

文章编号: 0253-2239(2010)08-2290-05

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

宋 锐 汤建勋 周 健 杨未强

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对传统方法中以抖动偏频量和抖动激励信号中的噪声强度来表示机抖激光陀螺抖动参数的方法进行了改进,以 K 参数和抖动幅度中的噪声强度来表示机抖激光陀螺的抖动参数,从而使不同抖动频率和注入效率的陀螺具有相同的比较标准。定量讨论了 K 参数与抖动幅度中噪声强度的大小对机抖激光陀螺零偏稳定性和角随机游走的影响。实验结果表明,当 K 参数取 600~650 之间、抖动幅度中的噪声强度取 2%~3% 之间时,机抖激光陀螺的零偏稳定性和角随机游走可以达到比较理想的状态。

关键词 激光陀螺;抖动参数;零偏稳定性;角随机游走

中图分类号 U666.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2290

Effects of Dither Parameters on Null-Shift Stability and Angle Random Walk of Dithered Laser Gyro

Song Rui Tang Jianxun Zhou Jian Yang Weiqiang

(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract New dither parameters which consist of K coefficient and the noise intensity in the dither amplitude are proposed to replace the traditional ones which consist of oscillating bias amplitude and the noise intensity in the dither drive signal. The improvement provides a same criteria for laser gyros with different dither frequencies and injecting efficiencies to compare with each other. The effects of dither parameters such as K coefficient and the noise intensity in the dither amplitude on the null-shift stability and the angle random walk of dithered laser gyro are discussed in detail. Experiments show that the null-shift stability and the angle random walk can be reduced to a minimum and the laser gyro works in good condition when K choose the value between 600 and 650, and the noise intensity in the dither amplitude choose the value between two and three percent.

Key words dithered laser gyro; dither parameters; null-shift stability; angle random walk

1 引 言

抖动偏频技术使得机抖激光陀螺中原来集中在零点附近的锁区分割成位于抖动角频率整数倍附近的一系列小锁区,称为动态锁区^[1]。为了进一步消除动态锁区的影响,较好的办法是向抖动信号中注入随机噪声^[2~4]。传统方法中是以抖动偏频量和抖动驱

动信号中的噪声强度来表示抖动参数^[5],但在实验过程中发现此方法存在一定的缺陷——对于不同抖动频率的陀螺来说无统一的比较标准。在捷联惯性导航系统中,为了克服惯导系统的圆锥误差^[6],三个激光陀螺具有不同的抖动频率,彼此相差 40~50 Hz;而相同的抖动偏频量对于不同抖动频率的激光陀螺来

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-11-25

基金项目: 国防科技预研基金(51309050301)资助课题。

作者简介: 宋 锐(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光惯性制导方面的研究。E-mail: srnotice@163.com

导师简介: 汤建勋(1972—),男,副教授,硕士生导师,主要从事捷联惯性导航方面的研究。

E-mail: Tangjianxun@sina.com

说相当于具有不同的抖动幅度,而陀螺在不同抖动幅度下对比其性能是无意义的。所以本文对原有表示抖动参数的方法提出改进,以 K 参数和抖动幅度中的噪声强度来表示抖动参数,此方法不仅可以克服原有方法的不足,而且还可以推广到不同类型的机抖激光陀螺之间进行相互比较。

2 表示机抖激光陀螺抖动参数的新方法

传统方法中抖动偏频量 α 和抖动驱动信号中噪声强度 χ_d 为

$$\alpha = S_F \omega_D \theta = S_F 2\pi f \theta, \quad (1)$$

$$\chi_d = \sigma(V)/V_0, \quad (2)$$

式中 S_F 为陀螺比例因子, f 为陀螺的抖动频率, θ 为抖动幅度, $\sigma(V)$ 为抖动激励信号中的均方差, V_0 为抖动激励信号的均值。

在改进方法中,以 K 参数和抖动幅度中的噪声强度 χ 来表示抖动参数的大小,表达式为

$$K = \alpha/f, \quad (3)$$

$$\chi = \sigma(\theta)/\theta_0, \quad (4)$$

式中 $\sigma(\theta)$ 为抖动幅度的均方差, θ_0 为抖动幅度的均值; χ 和 χ_d 之间的关系为

$$\chi = \eta \chi_d, \quad (5)$$

式中 η 是噪声的注入效率为

$$\eta = 1/2 \sqrt{\pi/Q}, \quad (6)$$

式中 Q 为抖轮的的品质因数^[7]。

在实验过程中发现,不同抖动频率激光陀螺的抖轮是不一样的,所以抖轮的的品质因数 Q 一般也不相同(Q 值是抖动频率除以频率—响应曲线中 3 dB 带宽对应的频率范围),而品质因数的大小决定了噪声的注入效率 η ; Q 值不同,注入效率不同,相同抖动激励信号中的噪声强度就会在抖动幅度中产生不同的噪声强度,所以,原有方法忽略了不同激光陀螺之间抖动频率和品质因数的差别,使得陀螺之间没有统一的比较标准,从而无法准确衡量激光陀螺的性

能。新方法中以 K 参数和抖动幅度中噪声强度 χ 来表示抖动参数可以很好的克服原有方法的不足,相同的 K 参数就有相同的抖动幅度,克服了抖动频率的不一致;相同的 χ 意味着相同的抖动幅度中的噪声强度,克服了因不同品质因数导致的不同噪声注入效率;这样,在相同 K 参数和 χ 的情况下,不同激光陀螺之间性能的相互比较就能准确反映其关键指标之一——锁区^[8~10]的大小。

抖动参数的取值会对激光陀螺的工作状态产生很大的影响,抖动幅度太小的陀螺无法跳出锁区,输出会严重失真甚至为 0;而抖动强度太大会增加功耗、减小抖轮的寿命并且对周围环境产生很大的噪声污染,这对于装备在隐蔽功能很强的载体上的捷联惯导系统来说后果是很严重的(如潜艇上的惯导系统)。关于抖动参数的研究有很多,但是采取什么样的抖动和噪声以及加入多大的强度始终比较模糊;有些研究只从理论上给出推导而不涉及实验结果,有些研究虽有实验结果但给出的强度范围很广,实际指导意义不大。所以希望通过实验,对本单位自行生产的机抖激光陀螺找到一些比较理想的经验值,得到一些有益的结论;这对于陀螺生产单位以及使用单位来说都是很有价值的,而且对于不同单位生产的激光陀螺来说也提供了一个相互比较的标准。

3 抖动参数对机抖激光陀螺零偏稳定性的影响

激光陀螺的零偏稳定性是衡量其精度的重要参数,实验中的抖动系统采取的是正弦抖动加伪随机序列产生高斯白噪声的方式,高斯白噪声是由伪随机序列通过滤波、采样保持电路得到,并且每半个抖动周期变化一次。抖动幅度和噪声的大小都是可调的,以方便观察二者对激光陀螺零偏稳定性的影响,图 1 为抖动控制和噪声注入方式的原理图。

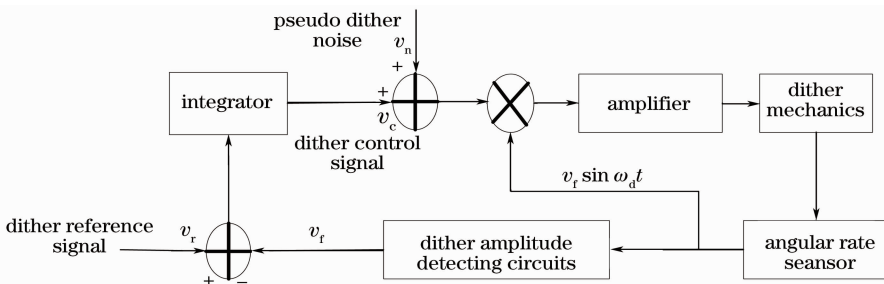


图 1 抖动控制和噪声注入方式的原理图

Fig. 1 Principle map of dither control and noise injection

当只加入抖动时,陀螺的锁区分散到抖动频率整数倍处形成一系列小的动态锁区,第 n 阶锁区宽度为^[1]

$$B_n = B_L |J_n(\alpha/f)| = B_L |J_n(K)|, \quad (7)$$

式中 B_L 为陀螺原始锁区, $J_n(K)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

所以 K 参数的大小直接关系到 n 阶动态锁区的宽度,在陀螺静态测试过程中,起作用的主要是零阶动态锁区,所以在此只需关心零阶贝塞尔函数。通过 Labview 仿真可以看出零阶贝塞尔函数是一个逐渐衰减的函数,如图 2 所示。

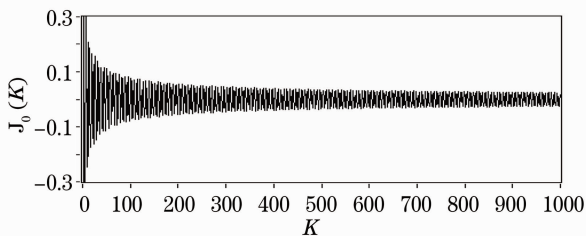


图 2 零阶贝塞尔函数曲线

Fig. 2 Zero order of Bessel function

当 K 值很大时,可作如下近似:

$$B_n = B_L |J_n(\alpha/f)| = B_L |J_n(K)| \approx B_L \left[\frac{2f}{\pi\alpha} \right]^{1/2} \cos \left[\frac{\alpha}{f} + \frac{1}{2}n\pi - \frac{\pi}{4} \right]. \quad (8)$$

所以当 K 值很大(约 600)时,即使不到 1% 的抖动幅度噪声就会使上式余弦项中产生 2π 的相位差,所以噪声具体取多少无法从理论上给出准确的回答,只能通过实验来探索是否存在一些优化值。

为了观察不同 K 值对零偏稳定性的影响,这里 K 从小到大取 6 个值,即 $K = 170, 300, 400, 500, 600, 650$ (因为 K 值太小无法跳出锁区)。当 K 取再大时由图 2 可见 $|J_0(K)|$ 变化不明显;另外由于受抖轮偏频量极限的限制,对于本单位生产的激光陀螺来说, K 值不能超过 670。为了观察不同的噪声强度对激光陀螺零偏稳定性的影响,这里 χ 从 0~5%,以 1%为间隔。(因为 5%是实验系统对所有激光陀螺来说都能达到的最大噪声强度)。

取两个激光陀螺,其抖动频率分别为 450 Hz 和 350 Hz, Q 值分别为 157 和 121;分别用陀螺 1 和陀螺 2 来表示,然后针对不同的 K, χ 值分别进行测量,以 1 s 为采样间隔,按照文献^[11]的标准在静态下测试 2 h,所得的零偏稳定性分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3,图 4 可见,当不加噪声时,2 个激光陀螺的零偏稳定性都随 K 值的增加而减小,这与零阶贝塞尔函数 $|J_0(K)|$ 随 K 值的增加而减小是一致的;

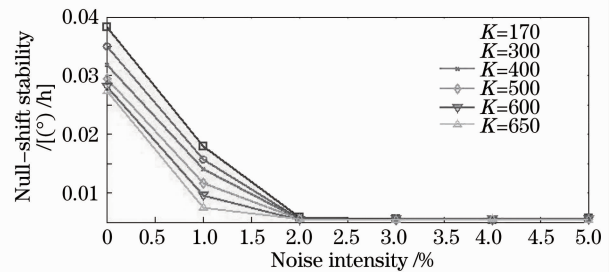


图 3 陀螺 1 抖动参数-零偏稳定性图

Fig. 3 Dither parameters versus null-shift stability of laser gyro 1

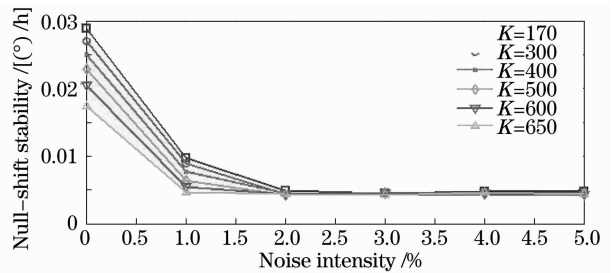


图 4 陀螺 2 抖动参数-零偏稳定性图

Fig. 4 Dither parameters versus null-shift stability of laser gyro 2

当加入高斯白噪声时,2 个陀螺在 6 个 K 值下的零偏稳定性均随着噪声的注入而迅速减小,这说明高斯白噪声在消除动态锁区方面确实效果显著,这与理论分析也是吻合的。但当噪声强度 χ 大于 2% 时,2 个激光陀螺在 6 个 K 值下的零偏稳定性均没有明显变化,这说明当噪声强度大于 2% 时,动态锁区已经被高斯白噪声随机化到一个较小值,即使加入更大的噪声强度,也无明显效果;当噪声强度 χ 取 5% 时,对 2 个激光陀螺来说抖动驱动信号中的噪声强度 χ_a 已经超过 50%,但由于抖动剔除采用的是高速采样低通滤波技术,所以激光陀螺的零偏稳定性并没有因为抖动强度的变大而表现出不稳定或变差。综合考虑上述实验结果以及激光陀螺在具体使用中的情况,建议 K 值取 600~650 之间,噪声强度 χ 取 2%~3% 之间。

4 抖动参数对机抖激光陀螺角随机游走的影响

对机抖激光陀螺来说,交变偏频的引入使得激光陀螺频繁通过锁区,导致其具有与锁区和偏频相关的噪音,这是提高激光陀螺精度的最大障碍之一,研究证明,此噪音具有随机游走的特性,这一误差被称为环形激光陀螺的角随机游走 (ARW)^[12]:

$$A_{RW} = \frac{\Omega_L}{\sqrt{S_F \alpha}} = \frac{\Omega_L}{\sqrt{S_F K f}}, \quad (9)$$

式中 Ω_L 为闭锁阈值, $S_F = 2\pi \frac{4A}{L\lambda}$ 为比例因子。

由上式可见, 由于 S_F 基本上是不变的, 角随机游走与闭锁阈值成正比, 与抖动偏频量的平方根成反比, 所以要减小角随机游走, 就要减小锁区, 加大抖动偏频量。

抖动的引进以及高斯白噪声的注入是为了减小锁区和消除动态锁区, 从而减小角随机游走; 但另一方面, 根据文献[1]的研究, 高斯噪声的注入在消除动态锁区的同时, 使得陀螺的相位变成了一个与时间相关的随机变量即: $\psi = at$ (a 为输入角速度); 也就是说高斯白噪声的注入通过随机化抖动幅度消除了动态锁区, 减小了角随机游走; 但同时又增加了一个随机变化的相位误差, 增加了角随机游走, 此相位误差在理论上是角随机游走不可消除的, 注入多大的噪声可以在消除动态锁区的同时又使得总的角随机游走较小只能通过实验来探索。根据文献[4]的要求, K, χ 的取值方法与上面零偏稳定性实验中的一致, 在静态下测量 8 h, 然后用文献[12]中的方法处理数据, 图 5, 图 6 为 2 个激光陀螺角随机游走的计算结果。

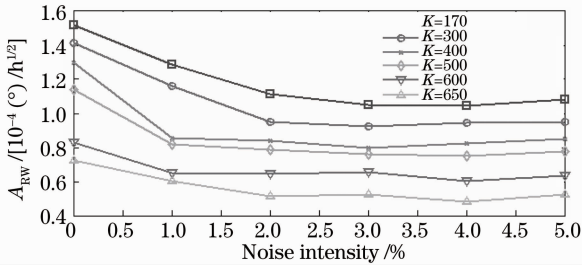


图 5 陀螺 1 抖动参数-角随机游走图

Fig. 5 Dither parameters versus angle random walk of laser gyro 1

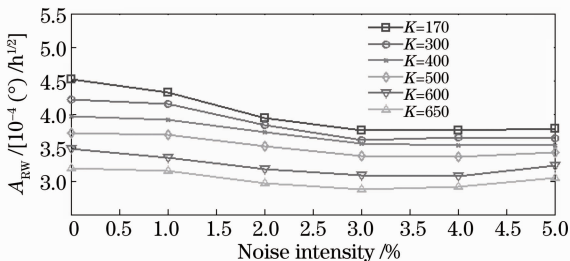


图 6 陀螺 2 抖动参数-角随机游走图

Fig. 6 Dither parameters versus angle random walk of laser gyro 2

由图 5, 图 6 可以看出, 在噪声强度 $0 \leq \chi \leq 5\%$ 范围内, 2 个激光陀螺的角随机游走均表现出随 K 值的增加而减小的趋势; 这是因为 K 参数是与抖动偏频量成正比, K 值的增加代表着抖动偏频量的增大, 而激光陀螺的角随机游走与抖动偏频量的平方根成反比, 所以上述现象与理论分析是一致的。此外, 2 个激光陀螺在六个 K 值下的角随机游走均表现出随着噪声的注入而逐渐减小, 当 $\chi \geq 2\%$ 以后角随机游走比较平稳; 由前面的分析已知, 高斯噪声的注入一方面通过随机化动态锁区从而减小了角随机游走, 但另一方面使得激光陀螺的相位差变为一个与时间有关的随机变量, 从而增加了角随机游走; 但从以上图表可以得出结论, 高斯白噪声的注入对角随机游走的减小是主要的, 其贡献大于对角随机游走的增加; 至于当 $\chi \geq 2\%$ 以后角随机游走比较平稳, 是因为在抖动参数对激光陀螺零偏稳定性影响的实验中就已经发现, 当噪声强度 $\chi \geq 2\%$ 时, 噪声对激光陀螺动态锁区已经随机化到一个比较小的值, 无法进一步减小动态锁区, 而激光陀螺的角随机游走是与锁区成正比的, 所以也表现的比较平稳。

5 结 论

对传统方法中以抖动偏频量和抖动驱动信号中的噪声强度来表示抖动参数的方法提出改进, 以 K 参数和抖动幅度中的噪声强度来表示陀螺的抖动参数, 把不同抖动频率和注入效率的陀螺统一了起来, 使它们具有相同的比较标准。定量讨论了 K 参数和噪声强度 χ 对激光陀螺零偏稳定性和角随机游走的影响, 实验结果表明, 当 χ 值固定时, 激光陀螺的零偏稳定性和角随机游走都会随着 K 值的增大而减小, 但当 χ 大于 2% 时, 激光陀螺的零偏稳定性变化不明显。当 K 值固定时, 激光陀螺的零漂稳定和角随机游走都随着噪声强度 χ 的增大而减小, 但当 χ 大于 2% 时, 陀螺的零偏稳定性以及角随机游走都无明显变化。另外由于受激光陀螺抖轮偏频量极限的限制, 不能无限制的通过提高 K 值来获得陀螺精度的提高。综合考虑上述实验结果以及激光陀螺实际使用中的具体情况, 建议 K 值取 $600 \sim 650$ 之间; χ 值取 $2\% \sim 3\%$ 之间。

参 考 文 献

1 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti. The ring laser gyro [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, **57** (1): 61~104
 2 Tang Jianxun. Research and design for dither bias system of

- mechanically dithered ring laser gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2000. 60~75
 汤建勋. 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. 60~75
- 3 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
- 4 R. M. Kay, Honeywell Inc. Sinusoidal Noise Injection into The Dither of a Laser Gyro [P]. US Patent 5416584, 1995
- 5 GJB2427-95. The test method of ring laser gyro[S]. 1995
 GJB2427-95. 激光陀螺仪测试方法[S]. 1995
- 6 Wang Yu. Preliminary exploration of strap down inertial navigation system based on dithered ring laser gyro[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2005. 10~20
 王 宇. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的初步探索[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005. 10~20
- 7 Tang Jianxun, Long Xingwu. Design of dithering mechanism for dithered ring laser gyros [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(2): 64~65
 汤建勋, 龙兴武. 机械抖动激光陀螺抖动机构的设计[J]. 激光杂志, 2000, **21**(2): 64~65
- 8 Han Zonghu, Chen Linfeng, Chen Yong *et al.*. The study of laser gyro lock-in characteristic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 807~810
 韩宗虎, 陈林峰, 陈 勇 等. 激光陀螺锁区特性的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 807~810
- 9 Zhan Dejun, Qin Shiqiao, Wang Xingshu *et al.*. Harmonic measurement for laser gyro lock-in [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 960~964
 战德军, 秦石乔, 王省书. 激光陀螺锁区的谐波测量方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 960~964
- 10 Kong Xianggui, Feng Tiesun, Jin Guofan. Lock-in variation in the frequency-stabilized ring laser gyroscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(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, **19**(10): 744~748
- 11 IEEE Std 1554TM-2005. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis[S]. 2005
- 12 Tang Jianxun, Song Rui, Feng Xianwang *et al.*. Methods of compute random walk coefficient of dithered laser gyro based on Labview [J]. *J. Chinese Inertial Technol.*, 2009, **17**(5): 331~335
 汤建勋, 宋 锐, 冯先旺 等. 基于 Labview 实现二频机抖激光陀螺角随机游走系数的计算[J]. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(5): 331~335