

文章编号 1004-924X(2018)03-0523-08

程长控制镜温度效应及耦合场分析

于旭东*, 黄一桂

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:程长控制镜是保持环形谐振腔腔长稳定的重要器件之一,温度变化引起的热形变直接影响环形谐振腔的光路形状和光束质量。首先利用 ANSYS 软件建立了程长控制镜的有限元仿真模型,分析了不同温度条件下程长控制镜的温度场及耦合场,得到了程长控制镜反射镜面中心形变量云图,对变温条件下程长控制镜反射镜面中心形变规律进行了研究,得到了反射镜面中心形变量与温度的关系函数。然后,通过扫模实验和温度实验验证了有限元模型的正确性,计算相对误差为 2.5%。最后,仿真分析了程长控制镜各个部件导热系数、杨氏模量、线膨胀系数的影响规律。不同材料参数下,导热系数以及密度对形变量影响较小,杨氏模量和线膨胀系数对形变量影响较大,形变量与杨氏模量成反比,与线膨胀系数成正比。本文首次研究了常温、高低温及变温条件下程长控制镜的温度场和耦合场,并对材料参数的影响规律进行了定量分析,研究结果对程长控制镜的材料选择与优化设计有一定指导意义。

关键词:激光陀螺;程长控制镜;有限元分析;温度场;耦合场

中图分类号:V241.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182603.0523

Temperature and coupling field analysis of path length control mirrors

YU Xu-dong*, HUANG Yi-gui

(College of Advanced Interdisciplinary Studies,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: wind0909@163.com

Abstract: Path length control mirrors (PLCM) are important devices used to keep the cavity length of ring resonators stable. The deformation caused by the temperature variation directly affects the optical path shape and beam quality of ring resonators. In this paper, a finite element simulation model of PLCMs was established using ANSYS. Subsequently, the model was used to analyze the temperature and coupled fields of a PLCM under different temperature conditions. The deformation distribution in the middle of the mirror was obtained. Next, the accuracy of the finite element model was verified by sweep and temperature experiments, with an error of less than 2.5%. Finally, the deformation in the middle of the mirror under the variable temperature conditions was studied, obtaining the relationship between the deformation and the temperature. The influence of the thermal conductivity, Young's modulus, and linear expansion coefficient of each component of the PLCM were simulated and

收稿日期:2017-09-29;修订日期:2017-11-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61503399);海军预研项目(No. 3020107010204)

analyzed. For different material parameters, the thermal conductivity and density have little effect on the deformation, while the Young's modulus and linear expansion coefficient greatly influence the deformation. The deformation was found to be inversely proportional to the Young's modulus and proportional to the linear expansion coefficient. In this paper, the temperature and the coupled fields of the PLCM under normal, high-low, and variable temperature were studied for the first time. In addition, the influence of the material parameters was quantitatively analyzed. The results of this paper have a guiding significance for material selection and optimization of PLCMs.

Key words: laser gyroscope; path length control mirror; finite element analysis; temperature field; coupled field

1 引言

激光陀螺是利用光学 Sagnac 效应来敏感角度与角速度的光学传感器。与传统的机电陀螺相比,它具有启动时间短、精度高、动态范围大、比例因子精确、对加速度不敏感等突出优点,已成功运用于航空、航天、航海以及地面定位定向等领域^[1-2]。

环境是影响激光陀螺稳定性和性能的重要因素^[3]。为了消除或降低环境因素带来的不利影响,一方面,激光陀螺各个元器件均采用低膨胀系数材料;另一方面,利用程长控制镜进行主动控制。程长控制镜包括抓卡、压电陶瓷膜片、螺钉和反射镜片 4 个元器件。它的基本工作原理是通过在压电陶瓷上施加电压,使螺钉发生微位移,位移传导至反射镜面中心,主动调节光程的长度,以保证激光陀螺工作过程中光程恒定^[4]。由于机抖激光陀螺各个部件材料不一致,高低温的剧烈变化会引起光学谐振腔材料的热胀冷缩,引起腔体变形,各个腔镜在温度变化时产生横向角度变形,使反射方向发生变化造成闭环光路失调,损耗变大,导致激光陀螺高低温工作时出现光强减弱甚至无光现象^[5-7]。

近年来,国内外科研工作者对程长控制镜结构和材料的改进进行了大量的研究。D. Tazarte 等介绍了高过载时如何控制激光陀螺环形谐振腔腔长的方法,提出利用反射镜位置调整来抵消加速度带来的影响^[8]。汪之国等提出了四频差动激光陀螺自适应程长控制技术^[9]。金世龙提出了一种激光陀螺光路及程长控制镜控制方法,设计了一种新颖的具有角度控制功能的光路程长控制

镜^[10-11]。C. M. Schobe 提出一种优化结构以减少程长控制镜的应力,提高了程长控制镜的稳定性^[12]。N. R. Zapotyl'ko 研究了温度变化对光学谐振腔玻璃和程长控制镜的影响规律^[13-14]。刘元正等提出了新型双筋腔长控制镜结构设计方案,有效提高了反射镜面的抗扭偏能力^[15]。

理想状态下,程长控制镜中压电元件产生的微量形变只会驱动镜片使其在镜面垂直方向上运动。但是,程长控制镜不可能一直处于理想状态,一方面,在复杂的环境因素中,程长控制镜反射面会发生扭偏,光路稳定性受到极大影响;另一方面,程长控制镜存在材料非一致性、粘接误差以及其他材料或结构方面的系统原因。这些不利因素降低了激光陀螺的稳定性和工作精度。

本文系统分析不同温度下程长控制镜的形变规律,研究温度场及耦合场对程长控制镜的影响规律,以消除或降低环境因素带来的不利影响,不仅为程长控制镜的结构优化设计和材料选择提供了参考,在激光陀螺的稳定性和精度的提升问题研究方面也有一定的借鉴价值^[16]。

2 程长控制镜温度效应

2.1 常温下程长控制镜形变分析

对于激光陀螺内部而言,主要传热途径有三种:环形谐振腔内部阴极阳极之间由于电压差引起的强制对流以及非增益区的有限空间自然对流,安装盒体内表面与陀螺腔体的有限空间自然对流,其余部件之间的热传导。在稳态情况下,整个激光陀螺的温度上升不大,忽略热辐射带来的影响^[17]。因此,将陀螺结构简化,以陀螺内侧圆弧中心为原点建立的坐标系及简化模型如图 1 所

示, xy 平面与陀螺侧面平行, 且 x 轴、 y 轴分别平行于腔体棱线。

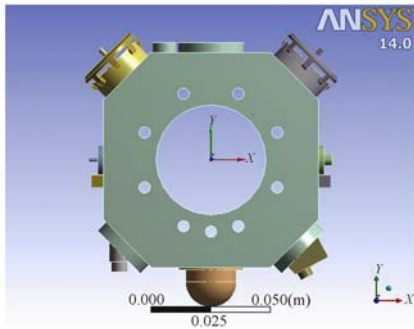


图 1 激光陀螺简化模型

Fig. 1 Simplified model of ring laser gyroscope

陀螺热物性参数及换热系数计算方法见参考文献[17]。将整个陀螺进行网格划分, 共划分节点 514 120 个、单元 299 210 个, 当激光陀螺达到稳态时, 激光陀螺腔体及程长控制镜的温度场分布如图 2、图 3 所示, 由于两控制镜具有对称性, 后文提及的程长控制镜均指图 1 中左侧的程长控制镜。

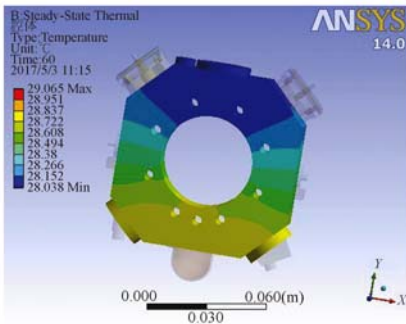


图 2 25 °C 时激光陀螺腔体的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of laser gyro cavity at 25 °C

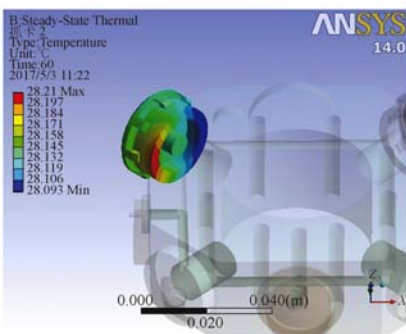


图 3 25 °C 时程长控制镜的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of PLCM at 25 °C

从图 2 和图 3 可知, 程长控制镜的温度最高点出现在左侧红色区域, 温度为 28. 209 °C, 最低温度点出现在右侧, 温度为 28. 093 °C, 腔体靠近阴极部分温度明显高于远离阴极侧, 且温度存在明显的梯度分布。分析其原因, 陀螺腔体内部的增益区强迫热对流动能转化为热能, 导致局部温度明显升高。

将温度场导入并添加约束, 求解得到激光陀螺腔体及程长控制镜的形变量, 在已知温度场、线膨胀系数和子单元大小的情况下, 形变量的求解公式为:

$$l_t = (t_x - t_0) \times \alpha_l \times l, \quad (1)$$

其中: l_t 为 t_x 温度下的形变量, t_x 为 x 节点的温度, α_l 为线膨胀系数, l 为微元大小特征量, t_0 为基准温度, $t_0 = 25$ °C (后文中均以 25 °C 为基准温度进行分析, 定义 25 °C 无温度场时的形变量为零)。

程长控制镜的耦合场分析主要指仿真分析中热效应引起的结构形变, 主要为热结构耦合分析。图 3 中左侧程长控制镜的形变分析结果如图 4 所示, 最大形变量为 1.669×10^{-7} m, 位置在抓卡和反射镜片接合处, 而最小形变在图中深蓝色区域。激光陀螺中, 镜片中心位置的形变量对于研究激光陀螺稳定性有至关重要的作用, 镜片中心位置的形变量直接决定光程的变化量。将镜面情况以形变云图显示, 得到常温条件下镜片中心的形变量, 如图 5 所示。常温条件下, 镜面中心的形变量为 $D_x \sin \theta + D_y \cos \theta$, 求解得到形变量为 5.73×10^{-8} m, 方向垂直镜面向外(后文均以垂直镜面指向激光陀螺腔体内侧为负, 反之为正)。

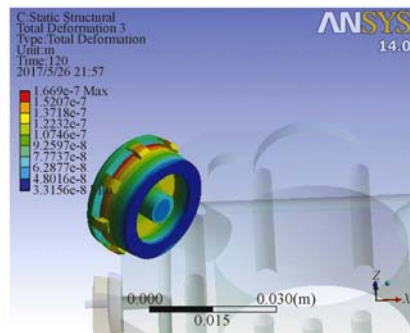
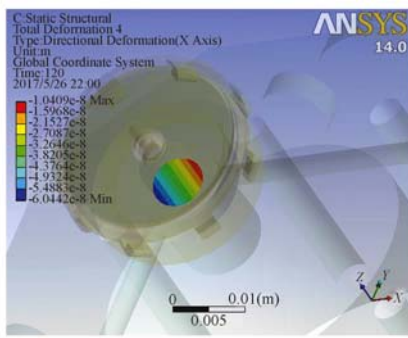


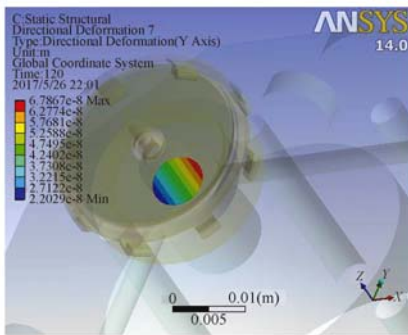
图 4 25 °C 时激光陀螺程长控制镜形变云图

Fig. 4 Deformation distribution of PLCM at 25 °C



(a) X 向形变云图

(a) Deformation distribution along X direction



(b)Y 向形变云图

(b) Deformation distribution along Y direction

图 5 25 °C 时反射镜面中心沿 X 向和 Y 向的形变云图
Fig. 5 Deformation distribution of PLCM along X and Y directions at 25 °C

2.2 高低温下程长控制镜的形变分析

激光陀螺在高温低温条件下,由于各个部件材料属性会发生变化,且热膨胀会产生微位移,使激光陀螺程长控制镜产生位移扭偏,直接影响激光陀螺性能。高低温条件下,程长控制镜中 PZT 线膨胀系数随温度的变化曲线如图 6 所示^[14],由

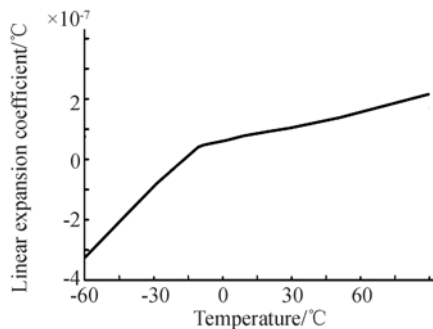


图 6 不同温度条件下 PZT 的线膨胀系数

Fig. 6 Linear expansion coefficients of PZT at different temperatures

此可知高低温及变温条件下 PZT 的线膨胀系数,其余参数的设置方式参考文献[17]。

在高温条件下进行模型分析,将环境温度设置为 60 °C,并修改各个部分的材料参数,得到程长控制镜的温度云图和形变云图,分别如图 7 和图 8 所示。程长控制镜整体向腔体外侧形变。对于反射镜镜面中心而言,在 60 °C 环境下达到稳态时其形变量为 3.19×10^{-7} m。

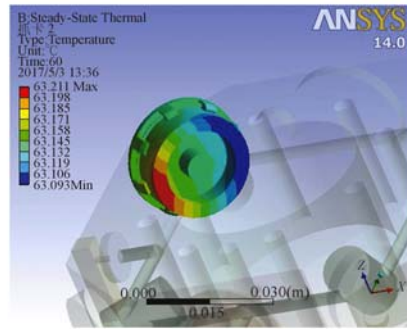
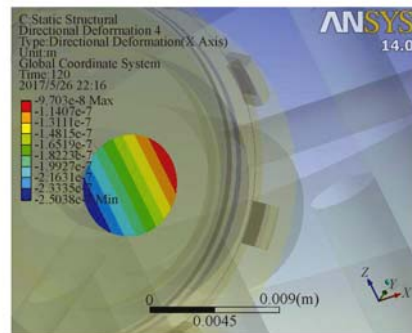


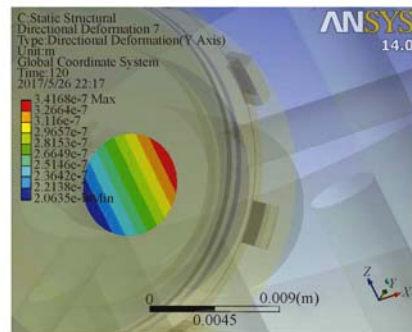
图 7 60 °C 时程长控制镜的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of PLCM at 60 °C



(a) X 向形变云图

(a) Deformation distribution along X direction



(b)Y 向形变云图

(b) Deformation distribution along Y direction

图 8 60 °C 时反射镜面中心沿 X 向和 Y 向的形变云图
Fig. 8 Deformation distribution of PLCM along X and Y directions at 60 °C

同样地,低温条件(此处指 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下反射镜镜面中心的形变量为 $-7.71\times 10^{-7}\text{ m}$ 。综上可知高低温条件下,程长控制镜镜面中心处的形变量差值为 $D_H - D_L = 3.19\times 10^{-7} - (-7.71\times 10^{-7}) = 1.09\times 10^{-6}\text{ m}$ 。

2.3 变温下程长控制镜形变分析

设定变温范围为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,首先由 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度降温至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定 5 h ,然后由 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度升温,升温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后恒温 10 h ,再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的速度降温至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温 15 h 。通过仿真分析可得到升温过程中程长控制镜反射镜面中心的形变规律,如图 9 所示。整个变温过程中程长控制镜反射镜面中心的形变规律如图 10 所示。

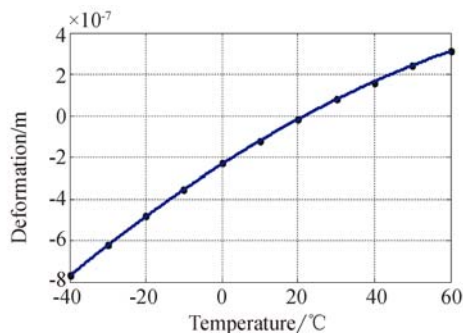


图 9 反射镜面中心随温度的变化曲线

Fig. 9 Variation of deformation in middle of mirror with temperature

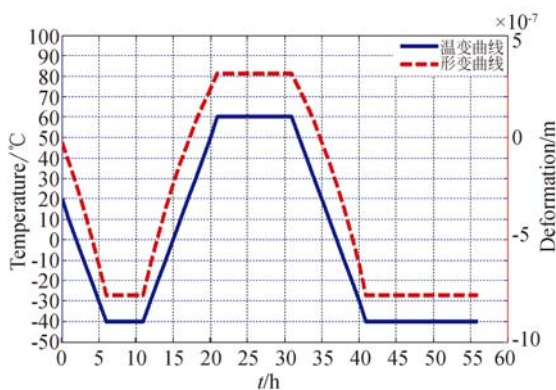


图 10 变温试验形变曲线

Fig. 10 Deformation curve in variable temperature experiment

在温度由 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化的过程中,利用 MATLAB 拟合程长控制镜反射镜面中心的形变量与温度的关系曲线,可得到温度与形变的函数

关系式为:

$$S = -4.331\times 10^{-11}t^2 + 1.165\times 10^{-8}t - 2.328\times 10^{-7}, \quad (2)$$

式中: S 为反射镜面中心的形变量, t 为温度。

3 实验验证

为了验证仿真实验的正确性,利用激光陀螺进行了扫模实验和温度实验。扫模实验是对压电陶瓷片加入推拉电压,电压在 $0\sim 300\text{ V}$ 变化,可以得到激光陀螺输出的光强变化情况如图 11 所示。由图 11 可知,光强随电压呈现规律性变化。对于激光陀螺而言,光强变化说明了光程差的变化,以此可以得到压电陶瓷的形变。图中出现一个光强峰值说明光程差变化一个波长。

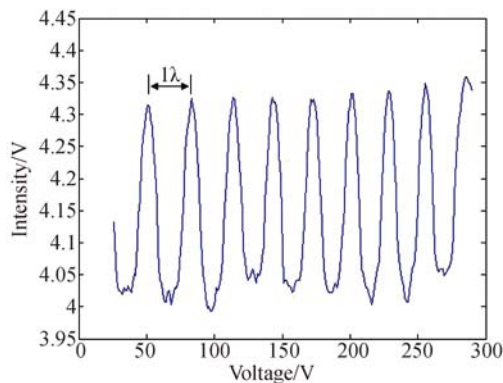


图 11 PZT 电压与光强值关系

Fig. 11 Relationship between PZT voltage and light intensity

温度实验是将陀螺放置于温箱内,由 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,再降温至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,具体变温过程如图 12 所示。对压电陶瓷电压值以及陀螺输出进行实验测量,具体结果如图 13 所示。

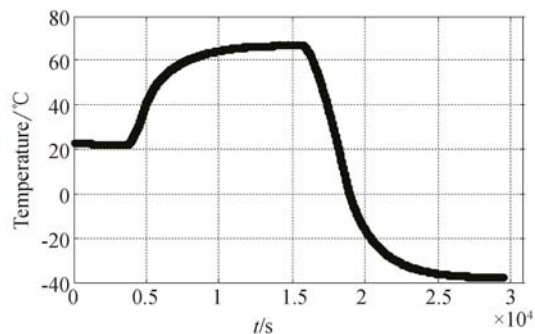


图 12 陀螺的温度变化曲线

Fig. 12 Temperature variation curve of gyro

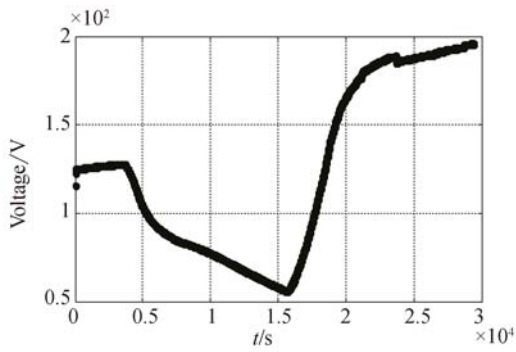


图 13 PZT 电压随时间的变化曲线
Fig. 13 Variation of PZT voltage with time

由图 13 可知,当温度处于 60 °C 时,压电陶瓷上电压为 55.48 V;当温度为 -40 °C 稳定时,压电陶瓷上电压为 195.6 V。对比图 11 可以得到由 60 °C 至 -40 °C 光程差的变化量为 4.753λ,光程差与反射镜面的形变量关系简图如图 14 所示。当反射镜沿虚线方向向内推进 D 时,光程会减少 2√2D,因此当两束光的光程差减少 λ 时,反射镜即向内垂直推进 $\frac{\sqrt{2}}{4}\lambda$,具体反映在反射镜中心位置的形变量上。而 PZT 的形变量与反射镜中心位置的形变量相等,由此可知,60 ~ -40 °C 镜面中心的形变量为 $4.753 \times \frac{\sqrt{2}}{4}\lambda = 4.753 \times \frac{\sqrt{2}}{4} \times 0.6328 \mu\text{m} = 1.063 \mu\text{m}$ 。

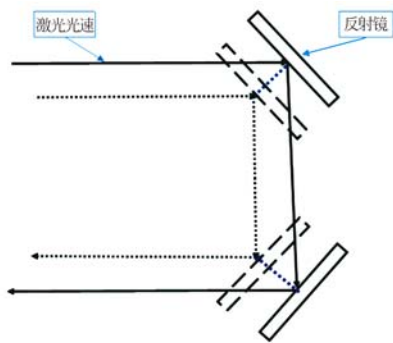


图 14 程长控制镜的简化工作原理图
Fig. 14 Simplified principle diagram of PLCM

因此,陀螺扫模实验测量得到的形变量为 1.063 μm,与本课题仿真实验结果 1.09 μm 相对比,计算相对误差为 2.5%;同时不同陀螺高低温测试得到的 PZT 电压随温度的变化关系存在一定的离散性,因此认为仿真结果在合理的范围内。

4 程长控制镜材料参数影响规律

常温常压下,改变激光陀螺中各个部件的材料参数,仿真分析得到各个材料参数对程长控制镜反射镜面的影响规律。一般情况下,程长控制镜的压电陶瓷采用 PZT 材料,抓卡及螺钉为超因瓦合金,反射镜为石英玻璃。

对反射镜导热系数进行分析,设定导热系数为 0.4~1.0,测得反射镜面中心的形变如图 15 所示。由图 15 可知,反射镜面中心的形变量随导热系数的增大而增大,但导热系数的改变对形变量变化影响非常小。

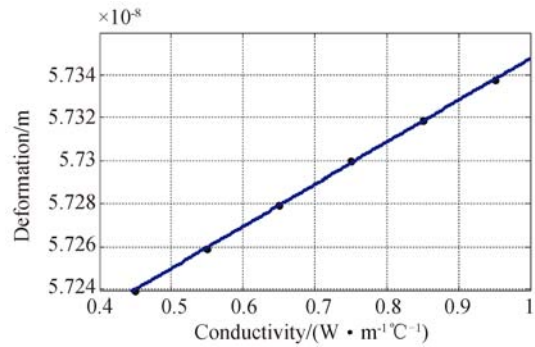


图 15 导热系数与反射镜面中心形变的关系
Fig. 15 Relationship between thermal conductivity and central deformation of mirror

对反射镜线膨胀系数进行分析,得到程长控制镜反射镜面中心的形变量与线膨胀系数的关系,如图 16 所示。由图 16 可知,反射镜面中心的形变量与反射镜的线膨胀系数呈线性关系,形变量与线膨胀系数成正比。

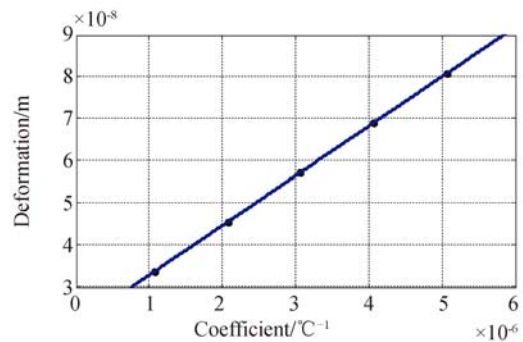


图 16 反射镜线膨胀系数与中心形变的关系
Fig. 16 Relationship between linear expansion coefficient and central deformation of mirror

对压电陶瓷线膨胀系数进行分析,反射镜面中心的形变规律如图 17 所示。由图 17 可知,形变量与 PZT 线膨胀系数成正比,并随线膨胀系数的增大而增大。

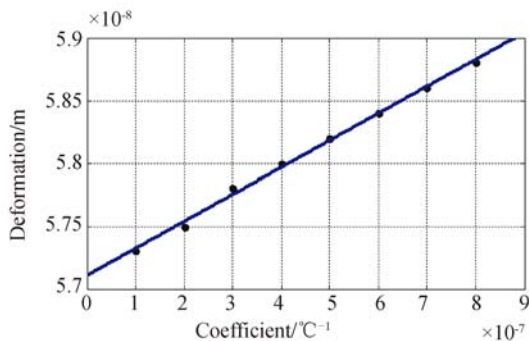


图 17 PZT 线膨胀系数与反射镜中心形变的关系

Fig. 17 Relationship between linear expansion coefficient of PZT and central deformation of mirror

对反射镜杨氏模量进行分析,得到程长控制镜反射镜面中心的形变量与杨氏模量的关系如图 18 所示。由图 18 可知,中心形变量与反射镜的杨氏模量成反比关系。

除此之外,我们还仿真分析了程长控制镜各个部件的导热系数、密度、杨氏模量、泊松比以及线膨胀系数的影响规律。导热系数和密度对反射镜中心形变量影响较小;杨氏模量和线膨胀系数对形变量影响较大,且形变量与杨氏模量成反比,与线膨胀系数成正比。由于篇幅原因,这里不再详述。

参考文献:

- [1] TITTERTON D H, WESTON J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*[M]. 2nd ed. . United Kingdom: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [2] 于旭东,王宇,张鹏飞,等. 单轴旋转惯导系统中陀螺漂移的精确校准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1201-1207.
YU X D, WANG Y, ZHANG P F, *et al.*. Calibration of RLG drift in single-axis rotation INS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1201-1207. (in Chinese)
- [3] 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

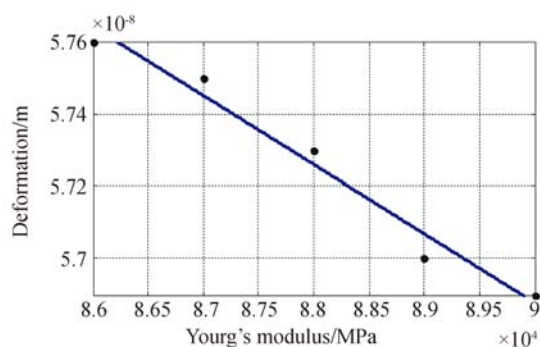


图 18 反射镜杨氏模量与反射镜面中心形变的关系

Fig. 18 Relationship between Young's modulus and central deformation of mirror

5 结 论

外界温度变化引起的程长控制镜的热形变直接影响激光陀螺的谐振光路,从而影响激光陀螺的热性能。本文基于 ANSYS Workbench 14.0 软件,首次建立了程长控制镜的温度场模型,得到了程长控制镜反射镜中心形变量的云图,系统地研究了不同温度情况下激光陀螺程长控制镜的形变规律,定量解释了激光陀螺在常温、高低温以及变温条件下温度场及耦合场对激光陀螺性能的影响规律,利用温度实验和扫模实验验证了有限元模型的合理性,计算相对误差为 2.5%。最后对程长控制镜各个部件的导热系数、杨氏模量、线膨胀系数的影响规律进行了研究,为激光陀螺程长控制镜的优化设计提供了参考。

(2): 281-288.

YU X D, LEI W, LIU CH. Deformation law of optical resonant cavity under random vibration environment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 281-288. (in Chinese)

- [4] YU X D, GAO N, XIE Y P, *et al.*. Displacement optimization of the path length control transducer for laser gyroscope by the finite element method[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2015, 49(3): 327-335.
- [5] 许光明,王飞. 激光陀螺光路变动分析及其对陀螺性能的影响[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 805-809.
XU G M, WANG F. Ring laser gyro light path variations and its impact on gyro performance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 805-809. (in Chinese)

- [6] YUAN J, LONG X W, LIANG L M. Optical-axis perturbation in triaxial ring resonator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(5): 628-631.
- [7] YUAN J, LONG X W, CHEN M X. Generalized ray matrix for spherical mirror reflection and its application in square ring resonators and monolithic triaxial ring resonators[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6762-6776.
- [8] TAZARTES D, MARK J, SCAPPATICCI A V, *et al.*. System and method for laser cavity length control: US, EP1305571[P]. 2003-05-02.
- [9] 汪之国, 龙兴武, 王飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040005. WANG ZH G, LONG X W, WANG F. Overview of four-mode differential laser gyros[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040005. (in Chinese)
- [10] 金世龙. 激光陀螺光路及程长控制镜: 中国, CN200410046907. 8[P]. 2005-04-06. JIN SH L. Light path and path length control mirror for laser gyro; CN, CN200410046907. 8 [P]. 2005-04-06. (in Chinese)
- [11] 金世龙, 龙兴武, 李晓红, 等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. *光学学报*, 2006, 26(4): 562-566. JIN SH L, LONG X W, LI X H, *et al.*. Research on new type control mirror of light path and optical path length for ring laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 562-566. (in Chinese)
- [12] SCHOBER C M. Piezoelectric transducer configured for use as a path length control apparatus for an optical device comprising a central void region: US, US 7068373[P]. 2006-06-27.
- [13] ZAPOTYL'KO N R, KATKOV A A, NEDZVETSKAYA A A. Piezo adjuster for compensating the thermal variations of the optical path length of the cavity of a laser gyroscope[J]. *Journal of Optical Technology*, 2011, 78(10): 644-645.
- [14] ZAPOTYL'KO N R, NEDZVETSKAYA A A, POLEKHIN I N. Piezoelectric drive for a ring laser gyroscope[J]. *Journal of Optical Technology*, 2011, 78(10): 646-647.
- [15] 刘元正, 张明辉, 张华伟, 等. 激光陀螺腔长控制镜改进设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(2): 235-239. LIU Y ZH, ZHANG M H, ZHANG H W, *et al.*. Optimization design for ring laser gyro path length control mirror[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(2): 235-239. (in Chinese)
- [16] CHEN L SH, HALL J L, YE J, *et al.*. Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(5): 053801.
- [17] 于旭东, 张鹏飞, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺温度场的有限元模拟与实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 913-920. YU X D, ZHANG P F, TANG J X, *et al.*. Finite element analysis and experiments of temperature fields of mechanically dithered ring laser gyroscopes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 913-920. (in Chinese)

作者简介:



于旭东 (1982—), 男, 吉林长春人, 讲师, 博士, 2005 年、2011 年于国防科技大学分别获得学士、博士学位, 主要从事激光陀螺及惯性导航系统的研究。E-mail: wind0909@163.com



黄一桂 (1995—), 男, 重庆云阳人, 学士, 2017 年于国防科技大学获得学士学位, 主要从事激光陀螺相关方面的研究。E-mail: hyg1995@qq.com