

激光陀螺磁灵敏度特性研究

陈林峰 韩宗虎 陈 勇 王金林 吉翠萍

(西北工业大学, 西安 710072)

摘 要 分析、计算了激光陀螺的磁灵敏度特性, 并进行了磁灵敏度试验. 试验结果及分析表明: 在腔体加工准确度不变的情况下, 采用合理的设计可以大大降低激光陀螺在某些方向上的磁灵敏度, 同时磁试验结果对于设计激光陀螺的磁屏蔽结构具有一定的实用价值.

关键词 激光陀螺; 磁灵敏度; 磁屏蔽

中图分类号 U666.12+3 **文献标识码** A

0 引言

基于 SAGNAC 效应的激光陀螺是捷联惯导系统的理想元件. 影响激光陀螺准确度的因素有: 激活气体的流动效应^[1](朗缪尔流)、多模耦合效应、锁区^[2]、磁场等. 这其中, 由磁场引起的零偏变化是影响激光陀螺准确度的一个重要的因素. 实验发现: 使用线偏振光工作的激光陀螺的磁灵敏度约为几度/小时/奥斯特, 而对于使用圆偏振光工作的激光陀螺, 磁灵敏度可达几千度/小时/奥斯特. 即使经过差动后的四频激光陀螺, 其磁灵敏度仍可达几十度/小时/奥斯特^[1]. 因此, 必须采取措施来降低激光陀螺的磁灵敏度. 对平面腔线偏振光激光陀螺, 降低磁灵敏度最直接的方法是提高腔体的加工准确度使得腔体更趋于理想的平面腔, 但这会给腔体加工增加很大的难度; 文献[3]提出了一种提高反射镜的双折射来降低激光陀螺磁灵敏度的方法, 但对反射镜镀制提出了新的挑战; 此外, 采用性能优良的磁屏蔽材料对激光陀螺进行屏蔽来降低磁灵敏度.

本文从理论上分析了影响激光陀螺磁灵敏度的主要因素, 并对采用圆偏光工作的激光陀螺磁特性进行计算、试验验证和分析. 试验结果及分析表明: 在腔体加工准确度、反射镜镀制及陀螺磁屏蔽不变的情况下, 采用合理的设计可以大大降低激光陀螺在某些方向上的磁灵敏度, 同时磁试验结果对激光陀螺的磁屏蔽罩设计有一定的帮助作用.

1 激光陀螺的磁灵敏度特性

1.1 线偏振四边形激光陀螺的磁灵敏度特性

具有理想反射镜和理想平面腔的激光陀螺, 其腔内运行的是线偏振光. 但是考虑到以下一些实际因素: 腔体的加工不可能保证理想的平面腔; 反射镜的双折射不为零; 反射镜的非圆对称或者说反射镜

受到应力双折射的作用. 这些原因使得腔内运行的线偏振光产生一定的椭圆度, 从而导致陀螺对磁场的敏感.

参考文献[3]中给出了四边形平面腔激光陀螺的磁灵敏度为

$$MS = \frac{1}{K} \frac{4 \times kl \times \epsilon}{\gamma} \times \frac{C}{L} \quad (1)$$

式中: K 为标度因数, 单位 Pulse/arcsec; MS 为磁灵敏度, 单位 $^{\circ}/h/Oe$; kl 为法拉第旋转角度, 单位 rad/Oe; ϵ 为非共面角, 单位 arcsec; γ 为反射镜的双折射, 单位 $^{\circ}$; C 为真空中的光速, 单位 m/s; L 为腔长, 单位 m.

取 $\epsilon = 1$ arcsec; $kl = 10^{-5}$ rad/Oe; $\gamma = 2^{\circ}$; $C = 3 \times 10^8$ m/s; $L = 0.2$ m, $K = 0.3831$ P/"; 代入式(1)计算得到 $MS = 21.7^{\circ}/h/Oe$. 显然, 这是一项较大的误差源, 必须加以控制. 参考文献[3]给出了相应的措施: 控制反射镜的双折射. 当反射镜的双折射 $\gamma = 0$ 时, 磁灵敏度为 0. 但是实际上 $\gamma = 0$ 是不可能达到的. 从式(1)可知, MS 与 γ 成反比, 因此使用 $\gamma = 40^{\circ}$ 的反射镜的激光陀螺的磁灵敏度要比使用 $\gamma = 2^{\circ}$ 的磁灵敏度降低 20 倍.

因此, 只要在镀膜时在控制好反射率等参量的同时控制好反射镜的双折射, 可以大大降低四边形激光陀螺因为腔体的微小非共面角而导致的较大的磁灵敏度.

1.2 圆偏振光激光陀螺的磁灵敏度特性

对使用圆偏振光工作的激光陀螺, 磁场对陀螺性能的影响主要是纵向塞曼效应引起的陀螺的零偏变化^[4]. 所谓的塞曼效应是指处于外磁场作用下发光介质的谱线发生分裂现象. 如果迎着磁场方向观测沿磁场方向辐射出来的光波, 能够看到两条圆偏振光谱线, 频率高的那条谱线是右旋偏振光, 频率低的那条谱线是左旋偏振光, 这种现象称为“纵向塞曼效应”. 右旋偏振光和左旋偏振光的中心频率分别为

$$\gamma_{RCP} = \gamma_0 + \Delta\gamma_z \quad (2)$$

$$\gamma_{LCP} = \gamma_0 - \Delta\gamma_z \quad (3)$$

γ_0 为无磁场时发光介质谱线的中心频率; $\Delta\gamma_z$ 是频率分裂值, 其大小为

$$\Delta\gamma_z = g \frac{\mu_B B}{h} \quad (4)$$

式中: μ_B 是玻尔磁子, 其值为 $9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$; g 是兰德因数, 其大小与谱线能级有关, 对激光陀螺常用的 0.6328 的氩氦激光谱线, $g \approx 1.3$; B 是外加磁场的磁感应强度; h 是普朗克常量, 其值为 $6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. 计算得到

$$\Delta\gamma_z = 1.8 \text{ MHz/Oe}$$

由纵向塞曼效应引起的零偏变化为

$$MS = \frac{1}{K} 2\Delta\gamma_z \times SFC \quad (5)$$

SFC 是相对比例因子的修正符号, 其大小约为 1×10^{-3} , 对腔长为 0.2 m 的激光陀螺, 标度因数 $K = 0.3831 \text{ P}''$, 带入式(5)得到: $MS = 9397 \text{ }^\circ/(\text{h} \cdot \text{Oe}^{-1})$. 可见, 采用圆偏光工作的激光陀螺的磁灵敏度远大于采用线偏光工作的陀螺.

2 激光陀螺的磁灵敏度特性试验及结果分析

2.1 激光陀螺的磁灵敏度特性试验

本文选取了一种采用圆偏光工作的激光陀螺进行了磁灵敏度试验, 试验方法及步骤如下:

1) 将陀螺置于磁试验台上, 接通陀螺测试设备, 启动陀螺进行预热; 2) 待陀螺输出趋于稳定后, 沿 Z 轴(陀螺的 XYZ 定义见图 2) 的正向施加磁场并维持数分钟, 记录磁场的大小 B_+ 和陀螺输出的脉冲数 N_+ . 撤掉磁场, 等待数分钟, 沿 X 轴的负向施加磁场, 记录磁场的大小 B_- 和陀螺输出的脉冲数 N_- ; 3) Y 向和 X 向的试验同 Z 向.

按式(6)计算各方向的磁灵敏度 MS

$$MS = \frac{|N_+ - N_-|}{K \times (|B_+| + |B_-|) \times T} \quad (6)$$

式中: T 为采样间隔, 一般取为 10 s; K 为被测陀螺的标度因数, 其值为 $0.5995 \text{ P}''$.

为了保证试验的准确性, 应该保证: 1) 陀螺的输出状态比较稳定, 因此给陀螺一定的预热时间; 2) 基本保证定义的陀螺 XYZ 轴与磁试验台磁场的 XYZ 轴重合. 试验数据见表 1.

表 1 试验陀螺 1 磁试验结果

D	Z ₊	Z ₋	Y ₊	Y ₋	X ₊	X ₋
B	125	79	80	122	98	105
N	26250	-10876	4448	3471	3441	4956
M	3035.6		80.7		124.5	
S						

表中: D 为磁场方向; B 为磁场强度大小 μT

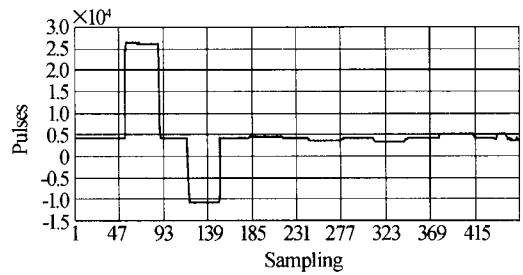


图 1 试验陀螺 1 磁灵敏度试验曲线

Fig. 1 The magnetic sensitivity test data of gyro 1

为了保证试验数据的置信度, 本文又对另外 2 个同类型的采用圆偏光工作的激光陀螺进行了磁灵敏度试验, 试验数据及计算结果见表 2 及表 3.

表 2 试验陀螺 2 磁试验结果

D	Z ₊	Z ₋	Y ₊	Y ₋	X ₊	X ₋
B	100	100	100	100	100	100
N	-18918	18836	-4513	-3399	-3141	-4490
M	3148.7		92.9		112.5	
S						

表 3 试验陀螺 3 磁试验结果

D	Z ₊	Z ₋	Y ₊	Y ₋	X ₊	X ₋
B	100	100	100	100	100	100
N	11354	-26745	-3534	-4094	-4598	-3280
M	3177.6		46.7		109.9	
S						

2.2 试验结果分析

图 2 中, A, B, C, D 四面反射镜组成环行谐振腔; H 为磁场方向; 试验结果表明: 该陀螺在 Z 方向的磁灵敏度远大于 X 和 Y 方向的磁灵敏度. 对该陀螺进行分析发现其偏频结构在水平方向(X 向和 Y 向) 由于具有对称性的对消作用而磁灵敏度很小. 理论上只要完全对称, 则磁灵敏度为零; 而在 Z 向无任何对消作用, 因而 Z 向的磁灵敏度远大于 X 向和 Y 向.

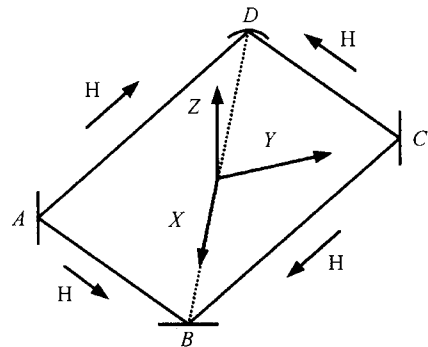


图 2 激光陀螺谐振腔与磁场方向

Fig. 2 Diagram of laser gyro resonator and direction of magnetic fields

实际上, 由于腔体加工等因素不可能保证腔内运行的激光光束关于 X 轴和 Y 轴完全对称, 导致陀螺在 X, Y 方向的磁灵敏度不为 0. 当在 X 向和 Y

向施加 1 奥斯特大小的磁场强度时,计算得到的 X 向和 Y 向的零偏最大变化(磁灵敏度)为

$$\Delta\Omega_{\max}^{M_x} = \Delta\Omega_{\max}^{M_y} = \frac{1}{K_{SF}} 4 \cos 45^\circ \sin(\Delta\theta_1) M_0 \quad (7)$$

式中: K_{SF} 为被测陀螺的几何标度因数,其值为 $0.2998 \text{ P}''$. 取 $\Delta\theta_{1\max} = 30'$, $M_0 = 3600 \text{ Hz/Oe}$,代入式(7)得到

$$\Delta\Omega_{\max}^{M_x} = \Delta\Omega_{\max}^{M_y} = 296.6^\circ / (\text{h} \cdot \text{Oe}^{-1})$$

Z 方向外加磁场强度 1 奥斯特时零偏变化为

$$\Delta\Omega^{M_z} = 2394.3^\circ / (\text{h} \cdot \text{Oe}^{-1})$$

要使该陀螺的磁灵敏度降至 $0.3^\circ / (\text{h} \cdot \text{Oe}^{-1})$, 磁屏蔽系数必须大于 10000 倍.

计算得到的陀螺的磁灵敏度与试验测得的磁灵敏度有一定的偏差,可能的原因是:相对比例因子的修正系数 SFC 的取值是一个大致的数值,实际上 SFC 的值可能大于 1×10^{-3} . 此外,在 X, Y 方向上计算得到的是最大可能的磁灵敏度,实际测得的磁灵敏度要小于该值.

3 结论

磁敏感性是激光陀螺一项较大的误差源,使用

圆偏光工作的激光陀螺的磁灵敏度远大于使用线偏光工作的陀螺. 从理论上分析了影响激光陀螺磁灵敏度的主要因素,并对采用圆偏光工作的激光陀螺磁特性进行计算、试验验证和分析. 试验结果及分析表明:在腔体加工准确度、反射镜镀制及陀螺磁屏蔽不变的情况下,采用合理的设计可以大大降低激光陀螺在某些方向上的磁灵敏度.

参考文献

- 1 高伯龙,李树棠. 激光陀螺. 长沙:中国人民解放军国防技术大学出版社,1984. 48~58
Gao B L, Li S T. Laser gyro. Changsha: Press of National Defense Technology University of PLA, 1984. 48~58
- 2 姚合宝,韩宗虎,陈林峰,等. 抖动偏频激光陀螺速率阈值特性研究. 光子学报,2001,30(9):1085~1087
Yao H B, Han Z H, Chen L F, et al. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(9):1085~1087
- 3 Graham J M. Non-planar gyros and magnetic biases. SPIE, 1984, 487:94~100
- 4 姜亚南. 环行激光陀螺. 北京:清华大学出版社,1995. 187~189
Jiang Y N. Ring laser gyro. Beijing: Press of Tsing Hua University, 1995. 187~189

Study on Characteristic of Ring Laser Gyroscope Sensitive to Magnetic Fields

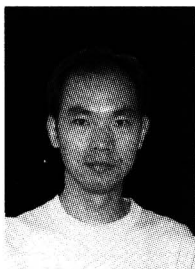
Chen Linfeng, Han Zonghu, Chen Yong, Wang Jinlin, Ji Cuiping

Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072

Received date: 2005-04-13

Abstract The characteristic of ring laser gyroscope sensitive to magnetic fields was analyzed and the magnetic sensitivity test was performed. The results of test and analysis show that reasonable design can greatly decrease magnetic sensitivity of ring laser gyroscope in certain direction. This result of test is valuable to the design of magnetic shielding configuration of ring laser gyroscope.

Keywords Ring laser gyroscope; Magnetic sensitivity; Magnetic shielding



Chen Linfeng was born in Hunan Province in 1974. He received B. S. degree in the Department of Aircraft Manufacturing Engineering, Northwestern Polytechnic University (NWPU) in 1996 and M. S. degree on inertial technology in Flight Automatic Control Research Institute (FACRI) in 1999. Now he is pursuing his Ph. D. degree in NWPU. His main interests focus on inertial sensors.