

全光纤电流互感器动态特性实验研究

王夏霄¹, 王野¹, 王熙辰¹, 王爱民², 彭志强²

(1. 北京航空航天大学惯性技术重点实验室, 北京 100191;

2. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 全光纤电流互感器(FOCT)克服了电磁式电流互感器在暂态响应方面的弱点, 满足现代电力系统对电流值实时精确测量的需求。为保证挂网使用时系统动态特性稳定符合使用要求, 对光纤电流互感器的动态特性进行实验研究。根据光纤电流互感器原理建立动态模型并推导出传递函数, 评估 FOCT 的动态特性; 进一步分析该动态模型中几个重要参数与闭环带宽的关系, 通过实验验证了系统闭环带宽与延迟光缆长度成反比, 与前向通道增益成正比。并且与影响前向通道增益的主要参数: 增益调节系数、干涉光强、和采样点数同样成正比。为了光纤电流互感器在设计 and 实际使用中保证一定的动态性能, 在延迟光缆长度的选取、对影响系统前向通道增益各参数的选择等方面, 提供了理论基础和参考依据。

关键词: 光纤电流互感器; 动态特性; 实验研究; 闭环带宽; 参数影响

Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer

WANG Xia-xiao¹, WANG Ye¹, WANG Xi-chen¹, WANG Ai-min², PENG Zhi-qiang²

(1. State Key Laboratory on Inertial Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Hong Feng Control Company Limited of San Jiang Astronautics, Xiaogan 432000, China)

Abstract: Fiber optic current transducer (FOCT) overcomes the weakness of electromagnetic current transducer in transient current response and meets the demands of accurate current measurement of modern power system in real-time. Experimental research on FOCT's dynamic character is done to ensure the system dynamic characteristics meet the practical requirements. A dynamic model is established based on the working principle of FOCT, and its transfer function is also deduced, so that the dynamic characteristics of FOCT can be evaluated. Furthermore, the relationship between several important parameters in the dynamic model and the closed-loop bandwidth is analyzed; the experiment result shows that system bandwidth is inversely proportional to the length of delay fiber optic cable and proportional to the gain of forward channel. And the bandwidth is proportional to important parameters of the gain of forward channel, such as gain adjustment coefficient, interference intensity, and sampling numbers. In order to guarantee the dynamic performance in the FOCT's designing and using, theoretical basis and reference are provided in the choice of length of delay fiber optic cable and the parameters of the gain in forward channel.

Key words: fiber optical current transformer (FOCT); dynamic character; experimental research; closed-loop width; parameter influence

中图分类号: TM933.1; TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0009-06

0 引言

随着电力系统向高电压、大容量发展, 建立在电流瞬时值差动测量基础上的线路继电保护、变压器保护等系统, 对电流互感器的动态范围、频率响应等性能提出了很高的要求^[1-5]。传统的电磁式电流互感器存在动态范围小、波形畸变等局限性, 从而导致了保护误动或拒动的严重后果^[6-7]。全光纤电流互感器具有无磁饱和、抗电磁干扰能力强、无二次

开路危险、绝缘结构简单、无测量频带限制等优点^[8-10], 能够真实反映电网电流的动态变化情况。对光纤电流互感器的动态特性的研究结果展现了其频率响应快、动态范围大、测量精度高的优点, 可以满足继电保护控制、电能计量、电能质量监测、故障录波等领域不断发展的需求^[11-12]。但是目前未见对于光纤电流互感器具体参数对系统闭环带宽影响的实验研究。没有对光纤电流互感器动态特性的稳定性进行实验研究。

本文以数字闭环全光纤电流互感器（FOCT）的动态特性为研究对象，分析FOCT的系统结构及信号传递过程，建立FOCT的闭环模型，推导FOCT的传递函数，评估FOCT的动态性能，进一步分析了主要参数与闭环宽带的关系；实验验证了动态模型的可信性和实际应用中主要器件对闭环带宽的影响，为光纤电流互感器设计时参数选择提供理论参考，为现场应用提供指导依据。

1 全光纤电流互感器基本原理

全光纤电流互感器光路基本工作原理^[13]：由光源发出的光经过一个单模环形器后进入Y波导器件，Y波导器件实现偏振起偏和相位调制。偏振光由偏振分束器的两个尾纤耦合后注入保偏光纤环，分别沿保偏光纤的X轴和Y轴传输，经过 $\lambda/4$ 波片后，分别变为左旋和右旋的圆偏振光，并进入传感光纤。由于激励交变电流产生磁场，会在传感光纤中产生Faraday磁光效应，使这两束圆偏振光的相位发生变化并以不同的速度传输，在镜面处反射后，两束圆偏振光的偏振模式互换，再次穿过传感光纤，并经历Faraday效应使两束光产生的相位加倍。这两束光再次通过 $\lambda/4$ 波片后，恢复为线偏振光，然后两束线偏振光发生干涉。最后，携带相位信息的光由单模环形器进入探测器。

在光纤环中的两束光产生与电流 I 成正比的相位差，干涉后转换为光强的变化，由光电转换器变为电流的变化。前置放大电路对该电流信号调理和放大，A/D进行高速采样并转换为离散的数字量，数字信号处理电路完成数字解调。根据控制算法形成反馈数字阶梯波，由D/A和驱动电路加在Y波导上，产生 φ_F 实现系统闭环工作。数字信号处理电路同时还要形成调制方波，使系统有合适的工作点^[14-15]。

2 全光纤电流互感器的动态模型

根据以上全光纤电流互感器的工作原理，可以得到全光纤电流互感器的原理框图如图1所示。

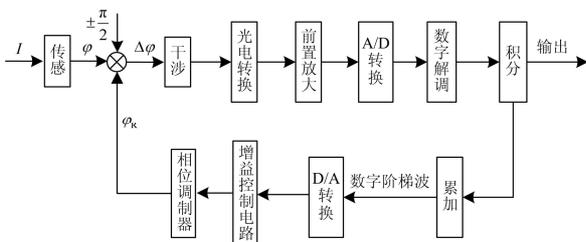


图1 全光纤电流互感器原理框图

Fig. 1 Schematic of FOCT

根据光纤电流互感器的原理框图，进行简化处理得到光纤电流互感器的动态模型图^[16-17]，如图2所示。其中 k 是以延迟时间 τ 为时间间隔的离散变量。 G 表示前向通道增益，取决于干涉的光强、偏执调制深度、光电转换、前放增益、A/D转换增益、数字解调增益等。 H 为反馈回路增益，取决于D/A转换增益、反馈增益控制电路、相位调制 2π 的电压等。 D 为延迟单位时间的算子符号。 F 为光纤电流互感器Faraday效应传感系数， $F=VIN$ ，其中 V 为光纤的Verdet常数， I 为导线中的电流强度， N 为环绕导线的光纤匝数。

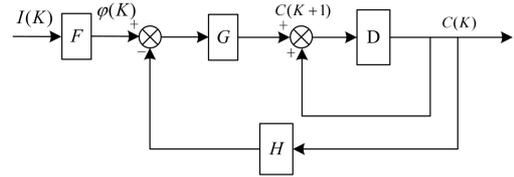


图2 简化的光纤电流互感器动态模型

Fig. 2 Simplified dynamic model of FOCT

根据图2所示光纤电流互感器的动态模型图进行理论推导，得出

$$C(K+1)+(GH-1)C(K)=GFI(K) \quad (1)$$

对以上的差分方程进行变换得到光纤电流互感器的传递函数为

$$F(s)=\frac{GF}{TS+GH}=\frac{F}{H}\cdot\frac{1}{T_c s+1}=K\frac{1}{T_c s+1} \quad (2)$$

式中： $K=\frac{F}{H}$ 为稳态输出标度因数； $T_c=\frac{\tau}{GH}$ 为互感器的时间常数， τ 为控制周期即为延迟时间， GH 为总的增益。通过传递函数表达式可以看出互感器系统为典型的一阶惯性系统。

根据传递函数 $F(s)=K\frac{1}{T_c s+1}$ 可以得到

幅频特性：

$$A(\omega)=K\frac{1}{\sqrt{(\omega T_c)^2+1}} \quad (3)$$

相频特性：

$$\phi(\omega)=-\arctan(\omega T_c) \quad (4)$$

-3 dB带宽：

$$B=\frac{1}{2\pi T_c}=\frac{GH}{2\pi\tau} \quad (5)$$

通过动态模型的建立，可以得到传递函数，分析动态特性的影响因素，为确定光纤电流互感器的最佳动态性能，进一步实现改善继电保护性能，提高继电保护的快速性和可靠性奠定了理论基础。

3 实验研究

采用信号发生器的正弦信号经过V-I转换电路后产生交变电流,通过缠绕在传感光纤上的线圈,感应激励Faraday效应相位差,测量全光纤电流互感器频率特性和各参数对系统闭环带宽的影响。测试波形图如图3所示。验证理论分析的正确性和各参数对系统动态性能影响的可靠性。

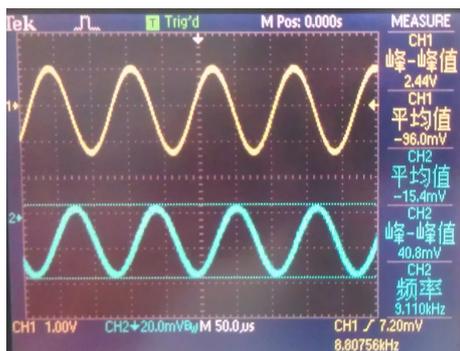


图3 光纤电流互感器频率特性测试波形

Fig. 3 Testing curves of frequency response for FOCT

3.1 一阶惯性系统的实验验证

利用实验室搭建的光纤电流互感器,设置其工作参数,前向通道增益 $G = 1.92 \times 2^{10}$,反馈回路增益 $H = 2\pi \times 2^{-15}$,延迟时间 $\tau = 4.2 \mu\text{s}$ 。根据传递函数进行频率特性仿真,仿真结果如图4所示,闭环带宽为14.3 kHz。

光纤电流互感器各参数不变,加正弦交变电流进行扫频,记录正弦电流大小和光纤电流互感器输出值,进行数据归一化处理,测试结果如图5所示。

通过对比得出:实验结果(图5)与仿真结果(图4)相一致,均为一阶惯性系统的典型曲线,

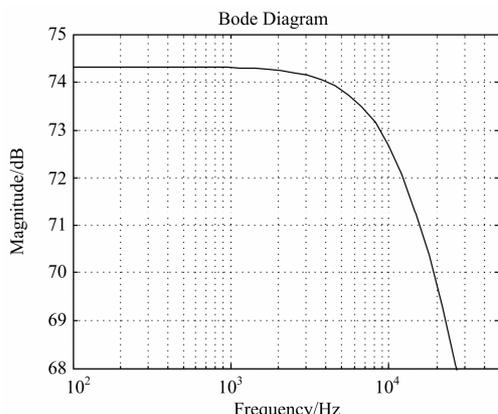


图4 光纤电流互感器的幅频特性曲线仿真图

Fig. 4 Simulation curves of magnitude-frequency characteristic for FOCT

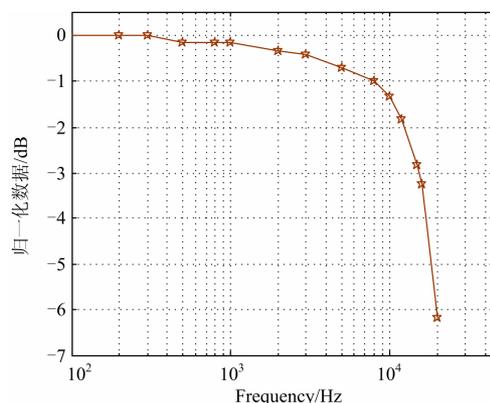


图5 光纤电流互感器幅频特性曲线图

Fig. 5 Testing curves of magnitude-frequency characteristic for FOCT

实验得出该型号光纤电流互感器的闭环带宽约为14.7 kHz,与动态模型得出的结论一致,验证了其动态模型的正确性。

3.2 工作参数对带宽影响的分析验证

根据动态模型带宽公式(5)得出,光纤电流互感器闭环带宽与前向通道增益 G 成正比,与控制周期 τ 成反比。而前向通道增益 G 与干涉光强、偏置调制深度、光电转换、前放增益、A/D转换增益、数字解调增益有关;控制周期 τ 主要决定于延迟光缆长度。

3.2.1 控制时间 τ 对带宽影响的验证

在光纤电流互感器中, $\tau = \frac{2nL}{c}$,其中 L 为延迟

光缆长度, n 为延迟光缆折射率, c 为光在真空中传播速度。设定光纤电流互感器的前向通道增益 $G = 1.92 \times 2^{10}$,反馈回路增益 $H = 2\pi \times 2^{-15}$,且保持不变, $n = 1.5$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。保证光纤电流互感器反馈闭环正常,使用图3所示的方法,测量不同延迟光缆长度(即不同控制周期)时光纤电流互感器的闭环带宽,拟合曲线图。如图6所示,光纤电流互感器的闭环带宽与控制周期成反比,实验结果与动态模型相一致。

在光纤电流互感器设计中,可以为延迟光缆长度的选择提供指导意义。使系统既能满足延迟光缆的长度要求,又能满足系统的动态性能。

3.2.2 验证带宽与前向增益成正比

为研究前向通道增益对FOCT闭环带宽的影响,先分别在改变增益调节系数、采样点数和光功率时,评估测试光纤陀螺的闭环带宽;然后再拟合不同前向通道增益与闭环带宽的关系。

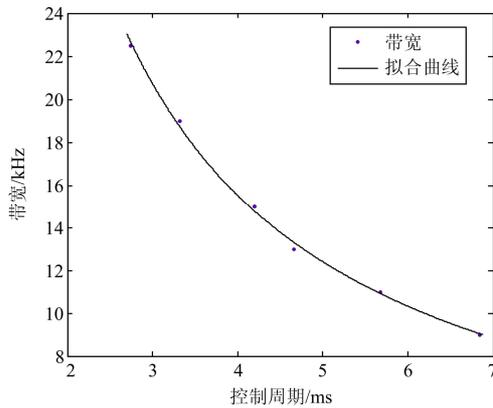


图6 带宽与控制周期的关系拟合曲线

Fig. 6 Relation curve between bandwidth and control cycle

设定电流互感器的控制时间 $\tau = 4.2 \mu\text{s}$ 反馈回路增益 $H = 2\pi \times 2^{-15}$ ，保持不变。选取不同的光纤电流互感器增益调节系数，其他与前向通道增益有关的保持参数不变。分别测量对应的光纤电流互感器系统闭环带宽，拟合得到增益调节系数与系统带宽的关系如图7所示。在同样条件下，只调整不同的干涉光强和采样点数，分别测量对应的光纤电流互感器系统闭环带宽，拟合得到干涉光强和采样点数与系统带宽的关系分别如图8和图9所示。

由实验结果可以看出，增益调节系数、干涉光强和采样点数都与系统带宽成正比关系，且三个参数都是现场可调的，可为实际应用中对于带宽的调节提供指导依据。

其中的干涉光强对于光纤电流互感器闭环带宽的影响可以看出，在长时间挂网使用时，光源光功率有可能出现衰减，则干涉光强也会出现下降，引起光纤电流互感器的系统带宽下降，在设计时需要保证足够的带宽来满足系统的长期稳定性。

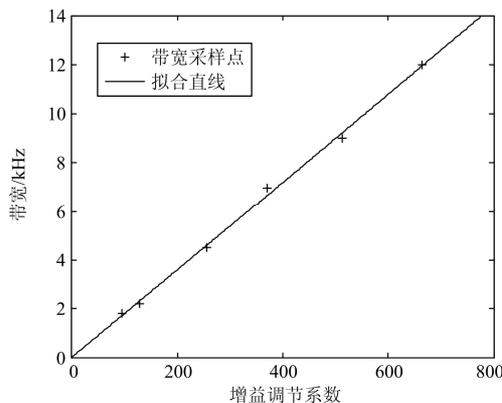


图7 增益调节系数与带宽关系曲线

Fig. 7 Relation curve between gain adjustment coefficient and bandwidth

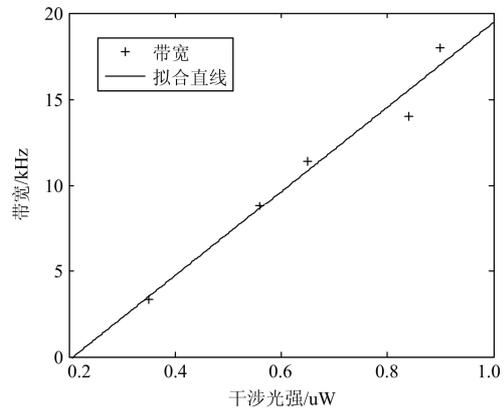


图8 干涉光强与系统带宽关系曲线

Fig. 8 Relation curve between interference intensity and bandwidth

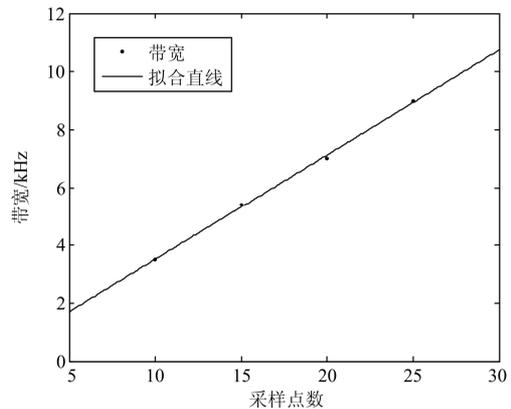


图9 采样点数与带宽关系曲线

Fig. 9 Relation curve between sampling number and bandwidth

最后在光纤电流互感器的延迟时间 $\tau = 4.2 \mu\text{s}$ ，反馈回路增益 $H = 2\pi \times 2^{-15}$ ，且保持不变。保证光纤电流互感器反馈闭环正常，测量不同前向增益时光纤电流互感器的带宽，拟合曲线图如图10所示。光纤电流互感器的闭环带宽与前向通道增益成正比，实验结果与动态模型相一致。

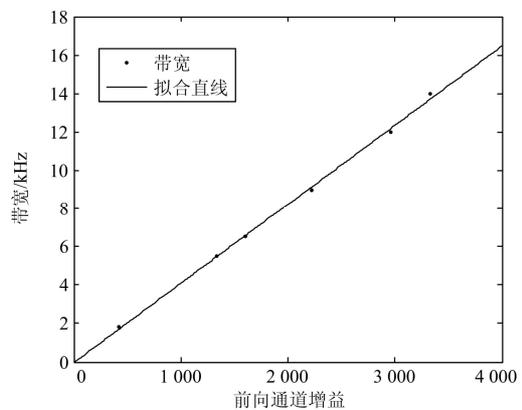


图10 带宽与前向通道增益的关系拟合曲线

Fig. 10 Measured bandwidth versus gain of forward channel

4 结论

FOCT 具有测量精度高、暂态性能优、动态范围大、绝缘性能好等优点, 受到电力行业的青睐。目前已有多家设备挂网试运行。本文以 FOCT 的动态特性为研究对象, 通过推导系统传递函数, 确定了光纤电流互感器为一阶惯性系统, 并且通过实验验证了动态模型的正确性。在此基础上, 分析并验证了动态模型的重要参数与闭环带宽的关系, 得出了光纤电流互感器闭环系统带宽与延迟光缆长度成反比; 与前向通道增益成正比, 并且可以通过改变增益调节系数、干涉光强和采样点数来改变前向通道增益。为系统设计时参数设置提供理论依据, 并且为现场测试时系统带宽调节提供指导意义。为优化动态特性, 真实反映电网电流的动态变化情况, 改善继电保护性能, 提高继电保护的快速性和可靠性奠定了基础; 为 FOCT 的正式挂网使用提供了助力。

参考文献

- [1] Klaus Bohnert, Philippe Gabus, Jürgen Nehring. Fiber-optic current sensor for electro winning of metals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [2] Klaus Bohnert, Jadran Kostovic, Pascal Pequignot. Fiber optic voltage sensor for 420 kV electric power systems[J]. Optical Engineering, 2000, 39(11): 3060-3067.
- [3] 刘彬, 张君正, 张秋婵, 等. 一种新型的光纤电流传感器[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(1): 81-83.
LIU Bin, ZHANG Jun-zheng, ZHANG Qiu-chan, et al. A novel fiber-optic current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(1): 81-83.
- [4] 黄莉, 何奔腾. 电流互感器饱和对距离保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(12): 16-20.
HUANG Li, HE Ben-teng. Influence of current transformer saturation on the distance protection[J]. Relay, 2004, 32(12): 16-20.
- [5] 庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV 智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 146-150.
PANG Hong-mei, LI Huai-hai, ZHANG Zhi-xin, et al. Research situation of 110 kV smart substation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 146-150.
- [6] 马超, 李立京, 李传生. Sagnac 型光纤电流互感器数据同步的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 38-43.
MA Chao, LI Li-jing, LI Chuan-sheng. Study of data synchronization of Sagnac fiber optic current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 38-43.
- [7] 王立辉, 伍雪峰, 孙健, 等. 光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 62-66.
WANG Li-hui, WU Xue-feng, SUN Jian, et al. Research on character and modeling method of noise in fiber optic current transducer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 62-66.
- [8] 陈金玲, 李红斌, 刘延冰, 等. 一种提高光学电流互感器温度稳定性的新方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 97-101.
CHEN Jin-ling, LI Hong-bin, LIU Yan-bing, et al. A novel method to improve the temperature stability of optical current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 97-101.
- [9] 朱国防, 陆于平. 平扇环型制动区差动保护算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 172-177.
ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sector-ring restraint region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.
- [10] 马静, 王增平, 吴劫. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166-171.
MA Jing, WANG Zeng-ping, WU Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171.
- [11] 王立辉, 杨志新, 殷明慧, 等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1890-1895.
WANG Li-hui, YANG Zhi-xin, YIN Ming-hui, et al. Simulation and test of dynamic performances of digital

- closed-loop fiber optic current transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1890-1895.
- [12] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式光纤电流传感器频率特性计算和测试[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 88-92. ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, et al. Frequency characteristics of reflecting fiber-optic current transducer[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 88-92.
- [13] 王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 77-80. WANG Xia-xiao, ZHANG Chun-xi, ZHANG Chao-yang, et al. A new all digital closed-loop fibre optic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 77-80.
- [14] 袁玉厂, 冯丽爽, 王夏霄, 等. 全光纤电流互感器检测系统的设计[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 95-98. YUAN Yu-chang, FENG Li-shuang, WANG Xia-xiao, et al. Design of measurement system on all-fiber-optical current transducer[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 95-98.
- [15] FENG Xiu-juan, ZHANG Chun-xi, LIANG Sheng, et al. A novel digital active homodyne demodulation scheme based on square wave phase modulation for interferometric fiber-optic sensors[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(1): 20-23.
- [16] 张朝阳, 张春熹. 闭环伞光纤电流互感器相位差的计算与测试[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 152-156. ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi. Calculation and test of phase difference of fiber optic current transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 152-156.
- [17] 马迎建, 王峥, 张惟叙, 等. 数字闭环光纤陀螺频率特性的计算和测试方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(6): 640-642. MA Ying-jian, WANG Zheng, ZHANG Wei-xu, et al. Method of testing and calculating for frequency characteristics of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6): 640-642.

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-06-15

作者简介:

王夏霄(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤陀螺和光纤传感方面的研究; E-mail: wangxiaxiao@buaa.edu.cn

王野(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤电力传感技术的研究。E-mail: wangyes111@sina.com