

基于锁相环的激光陀螺抖动机构频率跟踪技术

马家君^{1*}, 谢泉¹, 田泽安¹, 刘健宁², 蒋军彪³

¹ 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

² 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

³ 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要 基于激光陀螺抖动机构谐振频率随温度等环境因素的变化会导致抖动偏频不稳定的现象,研究了基于锁相环的激光陀螺抖动机构谐振频率跟踪技术。在对抖动机构和锁相环传递函数分析的基础上,应用自动控制理论,给出了锁相环频率跟踪精度、同步范围等性能指标与抖动控制参数的一般关系。结果表明,增大锁相环开环增益能减小频率跟踪稳态误差,同时将导致锁相环同步范围减小。采用低开环增益启动陀螺、再采用高开环增益跟踪抖动机构谐振频率,能保证 100 ms 内自动跟踪陀螺谐振频率,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内抖动机构谐振频率跟踪精度优于 0.015 Hz 。

关键词 激光光学; 激光陀螺; 抖动偏频; 频率跟踪; 锁相环

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101401

Frequency Tracking Technology for Dither Mechanism of Laser Gyros Based on Phase Locked Loop

Ma Jiajun^{1*}, Xie Quan¹, Tian Zean¹, Liu Jianning², Jiang Junbiao³

¹ College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

² School of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

³ Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The resonant frequency of dither mechanism of laser gyro varies with the temperature and other environmental factors, resulting in dither bias instability. The resonant frequency tracking technology of dither mechanism of laser gyro based on phase-locked loop is investigated. Based on the analysis of the transfer function of the dither mechanism and the phase-locked loop, the general relationship between the performance of the frequency tracking accuracy and the range of synchronization and the dither control parameters is worked out with the automatic control theory. The results show that the increase of the open-loop gain of phase-locked loop can reduce the steady-state error of frequency tracking and the synchronization range of phase-locked loop simultaneously. The low open-loop gain is adopted to initiate laser gyro, and then high-open loop gain is used to track frequency of dither mechanism. This strategy can guarantee the gyro resonance frequency being tracked automatically within 100 ms. The frequency tracking accuracy of the dither mechanism of a laser gyro machine based on phase-locked loop is better than 0.015 Hz with temperature ranging from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words laser optics; laser gyros; dither bias; frequency tracking; phase lock loop

OCIS codes 140.3370; 140.3425; 140.3570; 140.3560

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-03-02; 录用日期: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61605153, 61605156)、贵州省科技厅自然科学基金基础研究计划(黔科合 LH 字[2017]7224 号)、贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]107)、贵州大学博士基金[贵大人基合字(2016)61 号]

* E-mail: majiajun14041095@126.com

1 引言

激光陀螺利用环形激光器内相向行波的频差来测量角速度,具有动态范围大、比例因子精度高等优点,广泛应用于航空、航天、舰船、导弹等运动载体的导航或姿态控制^[1-7]。闭锁效应是激光陀螺主要的误差因素之一^[8-9],采用各种偏频技术克服锁区的影响成为激光陀螺的关键技术^[10-11]。机械抖动偏频是目前最成熟且应用最广泛的偏频技术^[12],该技术通过施加交变的机械抖动,使陀螺绝大部分时间工作在锁区之外,从而减小陀螺闭锁误差。抖动偏频同时使原来集中在零点附近的锁区分割成一系列的动态锁区,为了消除动态锁区的影响,通常需要向抖动驱动中注入随机噪声^[13]。

在激光陀螺工作过程中,抖动机构谐振频率会随温度变化发生漂移,目前主要有自激振荡和锁相环两种方案来跟踪陀螺抖动机构谐振频率^[14]。与自激振荡相比,锁相环具有抑制外界干扰的能力,能提高陀螺抖动偏频的稳定性及可靠性。目前,用锁相环芯片 CD4046 实现的抖动机构谐振频率跟踪由于失锁或频率跟踪精度低等原因,导致了陀螺在测试过程中出现偏频量不同程度的下降,避免锁相环失锁并提高频率跟踪精度成为亟待解决的关键问题。汤建勋等^[15]对锁相环跟踪激光陀螺抖动机构自然频率进行了初步的研究,但对影响锁相环频率跟踪性能的相关因素没有做详细分析。

本文从理论上分析了锁相环跟踪陀螺抖动机构谐振频率的机理,从频率捕获范围和跟踪精度两个方面分析了锁相环控制参数对谐振频率跟踪性能的影响,解释了 CD4046 失锁的主要原因。在此基础上,提出了采用小锁相环开环增益启动陀螺,再采用大开环增益进行频率跟踪的控制方法,该方法解决了陀螺调试过程中需要测试抖动机构谐振频率工艺步骤的问题,为提高陀螺生产效率提供了技术途径。同时,对采用锁相环技术的初始锁定时间及频率跟踪精度进行了实验测试。这些分析结果对优化陀螺机械抖动控制、改进生产工艺、提高激光陀螺可靠性及稳定性提供了重要参考。

2 理论模型

2.1 抖动机构数学模型

激光陀螺机械抖动机构可以近似为二阶振荡环节,其传递函数为^[15]

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \omega_n > 0, 0 < \zeta < 1, \quad (1)$$

式中: ω_n 为谐振频率; ζ 为阻尼比; s 为拉普拉斯变换的复变量。该传递函数的幅频和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arctan \frac{2\zeta\omega\omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2}, & \omega \leq \omega_n \\ -\pi \left(-\arctan \frac{2\zeta\omega\omega_n}{\omega^2 - \omega_n^2} \right), & \omega > \omega_n \end{cases}. \quad (3)$$

由(3)式可知,当 $\omega = \omega_n$ 时,有

$$\varphi(\omega_n) = -\pi/2, \quad (4)$$

且

$$\left. \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_n} = -\frac{2\zeta\omega_n(\omega_n^2 - \omega^2) + 4\zeta\omega_n\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \Big|_{\omega=\omega_n} = -\frac{1}{\zeta\omega_n}. \quad (5)$$

在 $\omega = \omega_n$ 处可以对抖动机构相位 $\varphi(\omega)$ 进行线性化处理,得到机械抖动机构传递函数近似为

$$H_\varphi = -\frac{1}{\zeta\omega_n}. \quad (6)$$

以上分析表明,根据激光陀螺相频特性,若将抖动激励信号与抖动反馈信号的相位差控制在 $-\pi/2$ 上,就能保证机械机构稳定工作在其谐振频率 ω_n 上。以异或门(XOR)作为鉴相器的锁相环能将输入输出信号相位差控制在 $-\pi/2$ 上。

2.2 锁相环数学模型

锁相环主要由异或门鉴相器、K计数器、ID计数器、除N计数器4部分构成^[16],其结构如图1所示,图中 f_0 为锁相环中心频率, M 为锁相环时钟频率与锁相环中心频率之比,INC为K计数器进位输出,DEC为K计数器借位输出。

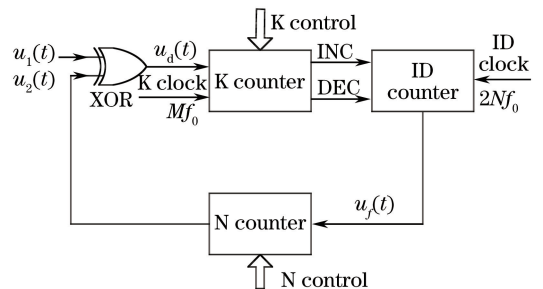


图1 锁相环结构图

Fig. 1 Structure diagram of phase lock loop

当锁相环的输入信号中含有噪声时,噪声使输入信号 $u_1(t)$ 过零点以随机的方式超前或滞后,从而导致鉴相器的输出信号 $u_d(t)$ 在一个平均值附近抖动,作为环路滤波器的 ID 计数器能消除鉴相器输出信号 $u_d(t)$ 中的随机波动。因此,锁相环可以有效避免随机噪声对频率跟踪的影响。异或门鉴相器的输出平均值 \bar{u}_d 是相位误差 θ_e 的三角函数,当 $-90^\circ < \theta_e < +90^\circ$ 时, $\bar{u}_d = (2/\pi)\theta_e$ 。因此,异或门鉴相器可以近似为增益 $G_d = 2/\pi$ 的零阶环节,其传递函数为

$$\frac{U_d(s)}{\Theta_e(s)} = \frac{2}{\pi}, \quad (7)$$

式中: $U_d(s)$ 和 $\Theta_e(s)$ 是 \bar{u}_d 和 θ_e 的拉普拉斯变换。异或门鉴相器的输出信号控制 K 计数器的占空比 δ_K , 当 $\delta_K = 1$ 时,上升计数器有效;当 $\delta_K = -1$ 时,下降计数器有效。当 K 计数器每秒产生的进位脉冲频率为 $f_{\text{carry}} = \delta_K M f_0 / K$ 时,相应的角频率为 $\omega_{\text{carry}} = \delta_K 2\pi M f_0 / K$ 。因此, K 计数器的传递函数为

$$H_K(s) = \frac{\Theta_{\text{carry}}(s)}{\Delta_K(s)} = \frac{2\pi M f_0}{K s}, \quad (8)$$

式中: $\Delta_K(s)$ 和 $\Theta_{\text{carry}}(s)$ 分别是信号 δ_K 和 θ_{carry} 的拉普拉斯变换, K 为 K 计数器的计数范围。加到 ID 计数器增量输入端的每个进位脉冲将引起 ID 输出信号增加 1/2 周期,故 ID 计数器可以是增益为 1/2 的零阶模块,除 N 计数器是增益为 1/N 的模块, N 为除 N 计数器的计数范围。综合以上分析得锁相环数学模型如图 2 所示,图中 DN/UP 是指 K 计数器对高电平进行减计数,对低电平进行增计数。

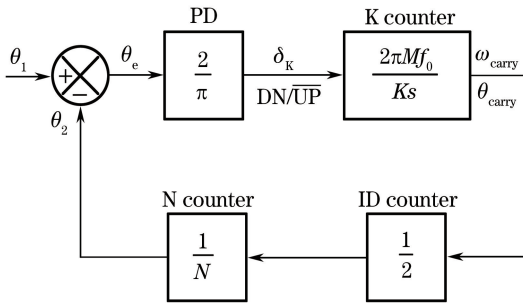


图 2 锁相环数学模型

Fig. 2 Mathematical mode of phase lock loop

以上分析获得了激光陀螺抖动机构和锁相环数学模型,下面将在此基础上,对陀螺机械抖动机构频率跟踪性能进行分析。

2.3 锁相环频率跟踪性能分析

根据图 2 所示的锁相环数学模型,可得输入信号相位 $\theta_1(t)$ 和输出信号相位 $\theta_2(t)$ 之间的传输函

数为

$$H'(s) = \frac{\Theta'_2(s)}{\Theta_1(s)} = \frac{2Mf_0/NK}{s + 2Mf_0/NK}, \quad (9)$$

式中: $\Theta'_2(s)$ 和 $\Theta_1(s)$ 分别为 $\theta_2(t)$ 和 $\theta_1(t)$ 的拉普拉斯变换; $2Mf_0/NK$ 为锁相环开环增益。(9)式表明,该锁相环相位传输函数为一阶惯性环节,具有抑制随机注入噪声以及外界干扰的能力,基于锁相环的机械抖动控制系统在一定程度上能提高激光陀螺的可靠性。锁相环误差传输函数可以表示为

$$H_e(s) = \frac{\Theta_e(s)}{\Theta_1(s)} = \frac{s}{s + 2Mf_0/NK}, \quad (10)$$

式中: $\Theta_e(s)$ 为 $\theta_e(t)$ 的拉普拉斯变换。激光陀螺抖动机构谐振频率随温度变化较为缓慢,将斜坡信号作为锁相环的输入,输入信号表示为 $\omega_1(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cdot t$, 相应相位为 $\theta_1(t) = \Delta\omega \cdot t$, 其中 $\Delta\omega$ 为斜坡信号变化率。相位拉普拉斯变换 $\Theta_1(s) = \Delta\omega/s^2$, 根据拉普拉斯变换终值定理,得相位误差为

$$\theta_e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{s}{s + 2Mf_0/NK} \frac{\Delta\omega}{s^2} = \frac{\Delta\omega}{2Mf_0/NK}。 \quad (11)$$

(11)式表明,增大开环增益 $2Mf_0/NK$, 可以有效减小锁相环稳态误差,从而提高锁相环频率跟踪精度。另外,由于线性模型仅对小相位误差有效,在大的相位误差情况下,鉴相器的输出信号与相位误差的三角波成比例,(11)式改写为

$$\theta_{e,\text{tri}}(\infty) = \frac{\Delta\omega}{2Mf_0/NK}。 \quad (12)$$

由于 $\theta_{e,\text{tri}}(\infty) \leq 1$, 不引起失锁的参考频率的最大变化值,即同步范围为

$$\Delta f_H = 2Mf_0/NK。 \quad (13)$$

采用锁相环芯片 CD4046 实现的抖动机构谐振频率跟踪,其中 $N = 2M$, $K = 32$, 假设锁相环中心频率 $f_0 = 400$ Hz, 则同步范围 $\Delta f_H = 12.5$ Hz, 陀螺在全温范围内谐振频率变化近 20 Hz, 如果激光陀螺谐振频率的变化超过 Δf_H , 系统将会失锁。

综上所述,锁相环开环增益与稳态误差成反比,与同步范围成正比。因此,为了保证锁相环可以快速自动锁定抖动机构谐振频率,并在陀螺工作过程中具有较高的频率跟踪精度,提出一种新的在陀螺启动过程中采用低开环增益,陀螺启动后,再采用高开环增益提高陀螺抖动几个频率跟踪精度的控制方法。该方法既能保证锁相环快速跟踪抖动机构谐振频率,又能保证陀螺在工作过程中具有较高的抖动机构谐振频率跟踪精度。

3 实验分析与讨论

在实验过程中,激光陀螺抖动反馈从抖动机构压电陶瓷上获取,经调理电路获得抖动方波和抖动幅度信号。抖动方波经全数字锁相环(ADPLL)进行相位锁定后,与24级伪随机信号发生器产生的随机噪声通过脉宽调制(PWM)驱动抖动机构;抖动幅度信号用于调节PWM脉宽,以确保陀螺工作过程中抖动机构幅度的稳定,抖动控制和噪声注入原理图如图3所示。

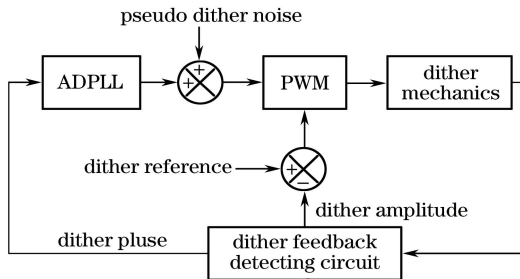


图3 抖动控制和噪声注入原理图

Fig. 3 Principle diagram of dither control and noise injection

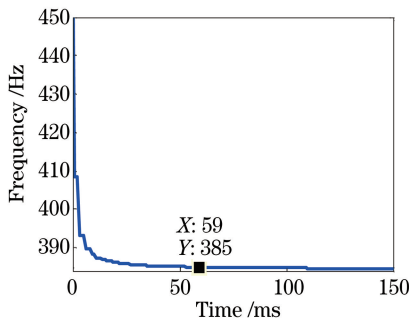
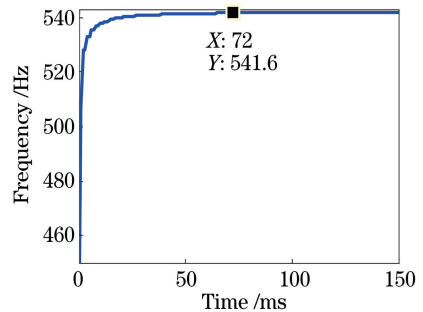


图4 启动过程中机械抖动频率变化曲线

Fig. 4 Mechanical dither frequency variation curve during startup



为进一步验证锁相环跟踪抖动机构谐振频率的性能,对常温下谐振频率为445 Hz的激光陀螺进行变温测试,变温过程如下:1)将激光陀螺固定在温箱中,设定温箱温度为20℃并保持2 h;2)设定温箱温度以1℃/min速度下降至-40℃并保持2 h;3)设定温箱温度以1℃/min速度上升至70℃并保持2 h;4)设定温箱温度以1℃/min速度下降至20℃并保持2 h。通过测试得到陀螺机械抖动频率和陀螺温度变化曲线如图5所示。

在图5中,当陀螺温度的升高时,机械抖动频率下降,当陀螺温度降低时,机械抖动频率升高,激光陀螺抖动系统谐振频率与温度近似呈线性关系,且陀螺温度每变化1℃,抖动频率变化约0.177 Hz,在全温范围内机械抖动频率变化在20 Hz以内,锁

通常情况下,激光陀螺抖动机构谐振频率在300~600 Hz范围内,设锁相环中心频率 $f_0 = 450$ Hz, $N = 2M$, $K = 3$,则同步范围 $\Delta f_H = f_0/K = 150$ Hz,能确保所有陀螺上电后都能自动跟踪抖动机械谐振频率。激光陀螺抖动控制通过现场可编程门阵列(FPGA)编程实现,用系统时钟频率 $f_s = 50$ MHz对抖动反馈方波进行采样计数,计数结果 N 通过串口输出,陀螺机械抖动频率 $f_d = f_s/N$ 。在常温条件下,对谐振频率分别为384 Hz、541.6 Hz的激光陀螺进行测试,得到陀螺在启动过程中机械抖动频率的变化曲线如图4所示。

测试结果表明,陀螺启动后,谐振频率为385 Hz的陀螺在59 ms完成陀螺谐振频率的跟踪,谐振频率为541.6 Hz的陀螺在72 ms完成陀螺谐振频率的跟踪。陀螺启动100 ms内锁相环能准确跟踪抖动机构谐振频率。陀螺启动0.5 s后,将当前陀螺抖动频率设置为锁相环中心频率 f_0 ,并设 $K = 15$,则锁相环同步范围 $\Delta f_H = f_0/15 \geq 20$ Hz。

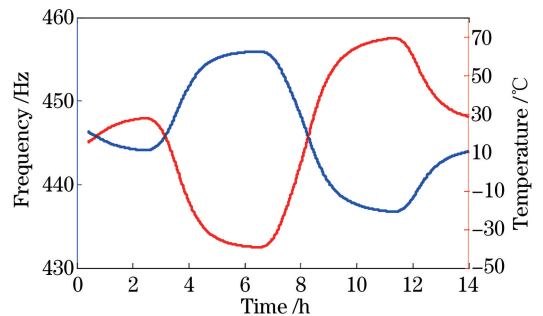


图5 变温过程中陀螺机械抖动频率和陀螺温度变化曲线
Fig. 5 Variation curves of mechanical frequency and temperature as functions of temperature

相环参数 $K = 15$ 能保证在全温范围内陀螺不失锁。为了进一步测试锁相环跟踪性能,分别在-20, 0, 20, 40, 60℃下对陀螺机械抖动控制系统谐振频率

进行检测,在检测过程中,采用高精度扫频信号发生器从 430 Hz 至 480 Hz 扫频,该信号发生器频率分辨率能达到 0.0001 Hz,记录抖动反馈幅度最大对应的频率为测试频率;在机械抖动闭环控制过程中,用高精度示波器检测的抖动机构频率为锁相环跟踪频率,表 1 给出了不同温度下检测频率与锁相环跟踪频率。

实验结果表明,基于锁相环的激光陀螺机械抖动控制系统在变温过程中频率跟踪精度误差优于 0.0150 Hz,能满足激光陀螺的使用要求。

表 1 不同温度下的频率跟踪误差

Table 1 Frequency tracking errors for different temperatures

Temperature / °C	Frequency of test /Hz	Frequency of track /Hz	Frequency difference /Hz
-20	452.5442	452.5406	0.0036
0	448.9881	448.9987	-0.0106
20	445.4695	445.4568	0.0127
40	441.9203	441.9194	0.0009
60	438.3740	438.3813	-0.0073

4 结 论

锁相环根据激光陀螺抖动机构相频特性跟踪谐振频率,增大开环增益能减小锁相环系统稳态误差,但会导致锁相环同步范围减小。采用低开环增益启动陀螺再采用高开环增益跟踪谐振频率,既能保证锁相环快速自动跟踪陀螺谐振频率,又能保证锁相环具有较高的频率跟踪精度。实验结果表明,锁相环能在陀螺启动 100 ms 以内自动跟踪抖动机构谐振频率,在变温环境下,锁相环频率跟踪精度优于 0.0150 Hz,基于锁相环的激光陀螺频率跟踪避免对抖动机构谐振频率的测定,该技术对提高激光陀螺生产效率及可靠性提供了重要参考。

参 考 文 献

[1] Liang K, Li L, Chen L F, *et al.* Experimental study on optimal transmittance of mirror in laser gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0401003.
梁可, 李龙, 陈林峰, 等. 激光陀螺反射镜最佳透射率实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0401003.

[2] Ma Y H, Yu W D, Quan B X, *et al.* Influence of path length control mirror on dynamic stability of ring laser gyro[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601001.
马仰华, 于文东, 权冰心, 等. 腔长控制镜对激光陀螺动态特性的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601001.

[3] Chow W W, Geabanacloche J, Pedrotti L M, *et al.* The ring laser gyro[J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61-104.

[4] Peshekhonov V G. Gyroscopic navigation systems: current status and prospects [J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(3): 111-118.

[5] Ma J J, Jiang J B, Liu J N. Frequency stabilization technique of total reflection prism laser gyros with double longitudinal modes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0902011.
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902011.

[6] Ma J J, Jiang J B. Research on the frequency stabilization properties of total reflection prism laser gyros[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102002.
马家君, 蒋军彪. 全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102002.

[7] Ma J J, Jiang J B, Liu J N. Adaptive frequency stabilization technique for total reflection prism laser gyros [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0314002.
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频技术 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0314002.

[8] Yang L X. Inertial technology manual[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013: 12.
杨立溪. 惯性技术手册[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 12.

[9] Lu Z D. Non-coplanar laser gyroscope[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 11-28.
陆志东. 非共面激光陀螺[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 11-28.

[10] Radina T V. Theory of frequency synchronization in a ring laser[J]. Physics Letters A, 2015, 379(36): 2140-2146.

[11] Hurst R B, Rabeendran N, Schreiber K U, *et al.* Correction of backscatter-induced systematic errors in ring laser gyroscopes[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7610-7618.

[12] Li G, Wu W Q, Fan Z F, *et al.* Research of misalignment between dithered ring laser gyro angle rate input axis and dither axis [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 92971X.

[13] Lü P, Liu J Y, Lai J Z, *et al.* Allan variance method for gyro noise analysis using weighted least square algorithm[J]. Optik, 2015, 126(20): 2529-2534.

- [14] Song R, Tang J X, Zhou J, *et al.* Effects of dither parameters on null-shift stability and angle random walk of dithered laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2290-2294.
宋锐, 汤建勋, 周健, 等. 抖动参数对机抖激光陀螺零偏稳定性与角随机游走的影响 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2290-2294.
- [15] Tang J X. Research and design for dither bias system of mechanically dithered ring laser gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000.
汤建勋. 机械抖动激光陀螺抖动偏频系统的研究与设计 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.
- [16] Li Y M. Phase locked loop design, simulation and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 4.
李永明. 锁相环设计、仿真与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 4.