

# 环路增益对光纤电流互感器测量准确度的影响

于 佳<sup>1</sup> 张春熹<sup>1</sup> 王夏霄<sup>1</sup> 李传生<sup>2</sup> 张宇宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

<sup>2</sup>中国计量科学研究院, 北京 100029

**摘要** 建立了光纤电流互感器的离散动态模型, 理论分析了互感器比值误差及相位误差与系统环路增益之间的关系, 确定了环路增益漂移是导致互感器长期运行精度劣化的主要原因之一。提出了一种环路增益在线监测方法, 能实时检测环路增益的变化, 监测值可以作为互感器长期运行的故障监测点之一。在此基础上实验验证了模型的正确性, 结果表明: 在保证静态测试精度的条件下, 系统环路增益取值越大, 环路增益波动对互感器比值误差和相位误差的影响越小。系统环路增益取值为 0.05 时, 为保证长期运行互感器测试准确度不超过误差限值要求, 环路增益波动应不超过 10%。

**关键词** 传感器; 光纤电流互感器; 环路增益; 比值误差; 相位误差; 在线监测

**中图分类号** O433.1; TM452+.94

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0910002

## Influence of Loop Gain on Measurement Accuracy of Fiber Optical Current Transformer

Yu Jia<sup>1</sup> Zhang Chunxi<sup>1</sup> Wang Xiaoxiao<sup>1</sup> Li Chuansheng<sup>2</sup> Zhang Yuning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup>National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** A discrete dynamic model of fiber optical current transformer is established. The relationship between the scale factor error, phase error of the transformer and the system loop gain is theoretically investigated. It's determined that the loop gain drift is one of the main reasons that lead to the degradation of the long-time operation accuracy of the transformer. A method for online loop gain monitoring is presented which can monitor the change of loop gain in real time. The monitoring value can be used as one of the fault monitoring points for long-time operation of the transformer. Based on it, the model correctness is verified by experiments. Results show that on the condition of ensuring the static test accuracy, the greater the system loop gain value is, the smaller the influence of loop gain fluctuation on scale factor error and phase error of the transformer will be. When the system loop gain is 0.05, the loop gain fluctuation should not exceed 10% to ensure that the transformer measurement accuracy in long-time operation is less than the required error limit.

**Key words** sensors; fiber optical current transformer; loop gain; scale factor error; phase error; on-line monitoring

**OCIS codes** 280.4788; 230.2240; 230.3120; 230.1150

## 1 引 言

基于 Faraday 效应和数字闭环检测技术的反射式 Sagnac 型光纤电流互感器(FOCT)具有测量精度高、暂态范围大、绝缘简单、抗干扰能力强、数字化输出、体积小、重量轻等优点<sup>[1-4]</sup>, 已成为智能变电站建设的关键设备, 并在智能变电站试点工程中挂网应用。

近年来, FOCT 的研究主要集中于温度对互感器测试精度的影响<sup>[5-6]</sup>, 其他的外界干扰如振动、串扰磁场

**收稿日期:** 2016-03-16; **收到修改稿日期:** 2016-04-25

**作者简介:** 于 佳(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤电流传感器方面的研究。E-mail: yu\_jia1985@126.com

**导师简介:** 张春熹(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤陀螺及光纤传感器方面的研究。

E-mail: zhangchunxi@buaa.edu.cn

等对互感器精度的影响也有相关的文献报道<sup>[7-8]</sup>。经过几年的挂网运行,FOCT 还暴露出一些其他问题,与传统互感器相比,其在稳定性和可靠性方面仍有待提高。FOCT 集成了多种光学器件,长期运行于变电站户外复杂、恶劣的环境中,其长期运行的稳定性及可靠性受到了严峻考验。根据电子式电流互感器标准 GB/T 20840.8-2007,FOCT 的测量准确度通常由电流比值误差及相位误差来定义<sup>[9]</sup>。FOCT 可以简化为一个闭环数字控制系统,已有相关文献对其离散传递函数与系统动态特性的关系、影响系统带宽的因素等进行分析<sup>[10-11]</sup>,但对系统长期运行稳定性的影响还有待深入研究。

环路增益是系统离散传递函数的主要特征参数,反映了 FOCT 系统的状态,由光源输出功率、光路损耗、光电转换效率、前置放大器(AMP)增益、解调增益、反馈增益等参数决定。系统长期运行过程中,任一参数变化都将导致环路增益变化,引起比值误差及相位误差的波动,导致互感器测量精度劣化。

本文以此为切入点介绍了 FOCT 的基本原理,根据各器件的数学模型建立了系统的离散动态模型,分析了环路增益变化对比值误差及相位误差的影响机理,提出了一种实现环路增益在线实时监测的方法,实验验证了环路增益对 FOCT 测量准确度的影响。

## 2 FOCT 基本原理

图 1 为 FOCT 的结构示意图<sup>[5]</sup>,超辐射发光二极管(SLD)发出的光经环形器后由偏振器起偏变为线偏振光,经保偏尾纤的熔接处(熔接对轴角度为 45°)注入到保偏(PM)光纤的快、慢轴,2 束正交的线偏振光经相位调制器调制后进入保偏延迟光纤,由 1/4 波片转换为 2 束正交的圆偏振光并进入传感光纤。在磁场作用下,2 束圆偏振光之间产生正比于被测电流的相位差,2 束圆偏振光经反射镜反射后沿原路返回,同时相位差加倍,并再次由 1/4 波片转换为 2 束模式互换(原来沿保偏光纤快轴、慢轴传输的线偏振光此时分别沿慢轴、快轴传输)的正交线偏振光,2 束线偏振光最终在保偏尾纤熔接处发生干涉,经偏振器检偏后由探测器接收进行后续的信号处理。发生干涉的 2 束光在传输过程中分别经历了保偏光纤的 2 个正交的偏振模式,只是先后顺序上略有区别。因此,理想情况下 FOCT 的光路结构是完全互易的,2 束光之间的相位差  $\varphi$ 。只源于传感光纤中非互易的 Faraday 相移,其表达式为  $\varphi_s = 4NVI$ ,其中  $V$  为传感光纤的 Verdet 常数, $N$  为传感光纤圈数, $I$  为被测电流。图 1 中 A/D 和 D/A 为模数转换器和数模转换器,PIN-FET 为光电探测器。

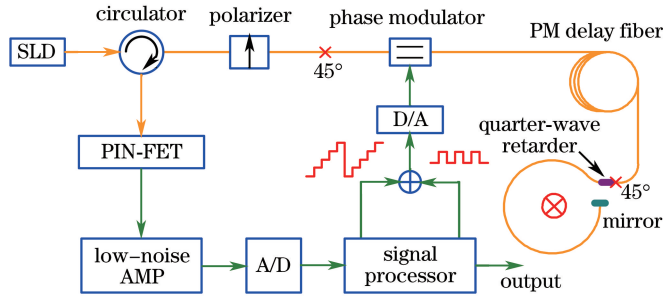


图 1 FOCT 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FOCT configuration

## 3 环路增益变化影响测量准确度机理

FOCT 采用全数字相位调制解调技术和闭环反馈技术实现高精度、大动态范围的信号检测<sup>[12-14]</sup>,具体实现方法可概括为方波调制、数字相关检测和阶梯波反馈。通过相位调制器在 2 束信号光之间引入  $\pm \pi/2$  的方波偏置调制,干涉光强变为与调制方波同频同相的方波信号,其幅值反映了被测电流;干涉光强正负半周采样值相减完成相关解调,实现电流信号的提取,为闭环反馈提供误差信号;对误差信号积分形成相位台阶,一方面经数字滤波作为互感器的输出,另一方面作为反馈相位形成阶梯波抵消 Faraday 相移,实现系统闭环。FOCT 闭环检测系统原理框图如图 2 所示。

FOCT 系统各器件的数学模型分别为<sup>[15-17]</sup>

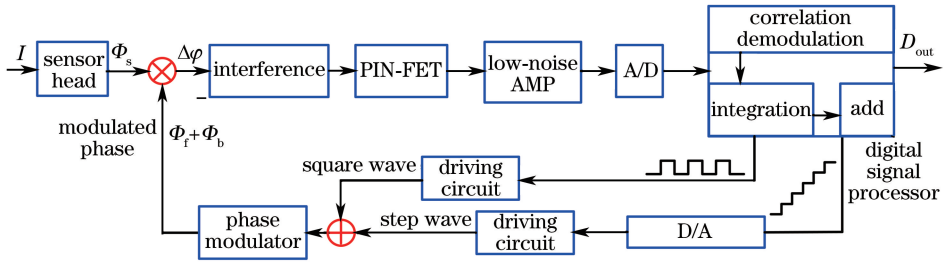


图 2 FOCT 闭环检测系统原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of FOCT closed loop detecting system

1) 传感环节

在光纤传感头处由待测电流引起的 Faraday 相位差为  $4NVI$ ，因此传感环节可以看作是比例环节，比例系数为  $K_0 = 4NV$ ，本系统中  $N = 8$ ，1310 nm 波长下  $V \approx 1.10 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$ 。

2) 干涉环节

引入方波调制及阶梯波反馈后，干涉输出表达式为

$$I = 0.5\alpha I_0 (1 \pm \sin \Delta\varphi), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为光源出光功率， $\alpha$  为光路损耗，基于闭环负反馈  $\Delta\varphi \approx 0$ ，(1) 式又可以表示为

$$I \approx 0.5\alpha I_0 (1 \pm \Delta\varphi). \quad (2)$$

由(2)式可见，干涉输出信号是直流信号与方波信号的叠加。不考虑直流信号，输出结果与相位差呈线性关系，因此干涉环节可以看作一个比例环节，比例系数  $P_0 = 0.5\alpha I_0$ ，由光源出光功率和光路损耗共同决定。

3) PIN-FET 环节与前置放大环节

光电探测器组件将干涉输出的光信号转变为电压信号。干涉光强为频率在百千赫兹量级的方波信号，远小于探测器响应带宽，因此 PIN-FET 环节可以近似为比例环节，比例系数为  $K_{\text{pin}} = R_f \eta$ ， $\eta$  为光电转换效率， $R_f$  为跨阻抗。前置放大器尽可能保证探测器输出方波信号的完整性，可等效为比例环节，比例系数为  $K_{\text{amp}}$ 。

4) A/D 转换环节

A/D 转换器将前置放大器输出的模拟信号转换为数字信号。系统采用 12 位 A/D 转换器，输入电压范围为  $\pm 1 \text{ V}$ ，忽略量化误差，可近似为比例环节，比例系数为  $2^{11}$ 。

5) 解调环节

解调过程是对方波信号的正负半周多点采样、累加平均，并作差分运算。此环节包含了比例环节  $K_{\text{jt}}$  和延迟环节  $z^{-1}$ ，动态模型可以表示为  $K_{\text{jt}} z^{-1}$ 。

6) 积分控制环节

对解调输出结果进行累加积分，并对积分结果进行增益调整，得到 FOCT 的输出和反馈阶梯波台阶高度，其动态模型可表示为  $K_i D(z)$ ，其中  $K_i$  为增益调整系数，积分环节  $D(z) = 1/(1 - z^{-1})$ 。

7) 反馈环节

反馈环节主要是由 D/A 转换器、相位调制器及其驱动电路组成。为抑制长期运行过程中调制器调制系数漂移对传感器测量准确度的影响，采用第二闭环控制技术保证闭环系统反馈增益稳定<sup>[18]</sup>，反馈增益为  $K_R = 2\pi/2^{16}$ 。同时，为了保证偏置调制信息和反馈数字信息的同步引入一个渡越时间的硬件延迟，动态模型可以表示为  $K_R z^{-1}$ 。

综上，可得到数字闭环 FOCT 系统的动态模型，如图 3(a) 所示；对前向通道和反馈通道进一步简化得到 FOCT 简化离散动态模型，如图 3(b) 所示，其中前向通道总增益  $K_q = P_0 K_{\text{pin}} K_{\text{amp}} K_{\text{A/D}} K_{\text{jt}} K_i$ 。

FOCT 系统的闭环离散传递函数为

$$H(z) = \frac{I_{\text{out}}(z)}{I(z)} = \frac{K_0 K_q z^{-1} D(z)}{1 + K_R K_q z^{-2} D(z)} = \frac{K_0 K_q z}{z^2 - z + K_R K_q}, \quad (3)$$

将  $z = \exp(j\omega t)$  代入(3) 式中可得

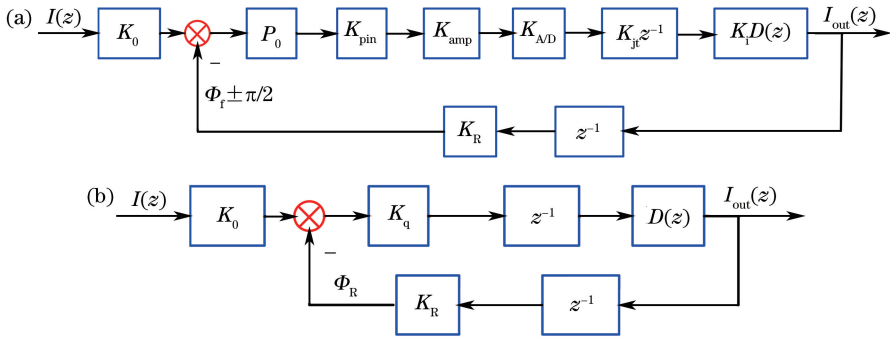


图 3 (a)FOCT 离散动态模型;(b)FOCT 简化离散动态模型

Fig. 3 (a) Discrete dynamic model of FOCT; (b) simplified discrete dynamic model of FOCT

$$H[\exp(j\omega t)] = \frac{K_0 K_q \exp(j\omega t)}{\exp(j2\omega t) - \exp(j\omega t) + K_R K_q} = \frac{K_0 K_q [\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)]}{\cos(2\omega t) - \cos(\omega t) + K_R K_q + j[\sin(2\omega t) - \sin(\omega t)]} \quad (4)$$

互感器系统的幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{K_0 K_q}{\sqrt{[\cos(2\omega t) - \cos(\omega t) + K_R K_q]^2 + [\sin(2\omega t) - \sin(\omega t)]^2}}, \quad \varphi(\omega) = \omega T - \arctan\left[\frac{\sin(2\omega t) - \sin(\omega t)}{\cos(2\omega t) - \cos(\omega t) + K_R K_q}\right] \quad (5)$$

式中  $\omega = 2\pi f$  为待测交流信号的角频率;  $T = \tau \approx 1.817 \mu s$ ,  $\tau$  为系统渡越时间;  $K = K_R K_q$  为系统环路增益, 由于采用了反馈增益控制技术, 环路增益的变化主要由前向通道增益波动导致。  $K < 0.5$  时系统满足闭环稳定条件。

图 4 为系统测量 50 Hz 工频电流时, 幅值和相位随环路增益变化的仿真曲线。从图 4 中可以看出: 测量工频电流时, 随着环路增益降低, 系统对应幅值和相位的变化量逐渐增大, 导致系统输出的比值误差和相位误差越来越大; 环路增益降低到 0.02 以下时, 幅值和相位的变化量增大趋势显著加快, 并且环路增益波动对系统相频特性的影响较幅频特性的影响更明显。由上述可知, 环路增益越大, 环路增益波动引起系统比值误差和相位误差越小, 但环路增益增大的同时会导致系统的噪声增大, 信噪比降低, 在额定电流为 1% 和 5% 的小电流测试时, 测量准确度降低。在实际测量应用时, 环路增益取值还需兼顾小电流的测试精度, 因此额定电流为 600 A 时本系统的环路增益取值为 0.05。

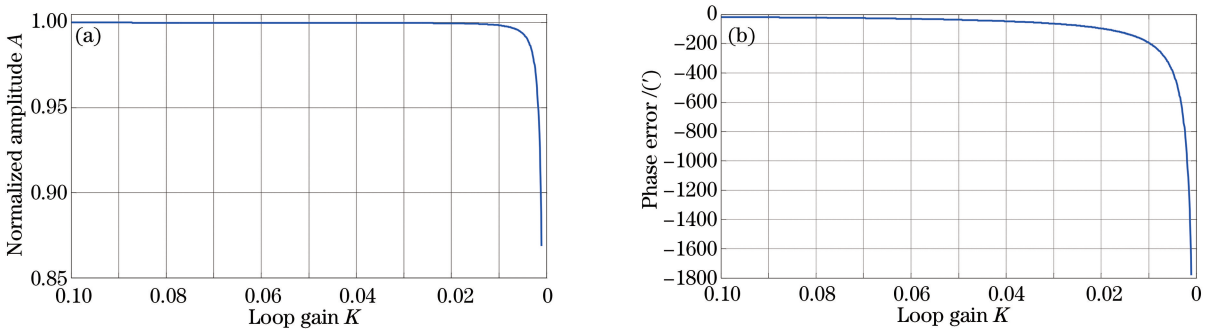


图 4 (a) 归一化幅值随环路增益变化曲线;(b) 相位误差随环路增益变化曲线

Fig. 4 (a) Normalized amplitude versus loop gain; (b) phase error versus loop gain

## 4 环路增益在线监测及实验验证

### 4.1 环路增益在线监测

环路增益由整个系统环路中光路和电路各环节器件的参数共同决定, 光功率、前置放大器增益、A/D 转

换器的增益变化都会导致环路增益变化,影响 FOCT 的测量准确度,因此环路增益变化能够在一定程度上综合反映 FOCT 运行状态。提出一种环路增益在线监测方案,能实时检测环路增益的变化,监测值作为互感器长期运行时的一个故障监测点。具体方案是:在积分环节人为加入一个附加数字量  $d_{in}$ ,如图 5 所示。附加数字量经反馈环节由相位调制器调制形成相位偏移,使 2 束光波之间的相位差发生改变,经过反射镜反射后沿原光路返回,到达光电探测器转变为电信号,经过前向通道后输出。所加的数字信号经过 FOCT 系统整个回路,由附加信号导致的输出结果携带了整个环路增益的信息,对数字输出量进行解调即可得到整个系统的环路增益值。

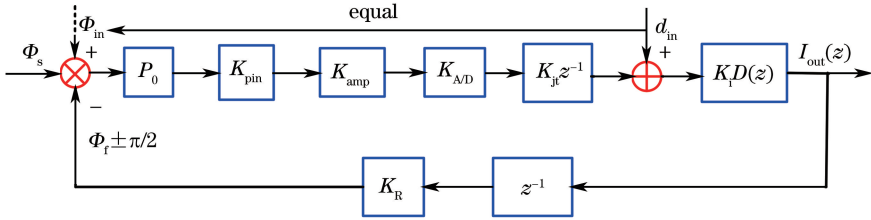


图 5 环路增益在线监测方案

Fig. 5 Online monitoring scheme of loop gain

如图 5 所示,  $d_{in}$  可以等效为通过相位调制器引入的一个大小为  $\phi_{in}$  的相位,  $\phi_{in} = d_{in}/K_m$ ,  $K_m = P_0 K_{pin} K_{amp} K_{A/D} K_{jt} = K_q/K_i$ 。

已知在闭环反馈情况下,当积分环节不加数字量  $d_{in}$  时,光纤电流互感器数字输出与 Faraday 相位差的关系为

$$D_{out} = \frac{\phi_f}{K_R} = -\frac{\phi_s}{K_R}, \tag{6}$$

加入数字量  $d_{in}$  时,输入相位可以等效为  $\phi_s + \phi_{in}$ ,此时 FOCT 数字输出量为

$$D_{out} = -\frac{\phi_s + \phi_{in}}{K_R}. \tag{7}$$

FOCT 的电流采样周期由渡越时间决定,一般为微秒量级,对采样值进行数字平均滤波,数据输出周期为  $100 \mu s$ 。如果  $100 \mu s$  内互感器采样点数为  $2n$ ,则输出可表示为

$$D'_{out} = 2nD_{out}. \tag{8}$$

为了不影响 FOCT 的最终输出,如图 6 所示,前后  $50 \mu s$  分别叠加数值相等、符号相反的数字量,在 FOCT 向合并单元发送数据的 1 个周期内,所叠加数字信号的平均值为 0,抵消了附加信号对 FOCT 输出的影响。

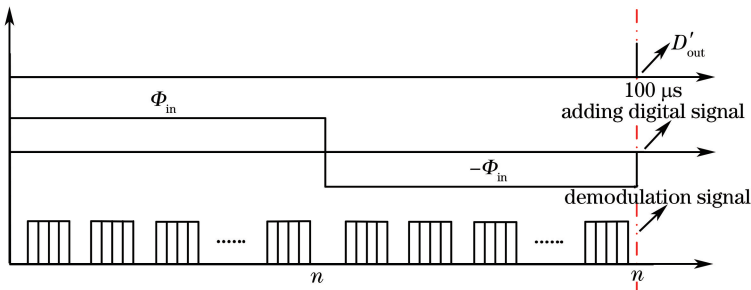


图 6 输出解调示意图

Fig. 6 Schematic diagram of output demodulation

对应于叠加信号正、负半周期,FOCT 的采样值分别为

$$\begin{aligned} D_{out+} &= -\frac{\phi_s + \phi_{in}}{K_R}, \\ D_{out-} &= -\frac{\phi_s - \phi_{in}}{K_R}. \end{aligned} \tag{9}$$

在数字滤波的同时,进行差分运算

$$\Delta D = nD_{out+} - nD_{out-} = \frac{-2n\phi_{in}}{K_R} = \frac{-2nd_{in}}{K_R K_m} \quad (10)$$

FOCT 环路增益的大小为

$$K = K_q K_R = K_m K_i K_R = -2NK_i \frac{d_{in}}{\Delta D}, \quad (11)$$

式中定值  $K_i$  不随环路中器件性能变化而改变,因此,通过监测  $\Delta D$  可实现对环路增益的在线监测。

#### 4.2 实验与结果分析

系统长期运行中,导致环路增益产生变化的最主要因素是光源的功率衰减。光源功率衰减不但使环路增益产生变化,也导致系统平均波长产生漂移,而平均波长漂移会引起比值误差和相位误差增大<sup>[19]</sup>。为在不叠加其他因素的情况下验证环路增益对 FOCT 测量准确度的影响,通过调节前置放大环节的放大倍数调节环路增益。具体方法是将第 2 级放大电路的反馈电阻( $R$ )由固定电阻换成滑动变阻器,调节变阻器阻值,环路增益随前置放大倍数降低而减小,测试 FOCT 系统输出的精度,实验结果如表 1 所示。FOCT 比值误差和相位误差与环路增益的关系曲线如图 7 所示。

表 1 比值误差和相位误差与前置放大倍数及环路增益的关系

Table 1 Relationship of scale factor error and phase error versus pre-amplification times and loop gain

$R / k\Omega$	Amplification	Loop gain	Scale factor error /%	Phase error /( $^\circ$ )
11.81	25.3915	0.1743	0.000954	-0.30811
10.23	21.9945	0.1502	-0.01732	-1.46754
8.87	19.0705	0.1312	-0.01571	-3.34291
7.88	16.942	0.1154	-0.01812	-4.6007
6.75	14.5125	0.09921	-0.01391	-7.24607
5.84	12.556	0.08559	-0.01454	-9.9557
5.06	10.879	0.07425	-0.01076	-13.09
4.02	8.643	0.05902	-0.01513	-19.6543
3.63	7.8045	0.05337	-0.0215	-23.1122
2.47	5.3105	0.03628	-0.02345	-35.3324
1.708	3.6722	0.02532	-0.03141	-59.2193
1.007	2.16505	0.01478	-0.0748	-113.216
0.627	1.34805	0.00922	-0.19381	-192.633
0.1132	0.24338	0.001671	-5.73664	-1150.83

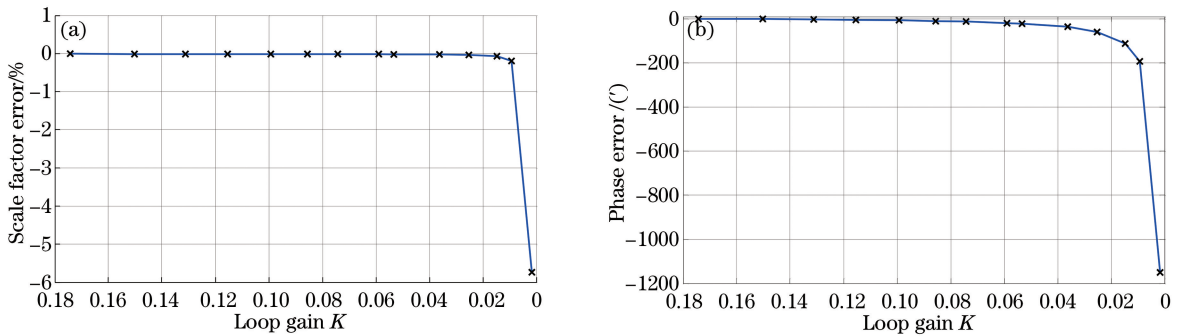


图 7 (a)比值误差随环路增益变化曲线;(b)相位误差随环路增益变化曲线

Fig. 7 (a) Scale factor error versus loop gain; (b) phase error versus loop gain

由表 1 及图 7 的实验结果可知,互感器系统的比值误差和相位误差随环路增益的减小而逐渐增大,当系统环路增益低于 0.02 时,比值误差和相位误差的变化量呈显著增大趋势,与仿真实验结果一致,验证了系统模型和环路增益在线监测方法的正确性。

## 5 结 论

FOCT 长期处于变电站户外复杂的环境中,互感器系统环路增益变化导致的测试精度恶化是影响互感器长期运行可靠性与稳定性的主要因素之一。建立了互感器系统的离散动态数学模型,得到了互感器比值

误差和相位误差与系统环路增益的关系,提出了一种环路增益在线监测方法,并实验验证了环路增益变化导致的系统比值误差和相位误差的变化与仿真结果一致。实验结果表明:在保证静态测试精度的条件下,系统环路增益取值越大,环路增益波动对互感器比值误差和相位误差的影响越小。本系统中环路增益取值约为0.05,为保证长期运行互感器测试准确度不超过误差限值要求,环路增益波动应不超过10%。

## 参 考 文 献

- 1 Ziegler S, Woodward R C, Iu H C, *et al.* Current sensing techniques: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4): 354-376.
- 2 Ortiz V H, Flores J L, Garcia-Torales G. A review on optical current transducers for power system metering[C]. SPIE, 2007, 6770: 677018.
- 3 Wang Zhi, Chu Fenghong. Research advances in optical fiber current sensor technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 100002.  
王 志, 初凤红. 光纤电流传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 100002.
- 4 Fan Yan'en, Wu Shuai, He Shengnan, *et al.* Research on current sensing technology using fiber Bragg grating demodulated by fiber Michelson interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080602.  
樊彦恩, 武 帅, 贺胜男, 等. 基于光纤迈克耳孙干涉仪调谐技术的光纤光栅电流传感技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080602.
- 5 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.* Key techniques of reflective Sagnac interferometer-type fiber optic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 104-127.  
李传生, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式 Sagnac 型光纤电流互感器的关键技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 104-127.
- 6 Wang Zhi, Chu Fenghong, Wu Jianping. Progress in all-fiber current sensor temperature compensation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120005.  
王 志, 初凤红, 吴建平. 全光纤电流传感器温度补偿研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120005.
- 7 Li Xuyou, Hao Jinhui, Yang Hanrui, *et al.* Research on the compensating fiber loop for eliminating vibration in Sagnac optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0205005.  
李绪友, 郝金会, 杨汉瑞, 等. 消除萨尼亚克光纤电流传感器振动干扰的光纤补偿环研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205005.
- 8 Niewczas P, Madden W I, Michie W C, *et al.* Magnetic crosstalk compensation for an optical current transducer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1071-1075.
- 9 GB/T 20840. 8-2007[S]. Transformer Part 8: Electronic Current Transformer, 2007.  
GB/T 20840. 8-2007[S]. 互感器第 8 部分: 电子式电流互感器, 2007.
- 10 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.* Frequency characteristics of reflecting fiber-optic current transducer[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 88-92.  
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.
- 11 Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Wang Xichen, *et al.* Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 9-13.  
王夏霄, 王 野, 王熙辰, 等. 全光纤电流互感器动态特性实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 9-13.
- 12 Li Chuansheng, Zhang Chaoyang, Sun Haijiang, *et al.* Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105008.  
李传生, 张朝阳, 孙海江, 等. 保偏延迟光纤环偏振串音对光纤电流互感器的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105008.
- 13 Gao Jinzhan. Weak signal detection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 171-182.  
高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 171-182.
- 14 Zhang Xi, Zhang Chunxi, Du Xinzheng. Design of digital lock-in amplifier in fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2001, 9(4): 70-73.  
张 晞, 张春熹, 杜新政. 光纤陀螺中的数字锁相放大器设计[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(4): 70-73.
- 15 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, 838.  
韩军良, 葛升民, 沈 毅. 数字闭环光纤陀螺建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(4): 833-836, 838.

- 16 Wang Xichen. Study of small signal errors in optic fiber current sensor[D]. Beijing: Beihang University, 2013: 21-30.  
王熙辰. 光纤电流互感器小信号误差分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013: 21-30.
- 17 Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.* Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205002.  
王夏霄, 张 猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205002.
- 18 Paviath G A. Closed-loop fiber optic gyros[C]. SPIE, 1996, 2837: 46-60.
- 19 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.* Influence of SLD's power attenuation on scale factor of closed-loop fiber optic current transformer[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 37(12): 2458-2461.  
张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 光源功率衰减对闭环光纤电流互感器变比影响研究[J]. 光子学报, 2007, 37(12): 2458-2461.