

全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术

马家君^{1,2} 蒋军彪² 刘健宁^{1,2}

(¹ 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)
(² 西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111)

摘要 针对全反射棱镜式激光陀螺在单纵模稳频条件下纵模调制信号存在盲区的现象,研究了全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术。理论分析了功率调谐曲线的特征,获得了双纵模条件下小抖动调制信号的幅度及相位特性,提出了双纵模稳频控制方案,通过软硬件电路设计,搭建了全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频控制系统。在定温和变温环境下,分别对单纵模稳频与双纵模稳频进行了实验测试。实验结果表明,与单纵模稳频控制方法相比,双纵模稳频技术在稳频精度上提高了 60%,陀螺精度也得到了相应的提高。

关键词 激光光学;棱镜式激光陀螺;双纵模;稳频精度;功率调谐曲线

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0902011

Frequency Stabilization Technique of Total Reflection Prism Laser Gyros with Double Longitudinal Modes

Ma Jiajun^{1,2} Jiang Junbiao² Liu Jianning^{1,2}

(¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi, 710071, China)
(² North Jierui Opto-Electronics Technology Ltd, Xi'an, Shaanxi, 710111, China)

Abstract For the dead zones phenomenon of longitudinal modes modulating signal in the total reflection prism laser gyros (TRPLG) during in single longitudinal mode frequency stabilization, a novel technique for the double longitudinal mode frequency stabilization of the TRPLG is studied. By analysing the theory of power tuning curve, amplitude and phase characteristics of the small jitter modulation signal in double longitudinal mode are derived. The double longitudinal mode frequency stabilization scheme is proposed, and the control system for the double longitudinal mode frequency stabilization of the TRPLG is built by software and hardware circuit design. In the fixed and varied temperature environments, the experimental tests for the single longitudinal mode and double longitudinal mode frequency stabilization are conducted. The results show that, comparing with the control method for single longitudinal mode frequency stabilization, the frequency stabilization accuracy of the double longitudinal mode can be improved by over 60%, and the accuracy of gyros is also increased accordingly.

Key words laser optics; prism laser gyros; double longitudinal mode; frequency stabilization accuracy; power tuning curve

OCIS codes 140.3370; 140.3425; 140.3570; 140.3560

1 引 言

全反射棱镜式激光陀螺(TRPLG)具有锁区小,可靠性高,寿命长等优点,在航空航天等领域具有广泛的应用^[1-4]。TRPLG的比例因子、闭锁阈值、差

损零漂等误差源与激光震荡频率有密切关系,激光震荡频率的变化将影响拍频输出的稳定性^[5]。因此,稳频控制一直是 TRPLG 研究的重点之一^[6-10]。传统的 TRPLG 采用单纵模稳频,即将稳频工作点

收稿日期: 2014-04-04; 收到修改稿日期: 2014-05-01

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFR70370)

作者简介: 马家君(1985—),男,博士研究生,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: majiajun_@126.com

导师简介: 蒋军彪(1962—),男,研究员级高级工程师,博士生导师,主要从事惯性技术方面的研究。

E-mail: jjbiaotz@163.com

控制在增益曲线中心位置,实践中发现,在增益曲线中心位置附近,纵模调制反馈信号在一定频率范围内存在“盲区”,在环境温度变化条件下给陀螺稳频精度带来一定的影响^[10]。采用双纵模稳频技术可以有效地避开“盲区”,传统的双纵模稳频控制技术根据相邻纵模输出的偏振方向相互垂直的特性,通过控制相邻纵模功率相等使激光器工作在双纵模稳频状态^[11-12]。由于全反射棱镜对 S 光有很强的衰减作用^[1],传统的双纵模稳频控制在 TRPLG 中不易实现。

本文对 TRPLG 功率调谐曲线的特征进行理论分析,得到了在双纵模条件下的小抖动调制特性。利用双纵模同时产生的调制信号幅度及相位关系,提出了 TRPLG 双纵模稳频控制方案。通过软硬件电路设计,实现了这种新的稳频技术。在定温和变温环境下,对单纵模稳频与双纵模稳频的精度进行了实验测定。实验结果表明,双纵模稳频在精度上比单纵模稳频在精度上提高了 60% 以上,该稳频技

术对提高 TRPLG 的性能有重要意义。

2 双纵模稳频原理

功率调谐曲线是 TRPLG 稳频的依据,功率调谐曲线的斜率直接影响陀螺的稳频精度^[5-7]。为了避免在频率中心位置处的模竞争,TRPLG 采用双同位素氦氖混合气体作为增益介质。双同位素净增益系数可表示为^[6]

$$\alpha(\xi, \eta) = G_0 \left[F \frac{Z_i(\xi, \eta)}{Z_i(0, \eta)} + \tilde{F} \frac{\tilde{Z}_i(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})}{\tilde{Z}_i(0, \tilde{\eta})} \right] - \gamma, \quad (1)$$

式中 $\tilde{F} = \sqrt{1.1}(1 - F)$, $\tilde{\eta} = \sqrt{1.1}\eta$, $\tilde{\xi} = \sqrt{1.1}(\xi - \xi_0)$, F 为同位素中 Ne^{20} 所占的比例, η 为均匀展宽和非均匀展宽之比, ξ 为频率参量, Z_i 为等离子体色散函数。在准稳态条件下,平均光强为

$$I_0(\xi) = \frac{\Gamma\alpha}{\beta + I\theta}.$$

代入 Lamb 系数,可得功率调谐曲线为

$$I_0(\xi) = \frac{\left[F \frac{Z_i(\xi, \eta)}{Z_i(0, \eta)} + \tilde{F} \frac{\tilde{Z}_i(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})}{\tilde{Z}_i(0, \tilde{\eta})} \right] - k_0^{-1} \frac{G_m}{G_0}}{\Gamma^{-1} \left[\frac{G_0 C}{Z_i(0)} b_j + \frac{G_0 \tilde{F}}{Z_i(0)} \tilde{b}_j \right] + G_0 \left[\frac{F}{Z_i(0)} \Re Z_i + \frac{\tilde{F}}{Z_i(0)} \Re \tilde{Z}_i \right]}, \quad (2)$$

式中 $b_j = Z_i(\xi_j) - \eta Z'_r(\xi_j)$, $\tilde{b}_j = \tilde{Z}_i(\tilde{\xi}_j) - \tilde{\eta} \tilde{Z}'_r(\tilde{\xi}_j)$, 为保证合成后的增益曲线对称性,采用 $\text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{22} = 53:47$ 同位素配比,增益区气体压强为 340 Pa,通过数值计算,得 TRPLG 功率调谐曲线及其斜率如图 1 所示。

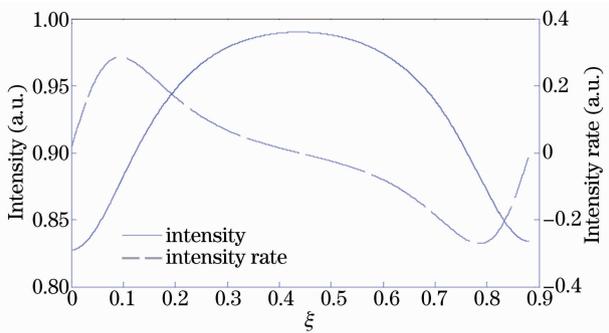


图 1 TRPLG 功率调谐曲线

Fig. 1 Power tuning curves of TRPLG

在中心频率 $\xi_m = 0.44$ 附近,功率调谐曲线较为平坦,在小抖动调制下,纵模调制反馈信号被完全淹没在电子噪声中,形成单纵模稳频控制的盲区,若将稳频工作点偏离中心频率足够远,功率调谐曲线有明显的斜率,利用双纵模条件下小抖动调制信号的幅度

与相位特性可以有效提高 TRPLG 的稳频精度。

在增益曲线中心位置附近,功率调谐曲线可以用二次曲线进行拟合,在双纵模气体激光器中,纵模 q 及相邻纵模 $q+1$ 对应的总光强可以表示为

$$I = I_1 + I_2 = I_0 [2 - k(v_1 - v_0)^2 - k(v_2 - v_0)^2]. \quad (3)$$

根据激光振荡条件,得光强与谐振腔程长的关系为

$$I = I_0 \left\{ 2 - k \left(\frac{qc}{L} - v_0 \right)^2 - k \left[\frac{(q+1)c}{L} - v_0 \right]^2 \right\}. \quad (4)$$

在小抖动调制下 $[L = L_0 + A \cos(\omega t), L_0 \gg A \cos(\omega t)]$, 总光强可表示为

$$I = I_0 \left\{ 2 - k \left[\frac{qc}{L_0} - \frac{qc}{L_0} A \cos(\omega t) - v_0 \right]^2 - k \left[\frac{(q+1)c}{L_0} - \frac{(q+1)c}{L_0} A \cos(\omega t) - v_0 \right]^2 \right\}. \quad (5)$$

对总光强进行分解,得直流分量 y_0 、一次谐波 y_1 和二次谐波 y_2 分别为

$$y_0 = I_0 [2 - k(v_1 - v_0)^2 - v_1^2 \frac{A^2}{L_0^2} k(v_2 - v_0)^2 - v_2^2 \frac{A^2}{2L_0^2}], \quad (6)$$

$$y_1 = 2I_0 k \frac{A}{L_0} [v_1(v_1 - v_0) - v_2(v_2 - v_0)] \cos(\omega t), \quad (7)$$

$$y_2 = -I_0 \frac{A^2}{L_0^2} (v_1^2 + v_2^2) \cos([2(\omega t) + 2\varphi]). \quad (8)$$

双纵模稳频控制系统以 y_1 的幅度作为控制系统的误差信号,即相应相敏误差项为

$$E(v) = 2I_0 k \frac{A}{L_0} [v_1(v_1 - v_0) - v_2(v_2 - v_0)]. \quad (9)$$

将 $v_1 = v_0 - c/(2L) + \Delta v$ 和 $v_2 = v_0 + c/(2L) + \Delta v$ 代入(9)式后得

$$E(v) = 2I_0 k \frac{A}{L_0} \left[\left(\frac{c}{2L} \right)^2 + \Delta v^2 + 2v_0 \Delta v \right]. \quad (10)$$

(10)式表明,在双纵模稳频控制过程中,当相敏误差 $E(v)$ 达到极小值时,激光陀螺处于双纵模工作状态,双纵模分布在增益曲线对称位置,由于两纵模幅度相等,其相敏调制误差相位相反,两纵模调制输出信号一次谐波分量相互抵消,当稳频工作点偏移增益曲线对称位置时,光强调制输出有明显变化,控制系统很容易检测到,并通过闭环控制很快将稳频工作点调整到增益曲线对称位置。

以上分析了 TRPLG 双纵模稳频技术的基本原理,为进一步验证双纵模稳频控制技术的有效性和正确性,设计了 TRPLG 双纵模稳频控制系统。

3 系统设计

3.1 双纵模稳频硬件设计

在 TRPLG 工作过程中,由于环境温度变化及谐振腔自身发热的影响,谐振腔中激光振荡频率将发生变化,为了保证谐振腔激光振荡频率的稳定,TRPLG 通过一个特殊设计的稳频伺服器来实现。该稳频伺服器实时控制环形谐振腔内一个通道上的空气密度,以此改变给通道的折射率,进而达到稳定谐振腔中激光振荡频率的目的。伺服部件完全密封,内部的压电陶瓷膜片在交流电压的驱动下使稳频通道内部空气密度波动,为稳频控制提供相敏信号。

TRPLG 双纵模稳频系统采用现场可编程门阵列(FPGA)作为主控单元,谐振腔输出的光信号通过光电二极管检测,并经过低噪声放大器放大,放大后的信号经过解调后由模数转换器(ADC)采集送入 FPGA,在 FPGA 中实现相敏解调,并通过数字比例-积分-微分(PID)控制输出稳频控制电压,该电压数模转换器(DAC)转换为模拟信号,通过调节

稳频伺服器内部加热器电压来实现双纵模稳频,双纵模稳频控制系统如图 2 所示。

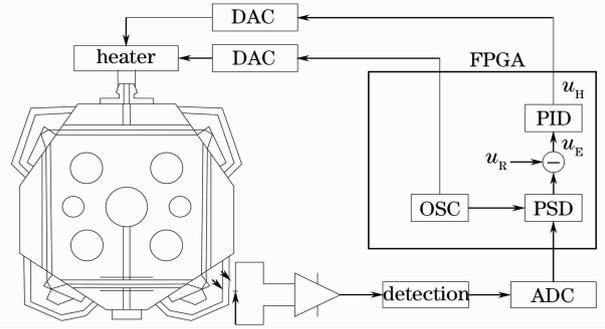


图 2 双纵模稳频控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of double longitudinal mode frequency stabilization control system

在双纵模稳频控制系统中,为了提高对纵模调制反馈信号的分辨率,ADC 器件选用 20 位高精度 ADS1250 对光强调制信号进行采样,该芯片转换量程为 $-V_r \sim +V_r$ 之间,转换电压为 $V_a - V_b$ 。电源电压设为 +5 V,基准电压 V_r 设为 2.5 V,则器件的转换量程为 $-2.5 \sim 2.5$ V。由于 V_a 端的输入信号幅值在 $0 \sim 5$ V 之间,故将信号输入端 V_b 接到 2.5 V 基准上,使输入电压 $V_a \sim V_b$ 满足芯片对转换电压的要求。

3.2 双纵模稳频软件设计

在上述硬件平台基础上,通过 Verilog 语言编程实现数字双纵模稳频控制。软件设计共包括,ADS1250 高精度 ADC 时序控制,有限脉冲响应(FIR)带通滤波器设计,数字 PID 控制器及模式变换时序控制,小抖动调整信号发生器设计。ADS1250 时序如图 3 所示。

ADS1250 时序通过状态机控制,该状态机有 23 个状态: idle, start, bit19, bit18, ..., bit0, stop。当 reset_ 有效时,状态机异步进入 idle 状态,刷新 data,用 1 装载 ncs,并用 20'hffff 装载 data_buf。在 idle 状态下,下一个时钟有效沿到来,状态机转移到 start 状态,并将 ncs 置 1,在 start 状态下,实时判断数据准备信号 drdy,当 drdy 为低电平并且控制时钟下降沿二分频信号 scl 为低电平时,进入接收串行数据,状态机转移到 bit19 状态,在 scl 为高电平时,将串行数据 sdata 装载进入 data_buf 相应位,并跳转到 bit18 状态,依次类推,直到 20 位串行数据采集完毕,状态机转移到 stop 状态,用 data_buf 装载 data,完成数据采集,状态机转移到 start 状态。等待下一个数据准备信号 drdy 有效。状态转移图如图 4 所示。

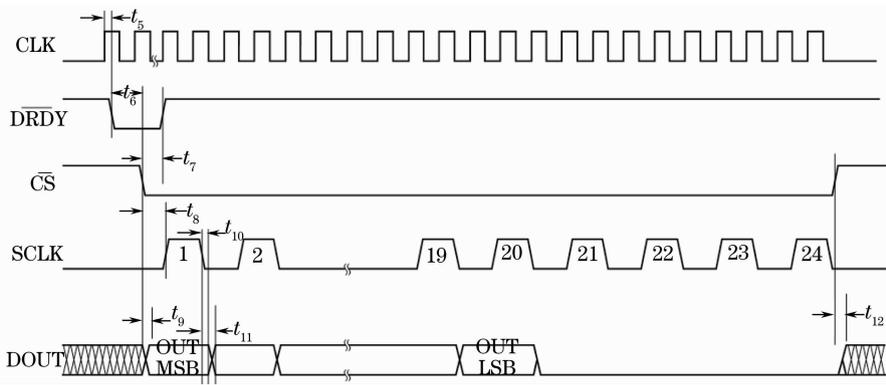


图 3 ADS1250 时序图

Fig. 3 ADS1250 timing diagram

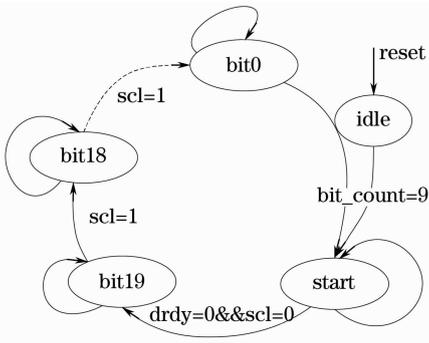


图 4 ADS1250 状态转移图

Fig. 4 ADS1250 state transition diagram

正弦信号产生的方法是在 Matlab 软件中生成一个周期内正弦信号各采样点幅值对应的量化数据,将其导入 Xilinx 中只读存储器(ROM)初始化文件中,利用地址计数器依次产生地址值,并从 ROM 中读出各地址所对应的数据,将该数据送入 DAC 器件,从而输出正弦信号。FIR 带通滤波器的设计通过在 FPGA 中调用数学滤波器 IP 核来实现,数字 PID 控制采用增量式 PID 控制。

完成了上述软、硬件设计后需要对 TRPLG 双纵模稳频精度进行测定,并与单纵模稳频精度进行

对比,进一步验证 TRPLG 双纵模稳频的有效性。

4 实验验证

4.1 双纵模稳频精度测定实验

在软硬件设计的基础上,搭建的 TRPLG 双纵模稳频控制系统实验装置如图 5 所示,其中: 1) 全反射棱镜式谐振腔; 2) 稳频控制电路; 3) 加热器。根据相敏误差与稳频工作点的对应关系,采用以下方法对 TRPLG 稳频精度进行估算。固定 TRPLG 工作电压,使加热器电压逐渐降低,与加热器连接的谐振腔毛细管空气密度也随之降低,从而导致光学



图 5 双纵模稳频控制系统实验装置

Fig. 5 Experimental configurations of double longitudinal mode frequency stabilization control system

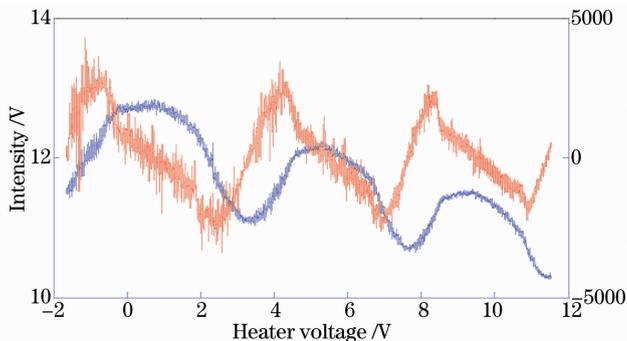


图 6 光强及相敏误差随加热器电压变化

Fig. 6 Light intensity and phase-error vary with the heater voltage

腔长减小,谐振腔工作频率增加,通过数字控制系统监测,得到光强及相敏误差随加热器电压变化曲线如图 6 所示。

根据激光原理以及 TRPLG 稳频控制系统的工作方式可以得出:随着稳频伺服器控制电压的减小,光强有明显起伏变化,每一个起伏周期对应一个纵模间隔;另一方面,当加热器电压减小时,在每个纵模间隔内,光强最大值逐渐增大,这与谐振腔中光路的偏移损耗有直接关系。同理,相敏误差随时间的变化曲线,也反映谐振腔工作频率的变化,为了使 TRPLG 工作在最佳状态,通常加热器电压设置偏低,相敏误差在一个纵模间隔内(-2000~2000)变化,因此,可以通过在稳频工作状态下,监测相敏误差的波动来估算稳频精度的大小。由于小抖动调制

也会对激光器工作频率产生影响,在稳频精度估算过程中应包含进去,通过以上分析,可以得到 TRPLG 小抖动稳频精度评估公式^[10]

$$\frac{\Delta v}{\bar{v}} = \sqrt{\frac{V_A^2}{k_1^2} + \frac{\Delta J^2}{k_2^2}} \frac{\Delta v_q}{\bar{v}}, \quad (11)$$

式中 V_A 为小抖动调制信号峰峰值, $k_1 = 160000$ 为调制增益系数; $\Delta J^2 = (J - \bar{J})^2$ 相敏信号方差, $k_2 = 4000$ 为误差增益系数; Δv_q 为纵模频率间隔,对应腔长为 0.45 m 的谐振腔,纵模间隔为 $\Delta v_q = 666.667$ MHz; $\bar{v} = 4.7 \times 10^{14}$ MHz 为谐振腔工作平均频率。在同一个仪表上,分别采用单纵模稳频和双纵模稳频控制,测得相应的相敏误差信号,通过稳频精度估算,得单纵模稳频与双纵模稳频精度如表 1 所示。

表 1 单纵模与双纵模稳频精度对比

Table 1 Comparison of frequency stabilization accuracy under single longitudinal mode and double longitudinal mode

Temperature / °C	Stabilization accuracy	
	Single longitudinal modes	Double longitudinal modes
-40	2.836×10^{-8}	1.132×10^{-8}
+25	2.824×10^{-8}	1.115×10^{-8}
+70	2.847×10^{-8}	1.124×10^{-8}
-40~+70	3.735×10^{-8}	1.281×10^{-8}
+70~-40	3.647×10^{-8}	1.275×10^{-8}

测试结果表明,在定温测试中,双纵模稳频精度比单纵模稳频精度提高 60% 以上,在变温测试中,双纵模稳频精度比单纵模稳频精度提高 65% 以上,采用双纵模稳频技术,稳频精度得到明显提高。

4.2 双纵模稳频技术验证

双纵模稳频控制技术作为一种在 TRPLG 上使用的新型控制技术,采用调节稳频控制增益点,避开了在增益曲线中心位置处相敏信号灵敏度低的不足,提高了 TRPLG 的稳频精度,为了进一步验证双纵模稳频技术,在定温及变温条件下分别采用单纵模稳频和双纵模稳频对 TRPLG 性能进行测试,表 2 给出了部分测试结果。

以上实验结果表明,在定温和变温环境下,采用双纵模稳频控制技术的 TRPLG 测试性能明显优于采用单纵模稳频控制。

5 结 论

理论分析了 TRPLG 功率调谐曲线的特征,给出了双纵模工作条件下的小抖动调制信号的各谐波

表 2 单纵模稳频与双纵模稳频技术在不同温度条件下陀螺精度比较

Table 2 Comparison of gyros accuracy under single longitudinal modes and double longitudinal control method

Temperature / °C	Gyros accuracy / (100 s)	
	Single longitudinal modes / ‰	Double longitudinal modes / ‰
-40	6.325	2.463
+25	6.325	2.463
+70	6.325	2.463
-40~+70	6.325	2.463
+70~-40	6.325	2.463

分量,利用在增益曲线对称位置附近,纵模调制输出信号一次谐波分量的幅度特性,提出了棱镜式激光陀螺双纵模稳频方案。采用低噪声放大器与高精度数模转换器,搭建了 TRPLG 双纵模稳频控制电路系统。在定温和变温环境下,对单纵模稳频和双纵模稳频进行了实验测试,实验结果表明,与传统的单纵模稳频控制技术相比,在定温环境下,双纵模稳频精度提高了 60%,在变温环境下,双纵模稳频精度提高了 65%,证实了双纵模稳频控制技术的有效性。通过对在双纵模稳频条件 TRPLG 进行性能测

试,陀螺精度也有明显的提高。

参 考 文 献

- 1 Y V Bakin, G N Ziouzev, M B Lioudomirski. Laser Gyros with Total Reflection Prisms[M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003. 1—34.
- 2 Yao Chengkang, Zeng Xiaodong, Cao Changqing. Intensity properties of output light in prism laser gyro with mechanical dither bias[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(9): 094216.
姚呈康, 曾晓东, 曹长庆. 机械抖动棱镜式激光陀螺出射光强度特性[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094216.
- 3 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy [J]. Chinese J Laser, 2013, 40(1): 0102002.
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器和光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.
- 4 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Lian Tianhong, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's cavity stress and gyroscope's characteristics[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(11): 1102003.
刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102003.
- 5 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.
- 6 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 214—216.
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 214—216.
- 7 Gao Bolong, Li Shutang. Ring Laser Gyro [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 50—52.
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 50—52.
- 8 Luo Hui, Guo Shaojun, Hu Shaomin, *et al.*. Research and design on high precision frequency-stability measurement system of ring laser gyroscope [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2005, 13(6): 86—89.
罗 晖, 郭少军, 胡绍民, 等. 激光陀螺仪频率稳定度高精度测量系统的研制[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(6): 86—89.
- 9 Tae W Hahn. Cavity Length Control Apparatus for Amultioscillator; US, 4963026[P]. 1990. 10—16.
- 10 Xie Yuanping. Investigation of Phase-Demodulation and Frequency Stabilization Techniques in Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000.
谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.
- 11 Zhang Hui, Shen Naizheng. Studies on the spectrum and frequency repetition of double-mode He-Ne laser with frequency stabilization[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(7): 1009—1012.
张 辉, 沈乃微. 双纵模稳频氦氖激光器的光谱与频率复现性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(7): 1009—1012.
- 12 Yin Jianping. TC time-spectrum method for frequency and power stabilization on two-mode He-Ne laser (theory part) [J]. Acta Optica Sinica, 1988, 8(5): 397—402.
印建平. 双纵模 He-Ne 激光器稳频稳幅的时间相干时谱法(理论部分)[J]. 光学学报, 1988, 8(5): 397—402.

栏目编辑: 韩 峰