

# 光纤电流传感器环路增益在线监测及控制技术

于佳<sup>1\*</sup>, 王夏霄<sup>1</sup>, 张春熹<sup>1</sup>, 李传生<sup>2</sup>, 马福<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** 给出了光纤电流传感器的数学模型, 推导出了传感器测量准确度的数学表达式, 并对系统的主要特征参数进行了分析。提出了一种在线监测方法, 将环路增益值解调并实时输出, 作为传感器系统的一个故障监测点。然后在此基础上, 提出了环路增益稳定控制技术, 使环路增益能够实现自动调整, 消除了系统在长期运行时因环路增益变化对精度的影响。实验结果表明: 改变前置放大器的放大倍数, 在线监测的环路增益值、比值误差和相位误差均随之改变, 实验结果与仿真结果一致; 引入环路增益稳定控制技术后, 改变前置放大器的放大倍数, 在线监测的环路增益基本保持不变, 且传感器的比值误差和相位误差波动也在准确度范围之内, 验证了在线监测方法和环路增益稳定控制技术的有效性。

**关键词** 光纤光学; 光纤电流传感器; 测量准确度; 环路增益; 控制技术; 在线监测

中图分类号 TM452+.94

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1010003

## Online Monitoring and Controlling Technique of Loop Gain of Fiber Optic Current Sensors

Yu Jia<sup>1\*</sup>, Wang Xiaoxiao<sup>1</sup>, Zhang Chunxi<sup>1</sup>, Li Chuansheng<sup>2</sup>, Ma Fu<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** We develop a mathematical model of a fiber optic current sensor and deduce a mathematic equation of measurement accuracy of the sensor. The influence of the loop gain variation on the measurement accuracy is theoretically investigated. Further, we develop a method for online monitoring of the loop gain. The loop gain value is demodulated and transmitted to the monitor in real-time as one of fault monitoring points for system monitoring. A stable loop gain controlling technique is developed to automatically adjust the loop gain, thereby eliminating the accuracy degradation caused by the loop gain change in the long-time system running. Results show that loop gain value monitored online as well as the scale factor error and phase error change as the preamplifier gain changes, consistent with the simulation results. Furthermore, the loop gain value monitored online remains stable, and appropriate measurement accuracy can be achieved while utilizing the proposed stable controlling technique. These observations denote the effectiveness of the proposed online monitoring and stable controlling technique for loop gain.

**Key words** fiber optics; fiber optic current sensor; measurement accuracy; loop gain; controlling technique; on-line monitoring

**OCIS codes** 060.2370; 060.2300; 280.4788; 230.2240

## 1 引 言

光纤电流传感器(FOCS)是一种基于 Faraday 磁光效应和数字闭环检测技术的光纤传感器, 它具

有检测精度高、绝缘性能好、带宽高、抗外界干扰能力强、体积小、结构灵活等优点<sup>[1-4]</sup>, 在高压、特高压变电站中有望逐步替代传统的电磁式互感器, 目前正在智能变电站试点工程中挂网应用。

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 重大科学仪器设备开发(2016YFF0102401)

\* E-mail: yu\_jia1985@126.com

依据电子式电流互感器标准的规定,比值误差(比差)及相位误差(角差)是评价 FOCS 测量准确度的两项指标<sup>[5]</sup>。近年来,FOCS 研究的重点是解决温度、振动等外界干扰在短时间内对传感器测试准确度的影响<sup>[6-9]</sup>。而相比于传统的互感器,FOCS 的光电采集模块结构复杂,包含多种光学器件和电子器件。在挂网运行试验中,受户外复杂、恶劣环境的影响,FOCS 在长期运行中的可靠性和稳定性不佳。FOCS 作为一个数字控制系统,其动态特性、带宽及影响因素已有相关研究<sup>[10-12]</sup>,但影响系统长期运行可靠性和稳定性的因素及稳定控制方法,还有待于进行深入研究。FOCS 系统环路增益由光路熔点损耗、光学器件的消光比、光源功率、光电转换效率和反馈增益等参数决定,是包含传感器所有环节的主要特征参数。在传感器挂网试验时,其中任一参数变化都将导致环路增益变化,从而引起比差及角差的波动,导致传感器测量精度劣化。

为消除环路增益对系统精度的影响,本文首先

介绍了系统各环节的数学模型,建立了传感器的闭环检测模型,给出了传感器比差及角差与系统环路增益之间的关系,提出了一种在线监测方法,将环路增益值解调并实时输出,设计实验验证了数学模型的准确性。在此基础上增加反馈控制环节,实现了环路增益的稳定控制,消除了环路增益变化对光纤电流传感器测量准确度的影响,提高了传感器长期运行的可靠性。

## 2 FOCS 的离散动态模型及仿真分析

图 1 为 FOCS 的结构示意图<sup>[4]</sup>,FOCS 采用的是反射式 Sagnac 干涉仪结构,光源为超发光二极管(SLD),延迟光纤采用保偏(PM)光纤。在理想情况下,光路是完全互易的,系统检测到的干涉相位差  $\Phi_s$  只与非互易的 Faraday 效应相关,其表达式为:  $\Phi_s = 4NVI$ ,其中:  $N = 8$ ,为传感线圈的光纤缠绕圈数;  $V \approx 1.10 \times 10^{-6}$  rad/A,为传感光纤在 1310 nm 波长处对应的 Verdet 常数值;  $I$  为穿过闭合传感线圈中心的被测电流。

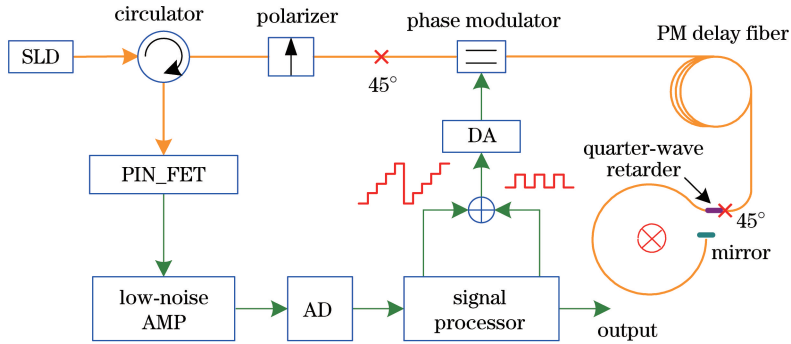


图 1 FOCS 结构框图

Fig. 1 Configuration of FOCS

FOCS 的电路检测基于全数字闭环反馈技术和相位调制解调技术,采用数字相关检测、方波调制和阶梯波反馈来实现大带宽、高精度的微弱信号检测<sup>[13-14]</sup>。FOCS 闭环检测系统原理框图如图 2 所

示,其中:  $\Phi_f$  为反馈相位;  $\Phi_b$  为偏置相位;  $\Delta\phi$  为相位误差;  $D_{out}$  为传感器输出的数字量。

FOCS 闭环检测系统包括传感环节、干涉环节、光电转换(PIN\_FET)环节、前置放大(AMP)环节、

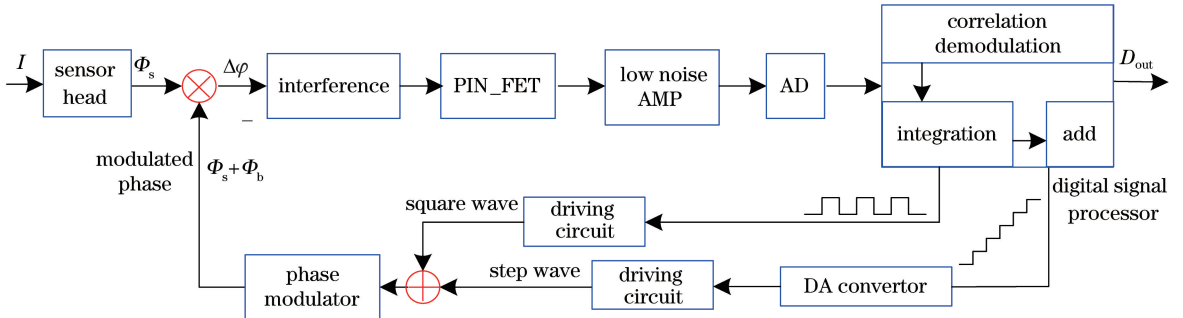


图 2 FOCS 数字控制系统构成

Fig. 2 Digital control system of FOCS

模数转换 (AD) 环节、解调环节、积分控制环节、数模转换 (DA) 环节, 各环节的功能和数学模型如下<sup>[15-17]</sup>:

1) 传感环节和干涉环节

光纤传感线圈是由 1/4 波片、传感光纤和反射镜组成的闭合回路, 对被测电流引起的 Faraday 相位差敏感, Sagnac 干涉仪将该相位差的变化转换为干涉光强的变化, 后续信号处理采用数字闭环检测。因此, 理想情况下, 传感环节和干涉环节都可以等效为比例环节, 传感环节的比例系数  $K_0 = 4NV = 8.8 \times 10^{-6}$ , 干涉环节的比例系数  $P_0 = 0.5\alpha I_0$ , 其中  $\alpha$  为光路损耗,  $I_0$  为光源出光功率。

2) PIN-FET 环节与前置放大环节

PIN-FET 组件由光电二极管 (PIN) 和跨阻放大器组成, 其功能是将干涉环节输出的光信号转变为电压信号。探测器的响应带宽远大于方波调制信号的频率, 可忽略带宽的影响, 将 PIN-FET 环节等效为比例环节, 比例系数  $K_{pin} = R_f \cdot \eta$ , 其中  $R_f$  为跨阻阻抗,  $\eta$  为光电转换效率。前置放大环节为将探测器输出的方波信号进行放大且不失真, 带宽设计远大于方波调制频率, 因此也可近似为比例环节, 比例系数为  $K_{amp}$ 。

3) 模数转换环节

模数转换环节将前置放大器输出的模拟信号转换为数字信号。为保证分辨率要求, 闭环检测系统

选择输入电压范围为  $\pm 1 \text{ V}$  的 12 位 AD 转换器, 不考虑量化误差的影响, 可等效为比例环节, 比例系数  $K_{AD} = 2^{11}$ 。

4) 解调环节和积分控制环节

解调环节和积分控制环节都是在现场可编程门阵列 (FPGA) 中实现的, 是微弱信号处理的核心。解调环节将方波信号的相邻两个半周的采样值进行累加平均, 并进行差分运算; 然后积分控制环节将解调结果进行累加积分并进行增益调整, 实现闭环反馈并将数字量输出。考虑解调的周期性, 解调环节可以近似为比例环节  $K_{jt}$  和延迟环节  $z^{-1}$ , 动态模型表示为  $K_{jt} z^{-1}$ , 积分控制环节的动态模型表示为  $K_i / (1 - z^{-1})$ , 其中  $K_i$  为增益调整系数。

5) 反馈环节

反馈环节将积分环节产生的反馈数字量由 DA 转换器转换为模拟信号后施加到直波导相位调制器上。考虑到调制信息和反馈信息同步, 反馈环节可近似为比例环节  $K_R$  和硬件延迟环节  $z^{-1}$ , 动态模型表示为  $K_R z^{-1}$ 。调制器系数会随温度产生漂移, 影响传感器测量准确度。为使系统反馈增益稳定, 采用第二闭环控制技术来消除该影响<sup>[18]</sup>, 因此反馈增益  $K_R = 2\pi / 2^{16}$ 。

综上, 如图 3 所示, 可得到 FOCS 系统的简化数学模型, 其中, 前向通道总增益  $K_q = P_0 K_{pin} K_{amp} \cdot K_{AD} K_{jt} K_i$ , 系统环路增益  $K = K_R K_q$ 。

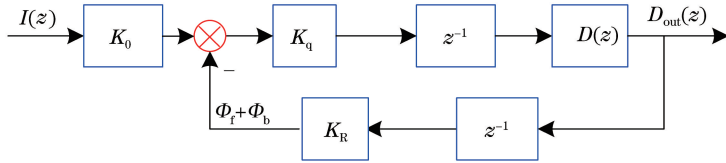


图 3 FOCS 系统简化离散动态模型

Fig. 3 Simplified discrete dynamic model of FOCS

因此, 根据闭环控制理论可得 FOCS 系统的传递函数  $H(z)$  为

$$H(z) = \frac{O_{ut}(z)}{I(z)} = \frac{K_0 K_q z^{-1} D(z)}{1 + K_R K_q z^{-2} D(z)} = \frac{K_0 K_q z}{z^2 - z + K_R K_q} \quad (1)$$

将(1)式进行拉氏变换可得

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

式中:  $T = \tau \approx 1.817 \mu\text{s}$ ,  $\tau$  为系统渡越时间, 由延迟光纤长度决定;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为被测电流频率。为满足系统闭环稳定条件, 环路增益取值应满足  $K < 0.5$ 。

由(2)式可得, 系统的幅频特性  $A(\omega)$  和相频特性  $\varphi(\omega)$  为

$$\begin{cases} A(\omega) = \frac{K_0 K_q}{\sqrt{[\cos(2\omega T) - \cos(\omega T) + K_R K_q]^2 + [\sin(2\omega T) - \sin(\omega T)]^2}} \\ \varphi(\omega) = \omega T - \arctan \frac{\sin(2\omega T) - \sin(\omega T)}{\cos(2\omega T) - \cos(\omega T) + K_R K_q} \end{cases} \quad (3)$$

图 4 为根据(3)式仿真得到的系统幅值和相位与

环路增益的对应关系,被测电流为 50 Hz 工频电流。

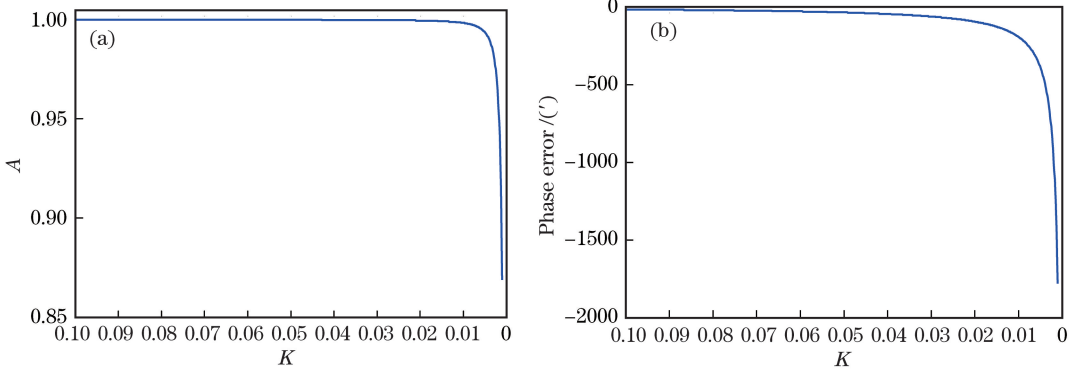


图 4 环路增益与频率特性对应关系。(a)环路增益与幅值对应关系;(b)环路增益与相位对应关系

Fig. 4 Loop gain versus frequency characteristic. (a) Loop gain versus amplitude; (b) loop gain versus phase

从图 4 可知:测量 50 Hz 工频电流时,系统幅值和相位会随着环路增益的变化而产生变化,从而导致系统输出的比差和角差也随之变化。环路增益越小,环路增益变化导致的系统幅值和相位的变化量越大,对应的比差和角差越大,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。

### 3 环路增益在线监测

#### 3.1 在线监测实现方法

FOCS 系统的光学器件和电路各部分的参数共同决定环路增益值。光路损耗、光学器件消光比、光源功率、前置放大、解调和反馈增益变化都会导致环路增益产生变化,进而导致 FOCS 的幅值和相位随之产生变化,如图 4 所示。因此,本研究提出一种能够实现在线监测环路增益的方案,将环路增益值解调并实时输出,输出值的变化反映系统比差和角差的变化。

在线监测方案具体实现方法如图 5 和图 6 所

示。在闭环检测系统的积分环节加入一个数字量  $d_{in}$ ,该数字量经过反馈环节施加到直波导相位调制器,产生调制相移。在两束干涉光波之间引入附加相位差  $\phi_{in}$ ,其与反馈相位一起经过完整的光路系统,到达 PIN-FET 时转换为电信号,然后经前向通道输出。引入的数字量经过了整个 FOCS 系统的所有光路和电路环节,携带了环路增益的完整信息,对其进行解调即可得到与环路增益成比例关系的输出。为保证系统的最终输出不叠加该数字量,引入数字量的周期与最终数据输出周期一致,如图 6 所示,在系统向上位机发送数据的一个周期内,前、后半周期分别叠加数值相等、符号相反的数字量  $d_{in}$ ,对正、负半周期信号进行差分计算即可解调出该数字输出量,从而可得到整个 FOCS 系统的环路增益值,而对正、负半周期信号累加可使叠加的附加数字量相互抵消,只保留被测电流信息,从而消除了引入数字信号对系统最终输出的影响。

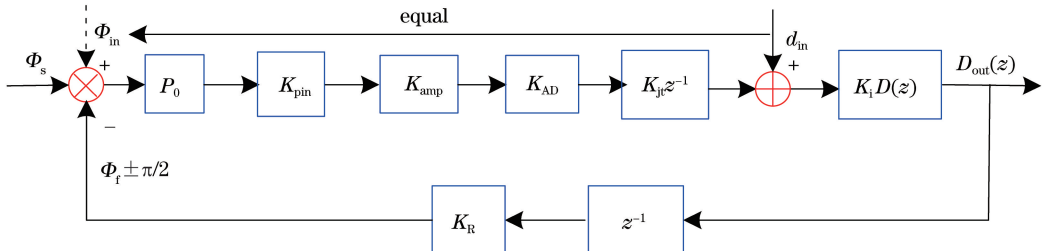


图 5 环路增益在线监测方案

Fig. 5 Scheme of loop gain online monitoring

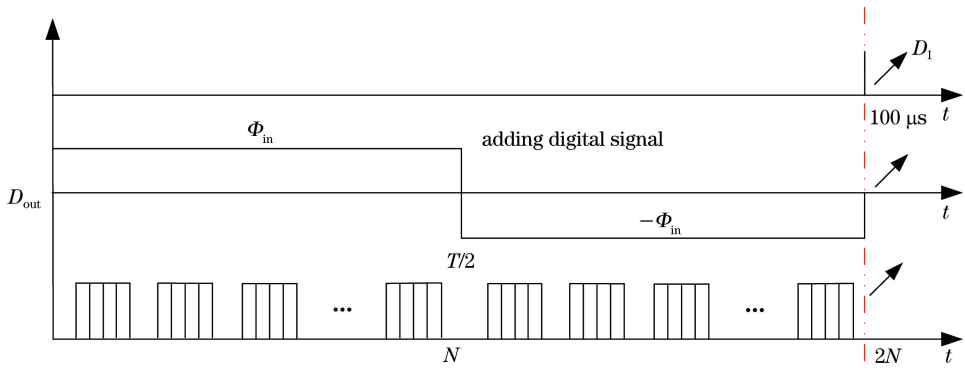


图 6 FOCS 系统最终输出解调示意图

Fig. 6 Sketch map of output demodulation of FOCS

未引入数字量  $d_{in}$  时, 闭环反馈系统的数字输出与 Faraday 相位差和反馈相移的关系为

$$D_{out} = \frac{\varphi_f}{K_R} = -\frac{\varphi_s}{K_R}; \quad (4)$$

引入周期数字量  $d_{in}$  时, 等效相位  $\phi_{in} = d_{in}K_i/K_q$ , 施加在相位调制器上的输入相位变为  $\phi_s + \phi_{in}$ , 此时, 系统的数字输出量与反馈相位的关系为

$$D_{out} = -\frac{\varphi_s + \varphi_{in}}{K_R}, \quad (5)$$

$D_{out}$  输出值为 FOCS 系统的一个采样周期的输出值, 采样周期由延迟光纤长度决定, 一般为微秒量级, 系统的最终输出是对  $D_{out}$  进行累加实现数字平均滤波后的输出。采样点数由数据输出周期和采样周期共同决定, 数据输出周期由合并单元的协议决定, 本系统采用的数据更新周期为  $100 \mu s$ , 对应的采样点数  $2N = 100/\tau$ , 因此平均滤波后输出  $D_i$  为

$$D_i = 2ND_{out} = -\frac{4N\varphi_s}{K_R}. \quad (6)$$

对应于图 6 的方波周期, FOCS 的正、负半周的采样值分别表示为

$$\begin{cases} D_{out+} = -\frac{\varphi_s + \varphi_{in}}{K_R} \\ D_{out-} = -\frac{\varphi_s - \varphi_{in}}{K_R} \end{cases}, \quad (7)$$

对(7)式进行差分运算可得与环路增益相关的数字量, 即

$$D_{Loop} = ND_{out+} - ND_{out-} = \frac{-2N\varphi_{in}}{K_R} = \frac{-2Nd_{in}K_i}{K_RK_q}, \quad (8)$$

因此, 根据(8)式可得对应 FOCS 系统的环路增益值为

$$K = K_qK_R = -2NK_i \frac{d_{in}}{D_{Loop}}. \quad (9)$$

因为  $K_i$  为固定值, 不随系统变化而改变, 因此, 将采集到的  $D_{Loop}$  数值进行对应转换, 即可得到环路增益的实时变化数值。

### 3.2 实验与结果分析

FOCS 系统长期运行时, 光源的功率衰减是最可能导致环路增益产生变化的因素, 在短时间内模拟光源功率的衰减可采用改变驱动电流的方式, 但该方式在改变环路增益的同时, 也会导致光源输出的平均波长产生漂移, 而平均波长漂移会引起系统测量准确度的变化<sup>[19]</sup>, 不能分离出环路增益的影响。因此, 为验证环路增益与系统比差和角差的对应关系, 本研究将前置放大电路的反馈电阻  $R$  由固定电阻器变为滑动变阻器, 通过改变滑动变阻器的阻值调节前置放大器的放大倍数, 实现改变环路增益的目的。改变前置放大器的倍数, 对应环路增益的变化和 FOCS 系统的输出比差和角差结果如表 1 所示, 图 7 所示为对应的关系曲线。

由图 7 和表 1 的结果可知, 传感器系统的比差和角差随环路增益变化的趋势与图 4 仿真结果一致, 随着环路增益减小, 比差和角差随环路增益波动产生的误差增大, 验证了系统离散模型的正确性和环路增益在线监测方法的有效性。

## 4 环路增益控制技术

### 4.1 环路增益控制技术实现方法

3.1 和 3.2 节实现了环路增益的在线监测并验证了环路增益对传感器准确度的影响, 为使传感器系统在长期运行时, 消除环路增益变化对传感器测量准确度的影响, 提高传感器系统的稳定性和可靠性, 在环路增益在线监测的基础上实现环路增益反馈补偿环节, 对环路增益的变化进行补偿, 实现环路增益的稳定控制, 使其能够满足准确度要求。



表 1 前置放大器的放大倍数与比值误差和相位误差的关系  
Table 1 Amplification versus scale factor error and phase error

$R / k\Omega$	Amplification	Loop gain	Scale factor error / %	Phase error / (°)
11.8100	25.39150	0.174300	0.000954	-0.30811
10.2300	21.99450	0.150200	-0.017320	-1.46754
8.8700	19.07050	0.131200	-0.015710	-3.34291
7.8800	16.94200	0.115400	-0.018120	-4.60070
6.7500	14.51250	0.099210	-0.013910	-7.24607
5.8400	12.55600	0.085590	-0.014540	-9.95570
5.0600	10.87900	0.074250	-0.010760	-13.09000
4.0200	8.64300	0.059020	-0.015130	-19.65430
3.6300	7.80450	0.053370	-0.021500	-23.11220
2.4700	5.31050	0.036280	-0.023450	-35.33240
1.7080	3.67220	0.025320	-0.031410	-59.21930
1.0070	2.16505	0.014780	-0.074800	-113.21600
0.6270	1.34805	0.009220	-0.193810	-192.63300
0.1132	0.24338	0.001671	-5.736640	-1150.83000

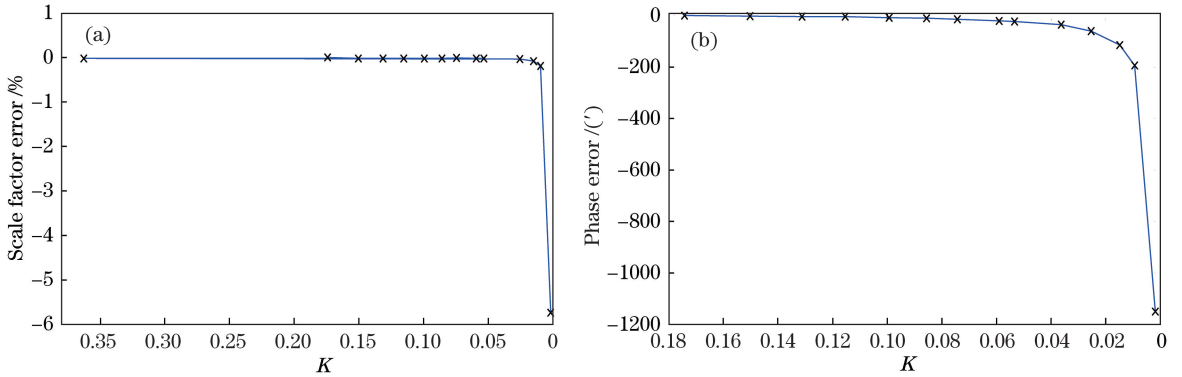


图 7 测量准确度与环路增益关系。(a)比值误差随环路增益变化曲线;(b)相位误差随环路增益变化曲线

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

环路增益稳定控制技术的具体实现方法如图 8 所示,其中: $K_1$ 是反馈补偿环节的增益系数; $K_m =$

$P_0 K_{pin} K_{amp} K_{AD} K_{jt}$ ,是前置放大环节、AD 环节等的乘积。

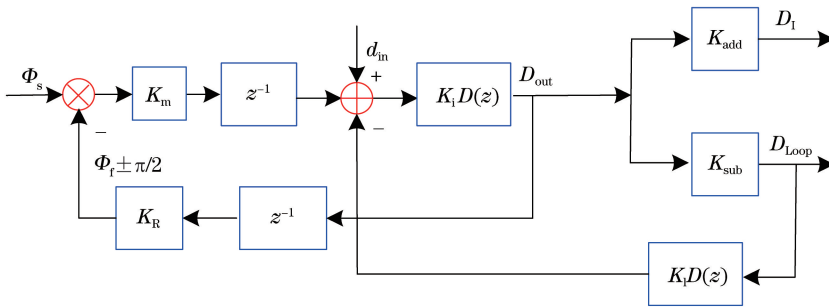


图 8 环路增益稳定控制技术

Fig. 8 Stable controlling technique for loop gain

传感器系统输出两路数字信号:其中一路信号为  $D_{out}$  信号经过累加运算处理( $K_{add}$ )后得到的数字量  $D_1$ ,与被测电流值成正比,反映被测电流的大小;另一路信号为  $D_{out}$  信号经过差分运算处理( $K_{sub}$ )后得到的数字量  $D_{Loop}$ ,与系统的环路增益成反比,反映环路增益的变化。当系统环路增益受某一参数影

响产生变化时,输出的数字量  $D_{Loop}$  将会发生改变,变化量的数学表达式为

$$\Delta D_{Loop} = D_{Loop}(N + 1) - D_{Loop}(N), \quad (10)$$

式中: $D_{Loop}(N + 1)$ 、 $D_{Loop}(N)$ 为相邻两个周期输出的数字量。将变化量  $\Delta D_{Loop}$  作为环路增益补偿回路的输入误差信号,然后采用数字积分器对该误差

信号进行处理,将积分后的数字信号取反后加入主回路中,从而实现环路增益系数的调整,形成环路增益稳定控制回路,对环路增益进行有效控制,使其始终稳定在初始运行状态,消除了环路增益变化对传感器测量准确度的影响。

#### 4.2 实验与结果分析

在传感器系统中引入环路增益稳定控制回路后,需要通过设计实验来验证环路增益稳定控制

技术的有效性,即环路增益变化不会引起比差及角差的波动。实验方法同验证环路增益与比差、角差的关系实验相对应;通过调节前置放大环节的放大倍数来达到改变环路增益的目的,在环路增益变化的同时测试传感器的比差和角差,测试结果如表 2 所示。引入增益稳定控制回路后,传感器的比差和角差与前置放大倍数的关系曲线如图 9 所示。

表 2 增益稳定控制后前置放大倍数及环路增益与比值误差和相位误差关系

Table 2 Preamplifier gain and loop gain versus scale factor error and phase error with stable controlling technique

R /kΩ	Amplification	Loop gain	Phase error /( $^{\circ}$ )	Scale factor error /%
12.030	25.86450	0.1775	0.2843	0.00600
11.060	23.77900	0.1770	0.1745	-0.01600
10.040	21.58600	0.1772	-0.2352	-0.00850
8.990	19.32850	0.1777	-0.3652	0.02800
8.050	17.30750	0.1777	-0.2635	-0.00700
7.010	15.07150	0.1773	0.7851	-0.01150
5.980	12.85700	0.1771	0.4937	-0.02800
5.050	10.85750	0.1775	0.5816	0.07565
4.020	8.64300	0.1774	0.2874	0.01225
3.040	6.53600	0.1772	-0.3256	0.01725
2.150	4.62250	0.1771	-0.1571	-0.02055
1.070	2.30050	0.1773	-0.6143	-0.03840
0.545	1.17175	0.1768	-1.5234	-0.04570
0.164	0.35260	0.1765	-1.0781	-0.04270

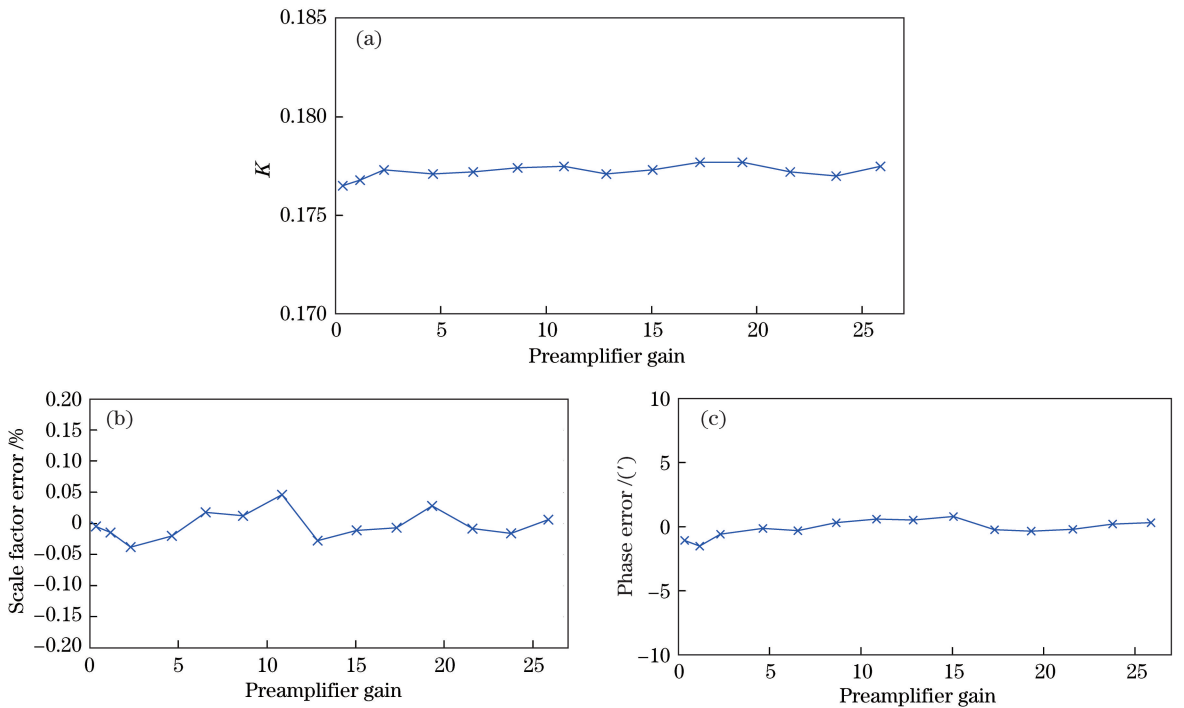


图 9 测量准确度与放大倍数关系。(a) 环路增益随前置放大倍数变化曲线; (b) 比值误差随前置放大倍数变化曲线; (c) 相位误差随前置放大倍数变化曲线  
Fig. 9 Measurement accuracy versus amplification. (a) Loop gain versus preamplifier gain; (b) scale factor error versus preamplifier gain; (c) phase error versus preamplifier gain

由表 2 及图 9 的测试结果可知:引入环路增益反馈控制回路后,调整前置放大器的放大倍数,可使环路增益得到有效控制,环路增益不随前置放大器放大倍数的改变而变化;传感器系统输出的比差和角差随环路增益变化引起的波动也得到了有效抑制。前置放大器的放大倍数由 25 减小至 0.3 时,比差的变化范围不超过 0.1%,角差的波动范围不超过 3',满足传感器测量准确度的指标要求,验证了环路增益在线监测及稳定控制技术的有效性,提高了传感器长期运行时的稳定性和可靠性。

## 5 结 论

光纤电流传感器常工作于户外复杂恶劣的环境中,其长期运行时精度会劣化。针对这一问题,从传感器的闭环检测数学模型出发,对系统的主要特征参数进行了分析,提出了一种在线监测方法,采用该方法将环路增益值解调输出,并在此基础上实现了环路增益稳定控制。这一方法使系统环路增益在长期运行时能够实现自动调整,不会因光源功率衰减等其他因素的影响而产生波动,从而消除环路增益波动引起的比差和角差。实验结果表明:传感器系统引入环路增益稳定控制回路后,前置放大器的放大倍数由 25 减小到 0.3,在线监测得到的环路增益输出稳定,比差和角差的变化范围也满足传感器的测量准确度要求,验证了环路增益在线监测和稳定控制技术的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Blake J N, Rose A H. Fiber-optic current transducer optimized for power metering applications[C] // 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, TX, USA. New York: IEEE, 2003: 405-408.
- [2] Blake J, Rose A H. Interfacing optical CTs and VTs to relays and meters [C] // 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 21-24, 2006, Dallas, TX, USA. New York: IEEE, 2006: 9087150.
- [3] Ortiz V H, Flores J L, García-Torales G. A review on optical current transducers for power system metering [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6770: 677018.
- [4] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, *et al.* Nonlinearities in the high-current response of interferometric fiber-optic current sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7004: 70040E.

- [5] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Instrument transformers: part 8: electronic current transformers: GB/T 20840.8-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 互感器第 8 部分: 电子式电流互感器: GB/T 20840.8-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [6] Wang X X, Zhang Y N, Yu J, *et al.* Influence of sensing coil errors on portable fiber-optic current transformer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010601.  
王夏霄, 张宇宁, 于佳, 等. 传感头误差对便携式光纤电流互感器的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010601.
- [7] Wang X X, Zhao Z J, Li C S, *et al.* Analysis and elimination of bias error in a fiber-optic current sensor [J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 8887-8895.
- [8] Blake J N. Optical interferometric sensor with measure and compensation that may selectively be used for temperature compensation and long term life degradation: US007038786 [P/OL]. 2006-5-2 [2019-04-10]. <https://patents.google.com/patent/US7038786B2/en>.
- [9] Bohnert K, Hsu C P, Yang L, *et al.* Fiber-optic current sensor tolerant to imperfections of polarization-maintaining fiber connectors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2161-2165.
- [10] Zhang C Y, Zhang C X, Wang X X, *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 X X, Wang Y, Wang X C, *et al.* Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 9-14.  
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): 9-14.
- [12] Yu J, Zhang C X, Wang X X, *et al.* Influence of loop gain on measurement accuracy of fiber optical current transformer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910002.  
于佳, 张春熹, 王夏霄, 等. 环路增益对光纤电流互感器测量准确度的影响[J]. 中国激光, 2016, 43



- (9): 0910002.
- [13] Li C S, Zhang C Y, Sun H J, *et al.* Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. Chinese Journal of 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.
- [14] Gao J Z. Detection of weak signals [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.
- [15] Zhang C Y. Dynamic characteristics analysis of digital closed-loop fiber optic current sensor [D]. Beijing: Beihang university, 2008: 43-53.  
张朝阳. 数字闭环光纤电流互感器动态性能研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008: 43-53
- [16] Wang X C. Study of Small signal errors in optic fiber current sensor [M]. Beijing: Beihang University, 2013: 21-30.  
王熙辰. 光纤电流互感器小信号误差分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学, 2013: 21-30.
- [17] Wang X X, Zhang M, Li C S, *et al.* Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of 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] Pavlath G A. Closed-loop fiber optic gyros [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2837: 46-60.
- [19] Zhang C Y, Zhang C X, Wang X X, *et al.* Influence of SLDs power attenuation on scale factor of closed-loop fiber optic current transformer [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 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, 2008, 37(12): 2458-2461.