

# 激光陀螺环形谐振腔抑制比优化控制研究

马仰华<sup>1,2</sup> 张自国<sup>2</sup> 韩宗虎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072  
<sup>2</sup> 中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要** 根据光阑衍射理论,以光阑衍射损耗灵敏度为参量,研究和分析了激光陀螺环形谐振腔的抗失调能力。基于激光陀螺的限模条件,为获得谐振腔的最佳光阑衍射损耗灵敏度,计算得到了激光陀螺抑制比下限。通过数值计算,研究了谐振腔增益和反射镜总损耗对其抑制比下限的影响,并得到了实验验证。研究结果表明:腔内增益越大,陀螺抑制比下限值越大;反射镜总损耗越大,陀螺抑制比下限值越小。这对激光陀螺环形谐振腔装调过程中抑制比的优化控制具有重要指导意义。

**关键词** 激光技术; 激光陀螺; 环形谐振腔; 光阑衍射损耗; 模式抑制比

**中图分类号** V241.5+58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0402007

## Investigation of Optimal Mode Suppression Ratio of Laser Gyro Ring Resonator

Ma Yanghua<sup>1,2</sup> Zhang Zigu<sup>2</sup> Han Zonghu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)  
(<sup>2</sup> AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract** By means of the diffraction loss sensitivity of the diaphragm, the anti-alignment capability of ring laser gyro (RLG) is analyzed numerically. Deriving from the condition of mode suppression of RLG, the lower limit of mode suppression ratio (MSR), which is defined as the ratio of the loss of a higher order transverse mode to that of the primary transverse mode, is calculated to obtain the optimal diaphragm diffraction loss sensitivity. The dependence of the lower limit of MSR (LLMSR) for a RLG on its gain level as well as its total mirror loss is investigated both numerically and experimentally, with the results showing that the higher the gain level, the higher the LLMSR, while the higher the total mirror loss, the lower the LLMSR. These results will be of great significance for the MSR optimizing control during the resonator alignment of RLG.

**Key words** laser technique; laser gyro; ring resonator; diaphragm diffraction loss; mode suppression ratio

**OCIS codes** 140.3410; 140.4780; 140.3370; 140.3560

## 1 引言

基于 Sagnac 效应<sup>[1-2]</sup>的激光陀螺,作为新一代惯性传感器,是激光捷联惯性导航系统的核心部件,在海、陆等领域获得越来越广泛的应用<sup>[3]</sup>。

闭锁、比例因子和零漂为激光陀螺的三大误差因素<sup>[4-9]</sup>,而多模耦合零漂是由多模振荡通过增益介质的反常色散所导致的一种零漂误差<sup>[4]</sup>。因此,为提高激光陀螺精度,必须保证陀螺稳频工作在单模状态。通常,采用小孔光阑选模法实现对高阶横

模的抑制,从而保证陀螺工作在基横模状态<sup>[10-12]</sup>。但光阑的引入也将同时引起基模的衍射损耗,从而对陀螺的工作模式产生不利影响。此外,在陀螺工作过程中,受到各种因素的综合影响,谐振腔的实际光轴将偏离其理想位置<sup>[13-16]</sup>,这将进一步加剧光阑对基模的衍射损耗。

高阶横模抑制比是谐振腔装调过程中一个关键控制参量。抑制比不同,对应谐振腔的抗失调能力不同。因此,开展激光陀螺抑制比的优化控制研究,

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-18

基金项目: 航空基金(2006ZD18011)

作者简介: 马仰华(1980—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事激光陀螺方面的研究。E-mail:mgyyy@eyou.com

对提高激光陀螺的工程化应用水平具有重要意义。本文根据光阑衍射理论,基于激光陀螺的限模条件,数值分析和实验研究了谐振腔增益和反射镜总损耗对其抑制比下限的影响,为陀螺谐振腔装调过程中抑制比的优化控制提供了重要参考依据。

## 2 光阑衍射损耗灵敏度与抑制比相关性研究

### 2.1 光阑衍射损耗理论

为便于讨论,记  $G_{00}$ 、 $G_{10}$  分别为 00 模、10 模的峰值增益,  $\delta_{00}$ 、 $\delta_{10}$  分别为 00 模、10 模的总损耗,  $R_{00}$ 、 $R_{10}$  分别为 00 模、10 模的光阑衍射损耗,  $\tau$  为反射镜总损耗。

通常,在激光陀螺腔体中引入椭圆光阑,且其长短轴分别与高斯光束束腰半径对应成比例。以光阑中心为原点,光阑长、短轴方向分别为  $x$  轴、 $y$  轴,建

立直角坐标系。理想情况下,谐振腔光轴与光阑轴线重合。而实际情况下,受到各种因素的影响,谐振腔内实际光轴与光阑轴线并不重合。设在光阑横截面内光轴与光阑轴线的最大偏离为  $(x_0, y_0)$ , 光束与光阑的横截面示意图如图 1 所示。

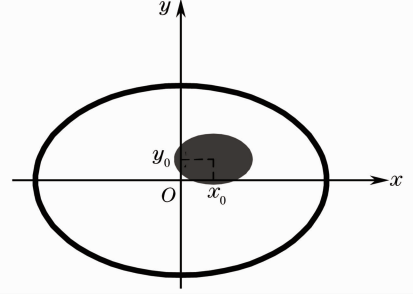


图 1 光束发射孔径的定义

Fig. 1 Definition of the aperture for beam transmission

对于图 1 中的情形,00 模、10 模、01 模相应的模分布可表示为

$$\begin{aligned} a_{00} &= \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_x\omega_y}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\omega_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{\omega_y^2}\right], \\ a_{10} &= \frac{2}{\omega_x} \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_x\omega_y}} (x-x_0) \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\omega_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{\omega_y^2}\right], \\ a_{01} &= \frac{2}{\omega_y} \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_x\omega_y}} (y-y_0) \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{\omega_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{\omega_y^2}\right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中三个模幅值分布均为归一化函数,且  $(x_0, y_0) = (0, 0)$  对应理想情况。

记光阑所围成的区域为  $S$ , 则上述各模态的光阑衍射损耗计算公式为

$$\begin{aligned} R_{00} &= 1 - \iint_S a_{00}^2 dx dy, \\ R_{10} &= 1 - \iint_S a_{10}^2 dx dy, \\ R_{01} &= 1 - \iint_S a_{01}^2 dx dy. \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 光阑衍射损耗数值计算

记  $K$  为光阑相对孔径,且满足

$$K = \frac{2a}{\omega_{0x}} = \frac{2b}{\omega_{0y}}, \quad (3)$$

式中  $a$ 、 $b$  分别为椭圆光阑的长、短轴半径,  $\omega_{0x}$ 、 $\omega_{0y}$  分别为腔内高斯光束束腰的长、短轴半径。

理想情况下,即  $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 。基于(2)式和(3)式,可将 00 模、01 模、10 模等模式的光阑衍射损耗计算公式改写为

$$R_{00} = \exp(-K^2/2),$$

$$R_{10} = R_{01} = (1 + K^2/2) \exp(-K^2/2). \quad (4)$$

图 2 给出了理想情况下不同模衍射损耗与  $K$  值的关系曲线。

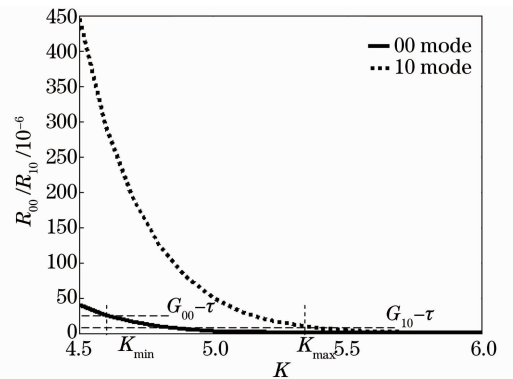


图 2 不同模式光阑衍射损耗与光阑相对孔径的关系曲线

Fig. 2 Dependence of the diffraction loss of different transverse modes on the diaphragm relative aperture

由图 2 可以看出,不同阶横模的光阑衍射损耗随光阑相对孔径的变化趋势是相同的,但随着光阑孔径的持续减小,同基模相比,高阶横模衍射损耗将急剧增大,这正是通过小孔光阑可抑制高阶模的依据所在。

## 2.3 光阑衍射损耗灵敏度与抑制比相关性分析

简便起见,并不失一般性,以光轴与光阑轴线沿  $x$  轴方向的失调为例,开展光阑衍射损耗灵敏度的相关性分析和研究。定义 00 模沿  $x$  轴方向的光阑衍射损耗灵敏度  $M_{R_x}$  为

$$M_{R_x} = \frac{dR_{00}}{dx}. \quad (5)$$

以 10 模为例,根据抑制比的定义,可知其抑制比  $C_{s10}$  与光阑相对孔径  $K$  的关系为

$$C_{s10}(K) = \frac{\delta_{10}(K) - \delta_{00}(K)}{\delta_{00}(K)} = \frac{R_{10}(K) - R_{00}(K)}{R_{00}(K) + \tau}, \quad (6)$$

由(1)~(3)、(5)~(6)式,经进一步计算可得不同抑制比  $C_{s10}$  情况下光阑衍射损耗灵敏度  $M_{R_x}$  曲线及其对比,如图 3 所示。

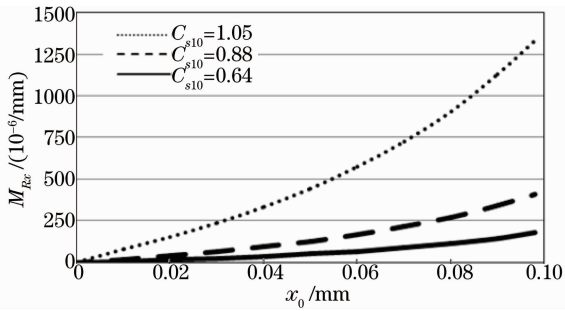


图 3 不同抑制比情况下光阑衍射损耗灵敏度

Fig. 3 Diffraction loss sensitivity with different mode suppression ratios

由图 3 可知,抑制比越小,谐振腔光阑衍射损耗灵敏度越低。这表明,为进一步提高谐振腔的抗失调能力,应尽量选取较小的抑制比控制指标。但抑制比选取过小,将出现高阶横模振荡的问题。为此,非常有必要深入开展谐振腔抑制比下限值的相关性分析和研究。

## 3 激光陀螺抑制比优化分析

### 3.1 激光陀螺限模条件

忽略毛细孔对光束的衍射损耗,并假定 00 模、10 模反射镜总损耗相同(均为  $\tau$ ),则有

$$\begin{aligned} \delta_{00} &= R_{00} + \tau, \\ \delta_{10} &= R_{10} + \tau, \end{aligned} \quad (7)$$

以 10 模为例,其限模条件可表示为

$$\begin{aligned} G_{00} &\geq \delta_{00} = R_{00} + \tau, \\ G_{10} &\leq \delta_{10} = R_{10} + \tau. \end{aligned} \quad (8)$$

由(8)式及图 2 可知,为保证 00 模起振和 10 模的抑制,光阑相对孔径取值必须满足:

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max}, \quad (9)$$

式中  $K_{\min}$ 、 $K_{\max}$  分别由(10)式确定:

$$\begin{aligned} R_{00}(K_{\min}) &= G_{00} - \tau, \\ R_{10}(K_{\max}) &= G_{10} - \tau. \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2 激光陀螺抑制比下限数值计算

根据(4)、(6)~(10)式,通过数值计算,给出了抑制比下限  $C_{s10 \min}$  与  $G_{00}$  和  $\tau$  的关系曲线,分别如图 4、5 所示。计算时,图 4 中令  $\tau = 450 \times 10^{-6}$ ,图 5 中令  $G_{00} = 700 \times 10^{-6}$ 。

由图 4、5 可以看出:腔内增益越大,陀螺抑制比下限值越大;反射镜总损耗越大,陀螺抑制比下限值越小。

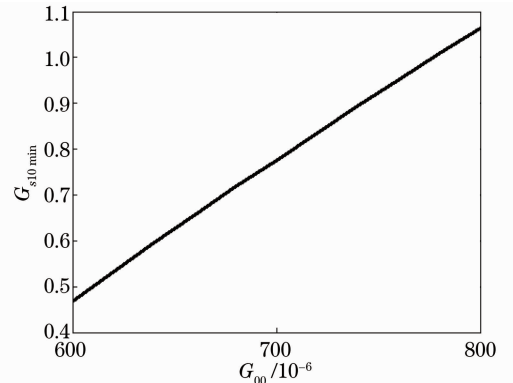


图 4 抑制比下限与峰值增益关系的数值曲线

Fig. 4 Simulation curve of the dependence of 10-mode suppression ratio lower limit on 00-mode peak gain

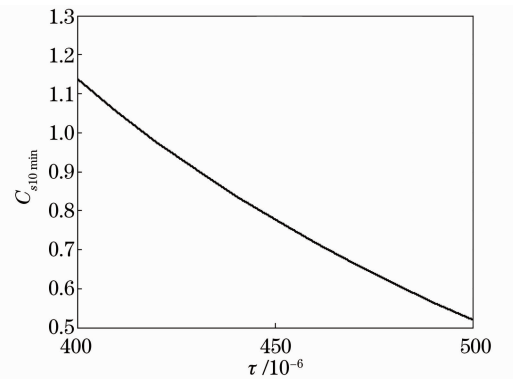


图 5 抑制比下限与反射镜总损耗关系的数值曲线

Fig. 5 Simulation curve of the dependence of 10-mode suppression ratio lower limit on total mirror loss

### 3.3 激光陀螺抑制比下限实验验证

在激光陀螺腔体参数一定的情况下,通过选配不同曲率半径的球面镜,便可到得不同的相对光阑孔径,即获得不同的抑制比。当谐振腔抑制比小于其下限值时,相应高阶横模将会与基模同时起振。利用 SA-201 型共焦扫描干涉仪,对激光陀螺输出光的频率成分进行监测和分析,便可得到谐振腔出

现多模的临界抑制比,该临界抑制比即为相应谐振腔的抑制比下限。

由于目前无法实现谐振腔内增益的精确测量,且在放电毛细孔径一定的情况下,腔内增益与增益长度  $l_g$  存在递增关系。为此,实验中以增益长度来表征腔内增益。

对毛细孔径相同、增益长度分别约为 100、80、60 mm 的三种谐振腔,在配套反射镜总损耗约为  $445 \times 10^{-6}$  的情况下,进行了抑制比下限测试,实验结果如图 6 所示。

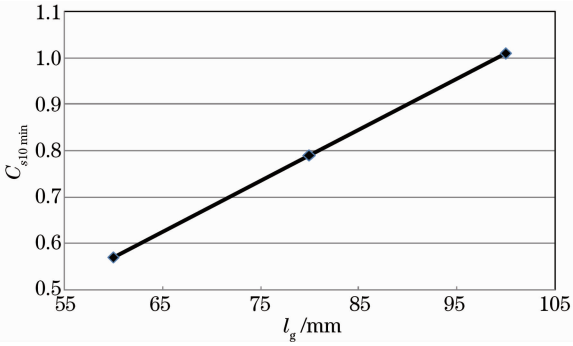


图 6 抑制比下限与增益长度关系的实验曲线

Fig. 6 Experimental curve of the dependence of 10-mode suppression ratio lower limit on gain length

对增益长度约为 80 mm 的谐振腔,在配套反射镜总损耗分别约为  $410 \times 10^{-6}$ 、 $445 \times 10^{-6}$ 、 $485 \times 10^{-6}$  等三种水平下,进行了抑制比下限的测试,实验结果如图 7 所示。

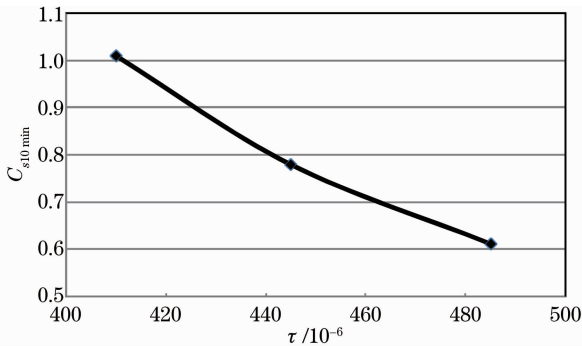


图 7 抑制比下限与反射镜总损耗关系的实验曲线

Fig. 7 Experimental curve of the dependence of 10-mode suppression ratio lower limit on total mirror loss

图 6、7 中实验结果表明,不同增益和反射镜损耗情况下,谐振腔抑制比下限是不同的,且实验结果与数值仿真结果呈现出相同的趋势,表现出较好的吻合性。

### 3.4 激光陀螺抑制比优化控制讨论

已有研究结果表明<sup>[13]</sup>,对于不同腔长大小的激光陀螺,在抑制比相同情况下,腔长越小,谐振腔光

阑衍射损耗灵敏度越高,这将对小型化陀螺研制带来新的挑战。

本文研究结果表明,谐振腔抑制比越小,其抗失调能力将越强。根据进一步关于谐振腔抑制比下限值相关性的研究结果可知,在其他参数相同情况下,同大陀螺相比,小陀螺抑制比下限值更低,从而可选取更小的抑制比控制指标,这将有利于进一步提高其谐振腔抗失调能力。此外,对于大陀螺,由于其腔内增益较大,因此在保证陀螺输出光功率满足工作要求的前提下,可通过适当减小激励电流或增大配套反射镜总损耗等措施,以获取更低的抑制比下限值,为选取更小的抑制比控制指标进而获得更强的抗失调能力创造条件。

## 4 结 论

本文基于激光陀螺的限模条件,从光阑衍射理论出发,为获得谐振腔的最佳光阑衍射损耗灵敏度,开展了激光陀螺环形谐振腔抑制比下限的分析和研究。通过数值计算,获得了谐振腔增益和配套反射镜总损耗对其抑制比下限的影响规律,并得到了实验验证。这对激光陀螺谐振腔装调过程中抑制比的优化控制和陀螺抗失调能力的提高具有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- Post E J. Sagnac effect[J]. Rev Mod Phys, 1967, 39(2): 475-493.
- Chow W W, Gea-Banacloche, Pedrotti L M, *et al.*. The ring laser gyro[J]. Rev Mod Phys, 1985, 57(1): 61-104.
- Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- Jiang Yanan. Ring Laser Gyro[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 1985. 72-106.  
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 72-106.
- Han Zonghu, Chen Linfeng, Chen Yong, *et al.*. The study of laser gyro lock-in characteristic[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(6): 807-810.  
韩宗虎, 陈林峰, 陈勇, 等. 激光陀螺锁区特性的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 807-810.
- Liu Yuanzheng, Wang Jingxian, Ma Yanghua, *et al.*. Lock-in zone controlling for ring laser gyro[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 781-784.  
刘元正, 王京献, 马仰华, 等. 激光陀螺锁区最小化控制技术[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 781-784.
- Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 354-358.  
高玉凯, 邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 354-358.
- Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1):

0102002

刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.

9 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.

10 Kogelnik H, Li T. Laser beams and resonator[J]. Proc IEEE, 1966, 54(10): 1312—1329.

11 Han Zonghu, Feng Peide. Influence analyses of resonator parameters on laser gyro performance[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(2): 32—38.

韩宗虎, 冯培德. 谐振腔参数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.

12 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.

13 Yuan Jie, Long Xingwu. Optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators[J]. Opt Commun, 2008, 281(5): 1204—1210.

14 Yuan Jie, Long Xingwu, Zhang Bin, *et al.*. Optical axis perturbation in folded planar ring resonators [J]. Appl Opt, 2007, 46(25): 6314—6322.

15 Yuan Jie, Long Xingwu, Liang Linmei. Optical-axis perturbation in triaxial ring resonator[J]. Appl Opt, 2008, 47(5): 628—631.

16 Wen Dandan, Li Dong, Zhao Jianlin. Generalized sensitivity factors for optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators [J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19752—19757.

栏目编辑:何卓铭