

doi:10.3788/gzxb20184706.0614002

温度扰动对棱镜式激光陀螺特性的影响

任莉娜, 刘健宁, 焦明星

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要:考虑温度扰动的情况下,对光在棱镜表面反射和折射的传输矩阵进行了修正.根据激光环形腔自洽理论,建立了温度扰动下的棱镜式激光陀螺腔内光束传输物理模型,分析了温度扰动对陀螺频率偏移、标度因数等参数的影响.理论分析表明,当温度在 $-40\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围波动时,激光陀螺光学腔长变化量、频率偏移量和标度因数变化量依次为 $10.04\ \mu\text{m}$ 、 $0.011\ \text{MHz}$ 和 1.96×10^{-10} .建立了棱镜式激光陀螺变温实验系统,实验结果与理论分析相吻合.

关键词:棱镜式激光陀螺;温度扰动;传输矩阵;自洽理论;标度因数

中图分类号:TN248.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0614002-9

Analysis of the Influence on the Characteristics of the Prism Laser Gyroscope by Temperature Disturbance

REN Li-na, LIU Jian-ning, JIAO Ming-xing

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The temperature perturbation being considered, the transmission matrixes of the reflected and refracted light beams on the prism surfaces have been modified. According to the self-consistent theory of the laser ring cavity, a physical model of the intra-cavity light transmission has been established considering the temperature disturbance in prism laser gyroscope, and the influences on the frequency variation, scale factor and other parameters have been analyzed. The theoretical analysis shows that when the temperature varies from -40°C to 70°C , the changes of the optical cavity-length, frequency offset, and scale factor are $10.04\ \mu\text{m}$, 0.011MHz and 1.96×10^{-10} , respectively. An experimental system of the prism laser gyroscope has been established whose temperature can be changed, and the experimental results agree with the theoretical values.

Key words: Prism laser gyroscope; Temperature disturbance; Transmission matrix; Self-consistent theory; Scale factor

OCIS Codes: 140.3370; 140.3410; 010.3310

0 引言

激光陀螺是捷联式惯性制导与导航系统的理想器件,具有启动时间短、精度高、动态范围大、功耗小等优点,在导弹制导、航空器飞行控制以及航天遥感卫星姿态控制等领域占有重要的地位^[1-3].环形谐振腔是激光陀螺的核心^[4].棱镜式激光陀螺(Laser Gyroscope with Total Reflection Prisms, TRPLG)通过全反射棱镜(Total Reflection Prisms, TRP)构成闭合回路,其优点在于完全免镀膜、背向散射小、功耗低^[5-6].但环形光路中较大一部分在 TRP 内部,由于 TRP 材料是熔融石英,其光学性质如:色散效应、吸收损耗或者其它非均

基金项目:国家自然科学基金(No.61605156),陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(No.2016JQ6073),陕西省教育厅科学研究计划专项(No.16JK1560)资助

第一作者:任莉娜(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光陀螺技术. Email:renlina0617@163.com

导师(通讯作者):刘健宁(1985-),男,讲师,博士,主要研究方向为激光陀螺技术. Email:liujianning@xaut.edu.cn

收稿日期:2017-12-11; **录用日期:**2018-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

匀损耗等,一般都对温度变化敏感,因此 TRPLG 的光路容易受到温度影响发生偏移. TRPLG 光路在 TRP 中的传输距离较长,进一步放大了温度因素的影响. 温度扰动引起 TRPLG 腔内光束偏离设计路径,导致激光陀螺的比例因子、闭锁阈值及谐振腔内损耗的变化,进而影响激光陀螺的稳定性和精度,是这种陀螺的主要误差源之一^[7-8].

目前针对环形谐振腔光路误差特性分析的研究很多,文献[9]基于光路传输矩阵,结合高斯光束特征参数,研究了反射镜曲率半径变化对环形谐振腔束腰半径的影响. 文献[10]根据矩阵光学理论分析了随机振动下谐振腔光阑处的形变的影响规律. 文献[11]以非共面环形腔为研究对象,结合光路传输矩阵,分析本征模式的特征参量. 上述研究以反射镜环形谐振腔为研究对象,关注角度误差对谐振腔工作特性的影响, TRP 因其光学特点,工作特性容易受到温度扰动的影响,有必要针对性研究. 本文根据棱镜式环形谐振腔光路传播的特点,理论研究了温度扰动下谐振腔光路偏移对激光陀螺的影响. 从修正光束在环形腔内的反、折射传输矩阵出发,将环境温度作为微扰项,添加在传输矩阵中,即将旧的 2×2 的传输矩阵修正为新的 3×3 的传输矩阵. 在此基础上结合环形腔自治理论,建立光路随温度偏移的物理模型,讨论环形腔内各个位置光路的偏移情况.

1 TRPLG 环形谐振腔

以光学腔长为 0.28 m 的三棱镜激光陀螺为研究对象. 三棱镜环形腔由三块 TRP 构成,即:单 TRP 实现光路的 120° 旋转,如图 1(a). 图 1 中, α 为梯形 TRP 的顶角, θ_B 表示光束以布儒斯特角入射到 TRP. 光束由 TRP 腰边中点折射进入 TRP 内部,折射角记作 θ_2 . 光传输一段距离后,在梯形 TRP 的下底面发生全反射,入射角记为 θ_3 . 反射光线射到 TRP 的另一腰面,再经折射回到空气中,入射、折射角分别为 θ_4 、 θ_5 ,在此过程中光束旋转 120° . 根据折射定律,结合光路传输的几何关系及布儒斯特角特性,代入 25°C TRP 折射率,可以得到等腰棱镜的顶角 $\alpha = 85.53^\circ$. l_1 、 l_2 分别表示梯形 TRP 的腰长和下底长, l_1 取 9.5 mm, l_2 取 12 mm,根据图 1(a)几何关系,光束在单 TRP 内部传输距离为 15 mm.

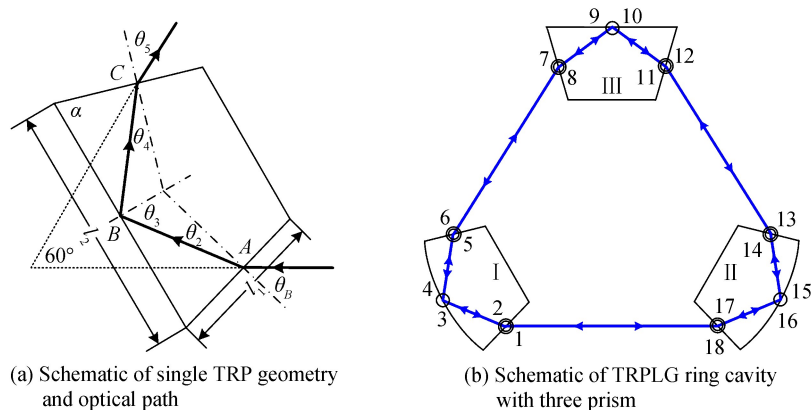


图 1 棱镜分光光路图

Fig.1 Sketch of optical system divided by octagonal pyramid

三角形 TRPLG 环形谐振腔光路结构示意图如图 1(b). 其中 I、II 号 TRP 完全相同,底面为曲面, III 号 TRP 的底面是平面,这给环形腔内形成稳定的光振荡提供了保证. 此外,图中单圆圈标记了光束在 TRP 底面上的全反射,如 3-4、9-10、15-16,分别代表光在 TRP 内部反射前、后的位置,双圆圈标记了光束在 TRP 表面以布儒斯特角入射空气-TRP 界面,如 1-2、5-6、7-8、11-12、13-14、17-18,分表代表光束在空气-TRP 界面折射前后的位置,光束以布儒斯特角入射时,相当于在环形光路中加入了六片布儒斯特窗,腔内光束的线偏振度很高.

2 温度扰动下的传输矩阵修正

棱镜式激光陀螺腔体采用热膨胀系数较低的低微晶玻璃, TRP、光阑、合光棱镜等光学元件采用熔融石英. 在 $-40^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内,微晶玻璃与熔融石英的平均线性热膨胀系数相比普通玻璃都非常小. 因此,认为稳

频伺服系统可补偿谐振腔受热膨胀发生的形变导致光路偏移理想路径引入的误差, 在本文中不再考虑。

2.1 温度对光学腔长的影响

TRP 的材料熔融石英是一种色散较大的光学玻璃, 在 20℃ 条件下 632.8 nm 波长光束的折射率为 1.456 98。熔融石英的折射率与温度的关系式为

$$n = n_0 + K(\lambda)T \quad (1)$$

式中, n_0 是有关材料的常数, T 是 TRP 的温度, $K(632.8 \text{ nm}) = 1.01 \times 10^{-5}$ 。

环境温度变化还会使稳频通道中干燥空气的折射率发生一定程度改变, 空气折射率与温度的关系式^[12]为

$$n(T) = 1 + \frac{n_1 - 1}{1 + \alpha T} \quad (2)$$

式中, n_1 是 0℃ 时的空气折射率, 取为 1.000 32; α 是常数, 取值为 $0.003 \text{ } 68^\circ\text{C}^{-1}$ 。

温度扰动使 TRP 折射率、空气折射率发生变化, 使得光束在 TRPLG 环形腔内传输角度发生变化, 相应的光在 TRP 内部的传输距离随之变化。分析谐振腔内光路偏移理想路径的程度, 可以通过光路传输矩阵来描述。

2.2 含温度微扰项的光路传输矩阵

光路传输矩阵对分析谐振腔的稳定性、外界扰动引起光路的偏移、稳定腔中高斯光束的束腰半径及标度因数的变化量有很大的帮助。其实质上是应用几何光学的方法描述傍轴光线在谐振腔内的传播情况, 以及光学元件对光路的作用^[13-14]。任意傍轴光线可以用两个坐标参数来表示, 光线偏离光轴的距离 r 和光线与光轴的夹角 α , 记作 (r, α) 。光路传输符号规则为: 1) 以光线传播的方向自左至右为正向基准, 傍轴光线在光轴以上时, r 为正, 反之 r 为负; 2) 以光轴为起始边, 旋转至光线, 逆时针 α 为负, 顺指针 α 为正; 3) 折射界面曲率半径为 R , 顶点到球心与光线传播方向相同时, R 取正, 相反时取负。

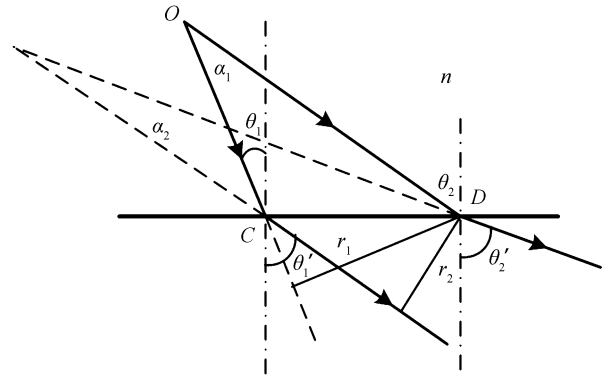


图2 理想情况下从 TRP 到空气光的折射
Fig.2 The ideal refraction of light from TRP to air

如图 1(a) 中 C 点, 以光线从 TRP 界面折射进入空气为例, 对于午面光路传输矩阵进行修正。C 点处光路传输情况如图 2: 以理想光路 OC 为光轴, θ_1 为入射角, 等于布儒斯特角, θ'_1 为折射角; OD 为傍轴光线, θ_2 、 θ'_2 分别为其入射角、折射角。TRP 折射率为 n , 空气折射率为 1。入射光线可以表示为 (r_1, α_1) , 其折射光线表示为 (r_2, α_2) 。由图中几何关系可得 $AB = \frac{r_1}{\cos\theta_1} = \frac{r_2}{\cos\theta'_1}$, 由于光线以布儒斯特角入射, 则 $\theta_1 + \theta'_1 = \frac{\pi}{2}$, 联立可知

$$r_2 = \frac{1}{n} r_1 \quad (3)$$

结合折射定律, 将 $\sin\theta_2$, $\sin\theta'_2$ 分别在 θ_1 , θ'_1 处进行一级泰勒展开, 相减后可得

$$n(\theta_2 - \theta_1) \cos\theta_1 = (\theta'_2 - \theta'_1) \cos\theta'_1 \quad (4)$$

由于 $\theta_2 - \theta_1 = \alpha$, $\theta'_2 - \theta'_1 = \alpha_2$, 联立式(3)、(4)可得

$$\alpha_2 = n \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta'_1} \alpha_1 = n^2 \alpha_1 \quad (5)$$

因此, 理想情况下光线从棱镜平面入射到空气的传输矩阵表示为 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ n & n^2 \end{pmatrix}$ 。

考虑温度扰动下 TRP 及毛细管内空气折射率的变化, 设温度扰动下的 TRP 折射率变化量 Δn_Q 空气折射率变化量 Δn_A 。光线从棱镜进入空气时有

$$(n + \Delta n_Q) \sin\theta_2 = (1 + \Delta n_A) \sin\theta'_2 \quad (6)$$

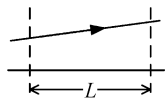
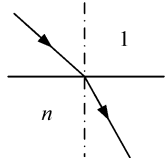
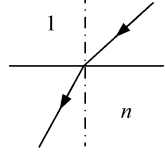
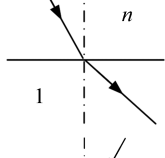
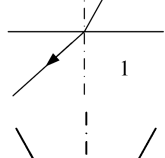
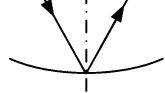
类似地可以得到

$$\alpha_2 = \Delta n_Q - n\Delta n_A + n^2\alpha_1 \quad (7)$$

可知温度扰动下的光路从棱镜进入空气传输矩阵为 $\begin{pmatrix} 1/n & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & \Delta n_Q - n\Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. 同样的方法可以得到其他情况的光路传输矩阵, 如表 1 所示.

表 1 温度扰动下的光线传输矩阵

Table 1 Transmission matrix under temperature disturbance

	Optical path diagram	Transmission matrix
Light traveling freely in uniform medium		$\begin{bmatrix} 1 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Light refracting from the air into TRP		$\begin{bmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n^2} & -\frac{\Delta n_Q}{n^2} + \frac{\Delta n_A}{n} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n^2} & \frac{\Delta n_Q}{n^2} - \frac{\Delta n_A}{n} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Light refracting from TRP into the air		$\begin{bmatrix} 1/n & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & \Delta n_Q - n\Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 1/n & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & -\Delta n_Q + n\Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Light total reflecting inner TRP		$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

3 温度扰动光路偏移特性研究

3.1 温度扰动光路偏移理论模型

激光谐振腔内光束形成稳定的激光光波振荡后, 光束在腔内各点的强度、偏振、相位, 路径具有自我复现性, 这就是激光器振荡的自洽条件. 设光在环形腔内的初始位置坐标为 (r_0, α_0) , 沿顺时针方向传播, 回到出发点时的坐标为 (r, α) . 温度扰动下的传输矩阵依次左乘, 得到光运转一周后的传输矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

根据自治理论, $(r, \alpha) = (r_0, \alpha_0)$ 可以得到

$$\begin{pmatrix} r \\ \alpha \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

即

$$r_0 = \frac{(1-a_{22})a_{13} + a_{12}a_{23}}{2-a_{11}-a_{22}} \quad (10)$$

$$\alpha_0 = \frac{(1-a_{11})a_{23} + a_{21}a_{13}}{2-a_{11}-a_{22}} \quad (11)$$

由式(10)、(11), 可以计算光束在谐振腔内任意位置的偏移距离和偏移角度.

3.2 温度光路偏移误差

应用 MATLAB 对波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 的光波在环境温度分别为 -20°C , 25°C , 45°C 时计算光路顺时针方向光波传输的偏移量, 见图 3.

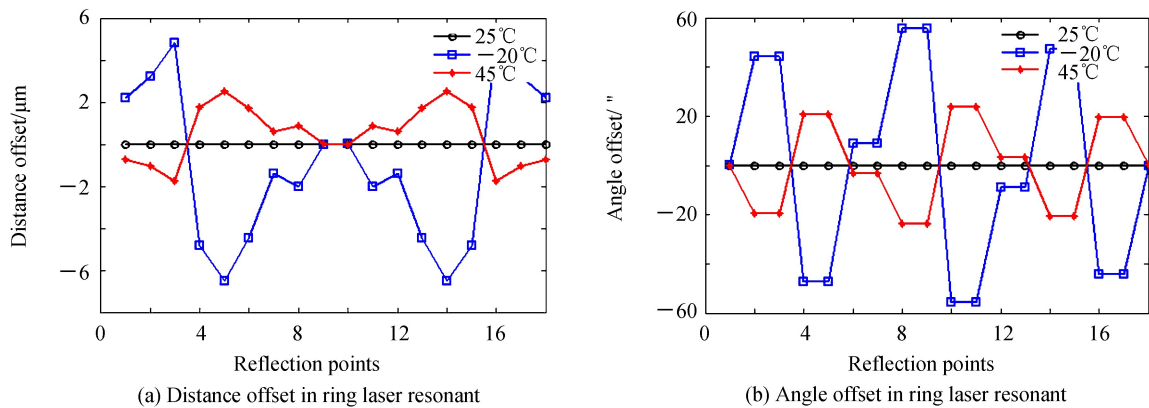


图 3 环形腔内光路偏移
Fig.3 The light path offset in ring laser resonant

环形谐振腔内光路偏移理想路径的距离如图 3(a) 所示, 图中横坐标表示图 1(b) 中环形腔内光路反、折射位置的编号. 可以看出环形腔内 III 号 TRP 内 9-10 位置光路偏移光轴距离为 0, 且其左右两边的光路偏移是完全对称的, 该结果符合环形光路的可逆性和对称性. I 号、II 号 TRP 光路在 5、14 位置处的偏移量较大, 该结果是 TRP 球面反射与温度扰动共同作用造成的, 这符合温度影响下光路传输的几何关系.

环形腔光路偏移理想路径的角度如图 3(b) 所示, 环形腔内, 在全反射位置, 光路偏移理想路径的角度取其相反数, 而在任意相邻反、折射点之间自由传输过程中, 光路偏移理想路径的角度是保持恒定的, 该结果与修正传输矩阵的模型的结论是一致的. 9-10 左右两侧的图形是中心对称的, 这是由环形光路结构的对称性以及光路的可逆性决定的, 在对称位置光路偏离理想路径的大小相等, 但方向相反.

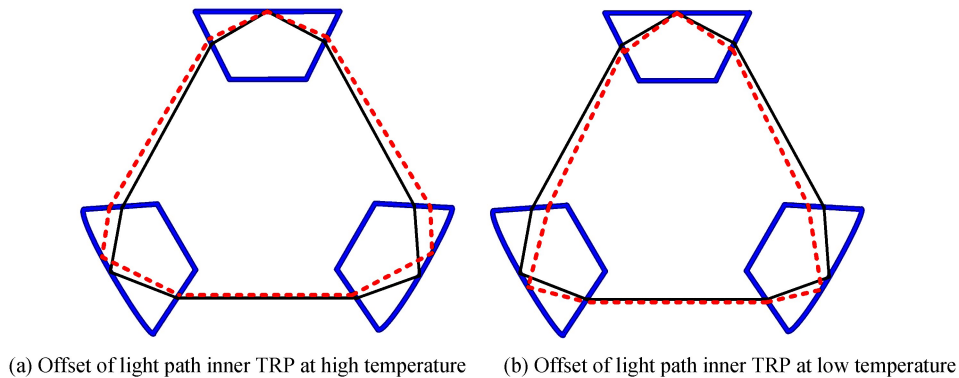


图 4 高、低温下光路偏移理想路径示意
Fig.4 Offset of light path inner TRP at high/low temperature

在图3的基础上,分别绘制 45℃、-20℃ 情况下光路偏离理想路径的示意图,如图4所示.图中,实线表示 25℃ 下光路的理想路径,虚线表示高、低温环境下的实际光路.可以看出,高温条件与低温条件下,光路在Ⅲ号 TRP 下底面全反射是光路没有偏移误差;在高温条件下,光路在Ⅲ号 TRP 内部的光路是外扩的,在Ⅰ号、Ⅱ号 TRP 之间是内收的,但内收的距离较小,整体环形光路呈现外扩的特点;然而,在低温条件下,光路在Ⅲ号 TRP 内部的光路是内收的,在Ⅰ号、Ⅱ号 TRP 之间是外扩的,但外扩的距离较小,整体环形光路呈现内收的特点.

类似的方法可以用于讨论色散效应对光路的影响.色散效应是指不同频率的光在同一介质中的折射率不同,根据上文方法将不同频率光在透镜内部的折射率变化量作为微扰项,添加到光路传输矩阵中,根据自治理论就可以得出色散效应对光路偏移的影响.这样的分析结果为选模光阑装配位置的设计提供了理论基础,其中限制横模的光阑可以放在光路偏移量较小的Ⅰ、Ⅱ棱镜之间,而限制纵模的光阑可以放在光路偏移位置较大的环形腔内 6、13 位置.

3.3 温度扰动对激光陀螺参数影响分析

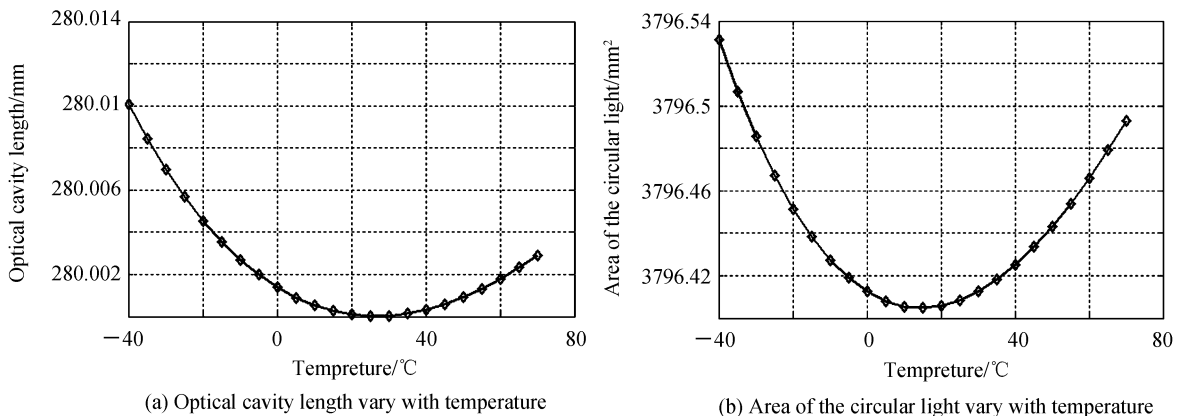
温度发生变化时,环形腔内 TRP 与空气的折射率均会发生变化,这导致光路发生偏移,从而使光在环形谐振腔内传输的路径、距离、角度发生改变.以逆时针光束为例,讨论温度变化时Ⅱ、Ⅲ号 TRP 内光路传输距离的变化量,结合光路传输的几何关系,Ⅱ号 TRP 内部光路传输的距离可以表示为

$$AB = \frac{l_1 \sin \alpha}{2 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{23})} \quad (12)$$

$$BC = \frac{\left[l_2 - \frac{l_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{22})}{2 \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{23})} \right] \sin \alpha}{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta_{24})} \quad (13)$$

式中: θ_{ij} 代表温度扰动下光路在 TRP 中传播的角度, i 代表 TRP 的代号, j 表示光线传输过程中的角度编号,与图1中相对应.类似地可以计算得到Ⅲ棱镜内光路传输距离,Ⅰ、Ⅲ或Ⅱ、Ⅲ棱镜之间传输距离.综合可以得到 TRPLG 谐振腔在 -40~70℃ 温度范围内,光线在环形腔内传输距离和温度的变化关系如图5(a)所示.光程的最大变化量达到 10.04 μm ,其中Ⅰ、Ⅱ棱镜内部光程变化量为 -5.4 μm ,Ⅲ棱镜内部光程变化量为 7.1 μm ,在Ⅰ、Ⅲ或Ⅱ、Ⅲ棱镜之间的变化量为 -3.2 μm .

相应地,环形光路所围面积发生改变,激光陀螺标度因数也将不再保持恒定,如图5(b)和图5(c)所示.在 -40~70℃ 温度范围内,标度因数随温度变化量为 1.96×10^{-10} .结合激光陀螺的工作原理,这些变化将导致输出频差发生改变,影响激光陀螺的测量精度,顺、逆时针行波频率差随温度变化的曲线如图5(d)所示.可以看出频差随温度升高过程中同步增大,在 -40~70℃ 温度范围内,频率差最大偏移量为 0.011 MHz,陀螺静态测试零位会向上发生漂移.



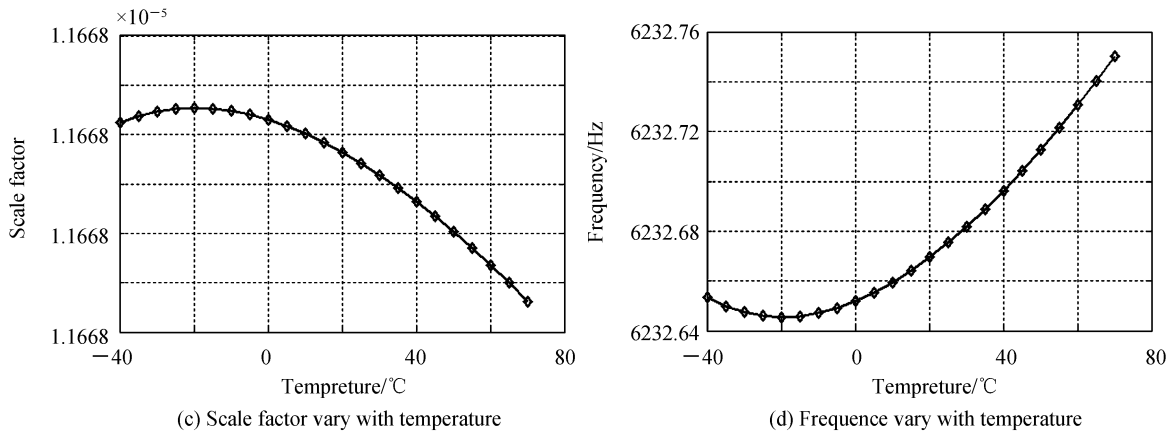


图5 TRPLG 谐振腔参数与温度的变化关系

Fig.5 The relationship between the parameters of TRPLG resonator and temperature

3.4 实验

为了验证上述结论, 分别在低温 -40°C , 高温 70°C , 以及 $25\sim 70^{\circ}\text{C}$ 匀速升温条件下激光陀螺静态测试是输出脉冲数的变化情况, 其中有三种数据: 横坐标为测试时间, 在相应的实验中对应于温度的变化; 第一行的纵坐标 N 是激光陀螺输出脉冲数, 表示激光陀螺静态测试时由于地球自转引入零位偏移, 其稳定性用来描述激光陀螺的测试精度; 第二行的纵坐标 U_{HIG} 是高频振荡器上的电压, 代表环形激光器的泵浦电压; 第三行的纵坐标 U_{war} 是加热器压电陶瓷上的直流电压, 其发生跳变的位置为其重新调整阶段。

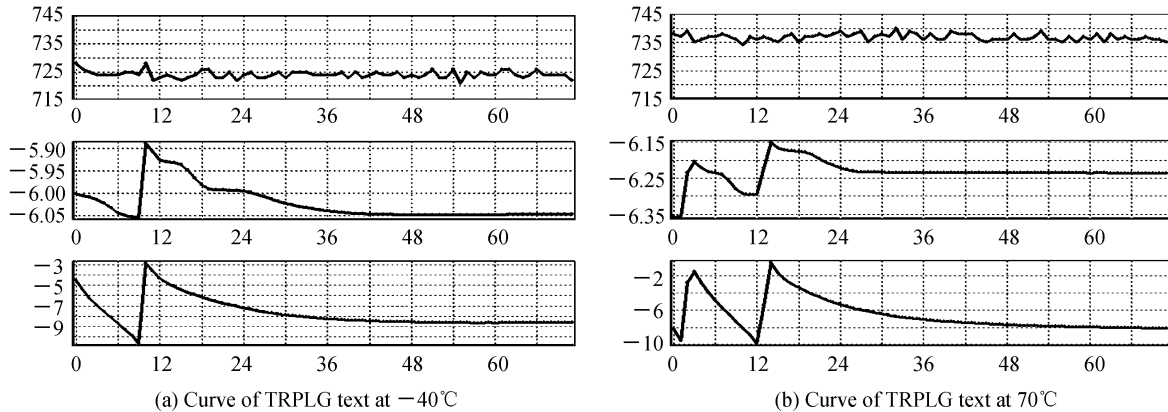


图6 -40°C , 70°C 条件下陀螺静态测试曲线

Fig.6 Curve of TRPLG text at -40°C and at 70°C

图6 (a)、(b) 分别是 -40°C 、 70°C 定温条件下陀螺静态测试图形。工作电压、加热器电压跳变次数较少, 表明恒温条件下激光陀螺环形谐振腔光路相对稳定, 激光器振荡频率保持恒定, 跳模较少, 激光陀螺工作状态相对稳定。从两幅图的脉冲数曲线可以看出, -40°C 时脉冲数是小于 70°C 时脉冲数的, 这与理论分析的结果是一致的。

$25\sim 70^{\circ}\text{C}$ 匀速升温条件下的陀螺静态测试图形如图7, 加热器电压、工作电压持续波动, 表明该过程中, 环形腔内光路受到光路扰动发生偏移, 导致环形腔光学腔长改变, 引起激光频率漂移, 多次发生跳模; 随环境温度升高时, 脉冲数偏离不在平行于时间轴线, 而随温度同步逐渐向上偏离, 呈现出陀螺输出顺、逆时针光波频率差随着温度升高, 偏离了中心零位, 呈现增大趋势, 这与理论分析的结果也是一致的。

该实验验证了环境温度变化引起光路偏移, 导致光学腔长变化和闭合光路所围面积变化引起标度因数变化和频率漂移, 引起静态陀螺测试零点偏移, 影响陀螺测试精度, 且变化方向与理论分析结果是吻合的。

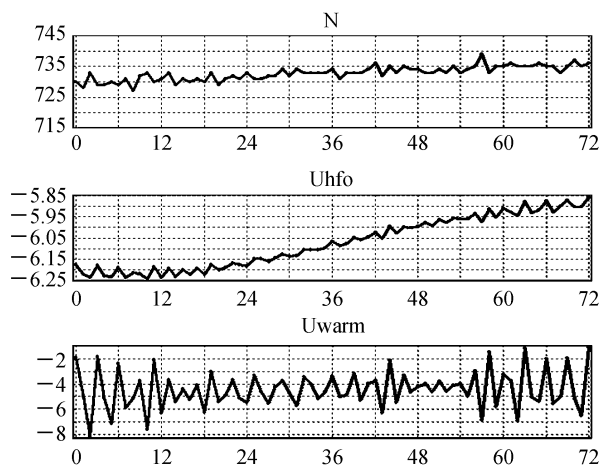


图7 25~70℃是陀螺静态测试曲线

Fig.7 Curve of TRPLG text when temperature vary from 25 to 70℃

4 结论

研究了温度对棱镜式激光陀螺性能的影响.对旧的 2×2 的光路传输进行修正,将环境温度变化量作为微扰项加入其中,得到新的 3×3 的传输矩阵;依据谐振腔自洽条件,在新的光路传输矩阵的基础上,建立激光陀螺光路偏移模型,并通过仿真获得高低温情况下光路偏移的情况;理论分析了光路偏移时光学腔长、标度因数随温度变化的趋势,以及频率漂移的方向;最后,搭建变温激光陀螺静态测试系统,分别研究低温、高温以及变温时激光陀螺的工作情况.实验结果表明,低温测试时激光陀螺的零偏是小于高温的,在温度线性升高的过程中,激光陀螺输出的脉冲数也是同步增长的.这些研究对于进一步棱镜式激光陀螺光阑装配位置设计、稳频系统设计提供了参考.

参考文献

- [1] BAKIN Y V, ZIOUZEV G N, LIUDOMIRSKI M B. Laser gyros with total reflection prisms[M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003.
- [2] HINUBER V E L, REIMER C, SCHNEIDER T, et al. INS/GNSS integration for aerobatic flight applications and aircraft motion surveying[J]. *Sensors*, 2017, **17**(5):941.
- [3] CHOW W W, GEA B J, PEDROTTI L M, et al. The ring laser gyro[J]. *Review of Modern Physics*, 1985, **57**(1):61-104.
- [4] IZMAILOV E A, KUKHTIEVITCH S E, TIKHOMIROV V V, et al. Analysis of laser gyro drift components[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, **7**(1):24-28.
- [5] MA Jia-jun, JIANG Jun-biao, LIU Jian-ning. Frequency stabilization technique of total reflection prism laser gyros with double longitudinal modes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(9):094216.
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术[J]. *中国激光*, 2014, **41**(9):094216.
- [6] LIU Jian-ning, JIANG Jun-biao, SHI Shun-xiang. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1):0102002.
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥. 全反射棱镜式环形激光器和光输出及陀螺精度特性分析[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1):0102002.
- [7] ZHAO Dong-yang. Capability study of laser gyro with total reflection prisms[D]. Xi'an: Xidian University, 2005:1-19.
赵东洋. 全反射棱镜式激光陀螺的性能研究[D]. 西安电子科技大学, 2005:1-19.
- [8] WANG Peng-guo, ZHAO Juan, HU Qiang, et al. Influence of low air pressure on the light path variations and loss of ring laser gyro[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4):0414004.
王朋国, 赵娟, 胡强, 等. 腔内低气压对激光陀螺光路变动及其损耗的影响[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4):0414004.
- [9] JIN Long, ZHANG Xing-qiang. Influence of cavity components on optical transmission characteristics of laser gyro[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, **36**(3):372-378.
靳龙, 张兴强. 腔内元件对激光陀螺光波传输特性的影响[J]. *半导体光电*, 2015, **36**(3):372-378.
- [10] YU Xu-dong, LEI Wen, LIU Chang. Deformation law of optical resonant cavity under random vibration environment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(2):281-288.
于旭东, 雷雯, 刘畅. 随机振动下光学谐振腔腔体形变及变动规律[J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(2):281-288.
- [11] LI Dong. Investigation on the eigenmodes and output properties in nonplanar ring resonators[D]. Xi'an: Northwestern

Polytechnical University, 2014.

李东. 异面环形谐振腔的激光振荡模式及输出特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

- [12] XING Jin-hua. The nonlinear effect of temperature on the refractive index of gas[J]. *Physical Experiment*, 2005, 25(4): 35-39.
邢进华. 温度对气体折射率的非线性影响[J]. *物理实验*, 2005, 25(4): 35-39.
- [13] ZHAO Xiao-ning, HAN Zong-hu, LI Xian-luo, *et al.* Improving mechanically dithered RLG vibration performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0731003.
赵小宁, 韩宗虎, 李县洛, 等. 提高机械抖动激光陀螺抗振性能[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0731003.
- [14] LU Zhi-dong. Non-planar cavity ring laser gyroscope[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 3-50.
陆志东. 非共面激光陀螺[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 3-50.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61605156), the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province(No.2016JQ6073), Education Department of Shaanxi Province (No.16JK1560)

引用格式: REN Li-na, LIU Jian-ning, JIAO Ming-xing. Analysis of the Influence on the Characteristics of the Prism Laser Gyroscope by Temperature Disturbance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0614002

任莉娜, 刘健宁, 焦明星. 温度扰动对棱镜式激光陀螺特性的影响[J]. *光子学报*, 2018, 47(6): 0614002