

文章编号:1002-2082(2009)03-0514-05

石英晶体温度效应对四频差动激光陀螺 中光场偏振特性的影响

杨建强, 廖丹

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为研究石英晶体温度效应对四频差动激光陀螺的影响,从陀螺的自再现传播矩阵出发,结合石英晶体旋光率随温度变化的经验公式,利用琼斯矩阵求本征模的方法,得出了四频差动激光陀螺腔内光场本征偏振态与温度的关系并进行了数值分析,得到椭圆度和左右旋差损随温度变化的曲线。结果表明,石英晶体温度效应对偏振特性的影响与反射镜片的振幅反射率和反射相移有密切关系,对于典型陀螺参量,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内石英晶体温度效应导致左右旋差损从0增加至 10^{-6} 量级,椭圆度从0.122增至0.138。

关键词:激光光学; 四频差动激光陀螺; 石英晶体; 温度效应

中图分类号: TN241.5

文献标志码: A

Influence of quartz crystal temperature effect on optical polarization characteristics of four-frequency differential laser gyro

YANG Jian-qiang, LIAO Dan

(College of Opto-electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Proceeding from the propagating Jones matrix of laser, the relation between the eigenpolarization and the temperature in the four-frequency differential laser gyro was obtained in combination with the empirical formula of quartz crystal rotatory power versus temperature and the method of calculating eigenvectors, for the research on the influence of the quartz crystal temperature effect on the four-frequency differential laser gyro. The variation curves of the light ellipticity and the differential loss with the temperature were acquired by the numerical analysis. The result shows that the influence of quartz crystal temperature effect on the optical polarization characteristics is closely related to the amplitude reflectivity and the phase shift of the mirror. For typical gyro parameters, the differential loss and the ellipticity increase respectively from 0 to 10^{-6} and from 0.122 to 0.138 when the quartz crystal temperature is in the range of $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: laser optics; four-frequency differential laser gyro; quartz crystal; temperature effect

引言

激光陀螺是利用 Sagnac 效应工作的环形激光器,由于其全固态、体积小、寿命长等特性,在惯性

导航领域得到广泛应用^[1-2]。四频差动激光陀螺是腔内同时工作两对模的高偏频量的激光陀螺,石英晶体的旋光效应产生左、右旋圆偏振模对,法拉第

收稿日期:2008-08-06; 修回日期:2008-10-20

作者简介:杨建强(1982-),男,河南新蔡人,在读博士生,主要从事环形激光器的理论研究工作。

E-mail:yjqyjq_yjq@163.com

室的磁光效应使每一对模间产生频率分裂, 最后利用差动思想得到双倍敏感度的输出拍频信号。理论上四频差动陀螺性能远优于二频陀螺, 但实际应用时由于存在石英晶体的安装误差、反射镜片的 s-p 各向异性效应等因素, 使得腔内光场本征偏振态实际上是椭圆偏振态, 而椭圆效应是制约四频陀螺性能的重要因素^[3-4], 故陀螺腔内光场偏振态特性分析很有必要。

不同于文献[5-6], 本文分析了石英晶体的温度效应对四频差动陀螺光场偏振态特性的影响。从四频差动激光陀螺的自再现传播矩阵出发, 结合石英晶体旋光率随温度变化的经验公式, 利用琼斯矩阵求本征模的方法, 得出了四频差动激光陀螺腔内光场本征偏振态与温度的关系并进行了数值分析, 得到了椭圆度和左右旋差损随温度变化的曲线。

1 四频差动陀螺中光束传输的琼斯矩阵表示

图 1 为八字形平面环路四频差动陀螺的示意图, 1, 2, 3, 4 为 4 个反射镜片, A, B, C 分别为石英晶体、法拉第室和增益区, 以大三角逆时针方向为 z 正方向, 以反射镜片的 sp 方向为 xy 正方向, 记反射镜片琼斯矩阵分别为 M_1, M_2, M_3, M_4 。

对于第 j 个镜片, 有关系式:

$$M_j = \begin{bmatrix} r_{xj} \exp(i\varphi_{xj}) & 0 \\ 0 & r_{yj} \exp(i\varphi_{yj}) \end{bmatrix}$$

式中: r_{xj} 和 r_{yj} 分别为第 j 个镜片在 xy 方向的振幅反射率; φ_{xj} 和 φ_{yj} 为相应的反射相移。石英晶体对其光轴方向通过的光

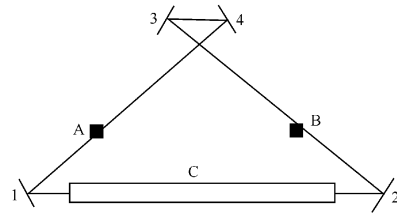


图 1 四频差动激光陀螺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-frequency differential laser gyro

线具有旋转光线偏振方向的作用, 设旋转角度为 θ ,

则旋光琼斯矩阵为 $M_s(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 。

法拉第室为磁旋光玻璃, 磁旋光量很小, 设为

δ , 其琼斯矩阵为 $M_f(\delta) = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$ 。

不考虑光束传播时的相位渡越, 对于顺时针光束, 从增益管 C 出发环绕一周回到 C 的传输矩阵为

$$M_{ccw} = M_2 M_f(\delta) M_3 M_4 M_s(\theta) M_1 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

则逆时针光束的传输矩阵为

$$M_{ccw} = M_1 M_s(-\theta) M_4 M_3 M_f(\delta) M_2 = \begin{bmatrix} M'_{11} & M'_{12} \\ M'_{21} & M'_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

建立了四频陀螺腔内光束的传输矩阵, 则可通过计算矩阵本征值来求自再现本征偏振态。

2 四频差动陀螺中的光场本征偏振态

将反射镜片、石英晶体、法拉第室的琼斯矩阵代入 M_{ccw} , 计算可得:

$$M_{11} = r_{x1} r_{x2} r_{x3} r_{x4} \exp[i(\varphi_{x1} + \varphi_{x2} + \varphi_{x3} + \varphi_{x4})] \cos \theta \cos \delta + r_{x1} r_{x2} r_{y3} r_{y4} \exp[i(\varphi_{x1} + \varphi_{x2} + \varphi_{y3} + \varphi_{y4})] \sin \theta \sin \delta \quad (3)$$

$$M_{12} = r_{y1} r_{x2} r_{x3} r_{x4} \exp[i(\varphi_{y1} + \varphi_{x2} + \varphi_{x3} + \varphi_{x4})] \cos \delta \sin \theta - r_{y1} r_{x2} r_{y3} r_{y4} \exp[i(\varphi_{y1} + \varphi_{x2} + \varphi_{y3} + \varphi_{y4})] \cos \theta \sin \delta \quad (4)$$

$$M_{21} = r_{x1} r_{y2} r_{x3} r_{x4} \exp[i(\varphi_{x1} + \varphi_{y2} + \varphi_{x3} + \varphi_{x4})] \cos \theta \cos \delta - r_{x1} r_{y2} r_{y3} r_{y4} \exp[i(\varphi_{y1} + \varphi_{y2} + \varphi_{x3} + \varphi_{x4})] \sin \delta \cos \delta \quad (5)$$

$$M_{22} = r_{y1} r_{y2} r_{x3} r_{x4} \exp[i(\varphi_{y1} + \varphi_{y2} + \varphi_{x3} + \varphi_{x4})] \sin \delta \sin \theta + r_{y1} r_{y2} r_{y3} r_{y4} \exp[i(\varphi_{y1} + \varphi_{y2} + \varphi_{y3} + \varphi_{y4})] \cos \theta \cos \delta \quad (6)$$

同理使可求出 M_{ccw} 各矩阵元的表达式, 在此不赘述。

对于顺、逆时针方向本征模 X_{cw} 、 X_{ccw} , 满足:

$$\begin{cases} M_{cw} X_{cw} = \lambda_{cw} X_{cw} \\ M_{ccw} X_{ccw} = \lambda_{ccw} X_{ccw} \end{cases}$$

解得本征值:

$$\begin{cases} \lambda_{cw\pm} = [(M_{11} + M_{22}) \pm \\ \sqrt{(M_{11} - M_{22})^2 + 4M_{12}M_{21}}] / 2 \\ \lambda_{ccw\pm} = [(M'_{11} + M'_{22}) \pm \\ \sqrt{(M'_{11} - M'_{22})^2 + 4M'_{12}M'_{21}}] / 2 \end{cases} \quad (7)$$

±号分别对应左、右旋模。

对应的本征模:

$$\begin{cases} X_{cw\pm} = \begin{bmatrix} M_{12} \\ \lambda_{cw\pm} - M_{11} \end{bmatrix} \\ X_{ccw\pm} = \begin{bmatrix} M'_{12} \\ \lambda_{ccw\pm} - M'_{11} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

实际情况中 $X_{cw\pm}$ 和 $X_{ccw\pm}$ 的 xy 分量均为复数, 本征模为椭圆偏振模。对于任何椭圆模, 将原坐标系 $x-y$ 旋转 Ψ 角得到新坐标系 $x'-y'$, 都可化为 $\begin{bmatrix} \cos \epsilon \\ i \sin \epsilon \end{bmatrix}$ 形式, 规定短轴为 y' 轴, 长轴为 x' 轴, 其中

$\Psi \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}]$, $\epsilon \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}]$, 这里椭圆率角 ϵ 和方位角 Ψ ^[7] 为

$$\begin{cases} \epsilon_{cw\pm} = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2\text{Im} \left(\frac{\lambda_{cw\pm} - M_{11}}{M_{12}} \right)}{1 + \left| \frac{\lambda_{cw\pm} - M_{11}}{M_{12}} \right|^2} \right], & \Psi_{cw\pm} = \arctan \left[\frac{\frac{\lambda_{cw\pm} - M_{11}}{M_{12}} - i \tan \epsilon_{cw\pm}}{i \frac{\lambda_{cw\pm} - M_{11}}{M_{12}} \tan \epsilon_{cw\pm} + 1} \right] \\ \epsilon_{ccw\pm} = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2\text{Im} \left(\frac{\lambda_{ccw\pm} - M'_{11}}{M'_{12}} \right)}{1 + \left| \frac{\lambda_{ccw\pm} - M'_{11}}{M'_{12}} \right|^2} \right], & \Psi_{ccw\pm} = \arctan \left[\frac{\frac{\lambda_{ccw\pm} - M'_{11}}{M'_{12}} - i \tan \epsilon_{ccw\pm}}{i \frac{\lambda_{ccw\pm} - M'_{11}}{M'_{12}} \tan \epsilon_{ccw\pm} + 1} \right] \end{cases} \quad (9)$$

则左右旋模差损 r 和椭圆度 η 为

$$\begin{cases} r_{cw} = |\lambda_{cw+} - \lambda_{cw-}| = \left| \sqrt{(M_{11} - M_{22})^2 + 4M_{12}M_{21}} \right|, & \eta_{cw\pm} = 1 - |\tan \epsilon_{cw\pm}| \\ r_{ccw} = |\lambda_{ccw+} - \lambda_{ccw-}| = \left| \sqrt{(M'_{11} - M'_{22})^2 + 4M'_{12}M'_{21}} \right|, & \eta_{ccw\pm} = 1 - |\tan \epsilon_{ccw\pm}| \end{cases} \quad (10)$$

3 石英晶体的温度效应对光场偏振态的影响

四频差动陀螺所用石英晶体是一种旋光晶体, 其旋光性实质上是左旋和右旋圆偏振光在晶体中的折射率不同引起的。而左右旋圆偏振光的折射率差异大小随温度变化而变化, 石英晶体的旋光性也受温度影响^[8-9]。

设石英旋光率为 α , d 为光轴方向上的厚度, 则石英旋光角 $\theta = \alpha \times d$ 。

借鉴晶体折射率修正公式塞耳迈耶尔方程 $\alpha = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2$, 式中 A, B, C, D 是温度系数, 光波长以 nm 为单位。由文献^[9]中的实验知, 在 $-60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 每隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 对旋光率进行测定, 通过对各温度系数进行 4 次数据拟和, 得到:

$$A = A(T) = -311.87457 - 2.75492T - 0.35441T^2 + 0.01061T^3 - 7.99432 \times 10^{-5}T^4;$$

$$B = B(T) = 1.76092 \times 10^8 + 5.31675 \times 10^5T + 7.1668 \times 10^4 - 2.090 \times 10^3T^3 +$$

$$15.35985T^4;$$

$$C = C(T) = 1.04049 \times 10^5 - 130.6369T - 22.26345T^2 + 0.62473T^3 - 0.00442T^4;$$

$$D = D(T) = -1.57039 \times 10^{-4} - 3.42124 \times 10^{-6}T - 4.1859 \times 10^{-7}T^2 + 1.2732 \times 10^{-8}T^3 - 9.75758 \times 10^{-11}T^4。$$

由此可得到旋光率随温度 T 变化的经验公式:

$$\alpha(T) = A(T) + \frac{B(T)}{\lambda^2 - C(T)} - D(T)\lambda^2。$$

石英晶体沿光轴方向的线膨胀系数 $\gamma = 7.97 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 则 $d(T) = [1 + \gamma(T - T_0)]d_0$, 其中 d_0 为初始温度 T_0 时石英光轴方向的厚度。

于是可得则旋光角:

$$\theta(T) = \alpha(T)d(T) = [A(T) + \frac{B(T)}{\lambda^2 - C(T)} - D(T)\lambda^2][1 + \gamma(T - T_0)]d_0 \quad (11)$$

结合(3)~(9)式, 将(11)式代入(10)式中, 可得到 $\eta = \eta(T)$, $r = r(T)$ 。描述光场偏振特性的椭圆度 η 和左右旋差损 r 都是温度 T 的复杂函数。

设室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 石英晶体的初始旋光角 θ_0 (其

表征了石英晶体的初始旋光率和沿光轴方向的初始厚度)存在下列几种情况:

1) $\delta = 0.05^\circ$, $r_{xj} = r_{yj} = 0.9998$, $\varphi_{xj} = \varphi_{yj} = -0.2^\circ$, $j = 1, 2, 3, 4$, 此时4个反射镜片xy方向的振幅反射率和反射相移相同,最后计算得到 $\eta_{cw\pm} = \eta_{ccw\pm} = 0$, $r_{cw} = r_{ccw} = 0$ 不随温度变化,且对于任意初始 θ_0 均有此结论,此种情况是理想情况,即石英晶体的温度效应对偏振态特性无影响。

2) $\delta = 0.05^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$, $r_{xj} = r_{yj} = 0.9998$, $\varphi_{xj} = -0.2^\circ$, $\varphi_{yj} = -0.7^\circ$, $j = 1, 2, 3, 4$, 此时4个反射镜片xy方向振幅反射率相同,但反射相移不同,仍然有 $r_{cw} = r_{ccw} = 0$ 不随温度变化, η 随温度变化曲线如图2(其中 $\eta_{cw\pm} \approx \eta_{ccw\pm}$, 以 η 统一表述)所示。

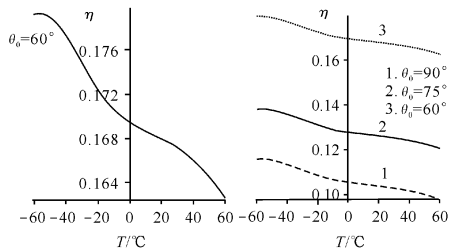


图2 情况2)下 η 随温度的变化曲线

Fig. 2 Variation of η with T when $\delta = 0.05^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$, $r_{xj} = r_{yj} = 0.9998$, $\varphi_{xj} = -0.2^\circ$, $\varphi_{yj} = -0.7^\circ$, $j = 1, 2, 3, 4$

可以看出,不同 θ_0 值 $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$, θ_0 越大,初始温度 20°C 下 η 越小,但 η 变化趋势均和温度变化趋势相反,在温度 -60°C 时 η 达到最大值,对于 $\theta_0 = 60^\circ$, $\eta_{\max} = 0.18$ 。但在温度变化过程中,左右旋差损始终为0。这说明石英晶体温度效应对椭圆度有影响,对左右旋差损无影响。

3) $r_{x1} = r_{x2} = 0.9998$, $r_{y1} = r_{y2} = 0.99975$, $r_{x3} = r_{x4} = 0.9999$, $r_{y3} = r_{y4} = 0.99993$, $\varphi_{x1} = \varphi_{x2} = -0.2^\circ$, $\varphi_{y1} = \varphi_{y2} = -0.7^\circ$, $\varphi_{x3} = \varphi_{x4} = -0.2^\circ$, $\varphi_{y3} = \varphi_{y4} = -0.5^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$, 此时每个反射镜片xy方向振幅反射率和反射相移均不同,且输出镜片1和2的振幅反射率小于高反镜片3和4,初始旋光角为 90° 。这种情况符合大多数四频差动陀螺的实际参量值,如图3所示。

在这种情况下,椭圆度和左右旋差损均受石英晶体温度效应影响。腔内四模椭圆度基本相等,仍有 $\eta_{cw\pm} \approx \eta_{ccw\pm}$, 在温度 $-60^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 之间, η 从0.122增至0.138;左右旋差损无顺逆方向的差别,

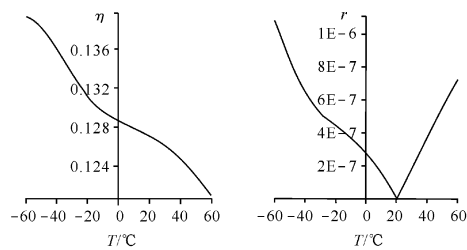


图3 情况3)下 η 和 r 随温度变化曲线

Fig. 3 Variation of η and r with T when $r_{x1} = r_{x2} = 0.9998$, $r_{y1} = r_{y2} = 0.99975$, $r_{x3} = r_{x4} = 0.9999$, $r_{y3} = r_{y4} = 0.99993$, $\varphi_{x1} = \varphi_{x2} = -0.2^\circ$, $\varphi_{y1} = \varphi_{y2} = -0.7^\circ$, $\varphi_{x3} = \varphi_{x4} = -0.2^\circ$, $\varphi_{y3} = \varphi_{y4} = -0.5^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$

即 $r_{cw} = r_{ccw}$, 在初始 20°C 时为最小值0,在 -60°C 时达到最大值 1×10^{-6} , 60°C 时为次最大值 7×10^{-7} 。由此可知,对于实际应用的四频差动陀螺,在高低温环境下石英晶体温度效应会导致左右旋差损变化,从室温下差损为0增至 10^{-6} 量级。在陀螺应用中,差损的变化将会引起工作点位置的不稳定,从而带来较大的陀螺零漂误差^[10],故石英晶体的温度效应不可忽视。而通常的零漂误差源中未将石英晶体的温度效应单独列出,只是笼统地用不太准确的温度模型去近似陀螺的热分布^[11-12],或者只是从数学上对零漂进行补偿^[13-14]。

4 结论

四频差动激光陀螺高低温环境下零漂误差源的寻找和改进是提高陀螺性能的关键,文中计算了石英晶体温度效应的的影响。经数值计算发现石英晶体温度效应对偏振特性的影响与反射镜片的振幅反射率和反射相移有密切关系。对于典型陀螺参量,在高低温环境下,由于石英晶体的温度效应导致左右旋差损和椭圆度变化,从初始的差损为0增加至 10^{-6} 量级,椭圆度从0.122增至0.138。

参考文献:

[1] 高伯龙,李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1984.
GAO Bo-long, LI Shu-tang. Laser gyro [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,1984. (in Chinese)
[2] 杨培根. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
YANG Pei-gen. Optoelectronic inertial technology [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999. (in

- Chinese)
- [3] 高伯龙. 水晶片的几个光学性能[J]. 国防科技大学学报, 1982, 4(1): 59-72.
GAO Bo-long. Some optical properties of quartz crystal[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1982, 4(1): 58-71. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
JIANG Ya-nan. Ring laser gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. (in Chinese)
- [5] 杨在富, 袁晓东, 张斌, 等. 四频差动激光陀螺中差分损耗的探讨[J]. 中国激光, 1999, 26(1): 39-42.
YANG Zai-fu, YUAN Xiao-dong, ZHANG Bin, et al. The loss difference in differential laser gyros[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(1): 40-42. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 杨在富, 袁晓东, 张斌, 等. 四频差动激光陀螺中的S-P各项异性效应[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1255-1260.
YANG Zai-fu, YUAN Xiao-dong, ZHANG Bin, et al. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1255-1260. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 孙刚, 金世龙. 双折射晶体琼斯矩阵分析[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 17-21.
SUN Gang, JIN Shi-long. Analysis of Jones matrix of birefringent crystal [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4): 17-21. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 苏富芳, 吴福全. 石英晶体左旋光和右旋光折射率差的温度特性[J]. 光学技术, 2005, 31(4): 540-542.
SU Fu-fang, WU Fu-quan. Temperature property on the refractive index difference of left rotation and right rotation light of quartz crystal [J]. Optical Technique, 2005, 31(4): 540-542. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 苏富芳, 吴福全. 石英晶体旋光性的温度效应测试研究[J]. 光学学报, 2005, 25(5): 671-673.
SU Fu-fang, WU Fu-quan. The research of thermal effect on the rotatory power of quartz [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5): 671-673. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 高伯龙. 四频差动陀螺中的第二类闭锁效应[J]. 国防科技大学学报, 1982, 4(1): 37-57.
GAO Bo-long. The locking phenomenon of the second kind in differential laser gyro [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1982, 4(1): 37-57. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 吴国勇, 顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. 光学技术, 2002, 28(3): 198-200.
WU Guo-yong, GU Qi-tai. Temperature's effect on four frequency RLG bias [J]. Optical Technique, 2002, 28(3): 198-200. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 袁杰, 黄云, 蒋安国. 四频差动激光陀螺热效应浅述与其温度分布的测试[J]. 激光杂志, 2000, 21(4): 46-47.
YANG Jie, HUANG Yun, JIANG An-guo. The thermal effect of the laser gyro and the measuring of it's temperature [J]. Laser Journal, 2000, 21(4): 46-47. (in Chinese with an English abstract)
- [13] 赵小宁, 李县洛, 雷宝权. 激光陀螺零偏温度补偿研究[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(3): 55-57.
ZHAO Xiao-ning, LI Xian-luo, LEI Bao-quan. Temperature compensation for ring laser gyro [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(3): 55-57. (in Chinese with an English abstract)
- [14] 罗传伟, 焦明印. 光学系统折射率温度效应的模拟计算[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 234-239.
LUO Chuan-wei, JIAO Ming-yin. Simulated calculation for effect of temperature on refractive index in optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 234-239. (in Chinese with an English abstract)