

# 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

陈洪芳\*, 汤亮, 石照耀, 宋辉旭, 孙行强

北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124

**摘要** 提出了一种基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统的 ZEMAX 仿真分析方法。利用光学器件对偏振光的变换特性来建立系统的能量模型,建立了基于 ZEMAX 软件的光学系统模型,分析了光学系统中非理想的光学元件性能对干涉条纹对比度的影响。仿真分析结果表明,当光学系统分光部分、追踪部分和接收部分的分光镜的分光比分别为 2:8、6:4 和 5:5 时,条纹对比度达到 0.99,光学系统的干涉效果最好。光学系统中的偏振分光镜在非理想条件下,对干涉信号的条纹对比度的影响较小。

**关键词** 测量; 空气折射率补偿; 激光追踪仪; ZEMAX 仿真; 能量分析; 高精度测量

中图分类号 TH71

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0104009

## ZEMAX Simulation Method of Laser Tracing System Using a Dual-Wavelength Method to Compensate for the Refractive Index of Air

Chen Hongfang\*, Tang Liang, Shi Zhaoyao, Song Huixu, Sun Yanqiang

Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract** In this study, we propose a ZEMAX simulation analysis method for laser tracking measurement using a dual-wavelength method to compensate for the refractive index of air. We first develop an energy model for the system using optical elements to transform its polarization characteristics. We then establish an optical-system model based on ZEMAX to analyze the influence of the non-ideal performance of optical elements on the visibility of fringe pattern. The simulation results show that the interference pattern is most obvious when the splitting ratios of the beam splitters in the spectroscopic part of the system, the tracking part, and the receiving part are 2:8, 6:4, and 5:5, respectively. The polarization beam splitters in the optical system have little influence on the visibility of the fringe pattern under non-ideal conditions.

**Key words** measurement; compensation of air refractive index; laser tracer; ZEMAX simulation; energy analysis; high-precision measurement

**OCIS codes** 120.4820; 260.3160; 230.5440; 080.2720

## 1 引 言

激光追踪仪是工业测量领域中一种高精度的测量仪器,它利用高分辨率的激光干涉测量方法实现高精度测量,被广泛应用于航空、航天、船舶、汽车等领域<sup>[1-3]</sup>。激光追踪测量系统的光学系统较复杂,无法满足“共路”原则,在非真空环境下,大气等环境条件

变化会对空气折射率产生影响,使测量精度降低<sup>[4-6]</sup>。

为了减小测量误差,提高激光干涉测量精度,很多学者研究了非真空环境下的空气折射率测量和补偿方法。空气折射率的测量方法大致分为两种:直接测量法和间接测量法<sup>[7-10]</sup>。直接测量法主要是将空气折射率的变化转变为干涉条纹明暗级次的变化,测量方法包括多波长激光干涉法、抽气测量法、

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17053904)、国家自然科学基金(51635001)、北京市自然科学基金(3182005)

\* E-mail: hfchen@bjut.edu.cn

瑞利干涉法、双波长干涉测量法、Fabry-Perot 干涉法和光频率梳法<sup>[11]</sup>等。利用上述方法进行空气折射率的测量时,对于不同的测量精度需求,需选择不同的修正公式补偿空气折射率。直接测量法实时性好,但光路复杂,成本高。空气折射率间接测量法<sup>[12-15]</sup>通过在干涉光路中放置高精度的压力、温度和湿度传感器,利用传感器测得空气中的压力、温度和相对湿度值后,将其代入到 Edlén 公式中求出空气折射率的值。传感器的测量精度直接影响空气折射率的测量精度,进而使激光追踪测量的精度难以进一步提高。Matsumoto 等<sup>[16-17]</sup>采用双波长干涉法测量了空气折射率,测量不确定度为  $\pm 10^{-7}$ 。Meiners-Hagen 等<sup>[18-19]</sup>研制了基于双波长干涉法的空气折射率测量计,实验结果表明,在 30 m 的位移测量范围内,测量不确定度为  $1.2 \times 10^{-7}$ 。陈强华等<sup>[20]</sup>研制了一套新型的双真空管空气折射率测量系统,将两个长度不等的真空管构成两个不同的虚拟波长,再利用合成波长公式测量空气折射率值,测量不确定度高于  $1 \times 10^{-7}$ 。

目前,对高精度激光追踪测量系统的空气折射率修正的研究还处于发展阶段<sup>[21-22]</sup>。本文提出了一种基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统,利用 ZEMAX 仿真方法建立了光学系统模型,并利用此模型分析了光学系统中非理想的光学元件对干涉信号能量的影响。所提方法对光学元件选择、光路搭建、系统调试具有重要的理论指导意义。

## 2 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统的能量模型

### 2.1 光学系统原理

图 1 所示为基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量的光学系统原理图。由激光器  $laser_1$  发射的波长( $\lambda_1$ )为 532 nm 的激光束,经过检偏器  $P_1$  后得到线偏光,由平面反射镜  $mirror_1$  反射,经过分光部分的分光镜  $BS_1$  透射后被  $mirror_3$  反射,然后透过接收部分的分光镜  $BS_3$ ,经过滤光片  $filter_1$  后得到参考光束  $O_{r1}$ 。经过分光部分的分光镜  $BS_1$  的反射光,被  $mirror_2$  反射,通过偏振分光镜  $PBS_1$ ,其垂直偏振光(s 光)经过四分之一波片  $QW_1$  后转换成圆偏振光,透过追踪部分的分光镜  $BS_2$ ,被猫眼反射镜反射后,再次经过  $BS_2$ ,其反射光入射到四象限探测器,其信号反映猫眼反射镜的位置变化,可用于控制电机使激光跟踪系统的光学部分能够实时跟踪猫眼反射镜。而  $BS_2$  的透射圆偏振光经过  $QW_1$  后转换成平行偏振光(p 光),经过偏振分光镜  $PBS_1$  和  $PBS_2$  后,透过四分之一波片  $QW_2$  转换成圆偏振光,被标准球反射,再次经过  $QW_2$  后转换成 s 光,s 光被  $PBS_2$  反射后,进入分光镜  $BS_3$  经过滤光片  $filter_1$  后,得到的测量光束  $O_{m1}$ 。测量光束  $O_{m1}$  与参考光束  $O_{r1}$  形成干涉光,由光电探测器  $PD_1$  接收。由激光器  $laser_2$  发射的波长( $\lambda_2$ )为 1064 nm 的激光束,透过检偏器  $P_2$  得到线偏光。透过分光镜  $BS_1$  后波长为

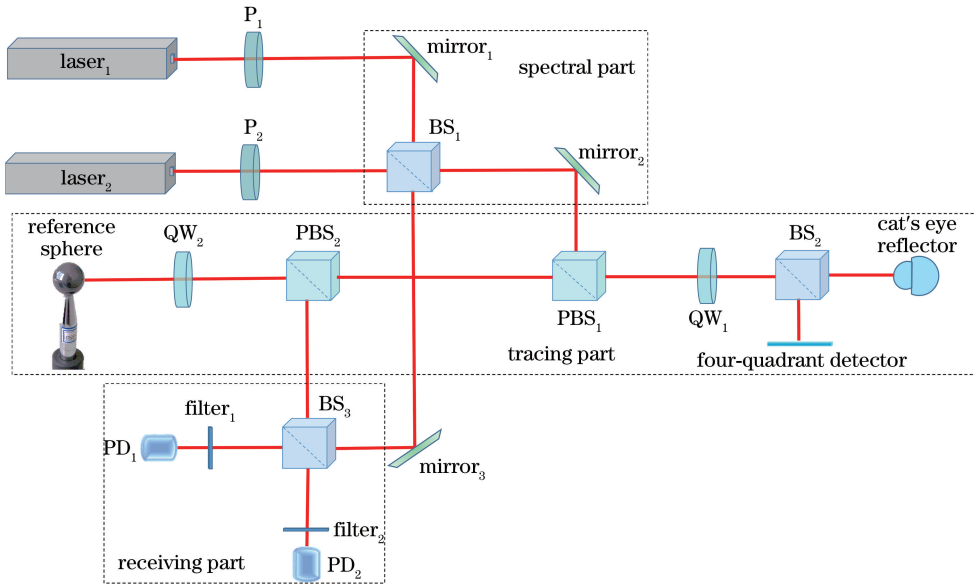


图 1 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统原理图

Fig. 1 Schematic of laser tracing measurement optical system based on dual-wavelength method to compensate air refractive index

$\lambda_2$  的激光束所走过的路径与波长为  $\lambda_1$  的激光束的一致,被分光镜 BS<sub>3</sub>反射后透过滤光片 filter<sub>2</sub>,得到的参考光束 O<sub>r2</sub>与测量光束 O<sub>l2</sub>形成干涉光,被光电探测器 PD<sub>2</sub>接收。

利用  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  两种不同波长的激光束得到的干涉信号所对应的相位差,得出猫眼反射镜的相对位移值  $D_1 = n_1 \cdot L$  和  $D_2 = n_2 \cdot L$ ,其中,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为标准大气条件下波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  对应的空气折射率,  $L$  为猫眼反射镜的相对位移。根据色散系数公式  $A_{\text{dis}} = (n_1 - 1)/(n_2 - n_1)$ ,得到双波长测距公式为

$$L = D_1 - A_{\text{dis}} \cdot (D_2 - D_1)。 \quad (1)$$

根据(1)式得到补偿空气折射率后猫眼反射镜的相对位移  $L$ 。假设  $T$  为理想真值,则其相对误差公式为

$$\Delta L = (L - T)/T。 \quad (2)$$

## 2.2 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统能量建模

光学器件对偏振光的变换特性可由琼斯矩阵表征。琼斯矩阵中的元素受到调制时,其光学器件出射偏振光的偏振态也相应受到调制,利用该特性建立基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统的能量模型。

波片的琼斯矩阵<sup>[23]</sup>可以表示为

$$\mathbf{J}_{\delta, \theta} = \begin{Bmatrix} \cos^2 \theta + \exp(-i\delta) \cdot \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta [1 - \exp(-i\delta)] \\ \sin \theta \cos \theta [1 - \exp(-i\delta)] & \sin^2 \theta + \exp(-i\delta) \cdot \cos^2 \theta \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\theta$  为波片快轴与光轴之间的夹角,  $\delta$  为波片延迟角。

四分之一波片的  $\theta = \pi/4$ ,  $\delta = \pi/2$ ,因此,四分之一波片的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{J}_{\text{QW}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-i & 1+i \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{-\text{QW}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-i & -1-i \\ -1-i & 1-i \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

偏振分光棱镜(PBS)的透射光和反射光的琼斯矩阵<sup>[24-25]</sup>可分别表示为

$$\mathbf{J}_{\text{PBT}} = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}, \mathbf{J}_{\text{PBR}} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $t_p$  为 p 光的透射系数,  $t_s$  为 s 光的透射系数,  $r_p$  为 p 光的反射系数,  $r_s$  为 s 波的反射系数。

设激光器输出的理想单频激光的琼斯矢量  $\mathbf{E}$  为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} A_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $A_0$  为单频激光束的琼斯矢量  $\mathbf{E}$  的振幅。

由激光器 laser<sub>1</sub>发出的激光束经过光学系统,到达光电探测器 PD<sub>1</sub>接收面,所接收的参考光束和测量光束的琼斯矢量分别为

$$\mathbf{E}_{r1} = \mathbf{J}_{\text{NPBT}_3} \mathbf{J}_{\text{mirror}_3} \mathbf{J}_{\text{NPBT}_1} \mathbf{J}_{\text{mirror}_1} \mathbf{J}_{P_1} \mathbf{E} \cdot \exp(i\varphi_{r1}), \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_{l1} = \mathbf{J}_{\text{NPBR}_2} \mathbf{J}_{\text{PBR}_2} \mathbf{J}_{-\text{QW}_2} \mathbf{J}_R \mathbf{J}_{\text{QW}_2} \mathbf{J}_{\text{PBT}_2} \mathbf{J}_{\text{PBT}_1} \mathbf{J}_{-\text{QW}_1} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_C \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_{\text{QW}_1} \mathbf{J}_{\text{PBR}_1} \mathbf{J}_{\text{mirror}_2} \mathbf{J}_{\text{NPBR}_1} \cdot \mathbf{J}_{\text{mirror}_1} \mathbf{J}_{P_1} \mathbf{E} \cdot \exp(i\varphi_{l1}), \quad (8)$$

式中:  $\varphi_{r1}$ 、 $\varphi_{l1}$  分别为光电探测器 PD<sub>1</sub>接收的干涉信号中参考光和测量光的相位;  $\mathbf{J}_{P_1}$  为检偏器 P<sub>1</sub>的琼斯矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{NPBT}_1}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{NPBR}_1}$  分别为分光部分的分光镜 BS<sub>1</sub>的透射矩阵和反射矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{NPBT}_2}$  为追踪部分的分光镜 BS<sub>2</sub>的透射矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{NPBT}_3}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{NPBR}_3}$  分别为接收部分的分

光镜 BS<sub>3</sub>的透射矩阵和反射矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{mirror}_1}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{mirror}_2}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{mirror}_3}$  分别为平面反射镜 mirror<sub>1</sub>、mirror<sub>2</sub>和 mirror<sub>3</sub>的琼斯矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{PBT}_1}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{PBR}_1}$  分别为偏振分光镜 PBS<sub>1</sub>的透射矩阵和反射矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{PBT}_2}$ 、 $\mathbf{J}_{\text{PBR}_2}$  分别为偏振分光镜 PBS<sub>2</sub>的透射矩阵和反射矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{QW}_1}$ 、 $\mathbf{J}_{-\text{QW}_1}$  分别为四分之一波片 QW<sub>1</sub>的琼斯矩阵;  $\mathbf{J}_{\text{QW}_2}$ 、 $\mathbf{J}_{-\text{QW}_2}$  分别为四分之一波片 QW<sub>2</sub>的琼斯矩阵;  $\mathbf{J}_R$  为标准球的琼斯矩阵;  $\mathbf{J}_C$  为猫眼反射镜的琼斯矩阵。

由激光器 laser<sub>2</sub>发出的激光束到达光电探测器 PD<sub>2</sub>接收面的参考光束和测量光束的琼斯矢量分别为

$$\mathbf{E}_{r2} = \mathbf{J}_{\text{NPBR}_3} \mathbf{J}_{\text{mirror}_3} \mathbf{J}_{\text{NPBR}_1} \mathbf{J}_{P_2} \mathbf{E} \cdot \exp(i\varphi_{r2}), \quad (9)$$

$$\mathbf{E}_{l2} = \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_{\text{PBR}_2} \mathbf{J}_{-\text{QW}_2} \mathbf{J}_R \mathbf{J}_{\text{QW}_2} \mathbf{J}_{\text{PBT}_2} \mathbf{J}_{\text{PBT}_1} \mathbf{J}_{-\text{QW}_1} \cdot \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_C \mathbf{J}_{\text{NPBT}_2} \mathbf{J}_{\text{QW}_1} \mathbf{J}_{\text{PBR}_1} \mathbf{J}_{\text{mirror}_2} \mathbf{J}_{\text{NPBT}_1} \mathbf{J}_{P_2} \mathbf{E} \cdot \exp(i\varphi_{l2}), \quad (10)$$

式中  $\varphi_{r2}$ 、 $\varphi_{l2}$  分别为光电探测器 PD<sub>2</sub>接收的干涉信号中参考光和测量光的相位;  $\mathbf{J}_{P_2}$  为检偏器 P<sub>2</sub>的琼斯矩阵。

条纹对比度表示干涉场中某一点附近条纹的清晰程度。基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的两路干涉信号的条纹对比度<sup>[26]</sup>分别为

$$K_{\text{PD}_1} = \frac{2(A_{r1}/A_{l1})}{1 + (A_{r1}/A_{l1})^2}, \quad (11)$$

$$K_{PD_2} = \frac{2(A_{r2}/A_{l2})}{1 + (A_{r2}/A_{l2})^2}, \quad (12)$$

式中,  $A_{r1}$  为参考光束  $E_{r1}$  的振幅,  $A_{l1}$  为测量光束  $E_{l1}$  的振幅,  $A_{r2}$  为参考光束  $E_{r2}$  的振幅,  $A_{l2}$  为测量光束  $E_{l2}$  的振幅。由此得到两路干涉信号的能量分别为

$$I_{PD_1} = |A_{r1} + A_{l1}|^2, \quad (13)$$

$$I_{PD_2} = |A_{r2} + A_{l2}|^2. \quad (14)$$

### 3 基于 ZEMAX 仿真的双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统建模

根据基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪

测量光学系统原理以及光学系统的能量模型, 利用 ZEMAX 软件分别对系统中每个光学元件进行仿真建模及多重结构参数的设置, 建立基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的 ZEMAX 仿真模型<sup>[27]</sup>。该光学系统中, 利用琼斯矩阵实现检偏器、四分之一波片等光学元件的模型建立, 偏振分光镜、分光镜的模型建立通过坐标断点的设置以及不同膜层结构参数的设置来实现, 根据平面反射镜、猫眼反射镜和标准球在光学系统中折转光束的作用, 通过设置膜层的参数来建立其模型。具体建模流程如图 2 所示, 其中 AR 代表增透膜, A、B、C、D 代表光学元件琼斯矩阵的对应参数。

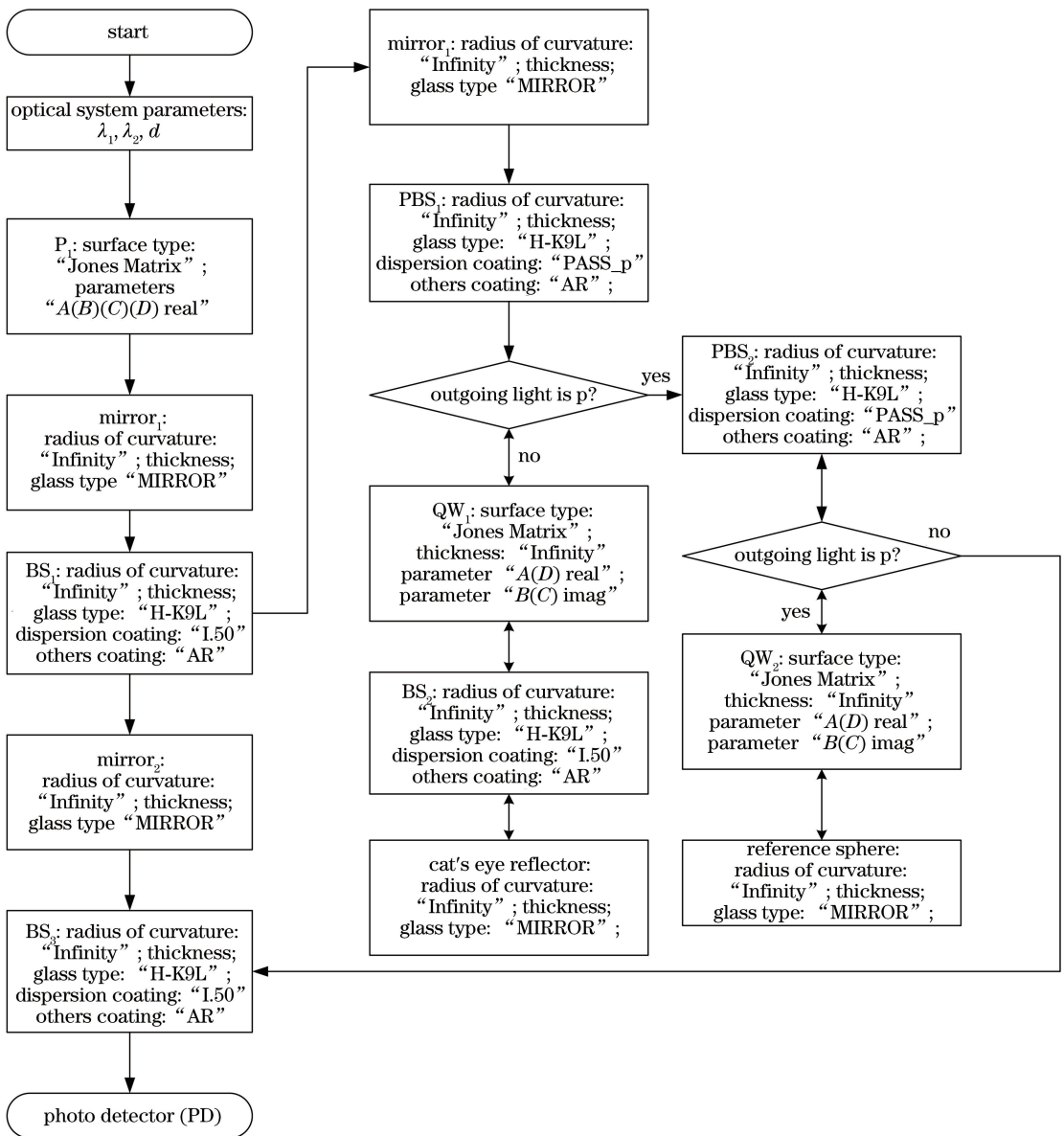


图 2 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的具体建模流程

Fig. 2 Specific modeling process of laser tracing measurement optical system based on dual-wavelength method to compensate air refractive index



设定光学系统的参数,即波长、通光口径,利用琼斯矩阵对检偏器  $P_1$  和  $P_2$  进行模拟仿真。随后在 ZEMAX 序列跟踪模式下完成偏振分光镜和分光镜模型的建立,设置光学元件分界面处的涂层参数,以分开两束光。利用坐标断点建立平面反射镜的仿真模型。通过琼斯矩阵对四分之一波片进行模拟仿真,通过参数的设定来建立波片的模型。标准球和猫眼反射镜用于作为平面反射镜折转光路,因此,要选择合适的膜层进行模型仿真<sup>[28]</sup>。根据激光追踪测量光学系统的原理,对光学元件的顺序进行调整,设置多重结构参数,设计各个光学元件之间的结构,得到的基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的仿真结构图如图 3 所示。

根据图 3 所建立的光学系统仿真模型,得到两路不同的干涉信号,在视野范围内其干涉条纹的稀

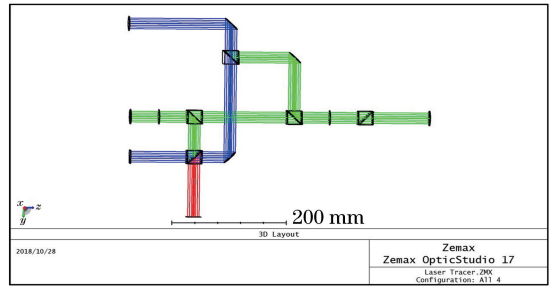


图 3 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的仿真结构图

Fig. 3 Simulation structure diagram of laser tracking measurement optical system for compensating air refractive index based on dual-wavelength method

疏程度不同,即光学系统的干涉信号具有不同的相位差,如图 4(a)、(b)所示,其中色度条表示干涉条纹光强的大小。

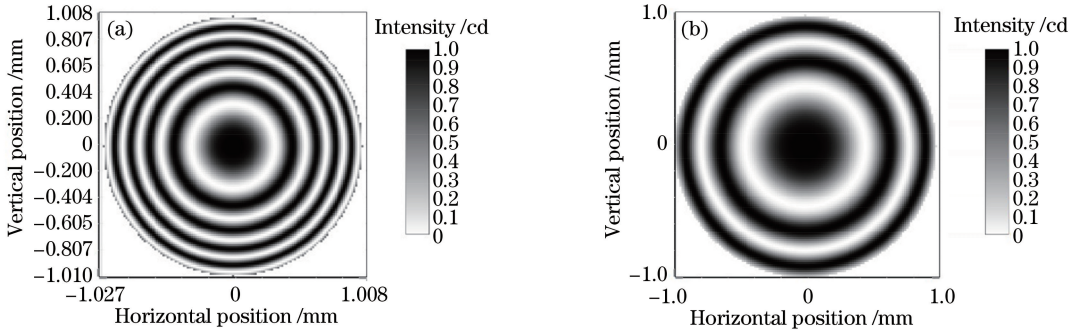


图 4 基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的仿真干涉图。

(a)由  $laser_1$  得到的干涉信号;(b)由  $laser_2$  得到的干涉信号

Fig. 4 Simulation interferogram of laser tracking measurement optical system based on dual-wavelength method for compensating air refractive index. (a) Interference signal obtained by  $laser_1$ ; (b) interference signal obtained by  $laser_2$

## 4 基于 ZEMAX 仿真的双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统分析

### 4.1 基于双波长法补偿空气折射率方法的测量精度验证

图 5 所示为单波长和双波长激光追踪测量系统的猫眼反射镜的绝对位移测量结果的对比图,单波长系统所用波长为 632.8 nm。可以看出,双波长测量得到的猫眼反射镜的绝对位移值与真值几乎重合,而单波长测量系统得到的结果相对真值的误差较大。如图 6 所示,利用激光追踪测量光学系统的 ZEMAX 仿真方法,对单波长和双波长测量系统所得到的猫眼反射镜的位移测量结果的准确性进行对比,可以看出,基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统位移值的准确性高,根据(2)式可得到

其相对误差值约为 2%;而基于单波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统的位移值的相对误差约为 9%。故双波长测量系统的测量结果更接近真值,测量精度更高。

### 4.2 光学元件的非理想性能对激光追踪测量光学系统干涉条纹对比度的影响

#### 4.2.1 分光镜的分光比的影响

根据 ZEMAX 软件的仿真模型,分析分光镜的分光比对基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的干涉条纹对比度的影响。当接收部分的分光镜  $BS_3$  的分光比为 5:5 时,  $PD_1$  和  $PD_2$  的接收信号能量值最接近,分别为 0.2723868、0.2379694。当分光部分的分光镜  $BS_1$  的分光比为 2:8 时,在追踪部分的分光镜  $BS_2$  的分光比由 2:8 到 3:7、4:6、5:5、6:4、7:3 及 8:2 的变化过程中,两路参考光束和测量光束的能量发生变化,其干涉信号

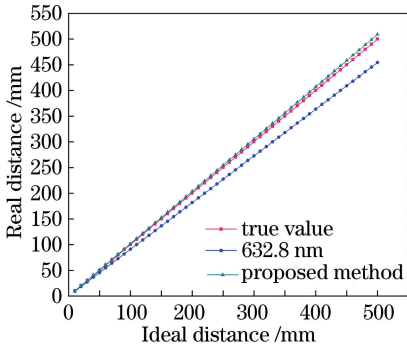


图 5 单波长系统和双波长系统测得的猫眼反射镜的位移值和理想值的对比图

Fig. 5 Comparison of displacement and ideal values of cat's eye reflector measured by single-wavelength system and dual-wavelength system

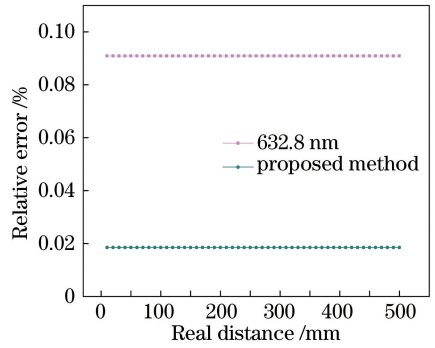


图 6 单波长系统和双波长系统测量得到的猫眼反射镜的位移值和理想值的相对误差图

Fig. 6 Relative error diagram of displacement and ideal value of cat's eye reflector measured by single-wavelength system and dual-wavelength system

的条纹对比度随  $BS_2$  分光比的增大先增大后趋于稳定,如表 1 所示。当  $BS_2$  的分光比为 6:4 时,干涉信号的条纹对比度随  $BS_1$  分光比的增大而减小,如表 2 所示。由表 1 和表 2 可知,在其他条件都理想的情

况下,当  $BS_1$ 、 $BS_2$ 、 $BS_3$  的分光比分别为 2:8、6:4、5:5 时,在  $PD_1$ 、 $PD_2$  处接收到的干涉信号能量值接近,条纹对比度可达到 0.999,条纹相对更清晰,干涉效果更理想。

表 1  $BS_1$  和  $BS_3$  的分光比固定,  $BS_2$  的分光比不同时,系统干涉条纹的对比度

Table 1 Visibility of fringe pattern of the system under different spectral ratio of  $BS_2$  with the fixed spectral ratio of  $BS_1$  and  $BS_3$

Splitting ratio of $BS_2$	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2
$K_{PD_1}$	0.614	0.814	0.933	0.988	0.999	0.984	0.952
$K_{PD_2}$	0.575	0.775	0.904	0.973	0.999	0.995	0.973

表 2  $BS_2$  和  $BS_3$  的分光比固定,  $BS_1$  的分光比不同时,系统干涉条纹的对比度

Table 2 Visibility of fringe pattern of the system under different spectral ratio of  $BS_1$  with the fixed spectral ratio of  $BS_2$  and  $BS_3$

Splitting ratio of $BS_1$	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2
$K_{PD_1}$	0.988	0.917	0.823	0.724	0.624	0.520	0.410
$K_{PD_2}$	0.973	0.885	0.784	0.684	0.585	0.485	0.380

#### 4.2.2 偏振分光镜的非理想性能的影响

根据上述分析可知,当  $BS_1$ 、 $BS_2$ 、 $BS_3$  的分光比分别为 2:8、6:4、5:5 时,在  $PD_1$ 、 $PD_2$  处接收的干涉条纹对比度理想。在上述条件下,分析偏振分光镜的非理想性能对系统能量的影响。在理想情况下,  $R_s = T_p = 1$ ; 在非理想情况下,  $R_s < 1$ ,  $T_p < 1$ 。当 PBS 的透射率和反射率非理想时,基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统条纹对比度分别如图 7(a)、(b) 所示。可以看出,当光学系统中不同位置处的 PBS 的反射率非理想时,  $PD_1$  和  $PD_2$  得到的干涉信号的条纹对比度均在 0.99 左右,对干涉信号对比度的影响很小。当不同位置处 PBS 的透射率或反射率非理想时,基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量光学系统的能量不受影响,如图 8 所示。

## 5 结 论

提出了一种基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统的 ZEMAX 能量仿真分析方法。根据基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量的光学系统原理,建立了 ZEMAX 仿真模型,验证了模型的可靠性及实用性。利用条纹对比度反映能量的变化,分析了分光镜的分光比和偏振分光镜的非理想性能对激光追踪测量光学系统能量的影响。研究表明,当分光部分、追踪部分、接收部分的分光镜的分光比分别为 2:8、6:4、5:5 时,两路接收的干涉信号能量接近,光学系统的干涉效果最好。此时,不同位置的偏振分光镜的非理想性能对所提激光追踪测量系统能量的影响不大。所提的 ZEMAX 能量仿真分析方法实时性好、可靠性强、精

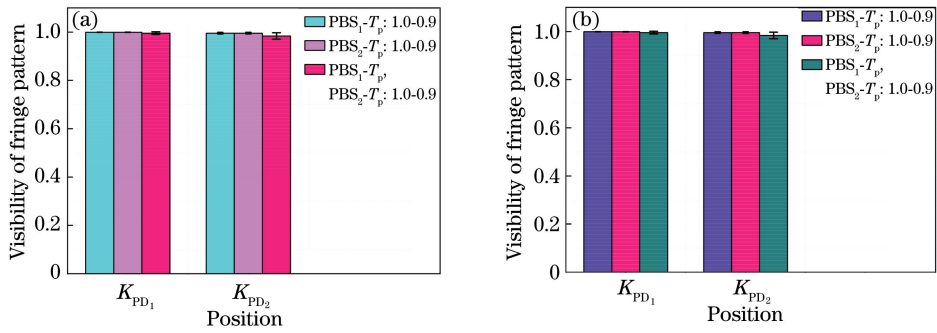


图 7 PBS 性能非理想对干涉条纹对比度的影响。(a) p 光透射率非理想；(b) s 光反射率非理想

Fig. 7 Effect of non-ideal PBS performance on visibility of fringe pattern. (a) Non-ideal p-light transmittance; (b) non-ideal s-light reflectance

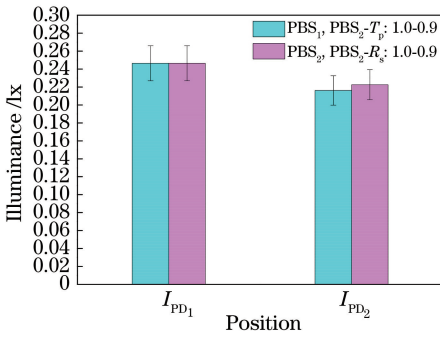


图 8 不同位置处 PBS 透射率非理想对光学系统能量的影响  
Fig. 8 Effect of non-ideal PBS transmittance on optical system energy at different locations

度高,适用于精密追踪测量系统的研究,可有针对性地调整基于双波长法补偿空气折射率的激光追踪测量系统中的光学元件,为光学系统精度提升、可靠性评估奠定了理论基础。

### 参 考 文 献

[1] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, *et al.* Lyapunov-based decentralized adaptive control for laser beam tracking systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1191-1200.

[2] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.

[3] Baumann E, Giorgetta F R, Deschênes J D, *et al.* Comb-calibrated laser ranging for three-dimensional surface profiling with micrometer-level precision at a distance[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 24914-24928.

[4] Wendt K, Franke M, Härtig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. Measurement, 2012, 45(10):

2339-2345.

[5] Teoh P L, Shirinzadeh B, Foong C W, *et al.* The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique [J]. Measurement, 2002, 32(2): 135-150.

[6] Lau K, Hocken R J, Haight W C. Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology [J]. Precision Engineering, 1986, 8(1): 3-8.

[7] Li D G, Zhang G X. Measurement and compensation for refractive index of air using a pre-evacuated airtight sealed cavity [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(1): 80-84.

李东光, 张国雄. 用预抽气真空腔法测量及补偿空气折射率的研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 80-84.

[8] Ma B T, Pei C Y, Li X C. Modified formula of environmental conditions in precision measurement of optical glass refractive index[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 936-939.

马伯涛, 裴春艳, 李小春. 光学玻璃折射率精密测量中环境条件修正公式的研究[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 936-939.

[9] Ni Y C. Modification of air derivative Edlén formula [J]. Metrology Technology, 1998(3): 22-27.

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.

[10] Cui J J. Research on high precision temperature control and PTF measurement [D]. Beijing: China Institute of Metrology, 2006.

崔建军. 高精度温度控制及 PTF 测量的研究 [D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2006.

[11] Lu Q, Shi L, Mao Q H. Research advances in dual-comb spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0400001.

路桥, 时雷, 毛庆和. 双光梳光谱技术研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0400001.

[12] Owens J C. Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and

- composition[J]. Applied Optics, 1967, 6(1): 51-59.
- [13] Jones F E. Simplified equation for calculating the refractivity of air[J]. Applied Optics, 1980, 19(24): 4129-4130.
- [14] Birch K P, Downs M J. An updated Edlén equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30(3): 155-162.
- [15] 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.
- [16] Matsumoto H, Zhu Y C, Iwasaki S, *et al.* Measurement of the changes in air refractive index and distance by means of a two-color interferometer [J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4522-4526.
- [17] Matsumoto H, Honda T. High-accuracy length-measuring interferometer using the two-colour method of compensating for the refractive index of air [J]. Measurement Science and Technology, 1992, 3(11): 1084-1086.
- [18] Meiners-Hagen K, Abou-Zeid A. Refractive index determination in length measurement by two-colour interferometry [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(8): 084004.
- [19] Vacharanukul K, Sudatham W, Tonmueanwai A. Real-time air refractive index compensation of laser interferometer system for step gauge calibration with CMM technique [C]. 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim Incorporating the Australian Conference on Optics, 2011: 1978-1980.
- [20] Chen Q H, Yan J Q, Liu Z Y, *et al.* An air refractometer with dual vacuum chambers based on method of equivalent synthetic wave [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(3): 203-206.  
陈强华, 闫聚群, 柳忠尧, 等. 基于等效合成波方法的双真空管空气折射率测量仪[J]. 计量学报, 2004, 25(3): 203-206.
- [21] Chen H F, Ding X M, Zhong Z, *et al.* Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(9): 1281-1285.  
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志, 等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1281-1285.
- [22] Chen H F, Sun Y Q, Wang Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104003.  
陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104003.
- [23] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 57.  
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 57.
- [24] Deng Y L, Li X J, Geng Y F, *et al.* Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112008.  
邓元龙, 李学金, 耿优福, 等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112008.
- [25] Zhang S, Huang D X, Yin D L, *et al.* Design of a novel polarization beam splitting prism and its applications [J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(1): 46-49.  
张晟, 黄德修, 殷东亮, 等. 一种新型偏振分光棱镜的设计和應用 [J]. 光电工程, 2003, 30(1): 46-49.
- [26] Liu Z J, Cui L S, Xie D L. Theory analysis and measurement for interference fringes of laser Doppler velocimeter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804001.  
刘子君, 崔骊水, 谢代梁. 激光多普勒流速仪的干涉条纹理论分析及测量 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804001.
- [27] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX optical design program user's guide [EB/OL]. (2005-02-03) [2018-08-15]. <http://www.zemax.com>.
- [28] Chen H F, Tang L, Sun Y Q, *et al.* Zemax simulation based energy analysis of optical system for laser tracking measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0704009.  
陈洪芳, 汤亮, 孙衍强, 等. 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0704009.