

反馈延迟对光纤陀螺振动误差特性的影响

潘 雄,张春生,王夏霄,王熙辰,赵亚飞,王定球

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要: 振动环境导致光纤陀螺引入较大的扰动。由于非线性因素,陀螺跟踪扰动的能力严重影响着其误差特性,而反馈延迟的存在使得跟踪性能变得更加复杂。因此,分析反馈延迟对于解决陀螺振动问题极其重要。首先,分析了非线性因素作用时不同反馈延迟对陀螺闭环跟踪能力和扰动稳定性的影响;然后在线性控制模型的基础上加入陀螺非线性环节,保证稳定裕度不变,仿真分析了不同反馈延迟下陀螺的跟踪性能以及输出。仿真及实验结果表明,减小反馈延迟,提高系统的跟踪扰动能力,可以减小非线性误差,改善振动环境下陀螺的输出性能。

关键词: 光纤陀螺; 振动误差; 跟踪误差; 反馈延迟; 非线性; 零偏

中图分类号: V241.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2607-06

Impact on vibration error characteristics of FOG with feedback delay

Pan Xiong, Zhang Chunsheng, Wang Xiaoxiao, Wang Xichen, Zhao Yafei, Wang Dingqiu

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Large disturbance is introduced into fiber optic gyroscope under vibration environment. And the error characteristics for FOG are severely affected with the ability of tracking disturbance as the existence of non-linear factors, which becomes more complicated as the result of the additional feedback delay. Therefore, it is important for solving vibration problem to analyze the feedback delay. Firstly, impacts on the closed-loop tracking ability and the stability against disturbance of FOG with different feedback delay were analyzed with the non-linear factors. Then, the non-linear element was considered based on the linear control model, and the outputs of FOG with different feedback delay were obtained and the tracking performance was analyzed by simulation as keeping the same stability margin. The simulation and final experiment show that the bias of FOG will be brought into a large offset under vibration with a poor tracking performance. Thus, it is important to solve the vibration problem of FOG by improving the closed-loop tracking ability with a small feedback delay.

Key words: fiber optic gyroscope; vibration error; tracking error; feedback delay; non-linear; bias

收稿日期:2013-12-05; 修订日期:2014-01-03

作者简介:潘雄(1977-),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事光纤陀螺技术方面的研究。Email:buaapx@aspe.buaa.edu.cn

0 引言

光纤陀螺仪是一种基于 Sagnac 效应感受载体角速率的传感器。相对于传统机械陀螺,有着结构简单、质量轻、使用寿命长、动态范围大和精度高等优点,因此被广泛运用到航空航天、导弹、汽车定位导航等军用、民用领域^[1-2]。

理论上,光纤陀螺具有较高的工作精度,但实际环境中存在着各种各样的干扰因素,实现其精度的提高变得有限而困难^[3],在众多干扰中,以振动环境影响最大。单轴光纤陀螺对其轴向的振动敏感性较低^[4],但由于结构设计缺陷、装配问题等因素,导致光纤陀螺振动引入的误差增大,影响着陀螺的输出精度。在实际的解决措施中,一方面采用改进结构设计、合理装配等工艺设计来达到改善振动环境下陀螺输出^[5-7];一方面可以改进陀螺闭环解调算法来实现^[8]。

参考文献[9]提出了在摇摆状态下陀螺输出精度与附加相移的关系。理想情况下,由于陀螺反馈相移总是滞后于 Sagnac 相移 1 个信号处理周期,有扰动输入的情况下,Sagnac 相移与反馈相移相减得到的闭环控制附加相移(即跟踪误差)不能即刻达到稳态,附加相移误差不断积累。为了满足精度等因素,实际情况下,光纤陀螺反馈相移滞后于 Sagnac 相移 2 个信号处理周期,此时,陀螺闭环控制附加相移变得更加复杂,跟踪性能受到较大的影响,导致较大跟踪误差的产生,对系统扰动稳定性存在显著影响,甚至引起系统稳定性状态的改变^[10]。另外,跟踪误差较小的情况,忽略非线性因素,陀螺闭环对输入角速率的响应基本上是线性的,但是在较大跟踪误差的时候非线性作用凸显出来,进一步影响着系统的输出。

文中从理论、仿真和实验三个方面出发,验证了存在非线性作用的情况下,光纤陀螺反馈延迟影响跟踪误差的途径,分析了不同延迟下系统的输出性能,对光纤陀螺的数字闭环控制优化及在振动环境下性能改善提供了参考。

1 反馈延迟和非线性现象分析

1.1 反馈延迟现象分析

在数字闭环光纤陀螺中,通常采用方波信号进行偏置调制,如图 1 所示的调制方波。其中,调制方

波与探测器输出时序对应,在时序上,调制方波的正半周期对应于探测器的奇数次输出,调制方波的负半周期对应于探测器的偶数次输出;解调时序控制着解调环节的实现,通常情况下,采样探测器输出信号,获取的采样数据与解调时序一致,探测器信号的偶数次输出与奇数次输出之差便是一次解调值。另外,为了尽可能地降低探测器输出噪声,通常在探测器奇、偶次输出区域内多次 A/D 采样,并对采样的样本点进行求和平均实现滤除噪声的目的,如图 1 的 $\sum U_{i,n-2}$ 、 $\sum D_{i,n-1}$, i 表示采样点的序号, $n-2$ 、 $n-1$ 代表相应的时刻,此时一次解调值为:

$$\Phi = \frac{\sum D_{i,n-1} - \sum U_{i,n-2}}{M} \quad (1)$$

式中: M 为探测器奇、偶次输出区域内 A/D 采样点数。由于完成一次解调需要实现采样区间数据的运算,因此,此时的反馈信号 Φ_b 只能补偿下一刻渡越时间内输入角速率,即满足:

$$\Phi_{b,n-1} = \Phi_{s,n} \quad (2)$$

同时,对于轻小型光纤陀螺而言,采样区间有限,加上 A/D 转换延迟和解调速率的限制,同一方波周期解调完成时刻总是滞后于当前反馈时刻,见图 1,解调后补偿输入端的信号滞后了 2 个渡越时间才能完成反馈。

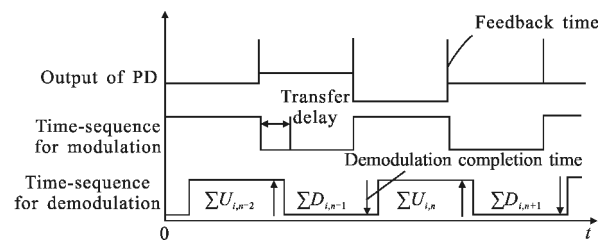


图 1 两种延迟作用机理

Fig.1 Two delay mechanisms

1.2 非线性现象分析

数字闭环光纤陀螺采用偏置相位调制技术,使得光纤陀螺交替工作在对旋转速率最灵敏的工作点上,探测器输出仍是旋转角速率的正弦函数。假设 φ_{n-2} 和 φ_{n-1} 表示 $n-2$ 、 $n-1$ 时刻角速率输入,在该方案的情况下,解调探测器输出并在第 n 反馈时刻完成反馈的角速率为:

$$\begin{aligned} \Phi_n &= a \cdot I_0 \cdot \left[\cos\left(\varphi_{n-1} - \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\varphi_{n-2} + \frac{\pi}{2}\right) \right] = \\ & a \cdot I_0 \cdot (\sin\varphi_{n-1} + \sin\varphi_{n-2}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: a 为与光功率、电路放大相关的增益系数; I_0 表示干涉光光强。

当跟踪性能较好,跟踪误差较小时, φ_{n-2} 和 φ_{n-1} 始终保持在较小的范围内,公式(3)可以表示为:

$$\Phi_n \approx a \cdot 2I_0 \cdot \left(\frac{\varphi_{n-2}}{2} + \frac{\varphi_{n-1}}{2} \right) \quad (4)$$

但是,当跟踪性能较差,跟踪误差较大时, φ_{n-2} 和 φ_{n-1} 较大,有:

$$\Phi_n = a \cdot I_0 \cdot (\sin \varphi_{n-2} + \sin \varphi_{n-1}) = a \cdot I_0 \cdot (\varphi_{n-2} + \varphi_{n-1}) + a \cdot I_0 \cdot (\Delta \varphi_{n-2} + \Delta \varphi_{n-1}) \quad (5)$$

式中: $\Delta \varphi$ 表示跟踪误差较大时引入的非线性误差项。

2 非线性机理的等效分析方法

2.1 非线性作用跟踪误差的抑制

对于公式(5),将跟踪误差较大时引入的非线性误差等效为输入端引入的干扰误差。此时,系统输出包括外界扰动输入和非线性误差项作用下线性系统的输出的叠加。因此,系统分析可以基于线性模型理论。

陀螺数字闭环控制可以简化为线性结构,当反馈延迟为 2 个渡越时间时,系统的闭环线性模型^[11-13]如图 2 所示。

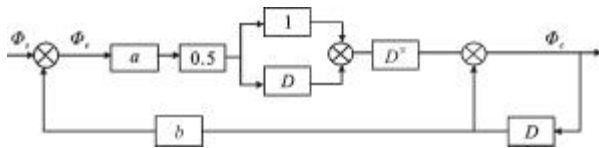


图 2 闭环线性模型

Fig.2 Linear model for the close-loop

图中, a 表示光电转换、前端放大和模数转换等系数组合而成的前向通道增益; b 表示反馈通道的增益; D 为延迟算子; N 表示延迟个数; Φ_i 、 Φ_e 和 Φ_o 表示输入的扰动信号、跟踪误差信号以及输出信号。由于非线性误差项 $\Delta \varphi$ 与跟踪误差成正比,随着跟踪误差的增大而增大,因此,需要提高跟踪性能来抑制系统的非线性。一方面,减小反馈通道延迟可以提高一部分跟踪能力;另一方面,对于陀螺闭环线性控制系统,通常以提高前向通道增益 a 为主来实现跟踪性能的改善。但是,当前向通道增益 a 增加时,系统稳定裕度减小,而跟踪性能的提高也是通过牺牲系统的稳定裕度来实现的。对于光纤陀螺闭环控制系统,反馈延迟 $N=2$ 时,系统相应的稳定裕度小于

$N=1$ 的系统,因此,额外的反馈延迟限制了系统闭环前向通道增益的提高。

2.2 非线性作用下的系统稳定性分析

当跟踪误差较大时,公式(5) $\Delta \varphi$ 中不能忽略,此时,将非线性误差等效为前向通道增益 a 的变化波动 Δa 。

$$\Delta a \cdot I_0 \cdot (\varphi_{n-2} + \varphi_{n-1}) = a \cdot I_0 \cdot (\Delta \varphi_{n-1} + \Delta \varphi_{n-2})$$

即:

$$\Delta a = \frac{\Delta \varphi_{n-2} + \Delta \varphi_{n-1}}{\varphi_{n-2} + \varphi_{n-1}} \quad (6)$$

根据 2.1 节的线性模型,可以得到变增益线性系统的跟踪误差的传递函数^[14-15]。当反馈延迟 $N=1$ 和 $N=2$ 时,相应的跟踪误差传递函数分别为:

$$S_1(z) = \frac{z^2 - z}{z^2 + (0.5ab - 1)z + 0.5ab} \quad (7)$$

$$S_2(z) = \frac{z^3 - z^2}{z^3 - z^2 + 0.5abz + 0.5ab} \quad (8)$$

对于 $S_1(z)$ 、 $S_2(z)$,由 Jury 稳定判据可知,分别满足 $0 < ab < 2$ 、 $0 < ab < \sqrt{3} - 1$ 时,两种反馈延迟系统处于扰动稳定状态。

当 Δa 项发生扰动时,使得乘积项 ab 的大小也会改变,从而影响系统的稳定性。因此,为了提高系统稳定性,一方面可以抑制 Δa 的波动,使得 ab 尽可能保持在稳定范围内,另一方面,可以通过减小延迟来实现稳定范围的增加。

综合 2.1 节的分析,对于延迟较大的系统,单纯地提高前向通道增益变得十分有限,因此采用减小反馈通道延迟提高稳定裕度同时增大前向通道增益的方案,这样保证了足够的稳定裕度来实现前向通道增益的提高,进而抑制非线性影响,减小 Δa 的波动,实现稳定性能的提高。

3 仿真分析

控制精度是对控制系统跟踪性能提出的基本要求;同时,跟踪性能的好坏影响着输出稳定性及精度^[9]。实际情况下,光纤陀螺闭环信号处理周期远远大于扰动输入的频率,当扰动频率不变时,调整扰动幅值,闭环系统相邻采样间隔扰动的增量改变,跟踪误差相应地改变。因此,仿真实验可以通过调节扰动的幅值以达到分析不同跟踪误差状态下的闭环系统的输出性能。

按照第 1、2 节,考虑到实际系统非线性环节的存在,利用仿真软件 MATLAB/Simulink 建立光纤陀螺的系统仿真模型。按照系统产生非线性现象的机理,在跟踪误差到前向通道增益之间加入嵌入式函数,表示为:

$$y = \frac{\left[\cos\left(u - \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(u + \frac{\pi}{2}\right) \right]}{2} \quad (9)$$

式中: u 表示该非线性环节的输入; y 表示输出。

根据实际扰动及陀螺闭环控制参数,仿真参数设定如下:仿真模型信号处理周期(采样间隔)为 0.01 s;由于实际环境扰动频率复杂,仿真采用简单、单一的扰动频率来分析,扰动输入频率为 1.5 Hz(对应 2000 Hz 附近频率振动)。根据第 2 节的分析,在相同的稳定裕度下,令反馈延迟 $N=1$ 的前向增益 a 为 $N=2$ 系统增益的 2 倍,此时两种延迟方案的稳定裕度相差不大。建立两种延迟方案的仿真模型:(1) 当 $N=2$ 时 $a=1$ 、 $b=0.1$; (2) 当 $N=1$ 时 $a=2$ 、 $b=0.1$ 。

仿真状态通过调节扰动幅值来设定,设定扰动引起的相移起始幅值为 0.1 rad。取足够多的样本点进行仿真实验,以不同延迟情况下跟踪误差和输出零偏作为分析对象,作出与扰动幅值的关系曲线,图 3(a)代表跟踪误差的标准差随扰动幅度变化的曲线;图 3(b)表示输出均值随扰动幅值变化的曲线;图 3(c)代表在较大扰动下两种延迟状态的仿真输出情况;图 3(d)表示两种延迟状态下跟踪误差仿真输出。

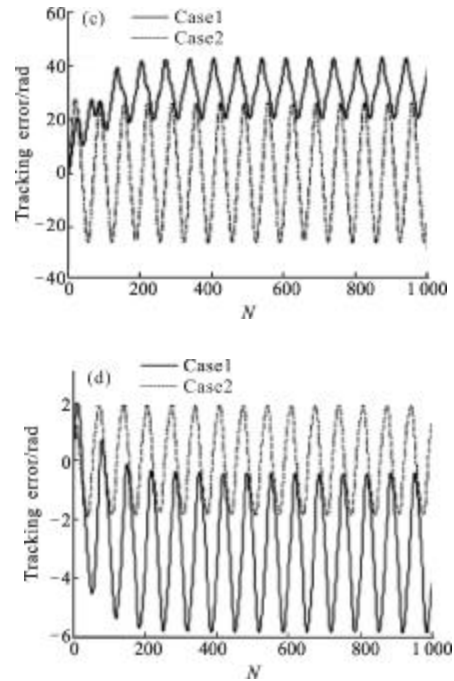
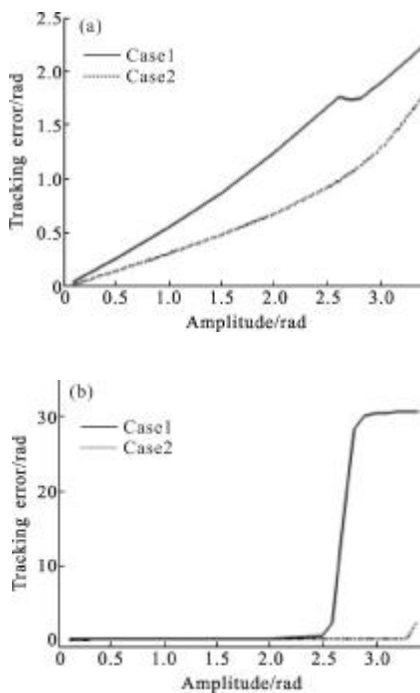


图 3 不同扰动下仿真情况

Fig.3 Conditions of the simulation with different disturbance

仿真结果分析:

(1) 对于系统的跟踪误差,由图 3(a)可知,随着扰动幅度的增加,跟踪误差增大;对于两种不同的反馈延迟,在不同扰动幅值下,Case2 对应的跟踪误差均小于 Case1 的情况,跟踪性能提高;另外,在较大扰动的情况下,Case1 中的跟踪误差如图 3(d)所示,均值产生了一个偏差,说明了非线性因素的存在使得跟踪性能发生了变化。

(2) 对于不同的扰动,由图 3(b)及图 3(c)可知,Case1 表示的状态随着扰动增加到一定大小,稳定状态发生改变,仿真输出均值产生较大的偏差,而此时 Case2 输出均值情况正常。

综上,对于仿真分析的各个状态,随着扰动幅值的增大,仿真系统相邻采样间隔输入扰动的差值增大,一方面由于瞬时输入的增量变大,另一方面考虑不同延迟状态跟踪性能不同,跟踪误差也随着发生变化,当扰动幅值增大到一定程度时,延迟较大的系统产生的跟踪误差较大,引入的非线性误差增大,导致跟踪误差的进一步增加,稳定状态发生改变,影响着输出均值;而延迟减小,在保证稳定裕度的情况下,通过增加前向通道增益提高跟踪性能,使得跟踪误差减小,非线性作用减弱,输出均值正常。

4 实验验证

从第 2 节理论分析及第 3 节仿真实验可知,光纤陀螺数字闭环环路反馈延迟不同,系统可以达到跟踪性能也不同,而实际振动情况下,输入扰动的频率及大小更加复杂,对于跟踪性能的不同,陀螺输出会有更大的差别。

文中的振动实验变量为仿真状态中提及的反馈延迟时间以及相应的前向通道增益。为了实现在不同反馈延迟时间分析陀螺的输出性能,文中采用高精度陀螺作为实验对象。由于高精度陀螺光纤环较长,采样区间较大,采样点数较多,在缩减一部分采样点数的情况下,可以实现陀螺反馈延迟的减小,同时对文中实验结果分析不会产生较大的影响。通过安装夹具将光纤陀螺光路部分固定在振动实验台上,由上位机控制振动实验台的实验状态。文中实验包括扫频振动和随机振动实验两种情况。

4.1 振动实验

在光纤陀螺各项测试中,振动测试是最基本的测试实验之一。根据陀螺实际的工作环境,对两种不同反馈延迟的陀螺施加两种振动测试状态:一种是加速度为 4 G, 振动范围为 50~2 000 Hz 实验时间为 7 min 的扫频振动实验;一种是随机振动实验。通过光纤陀螺采集振动环境下的陀螺输出,最后输出数据间隔为 1 s。图 4(a)和图 4(b)分别为闭环环路反

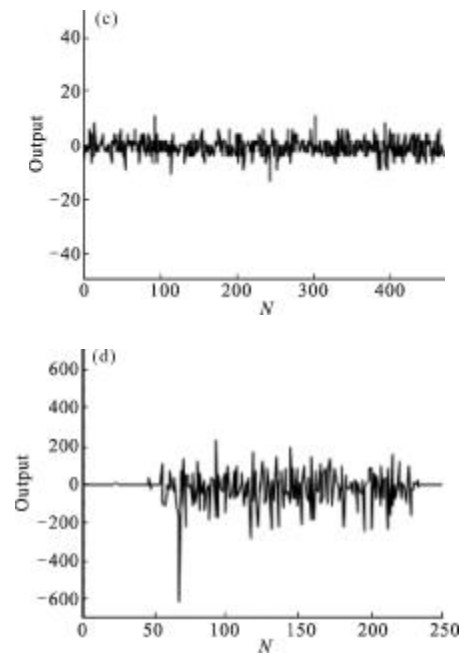
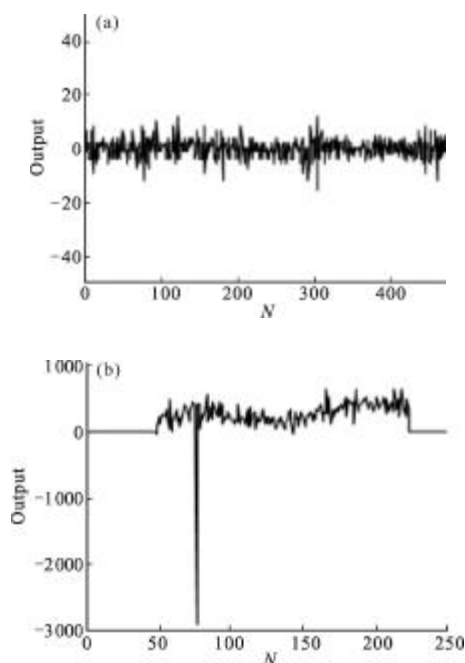


图 4 振动实验陀螺输出

Fig.4 Outputs of FOG in vibration test

馈延迟 $N=2$ 的光纤陀螺在扫频振动以及随机振动下的输出;图 4(c)和图 4(d)为闭环环路反馈延迟 $N=1$ 的光纤陀螺在扫频振动以及随机振动下的输出。

4.2 实验结果分析

(1) 在扫频振动实验下,由图 4(a)、4(c)可知,在不同延迟方案下系统输出无明显谐振点。

(2) 在随机振动实验下,由图 4(b)可知, $N=2$ 时,随机振动引入的扰动导致系统零偏变为 180;采用减小反馈延迟时间的方案后重复实验,如图 4(d),随机振动时系统零偏变为 43。

综上,进行扫频振动实验时,系统输出零偏性能相差不大;进行随机振动时,陀螺引入的扰动成份较复杂,包含高频成份,因此,在跟踪性能有限及非线性因素的影响下,陀螺闭环环路输出零偏发生变化。对于 $N=1$ 的状态,前向通道增益增加,跟踪性能提高,使得输入端引入较大扰动的情况下,系统跟踪误差较小,非线性作用减弱,闭环输出零偏性能改善。

5 结论

分析了光纤陀螺闭环反馈延迟和非线性机理;由于非线性因素的存在,闭环控制会引入附加的误差项,在反馈延迟较大的情况下,扰动时附加的误差项会降低陀螺闭环的稳定性能,同时,反馈延迟的存

在又限制了跟踪性能的提高,进而使得非线性误差项无法得到减小。实验以及仿真证明在跟踪性能较差的情况下,陀螺在振动环境下的输出零偏会产生较大的偏移,因此,减小反馈延迟,提高系统的闭环跟踪性能,对于解决陀螺的振动问题有着重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2013, 3: 223-226. (in Chinese)
- [2] Chen Wenhai, Mou Xudong, Shi Xiaowu, et al. Study on characteristic of vibration of Fiber Optical Gyroscope [J]. *Optical Instruments*, 2003, 25(5): 19-23. (in Chinese)
- [3] Cai Ming. Impact on accuracy and detection research with Fiber ring vibration and temperature in FOG [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] Liu Shurong, Wu Yanji, Xu Lei. Relationship between vibration error and structural resonance in closed-loop FOG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 256-259. (in Chinese)
- [5] Song Ningfang, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Analysis of vibration error in digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(8): 702-704. (in Chinese)
- [6] Meng Zhaokui, Shao Hongfeng, Xu Hongjie, et al. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(8): 958-961. (in Chinese)
- [7] Wu Yanji, Huang Xianlin. Influence of mechanical vibration on FOG and reducing measure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 363-364. (in Chinese)
- [8] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2201-2206. (in Chinese)
- [9] Li Xuyou, Zhang Na, Zhang Ruipeng. Error characteristic analysis of FOG on sway base [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(4): 843-849. (in Chinese)
- [10] Jia Hongjie, Chen Jianhua, Yu Xiaodan. Impacts of Time-delay on disturbance stability of electric power systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(5): 5-8. (in Chinese)
- [11] Han Junliang, Ge Shengmin, Shen Yi. Research on modeling and simulation of digital closed-loop FOG [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(4): 833-836. (in Chinese)
- [12] Radha Madhuri Rajulapati, Jagannath Nayak, Naseema Sk. Modeling and simulation of signal processing for a closed loop fiber optic gyro' s using FPGA [J]. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, 4(3): 947-959.
- [13] Celikel O, San S E. Establishment of all digital closed-loop interferometric fiber-optic gyroscope and scale factor comparison for open-loop and all digital closed-loop configurations[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2009, 9(2): 176-186.
- [14] Wu Min, Gui Weihua, He yong. *Advanced Robust Control* [M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 18-19. (in Chinese)
- [15] Hu Shousong. *Automation Control Principle* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 416-417. (in Chinese)