

# 零闭锁激光陀螺磁不敏感点与放电 电流关系的实验研究

梁 可 韩宗虎 陈林峰 傅 鑫

(中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要** 零闭锁激光陀螺(ZLG)增益曲线不对称导致左、右旋陀螺的比例因子修正系数不相等,使得当陀螺稳频工作点与磁不敏感点存在频率差时,陀螺零偏对外界磁场变化敏感,降低了陀螺的精度并限制了使用环境。利用兰姆半经典理论分析计算了比例因子修正系数与增损比的关系,并得到了陀螺的磁不敏感点与放电电流的关系,从信号处理系统中排除放电电流变化对控制信号的影响,并进行了实验验证。理论计算和实验结果均表明,线性地改变陀螺放电电流,陀螺磁不敏感点位置会因增益曲线的增损比变化而发生相应线性改变,进而能够通过控制放电电流降低陀螺的磁灵敏度。

**关键词** 传感器;零闭锁激光陀螺;磁不敏感点;放电电流;比例因子修正

中图分类号 V241.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0314005

## Experimental Investigations on Relation of Magnetic Insensitive Point and Discharge Current in Zero-Lock Laser Gyro

Liang Ke Han Zonghu Chen Linfeng Fu Xin

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

**Abstract** Since the asymmetry of laser gain leads to the unequal of scale factor corrections between left circularly polarized and right circularly polarized gyros in the cavity, zero-lock laser gyro (ZLG) bias is sensitive to magnetic field when frequency stabilization point is not matched with magnetic insensitive point, which degrades the precision and limits work condition of ZLG. The relation between scale factor corrections and gain-to-loss ratio is analyzed according to Lamb semiclassical theory, as well as the relation between magnetic insensitive point and discharge current. The influence of discharge current changing on control signal is eliminated from signal processing system and experimental verification is performed. It is proved by both theoretical calculation and experimental results that the magnetic insensitive point varies linearly with gain-to-loss ratio as the discharge current changes linearly, which means that the magnetic sensitivity can be reduced by changing discharge current.

**Key words** sensors; zero-lock laser gyro; magnetic insensitive point; discharge current; scale factor corrections

**OCIS codes** 140.3370; 140.3460; 140.3560

## 1 引 言

基于非共面谐振腔的零闭锁激光陀螺(ZLG)谐振腔内运行着4束圆偏振光,构成左、右旋两个陀螺,采用非互易法拉第磁光效应进行偏频,对左、右旋陀螺输出的拍频信号进行差动消去偏频量得到陀螺相对于惯性空间的转动信息<sup>[1]</sup>。从原理上讲,

ZLG具有灵敏度高、标度因数线性度好、抗振动能力强、随机游走系数小和便于脉冲细分等优点<sup>[2]</sup>,特别适合于高精度导航、定位定轴和定向,但当左、右旋陀螺比例因子修正系数不等时,陀螺零偏对磁场变化敏感,使得磁场成为制约陀螺精度的一个重要因素<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-10-13

基金项目: 总装备部“十二五”装备预先研究项目

作者简介: 梁 可(1989—),男,硕士研究生,主要从事零闭锁激光陀螺方面的研究。E-mail: lklk00lklk11@hotmail.com

导师简介: 韩宗虎(1961—),男,博士,研究员,主要从事激光陀螺的设计与研发方面的研究。

E-mail: HZH0587@facri.com

一般而言,降低陀螺磁灵敏度的方法主要有两种:一种是在结构上设计磁屏蔽罩及使用磁屏蔽材料;另一种是将陀螺稳频点选在磁不敏感点<sup>[5-6]</sup>。前者会增加陀螺的体积和重量,并且磁屏蔽材料价格昂贵,成本较高;后者是对陀螺的稳频工作进行控制,相比之下更易于工程化。

本文使用半经典理论分析了 ZLG 放电电流和磁不敏感点位置的关系并进行了仿真及实验。理论分析和实验结果均表明放电电流与磁不敏感点位置存在线性关系,通过控制陀螺放电电流能够降低陀螺磁灵敏度。

## 2 零闭锁激光陀螺磁灵敏度与比例因子修正的关系

图 1 为 ZLG 工作原理示意图。由于增益区域受到色散电流<sup>[7]</sup>、外界磁场和法拉第室漏磁的影响,磁场产生的塞曼效应导致增益曲线分裂为正、负旋增益曲线  $\sigma^+$ 、 $\sigma^-$ ,其频率差为  $\nu_z$ ,纵向磁场引起的塞曼频裂为  $\nu_z = 36 \text{ MHz/mT}$ 。 $\nu_0$  为陀螺稳频工作点,当陀螺工作在该稳频点时,左右旋模式在光强曲线上斜率的绝对值相等。ZLG 通过非共面谐振腔和非互易法拉第偏频将谐振腔内运行的光分为 4 个频率模式  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$ 、 $\nu_4$ 。有源腔中由于频率牵引效应使得纵模频率相比无源腔纵模频率更靠近中心频率,因此用虚线表示频率变化后的模位置。4 束光中左旋顺( $L_c$ )、逆时针( $L_a$ )光构成左旋陀螺,右旋顺( $R_c$ )、逆时针( $R_a$ )光构成右旋陀螺<sup>[8]</sup>,将左、右旋两个单陀螺拍频信号进行差动可以得到载体相对于惯性空间的转动信息。

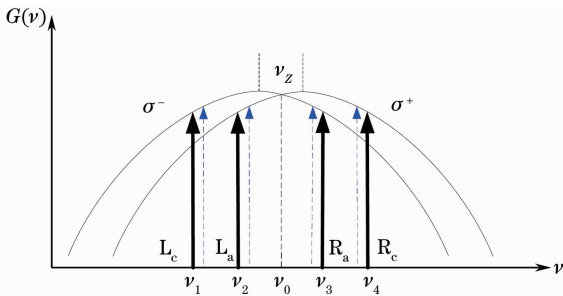


图 1 ZLG 工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of ZLG

### 2.1 磁灵敏度与磁不敏感点

陀螺具有磁灵敏度是由于外界磁场使增益曲线分裂为正、负旋增益曲线并分别对应不同的色散曲线,因此 4 个工作模式受到的频率牵引效应不同而导致频率变化量各不相同。若左、右旋单陀螺受到

的频率牵引效应影响是非对称的,则会在拍频差输出公式中造成误差,影响陀螺精度。

不同稳频点由色散电流变化带来的零偏也不同,存在一个理想的稳频点使得陀螺零偏对色散电流变化不敏感,即对磁场变化不敏感,称为磁不敏感点<sup>[9]</sup>。磁不敏感点的原理是利用左、右旋陀螺比例因子修正项与频率工作点相关这一特性,选择理想的稳频点使得左、右旋陀螺的比例因子修正系数相等,从而降低比例因子修正项在频差输出公式中造成的误差<sup>[10]</sup>。

### 2.2 比例因子修正项的计算与仿真

ZLG 频差公式为<sup>[11]</sup>

$$\Delta\omega = 2(1 + \bar{A})\Delta\Omega^0 + (A_L - A_R)(\Delta\omega_H + \omega_B) - 4KV\bar{A} - 2\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)\Delta\gamma, \quad (1)$$

式中  $\bar{A} = \frac{A_L + A_R}{2}$  为四频陀螺的相对比例因子修正,  $A_L$ 、 $A_R$  为左右旋陀螺相对比例因子修正,  $\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)_L$ 、 $\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)_R$  为左右旋陀螺的兰姆系数项,  $\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)_L + \left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)_R\right]$ ,  $\Delta\Omega^0$  为外界转动角速度,  $\Delta\omega_H$  为法拉第效应偏频圆频率,  $\omega_B$  是塞曼效应对应的增益曲线的圆频率分裂,  $KV\bar{A}$  代表朗缪尔效应,  $\rho$  为模自排斥系数,  $\tau$  为模互排斥系数,  $\beta$  为模自饱和系数,  $\theta$  为模互饱和系数,  $\Delta\gamma$  为顺、逆对模间差损。

比例因子修正项的表达式为

$$A = \frac{G_0 c}{2ku\langle L \rangle} (S_\sigma + S_R + S_\rho + S_\tau + S_i), \quad (2)$$

略去双同位素  $\text{Ne}^{20}$  与  $\text{Ne}^{22}$  多普勒展宽的差别因子  $\sqrt{1.1}$ , 并按等比例双同位素混合气体计算, 式中  $S_\sigma$  为差分模牵引量, 表达式为

$$S_\sigma = \frac{2\langle L \rangle}{G_0 c} \sigma'(\xi_{12}), \quad (3)$$

$S_\rho$  为差分模自排斥修正量, 表达式为

$$S_\rho = \frac{2\langle L \rangle}{G_0 c} \rho'(\xi_{12}) I, \quad (4)$$

$S_\tau$  为差分模互排斥系数, 表达式为

$$S_\tau = \frac{2\langle L \rangle}{G_0 c} \tau'(\xi_{12}) I, \quad (5)$$

$S_R$  为差分辐射捕获修正系数, 表达式为

$$S_R = -\frac{2\langle L \rangle}{G_0 c} \frac{2R}{G_0} [\sigma'(\xi_{12})\beta(\xi_{12}) + \sigma(\xi_{12})\beta'(\xi_{12})] I, \quad (6)$$

$S_i$  为光强差  $i$  项所引入的修正, 表达式为

$$S_i = -\frac{2\langle L \rangle}{G_0 c} \left( \frac{\rho - \tau}{\beta - \theta} \right) \left[ \alpha'(\xi_{12}) - \frac{I\beta'(\xi_{12})}{\Gamma} \right], \quad (7)$$

其中,  $G_0$  为增益介质峰值增益,  $c$  为真空中光速,  $k$  为角波数,  $u$  为原子运动最可几速率,  $\langle L \rangle$  为腔长,  $I$  为无量纲光强,  $\xi_{12}$  为频率参量,  $\sigma$  为模牵引量,  $R$  为比例系数,  $\alpha$  为单程净增益系数,  $\Gamma$  为辐射捕获修正量,  $(\cdot)'$  为求微分。

由以上各式可看出比例因子修正项  $A$  的表达式中除了差分模牵引量  $S_e$  外, 其余各项均与光强  $I$  成线性关系, 因此在固定其他参量不变的条件下, 改变光强  $I$  理论上会改变比例因子修正项  $A$  的值, 进而影响陀螺磁不敏感点位置。

激光陀螺为小信号增益, 线性改变放电电流, 光强也对应线性变化。从(2)式的比例因子修正项可知, 光强的线性改变导致 ZLG 的相对比例因子修正项  $A_L$ 、 $A_R$  线性变化。一般情况下,  $A_L \neq A_R$ ,  $A_L - A_R$  随放电电流线性变化。因此, 由 ZLG 频差公式可知, 陀螺磁灵敏度也随之线性变化。

使用 Matlab 软件编程对比例因子修正项  $A$  与增损比  $k_0$  的关系进行仿真, 仿真结果如图 2 所示。

从仿真结果可看出, 比例因子修正项  $A$  与增损比  $k_0$  有良好的线性关系, 与理论分析结论相符。

### 3 实验方法与结果

#### 3.1 误差因素

图 3 为实验所用电路的稳频控制系统的原理框图, 交流调制信号加载在带有稳频压电陶瓷 (PZT)

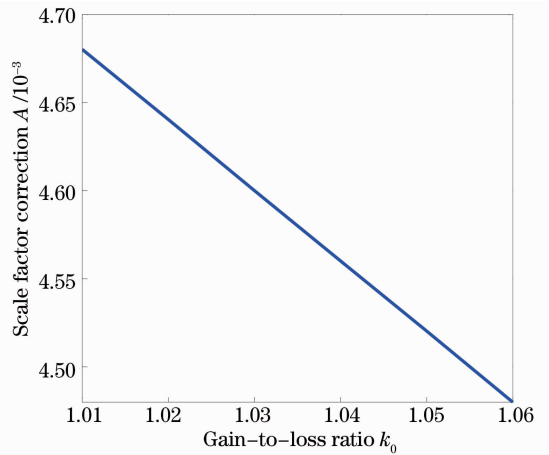


图 2 比例因子修正项随增损比变化的曲线

Fig. 2 Scale factor correction versus gain-to-loss ratio

的 ZLG 反射镜上, 对腔长产生调制, 输出光信号经光电转换 (O/E)、前置放大器和相敏检测器 (PSD) 后得到稳频误差信号  $E$ , 通过比例-积分-微分控制 (PID) 求得  $E$  的值。其中 PID 控制是加入偏置的闭环控制, 使用加法器将  $E$  和偏置  $S_{\text{hif}}$  进行求和并将求和结果作为新的稳频误差  $P_{\text{aerr}}$ , 控制系统以最终误差  $P_{\text{aerr}} = 0$  为稳频依据。

在稳频过程中保持  $P_{\text{aerr}} = 0$  不变,  $S_{\text{hif}}$  随着  $E$  的变化而变化, 根据  $S_{\text{hif}}$  与稳频工作点的对应关系, 通过改变  $E$  的值来改变稳频工作点, 并在相应稳频工作点下测试陀螺的磁灵敏度。当磁灵敏度为零时, 该工作点即为陀螺的磁不敏感点, 定义该点下  $E$  对应的压电码值为  $\Delta P$ 。

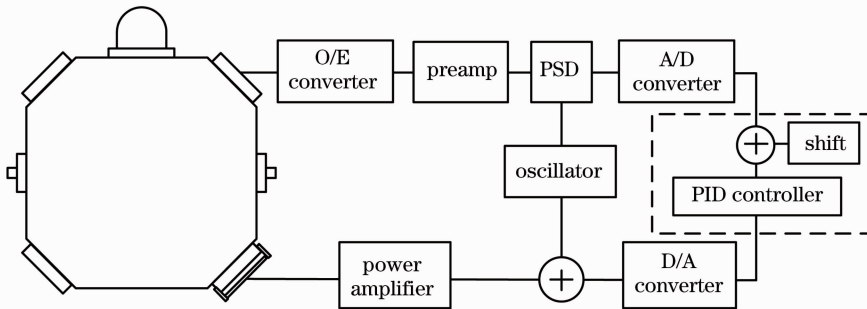


图 3 稳频控制系统原理框图

Fig. 3 Diagrammatic layout of frequency stabilization control system

稳频误差信号  $E$  与压电码值  $\Delta P$  的换算公式为

$$\Delta P = E / |K_E|, \quad (8)$$

式中  $K_E$  为扫模时光强随 PZT 变化的传递函数, 不同的放电电流  $I_w$  对应不同的传递系数  $K_E$ , 若改变放电电流后不考虑传递系数  $K_E$  的变化, 则会导致输出的压电码值  $\Delta P$  不能真实地表示磁不敏感点位

置的变化。因此改变放电电流后首先进行扫模, 计算出  $K_E$ , 从磁不敏感点扫描结果中除去由于  $K_E$  变化带来的误差, 从而得到实际的压电码值  $\Delta P$ 。

#### 3.2 测试方法

对编号为 20121-117 和 20121-128 的 ZLG (带有磁屏蔽罩) 进行磁不敏感点扫描实验和磁灵敏度

测试,实验陀螺双同位素气体体积比为  $\text{Ne}^{20}:\text{Ne}^{22}=53:47$ ,充气气压为几百帕,实验陀螺的色散电流在增益区域产生的磁场为  $3\text{ mT/A}$ ,实验环境为实验室常温,具体实验步骤如下:

1) 磁不敏感点扫描实验。将实验陀螺置于防振动实验台上,接通陀螺测试设备。改变压电陶瓷电压对陀螺进行扫描,通过选取合适的 PZT 码值设置陀螺工作稳频点,设置包括色散电流、放电电流等相应陀螺工作参数,并对陀螺进行磁不敏感点位置扫描。其中磁不敏感点位置扫描的评判标准为从色散电流标准值  $-2.4\sim 2.4\text{ mA}$  范围内改变色散电流,若测得陀螺脉冲输出数值变化小于  $3\%$ ,则判定该工作点即为陀螺的磁不敏感点。从  $0.6\sim 1\text{ mA}$  范围内改变放电电流,每次增加  $0.1\text{ mA}$ ,重复磁不

敏感点测试步骤得到测试结果。

2) 磁灵敏度测试。将实验陀螺置于三轴磁实验台上,使用磁场发生器施加外界磁场并使用 7030 型特斯拉计标定磁实验台。接通陀螺测试设备,从  $0.6\sim 1\text{ mA}$  范围内改变放电电流,并使用磁场发生器改变外界磁场来测试陀螺在不同放电电流下的磁灵敏度。

### 3.3 测试结果

陀螺放电电流与磁不敏感点位置结果如表 1 和表 2 所示。

陀螺磁不敏感点位置随放电电流变化关系如图 4 和图 5 所示。

陀螺放电电流与磁灵敏度测试结果如表 3 和表 4 所示。

表 1 陀螺 20121-117 不同放电电流下磁不敏感点位置扫描结果

Table 1 Results of magnetic insensitive point for different discharge currents of gyro 20121-117

$I_w/\text{mA}$	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$E$	-939	-465	50	519	1014
$K_E$	-4293.6	-4714.8	-5263.2	-5709.1	-6162
$\Delta P$	-0.2187	-0.0986	0.0095	0.0909	0.1646

表 2 陀螺 20121-128 在不同放电电流下磁不敏感点位置扫描结果

Table 2 Results of magnetic insensitive point for different discharge currents of gyro 20121-128

$I_w/\text{mA}$	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$E$	-695	-325	-45	247	564
$K_E$	-2641.1	-3000.5	-3289.5	-3644.5	-3926.9
$\Delta P$	-0.2631	-0.1083	-0.0137	0.0678	0.1436

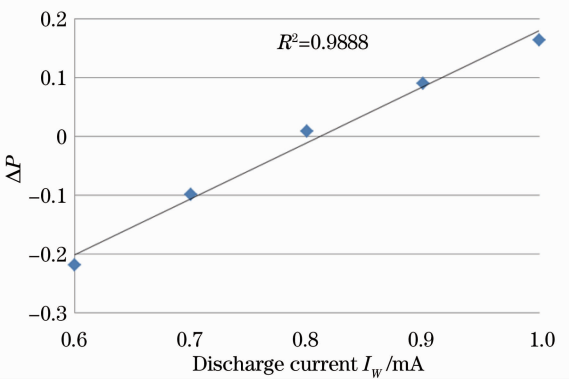


图 4 陀螺 20121-117 磁不敏感点与放电电流关系  
Fig. 4 Magnetic insensitive point versus discharge current of gyro 20121-117

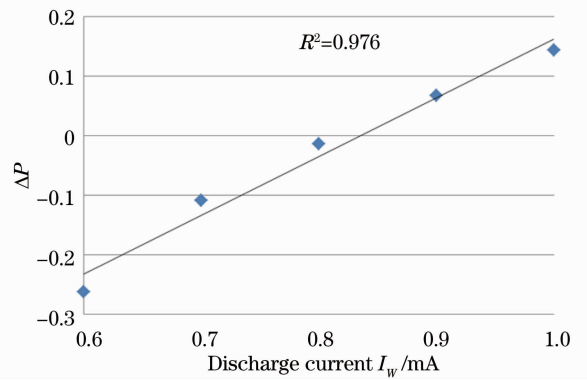


图 5 陀螺 20121-128 磁不敏感点与放电电流关系  
Fig. 5 Magnetic insensitive point versus discharge current of gyro 20121-128

表 3 陀螺 20121-117 不同放电电流下磁灵敏度结果

Table 3 Results of magnetic sensitivity for different discharge currents of gyro 20121-117

$I_w/\text{mA}$	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Magnetic sensitivity $/(\text{°}/\text{h}\cdot\text{mT})$	20.94	9.89	0.70	9.66	19.38
Bias stability $/(\text{°}/\text{h})$	0.0224	0.0187	0.012	0.0144	0.0196

表 4 陀螺 20121-128 不同放电电流下磁灵敏度结果

Table 4 Results of magnetic sensitivity for different discharge currents of gyro 20121-128

$I_w$ /mA	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Magnetic sensitivity / ( $^{\circ}$ /h $\cdot$ mT)	22.37	10.96	0.73	12.43	21.05
Bias stability / ( $^{\circ}$ /h)	0.0251	0.0195	0.0146	0.0156	0.0207

陀螺磁灵敏度随放电电流变化关系如图 6 和图 7 所示。

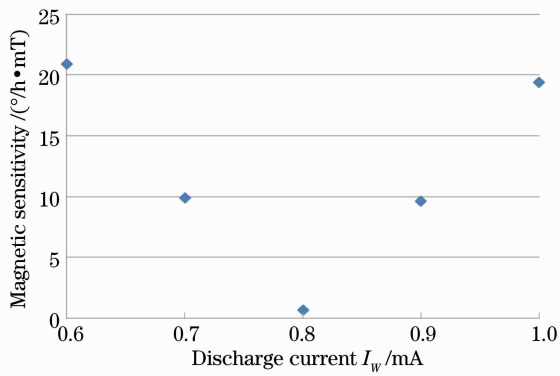


图 6 陀螺 20121-117 磁灵敏度与放电电流关系

Fig. 6 Magnetic sensitivity versus discharge current of gyro 20121-117

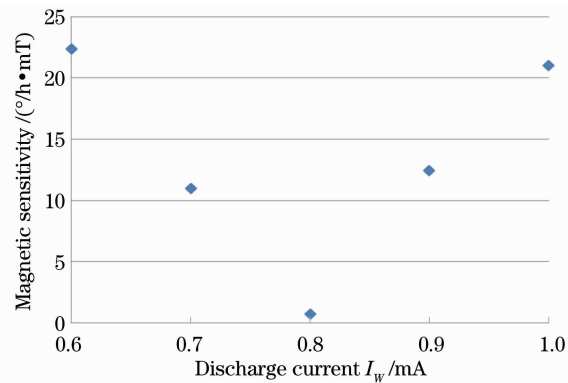


图 7 陀螺 20121-128 磁灵敏度与放电电流关系

Fig. 7 Magnetic sensitivity versus discharge current of gyro 20121-128

从实验结果可看出,陀螺磁不敏感点位置与放电电流大小具有线性关系,陀螺磁灵敏度随放电电流大小发生变化且在磁不敏感点处具有最小值,相应的陀螺零偏稳定性也具有最佳值。实验结果表明可以通过控制放电电流来降低陀螺磁灵敏度。

## 4 结 论

理论上分析计算了零闭锁激光陀螺的磁不敏感点与放电电流的相关性,并对其进行了实验验证。理论计算和实验结果均表明,当线性改变陀螺放电电流时,排除电流变化对控制信号的影响,陀螺磁不敏感点位置也会因增益变化而发生相应线性改变,

进而通过控制放电电流能够降低陀螺的磁灵敏度。

## 参 考 文 献

- 1 C H Volk, S C Gillespie, J G Mark, *et al.*. Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications [C]. *Optical Gyros and Their Application*, RTO AGARDograph 339, 1999, 4. 1—4. 26.
- 2 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four mode differential laser gyros [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040005.  
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040005.
- 3 Gao Bolong, Li Shutang. *Laser Gyro* [M]. Changsha: Press of National Defense Technology University of PLA, 1984. 48—58.  
高伯龙, 李树棠. *激光陀螺*[M]. 长沙: 中国人民解放军国防技术大学出版社, 1984. 48—58.
- 4 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): 0974.  
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): 0974.
- 5 Cao Yaohui, Han Zonghu, Chen Linfeng, *et al.*. Characteristics of magnetic sensitivity of zero-lock laser gyro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 668—671.  
曹耀辉, 韩宗虎, 陈林峰, 等. 零闭锁激光陀螺磁敏感特性研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(6): 668—671.
- 6 Wang Fei, Long Xingwu, Wang Zhiguo. Real-time control technique of optimal operating point in four-mode differential laser gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1123001.  
王 飞, 龙兴武, 汪之国. 四频差动激光陀螺最佳工作点实时控制技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1123001.
- 7 Yang Jianqiang. *Reserch on the Related Technologies of Four Frequency Differential Laser Gyro* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 57—70.  
杨建强. 四频差动激光陀螺相关技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. 57—70.
- 8 Yu Wendong, Lü Wancheng, Chen Linfeng, *et al.*. Study on separate LCP form 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.
- 9 Cao Yaohui. Study on Magnetic Sensitivity Control of Zero-Lock Laser Gyro [D]. Xi'an: AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, 2012. 42—62.  
曹耀辉. 零锁区激光陀螺磁敏感性控制技术[D]. 西安: 中国航空研究院 618 所, 2012. 42—62.
- 10 Wang Zhiguo, Long Xingwu, 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]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3202—3206.
- 11 Jiang Yanan. *Ring Laser Gyro* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 185—190.  
姜亚南. *环形激光陀螺*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 185—190.