光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023121202

大行程位移台干涉测距系统的误差补偿

王雨萌[1,2,3]，杨　帆[1,2]，谌庆荣[1,2]，余斯洋[1,2]，张　茜[1,2]，孙　思[1,2]，严　伟[1,2,3]*

（1. 中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室，成都 610209；
2. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 双频激光干涉仪作为常用的精密光学非接触式测量设备，具有精度高、抗干扰能力强、灵活性好等优点。然而环境温度变化、机械振动等因素可能会影响其测量结果的准确性，并且影响程度会随着测量光程的增加而增大。针对基于双频激光干涉仪的大行程位移台测距系统，首先研究了位移台测距系统的测量原理，然后针对系统存在的各项误差进行了分析和补偿，最后，对系统进行综合误差补偿实验，短时间补偿量达到 10^{-8} m 量级，且时间越长补偿效果越好。该方法较现有的误差补偿方法更为完整，补偿量更大。

关键词： 激光干涉测量；误差补偿；仪器误差；安装误差；环境误差

中图分类号： TH741　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0286－09

Error Compensation of Long Stroke Displacement Instrument Interference Ranging System

WANG Yumeng[1,2,3], YANG Fan[1,2], CHEN Qingrong[1,2],
YU Siyang[1,2], ZHANG Xi[1,2], SUN Si[1,2], YAN Wei[1,2,3]

(1. National Key Lab. of Optical Field Manipulation Science and Technol., Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: A dual-frequency laser interferometer, as a commonly used precision optical non-contact measurement device, has the advantages of high precision, strong anti-interference ability, and good flexibility. However, factors such as ambient temperature changes and mechanical vibration may affect the accuracy of the measurement results, and the extent of this influence increases with the optical measurement path. To investigate a large-stroke displacement platform ranging system based on a dual-frequency laser interferometer, the measurement principle of a shifting platform ranging system was first studied. Next, the errors existing in the system were analyzed and compensated. Finally, a comprehensive error compensation experiment was carried out on the system, and the short-term compensation reached the order of 10^{-8} m, with a longer time producing a better compensation effect. The method was more complete than the existing error compensation method, and the compensation was larger.

Key words: laser interferometry; error compensation; instrumental error; installation error; environmental error

收稿日期：2023－12－12.
基金项目：四川省重点研发项目(2022YFG0223)；中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20200060)；中国科学院特别研究助理项目(YA23K067).
* **通信作者：**严　伟

0　引言

在光学元件面形检测应用场景中，精密位移工作平台为重点研究内容之一。目前常用的精密测距方法有：超声波法、激光法、光纤法、光栅尺法、光学干涉法、飞行时间法等[1-2]。其中双频激光干涉仪作为一种重要的光学干涉测距工具，能够避免传感器与被测对象直接接触，从而保护待测面，具有极高的测量分辨率和灵敏度[3]。然而，实际位移台测距系统存在仪器、安装及环境误差，导致系统的稳定性和准确性降低。

为了减小误差对测距精度的影响，国内外学者对光学测距系统稳定性提升及误差补偿方法进行了研究。Wu 等[4]提出全局搜索优化算法来解决由振动干扰引起的激光干涉。张帆等[5]采用双频激光干涉仪互补校准式方法以提高光栅刻划机的定位精度。于海娇等[6]利用测量环境中的振型节点减小环境振动，提高了双频激光干涉仪的测量精度。吴嗣珊[7]研究了双频激光干涉仪的非线性误差和光学细分之间的关系，为外差干涉仪设计提供了理论依据。熊显名团队[8-9]利用 Edlen 公式法对双频激光干涉仪受空气折射率影响的激光波长进行了间接补偿，池峰等[10]研制出一种新型波长跟踪器，直接补偿激光波长，亦具有良好的补偿效果。滕伟等[11]针对激光测量中的阿贝误差和余弦误差建立了一种误差补偿模型，达到了超精密运动台的精度要求。Minsoo 等[12]针对基于扫描激光干涉光刻系统的光学相位差与基片运动共同引起的误差提出了一种实时补偿方法，解决了机械和相位抖动问题。

以上研究均有效减小了误差对系统精度的影响，但都只针对系统的某项或某几项误差进行补偿，补偿模型不够完整，在实际应用环境中稳定性较差。本文针对基于双频激光干涉仪的大行程高精度位移台测量系统，分析了其误差来源，给出了重点误差源的补偿方法并进行测量和仿真，对位移台系统进行综合误差补偿实验，验证了该方法的有效性。

1　系统原理及结构

双频激光干涉仪测距的原理图如图 1 所示。

双频激光器发出两列具有不同频率的线偏振光，波长为 λ。光束经过偏振分光器后按照偏振方向被分离。平行于纸面的偏振光 f_1 透过干涉仪后，被目标镜返回干涉仪。当被测目标镜以 V 速度移动时，产生多普勒效应，返回光束的频率变为 $f_1 \pm \Delta f$。多普勒偏移量 $\Delta f = 2V/\lambda$，包含被测目标镜的位移信息 $f_1 \pm \Delta f$ 经过干涉镜后，与参考光束 f_2 汇合。汇合后光束产生拍频，拍频信号可表示为：

$$f_1 - f_2 \pm \Delta f \tag{1}$$

其中正负号由被测目标镜移动方向决定，被测目标镜移向偏振分光器时 Δf 为负，反之则为正。$f_1 - f_2$ 为后续信号处理的基准信号。拍频信号被光电探测器接收后经过放大整形，再与基准信号 $f_1 - f_2$ 通过减法电路可得到 Δf，最后被传输给计算机。设被测目标镜移动的时间为 t，由 Δf 引起的条纹数为 N，则有：

$$N = \int_0^t \Delta f \,\mathrm{d}t = \int_0^t \frac{2V}{\lambda}\mathrm{d}t = \frac{2}{\lambda}\int_0^t V\mathrm{d}t = \frac{2}{\lambda} \cdot l \tag{2}$$

故有：

$$l = N \cdot \frac{\lambda}{2} \tag{3}$$

由式(3)可知，根据测得的条纹数就能计算出被测目标镜的移动距离 l。

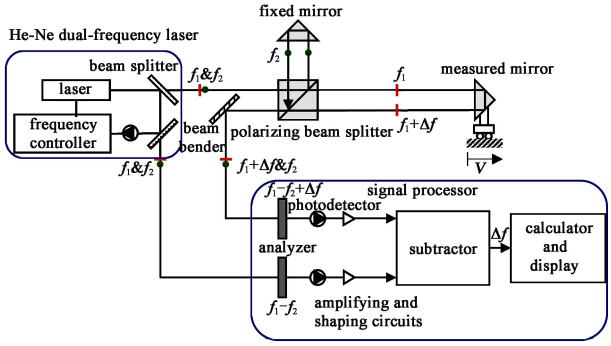


图 1　双频激光干涉仪原理图[13]

干涉测距系统通常为水平卧式，占地空间大，尺寸受限。在高精度曲率半径测量、大口径平面样品测量等特定应用中，基于测试效率、夹持方式、精度要求，采用立式结构更具有优势。垂直配置激光干涉仪更方便样品操作和调整，提升测试效，并且占地小，干涉腔体稳定，振动要求低，节省成本。因此本位移台测量系统采用如图 2 所示的立式结构，z 向行程为 1 080 mm。其由减振系统、干涉测长系统、载物系统、电控系统、交互软件系统构成。其中，电控系统用来控制位移台，使其可以在五个自由度运动，三路双频激光干涉仪可以实现 z 向位移及 x，y 向的倾斜角度的精密测量，交互软件系统用来完成对干涉数据的采集、处理和输出。

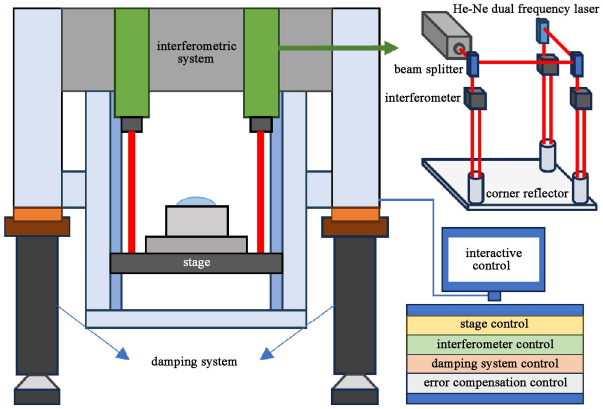


图 2 大行程位移台干涉测距系统示意图

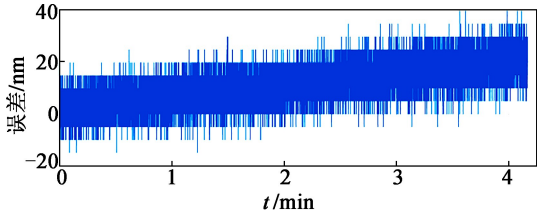
2 系统误差分析与补偿实验

本系统的误差分为仪器误差、安装误差和环境误差三类。仪器误差为本系统双频激光干涉仪的固有特性;安装误差包括阿贝误差和余弦误差;环境误差包括干涉仪元件热漂移、机械振动、材料折射率变化、材料热膨胀,通常对干涉测量结果的影响较大[14]。

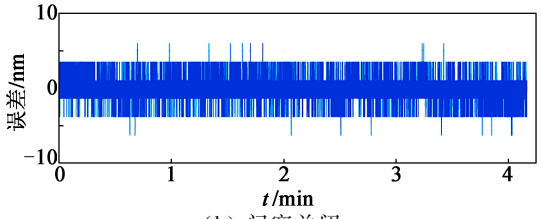
2.1 系统仪器误差

在短光程(200 mm)、短采样时间(4 min)的情况下测试位移台系统的误差,分别采集实验室门窗开启和关闭时的位移台干涉测量系统对短距离的测试数据。图 3 为测试结果,实验室门窗开启和关闭条件下的 3σ 值分别为 23.8 和 4.4 nm,后者可近似看作系统的仪器误差。

同时,对比图 3(a)和(b)可发现,环境因素对系统的影响较为明显,需要重点补偿。



(a) 门窗开启



(b) 门窗关闭

图 3 补偿前的干涉测距系统误差测试结果

2.2 系统安装误差

2.2.1 阿贝误差的测量与计算

当测量点与被测工件位移轴线横向分离,且载物台系统存在角度误差时,会产生如图 4 所示的阿贝误差。

图 4 中 L_a 代表阿贝臂,即运动轴线和测量轴线之间的距离,β 表示移动镜偏离理想位置时的角度即阿贝角。阿贝误差 E_a 可以通过以下公式表示:

$$E_a = L_a \tan\beta \tag{4}$$

当 β 非常小时,$\tan\beta \sim \beta$,即:

$$E_a = L_a \cdot \beta \tag{5}$$

由公式(5)可知,阿贝误差为一阶误差。

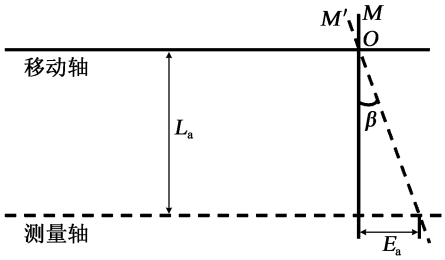


图 4 阿贝误差原理图

本测距系统的三个角锥反射镜与载物台中心并不重合,即测量轴与运动轴横向分离,因此需计算补偿阿贝误差。以载物台的中心点为坐标原点建立如图 5 所示的坐标系,忽略三个测量点在 x,y 轴方向误差,三轴干涉仪的测量值为 z_1,z_2,z_3,三角锥坐标分别为 $P_1(x_1,y_1,z_1)$,$P_2(x_2,y_2,z_2)$,$P_3(x_3,y_3,z_3)$,三点构成平面的法向量为 $\boldsymbol{n}(a,b,c)$,竖直向量为 $\boldsymbol{m}(0,0,1)$,两向量间夹角即为平面倾角 β。根据几何向量关系,利用式(6)、式(7)计算可得到法向量 $\boldsymbol{n}$,再根据式(8)、式(9)可得 $\boldsymbol{n}$ 和 $\boldsymbol{m}$ 的夹角即位移台测量面的倾角 β。

$$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{P_1P_2} \times \boldsymbol{P_1P_3} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} =$$

$$a\boldsymbol{i} + b\boldsymbol{j} + c\boldsymbol{k} = (a,b,c) \tag{6}$$

$$\begin{aligned} a &= (y_2 - y_1) \times (z_3 - z_1) - (y_3 - y_1) \times (z_2 - z_1) \\ b &= (z_2 - z_1) \times (x_3 - x_1) - (z_3 - z_1) \times (x_2 - x_1) \\ c &= (x_2 - x_1) \times (y_3 - y_1) - (x_3 - x_1) \times (y_2 - y_1) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{n} = |\boldsymbol{m}||\boldsymbol{n}|\cos\beta \tag{8}$$

$$\beta = \arccos\frac{\boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{m}||\boldsymbol{n}|} \tag{9}$$

获得测量面倾角后,根据几何关系,利用式(10)和式(11)可推导得到中心点相对理想位置的偏移距离 Δl 以及中心点的 z 轴方向位置 Z。

$$\Delta l = L_{y3} - L_{y3} \cdot \cos\beta = L_{y3} \cdot (1 - \cos\beta) \tag{10}$$

$$Z = z_3 + L_{y3} \cdot \sin\beta \tag{11}$$

根据上述方法，对位移台三轴干涉仪测试结果进行计算处理。图 6(a)为三轴干涉仪的测量值，其中 IF 为干涉仪，Z_1，Z_2 和 Z_3 分别表示第一、二和三轴；(b)为载物台倾角；(c)为载物台中心相对理想中心点的水平偏移距离；(d)为载物台中心点的 z 轴方向位移。在后续工件检测应用中，根据测量、计算结果可实现载物台系统的实时调平和中心校准。

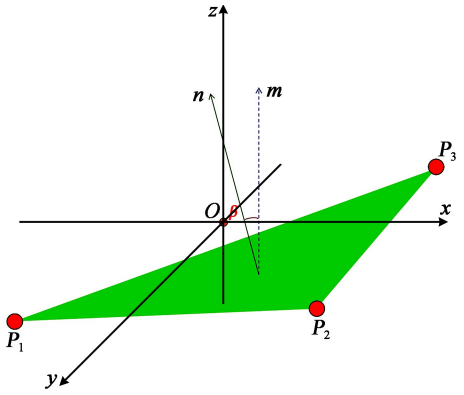


图 5　角锥反射镜分布示意图

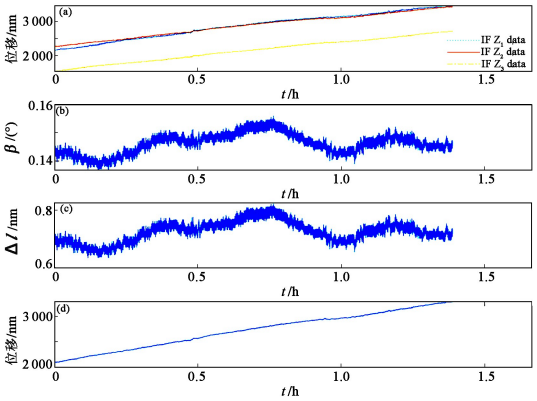


图 6　阿贝误差对系统测量结果的影响关系。(a)三轴干涉仪的测量值；(b)载物台倾角；(c)载物台中心的相对偏移；(d)载物台中心点的 z 轴方向位移

2.2.2　余弦误差的测量与计算

余弦误差是由于测量轴线与激光光束的运动轴线不平行而引起的测量误差。理想情况下，入射激光的方向与待测镜垂直。然而，实际激光会以偏离轴线 α 角度入射，导致测试移动距离由 L_{AO} 变为 $L_{AO'}$，如图 7 所示。

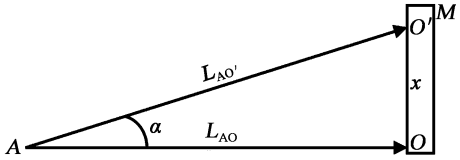


图 7　余弦误差原理图

由图 7 可知偏移的距离为：

$$\Delta L = L_{AO'} - L_{AO} = L_{AO'}(1-\cos\alpha) \tag{12}$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L_{AO'}}\right) \tag{13}$$

故偏移距离可表示为：

$$\Delta L = L_{AO'}\left\{1-\cos\left[\sin^{-1}\left(\frac{x}{L_{AO'}}\right)\right]\right\} \tag{14}$$

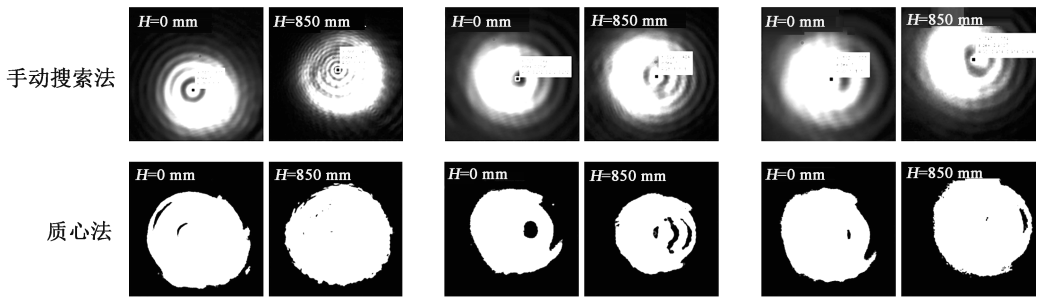
当 $\alpha \to 0$ 时，$1-\cos\alpha \sim \frac{1}{2}\alpha^2$，所以偏移距离也可简化为：

$$\Delta L = L_{AO'} \times \frac{1}{2}\alpha^2 \tag{15}$$

由式(15)可知，测量距离越长，余弦误差越大，且成均匀分布。

安装测量工装及相机，控制位移台于初始 $H=0$ mm 位置下移 $H=850$ mm，通过成像器件捕捉移动前后光斑位置的变化情况。光斑图像采集完成后，为得到更准确的光斑偏移量，采用手动寻找衍射中心法和质心法[15]两种方法来确定采集到的三轴光斑的中心点，如图 8 所示。

由上述光斑衍射中心位置得到三轴的光斑偏移量，根据干涉仪测量值分别计算出余弦角，表 1 为光斑偏移量和余弦角的计算结果。根据结果，可对干涉仪测量值进行余弦误差修正。



(a) Z_1 轴　(b) Z_2 轴　(c) Z_3 轴

图 8　衍射光斑图

表 1 余弦误差计算结果

IF	光斑偏移量/nm		余弦角/(°)		
	手动法	质心法	手动法	质心法	平均
Z_1	830 788.3	784 693.4	0.056 0	0.052 9	0.054 5
Z_2	451 531.7	474 302.4	0.030 4	0.032 0	0.031 2
Z_3	1 119 553.0	1 138 824.5	0.075 4	0.076 7	0.076 1

2.3 系统环境误差分析及补偿

2.3.1 干涉元件热漂移误差

为了避免干涉元件受热导致光路漂移问题，本系统的光学透镜选用的是石英材料，其在低温环境下(0～100 ℃)的热膨胀系数约 5.5×10^{-7}/℃，在温度变化时形变很小；底座选用的是因钢材料，在−60～80 ℃温度范围内，平均热膨胀系数低于 10^{-6}/℃。采用上述两种材料可以忽略干涉仪元件热膨胀导致的光束漂移。

2.3.2 外界振动误差

来自外界环境的振动干扰频率范围一般为 0.1～10 Hz，这里选择用隔振器来减小振动误差的影响。该隔振器采用空气弹簧隔振和小孔阻尼方式，可以消除表面共振，能够满足本系统的隔振要求。

2.3.3 空气折射率变化引起的波长误差

激光器的波长值一般是在真空或标准大气条件(温度为 20 ℃，气压为 1.013×10^5 Pa，相对湿度为 50%，CO_2 浓度为 4.5×10^{-4} m)下给出的。而实际环境中的激光波长 λ 与空气折射率 n 的变化满足如下关系：

$$\lambda=\frac{\lambda_0}{n} \tag{16}$$

式中，λ_0 为 632.991 514 5 nm，表示真空下的波长。当空气折射率发生变化时，激光波长的变化量为：

$$\Delta\lambda=\lambda_1-\lambda=\frac{\lambda_0}{n+\Delta n}-\frac{\lambda_0}{n}=-\frac{\Delta n\lambda_0}{n(n+\Delta n)} \tag{17}$$

为了补偿激光波长受折射率的变化，本实验采用最典型的 Edlen 公式法，该方法综合考虑了空气折射率与二氧化碳含量、温度、气压及湿度之间的关系[16]。由于后续温标值的改动和环境数据的更新，1993 年 Birch 和 Downs 给出了修正版 Edlen 公式[17]。修正后的理论精度可达 3.0×10^{-8}，具体公式为：

$$(n-1)_s\times10^8=8\,342.54+\frac{2\,406\,147}{130-\sigma^2}+\frac{15\,998}{38.9-\sigma^2} \tag{18}$$

$$(n-1)_x=[1+0.54(x-0.000\,3)](n-1)_s \tag{19}$$

$$(n-1)_{tp}=\frac{p(n-1)_s}{96\,095.43}\times\frac{1+10^{-8}(0.601-0.009\,72t)P}{1+0.003\,661t} \tag{20}$$

$$n_{tpf}-n_{tp}=-f(3.734\,5-0.040\,1\sigma^2)\times10^{-10} \tag{21}$$

式中，σ 是光在真空中的波数，单位为 μm^{-1}。标准干燥的空气环境参数为温度 $t=20$ ℃，压强 $p=1.02\times10^5$ Pa，相对湿度 $Rh=40\%$，CO_2 含量 $x=3.65\times10^{-4}$ m。各个环境参量对空气折射率的影响程度均呈线性或近似线性关系，空气折射率变化量与环境参量之间满足：

$$\Delta n=n-n_0=\frac{\partial n}{\partial t}\cdot\Delta t+\frac{\partial n}{\partial p}\cdot\Delta p+\frac{\partial n}{\partial Rh}\cdot\Delta Rh+\frac{\partial n}{\partial x}\cdot\Delta x \tag{22}$$

式(22)中的各项偏微分系数分别对应环境参量的敏感性参数，通过计算可得到环境敏感性参数[18]。

由计算结果可知，温度对折射率的影响最大，其次是大气压强，相对湿度参量影响较小，CO_2 空气的影响几乎可以忽略。因此要重点补偿前三者对空气折射率的影响。

保持被测目标镜位置不变即实际距离固定，当空气折射率波动 Δn 时，测量光束和基准光束之间的相位差变为：

$$\Delta\phi'=\frac{4\pi(n+\Delta n)l}{\lambda_0} \tag{23}$$

此时条纹数为：

$$N'=\frac{\Delta\phi'}{2\pi}=\frac{2(n+\Delta n)l}{\lambda_0} \tag{24}$$

根据默认空气中的激光波长值将相位差转换为测量距离 l'：

$$l'=\frac{N'\lambda}{2}=\frac{N'\lambda_0}{2n} \tag{25}$$

而实际距离值应为：

$$l=\frac{N'\lambda_0}{2(n+\Delta n)} \tag{26}$$

因此在空气折射率波动条件下，实际距离值与测量距离值比值为：

$$\frac{l}{l'}=\frac{n}{n+\Delta n} \tag{27}$$

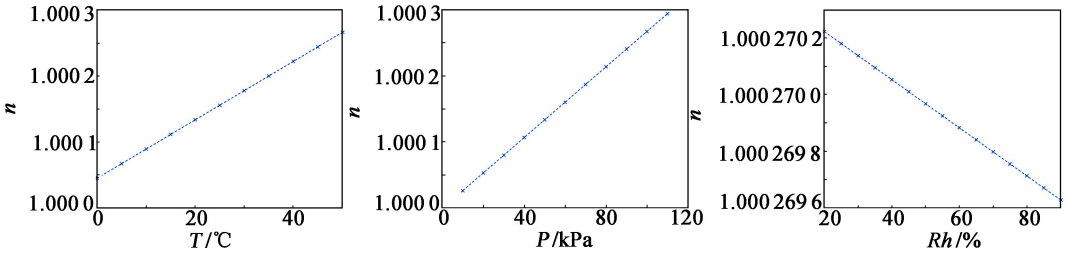
即：

$$l=\frac{n}{n+\Delta n}\cdot l' \tag{28}$$

根据当前环境因素求得折射率变化量，计算出比例值，乘以测量值即可得到实际距离值。

本文利用 MATLAB 软件，采用控制变量法，对

环境因素(温度、压强及相对湿度)影响空气折射率的程度进行了仿真,结果如图 9 所示。

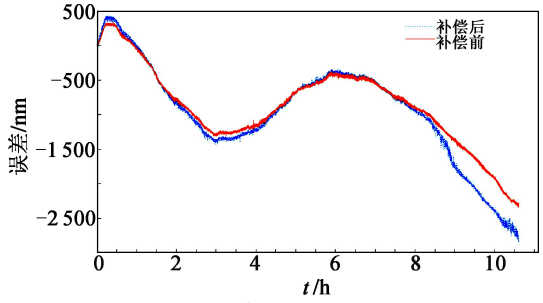


(a) 温度因素　(b) 压强因素　(c) 相对湿度因素

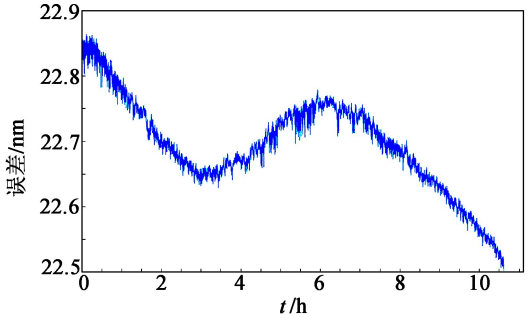
图 9　环境因素对空气折射率的影响

在其他环境参数恒定条件下,折射率受温度波动影响时的平均变化量为 9.36×10^{-7}/℃;折射率受压强变化影响时的平均变化量为 2.68×10^{-6}/kPa;相对湿度增大 70%,折射率仅减小了 4.25×10^{-7},1%的湿度变化引起折射率变化量仅为 6.07×10^{-9}。由仿真结果可知温度和大气压强对空气折射率影响较大,相对湿度引起的折射率变化很小。由于实验环境的温度变化较大,气压与湿度变化幅度很小,因此实际环境误差可近似为只受温度影响。

为了验证实际补偿效果,针对第一轴干涉光路,在测量光路附近放置温度、压力、湿度传感器,干涉仪出光后一分为二,一路开启补偿,另外一路不开启补偿。位移台系统进行 10 h 以上长时间采样,传感器的连续采样间隔为 1 s,干涉仪采样频率为 200 Hz,干涉仪光程为 1 000 mm,图 10 为环境折射率误差补偿的结果。



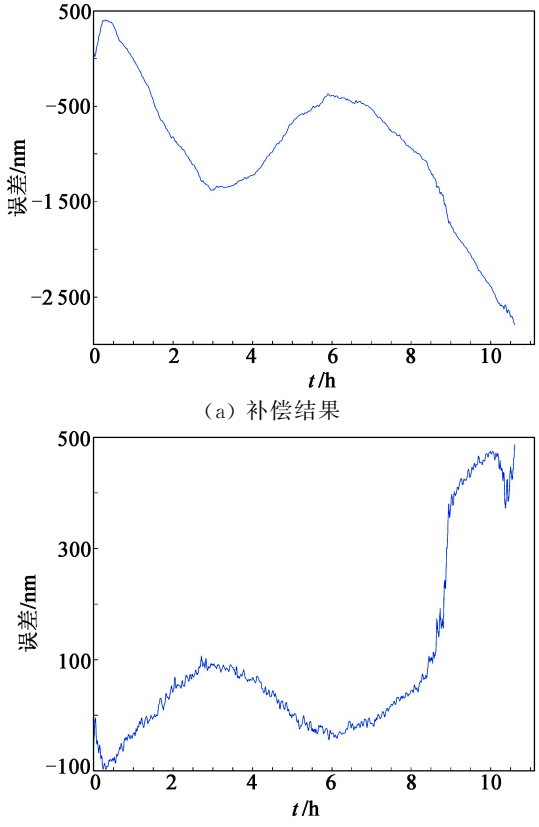
(a) 补偿前后对比图



(b) 温度趋势

图 10　环境误差补偿结果

从图 10 中可观察到,补偿趋势正确,但存在波动,波动范围在 100 nm 内。这种短期波动问题是温度传感器测量不稳定(精度为 0.05 ℃)导致的,可采用选取合适窗口对实验结果数据做滑动平均的方法减小波动,结果如图 11 所示。



(a) 补偿结果

(b) 补偿量

图 11　滑动平均后的补偿结果与补偿量

图 10 和图 11 的结果表明,采用本 Edlen 公式法实现了较好的波长补偿效果和良好的实时性。但从图 11(a)中可以观察到,在补偿了环境因素对波长的影响后,结果仍有明显的漂移,且与温度变化趋势一致,原因是本系统长时间工作发热引起了自身材料热膨胀,需要进一步对热膨胀误差进行修正。

2.3.4 材料热膨胀误差

温度变化会导致材料发生形变，对于某一被测物体，其材料具有线性膨胀系数 k，受到温度 T 的影响时，可用材料的热膨胀系数 M 来描述其特性[9]。具体表达式如下：

$$M=1-k(T-20) \tag{29}$$

式中材料的标准状态温度为 20 ℃，若温度未改变时的位移测量值为 L_1，温度变化之后的位移测量值为 L_2，二者之间关系如下：

$$L_1=L_2\cdot M=L_2\cdot[1-k(T-20)] \tag{30}$$

由此可得到位移测量系统的材料热膨胀误差为：

$$\Delta L=-L_2-L_1=L_1\cdot\frac{k(T-20)}{1-k(T-20)} \tag{31}$$

位移台系统并非由单一材料组成，热膨胀导致复杂三维变形，因此其偏移量与温度变化量不是简单的线性关系。设实际环境温度与标准温度(20 ℃)的差值为自变量 Δt，系统位移台相对初始位置的漂移量为因变量 Δl。将 5 h 时间内采集到的干涉仪测量数据作为参考样本，通过使用 MATLAB 软件进行多项式拟合，以捕捉热膨胀偏移量与温度之间更复杂的关系。图 12 为拟合函数曲线，蓝色点为样本数据，红色曲线为拟合函数曲线。横轴为实时采集的温度与标准温度(20 ℃)的差值，由于同一温度下不同时刻的测量值有差异，因此图 12 中出现同一温差值对应多个误差值的现象。拟合函数如式(32)：

$$\begin{aligned}\Delta l=&p_1\times\Delta t^8+p_2\times\Delta t^7+p_3\times\Delta t^6+\\&p_4\times\Delta t^5+p_5\times\Delta t^4+p_6\times\Delta t^3+\\&p_7\times\Delta t^2+p_8\times\Delta t+p_9\end{aligned} \tag{32}$$

式中各项的系数 $p_i(i=1,2,\cdots,9)$ 分别为 1.093×10^9，-2.308×10^{10}，2.13×10^{11}，-1.122×10^{12}，3.691×10^{12}，-7.762×10^{12}，1.019×10^{13}，-7.632×10^{12}，2.498×10^{12}。

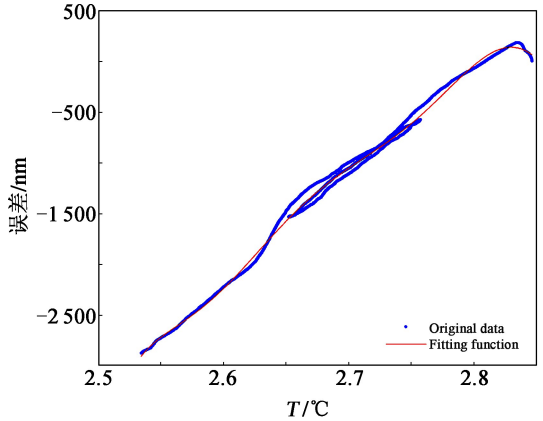


图 12 热膨胀误差拟合结果

图利用上述拟合关系函数根据实时温度计算热膨胀误差，并通过控制系统对实际载物台的位置进行补偿调整，得到补偿后的结果如图 13 所示。

由图 13 可以明显观察到补偿后的载物台位置趋势较为稳定。经过计算，在温度变化范围为 0.35 ℃时，原始测量值的均方差值约为 5×10^5 nm，经过热膨胀漂移补偿后的测量值均方差降至约 2×10^3 nm，效果显著。

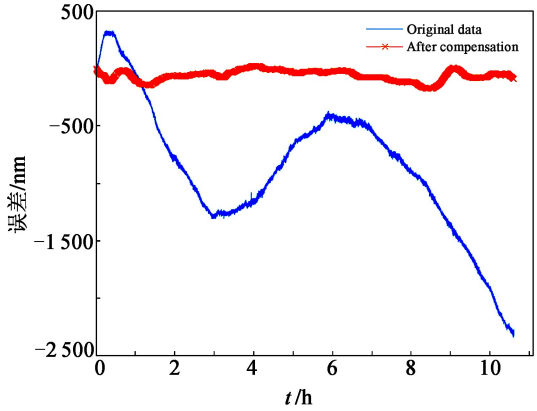


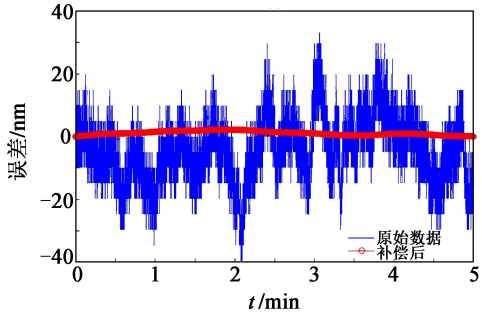
图 13 热膨胀误差补偿结果

3 综合误差补偿实验结果及分析

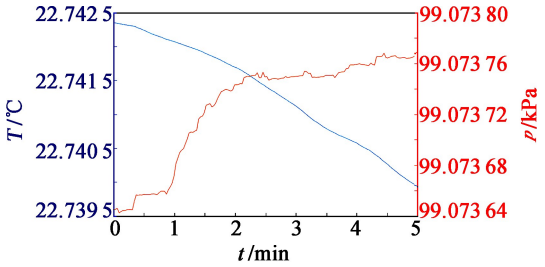
为验证系统在大行程测距时的补偿效果，在干涉仪光程为 1 000 mm 处进行测试。温度、压力感器的采样间隔为 1 s，干涉仪采样频率为 200 Hz。紧闭门窗、并设置空调恒温，开启系统的隔振器和综合误差补偿模块，对干涉仪测量值的余弦误差、阿贝误差、波长误差及材料热膨胀误差进行补偿。实验进行了两组：第一组连续采样时间为 5 min；第二组连续采样时间为 50 min。得到结果如下。

(1)连续采样时间为 5 min 时的补偿效果

图 14(a)为位移台测量系统连续采样 5 min 数据的补偿结果，蓝线为原始测量数据，红线为补偿结果值。通过各项补偿之后，系统测量误差的 3σ 由 30.45 nm下降到 4.69 nm，有一定的补偿效果。补



(a) 补偿结果



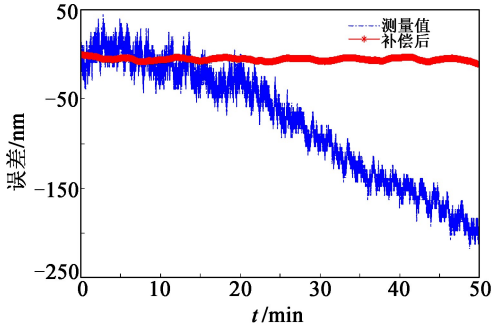
(b) 温度和气压数据

图 14　采样时间为 5 min 时的系统误差补偿结果

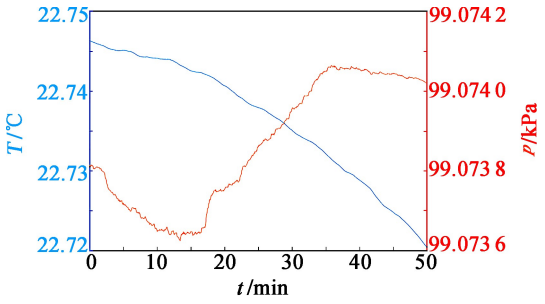
偿的残差主要因为双频激光干涉仪自身的仪器误差及环境不均匀性。图 14(b)为实时采集的环境温度及气压数据。

(2)连续采样时间为 50 min 时的补偿效果

将采样时间增大为 50 min，补偿结果如图 15(a)所示。系统测量误差的 3σ 由 197.0 nm 下降到 9.07 nm，达到了很好的补偿效果。温度和气压检测数据如图 15(b)所示。



(a) 补偿结果



(b) 温度和气压数据

图 15　采样时间为 50 min 时的系统误差补偿结果

4　结论

本文针对基于双频激光干涉原理的大行程位移台干涉测距系统中存在的系统误差问题，提出了一套系统综合误差补偿方法。在进行长距离测量时，短时间补偿量级为 10^{-8} m，长时间补偿量级达 10^{-7} m，验证了本文提出的多项系统误差补偿方法的有效性和可行性。与目前现有的干涉测距系统误差补偿效果相比，本方法补偿量级更大，且更适用于长距离、长时间测量，可广泛应用在光学元件面形检测等精密干涉测量领域。

参考文献：

[1] Berkovic G, Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements[J]. Adv. Opt. Photon., 2012, 4: 441-471.

[2] 赵　曦，贾　曦，黄荐渠. 现代长度测量方法综述[J]. 自动化仪表，2007，28(11)：12-15.
Zhao Xi, Jia Xi, Huang Jianqu. Survey on modem measuring method of distance[J]. Process Autom. Instrum., 2007, 28(11): 12-15.

[3] 羡一民. 双频激光干涉仪的原理与应用(一)[J]. 工具技术，1996，30(4)：44-46.
Xian Yimin. Principle and application of dual frequency laser interferometer (1)[J]. Tool Eng., 1996, 30(4): 44-46.

[4] Wu Q, Teng Y T, Wang X M, et al. Vibration error compensation algorithm in the development of laser interference absolute gravimeters [J]. Geosci. Instrum. Methods Data Syst., 2021, 10(1): 113-122.

[5] 张　帆，刘　瑾，杨海马. 双频激光干涉仪互补校准式高精度位移检测系统研究[J]. 传感器与微系统，2020，39(3)：14-17.
Zhang Fan, Liu Jin, Yang Haima. Research on high precision displacement detection system of dual frequency laser interferometer with complementary calibration[J]. Transducer and Microsyst. Technol., 2020, 39(3): 14-17.

[6] 于海娇，赵国罡. 基于振动节点优化提高双频激光干涉仪的测量精度[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(15)：100-107.
Yu Haijiao, Zhao Guogang. Improving measurement accuracy of dual-frequency laser interferometer based on vibration node optimization[J]. Laser Optoelectron. Progr., 2020, 57(15): 100-107.

[7] 吴嗣珊. 双频激光干涉仪的非线性误差与光学细分关系的研究[D]. 南昌：江西师范大学，2018.
Wu Sishan. The relations between the nonlinearity error and optical subdivision numbers in heterferodyne interferometer [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018.

[8] 熊显名，丁子婷，曾启林，等. Elden 公式法在双频激光干涉仪测量系统的应用[J]. 仪器仪表用户，2021，28(3)：38-42，86.
Xiong Xianming, Ding Ziting, Zeng Qilin, et al. Application of Elden formula method in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Instrumentation, 2021, 28(3): 38-42, 86.

[9] 丁子婷. 双频激光干涉仪测量系统的环境误差研究[D]. 桂林：桂林电子科技大学，2021.
Ding Ziting. Research on environmental error of dual frequency laser interferometer measurement system[D]. Guilin: Guilin

University of Electronic Technology, 2021.

[10] 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): 190-196.
Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, et al. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chin. J. Lasers, 2014, 41(4): 190-196.

[11] 滕 伟, 周云飞, 穆海华, 等. 超精密运动台激光测量模型及误差补偿算法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1492-1497.
Teng Wei, Zhou Yunfei, Mu Haihua, et al. An algorithm on laser measurement model of ultra—precision motion stage and error compensation[J]. China Mech. Eng., 2009, 20(12): 1492-1497.

[12] Minsoo K, Changsu P, Soonkyu J, et al. Real-time compensation of simultaneous errors induced by optical phase difference and substrate motion in scanning beam laser interference lithography system[J]. EEE/ASME Trans. Mechatron., 2018, 23(4): 1491-1500.

[13] 上海拍频光电科技有限公司. 双频激光干涉原理[EB/OL]. (2022-02-20)[2023-10-12]. http://www.spoe.com.cn/sys-nd/9.html.
Shanghai Paipin Photoelectric Technology. The Principle of Double Frequency Laser Interference[EB/OL]. (2022-02-20)[2023-10-12]. http://www.spoe.com.cn/sys-nd/9.html.

[14] 程吉水. 工件台激光干涉仪测量误差模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 14-18.
Cheng Jishui. Study on interferometer measurement error model in wafer stage[D]. Wuhan: Huazhong Univ. Sci. Technol., 2008: 14-18.

[15] 蒋佳雯, 康杰虎, 吴 斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 362-367.
Jiang Jiawen, Kang Jiehu, Wu Bin. High-precision center location algorithm of light spot[J]. Laser Optoelectron. Progr., 2021, 58(14): 362-367.

[16] Edlén B. The refractive index of air[J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71.

[17] Birch K P, M J Downs. An updated Edlén equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30(3): 155.

[18] 王磊杰, 张 鸣, 朱 煜, 等. 超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2975-2985.
Wang Leijie, Zhang Ming, Zhu Yu, et al. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer[J]. Opt. Precis. Eng., 2017, 25(12): 2975-2985.

作者简介:

王雨萌(1999—),女,硕士研究生,主要从事激光干涉仪应用方面的研究;

严 伟(1979—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微电子装备研制、微纳光学、光学测量等方面的研究。