

文章编号 1004-924X(2001)01-0080-05

# 用预抽气真空腔法测量及补偿空气折射率的研究

李东光<sup>1</sup>, 张国雄<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;

2. 天津大学精密仪器及光电子工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 空气折射率的补偿效果在高精度激光干涉测量中起着“瓶颈”作用。分析了空气折射率的补偿原理, 回顾了四种空气折射率的测量方法及特点。在此基础上, 深入研究了用预抽气真空腔测量与补偿空气折射率的测量原理、方法和装置。该方法保持了干涉法测量空气折射率能充分反映所有导致折射率变化的环境因素的特点, 避免了测量过程中由于抽气过程给测量带来的干扰。通过空气折射率测量及补偿实验, 证实了该方法的可行性, 测量结果经补偿后可使精度提高一个数量级。

**关键词:** 激光干涉测量; 空气折射率; 补偿

**中图分类号:** TN 277 **文献标识码:** A

## 1 引言

在激光干涉测量中, 环境因素变化导致空气折射率的改变是影响测量精度的主要原因。尤其是在非实验室环境的大距离测量中, 空气折射率补偿效果的好坏在精度干涉测量中起着“瓶颈”作用。目前, 对空气折射率的测量与补偿有许多方法, 各自有着不同的特点和应用条件。分析了空气折射率的补偿原理, 回顾了四种空气折射率的测量方法及特点。在此基础上, 深入研究了用预抽气真空腔测量与补偿空气折射率的方法和装置。通过一系列空气折射率测量的实验, 分析了用预抽气真空腔法测量空气折射率的特点, 证实了该方法的可行性, 测量结果经补偿后可使精度提高一个数量级。

## 2 空气折射率的补偿

空气折射率的补偿是精密激光干涉法在大气环境应用中的关键。补偿的传统方法是假设环境是均匀的, 光学元件的热变化极其缓慢, 因此某一点的折射率值就代表各处的折射率。然而许多环境并非足够均匀或只是处于准静态, 这给补偿带来很多困难。

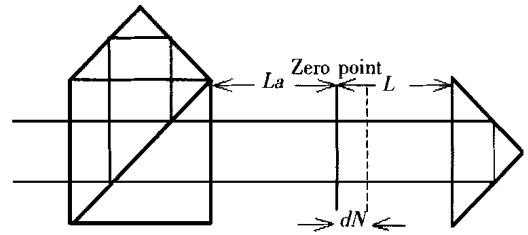


Fig 1 Zero point drift

如图 1 所示, 干涉测量的起始位置或零点是光学意义上的某一置零点, 即使靶镜和分光镜的物理位置不动, 环境的变化也会引起零点有一个明显的条纹数偏移量  $dN$ 。在均匀环境中,  $t$  时刻零点条纹数偏移量  $dN$  的修正可通过公式 (1)、(2)、(3) 计算:

$$dN \cdot \lambda/2 = L_g \{ n_g(t) - n_g(0) + [n_g(t) - 1] \cdot \alpha \cdot dT \} + L_a [n_a(t) - n_a(0)] \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为真空中波长,  $n_a$  为空气折射率,  $n_g$  为玻璃折射率,  $\alpha$  是玻璃的热膨胀系数,  $dT$  是温度变化量;  $L_g$  是零点位置下测量臂与参考臂之间在玻璃中的物理尺寸差;  $L_a$  是零点位置下两光臂在空气中的尺寸差。对应实际靶镜位移修正后的条纹数为:

收稿日期: 2000-04-28; 修订日期: 2000-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59605018)

$$N = N_0 - dN \quad (2)$$

式中,  $N_0$ 、 $N$  分别为修正前后的条纹数。靶镜的物理位移  $L$  由下式给出:

$$L = N \cdot \lambda / 2n_a(t) \quad (3)$$

在干涉仪中采用对称结构, 使测量臂和参考臂中的玻璃光程接近一致, 以减小  $L_g$  是十分必要的。另外, 波片等光学器件的特性也具有温度依赖性, 因此采用差动式干涉仪结构应具有接近一致的测量臂和参考臂的光程, 以减少干涉仪光学结构对温度的敏感性。补偿的一般做法是忽略在两光臂在玻璃中的光程差  $L_g$ 。

### 3 空气折射率测量及补偿的常用方法

#### 3.1 PTF 方法

所谓 PTF 方法是在干涉光路中布置高精度温度、压力和相对湿度传感器, 对空气的温度、压力和相对湿度进行测量, 并代入到 Edlen 经验公式中间接求出空气折射率  $n$ 。但 Edlen 经验公式是在一定的实验条件下得到的, 其误差源除计算公式本身的不准确性, 以及温度、压力和相对湿度等参数的测量误差外, 还要考虑测量环境中的空气成分与标准状态的差异产生的误差。空气成分的改变主要是  $\text{CO}_2$  含量的增加、 $\text{O}_2$  的减少, 以及测量环境中油蒸气等杂质的存在, 而且因时因地而异。另外, 该方法是采用传感器单点测量, 若环境不均匀, 存在温度、压力梯度等因素, 就会带来测量误差。因此该方法适用于均匀的测量环境, 并且空气参数偏离标准状态不大的情况。只要传感器的精度足够高, 就可以满足对  $n$  测量的精度要求。

#### 3.2 瑞利干涉仪法测量空气折射率

瑞利干涉仪是用来测量两种气体或液体折射率的微差, 这里是测量空气和真空的折射率微差。光源发出的光经柱面透镜及双缝光阑后分成两路。一路进入已知长度为  $l$  的光管真空室, 另一路进入同样长度的空气室, 两路光的光程差为  $(n - 1)l$ , 测出此光程差即可求出折射率  $n$ 。这种方法具有结构简单、不怕振动、不易产生系统误差的特点。由于干涉仪测量对象是  $(n - 1)$  在  $n = 1.00027123$  时,  $(n - 1)/n = 2.7 \times 10^{-4}$ , 因此, 欲使  $n$  的测量精度为  $10^{-8}$ ,  $(n - 1)$  的测量精度为  $10^{-5}$  左右即可。由空气色散公式可知, 折射率与光波波长有关, 瑞利干涉仪采用白光或组合单色光进行测量, 测得的折射率用于激光干涉仪的波

长修正会有原理误差。

#### 3.3 激光干涉仪法测量空气折射率

用激光干涉仪直接测量空气折射率是利用干涉法测出一个已知长度为  $L$  的管子由充满空气到真空光程的变化, 来计算出  $n$ 。在测量的初始, 管内的空气和外部是相同的, 然后用真空泵抽出管内的气体, 并用真空规监测直至管内成为真空。若此过程中干涉条纹数变化为  $N$ , 则有:  $L \cdot (n - 1) = N \cdot \lambda/2$ 。该式的物理意义很明显,  $L \cdot (n - 1)$  是抽真空过程中两路光束产生的光程差, 由于  $L$  和  $\lambda$  是已知的, 则  $N$  与  $n$  有一一对应的关系。根据干涉仪测出的  $N$  值, 就可得出空气折射率  $n$ 。用这种方法测得的空气折射率精度可达  $5 \times 10^{-8}$ 。该方法不仅反映了测量环境中温度、压力、湿度等空气参数引起的空气折射率变化, 还反映了空气中包含各种化学杂质时的情况, 环境的变化即刻在干涉条纹的变化中反映出来。根据标准情况下的空气折射率值及实际环境的测量值之差, 就可对测量结果进行补偿修正。但该方法占用空间大, 需要附加一套用于抽气的真空泵、真空规、阀门等设备, 还要防止真空泵工作时振动对测量的影响, 使得应用受到限制。基于这种原理的还有用雅满干涉仪测量空气折射率或其它类型的折射率计, 只是干涉仪结构略有不同。

为补偿空气折射率的变化对测量精度的影响, 还有补偿光路法及多波长干涉法等, 各有其不同的特点和应用。

## 4 用真空腔测量空气折射率

#### 4.1 测量原理

结合以上各种空气折射率测量方法的特点, 本文详细研究了一种用预抽气密封真空腔测量空气折射率的方法和装置。该方法采用干涉测量技术, 既保持了干涉法测量空气折射率能充分反映所有导致折射率变化的环境因素的特点, 同时又省去了测量过程中用于抽气的真空泵、真空规、阀门等设备, 而且避免了测量过程中抽气给测量带来的干扰, 其测量原理如图 2 所示。

矩形标准具沿对角线被分为两个气室, 其中一个气室与大气相通, 另一个气室预先抽成真空并良好密封。标准具左右两个透光窗严格平行, 距离为  $b_1$ 。两个气室用平行玻璃板分开, 分隔玻璃板在光程方向上宽度为  $b_2$ 。测量时将标准具置于干涉仪的一个光臂中, 透光窗法线与光束平行, 干涉

仪两光臂中的反射镜都固定不动。沿与光束垂直的方向缓慢移动标准具(不至产生空气流波动),使激光束从A位置到B位置。在移动过程中,光程差将发生变化,从A位置到B位置光程差总的变化OPL为: $OPL = 2(n - 1) \cdot (b_1 - b_2) = 2(n - 1) \cdot b = N \cdot \lambda$ , 所以有:

$$n - 1 = N \cdot \lambda / (2b) \quad (4)$$

式中,  $N$  为移动过程中条纹数的变化,  $\lambda$  为激光波长。

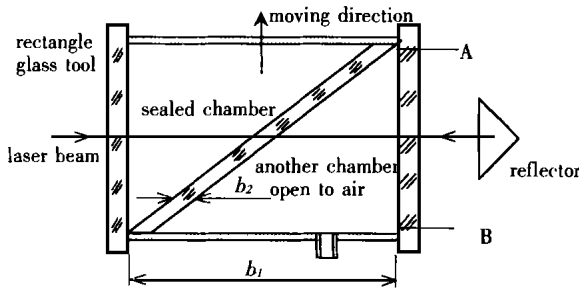


Fig 2 Measurement principle

事先精密测量出  $b$  的大小, 通过干涉仪测出标准具移动过程中条纹数的变化, 则空气的折射率可求得。光束位于B位置时标准具不动, 环境因素的变化会导致光程改变, 干涉仪监测此变化就可实时监测空气折射率的变化而对测量结果进行补偿。

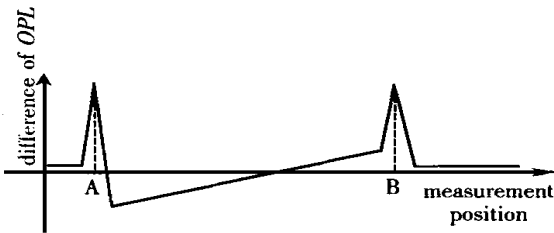


Fig 3 Sudden change of OPL

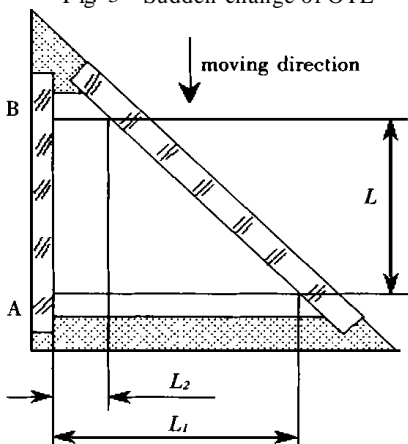


Fig 4 Triangle tool used in measurement

以上的分析仅是该方法的测量原理, 实际测量时, A、B 两个位置并不可用。因为激光束有一

定的束径, 若光束中心位于A、B 两个位置就不会使整个光束位于标准具内。在这两个位置上测量就会产生光程突变, 如图3所示, 从而导致“丢数”现象。因此实际测量时要采用内缩的位置A、B, 但这样  $b$  的大小就与预先测量的不符。基于以上原因, 实际使用的标准具做成45°的单室真空密封腔, 如图4所示。当标准具在光路中移动时, 光束从A位置变到B位置。光束在真空腔中的光程变化  $L_1 - L_2$  等于标准具移动的距离  $L$ 。这样就可直接测量标准具的移动量, 而不必预先知道  $L_1$  和  $L_2$  的大小, 所选的测量位置也可以是真空腔中任意的两个位置。为获得较多的干涉条纹数变化, 相对提高测量精度, 两个测量位置应选择较大的距离。

### 4.2 测量装置

图5给出了所设计的测量装置的结构示意图, 虚线框内构成普通的激光干涉仪。图中1~5组成精密一维工作台, 完成标准具在干涉仪测量臂中穿过光束的移动运动及  $L$  的测量。1为导轨, 2为底座, 3为载物台, 4为精密丝杠, 5为光栅尺。6即为测量用的标准具, 标准具的移动量  $L$  由光栅尺读出。

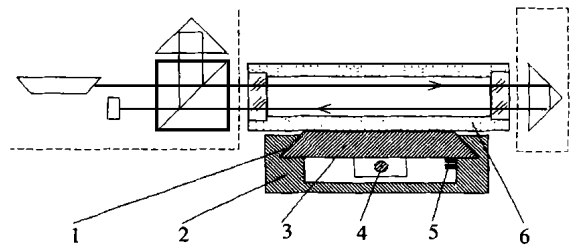


Fig 5 Structure of measurement device

### 4.3 标准具的制作

上述测量方法的精度在很大程度上取决于45°标准具与制造有关的几何精度, 除此之外还在很大程度上取决于腔内真空的获得及密封的好坏。需要根据测量精度确定所需的标准具真空度, 即要考虑真空泵的选用, 抽气时间的确定, 漏放气的减小, 标准具的密封等因素。限于篇幅, 不作详细讨论。

## 5 实验结果

激光干涉仪的示值反映的是靶镜物理位移的变化和环境因素变化的综合, 因此当靶镜物理位移为零时(静态), 示值反映的仅是环境因素变化的结果。为此, 我们设计了一组静态实验, 以验证

环境因素补偿的效果。

在实验中, 测量干涉仪的分光镜及靶镜固定于工作台上。在测量臂附近布置折射率测量干涉仪, 对空气折射率进行测量。考虑工作台温度变化造成的工作台膨胀因素, 在工作台测量干涉仪的光臂部位布置温度传感器, 以消除工作台膨胀导致的光镜及靶镜的物理位移。为改变环境参数, 在光路附近布置人为热源及加湿器。大气压力较难控制, 顺其自然变化。测量前实验室燃蜡烛, 以改变 CO<sub>2</sub> 浓度。由于没有 CO<sub>2</sub> 浓度传感器, 无法得到 CO<sub>2</sub> 浓度的确切值, 但其值应大于常态值。测量环境中适当加入挥发性气体(酒精)。

当空气温度和湿度升至一定值后撤去热源及

加湿器, 稳定一段时间后, 开始测量。实验室密封较好, 测量过程中无人员流动, 以减小扰动因素造成的测量光路中环境梯度对测量的影响。每隔 30 分钟取一组测量值, 干涉仪初始测量值为 842.68602mm。表 1 给出补偿前后的测量结果。

从表 1 中的测量数据中可以看到, 在经过工作台膨胀因素补偿后(表中第二列), 整个测量过程的测值仍然有 0.00330mm 的变化, 这就是仅由环境因素变化造成的, 对应的相对测量误差为  $3.9 \times 10^{-6}$ 。经过实际空气折射率补偿后(表中第三列), 测量过程的测值变化为 0.00012mm, 对应的相对测量误差为  $1.4 \times 10^{-7}$ 。测量精度提高一个数量级。

Table 1 Measured data of un-compensated and compensated

No.	un-compensated (mm)	compensated for table temp. (mm)	compensated for air refractivity (mm)	No.	un-compensated (mm)	compensated for table temp. (mm)	compensated for air refractivity (mm)
1	842.68602	842.64374	842.64838	11	842.67712	842.64569	842.64832
2	842.68525	842.64435	842.64844	12	842.67655	842.64581	842.64838
3	842.68416	842.64435	842.64832	13	842.67587	842.64594	842.64838
4	842.68323	842.64453	842.64832	14	842.67536	842.64606	842.64832
5	842.68260	842.64484	842.68838	15	842.67470	842.64630	842.64838
6	842.68172	842.64514	842.64832	16	842.67410	842.64642	842.64832
7	842.68070	842.64532	842.64832	17	842.67355	842.64655	842.64832
8	842.67977	842.64539	842.64838	18	842.67271	842.64679	842.64838
9	842.67905	842.64563	842.64844	19	842.67204	842.64697	842.64844
10	842.67810	842.64577	842.64832	20	842.67118	842.64703	842.64838

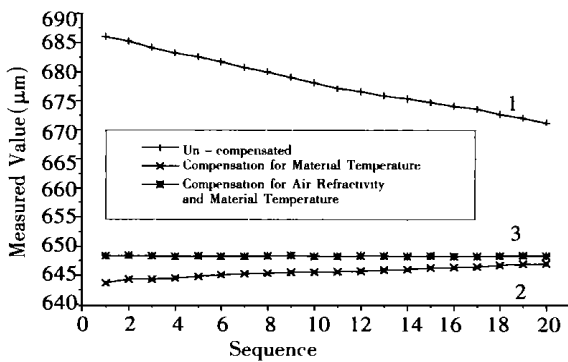


Fig 6 Measured value of un-compensated and compensated

图 6 对补偿效果给出更为直观的表达, 纵轴为测量值的小数部分。曲线 1 为未经任何补偿的测量结果, 曲线 2 为经过工作台膨胀补偿后的测量结果, 曲线 3 为经过空气折射率补偿后的测量

结果。曲线 1 的斜率很大, 说明承载干涉仪分光镜及靶镜的工作台或导轨的温度变化对测量影响非常大。在测量过程中, 必须对其温度进行严格控制, 以保证测量精度。经过空气折射率补偿后的曲线 3 与折射率补偿前的曲线 2 相比, 基本上是一条水平线, 从中可以看到明显的补偿效果。

## 6 结 论

研究了用预抽气真空腔测量与补偿空气折射率的方法和装置, 该方法采用干涉测量技术, 既保持了干涉法测量空气折射率能充分反映所有导致折射率变化的环境因素的特点, 同时又省去了测量过程中用于抽气的真空泵、真空规、阀门等设备, 而且避免了测量过程中由于抽气过程给测量带来的干扰。通过系列空气折射率测量的实验, 证实了该方法的可行性, 测量结果经补偿后可使精度提高一个数量级。

## 参考文献:

- [1] Bobroff N. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. Meas Sci Technol, 1993(4): 907-926
- [2] 徐毅, 等. 实时测量空气折射率的高精度激光干涉仪[A]. 在线测量、自动测量研讨会论文集[C]. 北京: 1993. 101-104
- [3] 王文绵. 用于精密和超精密测长的双频激光干涉仪[J]. 航空精密制造技术, 1995, 31(2): 35-39
- [4] 叶声华. 激光在精密计量中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980
- [5] Birch K P, Reinboth F. The effect of variation in the refractive index of industrial air upon uncertainty of precision length measurement[J]. Metrologia, 1993, 30: 7-14
- [6] Ciddor Philip E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(3): 1566-1573
- [7] Birch K P, Downs M J. An updated Edlen equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30: 155-162
- [8] 倪育才. 空气折射率埃德林公式的修改[J]. 计量技术, 1998(3): 22-27
- [9] Renkens M J, Schellekens P H. An accurate interference refractometer based on a permanent vacuum chamber-development and results[J]. Annals of the CRP, 1993, 40(1): 581-583

### Measurement and compensation for refractive index of air using a pre-evacuated airtight sealed cavity

L I Dong-guang<sup>1</sup>, ZHANG Guo-xiong<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Precision Instrument & Opto Electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** The compensation effect for refractive index of air is the "bottle neck" factor in improving the accuracy of interferometric measurement. The theory of compensation for refractive index of air is analyzed. Several methods for measuring refractive index of air are analyzed and effectiveness of compensation is compared. Based on these results, an interferometric device to measure the refractive index of air without air evacuation in the measuring process is studied. A pre-evacuated airtight sealed chamber with 45° slope is employed. It is testified that the method is effective and the measuring accuracy is improved by the experiments of measuring and compensating for refractive index of air.

**Key words:** interferometry; refractive index of air; compensation

**作者简介:** 李东光(1965-), 男, 天津人, 工学博士, 讲师。主要从事仪器智能化、精密光电测试方面的研究。