

文章编号:1004-4213(2011)03-0375-4

非共面腔激光陀螺复杂象散研究及其光阑设计

胡强, 严吉中, 陈林峰

(中航工业飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘 要:基于包括子午和弧矢方向完整的 4×4 旁轴光线传输矩阵, 建立了非共面谐振腔激光陀螺整体环绕传输矩阵. 根据该矩阵, 计算 q 参量矩阵, 代入实际参量, 分析并仿真计算了某型非共面谐振腔环形激光陀螺的复杂象散, 得到了光路上任意位置光斑尺寸. 实验采用 CCD 测量了该型激光陀螺输出光不同位置的光斑尺寸, 通过多点测量值双曲线拟合的方法得出束腰宽度, 仿真计算和实验结果一致. 采用高斯光束理论, 根据光场分布、光阑尺寸和位置确定衍射损耗, 设计出合适的光阑方案, 即将光阑设置在束腰位置, 其形状为圆形, 尺寸与束腰比值为 2 左右. 实验证明该方案保证了该型非共面谐振腔环形激光陀螺单横模工作.

关键词:激光陀螺; 非共面腔; 传输矩阵; 光阑

中图分类号: V241.5+58

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114003.0375

0 引言

激光陀螺^[1]是捷联惯性导航系统的理想核心元件. 作为克服激光陀螺锁区的一种成功方案, 四频差动激光陀螺^[2]采用法拉第和非共面腔结构^[3-4]的方法产生四频激光, 并最终差分掉共模误差, 消除锁区^[5]. 这种方案陀螺与抖动激光陀螺^[6]相比, 具有全固态、消除系统三轴抖动耦合影响等诸多优点, 提高了激光陀螺的准确度, 扩大了其应用范围^[7].

光阑^[8]设计的基础是光斑尺寸的计算, 平面腔环形激光陀螺由于只存在简单象散, 子午方向和弧矢方向的光斑尺寸可分别通过各自的 2×2 传输矩阵计算 q 参量得到; 而非共面腔环形激光陀螺由于存在复杂象散, 所以必须计算包括子午和弧矢方向完整的 4×4 传输矩阵, 通过求出的 T 矩阵得到非共面腔环形激光陀螺光路上任意处光斑尺寸, 并对某非共面腔环形激光陀螺的光束束腰进行了实验测量, 理论和实验结果一致. 最后, 根据计算所得光斑尺寸, 结合光阑设计方法, 设计出合适的光阑.

1 非共面腔光斑的计算和分析

1.1 传输矩阵

光线矢量经过一系列线性光线元件传播变换后, 表示为^[9]

$$\begin{pmatrix} r_{x(out)} \\ r_{y(out)} \\ \theta_{x(out)} \\ \theta_{y(out)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{x(in)} \\ r_{y(in)} \\ \theta_{x(in)} \\ \theta_{y(in)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

简化表示为

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ \theta_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{in} \\ \theta_{in} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 A, B, C, D 分别是 2×2 维矩阵, 角标 in 和 out 对应于输入和输出平面. 下面给出各线性光线元件的 4×4 传输矩阵:

1) 自由传播矩阵, 表示光线在自由空间行进 l 距离

$$\mathbf{L}(l) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & l & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2) 球面凹反射镜矩阵, 表示反射光线的变换

$$\mathbf{R}(r, \varphi) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2}{r \cdot \cos \varphi} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{2 \cdot \cos \varphi}{r} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 r 表示球面镜曲率半径, φ 表示光线入射角.

基金项目: 航空科学基金 (No. 20090818002) 资助

第一作者: 胡强 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光陀螺技术. Email: hugenuo@gmail.com

导师: 严吉中 (1958-), 男, 教授, 主要研究方向为激光陀螺及光学陀螺技术.

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2010-12-23

当 $r = \infty$ 时, 得出平面反射镜矩阵

$$\mathbf{R}_0 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

引入反射镜聚焦矩阵

$$\mathbf{F}(f_x, f_y) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{f_x} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f_y} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 $f_x = \frac{r \cdot \cos \varphi}{2}$, $f_y = \frac{r}{2 \cdot \cos \varphi}$, 分别表示象散球面镜在入射面上以及入射面正交的面上的焦距. 所以球面反射镜矩阵可表示为

$$\mathbf{R}(r, \varphi) = \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{F}\left(\frac{r \cdot \cos \varphi}{2}, \frac{r}{2 \cdot \cos \varphi}\right) \quad (7)$$

3) 像转矩阵, 表示坐标系旋转引起光线矢量的旋转

$$\mathbf{S}(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ 0 & 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 β 表示像转角.

从光传播的起始面即计算横截面开始, 各种类型传输矩阵的逆序乘积就是非共面腔激光陀螺整体环绕传输矩阵. 根据该矩阵的特性即可计算出光斑尺寸, 这将在后面详细讨论. 图 1 是非共面环形激光陀螺示意图, 图中给出从 x 轴上任意处开始计算的环绕传输矩阵(逆时针计算).

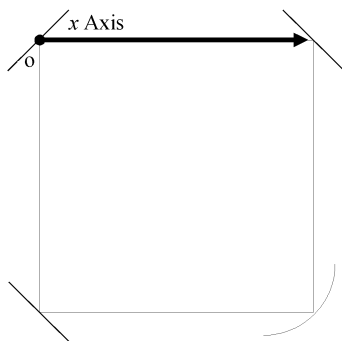


图 1 非共面环形激光陀螺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nonplanar cavity RLG

$$\mathbf{Q} = L(x)S(-\beta)R_0L(l)S(\beta)R_0L(l)S(-\beta) \cdot R(r, \varphi)L(l)S(\beta)R_0L(l-x) \quad (9)$$

1.2 光斑计算

非共面环形谐振腔中形成具有复杂象散的高斯光束, 其光场横向分布即光斑的形状是椭圆的, 并且其椭圆率和方位角是纵坐标的函数, 表达式^[10]为

$$A(r) = A_0 \exp \left[-i \frac{k}{2} \left(\frac{x^2}{q_{11}(z)} + \frac{y^2}{q_{22}(z)} + 2 \frac{xy}{q_{12}(z)} \right) \right] = A_0 \exp \left[-i \frac{k}{2} (\mathbf{r}^T \mathbf{T} \mathbf{r}) \right] \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{T}(z) = \begin{pmatrix} \frac{1}{q_{11}(z)} & \frac{1}{q_{12}(z)} \\ \frac{1}{q_{12}(z)} & \frac{1}{q_{22}(z)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{1}{q_{nm}} = \frac{1}{r_{nm}} - i \frac{2}{k \omega_{nm}}, \quad m, n = 1, 2 \quad (12)$$

如果 T 是带有不同特征值的正交矩阵, 则光束具有简单的象散, 这就转化为平面环形谐振腔的情况; 如果矩阵 T 不是正交的, 则光束具有复杂的象散, 这是非共面谐振腔的情况, 本文研究此种情况.

对于一个光学系统, 设入射面和出射面的 T 矩阵为 T_{in} 和 T_{out} , 那么

$$T_{out} = (C + DT_{in}) \cdot (A + BT_{in})^{-1} \quad (13)$$

与平面谐振腔 q 参量自洽类似, 具有复杂象散的非共面谐振腔的要求 T 矩阵自洽, 从而求出矩阵 T

$$T = (C + DT) \cdot (A + BT)^{-1} \quad (14)$$

求出 T 后, 容易得到光斑尺寸

$$\omega_1 = \left(-\frac{\lambda}{\pi A_i} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$\omega_2 = \left(-\frac{\lambda}{\pi B_i} \right)^{1/2} \quad (16)$$

设谐振腔腔长为 $4l = 0.204$ m, 所以单边毛细孔长为 $l = 0.051$ m, 非共面角为 $\beta = 16^\circ$, 球面镜曲率半径为 $r = 9$ m. 由前面的公式可以得到光斑尺寸, 如图 2 所示, 其中主、次坐标轴分别表示 ω_1 和 ω_2 .

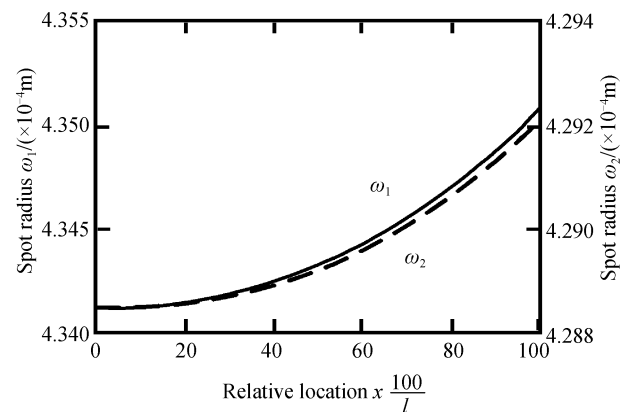


图 2 任意位置光斑尺寸

Fig. 2 Spot radius of Gaussian beam at any location

由图 2 可知, 光阑处于 $x = 0$ 处, 即球面镜对角方向的平面镜处.

1.3 光斑测量

束腰测量的基本原理是: 采用 CCD 测量不同处光斑, 通过多点测量值双曲线拟合法得出束腰宽度. (测量方法见图 3).

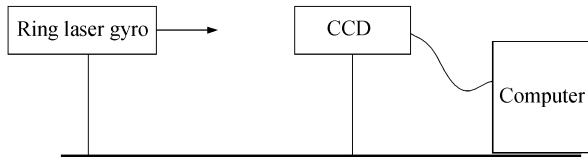


图3 光斑测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spot measurement

当光沿 z 轴方向传播, z 轴上任一处光斑尺寸 d_σ 表示为

$$d_\sigma = \sqrt{a+bz+cz^2} \quad (17)$$

根据多点测量数据,按照式(17)拟合即可获得束腰尺寸.

1.4 数据分析

测量值和计算值(表1)十分接近,相对误差小于4%.

表1 光斑计算值和测量值对比

Table 1 Comparison of theoretical and measured value of spot

Spot radius/mm	Theoretical value	Measured value	Relative error/(%)
ω_1	0.434	0.446	2.737
ω_2	0.429	0.443	3.300
ω_1/ω_2	1.012	1.007	0.545

2 光阑设计

2.1 光阑设计方法

在激光陀螺中,为了达到高准确度,必须建立 TEM_{00q} 模的振荡条件.通常设计光阑选择横向振荡类型,具体的,正确地设计光阑的位置和尺寸,使得对于基模 TEM_{00q} 的损耗足够小,而对于高阶横模损耗大得多.

严格解决光阑光学效应的问题必须考虑反射镜上光波能量部分的反射、光阑上的衍射、增益介质径向的不均匀性,可通过半经典的方法实现.但是,精确计算十分复杂.一般采用高斯光束理论计算损耗,根据模场的分布、光阑尺寸和位置确定衍射损耗的公式即

$$R_{mm} = 1 - \iint_S a_{mm}^2 ds \quad (18)$$

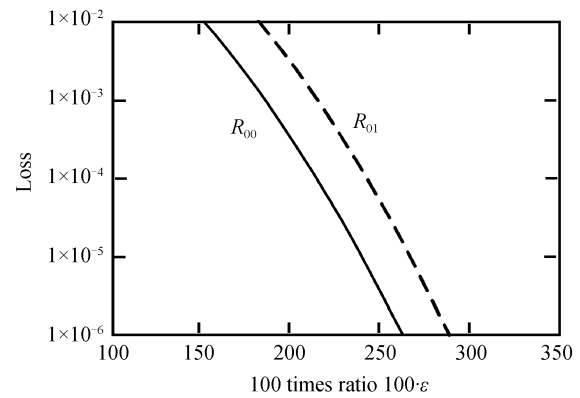
式中 a_{mm}^2 表示归一化高斯光束能量横向分布, m, n 表示横模阶数.

设计光阑的原则是光阑的几何尺寸 a 和 b 正比于相应的光斑尺寸 ω_1 和 ω_2 , 设比值为

$$\epsilon = \frac{a}{\omega_1} = \frac{b}{\omega_2} \quad (19)$$

所以 $R_{01} = R_{10}$. 经计算得到损耗如图4.

根据得到的损耗 R_{00} 、 R_{01} 及其关系,选择 ϵ 为2左右.

图4 不同 ϵ 时的损耗值Fig. 4 Loss curve corresponding to ϵ

2.2 光阑设计方案

将光阑设置在 Gaussian 光束束腰位置,这样可以更好地限制高阶模.由 $\omega = \omega_1 \approx \omega_2$, 因此可将光阑设计成半径为 $\epsilon \cdot \omega$ 圆形,以保证工艺性.最终,通过实验验证,证明该光阑可以保证非共面环形激光陀螺单横模工作,并且基模损耗很小(见图5).

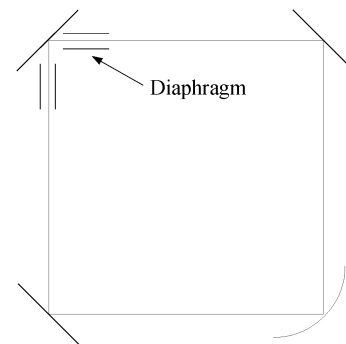


图5 光阑设计方案

Fig. 5 Plan of designed diaphragm

3 结论

利用光线传输矩阵的方法,全面分析了非共面腔激光陀螺的光斑情况,并最终设计出了合适的光阑,实验证明光阑设计满足在基模损耗很小情况下能够限制高阶模产生,实现了四频差动激光陀螺单横模运行.

参考文献

- [1] 高伯龙,李树棠.激光陀螺[M].长沙:中国人民解放军国防科技大学出版社,1984:1-5.
- [2] 姜亚南.环行激光陀螺[M].北京:清华大学出版社,1995:182-191.
- [3] YANG Jian-qiang, LUO Yun, LIAO Dan. Study on the startup null drift characteristic of four-frequency differential laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1709-1714. 杨建强,罗云,廖丹.四频差动激光陀螺开机零漂特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1709-1714.
- [4] WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu, WANG Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyro-scope with non-planar resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2892-2897.

- 汪之国,龙兴武,王飞. 异面腔四频差动激光陀螺的色散平衡[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2892-2897.
- [5] LIU Yuan-zheng, WANG Jing-xian, MA Yang-hua, *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.
- [6] SONG Rui, TANG Jian-xun, ZHOU Jian, *et al.* Effect of dither parameters on null-shift stability and angle random walk of dithered laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2291-294.
- 宋锐,汤建勋,周健,等. 抖动参量对机抖激光陀螺零偏稳定性与角随机游走的影响[J]. 光子学报, 2010, **30**(8): 2291-294.
- [7] WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu, WANG Fei, *et al.* Magnetic sensitivity and optimal operating point of four-frequency differential laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3202-3206.
- 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]. 光子学报, 2009, **29**(11): 3202-3206.
- [8] 周炳琨,高以智,陈家骅,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009: 210-211.
- [9] 阎吉祥,魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995: 26-33.
- [10] PLACHENOV A B, KUDASHOV V N, RADIN A M. Analytical description of a Gaussian beam in a ring resonator with a nonplanar axial contour and an even number of mirrors[J]. *Quantum Electronics*, 2009, **39**(3): 261-272.

Study on the Complex Astigmatism in Nonplanar Cavity RLG and Design of the Diaphragm

HU Qiang, YAN Ji-zhong, CHEN Lin-feng

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

Abstract: Based on 4×4 matrix including meridian and latitude, the round-trip matrix of nonplanar cavity was established. According to the matrix, the q parameters matrix was calculated, the complex astigmatism in some nonplanar cavity ring laser gyro (RLG) was analyzed, and the spot radius of Gaussian beam at any location was obtained theoretically. Then the spot radii of the out-cavity Gaussian beam were measured by CCD, and the Gaussian beam waist was obtained by hyperbola fitting. The result was consistent with the theoretical one. According to spot radii, diaphragm radii and location, the diffraction loss was obtained. The designed diaphragm located at the Gaussian beam waist is circular, and the ratio of diaphragm radius to waist radius is about 2. The designed scheme guarantees the nonplanar cavity RLG works with single TEM₀₀ mode.

Key words: RLG; Nonplanar cavity; Round-trip matrix; Diaphragm