

抖动激光陀螺谐振腔的热特性研究

兰佩锋 刘元正 王继良 徐宏财

西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 激光陀螺高低温条件下所产生的热应力、形变对其全温性能有重要影响。传统激光陀螺腔体设计重点关注谐振腔的光学特性,力学和热学特性研究较少。传统谐振腔结构设计主要采用经验公式与试验方法,设计迭代次数较多,设计效率低。利用有限元分析方法对抖动激光陀螺谐振腔的主要结构参数与热特性的关系进行研究,得到了谐振腔温度场的分布,以及谐振腔主要结构参数与谐振腔热应力、热形变之间的关系曲线,为抖动激光陀螺的谐振腔优化设计提供了重要方法和指导性依据。该研究对提高抖动激光陀螺设计效率、缩短设计周期、降低成本有着重要意义。

关键词 光学器件;激光陀螺;有限元分析;谐振腔;热特性;结构设计

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.051405

Research on Thermal Performance for Resonator of Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes

Lan Peifeng Liu Yuanzheng Wang Jiliang Xu Hongcai

Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Thermal deformation and stress have an important influence on performance of ring laser gyroscopes (RLG) in high-low temperature. The traditional design methods of RLG are focus on optical performance of resonator more than mechanical and thermal performance. Generally, the traditional structural design of resonator is dependent on experienced equation and experiment, which result in more iterative design and lower efficiency. Relationship between thermal performance and structural parameters is studied by finite element (FE) method in resonator of mechanically dithered ring laser gyroscopes, the temperature field of resonator and relationship between thermal performance and structural parameters are obtained, which provide the resonator of mechanically dithered ring laser gyroscopes with significant and directive method. It has significance to improve efficiency, shorten hour and reduce cost.

Key words optical devices; laser gyroscope; finite element analysis; resonator; thermal performance; structural design

OCIS codes 140.1340; 140.3370; 140.3425

1 引言

激光陀螺是利用激光原理与 Sagnac 效应制成的一种感测角速度的传感器^[1]。它具有结构简单、体积小、重量轻、精度高、稳定性好、启动快、动态范围大、寿命长和数字输出等诸多优点,是捷联惯导系统的理想器件。目前激光陀螺已成功运用于航空、航天、航海以及地面定位与定向等多个领域^[2]。

作为捷联惯性系统的核心器件,激光陀螺的精度除了受到制造工艺、自身内部参数影响外^[3-4],还受到环境条件和工作条件的影响^[5-7]。环境温度的剧烈变化直接影响激光陀螺的精度,从而影响惯导系统的工作精度和可靠性。同时,激光陀螺自身的温度变化对陀螺带来的影响制约着陀螺性能的进一步提高。

温度对激光陀螺的影响主要表现在温度、温度梯度与温度速率三个方面。激光陀螺内部温度的波动和周围环境温度的变化都会带来误差。材料的热胀冷缩会使激光陀螺谐振腔变形,引起光路、损耗等的变化。从而将最终影响激光陀螺的零偏稳定性与重复性等性能。

收稿日期: 2013-11-23; 收到修改稿日期: 2013-12-30; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 总装预研基金(51309010202)

作者简介: 兰佩锋(1982—),男,硕士,工程师,主要从事激光陀螺设计方面的研究。E-mail: lanpeifeng_553@163.com

在激光陀螺设计时,通常重点关注谐振腔的光学特性^[8],而未考虑其热学特性。结构设计主要靠经验公式和试验,设计迭代次数多,研制周期长,需要通过反复试验,来获得较理想的结构参数。在激光陀螺实际应用过程中,文献[9-10]对激光陀螺的温度特性进行了研究;文献[11-12]采用温度补偿的方法来降低温度对激光陀螺的影响。而在激光陀螺设计初期并没有一种有效方法进行激光陀螺结构的优化设计,得到相对合适的结构参数,降低温度对激光陀螺的影响。因此,研究激光陀螺结构参数与热特性的关系、并进行热优化设计具有重要意义。

2 有限元热耦合分析原理

2.1 温度场数学模型

热能传递有3种基本方式:传导、对流和辐射。根据能量守恒定律和傅里叶定律可以建立系统的导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi, \quad (1)$$

式中 T 为摄氏温度, λ 为导热系数, ρ 为微元体的密度, c 为比热容, Φ 为单位时间内单位体积中内热源的生成热, τ 为时间。

当 $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$ 时,即系统内各点的温度不随时间变化,系统参数为常物性时,(1)式变为泊松方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{\lambda} = 0, \quad (2)$$

(1)、(2)式是进行激光陀螺热分析的数学依据。

为了求解一个具体给定的传热过程,必须附加边界条件与初始条件。

常见的边界条件分为3类:

1) 已知物体边界上的温度值,它是强制边界条件:

$$T = T(x, y, z, t);$$

2) 已知物体边界上的热流密度:

$$q = q(x, y, z, t);$$

3) 已知与边界直接接触的流体温度和边界面与流体之间的对流换热系数:

$$q = h(T_w - T_f),$$

式中 h 为对流换热系数, q 为热流量, T_w 为物体表面温度, T_f 为流体介质温度。

初始条件为 $T|_{t=0} = T_0(x, y, z)$

根据上述理论,依据有限元原理可得稳态和瞬态热分析的能量平衡方程为

$$\mathbf{K}_T \mathbf{T} = \mathbf{Q}, \quad (3)$$

$$\mathbf{C}_T \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_T \mathbf{T} = \mathbf{Q}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{K}_T 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数及辐射率和形状参数; \mathbf{C}_T 为比热矩阵,考虑系统内能的增加; \mathbf{T} 为节点温度向量; $\dot{\mathbf{T}}$ 为温度对时间的导数; \mathbf{Q} 为节点热流率向量,包含热生成。

2.2 热应力场数学模型

物体由于热膨胀只产生线应变,剪切应变为零。这种由于热变形产生的应变可以看作是物体的初应变。计算热应力时只需计算出热变形引起的初应变 ϵ_0 ,求得相应的初应变引起的等效结点载荷 P_{ϵ_0} (简称温度载荷),然后按通常求解应力一样解得由于热变形引起的结点位移 δ ,即可以由 δ 求得热应力 σ 。也可以将热变形引起的等效结点载荷 P_{ϵ_0} 与其他载荷项合在一起,求得包括热应力在内的综合应力。

将温度引起的应变作为出应变,并以 ϵ_0 表示,

$$\epsilon_0 = \alpha(T - T_0)[1, 1, 1, 0, 0, 0]^T, \quad (5)$$

式中 α 为材料的热膨胀系数, T_0 为结构的初始温度场。

因此,总的应力为

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) = DB\delta^e - D\varepsilon_0, \quad (6)$$

式中 B 为结构单元几何矩阵, D 为结构单元弹性矩阵。

利用虚功原理, 导出单元上节点力和节点位移间的关系式, 即单元刚度方程,

$$K^e \delta^e = F^e + \iiint_{\Omega_e} B^T D \varepsilon_0 dx dy dz, \quad (7)$$

式中 K^e 为单元刚度矩阵, δ^e 为单元节点位移, F^e 为单元节点等效载荷, $\iiint_{\Omega_e} B^T D \varepsilon_0 dx dy dz$ 为温度变化引起的节点等效载荷。

联立所有单元节点方程, 即可得到整体结构的刚度方程

$$K\delta = P + P_{\varepsilon_0}, \quad (8)$$

式中 K 为整体结构刚度矩阵, δ 为整体结构节点位移, P 为体积载荷和表面载荷引起的载荷项, P_{ε_0} 为温度应力引起的载荷项。

求解热应力时, 先求出温度变化引起的等效节点载荷, 然后求节点位移, 最后求热应力。

3 谐振腔结构与有限元模型

抖动激光陀螺谐振腔的典型结构为三角形或四边形, 本文以四边形的谐振腔为研究对象。抖动激光陀螺谐振腔结构示意图如图 1 所示。其中, 谐振腔厚度为 H , 谐振腔中心孔的直径为 D , 中心孔孔壁与抖动机构联接。两个阳极分布在谐振腔的左右两侧, 阴极分布在谐振腔的上端面, 反射镜则分布在谐振腔的 4 个角上, 使激光在谐振腔内形成闭合的光路。激光陀螺在温度的影响下, 其谐振腔产生应力及形变, 从而导致反射镜位置的变化进而影响光路的变化, 该变化对高精度激光陀螺的性能产生较大影响。

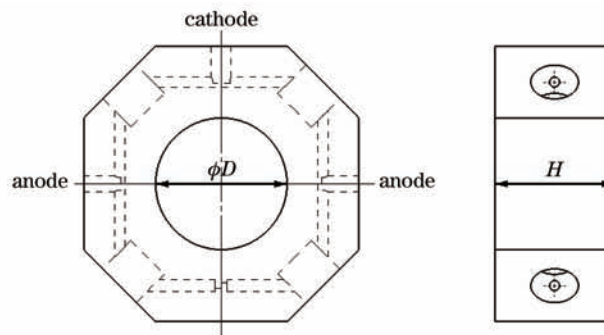


图 1 抖动激光陀螺谐振腔结构

Fig.1 Resonator structure of mechanically dithered ring laser gyroscope

基于温度场与热应力场有限元模型, 利用 ANSYS 有限元分析软件可对谐振腔进行热应力耦合分析。通过采用 UG 建模软件完成谐振腔模型的建立, 然后通过数据接口将该模型导入进 ANSYS workbench 有限元软件中, 并对该模型进行模型处理、参数设置、单元类型设置、网格划分以及计算^[13]。其中, 抖动激光陀螺谐振腔材料为微晶玻璃, 谐振腔的有限元 (FE) 模型如图 2 所示; 谐振腔材料属性如表 1 所示^[14]。

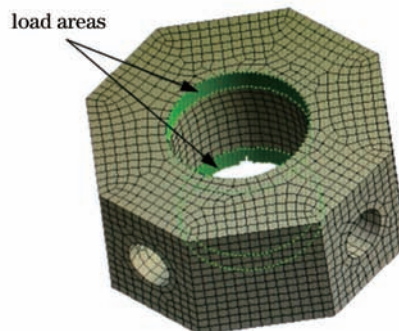


图 2 谐振腔有限元模型

Fig.2 FE model of resonator

表1 谐振腔材料属性

Table 1 Material parameters of resonator

Material	Density $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^3)$	Young's modulus $E /(\text{N}/\text{m}^2)$	Poisson's ratio μ	Heat capacity $c /[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	Thermal conductivity $\lambda /[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	Expansion α /K^{-1}
Glass	2500	9×10^{10}	0.24	800	1.46	0.05×10^{-6}

4 谐振腔结构热特性分析

4.1 谐振腔稳态温度场分析

谐振腔陀螺内部管道换热情况比较复杂。对于增益区相接触的表面,由于放电区电压与电流乘积较小,可认为沿径向温度是均匀的,并将增益区等效为径向温度分布均匀的圆柱体。因此,将热源均匀分布在阴极与阳极之间增益区的毛细孔的孔壁上。增益区放电电流为0.65 mA时,阴阳极电压差为405 V,单臂增益区的等效热功率约为0.263 W,因此,整个增益区的等效热功率约为0.53 W。谐振腔初始温度与环境温度均设为25 ℃。

通过对谐振腔在常温工作条件下的稳态温度场进行分析,谐振腔温度分布图如图3所示。由于谐振腔的2个阳极对称分布,因此其温度场分布是对称的;阴极区域温度最高,非增益区温度最低,增益区与非增益区间的温度梯度较大。使用温度传感器对谐振腔的阴极区、阳极区的温度进行测试,测试值与仿真值误差较小。测试值与仿真值对比如表2所示。

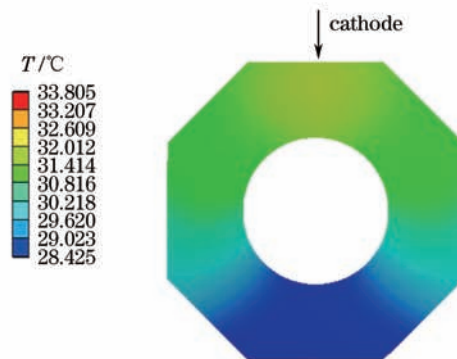


图3 谐振腔温度分布

Fig.3 Temperature field of resonator

表2 仿真数据与实测数据对比

Table 2 Comparison of simulation and measurements

	Simulated temperature /°C	Measured temperature /°C	Relative error /%
Cathode	32.0	31.7	0.9
Anode	30.7	30.9	0.6

4.2 谐振腔结构参数与热特性关系

分别对不同结构参数(厚度 H 、中心孔孔径 D)的谐振腔在高低温循过程中进行热应力及形变仿真分析,研究谐振腔主要结构参数对其热特性的影响。使用ANSYS对抖动激光陀螺谐振腔分别在高低温变温过程中进行热应力、热形变的仿真分析。由于谐振腔在高低温循过程是一个连续的过程,于是只对腔体在该过程的极限温度点(-45 ℃、70 ℃)下进行仿真分析。该热应力分析中考虑了谐振腔联接机构在高低温条件下对谐振腔的影响。将抖动机构高低温下由于形变产生对谐振腔的应力作为等效载荷均匀施加在抖动机构与谐振腔中心孔孔壁的接触区域,如图2所示。由于抖动机构的线胀系数大于谐振腔的线胀系数,高温条件下(70 ℃),谐振腔与抖动机构接触区域受到沿中心孔径向的压应力,约为0.6 MPa;低温条件下(-45 ℃),谐振腔与抖动机构接触区域受到沿中心孔径向的拉应力,约为0.9 MPa。

在高低温条件下,厚度 H 与谐振腔的热应力及热形变的关系如图4所示。中心孔孔径 D 与谐振腔的热应力及热形变的关系如图5所示。图中数值均为谐振腔毛细孔的最大热应力以及热形变。

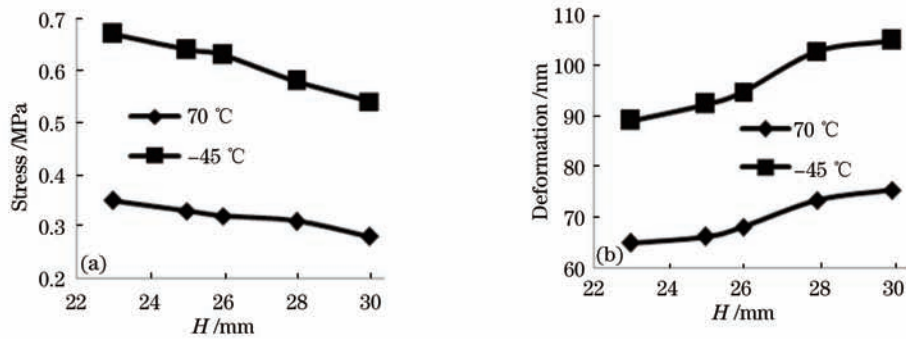


图4 厚度 H 与(a)热应力及(b)热形变的关系

Fig.4 Relationship between H and (a) stress and (b) deformation

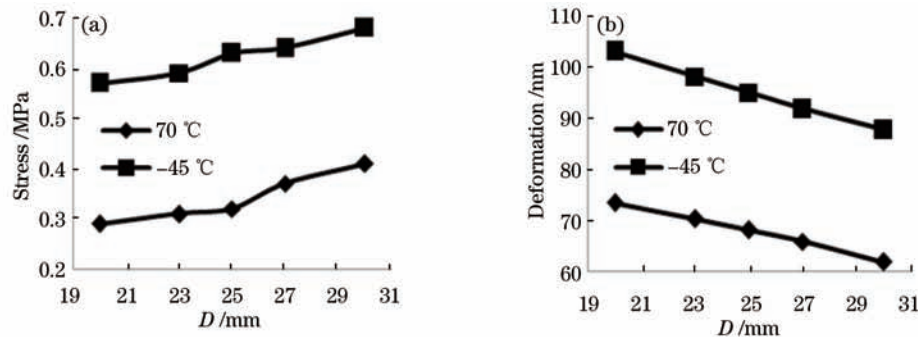


图5 中心孔孔径 D 与(a)热应力及(b)热形变的关系

Fig.5 Relationship between D and (a) stress and (b) deformation

仿真结果表明,抖动激光陀螺谐振腔在高低温下的热应力与谐振腔厚度 H 成反比,与中心孔孔径 D 成正比;热形变与谐振腔厚度 H 成正比,与中心孔孔径 D 成反比。

仿真分析结果给出了抖动激光陀螺谐振腔主要结构参数与其热应力及热形变的关系,为抖动激光陀螺谐振腔的优化设计提供了重要分析法与依据。

实际应用中可综合考虑热应力及形变的影响程度,适当选取结构参数来降低温度对激光陀螺的影响。依据抖动激光陀螺谐振腔的热特性研究结果,通过对外形尺寸 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的谐振腔进行优化设计得到了谐振腔较合理的结构参数:谐振腔厚度 H 为 24 mm ,中心孔孔径为 25 mm 。

5 结 论

针对激光陀螺高低温条件下所产生的热应力、形变对其全温性能影响的问题,利用有限元分析方法从力学和热学方面对抖动激光陀螺的温度场进行研究,并对谐振腔主要结构参数(厚度 H 、中心孔孔径 D)与谐振腔热特性的关系进行了研究,得到了抖动激光陀螺谐振腔的温度场分布,并给出了谐振腔主要结构参数与热应力、热形变之间的关系曲线,为抖动激光陀螺的谐振腔优化设计提供了重要方法和指导性依据。该研究对提高抖动激光陀螺设计效率、缩短设计周期、降低成本有着重要意义。

参 考 文 献

- Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyroscope [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 73-85.
高伯龙, 李树堂. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1984. 73-85.
- Zhao Xueya, Xia Yuanqin, Chen Deying. Frequency-biasing technique of laser gyro [J]. Laser & Optonics Progress, 2005, 42(8): 50-53.
赵雪亚, 夏元钦, 陈德应. 激光陀螺的偏频技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(8): 50-53.
- Ma Yanghua, Lei Jianjun, Xu Hongcai, et al.. Influence of gain-to-loss ratio on the performance of ring laser gyro [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1682-1685.

- 马仰华, 雷建军, 徐宏财, 等. 增损比对激光陀螺影响的研究[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1682-1685.
- 4 Yang Hongyou, Zhang Jinhong, Yan Jizhong, *et al.*. Influence of He-Ne on biasing value of zeeman laser gyroscope [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 785-788.
杨洪友, 张金红, 严吉中, 等. 气体压强对塞曼激光陀螺偏频特性的影响研究[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 785-788.
- 5 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei, *et al.*. Experimental investigations on magnetic sensitivity in four-frequency differential laser gyros [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 713-717.
汪之国, 龙兴武, 王 飞, 等. 四频差动激光陀螺磁灵敏度特性的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 713-717.
- 6 Xu Guangming, Wang Fei, Song Jianwen. Research of magnetic effect in little non-planar resonators [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514003.
许光明, 王 飞, 宋建文. 轻微非共面腔的磁效应特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514003.
- 7 Gao Yukai, Deng Zhenglong. Dithering mechanism temperature's influence on bias stability [J]. J Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3): 351-354.
高玉凯, 邓正隆. 机抖温度特性对激光陀螺零偏稳定性的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(3): 351-354.
- 8 Wang Shundeng, Ji Decheng. Study of the Designing Method of RLG'S Optical Resonator [C]. CSA 1st Annual Meeting Conference, 2006, 373-379.
王顺登, 季德成. 激光陀螺用光学谐振腔的设计方法研究[C]. 中国宇航学会首届学术年会, 2006, 373-379.
- 9 Wang Guochen. Analysis of four-mode laser gyro's null shift vibration under high-low temperature process [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2037-2040.
王国臣. 四频激光陀螺高低温过程中零漂振荡的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2037-2040.
- 10 Wang Guochen. Analysis of performance of four-mode laser gyro's null shift in different modes under high-low temperature process [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2295-2298.
王国臣. 四频激光陀螺不同工作模式下零漂的高低温性能分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2295-2298.
- 11 Hong Woon Seon, Lee Kyeong Soo, Paik Bok Soo, *et al.*. The compensation method for thermal bias of ring laser gyro [C]. IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2008, 723-724.
- 12 Zhou Lu, Ren Lei, Liu Qingqing, *et al.*. The compensation method for thermal bias of ring laser gyro [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2013, 26(3): 353-356.
周 璐, 任 磊, 刘晴晴, 等. 环形激光陀螺零偏热效应补偿模型的研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(3): 353-356.
- 13 Yu Xudong, Zhang Pengfei, Tang Jianxun, *et al.*. Finite element analysis and experiments of temperature fields of mechanically dithered ring laser gyroscopes [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 913-920.
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.
- 14 Lan Peifeng, Liu Yuanzheng, Wang Jiliang, *et al.*. Research and improving of path length control configuration for laser gyroscopes [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 161-165.
兰佩锋, 刘元正, 王继良, 等. 激光陀螺腔长控制机构研究与改进[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 161-165.