

光学平衡桥式电流互感器的设计

马任德¹ 吴福全² 孟祥省¹ 李爱国¹

(¹ 曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165; ² 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要 为了消除传感头随温度变化的线性双折射对光学电流互感器性能的影响,提出了光学平衡桥式电流互感器的概念,并给出了设计原理。推导了与温度有关的线性双折射导致的线偏振光方位角变化量的解析式,并计算了用 1/2 波片来消除线性双折射影响时波片光轴的方向。给出了光学平衡桥的工作原理和信号处理的方法,推导出计算电流的表达式。进行了实验研究,螺线管电流为 2 A,温度在 20 °C-65 °C 范围变化时,所设计互感器的输出误差在 2.96% 以内。提出的光学平衡桥式电流互感器,解决了原有方法存在的线性双折射随温度变化对测量精度影响的难题,有利于促进光学电流互感器的实用化进程。

关键词 光学测量; 电流互感器; 光学平衡桥; 法拉第效应; 线性双折射; 1/2 波片

中图分类号 TP212. 14 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092910.2876

Design of Optical Balanced Bridge Current Transformer

Ma Rende¹ Wu Fuquan² Meng Xiangsheng¹ Li Aiguo¹

(¹ College of Physics Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
(² Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract In order to eliminate the effect to the optical current transformer by the liner birefringence which changes with the temperature, the idea of optical balanced bridge current transformer is advanced, and the principle is also given; analytical expression of azimuth angle variation is deduced that is produced by liner birefringence, the direction of 1/2 wave plate axis is also calculated which is used to eliminate the effect of the liner birefringence. The working principle and signal processing method of the optical balanced bridge are given, the expression that used to calculate the current is deduced. It is proved that the current transformer output error is within 2.96% when the temperature changes between 20 °C and 65 °C as the current is 2 A. The advancement of optical balanced bridge current transformer solved the problem of the effect to the system produced by the birefringence along with the variation of temperature which could not be solved using the traditional methods. This new method will boost the utility of optical current transformer.

Key words optical measurement; current transformer; optical balanced bridge; faraday effect; liner birefringence; 1/2 wave plate

1 引 言

光学电流互感器利用介质的法拉第磁光效应^[1~3],通过检测经过介质的偏振光偏振面的旋转角度来测量未知电流。与传统的电流互感器相比具有无爆炸、无磁饱和、无滞后、体积小质轻等优点^[4]。对光学电流互感器的研究,目前已经取得了很多成果^[5~9]。信号处理普遍采用预置入射起偏角的差除和方案^[10],这种方案有利于提高系统对光源输出光强涨落、震动导致互感器输出波动、系统的直流漂移

等不利因素的抵御能力,提高了系统稳定性。但是在光学电流互感器的研制过程中,也遇到了比如随温度变化的线性双折射等用差除和方案无法消除的问题,严重影响了光学电流互感器的实用化进程^[10,11],导致人们开始寻找其他方法研制光学电流互感器^[12]。文献[13]提出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,但增加了检测系统的复杂性,使系统稳定性降低。

本文提出了用光学平衡桥探测器对光学电流互

感器进行信号处理的方法,并把这种互感器命名为光学平衡桥式电流互感器。该方法用一个 $1/2$ 波片代替原来差除和方法中的检偏器,并且起偏器无需预置偏转角,探测器的输出信号与待测电流大小成正比。但为了表述方便,假设起偏器在水平方向上透射。该光学平衡桥式电流互感器不仅能够同时消除光源强度起伏、震动、直流漂移等因素对偏振光偏振态的影响,最重要的是这种方法能够消除原有方法所不能消掉的随温度变化的线性双折射的影响。

2 光学平衡桥式电流互感器基本原理

光学平衡桥式电流互感器系统如图 1 所示。光学平衡桥由 $1/2$ 波片、沃拉斯顿(Wollaston)棱镜(W)和两光电探测器(A,B)组成^[14,15]。入射光经起偏器 P 水平起偏后,通过传感头。线偏光由于传感头材料的双折射作用变成长轴与水平方向微斜的椭圆偏光。再利用 $1/2$ 波片的特性^[16],调节椭圆偏光的长轴方向旋转到与水平方向成 45° 。沃拉斯顿棱镜水平放置,使椭圆偏光通过沃拉斯顿棱镜得到振动方向水平和竖直的两个正交分量,经两光电探测器检测后进行差除和运算,在平衡状态时输出为零。当传感头的线性双折射随温度变化时,未加待测电流的输出信号将偏离零点,但此时可由温度传感器测温,用步进电机根据这个温度按照已经测量得到的实验数据编程控制 $1/2$ 波片的光轴方向,使线性双折射产生的影响在平衡桥两探测器上相等,实现实时补偿,测量电流时的结果将反映实际电流大小。

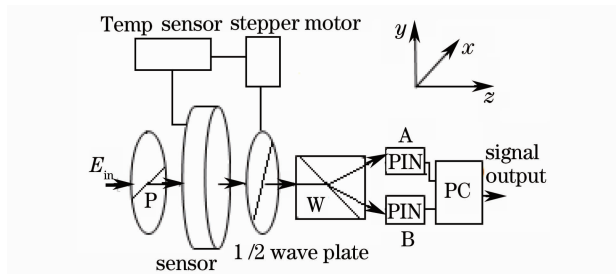


图 1 光学平衡桥式电流互感器系统

Fig. 1 Optical balanced bridge current transformer system

3 双折射导致的偏振光方位角的变化量

以水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴。起偏器透振方向沿 x 轴,光沿 z 轴正方向入射,经起偏器起偏后的线偏振光可以看作左右旋两圆偏振光的叠加,由于传感头自身的双折射,它们经过传感头时,传感

头对左右旋圆偏振光分量的折射率和吸收率不同,因而透射光将变成椭圆度很小的椭圆光。

光通过起偏器的琼斯矢量为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right). \quad (1)$$

通过传感头后,设右旋圆偏光分量相对于左旋分量相移为 φ ,幅度衰减为 γ ,由于 φ, γ 均为微小量,则经过传感头后的透射光变成椭圆偏光,它的长轴与 x 轴的夹角 θ_0 非常微小,椭圆偏光可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + (1 - \gamma) \exp(i\varphi) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \delta \cos \varphi + i \delta \sin \varphi \\ \delta \sin \varphi + i(1 - \delta \cos \varphi) \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_x \exp(i\theta_x) \\ A_y \exp(i\theta_y) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

$$\delta = 1 - \gamma, \quad (3)$$

$$A_x^2 = (1 + \delta \cos \varphi)^2 + (\delta \sin \varphi)^2 = 1 + \delta^2 + 2\delta \cos \varphi, \quad (4)$$

$$A_y^2 = (\delta \sin \varphi)^2 + (1 - \delta \cos \varphi)^2 = 1 + \delta^2 - 2\delta \cos \varphi, \quad (5)$$

$$\theta_x = \arctan \left(\frac{\delta \sin \varphi}{1 + \delta \cos \varphi} \right), \quad (6)$$

$$\theta_y = \arctan \left(\frac{1 - \delta \cos \varphi}{\delta \sin \varphi} \right). \quad (7)$$

设 $\Delta\theta = \theta_y - \theta_x$, 则有

$$\tan(2\theta_0) = \frac{2A_x A_y}{A_x^2 - A_y^2} \cos(\Delta\theta), \quad (8)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2A_x A_y}{A_x^2 - A_y^2} \cos(\Delta\theta) \right]. \quad (9)$$

由于传感头介质的双折射随着温度的变化而变化^[13],所以 θ_0 是温度的函数,记为 $\theta_0(T)$,不同温度下 $\theta_0(T)$ 值不同。

4 $1/2$ 波片光轴方向的确定

为使椭圆偏光经沃拉斯顿棱镜分束后,水平、竖直两个正交分量相等,需在沃拉斯顿棱镜前放置 $1/2$ 波片进行调节,使得椭圆偏光的长轴方向转到与 x 轴成 45° ,也就是说在任何温度下经过 $1/2$ 波片调制过的 $\theta_0(T)$ 恒等于 45° ,把这个角度记作 θ ,因而经过 $1/2$ 波片后的偏振光恒为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中 $A = A_x = A_y$ 。

为了使 θ 恒为 45° , $1/2$ 波片的光轴与 x 轴的夹角 $\alpha(T)$ 应为

$$\alpha(T) = \theta_0(T) + \frac{45 - \theta_0(T)}{2} = \frac{45 + \theta_0(T)}{2}. \quad (11)$$

当环境温度发生变化时, 调节 $\alpha(T)$ 可以确保 θ 值恒等于 45° 。消除随温度变化的线性双折射对光学电流互感器输出结果的影响。

5 光学平衡桥信号处理原理

5.1 光学平衡桥检测原理

加待测电流后, 椭圆偏振光经过传感头后, 长轴方向的转角为

$$\Delta\theta_F(I, T) = \Delta\theta_0(T) + \Delta\theta_F(I), \quad (12)$$

式中 $\Delta\theta_0(T)$ 是温度变化时线性双折射引起的偏转角, $\Delta\theta_F(I)$ 是加了电流后引起的偏转角。无论 $\Delta\theta_0(T)$ 怎样变化, 总可以通过 $1/2$ 波片将 $\theta_0(T)$ 调为 45° , 使互感器未加待测电流时输出为零; 测量时, 光偏振方向的微小旋转 $\Delta\theta_F(I)$ 将引起两路正交偏振光强分量的不相等, 则差除和信号的变化只反映待测电流产生的旋转角信息, 也就反映待测量电流的大小。

该方法的独到之处是即使两路正交偏振分量的强度很大, 当平衡点调得较好时差分信号基本为零, 因而保证测量系统有很高的共模抑制比和良好的动态响应特性, 而互感器传感头随温度变化的双折射、激光强度起伏、系统振动等引起的随机噪声在两路正交分量间表现一致, 因而差分信号不受影响, 检测到的信号与待测电流大小成正比。

5.2 光学平衡桥的信号处理

根据第 2 节可知, 经沃拉斯顿棱镜后的光信号, 可由两个性能十分接近的光电探测器 A, B 检测。两探测器 A, B 所得到的信号强度与 $\Delta\theta_F(I)$ 有关, 如图 2 所示。

由于 $\Delta\theta_F(I)$ 非常小, 所以近似认为在方位角为 45° 的平衡位置, 与 $45^\circ + \Delta\theta_F(I)$ 的法拉第效应偏转角处, 振幅都为 I_0 。

其中 $E_A = I_0 \cos[45^\circ + \Delta\theta_F(I)]$, $E_B = I_0 \sin[45^\circ + \Delta\theta_F(I)]$

探测器 A, B 所探测信号经过差除和运算输出得到

$$\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} = \frac{E_A^2 - E_B^2}{E_A^2 + E_B^2} = \cos[90^\circ + 2\Delta\theta_F(I)]. \quad (13)$$

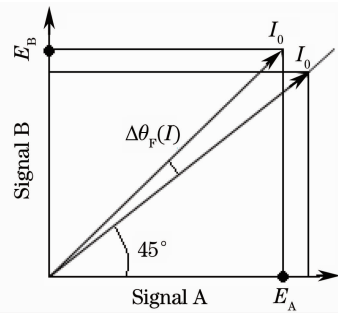


图 2 信号 A, B 与椭圆偏振方位角改变量 $\Delta\theta_F(I)$ 的关系图

Fig. 2 The relation of signal A, B with azimuth angle variation $\Delta\theta_F(I)$ of elliptically polarized light

对于差除和信号, 只关心绝对值的大小, 并且由于法拉第效应引起的偏转角非常小, 若以弧度计 $\Delta\theta_F(I)$ 可以把(13)式近似为

$$\sin[2\Delta\theta_F(I)] \approx 2\Delta\theta_F(I),$$

$$\Delta\theta_F(I) \approx \frac{I_A - I_B}{2(I_A + I_B)}, \quad (14)$$

$\Delta\theta_F(I)$ 表示为

$$\Delta\theta_F(I) = VL \frac{I}{2\pi r}, \quad (15)$$

式中 V 为韦尔代常数, L 为偏振光在传感头中沿磁场方向传播的距离, r 为偏振光距离导线中心的距离, I 为流经导线的电流, 也就是待测电流。

由(14)式, (15)式, 可得到待测电流 I 值:

$$I = \frac{(I_A - I_B)\pi r}{(I_A + I_B)VL}. \quad (16)$$

6 光学平衡桥式电流互感器的实验研究

实验系统由以下几部分组成: 光源采用稳频 He-Ne 激光器; 图 1 中的光学平衡桥由长春第一光学仪器厂生产的 WFC 法拉第效应测试仪改装而成, 将其光电倍增管换成两个性能参数非常接近的光电探测器, 把角度表内的偏振片换成 $1/2$ 波片, 用来调节波片光轴方向, 角度表调节精度为 $1'$; 为了让线性双折射现象明显, 给法拉第效应测试仪的磁光玻璃块施加一个侧向应力; 产生磁场的螺线管由 HY1791-5 型稳压稳流源供电。若以 20°C 为温度的起始点, 通过调节 $1/2$ 波片, 可以使如图 1 所示的光学平衡桥探测系统在 20°C 时差除和信号输出为零。此时固定 $1/2$ 波片不动, 随着温度的升高, 平衡桥输出信号随温度的变化如图 3 所示。

类比法拉第效应, 磁光玻璃随温度变化的双折

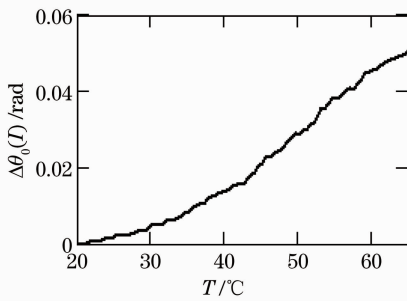


图 3 平衡桥输出信号随温度的变化曲线

Fig. 3 The relation curve for the output of the balanced bridge and temperature

射引起的椭圆偏光方位角变化量,也可用(14)式计算。由图 3 的数据,计算出椭圆偏光方位角变化量 $\Delta\theta_0(T)$ 随温度变化的关系如图 4 中实线所示。

对(11)式两端取微分,可得

$$2\Delta\alpha(T) = \Delta\theta_0(T), \quad (17)$$

由(17)式可知,当温度变化时,1/2 波片只需旋转椭圆偏光方位角改变量的一半,就可以使平衡桥的输出稳定在零点,实验测得 $2\Delta\alpha(T)$ 随温度的变化如图 4 中点线所示。对比两条曲线,可见当温度在 35~57 °C 范围变化时,两曲线几乎重合;当温度低于 35 °C 时实验测量值大于计算值,这是由角度表的回程差引起的,调零过程中,当温度从 20 °C 变化到 65 °C,再从 65 °C 降到 20 °C 时,角度表的回程差接近 6';当温度高于 57 °C 时计算值大于实验测量值,这是因为当温度高时双折射变强,不能再采用(14)式近似。

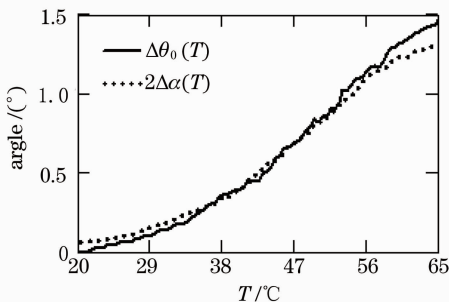


图 4 由差除和结果计算和实验测得的椭圆偏光旋转角度随温度的变化曲线

Fig. 4 Relation curves for the azimuth angle variation with temperature which is obtained through computation and direct measurement

给螺线管加 2A 恒定电流,当温度在 20~65 °C 范围变化时,按图 4 中点线所示的温度-旋转角度关系调节角度表,可实现误差在 2.96% 范围内的信号输出,由于所用仪器回程差太大,严重影响了测量结果,但是已经远远低于不用平衡桥时接近 20% 的误

差。可以推测:如果采用高精度的步进电机或压电陶瓷控制 1/2 波片旋转,减小回程差造成的误差,将得到更理想的实验结果。

7 结 论

与温度有关的线性双折射,严重阻碍了光学电流互感器的实用化进程。本文提出的光学平衡桥式电流互感器,通过 1/2 波片的调节作用可以消除随温度变化的线性双折射的影响,最终推导出的计算电流的表达式只与平衡桥两臂 A, B 的探测信号有关,其余各量都为常数,它是一个不受温度影响的量。虽然实验发现误差还处在一个较高的水平上,但是结果还是非常令人满意的。若用高精度步进电机自动控制 1/2 波片旋转,能更好地补偿线性双折射温度特性产生的影响,光学平衡桥式电流互感器的提出,解决了线性双折射随温度变化对系统测量精度的影响难题,将促进光学电流互感器的实用化进程。

参 考 文 献

- 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
- Wang Xiaojing. Optical current transducer research direction and actuality [J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2008, **24**(2): 34~36
王晓菁.光学电流互感器的研究方向与现状[J]. *电力科学与工程*, 2008, **24**(2): 34~36
- 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
- Li Hongbin. Study on the sensing probe of optical current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(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, **17**(7): 946~949
- Jiao Binliang, Wang Zhaohui, Zheng Shengxuan. A configuration of optical fiber transducer for elimination of vibration effect [J]. *Chinese. 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
- 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. 光学玻璃电流传感器头线性双折射的一种测量方法[J]. 光子学报, 2003, **32**(5): 612~614
- 8 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
- 9 WangJiangping, Li Yuquan. Polarizing azimuth angle effect on sensitivity of pulsed magnetic field photonic sensors[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 208~210
- 王江平,李玉权. 偏振方位角对光学脉冲磁场传感器灵敏度的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(s2): 208~210
- 10 Wang Zhengping, Liu Xiaoyu, Kang Chong. Theoretical analysis of the effects of linear birefringence on the output of a Faraday mirror-typed optical current transformer[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2005, **26**(5): 688~692
- 王政平,刘晓瑜,康 崇. 线性双折射对法拉第镜式光学电流互感器输出影响的理论分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, **26**(5): 688~692
- 11 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
- 12 Li Yansong, Liu Jun. Signal processing method for adaptive optical current transducer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, **32**(10): 52~56
- 李岩松,刘 君. 自适应光学电流互感器的信号处理方法[J]. 电力系统自动化, 2008, **32**(10): 52~56
- 13 Kang Chong, LüWenlei, Ouyang Hong *et al.*. The separate detection of linear birefringence and faraday effect in optical current transformer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 163~168
- 康 崇,吕文磊,欧阳鸿. 学电流互感器中线性双折射与法拉第效应的分离检测[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 163~168
- 14 D. Guidotti, J. G. Wilman, A. J. Ricci. An optical bridge reflectometer for sensitive measurement of ion implantation dose [J]. *Appl. Phys. A*, 1992, **54**: 570~573
- 15 R. Wilks, N. D. Hughes, R. J. Hicken. Investigation of ultrafast spin dynamics in a Ni thin film[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(10): 8670~8672
- 16 Yao Qijun. *Optical Tutorial* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 335~336
- 姚启钧. 光学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. 335~336