

激光陀螺锁区的谐波测量方法

战德军 秦石乔 王省书 张宝东 魏文俭

(国防科学技术大学光电科学与工程学院光信息科学与技术系, 湖南 长沙 410073)

摘要 锁区对速率偏频激光陀螺的性能有重要影响,而高精度的锁区测量依然是一个难题。从激光陀螺闭锁方程出发,通过理论近似的方法得到了锁区与激光陀螺输出信号谐波的近似关系。在此基础上提出了一种激光陀螺锁区的谐波测量方法,进而通过闭锁方程的严格数值解进行了修正和误差分析。最后利用谐波测量法测量了某一激光陀螺的锁区大小,结果表明精度能够优于 5%。

关键词 激光技术; 激光陀螺; 锁区; 测量; 谐波

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0960

Harmonic Measurement for Laser Gyro Lock-in

Zhan Dejun Qin Shiqiao Wang Xingshu Zhang Baodong Wei Wenjian

(*Department of Optics Information Science and Technology, Institute of Optoelectronic Science and Engineering,*
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Lock-in is important to rate-biased laser gyro, but accurate lock-in measurement is always difficult. According to lock-in equation of laser gyro, approximate relation of lock-in and laser gyro output signal harmonic is derived from theoretical approximation, and based on this approximate relation the harmonic measurement for laser gyro lock-in is provided. Modification and errors analysis are processed through accurate numerical result of lock-in equation. Finally lock-in value of a laser gyro is measured by harmonic method, and the result shows that the measurement accuracy can be better than 5%.

Key words laser technique; laser gyro; lock-in; measurement; harmonic

1 引言

闭锁效应是制约速率偏频激光陀螺精度的一个重要误差源^[1~5],锁区大小的准确测量对研究速率偏频激光陀螺的误差机制和改进陀螺性能具有重要的意义。

通常的测锁区方法采用国军标中定义的方案^[6],简单地概括为:改变转台的转速,然后观察激光陀螺是否有信号输出判断陀螺锁区的大小。由于陀螺生产制作技术的不断进步,激光陀螺的锁区越来越小,标准测量方法对转台的低速性能、精度和稳定性的要求都很高,很难实现对实际锁区大小的可靠测量。本文从闭锁方程出发,提出了一种激光陀

螺锁区的谐波测量方法,降低了对转台性能的要求,提高了锁区测量的精度和可靠性。

2 理论分析

根据激光陀螺理论,激光陀螺过锁区的相位方程为^[7,8]

$$\Delta\dot{\phi} = 2\pi K[\Omega_i - \Omega_L \sin(\Delta\phi + \beta)], \quad (1)$$

(1) 式即激光陀螺的频率输出方程,也称闭锁方程。其中 Ω_i 为输入转速, Ω_L 为激光陀螺锁区大小, K 为激光陀螺标度因数, $\Delta\phi$ 为陀螺腔内两束激光的相位差, $\Delta\dot{\phi}$ 为激光陀螺输出圆频率, β 为附加相位,一般情况下可视为常数^[9]。

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-09-17

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z208)资助课题。

作者简介: 战德军(1979—),男,博士研究生,主要从事虚拟仪器和激光陀螺等方面的研究。E-mail: zdj4444@sohu.com

通讯简介: 秦石乔(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光电仪器与测控技术和光电精确制导技术等方面的研究。

E-mail: sqqin8@nudt.edu.cn

方程(1)是超越方程,只能有数值解,在一定条件下,通过化简的方法可以得到(1)式的近似解析解。

当 $\Omega_L \ll \Omega_1$ 时,忽略 Ω_L 项,从(1)式得到 $\Delta\phi$ 的一次近似解:

$$\Delta\phi = 2\pi K\Omega_1 t + \alpha_1, \quad (2)$$

α_1 为的初始相位,将(2)式代入(1)式中

$$\Delta\dot{\phi} = 2\pi K[\Omega_1 - \Omega_L \sin(2\pi K\Omega_1 t + \alpha_1 + \beta)], \quad (3)$$

由(3)式可以得到 $\Delta\phi$ 的二次近似解

$$\Delta\phi = 2\pi K\Omega_1 t + \frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) + \alpha_2, \quad (4)$$

(4)式中 $\alpha = \alpha_1 + \beta, \alpha_2 = \frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos\alpha, \alpha_2$ 是对 $\Delta\phi$ 进行二次近似得到的初始相位。

激光陀螺的输出信号可表示为

$$S_1 = A \sin(\Delta\phi), \quad (5)$$

其中 A 代表输出信号的幅度, $\Delta\phi$ 为陀螺腔内两束激光的相位差。将(4)式代入(5)式,并展开得

$$\begin{aligned} S_1 &= A \sin \left[2\pi K\Omega_1 t + \frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) + \alpha_2 \right] = \\ &A \sin(2\pi K\Omega_1 t + \alpha_2) \cos \left[\frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) \right] + \\ &A \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha_2) \sin \left[\frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) \right], \quad (6) \end{aligned}$$

当 $\Omega_L \ll \Omega_1$ 时

$$\cos \left[\frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) \right] \approx 1, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sin \left[\frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha) \right] &\approx \\ &\frac{\Omega_L}{\Omega_1} \cos(2\pi K\Omega_1 t + \alpha), \quad (8) \end{aligned}$$

由于 $\alpha_2 = (\Omega_L/\Omega_1) \cos(\alpha)$ 和 $\Omega_L \ll \Omega_1$, 所以 $\alpha_2 \approx 0$ 。将(7)式、(8)式代入(6)式并展开得

$$\begin{aligned} S_1 &= A \left[\sin(2\pi K\Omega_1 t) + \right. \\ &\left. \frac{\Omega_L}{2\Omega_1} \cos(4\pi K\Omega_1 t + \alpha) + \frac{\Omega_L}{2\Omega_1} \cos\alpha \right], \quad (9) \end{aligned}$$

从(9)式中 S_1 的解析形式可以发现激光陀螺输出信号的基波幅度 $A_{K\Omega_1}$ 和二次谐波幅度 $A_{2K\Omega_1}$ 满足

$$\frac{\Omega_L}{2\Omega_1} = \frac{A_{2K\Omega_1}}{A_{K\Omega_1}}, \quad (10)$$

(10)式即为使用谐波测量激光陀螺锁区的理论基础。从(10)式可知,当输入转速一定的情况下陀螺锁区大小与二次谐波和基波幅度的比值成正比。

3 数值模拟

(10)式是在 $\Omega_L \ll \Omega_1$ 条件下近似得到的激光陀螺锁区谐波法测量法的理论表达式,从理论上讲(10)式只适用于输入转速远大于锁区的情况,而此时激光陀螺输出信号的谐波失真非常小,不利于高精度地测量锁区的大小。实际上,当 Ω_1 接近 Ω_L 时,激光陀螺输出信号的谐波失真很明显。使用 Simulink 仿真求解闭锁方程(1)式,激光陀螺输出信号的仿真模型如图 1 所示。对仿真得到的激光陀螺输出信号进行频谱分析,计算激光陀螺输出信号的基波幅度 $A_{K\Omega_1}$ 和二次谐波幅度 $A_{2K\Omega_1}$ 的比值,以期对输入转速在锁区附近时(10)式的正确性进行验证。

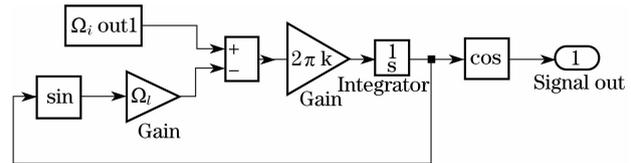


图 1 激光陀螺输出信号的 Simulink 模型

Fig. 1 Simulink model for laser gyro output signal

当 $K = 2000$ 脉冲/度, $\Omega_1 = 1^\circ/\text{s}$, $\Omega_L = 0.5^\circ/\text{s}$, $\beta = 0$ 时,通过(1)式和(5)式仿真得到激光陀螺的输出信号。图 2(a)为一段时域波形,图 2(b)为采样数据的频谱分析结果。

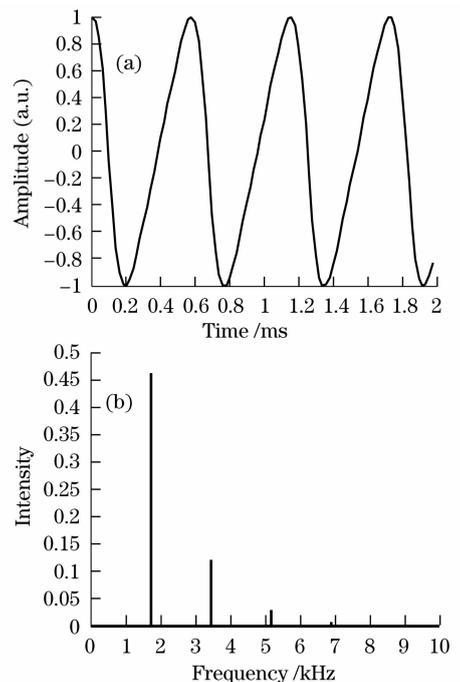


图 2 $\Omega_L = 0.5^\circ/\text{s}$ 时仿真结果的时域和频域图

Fig. 2 Time and frequency domain diagrams of simulation results with $\Omega_L = 0.5^\circ/\text{s}$

从图 2 可以发现,当输入转速接近锁区时,激光陀螺的输出信号有比较明显的畸变。通过傅立叶分析,发现频谱中包含多个谐波成份,并且基频并不准确地落在 $K\Omega_1$ 即 2000 Hz 处。按照激光陀螺理论^[10],激光陀螺的输出频率(基频) f 与输入转速 Ω_1 和锁区 Ω_L 的关系为

$$f = \begin{cases} K \sqrt{\Omega_1^2 - \Omega_L^2} & |\Omega| > \Omega_L \\ 0 & |\Omega| < \Omega_L \end{cases}, \quad (11)$$

根据(11)式,当 $\Omega_L \ll \Omega_1$ 时 $f \approx K\Omega_1$ 。当 Ω_1 接近 Ω_L 时, f 进入非线性区,其值应由 $K \sqrt{\Omega_1^2 - \Omega_L^2}$ 决定。例如,上面仿真中 $K = 2000 \text{ pulse}/(^{\circ})$, $\Omega_1 = 1^{\circ}/\text{s}$, $\Omega_L = 0.5^{\circ}/\text{s}$ 时,基频 $f = K \sqrt{\Omega_1^2 - \Omega_L^2} = \sqrt{2000^2 - 1000^2} = 1732 \text{ Hz}$ 。因此,当 Ω_1 接近 Ω_L 时,(10)式应修正为

$$\Omega_L/2\Omega_1^* = A_{2K\Omega_1^*}/A_{K\Omega_1^*}, \quad (12)$$

(12)式中, $\Omega_1^* = \sqrt{\Omega_1^2 - \Omega_L^2}$, 所以(12)式又可写为

$$\Omega_L = \frac{\Omega_1}{\sqrt{1 + (A_{K\Omega_1^*}/2A_{2K\Omega_1^*})^2}}, \quad (13)$$

(13)式是谐波法测锁区的一般性公式,可以应用在输入转速接近锁区的情况。

图 3 是当锁区大小 $\Omega_L = 0.1^{\circ}/\text{s}$, 其它参数不变的情况下,仿真得到的时域和频域图。

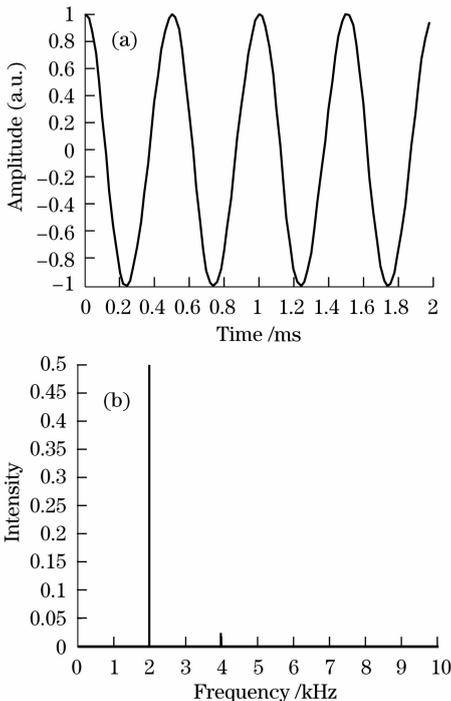


图 3 $\Omega_L = 0.1^{\circ}/\text{s}$ 时仿真结果的时域和频域图
Fig. 3 Time and frequency domain diagrams of simulation results with $\Omega_L = 0.1^{\circ}/\text{s}$

为了分析初始相位 $\Delta\phi_0$ 、输入转速 Ω_1 和锁区大小 Ω_L 对谐波法测锁区的影响,使用相对误差 R 表示谐波法测锁区的准确性。相对误差 R 的计算方法如下式所示:

$$R = \frac{\Omega_L^* - \Omega_L}{\Omega_L} \times 100(\%), \quad (14)$$

其中 Ω_L^* 是通过(13)式计算或实测得到的锁区大小, Ω_L 为理论真值。

图 4(a)、(b)所示的仿真结果初步说明了初始相位 $\Delta\phi_0$ (附加相位 β 可以归结到 $\Delta\phi_0$)、输入转速 Ω_1 和锁区大小 Ω_L 对谐波法测锁区的影响。

图 4(a)中的两条曲线代表了在 $\Omega_1 = 0.5^{\circ}/\text{s}$, Ω_L 分别为 $0.01^{\circ}/\text{s}$ 和 $0.03^{\circ}/\text{s}$ 时,谐波法测锁区误差与初始相位的关系;图 4(b)中的两条曲线代表了在 $\Omega_L = 0.01^{\circ}/\text{s}$, Ω_1 分别为 $0.2^{\circ}/\text{s}$ 和 $0.5^{\circ}/\text{s}$ 时,谐波法测锁区误差与初始相位的关系。仿真使用的刻度因数 $K = 2000 \text{ pulse}/(^{\circ})$ 。

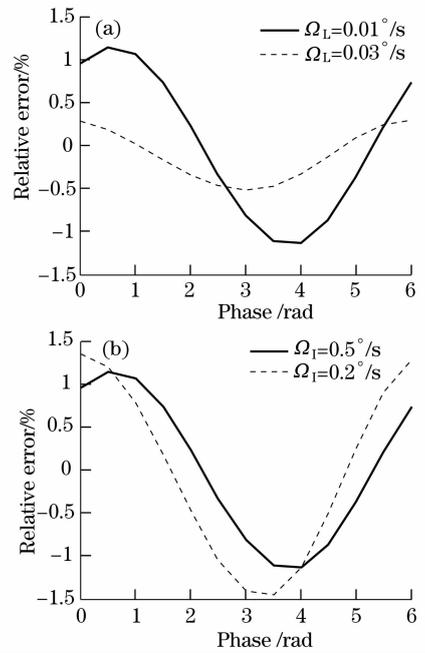


图 4 谐波法测锁区误差和初始相位的关系
Fig. 4 Error of lock-in harmonic measurement versus initial phase

为了更方便的分析谐波法测锁区与输入转速 Ω_1 和锁区 Ω_L 的关系,同时考虑到初始相位的影响,下面的仿真中使用不同初始相位条件下,谐波法测锁区的最大误差代替初始相位的影响。

3.1 谐波法测锁区误差与输入转速的关系

输入角速度 Ω_1 的变化范围为 $0.2^{\circ}/\text{s} \sim 2^{\circ}/\text{s}$, 锁区大小 Ω_L 分别等于 $0.01^{\circ}/\text{s}$ 、 $0.05^{\circ}/\text{s}$ 、 $0.10^{\circ}/\text{s}$ 和 $0.15^{\circ}/\text{s}$, 采样频率为 20 kHz, 采样时间为 3 s, 仿真

结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出谐波法测锁区的相对误差随输入角速度 Ω_1 的增大有所下降,当达到一定的转速后谐波法测锁区的误差趋于平稳。

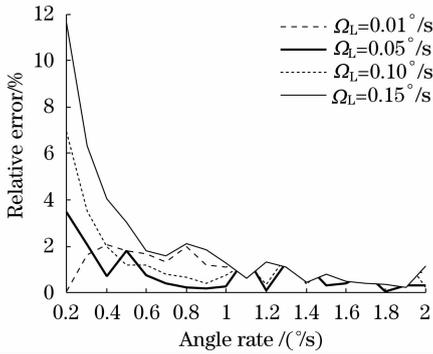


图 5 谐波法测锁区误差与输入转速的关系

Fig. 5 Lock-in error by harmonic measurement versus input angular rate

3.2 谐波法测锁区误差与锁区大小的关系

当输入转速 $\Omega_1 = 1^\circ/\text{s}$, 锁区大小的变化范围为 $0.01^\circ/\text{s} \sim 0.5^\circ/\text{s}$, 采样频率为 20 kHz, 采样时间为 3 s, 仿真结果如图 6 所示。

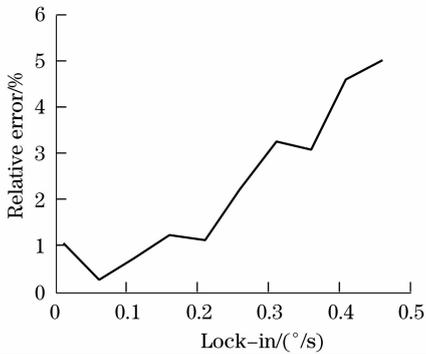


图 6 谐波法测锁区误差与锁区大小的关系

Fig. 6 Lock-in error by harmonic measurement versus lock-in value

从图 6 中可以清楚的看出,输入转速不变的情况下,随着陀螺锁区的增大,谐波法测锁区的精度明显下降。

上述的仿真结果也与采样频率和采样时间长度有关,一般采样频率越高、采样时间越长测锁区误差越小。当信号噪声较大时,通过增加采样时间可以降低噪声对频谱的影响,提高测锁区精度。

综合图 5、6 的仿真结果发现,当输入转速远离锁区时,测量锁区的精度会有所提高。但由于二次谐波所占的比重会随着输入转速的增大而减小,考虑到实际情况中噪声的影响,输入转速 Ω_1 不宜过大;但如果输入转速过小,则输入角速度的平稳性和测锁区精度会下降,所以输入转速 Ω_1 也不宜过小,

一般 Ω_1 取为 20 倍左右的 Ω_L 为宜,根据前面图 5、6 的仿真结果,使用(13)式的谐波法测锁区误差一般情况下可以达到 5%。

4 实 验

使用谐波法测量激光陀螺锁区的实验装置如图 7 所示。将激光陀螺通过一个支架安装在转台上,陀螺敏感轴与转台旋转轴成一定的夹角,降低转台转速的同时保证角速度的稳定性。利用转台旋转角速度在陀螺敏感轴上的分量为陀螺提供偏频。首先使转台高速旋转,根据激光陀螺(LG)的输出频率计算得出转台旋转轴和陀螺敏感的夹角为 88.693° ,然后减小转台转速,使用前面介绍的谐波分析法测得陀螺锁区。

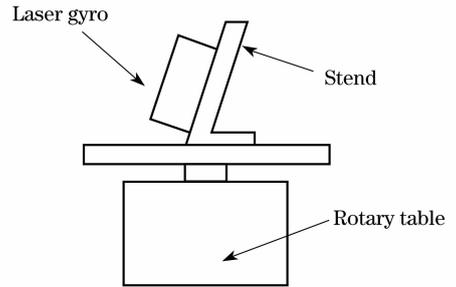


图 7 谐波法测量锁区实验方案

Fig. 7 Experimental setup for lock-in harmonic measurement

实验中使用的数据采集设备为泰克 TDS2014 示波器,8 位分辨率,每屏采样数据点数为 2500。图 8(a)、(b)是陀螺输出信号的一组时域和频域图,图 8(c)给出了基频成份放大图,图 8(d)给出了二次谐波成份放大图。

通过对多组实验测得的数据进行分析,谐波法测得激光陀螺锁区的相对误差为 6.8%,这个结果误差略大于前面仿真分析的结果,主要有两方面的原因:

1) 信号中含有噪声

与基波相比,二次谐波幅度很小,根据(13)式,噪声在二次谐波上的分量将会直接导致测锁区误差,所以噪声的影响不可忽略。

2) 示波器的采样点数少

根据傅里叶变换理论,采样点数决定窗函数的窗长,增加窗长有助于在频域上减小噪声对各次谐波的影响。

3) 地球自转角速度在陀螺敏感轴上的分量不断变化

在测锁区的过程中,地球自转角速度在陀螺敏感轴上的分量会随着转台旋转不断变化。实验装置所在地理纬度为 28.2° ,所以在转台旋转过程中,地球自转角速度在陀螺敏感轴上分量的变化范围约为

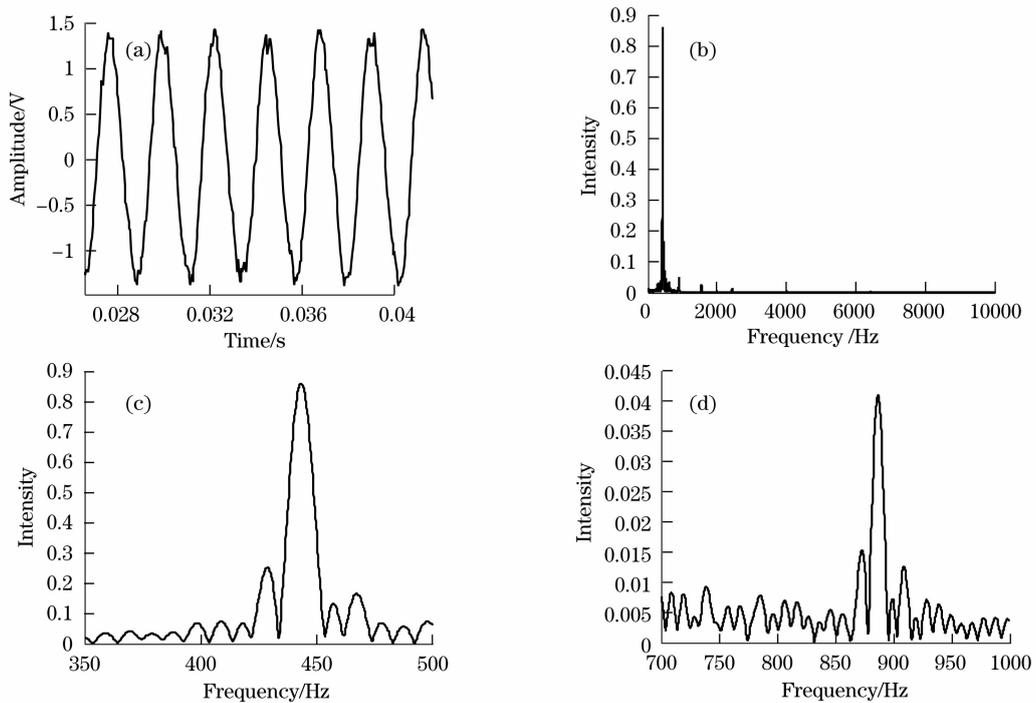


图 8 激光陀螺输出信号的时域和频域图

Fig. 8 Time and frequency domain diagrams of laser gyro output signal

±13°/h,虽然实验中通过观察基本在同一位置采样,但由于观测误差的存在,地球自转的影响不可忽略。

5 结 论

从理论分析得出激光陀螺输出信号的主要谐波成分即一次、二次谐波幅值与输入角速度和锁区大小的关系,得到当输入转速远远大于锁区时的理论计算公式(10),然后根据数值模拟结果对(10)式进行修正,最后得到用于激光陀螺锁区谐波测量法的公式(13)。然后对采用(13)式计算锁区的误差进行了数值模拟,结果表明使用谐波法测锁区误差与初始相位、输入转速和陀螺锁区大小有关,谐波法测锁区精度随着陀螺锁区增大而降低,随着输入转速的增大而提高。在实际情况中由于噪声的影响,输入转速越大,二次谐波受噪声影响越大,所以输入转速也不宜过大,输入转速为陀螺锁区大小的 20 倍左右时,谐波法测锁区误差可以达到 5%。

参 考 文 献

- Zhan De-jun, Qin Shi-qiao. Analysis of the error characteristic of rate-biased laser gyro passing through lock-in[J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(6):730~731
战德军,秦石乔. 速率偏频激光陀螺过锁区误差特性分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2007, **15**(6):730~731
- Gao Yukai, Lin Yurong, Deng Zhenglong. A method for improving the performance of ring laser gyro by injecting the multi-cycles step noise with white noise[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4):481~484

- 高玉凯,林玉荣,邓正隆. 改善激光陀螺输出特性的随机噪声注入方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):481~484
- Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chin. 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
- Xu Yajun, Liu Changhua, Xu Zhiyong. Dead band of laser gyro and rate bias control system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5):37~39
徐亚军,刘长华,徐智勇. 激光陀螺锁区及速率偏频控制系统[J]. *光电工程*, 2003, **30**(5):37~39
- Han Zonghu, Feng Peide. Theoretical research on improving the accuracy of laser gyro using rate biased technique[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, **9**(2):43~44
韩宗虎,冯培德. 速率偏频技术提高激光陀螺精度的理论研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, **9**(2):43~44
- Zhang Weixu, Du Jianbang. *Methods for Laser Gyroscope Test* [M]. Beijing: COSTIND, 1995: 7~8
张惟叙,杜建邦. *激光陀螺仪测试方法* [M]. 北京:国防科工委, 1995:7~8
- Gao Bolong. The theoretical analysis of lock-in in mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1979 (Supl.): 47~64
高伯龙. 抖动过锁区的理论分析[J]. *工学学报(现名国防科技大学学报)*, 1979(增刊):47~64
- Aronowitz F. Lock-in and intensity-phase interaction in the ring laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(1):130~141
- Xie Yuanping. *Investigation of Phase-Demodulation and Frequency Stabilization Techniques in Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes* [D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2000: 27~28
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:国防科学技术大学, 2000: 27~28
- Gao Bolong, Li Shutang. *Laser Gyro* [M]. Changsha: Press of National Defense Technology University, 1984:27~46
高伯龙,李树棠. *激光陀螺* [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984:27~46