

文章编号: 0253-2239(2008)01-0163-06

# 光学电流互感器中线性双折射与法拉第效应的分离检测

康 崇 吕文磊 欧阳鸿 黄宗军 董云吉

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 分析了线性双折射对光学电流互感器(OCT)电压输出的影响,指出了差除和信号处理方案检测输出光信息的不完备性问题,用琼斯矩阵理论证明了差除和方案不能独立检测块状玻璃传感头中线性双折射的结论。提出了光学电流互感器的椭圆检测方案,从椭圆偏振光参量方程出发,推导了温致线性双折射、法拉第旋转角与输出椭圆偏振光椭圆率、倾角之间的解析式,证明了椭圆检测法对输出光信息检测的完备性,实现了温致线性双折射和待测电流的同时测量。为保证实时性,提出了输出椭圆光的三态检测方案,采用水平、垂直和 45°三个偏振态的实时检测,既克服了线性双折射的影响又实现了待测电流的实时测量,从检测原理上解决了温致线性双折射对光学电流互感器的影响。

**关键词** 光电子学; 法拉第效应; 光学电流互感器; 线性双折射; 椭圆检测; 差除和检测

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

## The Separate Detection of Linear Birefringence and Faraday Effect in Optical Current Transformer

Kang Chong Lü Wenlei Ouyang Hong Huang Zongjun Dong Yunji

(School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** The effect of optical current transformer (OCT) output voltage for linear birefringence is analyzed, its incompleteness problem of the examination of output light's information in the difference divided by addition detection system is pointed out, linear birefringence in bulk-glass optical current sensing head cannot be examined separately by the difference divided by addition examination system, its proved and concluded theoretically by Jones matrix. Bringing forward the elliptical-polarization detection system of OCT, the formula to explain the relationship among the thermal induced linear birefringence, Faraday rotation angle, output elliptically polarized light's ellipticity and obliquity are deduced which are based on the elliptically polarized light parameter formula. The elliptically polarization examination system's completeness for the examination of output light's information is proved, and the thermal induced linear birefringence and electrical current intensity can be tested in the same time. The output of the 3-state detection, horizontal, vertical and 45° 3 polarization state testing are brought forward for ensuring being in real time. Linear birefringence's effect is conquered and electrical current intensity can be tested in real time, the thermal-induced linear birefringence's effect on optical current transformer is solved theoretically.

**Key words** optoelectronics; Faraday effect; optical current transformer; linear birefringence; elliptical-polarization examination; difference divided by addition examination

### 1 引 言

当前电力系统的工作电压日益增高,对高精度、大量程、安全可靠的新型电流互感器的需求日趋强

烈,新型电流互感器巨大潜在市场正在形成<sup>[1]</sup>。光学电流互感器<sup>[1~7]</sup>(Optical current transformer, OCT)是高压大电流测量领域中的新技术,对于电

收稿日期: 2007-04-23; 收到修改稿日期: 2007-08-23

基金项目: 哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUF04015)资助课题。

作者简介: 康 崇(1970—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,主要从事光电子技术方面的研究。

E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

力计量与保护具有重要的意义<sup>[2]</sup>。光学电流互感器所表现出的无爆炸、无磁饱和、无滞后、体积小质轻等优点<sup>[3]</sup>,得到了许多研究者的认可和关注。虽然有关光学电流互感器的研究已经取得了许多可喜的成果,但由于线性双折射<sup>[4]</sup>等关键技术障碍仍没得到彻底解决,行业准入的实用化光学电流互感器系统尚不多见。

光学电流互感器利用法拉第磁光效应<sup>[8]</sup>,通过检测输出光偏振面的旋转角度测量未知电流。常用的信号处理方案为差除和检测方案<sup>[9]</sup>,可以克服光源强度起伏的影响和系统的直流漂移。反射相移对光学电流互感器的影响问题已有多种办法予以解决。而光学电流互感器中线性双折射对系统输出的影响仍是光学电流互感器实用化的关键技术障碍<sup>[9]</sup>。差除和信号处理结果显示,多数光学电流互感器方案系统电压输出偏差受线性双折射影响没有改善。其根本原因是光学电流互感器方案中待测电流引起的法拉第效应与线性双折射在琼斯矩阵中纠缠在一起,差除和信号处理方案无法区分<sup>[10]</sup>。本文对此进行了详细分析,提出了用输出光椭圆偏检测方案同时测量待测电流和线性双折射的大小。从检测原理上解决法拉第效应与线性双折射的相互纠缠问题,为光学电流互感器的实用化研究提供了参考。

## 2 差除和检测方案

### 2.1 光学电流互感器差除和方案简介

典型光学电流互感器的光路如图 1 所示。光源发出的光射入块状玻璃头,经过三次反射,分经四个传感臂,绕头一圈后到达偏振分束器 PBS,输出光  $E_{out}$  经过检偏棱镜后形成的相互垂直的两个分量 (p、s 分量) 在 MathCAD 软件中分别表示为  $[E_{out}(I, \gamma)]_0$ 、 $[E_{out}(I, \gamma)]_1$ 。 $I$  为待测电流,  $\gamma$  为线性双折射值。光电转换后进行差除和信号处理,得

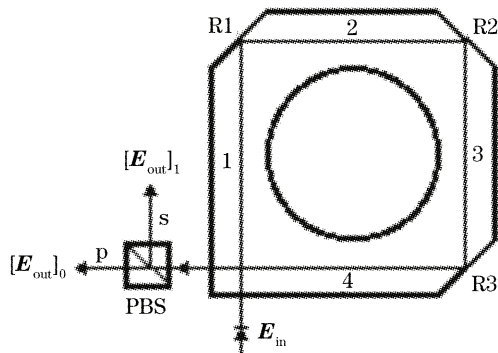


图 1 光学电流互感器光路

Fig. 1 Optical current transformer system

到待测电流对应的系统电压输出  $U_{out}$  (图中  $R$  为反射面)。

$$U_{out} = \frac{|[E_{out}(I, \gamma)]_1|^2 - |[E_{out}(I, \gamma)]_0|^2}{|[E_{out}(I, \gamma)]_1|^2 + |[E_{out}(I, \gamma)]_1|^2}. \quad (1)$$

由于线性双折射等因素的影响,系统输出光  $E_{out}$  的光矢轨迹可能退化成椭圆。经过 PBS 检测时,由于只检测了  $E_{out}$  中相互垂直的两个偏振态的光强信息,而没有检出这两束光的位相差<sup>[11]</sup> 信息,造成了信息检测的缺失。这样在信号复原时就无法计算出线性双折射的大小。因而当线性双折射受温度等影响产生无规变化时,差除和信号处理方案就无能为力了。

### 2.2 差除和检测方案不完备性的矩阵理论

振幅归一化的入射光矢量一般表示为

$$E_{in} = \begin{bmatrix} \cos \beta \exp(-i\alpha) \\ \sin \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对于  $45^\circ$  起偏的入射线偏振光,  $\beta = \pi/4$ ,  $\alpha = 0$ 。为分析方便设反射相移为零<sup>[12,13]</sup>, 则光通过传输光臂  $k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 的传输矩阵为<sup>[14]</sup>

$$F_k = \begin{bmatrix} A(\chi_k, \psi_k) & -B(\chi_k, \psi_k) \\ B(\chi_k, \psi_k) & A(\chi_k, \psi_k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} A(\chi_k, \psi_k) = \cos\left(\frac{\psi_k}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\psi_k}{2}\right) \cos \chi_k, \\ B(\chi_k, \psi_k) = \sin\left(\frac{\psi_k}{2}\right) \sin \chi_k, \\ \tan \chi_k = \frac{2\phi_k}{\gamma_k}, \\ \psi_k = 2 \sqrt{\left(\frac{\gamma_k}{2}\right)^2 + \phi_k^2}. \end{cases} \quad (4)$$

$\gamma_k$ 、 $\phi_k$  分别为传感臂上  $k$  的线性双折射值和待测电流产生的法拉第旋转角,单位是 rad。其中  $\phi_k = \frac{VI}{4} =$

$1.8055 \times 10^{-6} I^{[15]}$ ,  $V$  为菲尔德常数。当光学电流互感器的量程为 1 kA 时,  $\phi_k \leq 1.8 \times 10^{-3}$  rad。实验室条件下,块状玻璃传感臂单位长度线性双折射的测量值大约为 1 rad/m<sup>[4]</sup>, 单臂长 0.08 m。这样  $\gamma_k$  大约在 0.08 rad 即  $4.58^\circ$  附近变化。由于  $\phi_k \ll \gamma_k$ , (4) 式中后两式简化为  $\chi_k = \frac{2\phi_k}{\gamma_k}$ 、 $\psi_k = \gamma_k$ , 再代入 (4) 式前

两式中,得  $A(\chi_k, \psi_k) \approx \exp\left(i \frac{\gamma_k}{2}\right)$ 、 $B(\chi_k, \psi_k) \approx \phi_k$ 。

$E_{in}$  经过光学电流互感器,输出光  $E_{out}$  的矩阵表示为

$$E_{out} = F_4 \cdot F_3 \cdot F_2 \cdot F_1 \cdot E_{in}. \quad (5)$$

为分析方便,假设  $\gamma_k = \gamma$ 、 $\phi_k = \phi$ , 于是输出光的矩阵:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} [\exp(i\gamma) - \phi^2]^2 - 4\phi^2 \cos^2(\gamma/2) & -2\phi \cos(\gamma/2)(2\cos\gamma - 2\phi^2) \\ 2\phi \cos(\gamma/2)(2\cos\gamma - 2\phi^2) & [\exp(-i\gamma) - \phi^2]^2 - 4\phi^2 \cos^2(\gamma/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta \exp(-i\alpha) \\ \sin\beta \end{bmatrix},$$

考虑到  $\phi \leq 1.8 \times 10^{-3}$ , 略去含有  $\phi^2$  的项, 且考虑到  $\cos(\gamma/2)\cos\gamma \geq 0.99$ , 对  $\mathbf{E}_{\text{out}}$  作简化:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp(2i\gamma) & -4\phi \\ 4\phi & \exp(-2i\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

于是

$$\begin{cases} A = |[\mathbf{E}_{\text{out}}]_0| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - 8\phi \cos(2\gamma)}, \\ B = |[\mathbf{E}_{\text{out}}]_1| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + 8\phi \cos(2\gamma)}, \\ \delta = \arg[\mathbf{E}_{\text{out}}]_0 - \arg[\mathbf{E}_{\text{out}}]_1 = 2\tan(2\gamma). \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式表明, 仅仅依靠测量  $A$ 、 $B$  数值的差除和检测方案无法计算线性双折射和法拉第效应各自的大小。因为在  $A$ 、 $B$  中, 线性双折射和法拉第效应以完全相同的乘积形式出现而无法分离,  $A$ 、 $B$  之间不是完全独立的。只有再借助于  $\delta$  值才能计算出线性双折射和法拉第效应各自的大小。

当线性双折射较小时,  $\sin(2\gamma) \approx \tan(2\gamma) \approx 2\gamma$ , 可以近似计算值  $I$ 、 $\gamma$ 。

$$\begin{cases} \gamma = \frac{1}{2} \arctan(\delta/2), \\ I = \frac{1}{V} \frac{B^2 - A^2}{\sqrt{4 - \delta^2} B^2 + A^2}. \end{cases} \quad (8)$$

### 3 输出椭圆偏振光的检测理论

#### 3.1 系统输出椭圆光的方程描述

令输出光 p、s 分量的振动方向分别为与光传输方向相垂直并形成右手螺旋坐标系的  $x$  和  $y$  方向, 入射光频率为  $\nu$ , 时间为  $t$ 。输出光在  $x$ 、 $y$  方向上的振幅分别为  $A$ 、 $B$ , 位相差为  $\delta$ 。则  $x$ 、 $y$  向的振动方程如下:

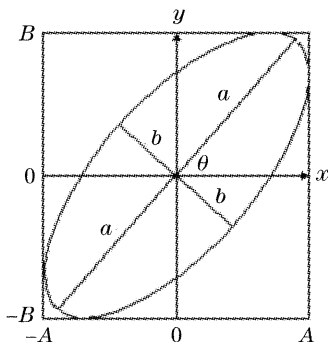


图 2 输出光的椭圆偏振图

Fig. 2 Diagram of the output light's elliptical polarization

$$\begin{cases} x = A \cos(2\pi\nu t), \\ y = B \cos(2\pi\nu t + \delta). \end{cases} \quad (9)$$

这是椭圆的参量方程, 其对应的一般椭圆方程是:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - \frac{2xy}{AB} \cos\delta = \sin^2\delta. \quad (10)$$

其图形如图 2 所示。

#### 3.2 输出椭圆光参量的测量

对于光学电流互感器系统输出的椭圆偏振光  $\mathbf{E}_{\text{out}}$ , 由于  $\delta$  不是直接测量量, 无法直接实验测量其大小。但可以用椭偏仪测量输出光矢椭圆轨迹的长短轴  $a$ 、 $b$  和倾角  $\theta$ 。利用  $a$ 、 $b$ 、 $\theta$  计算  $A$ 、 $B$ 、 $\delta$  的值。而以  $a$ 、 $b$  和倾角  $\theta$  所表示的椭圆方程为

$$\left( \frac{x \cos\theta + y \sin\theta}{a} \right)^2 + \left( \frac{x \sin\theta - y \cos\theta}{b} \right)^2 = 1. \quad (11)$$

对比(10)式、(11)式, 可得

$$\begin{cases} \frac{1}{A^2 \sin^2\delta} = \frac{\cos^2\theta}{a^2} + \frac{\sin^2\theta}{b^2}, \\ \frac{1}{B^2 \sin^2\delta} = \frac{\sin^2\theta}{a^2} + \frac{\cos^2\theta}{b^2}, \\ \frac{\cos\delta}{AB \sin^2\delta} = \left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \sin\theta \cos\theta. \end{cases}$$

于是

$$\begin{cases} \frac{1}{A} = \sqrt{\frac{\cos^2\theta}{a^2} + \frac{\sin^2\theta}{b^2} - \frac{\left[ \left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \frac{\sin 2\theta}{2} \right]^2}{\frac{\sin^2\theta}{a^2} + \frac{\cos^2\theta}{b^2}}}, \\ \frac{1}{B} = \sqrt{\frac{\sin^2\theta}{a^2} + \frac{\cos^2\theta}{b^2} - \frac{\left[ \left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \frac{\sin 2\theta}{2} \right]^2}{\frac{\cos^2\theta}{a^2} + \frac{\sin^2\theta}{b^2}}}, \\ \cos\delta = \frac{\left( \frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \sin\theta \cos\theta}{\sqrt{\left( \frac{\cos^2\theta}{a^2} + \frac{\sin^2\theta}{b^2} \right) \left( \frac{\sin^2\theta}{a^2} + \frac{\cos^2\theta}{b^2} \right)}}. \end{cases} \quad (12)$$

由(12)式看出, 即使线性双折射由于温度等外界环境因素随时变化, 通过实时测量输出光  $\mathbf{E}_{\text{out}}$  的长短轴和倾角就可以实现  $A$ 、 $B$ 、 $\delta$  的测量, 再由(7)式或(8)式可以实现待测电流和线性双折射的同时检测, 从而排除线性双折射的影响。

#### 3.3 椭偏检测与差除和检测相结合的检测方案

高压大电流检测是一个瞬态快变过程, 而温度引起的双折射变化是相对缓慢的变化过程。椭偏检

测方案依赖于检偏器高精度旋转实现。因此检测速度无法实时跟踪瞬变电流。把差除和方案与椭偏检测方案结合起来,用差除和方案实时检测电流,用椭偏检测方案定时测量线性双折射  $\gamma$ , 然后对差除和所得的电压输出  $U_{out}$  进行修正, 这样就从原理上解决了光学电流互感器中线性双折射问题。

带有保温措施的光学电流互感器的实验表明, 昼夜温差  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 双折射相对变化速度  $\Delta\gamma/\gamma \leq 0.033\%/min$ , 线性双折射的中心值约为  $\gamma = 0.08\text{ rad}$ , 代入(13)式

$$\begin{cases} U_{out} = \frac{B^2 - A^2}{B^2 + A^2} = 2VI \cos(2\gamma), \\ \frac{\Delta U_{out}}{U_{out}} = 2 \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \tan(2\gamma). \end{cases} \quad (13)$$

可估计出每分钟温致双折射变化引起的系统电压偏差  $\Delta U_{out}/U_{out} \leq 0.01\%$ , 因此针对系统电压输出  $U_{out}$  只需定时(如一分钟)修正线性双折射的影响, 就能保证计量指标(如  $\Delta U_{out}/U_{out} \leq 0.2\%$ )的要求。

### 3.4 输出椭偏光的三态检偏方案

3.3 中方案需要检偏器旋转完整的  $360^{\circ}$ , 这不适合温度快速变化的情况, 为了使温度变化趋缓, 需要采取保温措施, 不方便实用。

由(8)式知, 只要测量出椭圆参量方程(9)中的  $A$ 、 $B$ 、 $\delta$  三个值, 就能算出  $I$ 、 $\gamma$  的值。当输出椭圆光  $E_{out}$  经过与  $x$  轴成  $\varphi$  的检偏器后, 检测到的光强  $I_{out}(\varphi)$  为

$$I_{out}(\varphi) = |[E_{out}]_0|^2 \cos^2 \varphi + |[E_{out}]_1|^2 \sin^2 \varphi + |[E_{out}]_0| |[E_{out}]_1| \sin(2\varphi) \cos \delta. \quad (14)$$

于是

$$\begin{cases} I_{out}(0) = |[E_{out}]_0|^2 = A^2, \\ I_{out}(\pi/2) = |[E_{out}]_1|^2 = B^2, \\ I_{out}(\pi/4) = \frac{A^2 + B^2}{2} + AB \cos \delta. \end{cases} \quad (15)$$

(15)式指出, 只需对检偏器在三个特定的角度( $\varphi = 0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ )进行检偏测量(即三态检偏), 就可以计算出  $A$ 、 $B$ 、 $\delta$  的值。这意味着检偏器不用旋转  $360^{\circ}$  就可以测量待测电流和双折射的大小。

## 4 输出光椭偏检测实验验证

### 4.1 三态检偏方案光路

如图 3, 输出光  $E_{out}$  通过无偏振效应分束器 NPBS<sup>[15]</sup> 后被分成两束, 其一射入偏振分束器 PBS, 出射光被分成振幅为  $A^2$  的 p 光与振幅为  $B^2$  的 s

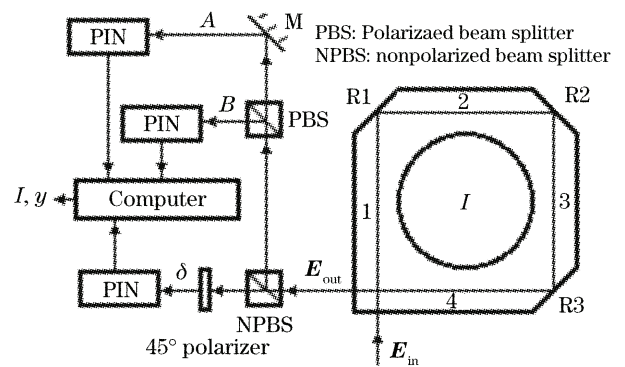


图 3 输出光椭偏检测方案

Fig. 3 The elliptically polarization examination system of output light

光, 经 PIN 光电二极管光电转换后送到计算机。另一路经过  $45^{\circ}$  检偏器, 其出射光强  $I_{out}(\pi/4)$  经光电转换后送至计算机用(15)式计算  $\delta$  的大小。有了  $A$ 、 $B$ 、 $\delta$ , 计算机可以用(8)式实时计算待测电流和线性双折射的值。这样测量电流的实时性就得到了保证, 也无须采取保温措施。

### 4.2 输出光的椭偏检测实验

实验光源采用武汉电信的 LED3S403 型超辐射二极管(SLD), 中心波长  $1290\text{ nm}$ ; 传感头为 ZF-7 玻璃, 反射面镀以单层保偏介质膜<sup>[13]</sup>; 采用 PMS-2 型光功率计测量检偏光强; 检偏器角度由椭偏仪度盘测量; 大电流发生器输出  $1\text{ kA}$ 。实验系统置于光学隔震平台上, 对光学传感头采用局部电加热以实现控温。旋转检偏器, 每转  $10^{\circ}$  记录光功率计输出, 至旋转  $360^{\circ}$  止。得到如图 4 所示的数据。此为极坐标系, 极角为  $\varphi$ , 极径代表检偏光强, 单位为  $\mu\text{W}$ 。

图 4 可见, 检偏后输出光强的大小随检偏器的旋转呈周期性变化, 光强分布符合马吕斯定律。由于存在线性双折射, 检偏光强的极小值亦不为零。曲线极大值对应的极角  $\varphi$  就是图 2 中的角  $\theta$ , 与待测电流的大小有关。

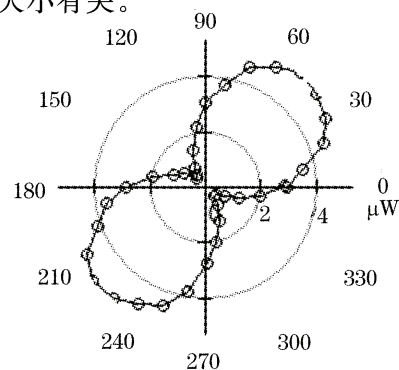


图 4 旋转检偏器得到的光强分布

Fig. 4 The distribution of the output light Intensity by rotating the analyzer



### 4.3 线性双折射与待测电流的三态检偏测量实验

传感头温度分别在 24.2~42.6 °C 的六个值,按

照图 3 所示光路搭建系统,测量三态检偏光功率如表 1 所示。

表 1 系统输出随温度变化的数据

Table 1 Data of system's output with the temperature

Temperature / °C	$I_{out}(0) / \mu W$	$I_{out}(\pi/2) / \mu W$	$I_{out}(\pi/4) / \mu W$	$\delta / rad$	$I / kA$	$U_{out} / V$	$\gamma / rad$
24.2	2.7919	2.8725	5.5308	0.3080	0.9961	4.943	0.0771
27.1	2.7918	2.8726	5.5569	0.2760	0.9969	4.959	0.0689
29.7	2.7915	2.8729	5.6279	0.1600	0.9989	5.000	0.0401
33.0	2.7921	2.8722	5.4865	0.3560	0.9949	4.917	0.0888
36.9	2.7925	2.8719	5.4133	0.4240	0.9928	4.873	0.1060
41.6	2.7932	2.8712	5.2669	0.5360	0.9890	4.785	0.1341

表 1 中  $\delta$  由(15)式算出,电流  $I$  和双折射值  $\gamma$  由(8)式算出,以 1 kA 为真值计算三态检偏法的相对偏差  $Er$ 。  $U_{out}$  是差除和检测方案的输出,电力计量标准要求满量程 1 kA 电流对应 5 V 电压输出,对 29.7 °C 的  $U_{out}$  值进行校准,并以此为基准计算差除和检测方案的相对偏差  $Er'$ 。做出  $Er$ 、 $Er'$  随温度变化的曲线如图 5 所示。

不能区分线性双折射和法拉第效应。为此文中提出了光学电流互感器的三态椭圆偏检测方案,推导了其检测原理,并由实验验证了其在减小温致线性双折射影响中的作用,在 25~40 °C 实验范围内光学电流互感器电流输出的相对偏差在 1% 以内。该方案由于获得了输出光的全部信息,所以可实现线性双折射和待测电流的准确实时测量。

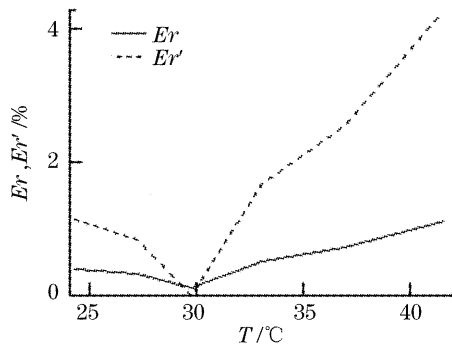


图 5 系统输出相对偏差的温度变化曲线

Fig. 5 Changes of system output relative deviation with temperature

在 25~40 °C 实验范围内,图中实线代表三态检偏方案的电流输出相对偏差随温度变化,变化范围在 1% 以内;虚线代表差除和方案的输出相对偏差随温度的变化,范围在 4% 以内。可见对光学电流互感器,三态检偏法具有补偿线性双折射,减小温度影响的实际作用。

## 5 结 论

光学电流互感器实用化的主要障碍是系统的温度稳定性问题。本文分析了线性双折射对光学电流互感器系统的影响,推导了利用椭圆偏率和倾角计算线性双折射和法拉第旋转角的公式。指出了差除和检测方案的不完备性,由于对输出光检测信息的缺失(丢失了 p、s 光位相差),差除和方案从原理上

## 参 考 文 献

- Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber transducer for elimination of vibration effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 469~472  
焦斌亮,王朝辉,郑绳植. 用于消除震动影响的光纤电流传感器结构[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 469~472
- Yu Youlong, Ye Hongan, Liu Zhiguo *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 586~588  
余有龙,叶红安,刘治国 等. 光纤光栅电流传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 586~588
- Li Hongbin. Study on the sensing probe of optical current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **26**(7): 946~949  
李红斌. 光学电流传感器传感头的研究[J]. *光学学报*, 1997, **26**(7): 946~949
- Wang Zhengping, Li Qingbo, Wang Huili *et al.*. A method to measure the linear birefringence inside the bulk glass head of an optical current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 612~614  
王政平,李庆波,王慧丽 等. 光学玻璃电流传感头线性双折射的一种测量方法[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 612~614
- Li Weiwen, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng *et al.*. A study for phase-shift characteristics of polarization controller based on simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 449~453  
李伟文,章献民,陈抗生 等. 基于模拟退火算法的偏振控制器波片相移特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 449~453
- Zengping Wang, Qingbo Li, Qiao Tan *et al.*. Novel method for measurement of retardance of a quarter-wave plate[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **36**: 285~290
- Wang Zhengping, Kang Chong, Huang Zongjun *et al.*. Optical current sensing element with polarization-preserving coatings for Faraday current sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2): 136~140
- Zheng Yonglin, Zheng Ruilun. Research of magnetic granular film Faraday rotation angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1126~1130

- 郑勇林,郑瑞伦. 磁性颗粒膜法拉第转角的研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1126~1130
- 9 Wang Zhengping, Liu Xiaoyu, Huang Zongjun. Theoretical analysis of reciprocity problems in bulk glass optical current sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1333~1336  
王政平,刘晓瑜,黄宗军. 光学玻璃电流互感器中互易性问题的理论研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1333~1336
- 10 Wang Zhengping, Liu Xiaoyu. Effects of linear birefringence upon performances of different designs of optical glass current transformers [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, **26**(14): 75~79  
王政平,刘晓瑜. 线性双折射对不同类型光学玻璃电流互感器输出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, **26**(14):75~79
- 11 Huang Jianbing, Wang Yingjian, Fang Ming *et al.*. Design of 90° reflection-induced phase retarder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1169~1172  
黄建兵,王英剑,方明等. 90°反射式相位延迟器的设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1169~1172
- 12 Kang Chong, Sun Weimin, Wang Zhengping *et al.*. The influence of reflection-induced phase retardation upon sensitivity of bulk-glass optic-current sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(11): 1513~1517  
康崇,孙伟民,王政平等. 反射相差对光学玻璃电流传感器测量灵敏度和稳定性的影响[J]. 光学学报, 1998, **18**(11): 1513~1517
- 13 Wang Zhengping, Ruan Sunling, Sun Weimin *et al.*. Reflecting prism-retarders with a single medium layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 556~560  
王政平,阮顺龄,孙伟民等. 单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究[J]. 光子学报, 1997, **26**(6): 556~560
- 14 Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng. *Principles and Technologies of Guided-Wave Optical Sensors* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 195~196  
靳伟,廖延彪,张志鹏. 导波光学传感器原理与技术[M]. 北京: 科学出版社,1998. 195~196
- 15 Kang Chong, Wang Zhengping, Huang Zongjun *et al.*. Influence of reflection-induced-retardance of non-polarizing beam splitter upon the polarization state of the output light of Faraday mirror optical current transformer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1857~1860  
康崇,王政平,黄宗军等. 无偏振效应分束器反射相移对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(12): 1857~1860