

四频差动激光陀螺小抖动稳频初步研究

杨建强 廖丹

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为避免传统光强差稳频方式的缺陷,提出了四频差动激光陀螺小抖动稳频方法。从四频陀螺工作原理出发,分析了小抖动稳频的特性和难点,如鉴频灵敏度较低、陀螺参量不当时工作点有严重偏移、工作模式不易判别、陀螺零漂受稳频精度影响大。针对每一难点提出了解决办法,特别是极低噪声电路的设计技术是提高四频陀螺小抖动稳频精度的关键。提出的解决方案为进一步实验研究提供了理论指导。

关键词 激光技术;四频差动激光陀螺;小抖动稳频;工作点;工作模式

中图分类号 TN 241.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2256

Preliminary Study of Dithering Frequency Stabilization for Four-Frequency Differential Laser Gyro

Yang Jianqiang Liao Dan

(College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract To overcome the disadvantages of light intensity difference frequency stabilization, the dithering frequency stabilization for four frequency differential laser gyro is studied in this paper. Based on the principle of laser gyro, the characteristics and difficulties of the dithering frequency stabilization are analyzed, including the low frequency sensitivity, the severe deviation of operating point at inappropriate gyro parameters, the indistinguishable operating mode and the zero shift problem resulting from the frequency precision. The solutions of each difficulty are presented, the design of low noise circuits is the key factor to improve the precision of the dithering frequency stabilization, which will be helpful to the further experimental study.

Key words laser technology; four-frequency differential laser gyro; dithering frequency stabilization; operating point; operating mode

1 引 言

激光陀螺是利用 Sagnac 效应工作的光学惯性器件,由于其固态构造,寿命长,抗恶劣环境能力强,动态范围大,故其在惯性导航领域的应用越来越广阔^[1,2]。而四频差动激光陀螺是一种真正意义上的全固态激光陀螺,利用水晶片的互易效应和法拉第室的非互易效应在腔内形成左右旋对模,两对模间的拍频差反映了输入角速度,完全消除了制约二频陀螺精度的闭锁效应,从原理上说比二频陀螺有更好的性能。由于多种误差因素,四频陀螺性能尚待提高,其中稳频控制误差是重要的误差源之一^[3~6]。

以往四频差动激光陀螺绝大多数是采用光强差稳频^[7,8],用左右旋光的光强差作为误差信号进行稳频控制,使激光陀螺工作在左右旋光强相等处,当左右旋光差损较小,如 10^{-6} 量级时,工作点近似位于增益曲线峰值处。光强差稳频对左右旋光合光棱镜、放大电路等对称性要求较高,且仅适用于能输出稳定左右旋光的情况。对于某些特殊形状的新型四频差动陀螺,如美国利顿公司生产的某型号空间四频陀螺,由于膜系设计的原因,光强差稳频不适用,而常用于二频机抖陀螺的小抖动稳频方式则能避免上述光强差稳频的缺陷。

收稿日期: 2009-01-14; 收到修改稿日期: 2009-03-04

作者简介: 杨建强(1982—),男,博士研究生,主要从事新型环形激光器方面的研究。E-mail: yjqyjq_yjq@163.com

导师简介: 高伯龙(1928—),男,教授,博士生导师,院士,主要从事激光陀螺技术方面的研究。

本文从四频差动陀螺的工作原理出发,比较详细的分析了小抖动稳频在四频陀螺中应用特点,指出了小抖动稳频方式的难点及解决办法,为进一步实验研究提供了理论指导。

2 四频差动陀螺的工作原理

四频差动陀螺腔内同时运行左右旋对模,分别位于增益曲线峰值两侧,如图 1 所示。

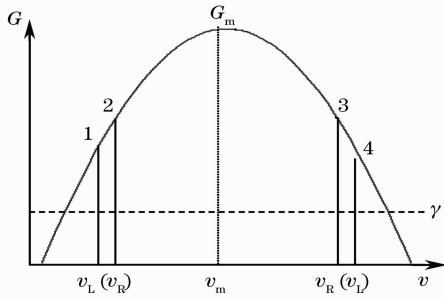


图 1 四频差动陀螺的工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of operation of four-frequency differential laser gyro

图 1 中横、纵轴分别代表频率 v 和增益 G , γ 为平均损耗线, v_m 为增益峰值 G_m 对应的频率, 1, 2 分别为顺、逆时针传播的左(右)旋模, 3, 4 分别为逆、顺时针传播的右(左)旋模。记四模光强为 I_1, I_2, I_3, I_4 , 左右旋对模平均频率和平均光强分别为 v_L, v_R 和 I_L, I_R , 则陀螺工作点(左右旋模中心频率) $v_0 = \frac{v_L + v_R}{2}$, $I_L = \frac{I_1 + I_2}{2}$, $I_R = \frac{I_3 + I_4}{2}$ 。四频陀螺正常工作时 v_L, v_R 近似对称的位于 v_m 两侧, 则 $v_0 = v_m, I_L = I_R$ 。

对于 $v_L > v_R$ 的工作模式, 当 $I_L > I_R$, 则 $v_0 < v_m$; 当 $I_L < I_R$, 则 $v_0 > v_m$, 由此根据 $I_L - I_R$ 的符号和绝对值可判断 v_0 偏离 v_m 的方向和大小, 这就是左右旋光强差稳频。

3 四频差动陀螺的小抖动稳频

小抖动稳频只需检测顺(逆)时针传播的单路光强信号, 不失一般性, 设顺时针光强信号为小抖动稳频信号 $I_s, I_s = I_1 + I_4$ 。由四频差动陀螺自洽场方程组^[9~10], 经过极其复杂的数学推导, 可得到 $I_s = I_s(v_0, G_m, \gamma, \gamma_{LR}, L, v_H, v_{LR})$, 其中 $v_0, G_m, \gamma, \gamma_{LR}, L, v_H, v_{LR}$ 分别为陀螺工作点、峰值增益、平均损耗、左右旋差损、腔长、法拉第偏频、左右旋模间隔频率, I_s 为上述多个参量的复杂函数。经计算, 在一定的参量数值范围内, I_s 随 v_0 变化曲线和增益 G 随 v 变化曲线基本一致, 即

I_s 峰值光强处仍有 $v_0 = v_m$ 。由此可仿照二频机抖陀螺, 在压电陶瓷(PZT)上加小抖动电压 V_d , 通过对 I_s 相干解调得到一次谐波信号 i_d 作为误差信号, 控制 I_s 于极大值处来稳频^[11,12], 如图 2 所示。

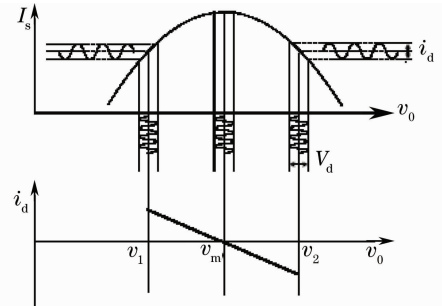


图 2 用 I_s 进行小抖动稳频原理图

Fig. 2 Schematic diagram of dithering frequency stabilization using I_s

调制电压 V_d 为正弦或方波电压, 叠加于直流控模电压上施于 PZT, 引起陀螺腔长的周期性变化, 激光频率也周期性变化, 从而引起陀螺光强 I_s 的调制, 调制情况与陀螺工作点 v_0 有关。当 v_0 位于光强峰值频率 v_m 的左侧时, $v_1 < v_m$, 光强调制与调制信号同相, 相干解调 i_d 输出为正; 在 v_m 右侧, $v_2 > v_m$, 光强调制与调制信号反相, 相干解调 i_d 输出为负; 在光强峰值频率 v_m 处, 光强调制信号尽含偶次谐波, 相干解调输出为 0。因此, 光强调制幅度的大小反映了 v_0 与 v_m 的偏差大小, 而相对于调制信号的相位反映了 v_0 与 v_m 的偏差方向, 由此原理可进行四频差动陀螺的小抖动稳频控制, 得到与光强差稳频一致的结果 $v_0 = v_m, I_L = I_R$ 。

4 四频差动陀螺小抖动稳频的特性及难点

与光强差稳频相比, 四频差动陀螺采用小抖动稳频方式优点是明显的, 即稳频光强信号只来源于一个光电二极管及前置放大器, 这样就消除了左右旋合光棱镜、1/4 波片、光电二极管、前置放大电路等不对称性的影响, 避免了这些光强差稳频不可克服的缺陷。另外, 对于某些特殊形状的新型四频差动陀螺, 如美国利顿公司生产的某型号空间四频陀螺, 由于膜系设计的原因, 只能采取小抖动稳频方式。

和二频机抖陀螺相比, 四频陀螺小抖动稳频有其特殊难点:

4.1 鉴频灵敏度较低

四频陀螺的稳频光强信号 $I_s = I_1 + I_4$, 而 I_1, I_4

是左右旋模,一般相差半个纵模间隔,在增益曲线上离峰值增益有一定距离,即 I_s 是非峰值增益光强;而二频机抖陀螺是单陀螺,正常工作时其腔模位于增益曲线峰值,即其稳频光强 I'_s 是峰值增益光强.对于典型陀螺,参数 $G_m/\gamma = 1.03, L = 30 \text{ cm}, \gamma_{LR} = 1 \times 10^{-6}, \nu_H = 500 \text{ kHz}$, 双同位素 $\text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{22} = 53 : 47$,

经数值计算, $I'_s \approx 1.35 I_s$, 鉴频灵敏度 $dI'_s/d\xi \approx 1.33 dI_s/d\xi$, 如图 3 所示.这里 $\xi = (\nu - \nu_{\text{Ne}1})/ku$, $ku = 1000 \text{ MHz}$ 为多普勒线宽, k 为波数, u 为增益气体原子热运动的最可几速度, $\nu_{\text{Ne}1}$ 为 Ne^{20} 增益曲线中心频率,图 3 中 $dI/d\xi \sim \xi$ 曲线在横轴上不重合是由增益曲线不完全对称所致.

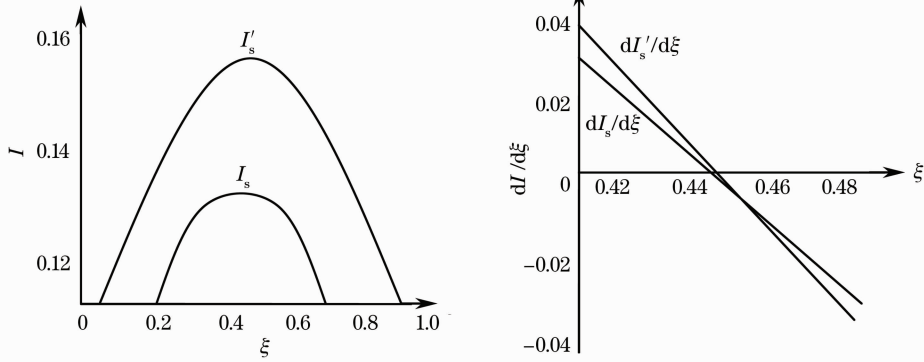


图 3 二频陀螺和四频陀螺光强 $I(\xi)$ 、鉴频灵敏度 $dI/d\xi$ 随 ξ 变化曲线对比

Fig. 3 Comparison of $I(\xi) \sim \xi, dI/d\xi \sim \xi$ curves for two frequency laser gyro and four frequency laser gyro

激光陀螺是微弱增益的 He-Ne 环形激光器,工作在峰值增益处的二频陀螺鉴频灵敏度实际上已远低于利用兰姆凹陷小抖动稳频的直管激光器^[13,14].而由图 3 可知,四频陀螺鉴频灵敏度比二频陀螺还要低,为达到相应的稳频效果,须提高放大电路的放大倍数,改善相敏检波电路的灵敏度和信噪比,才能将光强信号中的一次谐波信号清晰地提取出来.

ν_H, ν_{LR}) 是多参量函数,在一定参量数值范围下, I_s 随 ν_0 变化的极大值处才有 $\nu_0 = \nu_m, I_L = I_R$, 若参量不当则 I_s 极大值处 $\nu_0 \neq \nu_m, I_L \neq I_R$.例如若腔长 L 过大,增损比 $G_m/\gamma > 1.1$, 此时陀螺工作时易出现多纵模, I_s 达到光强峰值处陀螺腔内工作模式将如图 4 所示.取增益较大的左右旋模 ν_L, ν_R 的中心频率为陀螺工作点 ν_0 , 可看出,此时 ν_0 与 ν_m 严重不等,且 I_L, I_R 相差较大.

4.2 陀螺参量不当时工作点有严重偏移

四频陀螺稳频光强 $I_s = I_s(\nu_0, G_m, \gamma, \gamma_{LR}, L,$

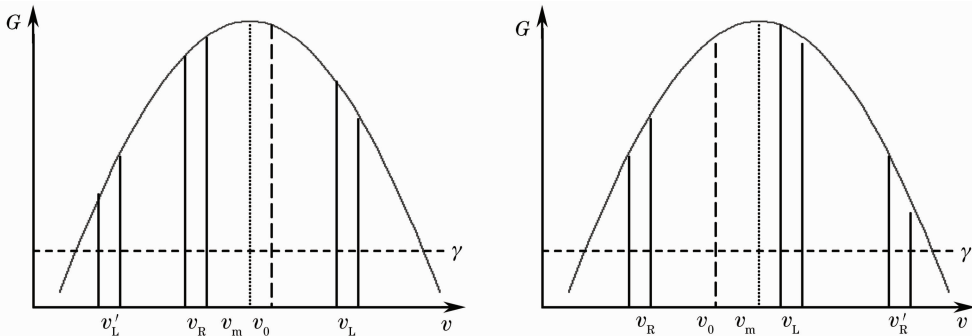


图 4 工作点 ν_0 严重偏移 ν_m 的情形

Fig. 4 Case of operating point ν_0 deviating from ν_m severely

曾用腔长较大的四频陀螺做小抖动稳频试验,稳频后 $I_L \approx \frac{2}{3} I_R$, 经过多次改进试验装置和电路均不成功.后来从理论上发现工作点严重偏移正是多纵模出现所致,更换腔长小的四频陀螺后才解决.而二频陀螺其腔模始终工作在增益曲线峰值处,则

无此问题出现.故四频陀螺要慎重选择陀螺参量,理论上要做相应的数值预估,在保证 $I_s = I_s(\nu_0, G_m, \gamma, \gamma_{LR}, L, \nu_H, \nu_{LR})$ 极大值点满足 $\nu_0 = \nu_m$ 的前提下,才可用小抖动稳频.

4.3 工作模式不易判别

左右旋四频差动陀螺实际上有两种工作模式^[15]： $\nu_L > \nu_R$ 和 $\nu_L < \nu_R$ ，如图 1 所示。由于增益曲线的不完全对称，使得左右旋模的频率色散效应不对称，这两种工作模式下陀螺零漂数值不同。光强差稳频方式合光棱镜两边分别输出左右旋光，可以辨别左右旋模，从而可以确定是哪一种工作模式。而小抖动稳频方式，对于通常的左右旋模相差半个纵模间隔的四频陀螺，在这两种工作模式下左右旋模平均增益相同，稳频光强 I_s 峰值大小相等，则无

法区分哪一种工作模式，那么在不同开机状态下无法稳定于固定的工作模式，将造成严重的零漂误差。

此问题可通过改变左右旋模的频率间隔即左右旋旋光角来解决，如旋光 45° ，则两种工作模式下左右旋模间隔分别为 $1/4$ 和 $3/4$ 纵模间隔；旋光 60° ，则两种工作模式下左右旋模间隔分别为 $1/3$ 和 $2/3$ 纵模间隔，如图 5 所示，其中 C 为光速， L 为腔长。两种工作模式下左右旋模平均增益 G_a, G_b 不同，对应的 I_s 峰值大小不等，那么就可通过判别 I_s 的大小来确定工作模式。

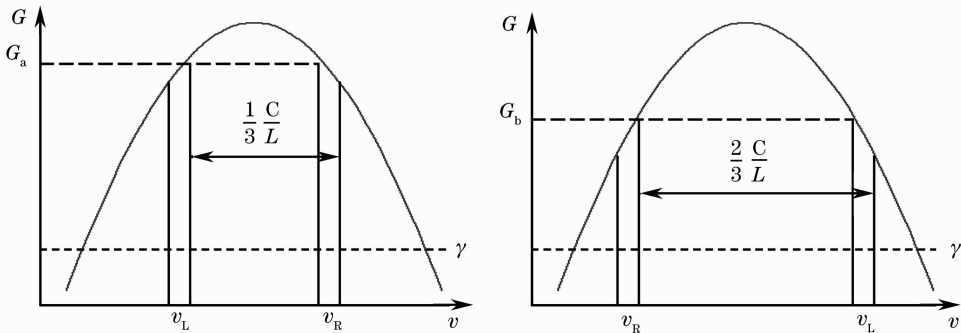


图 5 旋光 60° 时的两种工作模式

Fig. 5 The two operating modes at rotating angle of 60°

4.4 陀螺零漂受稳频精度影响大

由于四频差动陀螺左右旋模工作于距离增益曲线峰值数百兆赫兹的两侧，且左右旋对模间各有数百千赫兹的法拉第偏频量；而二频机抖陀螺中腔模工作于增益曲线峰值，且对模间只有机械抖动引入的幅值为数百赫兹的交变偏频量^[16,17]，则四频陀螺中增益对腔模的频率色散效应比二频陀螺要大得多，故四频陀螺稳频工作点的不稳定引致的陀螺零漂变化比二频陀螺要严重。取图 3 的陀螺典型参量

值，经数值计算，在工作点 ν_0 偏离 $\nu_m \pm 2$ MHz 内，四频陀螺零漂变化 Δf_1 约是二频陀螺零漂变化 Δf_2 的 833 倍，如图 6 所示。

事实上，稳频精度一直是四频陀螺零漂稳定性的重要因素。光强差稳频精度受电路对称性问题的制约，而对于小抖动稳频，则相敏检波的精度、环境噪声的影响将成为制约其精度提高的关键因素。笔者经大量的试验测试，现有的二频机抖陀螺的小抖动稳频电路只能满足二频陀螺的稳频要求，还远远不能达到四频陀螺的稳频要求，其中小抖动信号同频噪声的影响占决定性因素。故极低噪声电路的设计技术是提高四频陀螺小抖动稳频精度的关键。

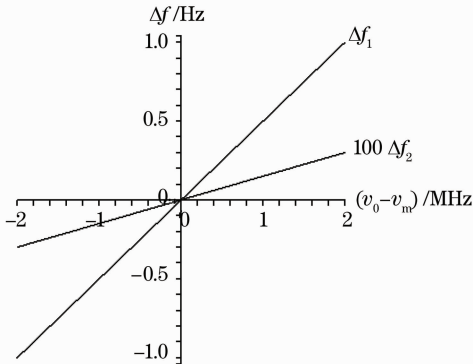


图 6 二频陀螺和四频陀螺工作点不稳定引致的零漂变化对比

Fig. 6 Comparison of zero shift variation caused by operating point variation of two frequency laser gyro and four frequency laser gyro

5 结 论

四频差动激光陀螺小抖动稳频在原理上是完全可行的，能避免合光棱镜、电路不对称等光强差稳频方式不可克服的缺陷。但它有其特殊难点，如鉴频灵敏度较低、陀螺参量不当时工作点有严重偏移、工作模式不易判别、陀螺零漂受稳频精度影响大等，比传统的二频陀螺小抖动稳频在电路设计、陀螺参量调节、噪声消除技术等方面有更高的要求，文中提出的办法为这些难点的解决指明了方向。事实上二频机抖陀螺技术的突破主要依赖于基础光学工艺和电子

学技术的提高,四频差动陀螺技术难点的解决同样最终归结于光学工艺和光电检测技术的改进且要求更高。四频陀螺原理上的优越性毋庸置疑,实际上国外某些四频陀螺精度已经达到甚至超过机抖陀螺,在基础光学工艺和电子学技术达到相当水平的前提下,我们的四频差动陀螺可望超过二频机抖陀螺。

参 考 文 献

- Gao Bolong, Li Shutang. Laser gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984, 1~5
高伯龙,李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984, 1~5
- Jiang Ya'nan. Ring laser gyro[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985, 1~6
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1985, 1~6
- Yuan Jie, Huang Yun, Han Shengjie *et al.*. The null shift of the differential laser gyro caused by the asymmetry of the left and right gyro's SFC[J]. *Laser J.*, 2002, **23**(3): 22~24
袁杰,黄云,韩生节等. 四频差动激光陀螺由于稳频精度局限等引入的零漂[J]. 激光杂志, 2002, **23**(3): 22~24
- Wu Guoyong, Gu Qitai. Temperature's effect on four frequency RLG bias[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(3): 198~200
吴国勇,顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. 光学技术, 2002, **28**(3): 198~200
- Yang Heng, Jiang Dongfang, Fan Dongyuan *et al.*. On frequency stabilization of ring laser gyros [J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 1999, **17**(3): 414~418
杨恒,蒋东方,范东远等. 环形激光陀螺频率稳定性的研究[J]. 西北工业大学学报, 1999, **17**(3): 414~418
- Jin Shilong, Long Xingwu, Li Xiaohong *et al.*. Research on New Type Control Mirror of Light Path and Optical Path Length for Ring Laser Gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 562~566
金世龙,龙兴武,李晓红等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 562~566
- Xu Guangming, Zhang Bin, Jiang Anguo *et al.*. Laser frequency stabilization for differential ring lasers [J]. *J. Optoelectronics laser*, 2000, **11**(1): 49~50
许光明,张斌,蒋安国等. 四频差动激光陀螺中的激光稳频[J]. 光电子激光, 2000, **11**(1): 49~50
- Li Junqiao, Qin Shiqiao, Wang Changping *et al.*. Simulation of frequency stabilization control for differential ring lasers [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 92~94
李君桥,秦石乔,王昌平等. 四频差动激光陀螺稳频控制仿真[J]. 光学技术, 2008, **34**(1): 92~94
- Gao Bolong. The locking phenomenon of the second kind in differential laser gyro [J]. *J. National University of Defense Technology*, 1982, **4**(1): 37~57
高伯龙. 四频差动陀螺中的第二类闭锁效应[J]. 国防科技大学学报, 1982, **4**(1): 37~57
- Yang Jianqiang. Derivation of the Lamb coefficients in four frequency ring laser [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 383~386
杨建强. 四频环形激光器兰姆系数的推导[J]. 激光技术, 2008, **32**(4): 383~386
- Tan Xinhong, Du Jianbang. A digital frequency-stabilization method for laser gyroscope [J]. *Acta Metrological Sinica*, 2002, **23**(3): 216~218
谭新洪,杜建邦. 激光陀螺数字式稳频方法的研究[J]. 计量学报, 2002, **23**(3): 216~218
- Pan Xianfei, Jiang Mingming, Li Changhong *et al.*. Digital DC frequency stabilization system for RLG[J]. *Chinese J. Inertial Technology*, 2006, **14**(3): 60~64
潘献飞,江明明,李长虹等. 激光陀螺数字直流稳频系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2006, **14**(3): 60~64
- Li Kangxun. Peak frequency stabilized transverse Zeeman He-Ne laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(1): 61~64
李康循. 峰值稳频横向塞曼 He-Ne 激光器[J]. 光学学报, 1991, **11**(1): 61~64
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Laser principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000, 214~221
周炳琨,高以智,陈侗嵘等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000, 214~221
- Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Choice of operating point for the four-mode differential laser gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 301~304
汪之国,龙兴武,王飞等. 四频差动激光陀螺工作点的选择[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 301~304
- Pan Xianfei, Jiang Mingming, Li Changhong *et al.*. Research on Control Method and Characteristics of RLG Digital Dither[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2006, **28**(5): 99~103
潘献飞,江明明,李长虹等. 激光陀螺数字抖动控制方法与特性[J]. 中国惯性技术学报, 2006, **28**(5): 99~103
- Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 354~358
高玉凯,邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 354~358