

## 超大电流量值传递用光纤电流传感技术

李传生,邵海明,赵 伟,王家福,张煌辉

(中国计量科学研究院,北京 100029)

**摘 要:** 面向工业、国防及重大科学研究领域超大电流在线计量的迫切需求,提出基于光纤电流传感器量程自扩展特性实现超大电流量值传递。基于微分琼斯矩阵方法,建立了光纤敏感环路的数学模型,揭示了线性双折射对传感器量程自扩展特性的影响机理,并证明了采用椭圆双折射光纤的电流传感器具有良好的量程自扩展能力,可通过光纤圈数对 Faraday 效应的比例放大作用,利用小电流实现传感器在超大电流下的等效校准。研制了干涉式数字闭环柔性光纤电流传感器,可在不断开载流母线的情况下直接形成敏感环路,实现在线计量。样机性能测试结果表明:在直流等效 10~210 kA 范围内,样机的测量准确度优于 $\pm 0.1\%$ ;在工频额定等效 25 kA 条件下,样机的比差准确度满足 IEC60044-8 0.2 S 级要求;样机的带宽大于 10 kHz。

**关键词:** 光纤电流传感器; Faraday 效应; 椭圆双折射光纤; 超大电流量

**中图分类号:** TM452+.94 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0722001

## Fiber-optic current sensing technique utilized for ultra-high current value transfer

Li Chuansheng, Shao Haiming, Zhao Wei, Wang Jiafu, Zhang Huanghui

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to meet the urgent needs of online metrology of the ultra-high current in the field of industry, national defense and key scientific research, a value transfer method of the ultra-high current standard based on the range self-expansion characteristic of the fiber-optic current sensor (FOCS) was presented. The mathematical model of the sensing coil was established by utilizing the differential Jones matrix methods. The effect mechanism of the linear birefringence on the range self-expansion characteristic of the sensor was analyzed, and the excellent range self-expansion capability of the FOCS with a spun high-birefringence sensing fiber coil was proved. By means of the magnification effect of the number of fiber loops to the Faraday effect, the sensor can be calibrated with the relatively low equivalent ampere-turn current. The flexible interferometer-type FOCS utilizing the digital closed-loop signal-detecting scheme was developed. The spun high birefringence optical fiber was packaged into a sensing element, which can be bent into a sensing coil without opening the current-carrying bus bar. It is shown by the experimental results that the sensor achieves the accuracy within  $\pm 0.1\%$  for the DC

收稿日期:2016-11-10; 修订日期:2016-12-20

基金项目:国家重点研发计划—重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0102400)

作者简介:李传生(1984-),男,在站博士后,主要从事光纤电流传感技术、宽带大电流量值技术方面的研究。Email: lichsh@nim.ac.cn

导师简介:邵海明(1965-),男,研究员,博士,主要从事高压、大电流及医学计量标准方面的研究。Email: shaohm@nim.ac.cn

equivalent current between 10 kA and 210 kA. For a power-frequency equivalent current of 25 kA, the scale factor error of the sensor can meet the need of 0.2S accuracy class specified in IEC 60044-8. The bandwidth of the sensor is more than 10 kHz.

**Key words:** fiber-optic current sensor; Faraday effect; spun high birefringence optical fiber; ultra-high current metrology

## 0 引言

超大电流计量技术在冶金、发电、脉冲功率、可控核聚变研究等领域具有广泛应用<sup>[1-4]</sup>,准确的电流计量与安全生产、节能减排以及重大科学研究密切相关。在这些应用领域,被测电流通常高达几十到几百 kA,甚至 MA 量级。准确的计量需要溯源国家标准,2013 年,笔者基于电流比较仪技术建立了直流大电流国家计量标准<sup>[5]</sup>,从 10 A:1 A 到 5 kA:5 A 测量不确定度均优于  $1.6 \times 10^{-7}$ ,  $k=2$ 。借助等安匝法,大电流传感器可以在计量实验室精确校准。但是,由于工业现场恶劣的环境以及大电流设备客观存在的特殊性,如体积、重量庞大,拆装、运输不便以及现场不间断运行,计量实验室建立的标准量值无法传递到工业现场,现场的大电流测量仪表也很难到实验室校准。因此,迫切需要一种准确、便携的量值传递标准解决超大电流的在线计量难题。

基于 Faraday 效应的干涉型光纤电流传感器(FOCS)具有测量精度高、动态范围大、母线偏心及杂散磁场干扰敏感度低、安装方便、便携性好等特点,在超大电流在线计量方面具有明显优势。借助多圈传感光纤对 Faraday 相移的放大作用,等效测试电流将随光纤圈数等比例增加,这允许采用多圈敏感环及相对较小的等安匝电流来校准传感器,然后将此标准量值传递到工业现场,用较少圈数的敏感环实现超大电流测量。另外,通过优化闭环检测算法,光纤电流传感器的检测带宽可达到音频范围,这也为工频(如大型发电机输出电流)和长脉冲(如 Tokamak 装置中的等离子体电流<sup>[4]</sup>)超大电流的校准提供了解决方案。

多圈敏感环随光纤圈数累积的线性双折射是制约光纤电流传感器校准能力的主要问题之一。线性双折射会影响传感光纤中圆偏振光的偏振态,导致传感器的输出与光纤圈数及被测电流之间出现非线性。

对于目前的商用产品,如 ABB 公司研制的光纤电流传感器<sup>[1]</sup>,采用低双折射光纤(Lo-Bi Fiber)作为传感光纤,敏感环的光纤圈数仅为 1 圈,直径达到 m 量级,线性双折射对传感器的影响几乎可以忽略。但对于多圈敏感环,如果线性双折射不能被有效抑制,传感器将很难获得高测量精度。在文中的研究中,电流传感光纤为椭圆双折射光纤(Spun Hi-Bi Fiber)。该光纤的双折射主轴具有特殊的螺旋结构,可有效地抑制线性双折射造成的传感器输出非线性。

文中首先介绍了光纤电流传感器的基本工作原理,然后着重分析了线性双折射对传感器校准能力的影响以及椭圆双折射光纤对这种不利影响的抑制机理,最后对研制的传感器样机的直流、工频大电流测量准确度及频率响应特性进行了测试。

## 1 基本原理

如图 1 所示,超辐射发光二极管(SLD)发出的光经环行器,由起偏器变为线偏振光,经 45° 光纤熔点被均分到保偏光纤的快、慢轴上。两束正交的线偏振光沿保偏延迟光纤传输,并由 1/4 波片变为左旋、右旋圆偏振光,在被测电流的作用下,两束正交的圆偏振光之间产生相位差,经传感光纤末端反射镜反射后沿原路返回,相位差加倍。两束正交圆偏振光经 1/4 波片再次变为线偏振光,但偏振方向发生了互换(原

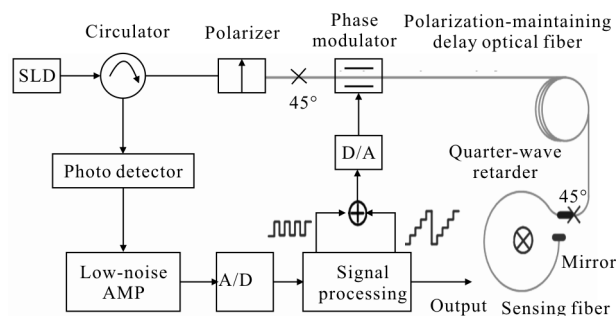


图 1 光纤电流传感器结构示意图

Fig.1 FOCS configuration

来沿保偏延迟光纤快轴传输的光此时沿慢轴传输,原来沿保偏延迟光纤慢轴传输的光此时沿快轴传输),两束线偏振光最终经偏振器检偏并发生干涉。传感器的光路结构完全互易,两束信号光之间的相位差仅由被测电流产生的 Faraday 相移产生,表达式为:

$$\Phi_s = 4F = 4VNI \quad (1)$$

式中: $F$  为 Faraday 相移; $V$  为传感光纤的 Verdet 常数 ( $V \approx 1.02 \mu\text{rad}/\text{A} @ 1.31 \mu\text{m}$ ); $N$  为光纤圈数; $I$  为被测电流。

与光纤陀螺类似,采用数字闭环信号检测技术实现被测电流的解调<sup>[6-7]</sup>。为了保证高灵敏度并区分电流方向,在两束信号光之间引入  $\pm\pi/2$  的方波调制相位,采用数字锁相放大技术实现 Faraday 相移的解调,同时,利用阶梯波调制技术引入反馈相移实时补偿被测电流产生的 Faraday 相移,实现系统闭环,保证传感器在大动态范围内具有高线性度。

根据公式(1),传感器的输出与被测电流和传感光纤圈数的乘积成正比,单圈敏感环、超大电流与多圈敏感环、较小电流对应的 Faraday 相移具有等效性。随着传感光纤圈数的增加,等效测试电流将等比例的增加,这一特性称为光纤电流传感器的量程自扩展特性。基于这一特性,利用多圈敏感环和等安匝法可以实现传感器在超大电流下的等效校准,而在现场的计量应用中,仅用较少圈数的光纤敏感被测电流。例如,对于 210 kA 的被测电流,传感器可以在 35 kA 等安匝电流和 6 圈传感光纤下校准,而仅用 1 圈光纤用于测量。量程自扩展特性是光纤电流传感器的独特优势,极大地降低了传感器校准对超大电流源和标准器的需求,可有效解决其它大电流传感器“低值校准、高值认定”的局限。

## 2 理论研究

如前所述,实用光纤电流传感器的传感光纤通常包括两种:低双折射光纤和椭圆双折射光纤。它们均通过旋转拉丝工艺制造而成,主要区别在于预制棒的不同。低双折射光纤采用普通单模预制棒,具有极低的本征线性双折射;而椭圆双折射光纤采用保偏预制棒,在旋转拉丝过程中,光纤的双折射主轴沿其轴向连续旋转,呈现螺旋结构,螺距的大小由旋转

周期和拉丝速度决定<sup>[8]</sup>。该节将建立光纤电流传感器敏感环路的微分传输模型,并用数值方法计算两束信号光在低双折射、椭圆双折射两种光纤敏感环中累积的相位差,从而揭示线性双折射对传感器量程自扩展特性的影响机理及椭圆双折射光纤对其的抑制作用。

### 2.1 敏感环路微分传输模型

光纤电流传感器的敏感环可视为一种椭圆双折射传输介质,同时分布着本征线性双折射、弯曲线性双折射及 Faraday 效应引入的圆双折射组成。微分琼斯矩阵方法是研究此类介质中光波偏振态演变过程的有效手段<sup>[9]</sup>。在线偏振基矢量( $x, y, z$ )下, $z$  为传输方向,光波的电场矢量  $E_x, E_y$  满足:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} = N(z) \cdot \begin{bmatrix} E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $N(z)$  为光纤敏感环的微分琼斯矩阵。

对于一个弯曲半径为  $R$  的椭圆双折射光纤敏感环,在光波正向、反向传输过程中,矩阵  $N(z)$  可分别表示为:

$$N_F(z) = \begin{bmatrix} -j\frac{\Delta\beta}{2}\cos 2\tau - j\frac{\delta}{2} & -f - j\frac{\Delta\beta}{2}\sin 2\tau \\ f - j\frac{\Delta\beta}{2}\sin 2\tau & j\frac{\Delta\beta}{2}\cos 2\tau + j\frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$N_B(z) = \begin{bmatrix} j\frac{\Delta\beta}{2}\cos 2\tau + j\frac{\delta}{2} & f + j\frac{\Delta\beta}{2}\sin 2\tau \\ -f + j\frac{\Delta\beta}{2}\sin 2\tau & -j\frac{\Delta\beta}{2}\cos 2\tau - j\frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $f = VI/2\pi R$  为 Faraday 效应引入的圆双折射; $\tau$  为单位长度光纤双折射主轴的旋转角度; $\Delta\beta$  为保偏光纤的本征线性双折射; $\delta$  为弯曲线性双折射,可表示为<sup>[1]</sup>:

$$\delta \approx 0.772 \cdot \frac{r^2}{\lambda R^2} \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为工作波长, $r$  为光纤包层半径。

对于低双折射光纤敏感环,假设光纤的本征线性双折射足够小,仅考虑弯曲线性双折射。此时,矩阵  $N(z)$  可简化为:

$$N_F(z) = \begin{bmatrix} -j\frac{\delta}{2} & -f \\ f & j\frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$N_B(z) = \begin{bmatrix} j\frac{\delta}{2} & f \\ -f & -j\frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.2 相位差计算方法

基于传感器敏感环路的微分传输模型,以左旋、右旋圆偏振光作为输入,求解微分方程(2),得到输出光波的复振幅,即可计算出两束正交圆偏振光在敏感环路中累积的相位差。

对于椭圆双折射光纤敏感环,微分方程(2)无法解析求解,采用 Runge-Kutta 法进行数值计算。分别以左旋、右旋圆偏振基矢量:

$$e_l = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$e_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} \quad (9)$$

为初始条件求解公式(2)和(3),再以微分方程在敏感环末端( $z=2\pi RN$ )的解作为初始条件,分别求解公式(2)和(4),方程在敏感环路输入端( $z=0$ )的解  $E_1$ 、 $E_2$  即为从敏感环返回的光波的复振幅。由于敏感环中存在线性双折射,返回光波变为椭圆偏振光,可将其分解为左旋、右旋圆偏振分量,分别表示为:

$$E_1 = A_{1l}e_l + A_{1r}e_r \quad (10)$$

$$E_2 = A_{2l}e_l + A_{2r}e_r \quad (11)$$

式中:  $A_{1l}$ 、 $A_{2l}$ 和  $A_{1r}$ 、 $A_{2r}$  分别为左旋、右旋圆偏振分量的复振幅。从敏感环返回的椭圆偏振光除形成主波外,还将在传感光路中引入两个正交的寄生波列。携带被测电流信息的主波以互换的偏振模式沿保偏延迟光纤返回,相干性得以重建;而寄生波列以相同的偏振模式返回,由于光程差远大于光源的相干长度而失去了相干性,在最终的干涉光强中形成一个直流分量,被数字闭环检测系统消除。根据主波的复振幅,可计算出两束信号光在敏感环中累积的相位差:

$$\Phi_s = \arg(A_{1l}) - \arg(A_{2l}) \quad (12)$$

式中:  $\arg(*)$ 表示求幅角运算。

对于低双折射光纤敏感环,微分方程(2)可解析求解,根据公式(12)可计算出两束信号光在敏感环中累积的相位差为:

$$\Phi_s = 2\arctan\left(\frac{2F}{\sqrt{4F^2 + \Delta^2}} \tan\sqrt{4F^2 + \Delta^2}\right) \quad (13)$$

式中:  $F=2\pi RNf$ ,  $\Delta=2\pi RN\delta$ 。

理想情况下,传感器的敏感环没有任何线性双折射( $\Delta\beta=0$ ,  $\delta=0$ ),此时  $\Phi_s=4F$ 。定义传感器的归一化变比为:  $K=\Phi_s/4F$ 。

### 2.3 仿真分析

被测电流与传感光纤圈数的乘积  $NI$  保持不变的条件下,传感器输出随光纤圈数的变化关系如图2所示。在仿真计算中,  $NI=210 \text{ kA}\cdot\text{turn}$ , 相应的 Faraday 相移约为  $0.214 \text{ rad}$ ;椭圆双折射光纤的参数为:  $\Delta\beta=2\pi/0.004 \text{ rad/m}$ ,  $\tau=38\ 080 \text{ rad/m}^{[10]}$ 。

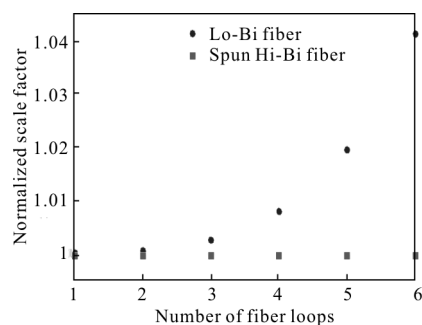


图 2 归一化变比与传感光纤圈数之间的关系曲线

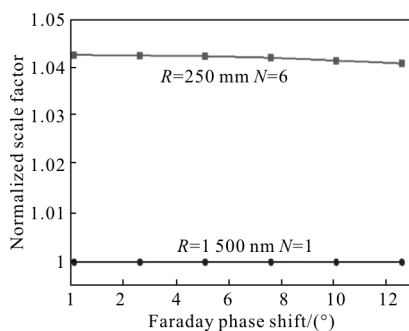
Fig.2 Normalized scale factor versus number of fiber loops

对于低双折射光纤敏感环,根据公式(13),相同 Faraday 相移情况下传感器的输出还受弯曲线性双折射的影响。随着传感光纤圈数的增加,累积的线性双折射将破坏传感器的量程自扩展能力,单圈敏感环、大电流与多圈敏感环、小电流对应的传感器输出不再具有等效性。这意味着量程自扩展特性不适用于校准采用低双折射光纤的电流传感器,其在超大电流下的校准需要一个超大功率的电流源。

对于椭圆双折射光纤,如图 2 所示,相同 Faraday 相移条件下传感器的输出随传感光纤圈数的增加几乎保持恒定。线性双折射的影响被传感光纤双折射主轴特殊的螺旋结构有效抑制。因此,采用椭圆双折射光纤敏感环的电流传感器具有良好的量程自扩展能力,通过传感光纤圈数的变换可实现超大电流标准量值的传递。

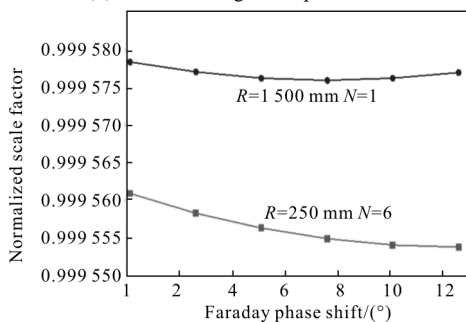
图 3 给出了传感器的归一化变比随被测电流产生的 Faraday 相移的变化曲线。对于低双折射光纤,根据公式(13),传感器输出与 Faraday 相移之间为非线性关系。随着光纤圈数的增加或环路半径的减小,弯曲线性双折射增大,传感器的线性度也将严重劣化。如图 3(a)所示,传感光纤的圈数从 1 圈增加至 6 圈,弯曲半径缩小 6 倍,相应的弯曲线性双折射从 0.56 增加到 20.04,在 Faraday 相移从 0 变化至 12.5

过程中,传感器的变比变化约 0.19%。对于椭圆双折射光纤,借助于特殊的光纤结构,传感器的输出与 Faraday 相移之间呈现线性关系,且受环路弯曲半径影响很小,根据图 3(b),随着 Faraday 相移的变化,传感器的变比变化不超过 0.01%,线性双折射对传感器线性度的影响被极大地改善。



(a) 低双折射光纤

(a) Low birefringence optical fiber



(b) 椭圆双折射光纤

(b) Elliptical birefringence optical fiber

图 3 归一化变比与 Faraday 相移之间的关系曲线

Fig.3 Normalized scale factor versus Faraday phase shift

实际上,如果敏感环路半径足够大,弯曲线性双折射的影响可忽略,则微分方程(2)可解析求解,两束信号光之间的相位差为:

$$\Phi_s = 2 \arctan \frac{\sin A \cos B \sin \chi + \cos A \sin B \sin \zeta}{\cos A \cos B - \sin A \sin B \cos(\chi - \zeta)} \quad (14)$$

$$A = \frac{1}{2} \sqrt{4(F-T)^2 + \Delta^2} \quad (15)$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{4(F+T)^2 + \Delta^2} \quad (16)$$

$$\sin \chi = \frac{2(F-T)}{A} \quad (17)$$

$$\sin \zeta = \frac{2(F+T)}{B} \quad (18)$$

式中:  $T=2\pi RN\tau$ 。当  $2T \gg \Delta$  时,  $\Phi_s \approx B - A \approx 4F$ 。因此,

与低双折射光纤相比,椭圆双折射光纤更适宜绕制多圈敏感环,实现超大电流的量值传递,并保证传感器具有良好的线性度,避免了非线性补偿。

### 3 实验与讨论

#### 3.1 柔性光纤电流传感器的设计

光源采用  $1.3 \mu\text{m}$  低偏振度 SLD,输出功率大于  $1 \text{ mW}$  (@ 驱动电流  $100 \text{ mA}$ )。采用单模环行器替代耦合器,减小  $6 \text{ dB}$  光路损耗。光纤起偏器的消光比大于  $30 \text{ dB}$ 。采用钛扩散  $\text{LiNbO}_3$  直波导集成光学相位调制器对两正交的偏振模式进行双折射调制。保偏延迟光纤采用熊猫型保偏光纤,长度为  $100 \text{ m}$ 。 $1/4$  波片通过截取椭圆芯保偏光纤的  $1/4$  拍长制成, $45^\circ$  方位角通过监测输出光波的消光比来精确调整。选用椭圆双折射光纤作为传感光纤。光纤波片、传感光纤及反射镜整体封装成缆,可以在不断开母线的条件下形成敏感环路,实现在线安装。数字闭环检测算法在 FPGA 中实现。

#### 3.2 传感器性能实验

采用等安匝法校准光纤电流传感器,实验装置如图 4 所示。直流电源可输出  $35 \text{ A}$  电流,驱动  $4 \times 250$  匝母线,多圈传感光纤绕在  $1000$  匝母线上,等效电流为  $35 \text{ kA}$ 。电源输出电流采用准确度  $0.01\%$  的分流器取样,8 位半数字电压表测量分流器两端的电压。

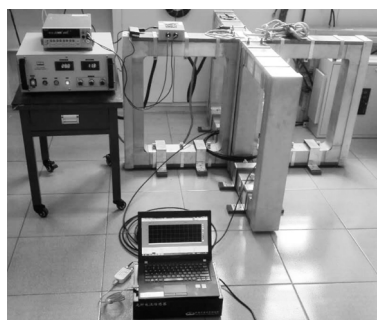


图 4 直流大电流测量准确度实验装置

Fig.4 Experimental setup for DC high current measurement

逐步增加传感光纤的圈数,相应的传感器输出列于表 1,其中等效电流等于标准电流与光纤圈数的乘积。可以看出:随着光纤圈数的增加,传感器输出等比例增大,即光纤圈数将被测电流等比例放大,最大误差不超过  $0.04\%$ ,表明采用椭圆

表 1 传感器输出与传感光纤圈数之间的关系  
Tab.1 Sensor output versus number of fiber loops

Bending radius/mm	Number of fiber loops/turn	Standard current /kA	Equivalent current /kA	Sensor output/kA	Relative error
250	1	35.087 09	35.087 09	35.096 2	0.025 963 97%
	2	35.065 78	70.131 56	70.142 1	0.015 028 9%
	3	35.063 29	105.189 87	105.189 4	-0.000 446 8%
	4	35.031 16	140.12 464	140.127 5	0.002 041 04%
	5	35.030 7	175.153 5	175.206 7	0.030 373 36%
	6	35.104 07	210.624 42	210.641 5	0.008 109 22%
350	1	35.043 09	35.043 09	35.050 1	0.020 003 94%
	2	35.051 1	70.10 22	70.100 1	-0.002 995 6%
	3	35.050 94	105.152 82	105.154 3	0.001 407 48%
	4	35.048 63	140.194 52	140.189 1	-0.003 866 1%
	5	35.052 08	175.260 4	175.281 5	0.012 039 23%
	6	35.083 85	210.503 1	210.501 2	-0.000 902 6%

双折射光纤的电流传感器具有良好的量程自扩展能力。

将 6 圈传感光纤绕母线形成敏感环路，最大等效电流为 210 kA。图 5 给出了传感器直流大电流测量准确度的测试结果，在等效 10~210 kA 范围内，最大测量误差不超过 0.1%。

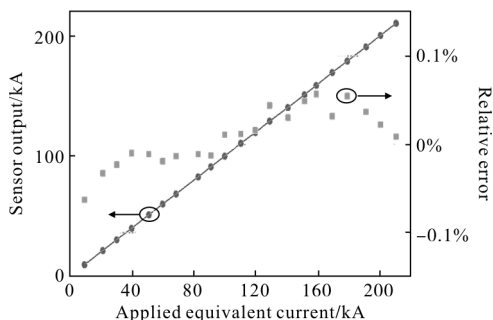
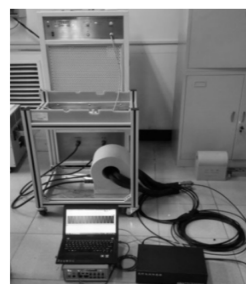


图 5 直流大电流测量准确度测试结果

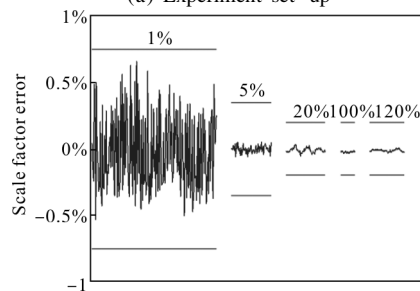
Fig.5 Test results for measurement accuracy of DC high current

图 6 所示为光纤电流传感器样机工频大电流测量准确度实验装置及测试结果。交流电源最高可产生 5 kA<sub>ms</sub> 的工频电流。6 圈传感光纤绕制在载流母线上，最大等效电流为 30 kA<sub>ms</sub>。从测试结果可以看出：样机在额定 25 kA 条件下比差准确度满足 IEC 60044-8 0.2 S 级的准确度要求。



(a) 实验装置

(a) Experiment set-up



(b) 测试结果

(b) Test results

图 6 工频大电流测量准确度实验

Fig.6 Test for measurement accuracy of power-frequency high current

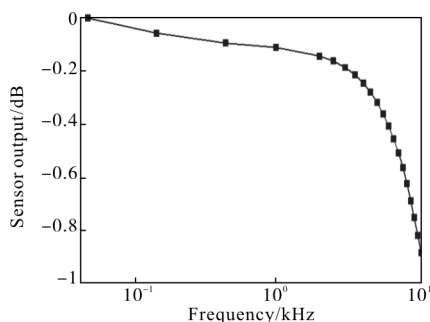
如图 7 所示，采用高频功率源测试光纤电流传感器样机的频率响应。高频功率源最大可输出 10 kHz、50 A<sub>ms</sub> 的高频电流，用分流器 (10 kHz 下交

直流差优于 60 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>) 取样,8 位半数字电压表测量分流器两端电压。输出电流的频率从 50 Hz 增大到 10 kHz, 传感器输出信号的幅值约下降 10.8%。因此,样机的带宽高于 10 kHz。



(a) 实验装置

(a) Experiment set-up



(b) 测试结果

(b) Test results

图 7 频率响应特性测试实验

Fig.7 Test for frequency response characteristic

## 4 结 论

基于微分琼斯矩阵方法,证明了采用椭圆双折射光纤的干涉式数字闭环光纤电流传感器具有良好的量程自扩展特性,利用等安匝电流和多圈敏感环,能够实现传感器在超大电流条件下的等效校准,并通过传感光纤圈数的变换,可实现计量实验室大电流标准量值的传递。研制了基于椭圆双折射光纤的柔性光纤电流传感器样机,可在不断开大电流母线的情况下实现高精度非介入式在线测量。样机在直流等效 10~210 kA 范围内测量准确度优于±0.1%,工频等效 25 kA 条件下比差准确度满足 IEC60044-8 0.2S 级要求,带宽大于 10 kHz。借助光纤电流传感器独特的量程自扩展能力,加之其在大电流测量准确度、便携性以及可在线安装等优势,作为量值传递标准,为超大电流计量溯源难

题的解决提供了一种可行的技术方法。

## 参考文献:

- [1] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, et al. Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3602-3609.
- [2] Rahmatian F, Blake J N. Application of high-voltage fiber-optic current sensors [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006: 1-6.
- [3] Deng Xiangyang, Li Zeren, Peng Qixian, et al. Two path optical current sensor for measuring high pulse current [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27 (1): 45-49. (in Chinese)  
邓向阳, 李泽仁, 彭其先, 等. 测量脉冲大电流的双光路光学电流传感器技术[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(1): 45-49.
- [4] Descamps A, Aerssens M, Gusarov A, et al. Simulation of vibration-induced effect on plasma current measurement using a fiber optic current sensor [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14666-14680.
- [5] Shao Haiming, Lin Feipeng, Liang Bo, et al. DC 5 kA current ratio standards based on series-parallel self-calibration DCCs [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(11): 3093-3100.
- [6] Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4082-4087. (in Chinese)  
李晶, 王巍, 王雪峰, 等. 光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 4082-4087.
- [7] Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, et al. Open-loop detection of fiber optic current transducer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1648-1653. (in Chinese)  
李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1648-1653.
- [8] Wang Yingli, Kang Menghua, Ren Liyong, et al. Design of spun high-birefringent fiber for fiber optic current sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 170-175. (in Chinese)  
王英利, 康梦华, 任立勇, 等. 用于全光纤电流传感器的扭转高双折射光纤设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 170-175.
- [9] Polynkin P, Blake J. Polarization evolution in bent spun fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3815-3820.
- [10] Peng Nai, Huang Yong, Wang Shuangbao, et al. Fiber optic current sensor based on special spun highly birefringent fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2013, 25 (17): 1668-1671.