

平面谐振腔参数对腔内模式椭圆率影响的机理研究

于文东 王京献 陈林峰 张明辉

中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 腔内模式椭圆偏振态和磁场是激光陀螺产生磁致误差的两个必要条件,减小腔内模式椭圆率是降低激光陀螺磁灵敏度的重要途径。基于琼斯矩阵的谐振腔理论,提出了建立自洽方程的位置原则;提出了自洽方程求解中起振模式的选取方法;形成了准确、完善的腔内模式椭圆率计算公式。采用数值分析法,分析了平面腔激光陀螺反射镜参数及光路非共面误差对腔内本征模式偏振态的影响机理;提出了两种通过配置反射镜反射相移减小腔内模式椭圆率的新方法。

关键词 光学设计; 激光陀螺; 磁灵敏度; 椭圆率; 反射相移; 非共面角

中图分类号 V241.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0814001

Mechanism Study on the Effect of Planar Ring Resonator Parameters on Ellipticity of Modes in Resonator

Yu Wendong Wang Jingxian Chen Linfeng Zhang Minghui

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institution, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Ellipticity of modes in resonator and magnetic fields are two necessary conditions for magnetic sensitivity of ring laser gyroscope. Reducing ellipticity of modes is one of approaches to reduce magnetic sensitivity of ring laser gyroscope. Based on theory of resonator by Jones matrix, the positional principle of establishing self-consistent equation is given, the method of choosing modes which exists is given, a theory of calculation on ellipticity of modes is formed. The mechanism of the effect of reflectors' parameters and angle of folding plane of ring laser on ellipticity of modes in resonator are analyzed by analytical method of numerical value. Two new approaches to reduce ellipticity of modes are advanced, they are achieved by collocating the reflection-induced-retardances of mirrors. The results of research have important significance for study of engineering on reducing magnetic sensitivity of ring laser gyroscope.

Key words optical design; ring laser gyroscope; magnetic sensitivity; ellipticity; reflection-induced-retardance; angle of folding plane

OCIS codes 140.3370; 260.5430; 120.5700

1 引 言

激光陀螺是一种精密的光学角速度传感器,是飞机、导弹、舰艇等军民产品自主惯性导航的核心元件。磁灵敏度是激光陀螺性能指标之一,在特殊磁环境下应用,该指标尤为重要。理想情况下,平面腔激光陀螺的腔内模式偏振态是线偏振光,激光陀螺输出不受磁场影响,即磁灵敏度为零。由于谐振腔参数误差等因素的影响,腔内模式偏振态变为轻微的椭圆偏振,在塞曼磁光效应的机理下,陀螺产生了磁灵敏度。因此,腔内出现椭圆偏振光是平面腔激光陀螺磁灵敏度产生的必要条件。谐振腔的几何参数和光学参数都会影响本征模式的偏振态,国内外对此现象有深入的研究。在20世纪80年代早期,美国David A.Smith^[1]和Graham J.Martin^[2]

收稿日期: 2015-03-09; 收到修改稿日期: 2015-04-01

基金项目: 装备预先研究项目(51309010202)

作者简介: 于文东(1984—),男,硕士,工程师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: yuwendongcc.student@sina.com

先后给出了激光陀螺磁灵敏度的计算公式。后来 Laurence G Cote、Robert H Moore、Mark S Grasso 先后在各自的专利中提出了不同的降低激光陀螺磁灵敏度的方法[3-5]。国内陈林峰等^[6]和杨昊东等^[7]分别在美国人研究的基础上对磁灵敏度进行了深入的理论和实验验证。

本文结合工程实际,在误差定量分析、自洽方程列写和模式选择等方面,完善对平面腔激光陀螺磁灵敏度的理论分析,提出新的减小磁灵敏度的方法。

2 腔内模式偏振态计算

2.1 谐振腔参数讨论及琼斯矩阵

以四镜平面腔激光陀螺为例,如图 1 所示。R1、R2、R3、R4 为反射镜,L12、L23、L34、L41 为四段光路位置,定义 R2 反射镜为具有一定透射率的输出镜片。

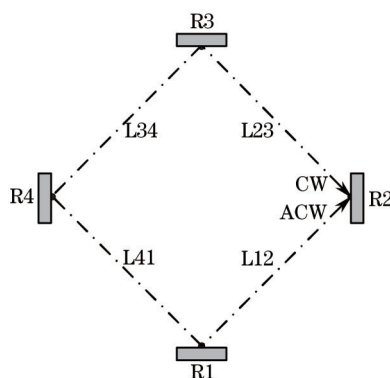


图 1 四镜平面谐振腔结构示意图

Fig.1 Ring resonator with four reflectors

基于琼斯(Jones)矩阵,表述谐振腔中各个参数及误差对光的影响。根据环形腔中光路的传播方向,分别列写顺、逆时针光的自洽方程。其中必须考虑的因素包括:

1) 反射矩阵

反射镜反射矩阵^[8]为:

$$R_j = \begin{bmatrix} R_{sj} \cdot \exp(i\Delta_j/2) & 0 \\ 0 & R_{pj} \cdot \exp(-i\Delta_j/2) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 R_{sj} 、 R_{pj} 分别为第 j 个反射镜的 s 态反射率、 p 态反射率, Δ 为 s 、 p 反射相移。

2) 应力双折射

应力双折射在很多光学器件实际应用当中都会出现,其 Jones 矩阵的表达式^[4]为

$$C = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi \\ \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\eta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi \\ -\sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 ξ 为应力双折射快轴与光学器件 s 向的夹角, η 为双折射附加相移。

激光陀螺反射镜膜系在光反射时也可能带来一定的应力双折射,但经实验测试,其量值远远小于反射镜反射相移,因此可忽略不计。一般情况下,当光经过反射镜基片透射输出时,基片应力双折射对光的偏振态的影响是明显的。

3) 像旋转

平面腔由于加工及调腔等误差,导致光环路存在轻微的非共面折叠角,如图 2 所示。该非共面折叠角会引起光入射面在每次反射时发生旋转,称之为像旋转。例如在 2 点反射时,入射面由 412 面旋转至 123 面。

根据几何算法,早期文献^[9]已给出正像旋转角的计算公式,由于定义域的扩展,对公式进行了修正,修正后为

$$\varepsilon = \begin{cases} \cos^{-1}[(\cos \theta/2)^2]; & \theta \geq 0 \\ -\cos^{-1}[(\cos \theta/2)^2]; & \theta \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 θ 为光环路非共面折叠角,如图2所示。

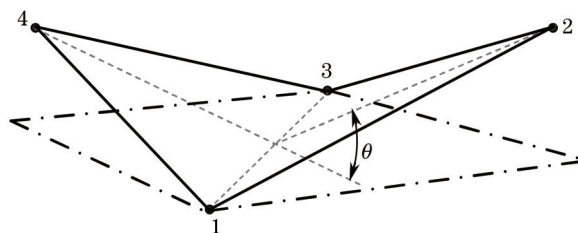


图2 非共面环形光路

Fig.2 Out-of-plane ring resonator

相邻反射点处像旋转方向相反,假设每次反射时的像旋转角度绝对值相等,因此正像转矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (4)$$

负像转矩阵为:

$$S' = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (5)$$

4) 增益介质的法拉第效应

经实验测试,在正常的地磁环境下,当光经过激光陀螺增益介质时法拉第效应是微乎其微的,因此法拉第效应对谐振腔的影响可以忽略。

2.2 自洽方程及腔内光椭圆率计算

根据上述因素的 Jones 矩阵,列写谐振腔中某一位置和状态光线的自洽方程,进而计算该位置光的偏振态。由于不同的位置和状态的光偏振态不同,所以选取求解位置和状态必须是准确的,以往的研究当中很容易忽视这一点,计算结果将验证这一结论。

如图1所示,以求解处于R2入射面,未经过R2反射的L12位置的逆时针光线为例,该光线的 Jones 矩阵自洽方程为:

$$Q_{12-} = S' \cdot R_1 \cdot S \cdot R_4 \cdot S' \cdot R_3 \cdot S \cdot R_2. \quad (6)$$

同时为了分析谐振腔同一段光路当中的顺时针光线的椭圆率,求解处于R2入射面,已经过R2反射的L12位置的顺时针光线。该光线的自洽方程为:

$$Q_{12+} = R_2 \cdot S \cdot R_3 \cdot S' \cdot R_4 \cdot S \cdot R_1 \cdot S'. \quad (7)$$

以顺时针自洽方程求解为例,将得到两个本征矢量,分别表示左、右旋椭圆偏振模式

$$\begin{aligned} Q_{12+} \cdot \nu_L &= \lambda_{+L} \cdot \nu_L, \\ Q_{12+} \cdot \nu_R &= \lambda_{+R} \cdot \nu_R. \end{aligned} \quad (8)$$

对于轻微非共面谐振腔,两个本征椭圆偏振模式中,一个模式损耗接近谐振腔s态损耗,另一个模式损耗接近谐振腔p态损耗。实际当中由于激光陀螺反射镜p态损耗远大于s态损耗,因此接近p态损耗的轻微椭圆模式很难在谐振腔中起振,实际存在的是损耗较小的接近谐振腔s态损耗的模式,假设该模式为左旋模式,其电矢量为

$$\nu_L = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 E_1 和 E_2 为电矢量的两个分量。

因此,根据偏振光参数分解^[10],该模式的偏振椭圆率可表示为

$$\rho = \tan \left\{ \frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{2 \cdot \text{Im}(E_1/E_2)}{1 + |E_1/E_2|^2} \right] \right\}. \quad (10)$$

为分辨椭圆偏振光的左右旋向,定义左旋光椭圆率为负,右旋光椭圆率为正。文献^[7]误将椭圆率角定义为椭圆率,与常用定义不同。

3 数值分析

部分文献^[4,11]采用了推导解析式来计算椭圆率,由于其中存在近似和简化的过程,会产生一定误差。对于研究轻微非共面误差因素带来的陀螺输出误差,该方法的精度有限。在计算机的辅助下,数值分析方法既高效又精准,因此选用该方法进行研究。

3.1 典型激光陀螺腔内光椭圆率计算及分析

为计算处于R2入射面,L12位置中顺(CW)、逆时针(ACW)光的椭圆率,需要确定多个谐振腔参数。首先假设4个反射镜参数相同的情况下,各参数值确定如下:

$$R_{s1}=R_{s2}=R_{s3}=R_{s4}=R_s=0.99995, R_{p1}=R_{p2}=R_{p3}=R_{p4}=R_p=0.997, \Delta_1=\Delta_2=\Delta_3=\Delta_4=\Delta=5^\circ, \theta=10''. \quad (11)$$

根据上述选模方法和计算公式,数值计算得到顺、逆时针光的椭圆率 ρ 均为 3.93×10^{-4} ,且均为右旋光。

基于上述谐振腔参数值,逐一分析各参数对腔内顺、逆时针光的椭圆率的影响,计算结果如图3所示。可以得出以下结论:

- 1) 同光路段顺、逆时针光偏振态始终保持一致,即旋向和椭圆率均一致;
- 2) 椭圆率随 R_s 增大而减小,椭圆率随 R_p 增大而增大;
- 3) 当反射相移为负时,偏振态为左旋光,且椭圆率随反射相移的增大而减小;当反射相移为正时,偏振态为右旋光,且椭圆率随反射相移的增大而减小;
- 4) 椭圆率随非共面角的增大而增大。

对比结果显示,反射相移对椭圆率的影响最为显著,其次为非共面角,反射率对椭圆率的影响较小。

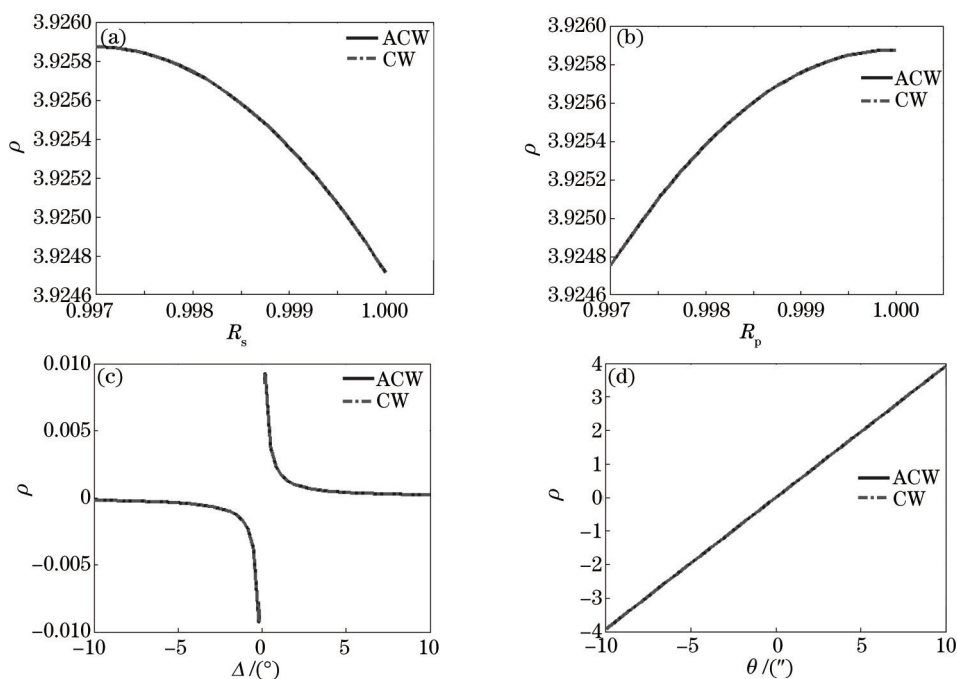


图3 顺、逆时针光椭圆率随各参数的变化

Fig.3 Ellipticity of ACW and CW versus parameters of resonator

3.2 反射率对椭圆率的影响及减小方法

从图3(a)、(b)中可以看出增大反射镜 R_s , 减小反射镜 R_p , 确保 $R_s \gg R_p$, 有利于减小腔内光椭圆率, 同时也利于抑制接近 p 态线偏光的模式起振, 避免模式竞争, 保证激光陀螺单模工作。

专利^[3]提出了通过膜系设计平移反射率-波长曲线, 使得在波长为 632.8 nm 时 $R_s \gg R_p$ 的方法, 是工程上非常实用的一种方法。

3.3 反射相移对椭圆率的影响及减小方法

考虑实际当中4个反射镜反射相移的不同配置情况下,分析反射相移对椭圆率的影响,发现两个规律,下面分别讨论。

1) 反射镜反射相移之和不为零

椭圆率与4个反射镜反射相移之和的关系如图4所示。

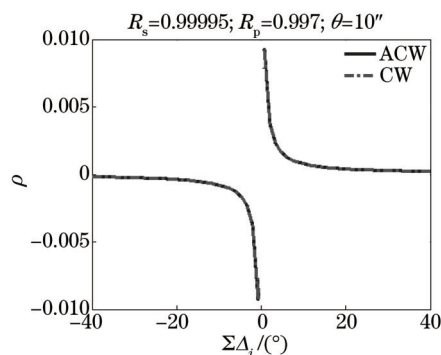


图4 顺、逆时针光椭圆率随反射镜反射相移之和的变化

Fig.4 Ellipticity of ACW and CW versus sum of anisotropisms

根据这一关系曲线,通过配置反射镜使得反射相移之和远离0°,或偏正或偏负的方法,可以显著减小椭圆率。该方法是减小平面腔激光陀螺磁灵敏度的第一种方法。

2) 反射镜反射相移之和为零

以逆时针为例,当 $\Delta_1=\Delta_2=-\Delta_3=-\Delta_4$ 时,不同光路位置的椭圆率不同,如图5(a)所示。计算结果显示,L23、L41位置椭圆率随非共面角变化最大,变化约 4×10^{-3} ;L12、L34位置椭圆率随非共面角变化最小,变化 3×10^{-6} ,远远小于L23、L41位置椭圆率变化。同理,当 $\Delta_1=-\Delta_2=-\Delta_3=\Delta_4$ 时,结果相反,如图5(b)所示。

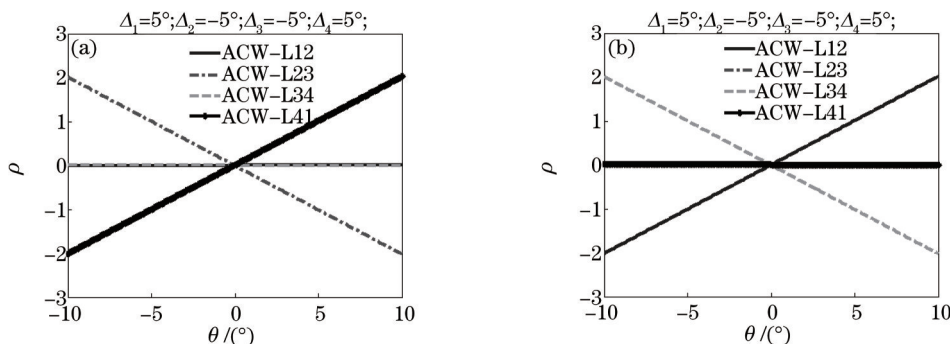


图5 不同光路段椭圆率随非共面角的变化。(a) $\Delta_1=\Delta_2=-\Delta_3=-\Delta_4$; (b) $\Delta_1=-\Delta_2=-\Delta_3=\Delta_4$

Fig.5 Ellipticity of ACW versus out-of-plan for differ segment in ring resonator. (a) $\Delta_1=\Delta_2=-\Delta_3=-\Delta_4$; (b) $\Delta_1=-\Delta_2=-\Delta_3=\Delta_4$

因此,提出配置反射相移 $\Delta_{1,2,3,4}$ 按++--或+--+分布,并使得反射相移之和为0°,谐振腔某两个相对光路的椭圆率将大大减小。该方法是减小平面腔激光陀螺磁灵敏度的第二种方法。

3.4 非共面角对椭圆率的影响及减小方法

在平面腔激光陀螺当中,引起非共面光路的误差因素包含两个方面:一是反射镜内表面与设计光路的不垂直误差,实际主要指腔体上反射镜安装面与光路毛细孔面之间的不垂直误差;二是球面反射镜在腔体安装面上的位置误差,同时准确调节球面镜位置一定程度可以补偿第一个误差因素。工程实际当中,第一个因素依赖于加工水平,第二个因素依赖于装配水平。

4 总 结

基于 Jones 矩阵的谐振腔理论,采用数值分析法,研究了激光陀螺当中平面环形谐振腔参数对腔内本征模式偏振态的影响。结果显示,反射镜反射相移对腔内模式椭圆率的影响最为显著,其次为非共面角,反射率对椭圆率的影响较小。提出了两种通过配置反射镜反射相移的方法减小腔内模式椭圆率。第一种是使得反射相移之和远离0°位置,或偏正或偏负的;第二种是使得反射相移 $\Delta_{1,2,3,4}$ 按++--或+--+分布,并之和为0°,显著减小非共面角对腔内模式在某两段相对光路中椭圆率的影响。提出的消除腔内模式椭圆率的方法,对减小平面腔激光陀螺磁灵敏度的工程化研究具有重要作用。

参 考 文 献

- 1 David A Smith. Distorted-induced magnetic field bias in the square ring laser[J]. SPIE, 1983, 0412: 229-233.
- 2 Graham J Martin. Non-planar gyros and magnetic biases[J]. SPIE, 1984, 487: 94-100.
- 3 Laurence G Cote. System for Reducing the Sensitivity of a Ring Laser Gyro to Changes in a Magnetic Field. U. S. , 4698823[P]. 1987: 10-6.
- 4 Robert H Moore, Denise Durance. Method and Apparatus for Planar Alignment of a Ring Laser Gyroscope for Minimum magnetic Bias Sensitivity. U.S., 4850708[P]. 1989: 7-25.
- 5 Mark S Grasso, Joseph P Ficalora. Ring Laser Gyroscope Having Reduced Sensitivity to Magnetic Effects. U.S., 5104224[P]. 1992: 4-14.
- 6 Chen Linfeng, Han Zonghu, Chen Yong, *et al.*. Study on characteristic of ring laser gyroscope sensitive to magnetic fields[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 974-976.
陈林峰, 韩宗虎, 陈 勇, 等. 激光陀螺磁灵敏度特性研究[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 974-976.
- 7 Yang Haodong, Yuan Jie, Wang Litao. Stress effect of output mirror in slightly nonplanar resonators[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(04): 641-645.
杨昊东, 袁 杰, 王立涛. 轻微非共面腔的输出片应力作用研究[J]. 应用光学, 2011, 32(04): 641-645.
- 8 Yan Jixiang, Wei Guanghui. Matrix Optics[M]. Beijing : Ordnance Industry Press, 1995: 144-177.
阎吉祥, 魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 144-177.
- 9 Terry A. Dorschner. Nonplanar rings for laser gyroscopes[C]. SPIE, 1983, 0412: 198-200.
- 10 Yu Wendong, Lü Wancheng, Chen Linfeng, *et al.*. Study on separate LCP from RCP based on multioscillator ring laser gyroscope with optical signal processing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814001.
于文东, 吕晚成, 陈林峰, 等. 四频差动激光陀螺左右旋模式光学解调分离方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814001.
- 11 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei, *et al.*. Theoretical analysis of polarization eigenstate and magnetic sensitivity in a ring laser gyro [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 054205.
汪之国, 龙兴武, 王 飞, 等. 激光陀螺本征模偏振态与磁敏感特性的理论研究[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 054205.

栏目编辑: 韩 峰