

## 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究

张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 罗光明, 冯秀娟

(北京航空航天大学仪器科学与光学工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了一种电力输变电网络适用的光纤电流互感器, 给出了一种基于 DSP+FPGA 的数字闭环信号检测方法, 分析了互感器光路系统主要误差源及其相应抑制措施。依据电子式电流互感器标准 IEC 60044-8, 设计了互感器样机的各种准确度实验。实验结果表明: 在-40~60℃范围内, 样机对直流和交流电流的测量变比误差均小于±0.2%; 室温条件下, 直流电流测量变比误差小于0.1%, 系统相位延迟约129.6'; 工频电流15次以内谐波测量准确度优于0.2%, 51次以内优于0.5%。研制的光纤电流互感器样机计量精度已经达到实用化要求。

**关键词:** 光纤电流互感器; 数字闭环; 变比误差; 谐波

**中图分类号:** TM452.94

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2008)05-0417-03

### Error Analysis and Experimental Research of Closed-loop Fiber Optic Current Sensor

ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, LUO Guang-ming, FENG Xiu-juan

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A fiber optic current sensor suitable for electric power system is introduced. In order to improve the measurement accuracy of FOCT, a closed-loop signal detection method based on DSP+FPGA is presented. Some main error sources and corresponding suppression methods are analyzed. According to IEC 60044-8, various accuracy tests of FOCT are designed. The experimental results indicate that the ratio errors of FOCT prototype for the input AC and DC current are all less than ±0.2% within -40~+60℃. At room temperature, AC current metering accuracy of prototype exceeds 0.1%, and phase delay is less than 129.6'. Measurement accuracy of FOCT for harmonic current within 51 orders is less than 0.5%. The designed FOCT prototype reaches 0.2 class in IEC60044-8 in metering accuracy.

**Key words:** fiber optic current sensor(FOCT); digital closed-loop; ratio error; harmonic wave

## 0 引言

随着高压、超高压电力输变电网络的建设,以及轻型直流输电技术的发展,基于电磁感应原理的传统电流互感器已经逐渐不能满足行业应用要求<sup>[1]</sup>。近20年来,光学电流互感器的研究不断取得进展,与传统互感器相比,它具有绝缘性能好、无磁滞饱和、结构简单、重量轻、带宽大以及便于输变电系统数字化等诸多优点,被认为是必将取代传统电流互感器的新一代互感器<sup>[2-5]</sup>。目前,在欧洲和北美已经逐步有相关产品面世。

笔者研究了一种全光纤结构光学电流互感器。根据安培定律和磁光法拉第效应原理,通电导线周围存在闭合磁场,这种磁场可以使得围绕在导线周围光纤中传输的偏振光的偏振面发生旋转。由于电流与偏振光的偏转角成线性比例关系,因此可以通

过检测偏转角度以测量电流。文中首先给出了光纤电流互感器基本原理和源于光纤陀螺技术的闭环信号检测方法,接着分析了主要光路误差源及其相应补偿方法,然后依据行业标准 IEC 60044-8,对研制的互感器样机测量准确度等级进行了实验验证。

## 1 系统构成及基本原理

在目前技术条件下,直接测量偏振光偏转角度非常困难<sup>[6]</sup>。光纤电流互感器通过光路结构的巧妙设计,首先把角度信息转换成干涉光强的幅度信息,再进行测量。基本原理见图1:光源发出的光经起偏器起偏成完全线偏振光后,随即分成模式正交的两束,沿着保偏光纤的两个模式传输至传感头。在1/4波片处,两束线偏光分别被转换为左旋和右旋圆偏光,进入传感光纤。由于导线内电流产生磁场的 Faraday 磁光效应作用,两束圆偏光在传感光纤中的传输速度不同,从而产生 Faraday 相位差。当两束圆

收稿日期:2007-11-22; 修回日期:2008-04-21

作者简介:张朝阳(1981-),男,江苏省泗阳县人,博士研究生,主要从事光电传感器研究。

偏光传输到传感光纤末端时,发生镜面反射,两束光在模式互换(左旋变右旋,右旋变左旋)后沿原光路返回, Faraday 效应相位差加倍, 并且在 1/4 波片处再次转变为两束模式正交的线偏光 (模式也互换了)。最终,携带 Faraday 效应相位信息的两束光在起偏器处发生干涉,然后由 3 dB 耦合器耦合进光电探测器,进行后续信号处理。

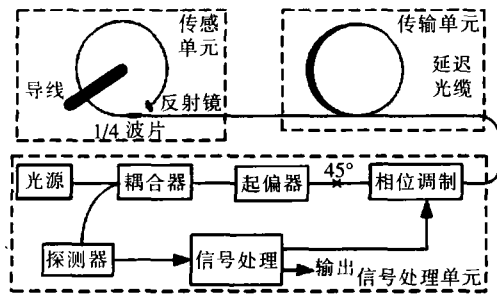


图1 闭环光纤电流互感器原理图

可以看出,发生干涉前两束偏振光始终在同一根保偏光纤的两个正交模式上传输,并且都经过了相同的传输路径和模式变化(只是在顺序上刚好相反),所以互感器的光路系统具有很强的抗干扰能力,干涉结果只携带了 Faraday 磁光效应产生的相位信息。最终,经过探测器实现光电转换后的信号表达式为

$$S_d = 0.5K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot (1 + \cos \phi_F) \tag{1}$$

式(1)中  $K_p$  是探测器的光电转换系数;  $L$  为光路损耗;  $P_0$  是光源输出光强;  $\phi_F = 4NVI$  是磁光 Faraday 效应相位差(其中,  $N$  是传感光纤匝数,  $V$  是传感光纤 Verdet 常数,  $I$  是导线中传输电流值)。

分析互感器系统光路器件基本参数可知<sup>[5]</sup>,探测器输出电压是微伏级的微弱信息,而噪声一般是毫伏量级,因此必须应用微弱信号检测方法提取信号。同时从式(1)可知,探测器输出信息  $S_d$  是相位差  $\phi_F$  的余弦函数。由于余弦函数波形在零相位时斜率为零,对微小相位差反应不灵敏,所以根据(1)式直接提取相位信息  $\phi_F$  比较困难,同时不能分辨  $\phi_F$  的符号。

借鉴数字闭环光纤陀螺信号检测技术<sup>[7]</sup>,在集成光学相位调制器处人为引入两个非互易相位差一方波偏置调制相移和阶梯波反馈调制相移,则探测器输出信息表达式变为

$$S_d = 0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot [1 + \cos(\phi_F + \phi_S + \phi_R)] \tag{2}$$

式(2)中,  $K_p$ 、 $L$ 、 $P_0$ 、 $\phi_F$  等含义与式(1)相同,  $\phi_S = \pm\pi/2$  是方波偏置相移;  $\phi_R$  是与法拉第相位差大小相等、方向相反的阶梯波反馈相移。

分析式(2),当系统为理想闭环时,有

$$\begin{aligned} S_d &= 0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot [1 + \cos(\phi_F + \phi_S + \phi_R)] = \\ &0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot [1 + \cos(\phi_F \pm \pi/2 + \phi_R)] = \\ &0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot [1 \mp \sin(\phi_F + \phi_R)] \approx \end{aligned}$$

$$0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \mp 0.5 \cdot K_p \cdot L \cdot P_0 \cdot (\phi_F + \phi_R) \tag{3}$$

可以看出,闭环互感器系统探测器输出  $S_d$  中包含一个直流分量和一个方波交流分量。 $S_d$  经过高通滤波放大后送入 A/D 转换器转换为数字信息,然后送入基于 DSP+FPGA 的数字信号处理单元,经过一定的算法得到数字反馈量,该反馈量经过 D/A 转换器及其驱动电路后驱动相位调制器,产生反馈调制相移  $\phi_R$ 。此外,反馈量同时作为互感器数字输出,反映待测电流值大小。

## 2 光路误差分析

光纤电流互感器光路误差主要包括:起偏器消光比和对轴角度误差、1/4 波片位相差误差、传感光纤 Verdet 常数和线性双折射误差、集成光学相位调制器误差以及光源噪声等。其中,1/4 波片位相差误差传感光纤 Verdet 常数和线性双折射误差是互感器系统最主要误差源。

### 2.1 传感光纤线形双折射误差

传感光纤的线性双折射会造成输入偏振光偏振面的旋转,产生一个与法拉第效应偏角无法区分的误差信号,对光纤电流互感器测试性能造成严重影响,这也是其一直难以实用化的最主要原因之一。光纤中的双折射由光纤本身固有和外界因素引起。前者主要由制造时光纤纤芯非圆引入,后者则是压力、形状和环境温度等因素引起<sup>[6]</sup>。

为了降低线性双折射的影响,可减小传感光纤中的固有线性双折射,或引入大量圆双折射。减小固有双折射的方法是降低光纤的非圆率和内应力。目前国内外制作的低双折射光纤指标可达 2~3 %/m。在传感光纤中引入圆双折射的方法之一是将光纤预制棒在拉丝过程中沿光纤轴旋转,不足之处是其双折射特性对外界温度极敏感,且长期应用中还有退化现象;二是沿轴向扭转已制好的传感光纤,尤其是在石英骨架上螺旋缠绕光纤,通过改变形状引入圆双折射,且不易随温度变化或时间推移而改变。

### 2.2 传感光纤 Verdet 常数误差

传感光纤 Verdet 常数是衡量其磁致旋光效应的主要参数,它与互感器变比成正比<sup>[8]</sup>,是光波波长和环境温度的函数。通过稳定光源功率可以比较精确地控制中心波长,根据文[5]的研究,磁光晶体 Verdet 常数同温度成正比,对于普通二氧化硅光纤来说,其 Verdet 常数与温度的关系可近似为

$$\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} = 0.7 \times 10^{-4} \tag{4}$$

式(4)中,  $V$  是传感光纤 Verdet 常数,1 310 nm 波长下其值大约为  $1.10 \times 10^{-6}$  rad/A;  $T$  是环境温度。

从式(4)可以看出,当互感器工作环境温度在 -40~60 °C 范围内变化时,由于传感光纤 Verdet

常数的变化造成互感器变比漂移可达0.7%左右,必须采取补偿措施消除其影响。

### 2.3 1/4波片位相差误差

1/4波片是在光纤电流互感器光路系统中对光的偏振态起主要影响的器件,由环境温度变化引起的波片位相差误差对互感器测量精度影响不可忽视。根据数学推导,如令 $h=1-\sin\delta\sin 2\theta$ (其中 $\delta$ 是1/4波片位相差,理想值为 $90^\circ$ ; $\theta$ 是对轴角度,理想值为 $45^\circ$ ),则闭环光纤电流互感器变比 $K$ 与 $(1+h)$ 成正比<sup>[3,5]</sup>。文[3]给出了一种补偿方法:通过确定1/4波片初始位相差(不一定是 $90^\circ$ ),使得波片温度误差与传感光纤 Verdet 常数温度误差对互感器变比的影响相反,从而实现其相互补偿。理论分析结果表明<sup>[5]</sup>:当只有波片受温度影响时,互感器全温变比误差约为0.6276%;当只有 Verdet 常数受温度影响时,互感器全温变比误差约为0.63%;两者相互补偿后,互感器变比相对误差约为0.1175%,补偿效果显著。

## 3 实验测试

根据上节所述方法基本抑制了主要光路误差后,参考电子式电流互感器标准 IEC 60044-8,对所研制的互感器样机进行各种测量准确度实验。

### 3.1 准确度实验

#### 3.1.1 比差

室温条件下,对闭环光纤电流互感器样机作稳态测量误差实验。一个月内每3天测试一组。每次测试时,分别对互感器输入150、300、450、600、750、900 A 等不同值的直流电流,测得互感器样机相应输出,然后对应输入输出以最小二乘法拟合求得互感器变比。测试结果见图2。可见,常温条件下互感器测量准确度达到0.1%。

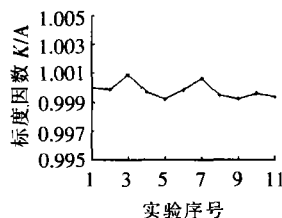


图2 互感器室温变比误差

#### 3.1.2 角差

对互感器样机输入有效值分别为600、1200、2400、4800 A 的工频交流电流,测试互感器模拟输出信号相对于输入信号的时间延迟,然后以 $1\ \mu\text{s}$ 时间延迟对应 $1.08'$ 计算互感器角差。测量方法是:互感器输入电流经电流/电压转换器,形成较小电压信号后作为示波器通道1的输入(电流/电压转换环节的时间延迟可以忽略),互感器模拟输出电压信号作为示波器通道2的输入。当输入电流变化时,分别在示波器上读出通道2相对于通道1的时间延迟,即是互感器系统对工频输入电流的时间延迟。测试结果分别是122、120、120、120  $\mu\text{s}$ 。因此,可以认为互感器系统对工频响应的的时间延迟大约是120  $\mu\text{s}$ ,约

合相位差 $129.6'$ 。图3是输入电流为2400 A 时示波器显示。需要指出的是,由于互感器系统的时间延迟大小基本固定不变,因此系统的相位差是可以在其信号处理单元中修正补偿的,补偿后的相位误差形成互感器测量角差。

### 3.2 温升实验

把互感器传感头部分放置在温箱里,调节温箱中温度在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内变化,且在 $-40$ 、 $-20$ 、 $0$ 、 $20$ 、 $40$ 、 $60^\circ\text{C}$ 等几个测试温度点上分别保温50 min。每次均在保温结束前10 min,分别对互感器样机输入160、320、480、640、800、960 A 等不同电流值的直流电流,测得相应输出。对应输入输出分别以最小二乘法拟合求得样机在该温度点处的变比。实验结果见图4。可以看出,温升实验过程中互感器测量精度始终满足 IEC 60044-8 的0.2级计量标准。

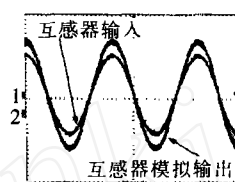


图3 角差测量中示波器典型显示

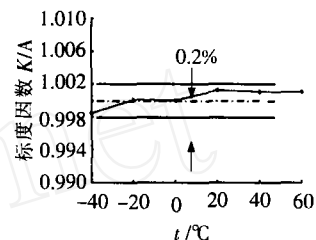


图4  $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 互感器变比误差

### 3.3 谐波测量

在约820 A 的50 Hz 基波工频电流上叠加10%幅度谐波分量,作为互感器输入,测试样机对不同等级谐波响应准确度。互感器数字输出频率为5000/s,每一谐波等级进行5 s 采样,应用自相关法计算相应数字输出有效值

$$Output = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2 - \sum_{i=1}^n (A_i - A_0)^2 \right] / n} \quad (5)$$

式(5)中 $n=25000$ 是互感器5 s 内数字输出采样值个数, $A_i (i=1\cdots 25000)$ 是零电流输入时互感器数字输出采样值, $A_0$ 是 $A_i (i=1\cdots 25000)$ 平均值; $Y_i (i=1\cdots 25000)$ 是非零电流输入时互感器数字输出采样值, $Y_0$ 是 $Y_i (i=1\cdots 25000)$ 平均值。

测得互感器输出有效值后,对应输入输出,以式(6)计算互感器对叠加谐波分量输入电流的测试百分电流误差

$$\eta = \frac{Output/K - Input}{Input} \quad (6)$$

式(6)中,Input 是包含谐波分量的输入电流有效值;Output 是互感器数字输出有效值;K 是变比。

测试结果见表1,图5是实验中互感器数字输出的几个典型波形。可以看出,互感器对15次以内谐波测量变比误差小于0.2%,对51次以内谐波测量变比误差小于0.5%。(下转第423页)

大于4%,平均误差为3.11,这表明LS-SVM绝缘子ESDD预测模型精度显著提高,同时,LS-SVM预测模型学习训练时间大大缩短,仅为ANN模型的千分之一。几种预测方法的结果比较见图3。

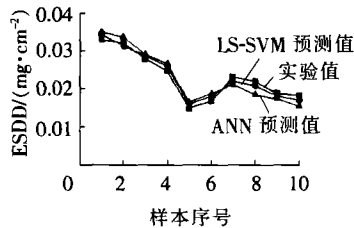


图3 几种预测方法结果比较

### 3 结语

由于气象因子与绝缘子ESDD存在非线性关系,人工智能技术预测绝缘子ESDD的方法,无须知道各个自然因素与最终盐值密度之间的数学关系公式,为高压系统管理提供了一个新的手段。最小二乘支持向量机由于将求解二次规划问题转化为求解线性方程,是最完善的预测和识别人工智能技术。它不仅适合小样本状态下的机器学习问题,而且性能优于标准SVM和ANN。在建模时间上一般比SVM方法缩短1~2个数量级,比BP方法可缩短2~3个数量级,而预测精度要比SVM标准模型高0.5~0.6

倍,比BP模型高1~2倍。

利用气象数据获得的绝缘子等值密度可以满足工程需要,它将污物生成条件与抗污闪能力直接联系起来<sup>[6]</sup>,通过模型能够判断出影响等值密度的最主要气象因素,据此挑选合适类型的绝缘子,以提高整个线路的抗污闪能力。同时,检测方法更简便、直观,实现了绝缘子污秽物的在线评估,符合状态检修的发展要求。

### 参考文献:

- [1] 周龙,文远芳,詹琼华. 递归神经网络及其在MOA状态预测中的应用[J]. 高压电器, 1998, 34(1): 22-24.
- [2] 张寒,文习山,丁辉. 用神经网络预测基于气象因素的绝缘子等值附盐密度[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 31-35.
- [3] 曹一波,谢小鹏. 基于最小二乘支持向量机的磨损预测[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 138-141.
- [4] 吴德会. 基于最小二乘支持向量机的表面粗糙度预测模型铣削加工[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 838-840.
- [5] KU C C, LEE K Y S. Identification and Control Using Diagonal Recurrent Neural Networks [C]// Proc American Control Conf. Chicago, USA, 1992: 545-549.
- [6] ZHU Han-xin, RAGHUVVEER M R. Influence of Representation Model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(4): 599-603.

(上接第419页)

表1 不同等级谐波测量准确度

等级/10%	输入/A	输出/A	误差/%
基波/50 Hz	822.92	823.17	0.030
3次	823.67	823.91	0.029
5次	818.46	817.45	-0.123
7次	824.52	824.68	0.019
9次	826.22	825.27	-0.115
11次	821.69	820.60	-0.133
13次	820.26	820.30	0.005
15次	819.28	819.76	0.059
25次	819.05	821.89	0.347
35次	818.89	822.19	0.403
41次	818.84	822.35	0.429
51次	818.83	822.55	0.454

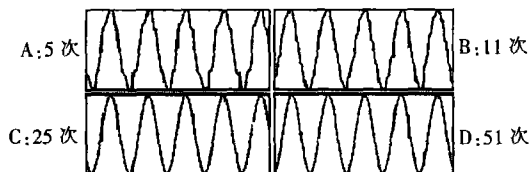


图5 谐波测量实验中互感器数字输出典型波形

### 4 结语

笔者介绍了闭环光纤电流互感器基本原理和结构组成,分析了光路主要误差源及相应的抑制措施。依据电子式电流互感器行业标准 IEC 60044-8,设计了实验室样机测量准确度实验。实验结果表明:室

温条件下,样机测量变比准确度达到0.1%,对工频电流响应相位差大约129.6';在-40~60℃范围内样机测量变比误差优于0.2%;互感器样机对51次以内谐波测量变比准确度优于0.5%。研制的光纤电流互感器样机测量准确度基本能够满足实用化要求。

### 参考文献:

- [1] 王政平,康崇,张雪原,等. 光学电流互感器的问题与解决对策[J]. 传感器技术, 2005, 24(5): 5-7.
- [2] BOHNERT K, GABUS P, BRÄNDLE H. Fiber Optic DC Current Sensor for the Electro-winning Industry [C]// Conference on Optical Fiber Sensors, 2005: 210-213.
- [3] 王夏霄,张春焘,张朝阳,等. 光纤电流互感器λ/4波片温度特性及其影响研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 596-599.
- [4] BLAKE J, TANTASWADI P, CARVALHO R T DE. In-line Sagnac Interferometer Current Sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
- [5] 王夏霄. Sagnac型光纤干涉仪法拉第效应研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006.
- [6] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [7] 张喏. 光纤陀螺闭环检测与控制[D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
- [8] 王政平,李庆波,齐异,等. Verdet常数色散对光学电流传感器灵敏度影响的理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 188-191.