

doi: 10.3788/gzxb20124106.0668

零闭锁激光陀螺磁敏感特性研究

曹耀辉, 韩宗虎, 陈林峰, 傅鑫

(中航工业飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要:与腔内运行线偏振光的抖动陀螺相比,腔内运行圆偏振光的零闭锁激光陀螺对磁场更为敏感.为了减小零闭锁激光陀螺的磁敏感性,理论分析了其磁敏感特性.当左、右旋陀螺的比例因子修正相等时,陀螺零偏不随磁场的变化而变化,同时陀螺比例因子线性度也将得到改善.试验测试了零闭锁激光陀螺的磁敏感性,结果表明陀螺存在磁不敏感点.试验结果与理论分析吻合.与传统的被动磁屏蔽方法相比,通过主动控制使得零闭锁激光陀螺工作在磁不敏感点的方法对于降低该陀螺的磁灵敏度和提高准确度具有实用价值.

关键词:零闭锁激光陀螺;塞曼效应;磁不敏感点;磁灵敏度

中图分类号: V241.5+58

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0668-4

0 引言

激光陀螺作为一种原理先进的光电式惯性敏感仪表,具有启动快、准确度高、动态范围宽、输出信号数字化等优点,已经成为现代捷联惯导系统的核心传感器.目前,基于法拉第偏频技术和非共面谐振腔技术的零闭锁陀螺是继抖动激光陀螺之后的第二代激光陀螺,兼具高准确度和全固态的特点^[1].与抖动激光陀螺相比,零闭锁激光陀螺彻底去掉了机械活动机构,不存在抖动耦合和过锁区问题,随机游走系数小^[1].美国 Northrop Grumman 公司研制的 S-18 型零闭锁激光陀螺 (Zero-lock Laser Gyro, ZLG) 已广泛应用于 F22 等西方现役装备.

尽管零闭锁激光陀螺具有很多优点,但其谐振腔内运行的是圆偏振光,对外界磁场更为敏感^[2-3],要提高其准确度,必须降低磁场对陀螺的影响.通常采用被动磁屏蔽的方法,即在陀螺外壳施加一层或多层磁屏蔽.磁屏蔽效果一般能做到百倍左右,而高准确度的陀螺磁屏蔽系数需要做到千倍以上^[2].同时,采用被动磁屏蔽会使陀螺体积、重量增加,还会导致系统抗震性能的变差.因此,仅仅依靠磁屏蔽来减小磁场对陀螺的影响难以满足零闭锁激光陀螺对磁敏感性的要求,需要从陀螺本体出发寻找降低磁敏感性的方法^[4].

文献^[5-6]对异面腔四频激光陀螺中工作点对磁敏感性的影响进行了实验研究,通过在陀螺上施加纵向交流磁场调制,采用相敏解调的方式提取陀

螺工作点.与该方法相比,本文采用静态设置的方式调节陀螺工作点,控制反馈量取自陀螺稳频控制回路,通过稳频误差与工作点的传递关系改变工作点.该方法电路实现简单,不涉及微弱信号的提取与放大,降低了电子线路对信噪比的要求.通过实验验证,该方法能够满足控制准确度要求,同时兼顾了电子控制线路的实用性和小型化的工程需求.

本文从零闭锁激光陀螺的拍频公式出发,分析了其磁敏感性与左、右旋激光陀螺的相对比例因子相关,当左、右陀螺的比例因子修正相等时,陀螺零偏不随磁场的变化而变化,同时陀螺比例因子线性度也将得到改善.试验测试了零闭锁激光陀螺不同偏置工作点下的磁敏感性,结果表明:陀螺存在理想工作点对磁场的变化不敏感.相对于传统的被动磁屏蔽方法,通过主动控制使得零闭锁激光陀螺工作在磁不敏感点的方法对于降低该陀螺的磁灵敏度具有重要意义.

1 零闭锁激光陀螺磁敏感特性分析

1.1 零闭锁激光陀螺工作原理

零闭锁激光陀螺采用非共面腔技术产生互异频率分裂,利用法拉第磁光效应,使得谐振腔内正、反两束光频率产生非互易分裂,陀螺工作点远离锁区.在零闭锁激光陀螺的谐振腔中运转着两对正交圆偏振光,分别构成左旋激光和右旋激光陀螺,其拍频公式为^[1]

基金项目:航空科学基金(No. 20090818002)资助

第一作者:曹耀辉(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光陀螺技术. Email: caoyh-0329@163.com

导师(通讯作者):韩宗虎(1961-),男,研究员,主要研究方向为激光陀螺及光学陀螺技术. Email: hanzonghu@sina.com

收稿日期:2011-11-18;修回日期:2012-01-06

$$\omega = 2(1 + \overline{\text{SFC}}) \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda} \omega_r + (\text{SFC}_L - \text{SFC}_R) \cdot$$

$$(\omega_H + \omega_B) - 4KV \overline{\text{SFC}} - 2 \left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right) (\gamma_2 - \gamma_1) \quad (1)$$

式中: $\overline{\text{SFC}} = (\text{SFC}_L + \text{SFC}_R)/2$; SFC_L 为左旋陀螺的比例因子修正项; SFC_R 为右旋陀螺的比例因子修正项; ω_r 为陀螺转动的角速度; ω_H 为法拉第偏频量; ω_B 为磁场引起的圆频率分裂; S 为环形光路所包围的面积; $\langle L \rangle$ 为环路的总光程; KV 为非均匀展宽的半宽度;

$$\overline{\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right)} = \left(\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right)^L + \left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right)^R \right) / 2$$

($\gamma_2 - \gamma_1$) 为顺逆时针光损耗差; SFC_L 、 SFC_R 是频率、损耗等参量的函数。

1.2 塞曼效应

磁场之所以能够影响激光陀螺的准确度是因为外加磁场能够使激光陀螺放电管中的增益原子产生能级分裂(即塞曼效应)^[7]。

如图 1 所示,当增益区存在磁场时,其增益谱线将会分裂,产生 σ^+ 、 σ^- 及 π 三条谱线。其中, π 谱线与未加磁场时相同; $\Delta\nu_B$ 表示由磁场引起的谱线分

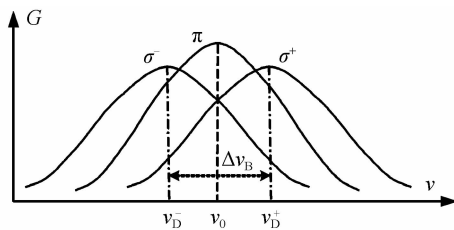


图 1 塞曼效应
Fig. 1 Zeeman effect

裂值,且三条谱线发光的偏振方向有所不同; σ^- 为电矢量垂直于磁场方向的平面内的左旋圆偏振光, σ^+ 为电矢量垂直于磁场方向的平面内的右旋圆偏振光, π 为电矢量平行于磁场方向的线偏振光。对于 $0.6328 \mu\text{m}$ 的激光器来说分裂值 $\Delta\nu_B$ 为^[1]

$$\nu_B/B \approx 3.5 \text{ MHz/Gs}$$

式中 B 是作用于增益区的磁感应强度。与频裂只有 8 KHz/Gs ^[2] 的线偏振光相比,其频裂要大数百倍,所以要实现高准确度的零闭锁激光陀螺,除了被动磁屏蔽之外,还需要主动控制措施。

1.3 零闭锁激光陀螺的磁敏感特性

磁场对激光陀螺准确度的影响主要体现在磁场引起激光陀螺零偏的变化上。

若只考虑磁场对陀螺零偏的影响,根据式(1),考虑四频陀螺拍频公式中与磁场相关的项($\text{SFC}_L - \text{SFC}_R$)($\omega_H + \omega_B$),受增益曲线的不对称性和腔内损耗差异的影响,一般 $\text{SFC}_L \neq \text{SFC}_R$,导致陀螺对磁场敏感。同时,从式(1)出发,通过控制相对比例因子的

影响因素,使得零闭锁激光陀螺工作在 $\text{SFC}_L = \text{SFC}_R$ 的工作点下,其结果将大大降低磁场对陀螺准确度的影响。

1.4 比例因子线性度的改善

零闭锁激光陀螺工作于磁不敏感点时, $\text{SFC}_L = \text{SFC}_R$,其比例因子的表达式为 $2(1 + \overline{\text{SFC}}) \frac{4A}{\langle L \rangle \lambda}$,其中, $\overline{\text{SFC}} = (\text{SFC}_L + \text{SFC}_R)/2$, SFC_i ($i=L, R$) 为差分量以及光强的偶函数,当 $\text{SFC}_L = \text{SFC}_R$ 时, $\overline{\text{SFC}} = (\text{SFC}_L + \text{SFC}_R)/2$ 的导数为零,从而四频陀螺的比例因子线性度也能够得到改善。

2 零闭锁激光陀螺磁灵敏度实验方法与结果分析

2.1 试验方法

零闭锁激光陀螺的工作点指谐振腔内四个模式频率的平均值与增益曲线峰值频率之差。调节陀螺的工作点位置,即通过改变施加在压电陶瓷组件上的输入电压,改变激光谐振腔的腔长,得出稳频误差与增益曲线的关系^[8]如图 2。从实验结果可以看出:在增益曲线顶部附近,零闭锁激光陀螺稳频误差与工作点具有较好的线性关系。

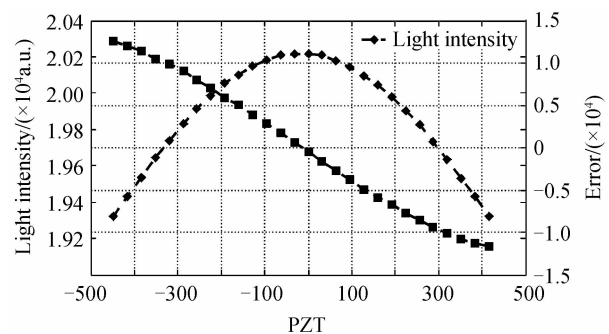


图 2 稳频误差与工作点的关系
Fig. 2 The relation of frequency stabilization error and operating point

通常情况下,陀螺工作在稳频误差为零的位置。本实验利用稳频误差与工作点的线性关系,通过相关控制使陀螺工作在非零误差点,以使得陀螺工作在增益曲线的不同位置(工作点)^[9]。在各个工作点下测试陀螺的磁敏感性,其基本原理图见图 3。

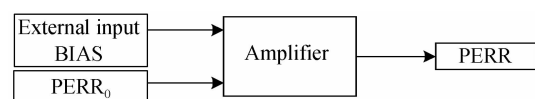


图 3 控制原理
Fig. 3 Schematic control diagram

在图 3 中, $\text{PERR} = K * (\text{PERR}_0 + \text{BIAS})$,以最终误差 $\text{PERR} = 0$ 为稳频依据,当有外部输入 BIAS 时,可将 PERR_0 置于任意非零位置,根据 PERR_0 与工作频率的线性关系,可以将陀螺的工作点控制

在模顶附近的任意位置. 误差信号与外部输入的关系见表 1.

表 1 误差信号与外部输入的关系

Table 1 The relation of error signal and external input

PERR	PERR ₀	BIAS
0	-A	A
0	-2A	2A
0	-3A	3A

2.2 不同工作点下陀螺零偏随磁场的变化测试

实验中磁场的变化通过一对亥姆霍兹线圈来实现, 改变线圈中的电流即可实现磁场大小的变化. 在某一固定外部偏置电压 BIAS 下, 即某一工作点下, 通过改变陀螺所处的磁场, 测试陀螺的零偏输出, 得到陀螺零偏在某一工作点下随磁场的变化情况^[10]. 通过扫描不同工作点在磁场变化下的零偏输出, 最终找到陀螺对磁场不敏感的工作点.

通过实验发现, 陀螺存在对磁场不敏感的工作点, 即在此工作点下, 陀螺零偏几乎不随磁场的变化发生变化, 此工作点的磁灵敏度也最小, 详见 2.3 节分析.

图 4 中, 横轴表示产生磁场的电流大小, 即磁场大小, 纵轴表示陀螺零偏, 曲线斜率即为某工作点下陀螺的磁敏感性. $\Delta=0$ 的曲线表示工作点在增益曲线峰值处, 可以看出此点的磁敏感性较大. $\Delta=-3$ 的曲线表示陀螺工作点与峰值压电码值相差-3, 在 $\Delta=-3$ 的工作点下, 陀螺零偏随磁场的变化很小, 此工作点下磁敏感性最小.

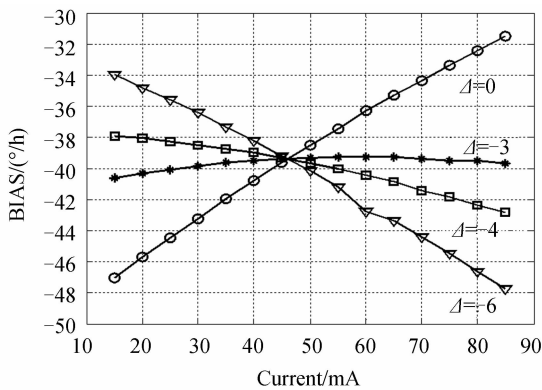


图 4 不同工作点下陀螺零偏随磁场的变化曲线
Fig. 4 ZLG bias versus magnetic field for different operating point

2.3 不同工作点下陀螺磁灵敏度测试

在 2.2 节实验结果的基础上, 测试了 3 个陀螺不同工作点的磁灵敏度. 实验采用扫描工作点的方式, 即在某一固定磁场下, 通过连续改变外部电压输入, 使工作点持续线性变化, 再加反向固定磁场, 推移工作点获得零偏, 即可获得每个工作点的磁灵敏度数据, 具体见图 5. 试验结果表明, 不同陀螺磁不

敏感点所对应的 PZT 偏置有所差异; 控制工作点之后, 陀螺的磁灵敏度较控制之前降低 20 多倍, 再加上 100 倍左右的被动磁屏蔽 (很容易实现), 即可满足高精度激光陀螺对磁敏感性的要求.

表 2 不同工作点磁灵敏度对比

Table 2 the contrast of magnetic sensitivity for different operating point

Experiment conditions	Normal point	Controlled point	Reduced degree	
Magnetic sensitivity (°/h/Gs)	ZLG1	5.98	0.24	25
	ZLG2	5.24	0.24	22
	ZLG3	4.82	0.18	26

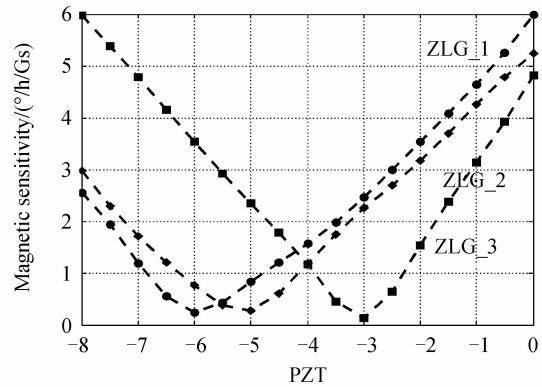


图 5 不同陀螺不同工作点磁灵敏度
Fig. 5 Magnetic sensitivity for different gyros of operating point

2.4 试验结果分析

根据图 4 的实验结果, 随着工作点的变化, 零偏随外加磁场的变化从正斜率变为负斜率, 即存在某个理想工作点, 使零偏对磁场的变化斜率为零, 即能够使零闭锁激光陀螺对磁场不敏感. 在 2.3 节的实验结果中可以看出, 三个陀螺的磁不敏感点所对应的 PZT 偏置不同, 因为比例因子修正是工作频率、损耗等参量的函数, 各个陀螺损耗的差异导致其磁不敏感点位置不同, 但陀螺的磁灵敏度较控制之前均降低了 20 多倍以上. 本实验所采用的主动控制工作点减小陀螺磁敏感性的方法在工程应用中易于实现, 具有实用价值.

3 结论

磁敏感性是激光陀螺一项较大的误差源, 使用圆偏光工作的零闭锁激光陀螺的磁灵敏度远大于使用线偏光工作的抖动激光陀螺, 必须采取措施予以降低. 本文通过对零闭锁激光陀螺的磁敏感特性的理论分析, 发现当左、右陀螺的比例因子修正相等时, 陀螺零偏不随磁场的变化而变化, 同时陀螺比例因子线性度也将得到改善. 此外, 从试验验证了零闭锁陀螺磁不敏感点的存在性, 与理论分析吻合. 实验结果显示, 通过主动控制使得零闭锁激光陀螺工作

在磁不敏感点,其磁灵敏度可以降低 20 倍以上,在此基础上,辅助以简单的被动磁屏蔽,可以实现零闭锁激光陀螺的极低磁灵敏度.该方法对于降低该陀螺的磁灵敏度和提高准确度具有重要意义.

参考文献

- [1] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1995: 182-189.
- [2] 高伯龙,李树堂. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984: 73-85.
- [3] CHEN Lin-feng, HAN Zong-hu, 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.
- [4] VOLK C H, GILLESPIE S C, MARK J G, *et al.* Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications [EB/OL]. [2010-04-06]. http://www.es.northropgrumman.com/media/whitepapers/assets/Multioscillator_Ring_Laser_Gyr.pdf.
- [5] WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu, WANG Fei, *et al.* Experimental investigations on magnetic sensitivity in four-frequency differential laser gyros[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(3): 107-111.
汪之国,龙兴武,王飞,等. 四频差动激光陀螺磁灵敏度特性的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 107-111.
- [6] 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. 四频差动激光陀螺磁敏感性与最佳工作点[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3202-3206.
- [7] WANG Zhuo-wei. Mechanism of laser gyros susceptibility to magnetis[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(3): 103-106.
王卓伟. 激光陀螺磁敏感机理[J]. 中国惯性技术学报, 2010, **18**(3): 103-106.
- [8] YANG Heng. Research on the frequency stabilization and methods of mode sweep of ring laser gyro [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999: 103-112.
杨恒. 激光陀螺的频率稳定性与扫模方法的研究[D]. 西安:西北工业大学, 1999: 103-112.
- [9] HU Peng-cheng, TAN Jiu-bin, YANG Hong-xing, *et al.* A new lock point offset correction-based frequency stabilization method for longitudinal zeeman laser [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(1): 49-52.
胡鹏程,谭久彬,杨宏兴,等. 一种基于控制点偏移修正的纵向塞曼稳频方法与系统[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(1): 49-52.
- [10] ZHAO Zheng-xin. Research on the influence of environmental magnetic field on the precision of differential ring laser gyroscope[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 24-31.
赵政鑫. 环境磁场对四频差动激光陀螺准确度影响的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006: 24-31.

Characteristics of Magnetic Sensitivity of Zero-lock Laser Gyro

CAO Yao-hui, HAN Zong-hu, CHEN Lin-feng, FU Xin

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

Abstract: Compared to the dithered ring laser gyro with the linearly polarized light running in the cavity, the Zero-lock Laser Gyro(ZLG) with the circularly polarized light running in the cavity is more sensitive to the magnetic field. In order to reduce the magnetic sensitivity of the ZLG, the magnetic sensitivity of the ZLG is theoretically analyzed. When the relative scale factor corrections of left and right circularly polarized gyros are equal, the bias of the ZLG will not vary with the magnetic field. Further more, the linearity of relative scale factor correction will be improved. The magnetic sensitivity of the ZLG is experimentally tested, and the results indicate that the insensitivity point with respect to the magnetic field is existent, which is consistent with the theoretical analysis. Compared to the method of traditional passive magnetic shielding, the method of operating ZLG on the insensitive point by active control is proved to be of great practical value for reducing the magnetic sensitivity and improving the accuracy of the ZLG.

Key words: Zero-lock Laser Gyro(ZLG); Zeeman effect; Insensitive point to magnetic field; Magnetic sensitivity