

文章编号:1002-2082(2016)06-0948-06

闭环光纤陀螺死区及光功率交扰误差的研究

周 原^{1,2}, 孙丰元¹, 梁 勇¹, 吕航伟¹

(1. 中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065;

2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 数字闭环光纤陀螺引入的死区问题限制了其向更高性能惯性导航系统的应用。采用数学模型分析了数字闭环光纤陀螺死区的成因是反馈相关误差干扰, 通过 simulink 仿真工具对死区现象进行了仿真, 对比陀螺死区测试对模型进行了验证。以此为基础提出了电光串扰造成死区的干扰模式, 分析了干扰误差源的信号频域特征并使用频谱分析仪对受干扰的光功率信号进行了相关频点的测试, 同时对比了干扰抑制后无死区的光功率信号相关频点的测试结果。通过抑制相关误差前后的测试结果对比, 验证了与数字闭环反馈阶梯波相关的误差输入是死区形成的根本原因, 除了电路交叉耦合之外, 电路对光强的调制干扰也会造成死区问题。在采用针对干扰信号频率特性的退耦及 PCB 设计后, 闭环光纤陀螺死区由 $0.2^\circ/\text{h}$ 降低至 $0.02^\circ/\text{h}$, 满足系统应用需求。

关键词: 光纤陀螺; 死区; 光强调制; 交叉耦合

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201637.0608003

Research on dead zone of closed-loop fiber optic gyroscope and optic power crosstalk error

Zhou Yuan^{1,2}, Sun Fengyuan¹, Liang Yong¹, Lyu Hangwei¹

(1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The dead zone has severely influenced the application of the digital closed-loop fiber optic gyroscope (DCFOG) in high performance inertial navigation system. A mathematic model focusing on feedback related interference was established to analyze the dead zone in fiber optic gyroscope and was verified through FOG dead zone measurement of its simulation data by simulink. Based on this, an optical power interference model was proposed, and the frequency characteristic of the interference source analyzed and compared to the optic power affected. Further, an interference suppressed PCB layout shows a much less coupling and dead zone. All measurement shows that the feedback phase step signal dependent error is the primary cause of the dead zone; besides the electric crosstalk, the phase step dependent modulation of optic power can also bring error to gyro signal processing and cause dead zone. After the targeted design of decoupling and error modulation, the dead band reduces from $0.2^\circ/\text{h}$ to $0.02^\circ/\text{h}$, which meets the requirements of the application.

Key words: fiber optic gyroscope; dead zone; optic power modulation; cross talk

收稿日期: 2016-04-28; 修回日期: 2016-06-03

基金项目: 总装预研基金 (9140A09011815HK48121)

作者简介: 周原(1984—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事光学传感器及光纤陀螺信号检测研究。

E-mail: zhouzrz319@hotmail.com

引言

干涉式闭环光纤陀螺仪是近年来发展迅速的一种全固态角速率传感器^[1],光纤陀螺仪的死区是指在测量很小的输入转速时,陀螺仪输出不再与输入成线性比例关系,并随着输入的减小稳定在零的现象^[2-3]。随着闭环光纤陀螺工程化不断深入,目前其环境条件下零偏稳定性优于 $0.01^{\circ}/h$ ($100s, 1\sigma$),标度因数重复性优于 $20e-6$,使得死区成为其面向高性能导航系统应用的瓶颈。与环形激光陀螺不同,干涉式光纤陀螺的光路固有误差非常有限,并且检测原理不存在死区^[4]。闭环光纤陀螺引入反馈相位,稳定了工作点,提升了零偏稳定性和标度性能,但也同时引入了对输出的干扰^[5],使死区成为所有闭环光纤陀螺共同面对的问题。

文献[6]认为死区来自电路调制信号对检测信号的耦合,文献[7]认为干扰随阶梯波高度的变化是死区的成因,文献[8]认为反馈非线性造成死区问题。本文首先采用数学分析及系统仿真的方法,明确造成死区的必要条件是反馈数字阶梯波相关的相位交扰,并用测试验证了仿真结果,其次分析了反馈数字阶梯波的频域特征,在理论分析的基础上,对光功率受到的反馈相关干扰进行了测量,验证了反馈阶梯波信号调制光功率并造成死区。最后通过对干扰误差针对性的退耦设计改善了死区,并给出对比测试结果。

1 死区干扰模型的建立及测试验证

全数字闭环光纤陀螺使用数字阶梯波反馈实现工作点闭环,对于闭环状态而言,一个新渡越时间内产生的 Sagnac 相移需要数字阶梯信号的持续增长抵消以重新达到闭环状态,即有:

$$\tau \frac{d\varphi_f}{dt} + \varphi_s = 0 \quad (1)$$

式中: τ 为渡越时间; φ_f 为阶梯波反馈相位, φ_s 为 Sagnac 效应相位,但是当干扰存在时,阶梯波的形成将受到干扰相位 φ_i 的影响,即有:

$$\tau \frac{d\varphi_f}{dt} + \varphi_s + \varphi_i = 0 \quad (2)$$

闭环光纤陀螺一定时间 T 内的平均输出正比于反馈相位在每个渡越时间内的反馈相移之和对 T 平均。假设比例系数为 1,则速率输出可由下式定义:

$$Rate_{out} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\tau}{T} \int_0^T \varphi'_f(t) dt \quad (3)$$

由(3)式和(2)式,则有:

$$\frac{\tau}{T} \int_0^T \frac{d\varphi_f}{dt} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\varphi_s + \varphi_i) dt \quad (4)$$

如果误差相位 φ_i 独立于 φ_s ,则在任何 φ_f 无关的干扰下,(4)式均有与之对应的唯一解,此时输出虽然不能准确反应 Sagnac 效应相位的积分,但在输入速率一定时,输出误差完全由干扰的形式决定:

$$Rate_{error} = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi_i dt \quad (5)$$

对于某次测量, $\varphi_i(t)$ 可用傅立叶级数展开,则输出误差可表示为

$$Rate_{error} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(j\omega) e^{j\omega t} d\omega dt \quad (6)$$

某次测量的所有交流相位误差项可在时间平均下视为 0,则最终速率输出误差为一直流项,表现为陀螺的固定零偏偏置。由此可见,任何与反馈相位信号无关的干扰,只能造成直流固定偏置误差,即

$$Rate_{error} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_{e0} \cdot dt \quad (7)$$

反之,如果相位误差 φ_i 是反馈相位 φ_f 的函数,则 φ_i 可以使用傅立叶展开为 φ_f 的弦函数之和,即

$$\varphi_i = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \cos(n\varphi_f + b_n) \quad (8)$$

为讨论简便,取一次交流项,并假设相位为 0,代入(2)式,解得:

$$\varphi_f = -2 \arctan \left(\sqrt{\frac{\varphi_s + \varphi_i}{\varphi_s - \varphi_i}} \tan \left(\frac{t \sqrt{\varphi_s^2 - \varphi_i^2}}{2\tau} \right) \right) \quad (9)$$

代入(3)式,解得输出速率均值:

$$Rate_{out} = \sqrt{\varphi_s^2 - \varphi_i^2} \quad (10)$$

在陀螺测试小速率时,随着 φ_s 的不断降低,使 $\varphi_i^2 > \varphi_s^2$,造成根号内取值为负,此时输出速率在实部的取值为 0,造成了输出为 0 的死区现象。同时,在进入死区前,输出速率与闭环系统 Sagnac 输入间的比值不再为线性,比例系数 K_g 为

$$K_g = \frac{Rate_{out}}{\varphi_s} = \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_s} \right)^2} \quad (11)$$

下面使用仿真工具将上述数学过程代入控制模型进行仿真,带有反馈干扰的全数字闭环光纤陀螺控制离散模型可用图 1 表示。 Z^{-1} 代表闭环反馈周期 τ 的延迟,虚线为干扰途径, F_i 为干扰的

传递函数,利用线性传递环节的特性将前向检测通路的所有增益之积写为 K_1 ,反馈通路的所有增益之积写为 K_2 。

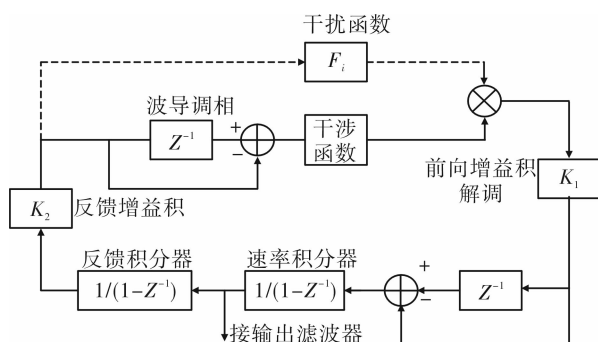


图1 带有反馈阶梯波干扰的控制模型示意图

Fig.1 Schematic of FOG control model with feedback related interference

图1中干涉函数为 $I(\cos\varphi + 1)$, I 为到达探测器的光强。由于非线性函数的存在,闭环系统不能严格使用线性控制系统方法求解,使用 Simulink 仿真工具对上述过程进行建模仿真,并与实际测试进行了对比,结果如图2所示。为了减少其他误差和噪声对测试结果带来的影响,每个测试点取 120 s 平均值。可以看出,在存在与阶梯波相位相关的干扰误差时,仿真的速率输出与实际测试结果的非线性现象和死区现象均符合较好。

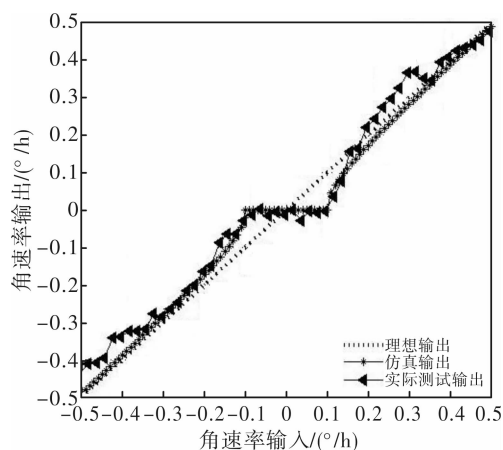


图2 死区现象仿真与实际测试对比

Fig.2 Comparison of dead band simulation and measurement

综上,与反馈阶梯波不相关的干扰误差将造成闭环光纤陀螺输出的固定偏移,而与反馈阶梯波相关的干扰误差,将导致陀螺在小转速下的输出非线性效应。当输入转速小于干扰误差时,输出转速为零,成为“死区”。由此可见,与反馈相关的干扰误差是造成数字闭环光纤陀螺死区问题的根本原因。

2 反馈相关光强调制误差的分析及测试

文献[9-11]讨论了阶梯波对检测通道造成的干扰误差途径和机理,并侧重于调制电路对探测器或电路前向通道的直接耦合,即图3中干扰途径A。然而数字阶梯波可以通过调制光强以光电耦合的形式对检测信号本身造成干扰误差,其作用途径B如图3所示。下面将通过分析干扰信号频域特征及实验测量的方法,讨论干扰途径B的存在及影响。

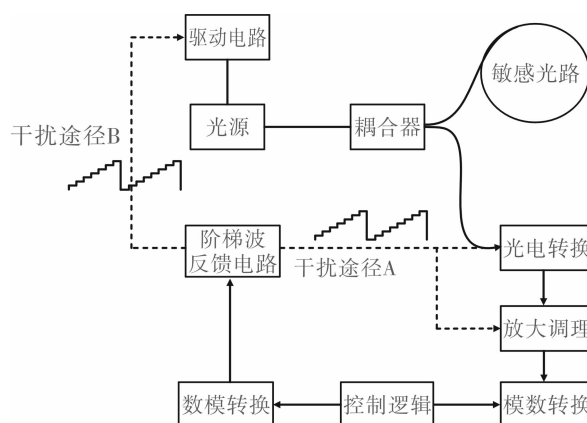


图3 阶梯波干扰的途径示意图

Fig.3 Path of feedback interference

如图4所示,在一个固定的低转速下,全数字闭环光纤陀螺的阶梯波可以分离为理想反馈和非理想反馈2个部分。理想部分是一个均匀上升的数字阶梯波,它又可以分为以 2π 复位时间 T 为周期的三角波 $\varphi_{\text{triangle}}$ 和以渡越时间 τ 为周期的三角波 φ_{step} ,非理想部分为量化效应及其他噪声造成的台阶型抖动 φ_{noise} :

$$\varphi_f = \varphi_{\text{triangle}} + \varphi_{\text{step}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{triangle}} = \frac{2\pi}{T}(t - nT) \quad n \text{ 为整数} \quad (13)$$

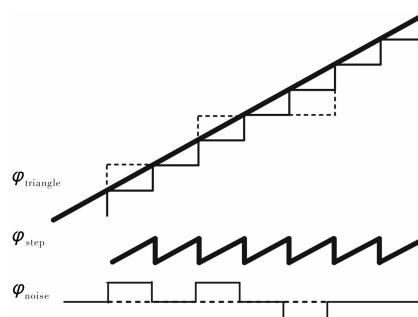


图4 阶梯波信号的时域分解示意图

Fig.4 Feedback split in time domain

该信号的傅立叶级数可写为

$$\varphi_{\text{triangle}}(t) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} A_u e^{j2\pi \frac{u}{T} t} \quad (14)$$

另一方面,三角波 φ_{step} 可写为

$$\varphi_{\text{step}}(t) = \frac{2\pi}{T}(t - m\tau) \quad m \text{ 为整数} \quad (15)$$

该信号的傅立叶级数可写为

$$\varphi_{\text{step}}(t) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} B_u e^{j2\pi \frac{u}{2\tau} t} \quad (16)$$

(14)式和(16)式中 u 为整数; A_u 为复位频率各阶谐波的系数; B_u 为偶次倍于陀螺本征频率 $1/2\tau$ 各阶谐波的系数。

台阶型抖动 φ_{noise} 是阶梯波上升或下降的阶梯状噪声,假设与理想的反馈阶梯波相比,每个反馈周期实际相位选择上升的概率与选择下降或静止不动的概率相等。每次抖动等效为一个正或负系数的门函数符号 φ_{gate} ,符号的宽度为 τ ,正负出现的概率 $P_{\text{pos}} = P_{\text{neg}} = P$,其频谱特性为

$$\varphi_{\text{gate}}(t) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \phi_u e^{ju2\pi \frac{1}{\tau} t} \quad (17)$$

那么该噪声频谱的稳态功率谱可表示为

$$P_{\text{noise}}(f) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{\tau} [P_{\text{pos}} \phi_u - P_{\text{neg}} \phi_u] \right|^2 \delta(f - \frac{u}{\tau}) \quad (18)$$

式中 $\delta(f)$ 为单位冲击函数。

由于噪声相位中单位门函数符号 φ_{gate} 正负抖动的概率相等,稳态功率谱密度为零,综合(13)式、(14)式、(18)式可知数字反馈阶梯波的主要能量集中于复位频率及偶次本征频率的各频率点。线性传递函数将改变各频点的幅度,而非线性传递函数则会产生各频点的高次谐波分量。由于干扰传递函数的不确定性,式中各阶谐波的幅度难以用解析方法确定,但偶次本征频率的各频点上必然存在干扰能量。为验证干扰误差的存在,使用频谱仪对存在死区的某型全数字闭环光纤陀螺进行了测量。图5为测量方法示意图。

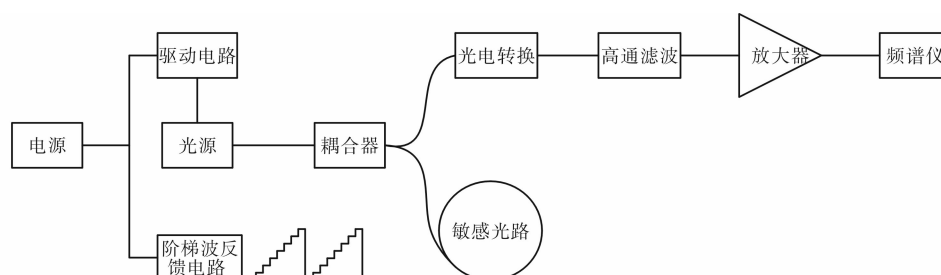


图5 光强调制误差测试示意图

Fig.5 Schematic of optic power modulation error measurement

为保证干扰通道唯一,阶梯波反馈电路仅以固定斜率的阶梯波干扰发生源的形式接入电路,并不直接调制敏感光路,同时阶梯波反馈电路与频谱检测使用相互独立的电路进行。为避免后级饱和,使用高通滤波器去除直流光强信号。存在死区的光功率测试结果见表1,图6为其绘图,区分了频带内所有奇、偶次倍频点。

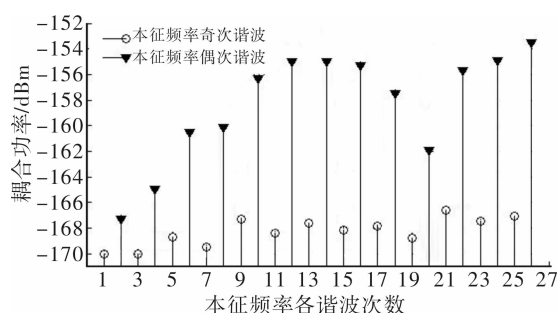


图6 存在阈值时光强调制误差的光功率频谱

Fig.6 Optic power spectrum with feedback modulation error

表1 光纤陀螺本征频率谐频点的光功率干扰耦合测试数据

Table 1 Measured optic power interference at harmonic frequency of FOG

本征频率倍频点	功率/dBm	本征频率倍频点	功率/dBm
1	-170.010	14	-155.013
2	-167.334	15	-168.129
3	-170.008	16	-155.280
4	-164.968	17	-167.813
5	-168.726	18	-157.473
6	-160.492	19	-168.782
7	-169.509	20	-161.937
8	-160.103	21	-166.636
9	-167.286	22	-155.719
10	-156.309	23	-167.453
11	-168.422	24	-154.894
12	-155.001	25	-167.054
13	-167.630	26	-153.515

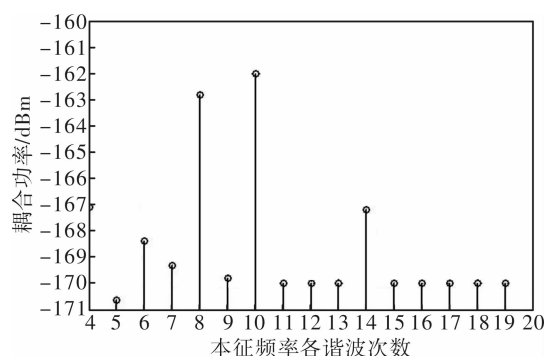


图7 抑制干扰后光强调制误差的光功率频谱

Fig. 7 Optic power spectrum with suppressed feedback modulation error

图7为某个偶次倍频点的仪器测试结果,可以看到受仪器设备的限制,测试的底噪约为171 dBm,当阶梯波反馈电路以本征频率输出数字阶梯波时,会在探测器光功率中检测到与之相关的本征频率偶次谐波,这说明干扰以光功率调制的方式耦合入检测信号,综合之前的计算及仿真分析结论,该种与反馈阶梯波相关的光电干扰会造成闭环光纤陀螺的死区现象。

采用针对性的退耦及PCB优化设计的措施削弱了阶梯波反馈信号对光功率的调制。改善后采用了同样的测试方法对光功率信号进行了测试,结果列于表2。从图8中可以看出,与优化设计前对比,阶梯波相关的干扰信号分量得到了有效的控制,各阶偶次谐波有6 dB至25 dB的下降。图9对比了优化前后的阈值测量结果,死区由之前的 $0.2^{\circ}/\text{h}$ 降低至 $0.02^{\circ}/\text{h}$,对干扰信号进行针对性的设计,有效的抑制了闭环光纤陀螺的死区。

表2 本征频率谐频点的光功率干扰耦合测试数据(抑制干扰后)

Table 2 Measured optic power interference at harmonic frequency of FOG(after suppression)

本征频率倍频点	功率/dBm	本征频率倍频点	功率/dBm
1	低于底噪	14	-167.179
2	低于底噪	15	-170.192
3	低于底噪	16	-170.129
4	-167.098	17	-170.002
5	-170.640	18	-170.371
6	-168.393	19	-169.595
7	-169.307	20	低于底噪
8	-162.821	21	低于底噪
9	-167.286	22	低于底噪
10	-162.024	23	低于底噪
11	-170.002	24	低于底噪
12	-170.001	25	低于底噪
13	-169.992	26	低于底噪

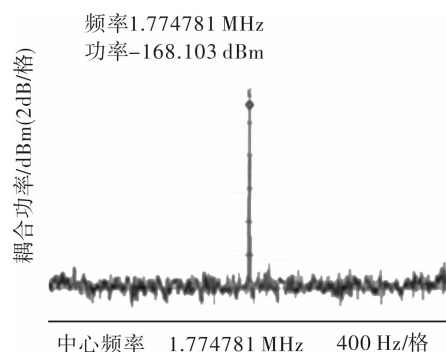


图8 光强调制误差的频谱测试

Fig. 8 Optic power modulation measurement using spectrum analyzer

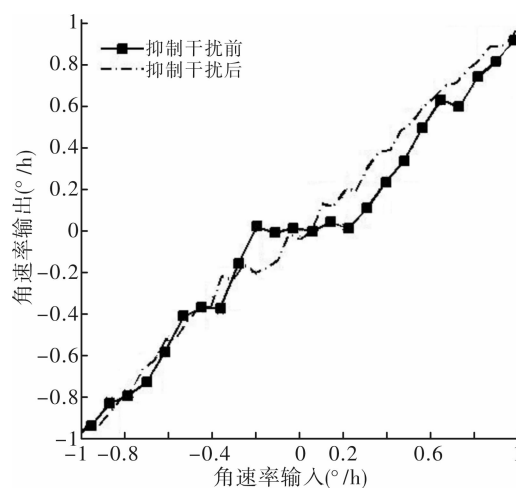


图9 抑制干扰前后死区测试对比

Fig. 9 Dead zone with and without error suppression

3 结论

通过对死区成因机理的分析,明确了与阶梯波相关的干扰误差是死区的直接成因。通过对阶梯波信号频域特征的进一步分析,使用直接测量的方式验证了上述干扰的存在,提出并验证了阶梯波信号可以通过光电交扰的方式影响检测的新干扰模式,在有效抑制干扰信号后,闭环光纤陀螺的死区由 $0.2^{\circ}/\text{h}$ 降低至 $0.02^{\circ}/\text{h}$ 。

参考文献:

- [1] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. 2nd. London: Artech House, 2014.
 - [2] Pei Fujun, Zhang Bo, Jiao Fulong. Research on deadband analysis and deadband suppression method of fiber optic gyroscope[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(4): 1254-1256.
- 裴福俊, 张博, 焦富龙. 数字闭环光纤陀螺的死区分

- 析和抑制方案研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 1254-1256.
- [3] YuTao, Qing Li, Wu Yanji. FOG deadband reason analysis and error compensation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3): 363-365.
余涛, 卿立, 吴衍记. 光纤陀螺仪死区的原因分析及误差补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(3): 363-365.
- [4] Song Ningfang, Wang Xiaoxiao, Wu Zhanjun. Method for eliminating the deadband of FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(4): 53-66.
宋凝芳, 王厦霄, 邬战军. 消除光纤陀螺死区的方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 53-66.
- [5] Jin Jing, Zhang Chunxi, Song Ningfang. Electrical crosstalk of modulation signal in digital closed-loop FOG[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1200-1205.
金靖, 张春熹, 宋凝芳. 数字闭环光纤陀螺的调制串扰误差[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1200-1205.
- [6] Gu Hong, Li Shuhong, Zhao Qida. Method of reducing the threshold of the high-precision digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(9): 1732-1737.
顾宏, 李淑红, 赵启大. 改善高精度数字闭环光纤陀螺阈值方法研究[J]. 光电子 • 激光, 2012, 23(9): 1732-1737.
- [7] Pan Xiong, Zhang Chunxi, Jin Jing, et al. Data analysis and modeling of dead zone in close-loop fiber optic gyros[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 61-65.
潘雄, 张春熹, 金靖, 等. 光纤陀螺“死区”测试分析与建模[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 61-65.
- [8] Yu Haicheng, Wang Wei, Wang Junlong. Effect and suppression method of feedback loop nonlinearities in FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(4): 487-492.
于海成, 王巍, 王军龙. 光纤陀螺反馈回路非线性的影响与对策[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(4): 487-492.
- [9] Ji Shitao, Qin Yongyuan, Shang Junyun, et al. Research on dead zone suppression technology of FOG[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(2): 497-499.
吉世涛, 秦永元, 尚俊云, 等. 光纤陀螺仪死区抑制技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 497-499.
- [10] Wang Wei, Fu Tiegang. Analysis on dead-band mechanism of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 105-107.
王巍, 付铁刚. 数字闭环光纤陀螺死区机理分析[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 105-107.
- [11] Jin Jing, Zhang Chunxi, Song Ningfang. Dead band nonlinearity of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1046-1050.
金靖, 张春熹, 宋凝芳. 数字闭环光纤陀螺死区非线性机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1046-1050.