

doi: 10.3788/gzxb20144304.0414004

腔内低气压对激光陀螺光路变动及其损耗的影响

王朋国¹, 赵娟², 胡强¹, 刘宇刚¹, 权冰心¹, 张自国¹

(1 中航工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

(2 西安邮电大学, 西安 710121)

摘 要: 激光陀螺光路稳定性决定着陀螺的性能, 而谐振腔内外压差是影响陀螺光路稳定性重要因素之一。为了研究腔内低气压对激光陀螺光路变动及其损耗的影响, 采用 ANSYS 仿真软件对激光陀螺在腔内低气压状态下反射镜的微小形变进行了仿真计算, 结果表明: 低气压状态下, 反射镜的中心发生最大形变, 其中球面镜最大形变量为 545 nm, 平面镜最大形变量为 31 nm, 这不仅引起光路偏离光阑中心 390 nm, 同时引起球面镜曲率变化 174 mm, 进一步从理论上分析了这种变化对光路变形和谐振腔损耗的影响, 结果表明: 上述变化综合引起谐振腔损耗变化 2%~3%, 其中球面镜曲率半径的变化是引起损耗变化的主要原因, 增加球面镜槽深或降低腔内外压差都能有效减小这种光路的变化。通过搭建光路测试系统, 进一步验证了计算结果的正确性。

关键词: 激光光学; 低气压; ANSYS 仿真; 激光陀螺; 光路变动; 光阑; 损耗; 最大形变

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0414004-5

Influence of Low Air Pressure on the Light Path Variations and Loss of Ring Laser Gyro

WANG Peng-guo¹, ZHAO Juan², HU Qiang¹, LIU Yu-gang¹, QUAN Bing-xin¹, ZHANG Zi-guo¹

(1 AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

(2 Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, 710121, China)

Abstract: The light path stability of ring laser gyro determines its performance, while the internal and external pressure difference of resonator is one of the important factors influencing the light path stability of gyro. To study the low air pressure assembly causing light path variations and the loss changes of ring laser gyro, the micro-deformation of mirrors was simulated and calculated by ANSYS software. The results indicate that under the condition of the low air pressure, there is maximum-deformation in the center of the mirror, therein to, the maximum-deformation of spherical mirror is 545 nm, and the maximum-deformation of plane mirror is 31 nm, thus this deformation leads to the light path's deviation of 390 nm from the center of diaphragm and brings out a curvature variation of 174 mm for the spherical mirror. Furthermore, the deformation influence on the light path variation and the loss changes of ring laser gyro is calculated in theory, the results show that this deformation synthetically cause about 2%~3% loss variation of resonator, among them the variation of curvature is the main cause of loss variation. To increase the groove depth or decrease the air difference between outer and inner of the resonator will effectively reduce the light path variation. A test system is built and verifies that the results of calculation are correct.

Key words: Laser optics; Low air pressure; ANSYS simulation; Ring laser gyro; Light path variation; Diaphragm; Loss; The maximum deformation

OCIS Codes: 140.0140; 140.3370; 140.3425; 140.3410; 140.3560

基金项目: 总装预研基金(No. 51303010202)资助

第一作者: 王朋国(1980-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向环形激光陀螺技术. Email: gentle0951@sina.com

收稿日期: 2013-07-26; 录用日期: 2013-09-23

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

0 引言

激光陀螺是一种精密的光学惯性传感器^[1-3],广泛应用于军事和民用领域^[4].谐振腔作为激光陀螺核心器件具有双重作用,一是提供光学正反馈,二是控制谐振腔内的光束使其沿毛细孔轴线传播,确保激光的传输质量.反射镜作为激光陀螺谐振腔的重要组件,其曲率半径的大小和稳定性影响着谐振腔光路稳定性,进而影响陀螺的准确度^[5].在描述谐振腔光路稳定性的诸多参量中,损耗稳定性是谐振腔关键参量之一,由于其具有敏感性强、易于测量等特点常用于对谐振腔光路稳定性的评估,通过对谐振腔损耗的研究就可以反映出陀螺光路的变化特性.

激光陀螺在实际工作时,腔内充入几百帕工作气体,此时谐振腔内部处于低气压状态,外部处于大气状态,这种腔内、外压差使得反射镜发生变形,引起腔内光路发生变化,偏离调控时的最佳状态^[6-7],从而导致谐振腔损耗^[8]发生变化.

本文从激光陀螺实际应用角度出发,建立了数学模型,采用 ANSYS 分析仿真软件^[9]计算四边形谐振腔在腔内低气压状态下反射镜的变形量,分析和验证了这种形变对激光陀螺光路变动和腔损耗的影响,为激光陀螺设计和工艺改进提供依据.

1 腔内低气压引起光路的变动分析

理想的四边形谐振腔结构示意图如图 1 所示,其由两片平面镜(P_1 和 P_2)、两片球面镜(Q_1 、 Q_2)和长方体微晶玻璃腔组成.平面镜主要用于光强和信号输出,而球面镜用于调节腔体加工误差和装配误差对光路的影响,使得谐振腔内激光光束沿中心轴线传播,在两个球面镜中心设置一光阑用于抑制高阶模振荡,保证腔内基模运行.

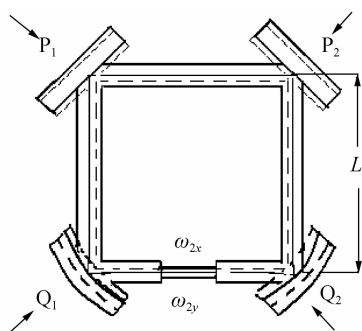


图 1 四边形谐振腔的结构示意图

Fig. 1 The schematic graph of quadrilateral resonator

图中实线部分表示理想状态下^[10]陀螺内部经过各毛细孔和光阑的中轴线形成闭合光路,此时光在谐振腔内具有最大的模体积和最小的腔损耗,陀螺处于最佳位置^[11].当谐振腔内充入数百帕工作气体,谐振腔在内、外压差作用下反射镜受到向内的作用力而发生微小的变形,光束将沿着图中虚线的光路传输,偏离

毛细孔和光阑的中心轴线^[12],这将引起腔损耗的变化.以 360 mm 腔长激光陀螺为例,计算腔内低气压状态下引起反射镜的形变量,考虑到大气和低气压状态下谐振腔反射镜结构变化处于亚稳态,因此采用 ANSYS 稳态结构分析模块进行分析,按照实验室标准设定腔内外气压,腔外为标准大气压,腔内为理想真空状态即气压为零,计算结果如图 2.

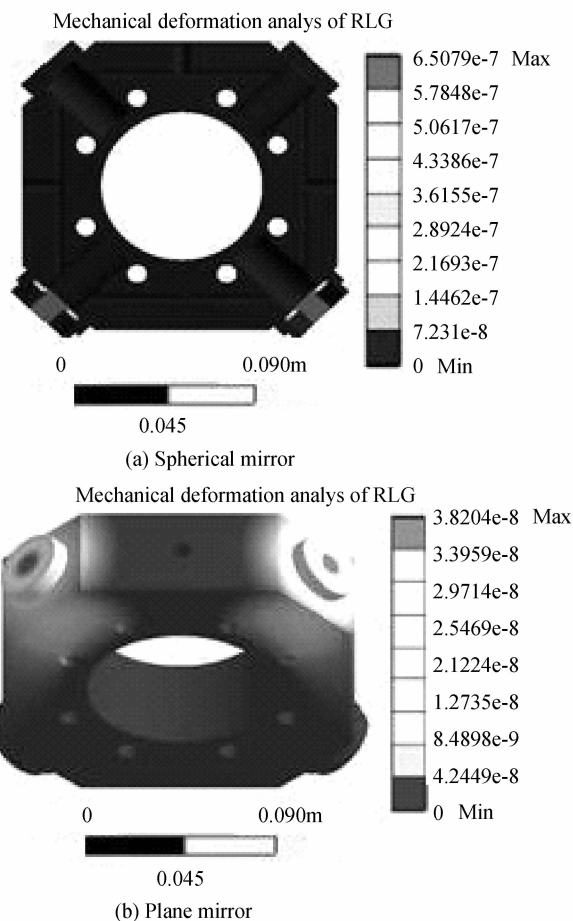


图 2 球面镜和平面镜变形计算图

Fig. 2 The deformation graph of spherical mirror and plane mirror

计算结果表明:平面镜和球面镜由于受力方向上尺寸薄厚的不同,发生形变的大小也不同.球面镜的最大形变量发生在两个球面镜中心,形变量为 545 nm,平面镜最大形变量发生在两个平面镜中心,形变量为 31 nm.上述仿真计算是在理想的真空状态下得出的结论,不同低气压下反射镜形变量计算结果如表 1.

表 1 不同充气压下反射镜的最大形变量

Table 1 The maximum deformation of mirrors on different pressure

Pressure/Pa	Spherical mirror/nm	Plane mirror/nm
1 000	538.53	30.485
800	540.82	30.737
600	541.82	30.883
400	543.55	30.919
300	544.17	30.946

计算结果对激光陀螺光路影响最直接的是球面镜^[13],其简单的结构如图3所示,球面镜中心在受到力作用下,一定槽深 L 时,其结构将沿虚线部分变化,这种综合效应的影响不仅导致光路发生平移,同时球面镜半径也将由 R_1 变化为 R_2 ,使得光束的特性发生变化。

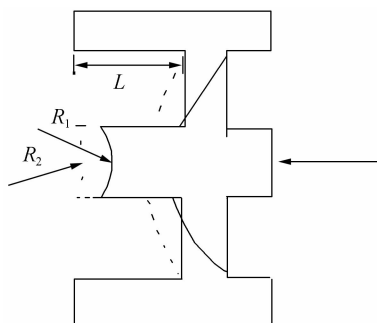


图3 球面镜变形结构图

Fig. 3 The structure graph of deformation on spherical mirror

2 光路的理论计算和分析

2.1 光路的变动计算

分析得知,腔内低气压下谐振腔四片反射镜会向腔内发生形变,这将会引起光路发生两个变化.首先光路会偏离初始状态而向上偏移,其结果如图4.

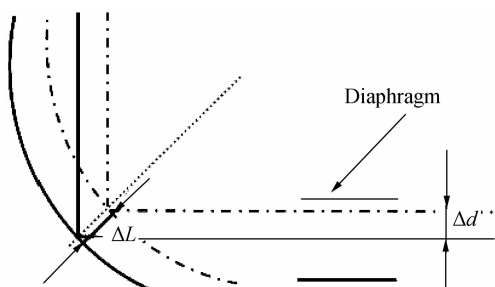


图4 低气压下光路偏移示意图

Fig. 4 The schematic graph of light path deviation on low air pressure

陀螺的初始状态如图4中实线所示,在低气压下,反射镜受到向内力的作用发生偏移,光束将沿虚线传输,设球面镜偏移量为 ΔL ,于是通过光阑处的光路平移量 Δd 为

$$\Delta d = \Delta L \cdot \sin 45^\circ \quad (1)$$

根据式(1)可知,当球面镜中心点推移距离 ΔL 为545 nm时,通过光阑的高斯光束将偏离光阑中心距离 Δd 为390 nm,这将引起光阑处衍射损耗发生一定变化。

其次,由于球面镜发生形变,其曲率半径发生变化,球面半径 R 、球镜矢高 X_R 、球冠底面半径 r 之间的关系为

$$R = \frac{r^2}{2X_R} + \frac{X_R}{2} \quad (2)$$

利用 ANSYS 有限元仿真工具计算在球面镜中心发生推移时曲率的变化情况.对球面镜半径 R 为6 000 mm,筋厚为1 mm的球面镜模型,不同槽深、不同形变量下曲率半径变化计算结果见表2(计算误差 δ 在1%以内)。

表2 不同球面镜槽深和形变量下曲率半径计算
Table 2 The curvature radius variation of spherical mirror on different groove depth and deformation

Groove depth L/mm	Deformation $\Delta d/\text{nm}$	Spherical vector $X_R/\mu\text{m}$	Variations $\Delta R/\text{mm}$
1.5	1 600	0.112 10	845.1
4.5	1 600	0.044 30	295.4
4.5	545	0.044 30	174.1

从表2的计算结果可知,不同槽深对曲率变化影响较大,槽深越深曲率变化越小,陀螺抗失谐能力越强,这对改进球面镜结构设计具有重要的参考意义。

2.2 低气压下腔损耗的变化分析

由2.1中光路变动计算结果可知:腔内低气压状态对陀螺光路影响主要表现在以下两个方面:其一光路偏离光阑中心轴线某一距离导致衍射损耗变化;其二,球面镜曲率半径变化导致衍射损耗的变化,总变化是上述两种变化的综合.根据光学谐振腔理论,激光陀螺在工作时,腔内运行的是高斯光束,其衍射损耗的大小与光阑的尺寸和高斯光束在光阑处的腰斑半径有关,而腰斑半径与球面镜曲率半径有关.在理想情况下, L 表示四边形腔边长, R 为球面镜曲率半径, ω_{2x} 、 ω_{2y} 分别为腔内高斯光束束腰的长、短轴半径,其大小与 R 和 L 的关系为

$$\omega_{2x} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \left(\frac{L(2\sqrt{2}R-3L)(\sqrt{2}R-2L)}{\sqrt{2}R-L}\right)} \quad (3)$$

$$\omega_{2y} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \left(\frac{L(4\sqrt{2}R-3L)(\sqrt{2}R-L)}{\sqrt{2}R-3L}\right)} \quad (4)$$

光阑的形状一般为椭圆,其长短轴用 a 和 b 表示,那么各阶横模的衍射损耗可表示为

$$R_{00} = 1 - \left(\frac{2}{\pi\omega_{2x}\omega_{2y}}\right) \int_{-b}^b \int_{-a}^a \exp\left\{-2\left[\left(\frac{x}{\omega_{2x}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_{2y}}\right)^2\right]\right\} dx dy \quad (5)$$

$$R_{10} = 1 - \left(\frac{8}{\pi\omega_{2x}\omega_{2y}}\right) \int_{-b}^b \int_{-a}^a x^2 \exp\left\{-2\left[\left(\frac{x}{\omega_{2x}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_{2y}}\right)^2\right]\right\} dx dy \quad (6)$$

$$R_{01} = 1 - \left(\frac{8}{\pi\omega_{2x}\omega_{2y}}\right) \int_{-b}^b \int_{-a}^a y^2 \exp\left\{-2\left[\left(\frac{x}{\omega_{2x}}\right)^2 + \left(\frac{y}{\omega_{2y}}\right)^2\right]\right\} dx dy \quad (7)$$

对于光路平行于光阑且偏离光阑中心某一距离时,衍射损耗的计算仍可采用式(5)~(7),这时需要对上述公式做修正^[14].取 $\lambda=632.8$ nm, $L=360$ mm, $R=$

6 000 mm, $a=0.93$ mm, $b=0.81$ mm, $\Delta L=3.9 \times 10^{-4}$ mm, 计算在大气状态 (10^5 Pa) 下和低气压 (300 Pa) 状态下衍射损耗, 结果见表 3.

表 3 大气、真空状态下衍射损耗计算结果对比
Table 3 The comparison of diffraction loss between atmosphere and vacuum status

Mode	Atmosphere loss/ppm	Low air pressure loss/ppm	Relative variation /%
10	1 204	1 231	2.24
01	1 209	1 237	2.32
00	597	605	1.34

从表 3 计算结果可知: 在低气压状态下, 陀螺中光路平移导致的衍射损耗变化很小, 可以忽略; 球面镜半径变化导致的衍射损耗变化较大, 其中高阶模损耗增加了 24~25 ppm, 基模损耗增加了 7.2 ppm, 这将综合引起腔衍射损耗变化在 2%~3%, 其中由球面镜曲径变化是引起陀螺衍射损耗变化的主要原因.

3 试验研究与结果分析

3.1 试验平台的搭建

为了验证谐振腔在大气状态和低气压状态下损耗的差异, 搭建了试验测试平台, 如图 5 所示. 将待测谐振腔安装在测量夹具上, 激光器注入一束激光进入谐振腔, 谐振腔与真空泵相连接, 通过观察安装在真空泵上的压力表可以调节谐振腔内部的压力^[15], 损耗测量仪与计算机相连, 通过损耗测量系统实时测量谐振腔损耗^[16], 测量结果显示在计算机上.

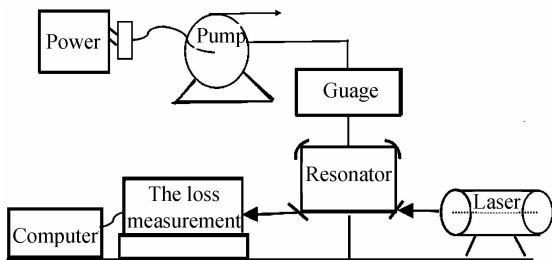


图 5 试验装置图

Fig. 5 Experiment setup

3.2 试验结果与分析

试验中通过损耗测量系统测量谐振腔在大气状态下的损耗, 并通过图 5 试验装置中的真空泵调节谐振腔内气压的大小, 并实时测量在不同气压下的腔损耗. 大气状态 (10^5 Pa) 和低气压 (300 Pa) 状态下谐振腔损耗试验结果见表 4.

由表 4 试验结果可知: 低气压下谐振腔损耗要较大气状态下损耗略微增大, 其中基模损耗变化了 8 ppm, 谐振腔损耗变化 1.34%, 会对陀螺的性能造成一定的影响; 高阶模损耗变化量均值为 27~28 ppm, 谐振腔损耗的变化在 2% 左右, 较基模更为显著, 一方面由于高阶模损耗本身较基模损耗大, 另一方面由于

表 4 不同气压下损耗的试验结果

Table 4 The loss of experimental results between atmosphere and low air pressure (300 Pa)

Status	Light path variation	00 mode /ppm	10 mode /ppm	01 mode /ppm
Atmosphere	None	20.574	244.739	240.455
Vacuum	Deviation	20.654	244.874	240.883
Vacuum	Radius variation	27.811	279.571	275.074
Vacuum	Total variation	27.813	279.583	275.089

低气压状态下反射镜的变形引起光路的变化导致高阶模衍射损耗较基模有更大的变化, 这与理论计算和分析是一致的.

4 结论

真空处理过程是激光陀螺研制过程中的的一个关键过程, 本文计算仿真了谐振腔在低气压状态下反射镜中心发生的微小变形, 研究表明: 反射镜变形发生在反射镜的中心, 腔内外压差越大, 反射镜形变量越大.

通过对反射镜微小变形对光路影响理论计算和试验分析, 结果表明: 反射镜变形引起光路发生较大变化. 一方面引起腔内高斯光束较原光路发生平移, 引起衍射损耗的变化, 但对腔损耗影响很小; 另一方面会使球面镜曲率发生一定的变化, 改变腔内高斯光束的特征, 引起衍射损耗发生较大变化, 是引起腔损耗变化的主要原因. 增加球面镜槽深或者降低谐振腔内外压差都能有效减小这种光路的变化. 本文的研究结果对于提高谐振腔稳定性, 改进激光陀螺设计具有重要的指导意义.

参考文献

- [1] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 147-173.
- [2] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 252-262.
- [3] GAO Bo-long, DING Jin-xing, LONG Xing-wu, et al. Green (yellow, green) He-Ne laser with internal cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 1617-1621.
- [4] 高伯龙, 丁金星, 龙兴武, 等. 全内腔绿(黄、橙)光 He-Ne 激光器[J]. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1617-162.
- [5] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4): 332-339.
- [6] HAN Zong-hu, FENG Pei-de. Influence analyses of resonator parameter on laser gyro performance[J]. *Journal of Chinese Intertrial Technology*, 2012, **10**(2): 32-38.
- [7] 韩宗虎, 冯培德. 谐振腔参量对激光陀螺性能影响的分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2002, **10**(2): 32-38.
- [8] SHUTTS G. Phased-coded control for ring laser gyro: US, 4099876[P]. 1978-06-11.
- [9] WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu, WANG Fei, et al. Magic sensitivity and optimal operating point of four-frequency differential laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 481-484.
- [10] 汪之国, 龙兴武, 王飞, 等. 四频差动激光陀螺的磁敏感性与最佳工作点[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 481-484.
- [11] GAO Ai-hua, GU Qiao, LU Zhi-guo. The maladjustment of

- laser cavity and light beam quality[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8): 763-766.
- 高爱华, 顾樵, 陆治国. 激光器腔的失调与光束质量[J]. 光子学报, 1999, **28**(8): 763-766.
- [9] 张洪武, 关振群, 李云鹏, 等. 有限元分析与 CAE 技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 方洪烈. 光学谐振腔理论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [11] JIN Shi-long, LONG Xing-wu, ZHANG Bin, *et al.* Cavity adjustment technology for orthogonal triaxialring laser gyro [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(04): 525-529.
- 金世龙, 龙兴武, 张斌, 等. 空间正交三轴激光陀螺的调控技术[J]. 光学技术, 2005, **31**(04): 525-529.
- [12] 金世龙. 激光陀螺光路控制系统: 中国, 200410046906. 3[P], 2005-04-06.
- [13] XU Guang-ming, WANG Fei. Ring laser gyro light path variations and its impact on gyro Performance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(5): 805-809.
- 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.
- [14] 胡强. 基于非共面谐振腔的正交圆偏振环形激光陀螺光束特性研究[D]. 西安: 中国航空研究院 618 所, 2011.
- [15] DONG Deng-feng, MENG Xiao-feng, LI Jin-yang, *et al.* A novel method for gas flow rate measurement in vacuum[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, **24**(02): 123-127.
- 董登峰, 孟晓风, 李晋阳. 一种真空状态下气体流量测量新方法[J]. 真空科学与技术学报, 2012, **24**(02): 123-127.
- [16] LI Jie, LI Jian, YU Quan-xun. Measurement of the optical parameters of the resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(7): 591-594.
- 刘杰, 李健, 于全训. 谐振腔光学参量的测量[J]. 中国激光, 1997, **24**(7): 591-594.