

文章编号: 0258-7025(2007)03-0354-05

# 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法

高玉凯, 邓正隆

(哈尔滨工业大学控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 理论分析了机械抖动激光陀螺(MDRLG)闭锁误差产生的原因,给出了闭锁误差与输入角速率、机械抖动频率和机械抖动幅度的关系。针对激光陀螺读出电路整脉冲计数解调的缺陷,提出了用抛物线方程描述激光陀螺输出信号零速率点的相位特征来补偿丢失的小角速率信息,并且利用激光陀螺零速率点相位的正弦值和余弦值以及零速率点相位的二阶导数进行闭锁误差补偿的新方法。仿真实验结果表明,在整周期采样过程中,激光陀螺最大输出误差由原来的6.25%减小到0.622%,有效地减小了闭锁误差,提高了激光陀螺的检测精度。同时该方法也使激光陀螺输出信号具有良好的稳定性和重复性。

**关键词** 激光技术;激光陀螺;闭锁误差;信号解调;零速率点

**中图分类号** V 241.5<sup>+</sup>58 **文献标识码** A

## A New Method for Eliminating the Lock-in Error of Mechanically Dithered Ring Laser Gyro

GAO Yu-kai, DENG Zheng-long

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The origin of lock-in error of the mechanically dithered ring laser gyroscopes (MDRLG) is theoretically analyzed. It is obtained that the lock-in error relates to the input angular velocity, the dither frequency and the dither magnitude. According to the limitation of pulse count decoder caused by the readout circuit, a new method for eliminating the lock-in error of RLG is presented. At first, the phase character at the zero rate of crossing is described by a parabola equation. Secondly, the fractional angular signal that is smaller than a pulse count is compensated. Finally, by utilizing the values of sine, cosine and the second derivate of the phase at the zero rate of crossing, the lock-in error is eliminating. The simulation results show that the maximum output error of RLG is reduced from 6.25% to 0.622%. So this method improves the detection precision of RLG, and the output signal of RLG has preferably stability and repetition.

**Key words** laser technique; ring laser gyroscope; lock-in error; signal decoder; zero rate of crossing

## 1 引言

激光陀螺(RLG)闭锁阈值一般为几十度/小时到几百度/小时,而且可能随时间变化<sup>[1]</sup>,闭锁将导致低于闭锁阈值的转速信息丢失以及锁区附近刻度系数非线性,是提高激光陀螺检测精度首先要克服的问题。

围绕激光陀螺的闭锁问题,提出了各种各样的

解决方案。其中,机械抖动偏频是最成功、使用最广泛的一种。通过加入正弦机械抖动,使陀螺大部分时间工作在锁区之外,以此来减小闭锁误差<sup>[2,3]</sup>。但是加上机械抖动后,陀螺输出信号中不仅包括载体输入角速率信息,还包含抖动信号的角速率信息,因此必须对输出信号进行鉴相解调,消除抖动角速率信号。目前,国内抖动偏频激光陀螺均采用整周期计数进行解调<sup>[4,5]</sup>,整周期采样对消除偏频信号

收稿日期:2006-09-13;收到修改稿日期:2006-11-17

作者简介:高玉凯(1970—),男,山东东平人,博士研究生,主要从事光电子技术和惯性技术研究。

E-mail: gaoyukai@hit.edu.cn

导师简介:邓正隆(1939—),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,从事惯性技术的教学与研究。

E-mail: deagle@public.hr.hl.cn

非常有效,但不能消除动态锁区的影响。另外,机械抖动在减小闭锁误差的同时,给激光陀螺输出信号的测量带来了不确定性,这种测量的不确定性就是随机游走。为了消除这种积累性误差,较好的办法是向正弦抖动信号中注入随机噪声<sup>[6,7]</sup>。这样,进出锁区所带来的误差可以通过时域平均的方法来减小。可是这样的噪声注入,每个抖动周期内噪声的取值有正有负,经过积分运算之后,并不能有效地随机化激光陀螺过锁区的相位,使激光陀螺误差角的减小并不明显<sup>[8]</sup>。通过注入由白噪声调制而成的阶梯噪声能很好地随机化激光陀螺过锁区的相位<sup>[9]</sup>,但需要长时间的测量,才能使激光陀螺的输出特性得到有效改善,如果测量时间短,阶梯噪声会使激光陀螺零偏稳定性变差。

本文从激光陀螺信号读出电路入手,提出借助零速率点相位的正弦值、余弦值和二阶导数值,采用软件补偿的办法达到减小闭锁误差的目的。该方法每半个抖动周期补偿一次,因此具有在线补偿的特点,在提高激光陀螺检测精度的同时,也使激光陀螺具有良好的零偏稳定性和重复性。

## 2 机械抖动激光陀螺的闭锁误差

机械抖动激光陀螺输出信号的数学模型为<sup>[2,3]</sup>

$$\dot{\psi}_{\text{gyro}} = \frac{2\pi}{K} [\Omega_{\text{in}} + \Omega_{\text{L}} \sin(\psi_{\text{gyro}}) + \Omega_{\text{D}} \sin \omega_{\text{D}} t], \quad (1)$$

式中  $\psi_{\text{gyro}}$  为激光陀螺输出正、反方向传播的两束光波的瞬时相位差,单位 rad;  $K$  为激光陀螺的刻度系数,单位 arcsec/count;  $\Omega_{\text{in}}$  为载体输入角速率,  $\Omega_{\text{L}}$  为闭锁阈值,  $\Omega_{\text{D}}$  为峰值抖动速率,单位均为 arcsec/sec;  $\omega_{\text{D}}$  为抖动角频率,单位 rad/sec。

激光陀螺的闭锁误差为

$$\psi_{\text{error}} = \psi_{\text{gyro}} - \psi_{\text{actual}}, \quad (2)$$

其中,  $\psi_{\text{actual}} = \int \frac{2\pi}{K} (\Omega_{\text{in}} + \Omega_{\text{D}} \sin \omega_{\text{D}} t) dt$  为激光陀螺实际感受到的角运动。将式(2)代入式(1),有

$$\dot{\psi}_{\text{error}} = \frac{2\pi}{K} \Omega_{\text{L}} \sin(\psi_{\text{actual}} + \psi_{\text{error}}). \quad (3)$$

如果载体输入角速率  $\Omega_{\text{in}} = 0$ ,激光陀螺机械抖动机构正、负半周最大抖动速率分别为  $\Omega_{\text{D}}^+$  和  $\Omega_{\text{D}}^-$ ,那么机械抖动激光陀螺在一个正的半抖动周期内敏感到的实际角位移为

$$\psi_{\text{actual}}^+ = \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} \cos \omega_{\text{D}} t \cong \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} \left(1 - \frac{\omega_{\text{D}}^2 t^2}{2}\right), \quad (4)$$

同理,机械抖动激光陀螺在一个负的抖动周期内敏

感到的实际角位移为

$$\psi_{\text{actual}}^- \cong \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} \left(\frac{\omega_{\text{D}}^2 t^2}{2} - 1\right), \quad (5)$$

将式(4)代入式(3),得到机械抖动正半周期所引起的闭锁误差

$$\dot{\psi}_{\text{error}}^+ = \frac{2\pi}{K} \Omega_{\text{L}} \sin \left[ \frac{2\pi}{K} \left( \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} - \frac{\Omega_{\text{D}}^+ \omega_{\text{D}} t^2}{2} \right) + \psi_{\text{error}} \right], \quad (6)$$

对式(6)积分,并利用菲涅耳积分特性<sup>[6]</sup>,可以得到一个正抖动半周期所引起的误差角增量

$$\Delta \psi_{\text{error}}^+ = \frac{2\pi \Omega_{\text{L}}}{\sqrt{K \Omega_{\text{D}}^+ \omega_{\text{D}}}} \sin \left( \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} + \psi_{\text{error}} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (7)$$

同理,将式(5)代入式(3),可以得到一个负抖动半周期所引起的误差角增量

$$\Delta \psi_{\text{error}}^- = \frac{2\pi \Omega_{\text{L}}}{\sqrt{K \Omega_{\text{D}}^- \omega_{\text{D}}}} \sin \left( \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} - \psi_{\text{error}} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (8)$$

这样一个完整的抖动周期所引起的误差角增量为

$$\begin{aligned} \Delta \psi_{\text{error}} &= \Delta \psi_{\text{error}}^+ + \Delta \psi_{\text{error}}^- = \\ &= \frac{4\pi \Omega_{\text{L}}}{\sqrt{K \Omega_{\text{D}} \omega_{\text{D}}}} \sin \left( \frac{\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^+ + \Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} + \frac{\pi}{4} \right) \times \\ &= \cos \left( \psi_{\text{error}} + \frac{\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}^+ - \Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

如果机械抖动机构的正负半周的最大抖动速率完全相同,则式(9)为

$$\Delta \psi_{\text{error}} = \frac{4\pi \Omega_{\text{L}}}{\sqrt{K \Omega_{\text{D}} \omega_{\text{D}}}} \sin \left( \frac{2\pi}{K} \frac{\Omega_{\text{D}}}{\omega_{\text{D}}} + \frac{\pi}{4} \right) \cos(\psi_{\text{error}}), \quad (10)$$

式(10)说明,尽管激光陀螺外部输入的角位移为零,但激光陀螺的输出显示陀螺还是转过了一定的角度,这个误差是由机械抖动零速率点穿越锁区造成的<sup>[10]</sup>,并且还会不断积累,形成角度随机游走误差。

式(10)是在激光陀螺输入速率为零的情况下获得的。现在考虑输入速率  $\Omega_{\text{in}}$  不为零的情况,即在有外界输入速率时,机械抖动激光陀螺在一个正的半抖动周期内敏感到的实际角位移为

$$\begin{aligned} \psi_{\text{actual}}^+ &= \frac{2\pi}{K} \left( \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} \cos \omega_{\text{D}} t + \Omega_{\text{in}} t \right) \cong \\ &= \frac{2\pi}{K} \left[ \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} \left( 1 - \frac{\omega_{\text{D}}^2 t^2}{2} \right) + \Omega_{\text{in}} t \right] \cong \\ &= \frac{2\pi}{K} \left[ \frac{\Omega_{\text{D}}^+}{\omega_{\text{D}}} + \frac{\Omega_{\text{in}}^2}{2\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^+} - \frac{\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^+}{2} \left( t - \frac{\Omega_{\text{in}}}{\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^+} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (11)$$

同理,机械抖动激光陀螺在一个负的抖动周期内敏感到的实际角位移为

$$\begin{aligned} \psi_{\text{actual}}^- &= \frac{2\pi}{K} \left( \frac{\Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} \cos \omega_{\text{D}} t - \Omega_{\text{in}} t \right) \cong \\ &= \frac{2\pi}{K} \left[ \frac{\Omega_{\text{D}}^-}{\omega_{\text{D}}} - \frac{\Omega_{\text{in}}^2}{2\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^-} + \frac{\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^-}{2} \left( t - \frac{\Omega_{\text{in}}}{\omega_{\text{D}} \Omega_{\text{D}}^-} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(11)和式(12),可得到一个抖动周期内的闭锁误差为

$$\Delta\psi_{\text{error}} = \Delta\psi_{\text{error}}^+ + \Delta\psi_{\text{error}}^- = \frac{4\pi\Omega_L}{\sqrt{K\Omega_D\omega_D}} \sin\left(\frac{\pi}{K} \frac{\Omega_D^+ + \Omega_D^-}{\omega_D} + \frac{\pi}{4}\right) \times \cos\left[\psi_{\text{error}} + \frac{\pi}{K} \left(\frac{\Omega_D^+ - \Omega_D^-}{\omega_D} + \frac{2\Omega_{in}^2}{\omega_D\Omega_D}\right)\right], \quad (13)$$

式(13)说明机械抖动激光陀螺闭锁误差不仅与机械抖动参数即抖动频率和抖动幅度有关,而且还与外界输入角速率的大小有关。

### 3 机械抖动激光陀螺闭锁误差的补偿方法

激光陀螺的输出信号是由相距 1/4 干涉条纹的一对光电管进行检测的。干涉条纹的移动形成了两

路相差为 90°的近似正弦电信号,两路信号相位的超前和滞后代表了陀螺的转动方向,而正弦信号的波数代表干涉条纹移动数也就是代表陀螺正向或反向转动的角增量。在输入速率小于闭锁阈值时,每个抖动周期激光陀螺输出信号进出锁区两次,图 1 所示为抖动周期是 8 ms 的激光陀螺输出信号的波形图。

通常激光陀螺的读出电路是一个整脉冲计数鉴相解调电路,通过记录每半个抖动周期内的脉冲数,并把脉冲数乘以刻度系数,就是相应时间内激光陀螺输出的角增量。图 2 所示为抖动方向切换点处原始信号的放大图,图中,A,B 分别是  $\sin\psi$  和  $\cos\psi$  经过零比较器后形成的方波信号,CW1,CCW1 为四倍频鉴相解调电路得到的负半抖动周期和正半抖动周期内的脉冲整形输出,每个脉冲代表激光陀螺正反两束光的相位差发生了  $\pi/2$  的改变。

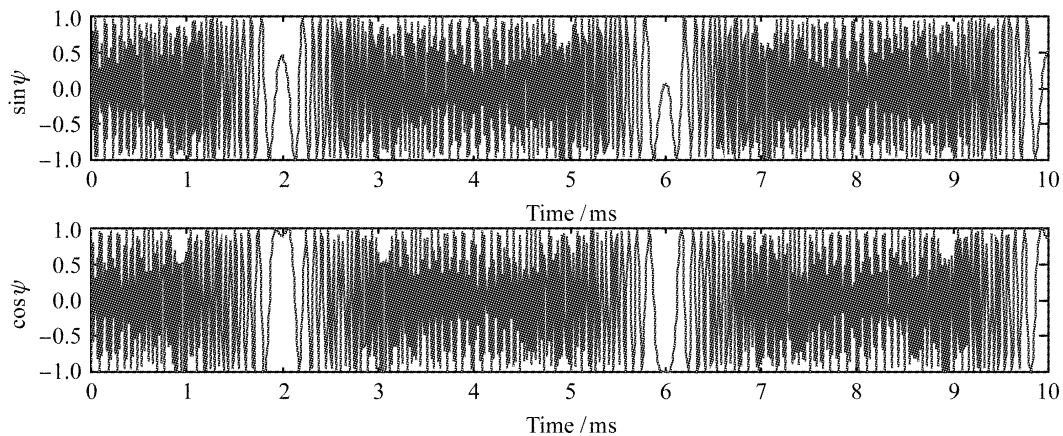


图 1 激光陀螺输出信号进出锁区波形的变化

Fig. 1 Output waveforms of the mechanically dithered RLG in lock-in area

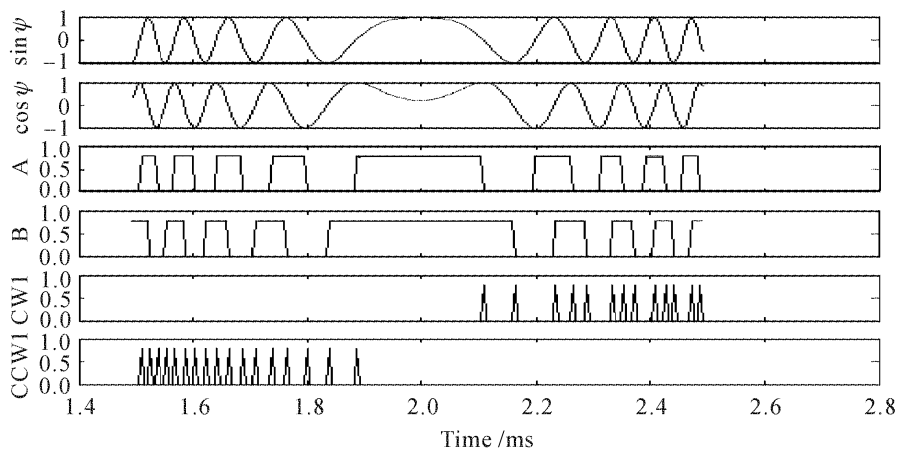


图 2 机械抖动激光陀螺闭锁误差的计算方法

Fig. 2 Arithmetic for calculating the lock-in error from the readout circuit

由于激光陀螺正反两束光的瞬时相位差在进出锁区时不可能总是  $\pi/2$  的整数倍,这样在整脉冲采样的过程中,就把小于  $\pi/2$  相角的小角度信号丢失

了。从图 2 的分析中也可以知道,输出信号每次进或出锁区的相位差在  $0 \sim \pi/2$  之间。设激光陀螺零速率点的两束光的相位差为  $\psi_0$ ,如图 2 中 2 ms 时刻

对应的相位(零速率点就是抖动方向的切换点,是 $\sin\psi$ 和 $\cos\psi$ 的导数都为零的时刻)。

当机械抖动信号为负的抖动周期时,在零速率点前,激光陀螺输出相位逐渐减小,零速率点后,机械抖动信号为正的抖动周期,激光陀螺输出相位逐渐增大,那么激光陀螺在零速率点输出的相位可以用抛物线方程来描述(一般情况下,零速率点前后的抛物线形状关于零速率点是不对称的)

$$\psi_{\text{gyro}}^- = \psi_0 - \frac{\ddot{\psi}_0^-(t-t_0)^2}{2}, \quad (14a)$$

和

$$\psi_{\text{gyro}}^+ = \psi_0 + \frac{\ddot{\psi}_0^+(t-t_0)^2}{2}, \quad (14b)$$

式中 $t_0$ 为机械抖动零速率点的时刻, $\psi_{\text{gyro}}^-$ 和 $\psi_{\text{gyro}}^+$ 分别为零速率点前和零速率点后激光陀螺输出的相位, $\ddot{\psi}_0^-$ 和 $\ddot{\psi}_0^+$ 为零速率点前后的相位加速度。

设零速率点后鉴相电路输出的第一个鉴相脉冲的时刻为 $t_1$ ,第二个鉴相脉冲的时刻为 $t_2$ ,因为两个鉴相脉冲之间的相位相差 $\pi/2$ ,则

$$\frac{\pi}{2} = \frac{\ddot{\psi}_0^+}{2} [(t_2-t_0)^2 - (t_1-t_0)^2], \quad (15)$$

从式(15)中可以求出过锁区后零速率点处的相位加速度。由式(14b)就可以求出零速率点与第一个鉴相脉冲的相位差。这个相位差就是整脉冲解调电路丢失的小角度信号。通过补偿半个抖动周期内两个丢失的小角度信号,就得到该半个抖动周期内激光陀螺实际输出的相位差。

将式(14)代入式(3)中,得到该零速率点前后激光陀螺的闭锁误差

$$\psi_{\text{error}}^- = \frac{2\pi\Omega_L}{K} \sqrt{\frac{\pi}{\ddot{\psi}_0^-}} [\sin(\psi_0) - \cos(\psi_0)], \quad (16a)$$

$$\psi_{\text{error}}^+ = \frac{2\pi\Omega_L}{K} \sqrt{\frac{\pi}{\ddot{\psi}_0^+}} [\sin(\psi_0) + \cos(\psi_0)], \quad (16b)$$

表 1 补偿激光陀螺闭锁误差仿真实验结果

Table 1 Simulation results for eliminating the lock-in error of RLG

Input rate / (°/h)	Output rate of RLG / (°/h)	Actual output rate of RLG / (°/h)	Output rate after eliminating the lock-in error / (°/h)	Output error before compensation / (%)	Output error after compensation / (%)
15	15.625	17.1774	15.0377	0.625	0.0377
100	93.75	101.7254	100.6222	6.25	0.6222
200	203.125	200.1654	201.281	3.125	1.281
300	296.875	297.6828	301.8518	3.125	1.8518
400	406.25	397.692	402.489	6.25	2.489
500	500	497.710	501.933	0	1.933

从表 1 可以看出,通过闭锁误差的补偿,激光陀螺输出误差得到有效的减小,如在输入速率为

设下一个零速率点激光陀螺输出的相位为 $\psi_1$ ,则在这两个零速率点之间,即这半个抖动周期内的闭锁误差为

$$\Delta\psi = \frac{2\pi\Omega_L}{K} \left[ \sqrt{\frac{\pi}{\ddot{\psi}_0^+}} (\sin\psi_0 + \cos\psi_0) + \sqrt{\frac{\pi}{\ddot{\psi}_1^-}} (\sin\psi_1 - \cos\psi_1) \right], \quad (17)$$

式(17)中零速率点的二阶导数由式(15)求得,零速率点的正弦值和余弦值由激光陀螺读出电路中相差 $1/4$ 干涉条纹的光电探测器读出。

激光陀螺读出电路在半个抖动周期内输出的脉冲数加上丢失的小角度信号,得到激光陀螺实际输出的角增量。由式(3)可以知道,实际的角增量减去式(17)表示的误差角增量,就是消除了激光陀螺闭锁误差后的真实输出信号。

## 4 仿真实验

按照第 3 节所述的补偿方法,利用计算机仿真技术,对激光陀螺的输入输出特性进行仿真实验。仿真实验中取 $\Omega_L = 300^\circ/\text{h}$ , $\Omega_D = 109.1^\circ/\text{s}$ , $\omega_D = 783.4 \text{ rad/s}$ ,输入速率范围为 $\Omega = 0^\circ/\text{h} \sim 500^\circ/\text{h}$ ,激光陀螺的刻度系数 $K = 0.5 \text{ arcsec/count}$ ,仿真结果如表 1 所示。激光陀螺鉴相电路输出速率为激光陀螺鉴相解调电路读出的脉冲数乘以刻度系数后的输出速率;实际输出速率为读出电路的脉冲数加上丢失的小角度信号后乘以刻度系数所表示的激光陀螺实际输出的角速率;补偿闭锁误差后输出速率为实际输出的角速率减去闭锁误差后的角速率。

100°/h时的输出误差由6.25%减小到0.622%。剩余的误差主要是受刻度系数及读出电路计数器时钟频

率的限制所造成的。

另外,该方法是对机械抖动激光陀螺在未加入随机噪声的情况下的读出电路进行软件改进的方法,能有效地检测小于闭锁速率的输入角速率,并且极大地提高激光陀螺输出信号的稳定性和重复性。

## 5 结 论

理论分析及仿真实验结果表明,通过补偿鉴相解调电路丢失的小角度信号及闭锁误差后,激光陀螺的输出精度得到有效提高。该方法是每半个抖动周期补偿一次,具有在线补偿的特点,在实时性上明显优于传统的注入白噪声减小动态锁区方法,对于利用激光陀螺整抖动周期采样的惯性技术具有很大的应用价值。该方法是在未加随机噪声的情况下,实现对小于闭锁阈值的速率进行检测,因此有利于提高激光陀螺的稳定性和重复性,对于长时间采样的激光陀螺惯导系统,能有效地减小由于注入随机噪声而引起的角度随机游走误差。

## 参 考 文 献

- 1 Kong Xiangui, Feng Tiesun, Jin Guofan. Lock-in variation in the frequency-stabilized ring laser gyroscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(10):744~748  
孔祥贵,冯铁荪,金国藩. 稳频激光陀螺中闭锁阈值的变化[J]. 中国激光, 1992, **A19**(10):744~748
- 2 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti *et al.*. The ring laser gyro [J]. *Rev. Modern Phys.*, 1985, **57**(1):61~104
- 3 Weng W. Chow, Jarel B. Hambenne, Thomas J. Hutchings *et al.*. Multi-oscillator laser gyros [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(9):918~936
- 4 Xie Yuanping, Zeng Chun, Tang Jianxun. Analysis and process of lock-in mechanically dithered ring laser gyro [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(1):45~48  
谢元平,曾 淳,汤建勋. 机械抖动激光陀螺过锁区分析与处理[J]. 光电子·激光, 2000, **11**(1):45~48
- 5 Liantuan Xiao, Jianming Zhao, Wangbao Yin *et al.*. Measurement of the wavelength modulation indices with selective reflection spectroscopy [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7):426~428
- 6 Joseph E. Killpatric. Laser gyro dither random noise [C]. *SPIE*, 1984, **487**:85~93
- 7 Wang Kedong, Gu Qitai. The influence of random noise on output of ring laser gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12):1479~1483  
王可东,顾启泰. 随机噪声对激光陀螺输出特性的影响[J]. 光学学报, 2003, **23**(12):1479~1483
- 8 Róbert M. Kay, Honeywell Inc. Sinusoidal Noise Injection into the Dither of a Laser Gyroscope [P]. US Patent 5416584, May 16, 1995
- 9 Tang Jianxun, Fu Wenyu, Zhang Guangfa. Experimental investigation of eliminating the dynamic in lock-in error of dithered ring laser gyro [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(2):176~179  
汤建勋,付文羽,张广发. 消除抖动偏频激光陀螺动态闭锁误差的实验研究[J]. 光电子·激光, 2000, **11**(2):176~179
- 10 Du Jianbang. Analysis of the error of a mechanically dithered laser gyro at the zero rate crossing [J]. *Journal of Astronautics*, 2000, **21**(3):58~63  
杜建邦. 抖动式激光陀螺零速率点误差分析[J]. 宇航学报, 2000, **21**(3):58~63