穿透两个窗片,用于测量窗片倾斜导致的干涉相位变化 $\Delta\varphi_c$ 。 EOM_1 和 EOM_2 用于对单频干涉信号进行正弦相位调制,从而采用 PGC-Arctan 相位解调方法获得干涉信号相位。同时,分

别对真空腔进行预拉伸和对 PZT 进行线性调制, 获得连续变化的测量干涉信号和补偿干涉信号, 进一步采用椭圆拟合算法对 PGC-Arctan 相位解调误差进行修正^[22]。

图 4 所示光路中, 在真空腔拉伸过程中, 首先测得 PD₁ 和 PD₂ 干涉信号相位变化量 $\Delta\varphi_m$ 和 $\Delta\varphi_c$, 由式(6)和(7)算得 $2\Delta l$; 然后根据真空计和温度计测得的真空腔

拉伸前后腔内的气压和环境温度参数计算 n_1 和 n_2 ; 进一步根据式(10)计算 Δn ; 最后, 获得补偿真空腔透光窗片倾斜误差和腔内残余压强误差的空气折射率 n_a 为:

$$n_a = 1 + \frac{1}{(L_V - 2\Delta l)} \cdot \frac{(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_c)}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{2} + \Delta n \quad (11)$$

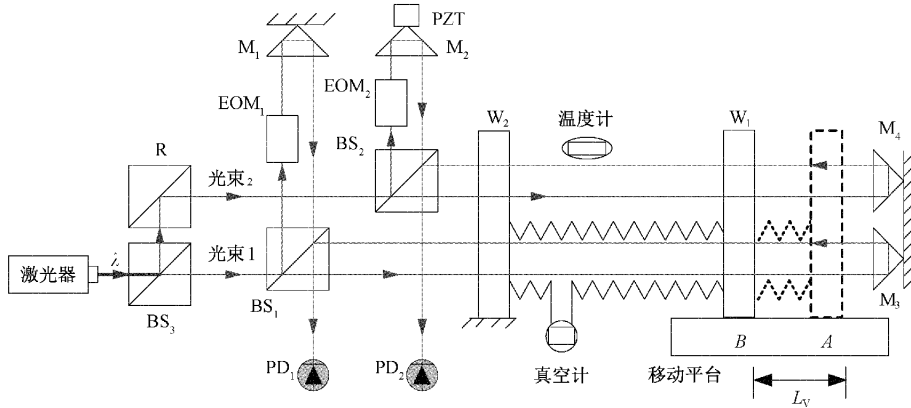


图 4 基于长度可变真空腔的空气折射率测量和补偿原理

Fig. 4 Schematic of air refractive index measurement and compensation based on length-variable vacuum cavity

3 实验和结果

为了验证所提出的空气折射率测量和补偿方法的有效性, 搭建了如图 5 所示的实验装置。激光光源为单频 He-Ne 稳频激光器 (XL- 80, Renishaw), 波长为 632. 990 577 nm。长度可变真空腔由内径为 15 mm 的不锈钢焊接真空波纹管制成, 其端部透光窗片由透射率优于 99. 8% 的熔融石英构成, 真空计用于检测真空腔内压

强变化, 透光窗片 W₁ 置于线性位移台 (MTN100CC, Newport) 滑块上, 位移台运动范围为 100 mm。此外, 在测量过程中将空气折射率补偿单元 (XC- 80, Renishaw) 放置在真空腔附近记录环境温度、湿度和压强参数, CO₂ 传感器 (GMT222, Vaisala) 测量 CO₂ 含量。XC- 80 和 GMT222 采集的环境参数用于 Edlén 公式法计算空气折射率^[9], 而且环境温度参数同时用于真空腔内折射率的计算。实验过程中, 图 5 所示的整个实验装置用黑色 KT 纸板制成的外罩罩住, 以避免局部空气湍流。

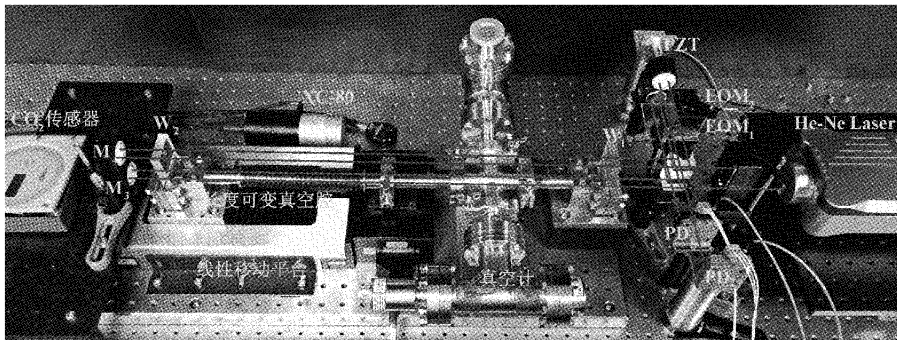


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experiment setup

3.1 空气折射率测量过程

实验之前, 将真空腔抽成真空, 透光窗 W₁ 处于初始位置 B, 真空腔长度 L₁ = 400 mm。首先线性位移台带动 W₁ 将真空腔拉伸约 10 mm, 在此过程中采集 5 个周期的

测量干涉信号数据进行椭圆拟合, 获得测量光路 PGC 解调修正参数; 然后对 PZT 施加三角波调制信号驱动 M₂ 线性移动, 在此过程中采集 5 个周期的补偿干涉信号进行椭圆拟合, 计算出补偿光路的 PGC 解调修正参数, 最

后 W_1 再次返回初始位置 B 。具体测量步骤如下:

1) 对 EOM_1 和 EOM_2 施加相同的正弦调制信号, 分别对测量和补偿干涉信号进行 PGC 相位解调, 记录测量和补偿干涉信号的初始相位 φ_{1B} 和 φ_{2B} , 同时记录真空腔内压强 P_1 和环境参数。

2) 线性平台以 5 mm/s 的速度拉伸真空腔 $L_V = 98 \text{ mm}$, 在此过程中, 对测量和参考干涉信号的解调相位进行相位解包裹处理, 得到整周期干涉条纹数 N_1 和 N_2 , 当窗片 W_1 稳定于位置 A 且位移台停止约 5 s 后, 记录测量和补偿干涉信号的实时相位 φ_{1A} 和 φ_{2A} , 同时记录真空腔内压强 P_2 和环境参数。则测量和补偿干涉信号的相位变化量分别为:

$$\Delta\varphi_m = N_1 \times 2\pi + \varphi_{1A} - \varphi_{1B} \quad (12)$$

$$\Delta\varphi_c = N_2 \times 2\pi + \varphi_{2A} - \varphi_{2B} \quad (13)$$

3) 将 P_1 、 P_2 和环境温度代入低压 Edlén 公式^[23], 得到透光窗 W_1 处于位置 B 和 A 时真空腔内残留气体的空气折射率 n_1 和 n_2 ; 结合 L_1 、 L_V 、 $\Delta\varphi_m$ 、 $\Delta\varphi_c$ 和式(7)、(10)和(11), 可以实现空气折射率测量。

线性位移台驱动透光窗 W_1 返回初始位置 B , 重复上述步骤 1)~3), 可以持续测得空气折射率值。

3.2 空气折射率测量结果

分别进行了 2.2 h 长时间和 20 min 短时间的空气折射率测量实验。在测量过程中, 由于补偿干涉仪测量臂在空气中的光程较长(约 500 mm), 导致补偿干涉信号相位测量结果波动较大。为了提高补偿干涉相位测量精度, 从第 20 组数据开始(前 19 组数只用于拟合计算), 将当前测得的相位值 $\Delta\varphi_c$ 与之前测得的所有相位值做最小二乘直线拟合, 得到的拟合值 $\Delta\varphi'_c$ 用于空气折射率测量时透光窗片倾斜误差的补偿。

图 6 是 2.5 h 内 $\Delta\varphi_c$ 测量结果及其拟合值, 一共进行了 150 组测量, 得到 131 组测量值(2.2 h)。可以看出, 经过线性拟合后, 透光窗片倾斜引起的补偿干涉仪相位变化基本维持在 -2° 左右。

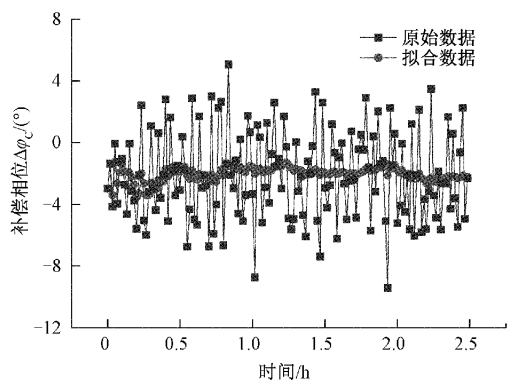
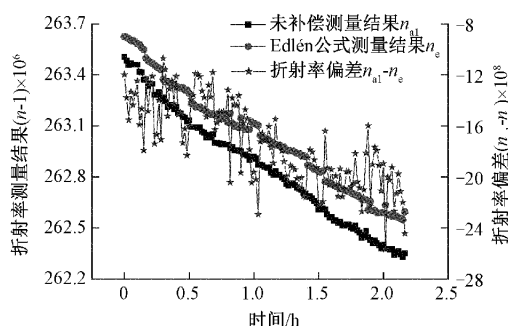


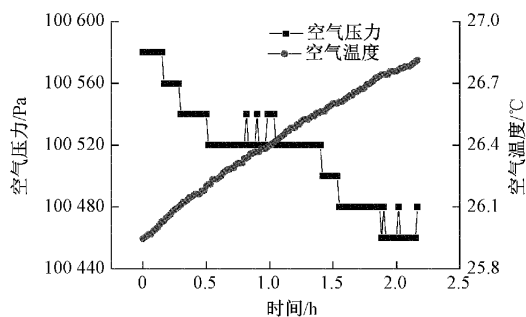
图 6 窗片倾斜导致的补偿干涉仪相位变化

Fig. 6 Phase change of compensation interferometer caused by the window tilt

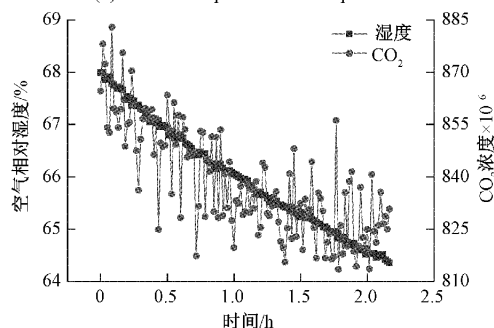
图 7 为 2.2 h 内未补偿透光窗倾斜误差和残余压强误差的空气折射率直接测量结果及环境参数变化值。实验过程中, 空气温度上升约 0.90°C , 压强下降为 120 Pa , 相对湿度下降 3.5% , 二氧化碳浓度下降约 0.006% 。可以看出, 未补偿透光窗倾斜误差和真空腔内的残余气压误差时, 直接测得的空气折射率 n_{a1} 和 Edlén 公式计算结果 n_e 具有相同的变化趋势, 但是两者之间具有较大的偏差, 差值的平均值达 -17.39×10^{-8} , 标准偏差为 3.28×10^{-8} 。



(a) 未补偿测量结果和Edlén公式测量结果
(a) Uncompensated measurement result and Edlén equation result



(b) 环境空气压力和温度
(b) Ambient air pressure and temperature



(c) 环境湿度和二氧化碳含量
(c) Ambient humidity and carbon dioxide content

图 7 空气折射率的未补偿测量结果、Edlén 公式测量结果以及环境参数

Fig. 7 The uncompensated air refractive index measurement result, the calculated result of Edlén equation and ambient parameters

图 8 为每次测量时 W_1 在位置 B 和 A 处真空腔内残余压强值, 残余压强随测量时间增加而增加。根据 B 点、 A 点的压强及环境温度, 可算得腔内残余空气折射率 n_1 和 n_2 , 代入式 (10) 可获得残余气压对应的折射率补偿量 Δn 。图 9 为补偿 Δn 后空气折射率测量结果 n_{a2} , 可以看出, n_{a2} 与 n_e 的偏差有所减小, 差值的平均值为减小为 -6.58×10^{-8} , 标准偏差为 2.33×10^{-8} 。

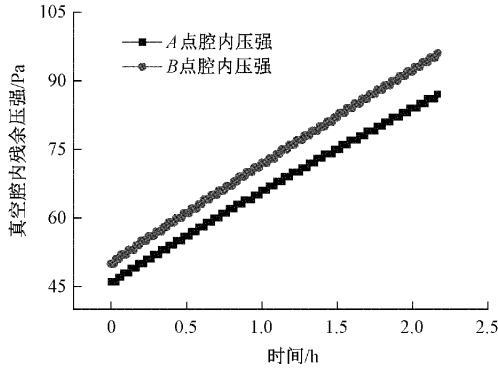


图 8 真空腔残余气体压强

Fig. 8 Residual pressure in vacuum chamber

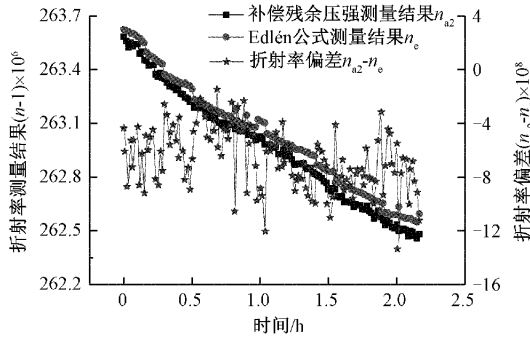


图 9 补偿 Δn 的折射率测量结果

Fig. 9 Measurement results with Δn compensation

图 10 为同时补偿 Δn 和透光窗倾斜误差 $\Delta \varphi_c$ 的空气折射率最终测量结果 n_a 。很明显, n_a 与 n_e 的偏差进一步减小, 差值的平均值为减小为 1.83×10^{-8} , 标准偏差为 2.34×10^{-8} 。

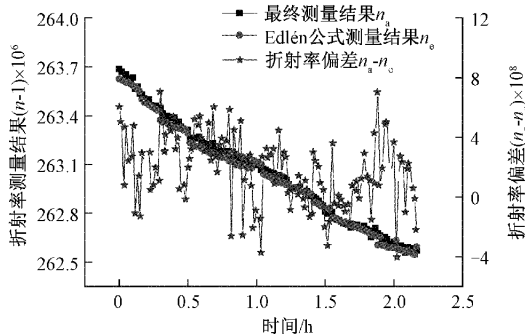


图 10 空气折射率测量最终结果

Fig. 10 Final air refractive index measurement results

图 11 为 20 min 空气折射率测量结果, 一共进行了 20 组测量。在实验过程中, 空气温度大约上升 0.10°C , 相对湿度下降约 0.40% , 环境气压和二氧化碳浓度几乎不变。补偿透光窗倾斜误差和腔内残余气压误差后, 空气折射率的最终测量结果和 Edlén 公式结果差值的平均值为 1.73×10^{-9} , 标准偏差为 2.89×10^{-8} 。

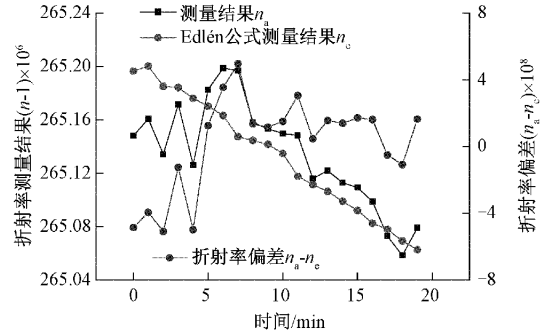


图 11 20 min 空气折射率测量结果

Fig. 11 Measurement results of air refractive index in 20 minutes

上述实验结果表明, 通过补偿透光窗倾斜误差和腔内残余气压误差之后, 本文设计的基于长度可变真空腔的空气折射率测量系统能够实现空气折射率的精密测量。

4 测量不确定度分析

根据式 (11), 空气折射率测量不确定度可表示为:

$$u(n_a) = \sqrt{\left[\frac{\partial n_a}{\partial L_V} u(L_V) \right]^2 + \left[\frac{\partial n_a}{\partial \lambda_0} u(\lambda_0) \right]^2 + \left[\frac{\partial n_a}{\partial \Delta \varphi_m} u(\Delta \varphi_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial n_a}{\partial \Delta \varphi_c} u(\Delta \varphi_c) \right]^2 + u^2(\Delta n) + u^2(\Delta T)} \quad (14)$$

式 (14) 中, 第 1、2、3 和 6 项分别表示真空腔拉伸长度不确定度、激光器波长稳定性、测量干涉仪相位解调精度和材料热膨胀引入的空气折射率测量误差。根据课题组前期验证^[22], 这四项误差对 $u(n_a)$ 的贡献分别为 2.7×10^{-9} 、 5.3×10^{-12} 、 5.4×10^{-9} 和 5.2×10^{-9} 。

第 4 项表示补偿干涉仪相位解调精度和稳定性的影响, 根据实验测得 $\Delta \varphi_c$ 的数据和所采用的 $\Delta \varphi_c$ 线性拟合方法, 2.2 h 和 20 min 内, $\Delta \varphi_c$ 的不确定度分别为 0.35° 和 1.82° , 对 $u(n_a)$ 的贡献分别为 3.14×10^{-9} 和 1.63×10^{-8} 。

第 5 项表示真空腔内残留气压的影响, 根据空气折射率计算公式^[23] 和式 (10), 2.2 h 和 20 min 内, 该项对 $u(n_a)$ 的贡献分别为 8.7×10^{-9} 和 5.7×10^{-9} 。

结合上述所有空气折射率测量不确定度影响因素, 2.2 h 和 20 min 空气折射率测量不确定度 $u(n_s)$ 分别为 1.22×10^{-8} 和 1.91×10^{-8} , 该理论分析结果与实际测量结果吻合。

5 结 论

本文详细分析了真空腔透光窗片倾斜和腔内残余气体对基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量方法的影响, 提出了基于补偿干涉仪同步测量的透光窗倾斜误差补偿方法, 并采用真空计实时监测测量过程中腔内气压的变化, 进一步补偿残余气压引入的折射率测量误差。搭建了基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量及补偿实验装置, 开展了长时间和短时间内的空气折射率测量实验。实验结果表明, 补偿透光窗倾斜误差和腔内残余气压误差之后, 空气折射率测量结果与 Edlén 公式测量结果偏差的标准偏差可达 2.89×10^{-8} , 证明本方法能实现空气折射率的精密测量, 对于提高激光干涉位移测量精度具有重要的意义。

参考文献

- [1] LEACH R K, CLAVERLEY J, GIUSCA C, et al. Advances in engineering nanometrology at the national physical laboratory [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(7):1-9.
- [2] 皮世威, 刘强, 孙鹏鹏. 基于激光干涉仪的旋转轴误差快速检定方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2484-2491.
PI SH W, LIU Q, SUN P P. Geometric error detection for rotary feed drive based on laser interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2484-2491.
- [3] 金涛, 刘景林, 杨卫, 等. 线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置[J]. 光学精密工程, 2018, 27(7): 1570-1577.
JIN T, LIU J L, YANG W, et al. High-precision straightness interferometer for linear moving stage [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 27 (7): 1570-1577.
- [4] 池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
CHI F, ZHU Y, ZHANG ZH P, et al. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0408004.
- [5] 陈洪芳, 汤亮, 石照耀, 等. 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪系统 ZEMAX 仿真方法[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104009.
- [6] EDLÉN B. The refractive index of air [J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71-80.
- [7] BIRCH K P, DOWNS M J. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air [J]. Metrologia, 1994, 31(4): 315-316.
- [8] CIDDOR P E. Refractive index of air; New equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.
- [9] BÖNSCH G, POTULSKI E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae [J]. Metrologia, 1998, 35 (2): 133-139.
- [10] CHE Q H, ZHANG M C, LIU S J, et al. Revision to the humidity correction equation in the calculation formulae of the air refractive index based on a phase step interferometer with three frequency-stabilized lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 125002.
- [11] SCHELLEKENS P, WILKENING G, REINBOTH F, et al. Measurements of the refractive index of air using interference refractometers [J]. Metrologia, 1986, 22(4): 279-287.
- [12] HOU W, THALMANN R. Accurate measurement of refractive index of gases [J]. Measurement, 1994, 13(4): 307-314.
- [13] ZHANG J, LU Z H, WANG L J. Precision refractive index measurements of air, N₂, O₂, Ar, and CO₂ with a frequency comb[J]. Applied Optics, 2008, 47 (17): 3143-3151.
- [14] KRUGER O A. A robust air refractometer for accurate compensation of the refractive index of air in everyday use[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9118.
- [15] YAN L P, CHEN B Y, ZHANG E Z, et al. Precision measurement of refractive index of air based on laser synthetic wavelength interferometry with Edlén equation estimation [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(8): 085111.
- [16] PIKÁLEK T, BUCHTA Z. Air refractive index measurement using low-coherence interferometry [J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5024-30.
- [17] YANG L J, ZHANG H Y, LI Y, et al. Absolute group refractive index measurement of air by dispersive interferometry using frequency comb[J]. Optics Express,

- 2015, 23(26): 33597.
- [18] LAZAR J, HOLÁ M, ČÍP O, et al. Displacement interferometry with stabilization of wavelength in air[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27830-27387.
- [19] QUAN M R, TIAN J J, YAO Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [20] FUJII K, WILLIAMS E R, STEINER R L, et al. A new refractometer by combining a variable length vacuum cell and a double-pass Michelson interferometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, 46(2): 191-195.
- [21] YU X Z, ZHANG T L, ELLIS J D. Absolute air refractive index measurement and tracking based on variable length vacuum cell [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(6): 064112.
- [22] CHEN B Y, YANG Y, YAN L P, et al. Precision measurement of the refractive index of air using a phase modulated homodyne interferometer with a variable length vacuum cavity [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(7): 075010.
- [23] SCHÖDEL S, WALKOVA, VOIGT M, et al. Measurement of the refractive index of air in the low-pressure regime and the applicability of traditional empirical formulae [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 064002.

作者简介



杨晔, 2007年于浙江理工大学获得硕士学位, 现为浙江理工大学实验师, 主要研究方向为先进制造与测量技术。

E-mail: hooohoo9999@163.com

YangYe received his M.Sc. degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2007. He is currently a lab master at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include advanced manufacturing and measurement technology.



严利平(通信作者), 2000年、2003年于重庆大学分别获得学士和硕士学位, 2014年于浙江理工大学获得博士学位, 现为浙江理工大学教授、博士生导师, 主要从事激光干涉精密测量技术研究。

E-mail: yanliping@zstu.edu.cn

Yan Liping (Corresponding author) received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University in 2000 and 2003, respectively, received her Ph.D. degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2014. She is currently a professor at Zhejiang Sci-Tech University. Her main research interest is laser interferometric precision measurement technology.