

光纤偏振态自动补偿的光纤电流互感器*

何竞翼 刘德明 张新亮 黄德修
(华中理工大学光电子系, 武汉 430074)

摘 要 提出了一种对块状结构光纤电流互感器中的输入光纤偏振态进行自动补偿的新结构, 并给出了理论分析和实验结果。这种结构使光纤电流互感器的稳定性和检测精度有显著提高。

关键词 光纤电流互感器, 偏振态补偿, 法拉第效应。

1 引 言

光纤电流互感器(OFCT)是以法拉第磁光效应为原理的一种新兴电力计量技术,它通过测量光波在通过磁光材料时其偏振面由于电流产生磁场的作用而发生旋转的角度来确定电流的大小。与传统的电流互感器相比,光纤电流互感器具有许多优越性:1)不含油,无爆炸危险;2)不含交流线圈,在故障电流下不饱和;3)不含铁芯,无铁磁共振和磁滞效应;4)抗电磁干扰;5)体积小、重量轻、易安装;6)与高压线路完全隔离,运行安全可靠;7)测量带宽宽,精度高。因此,光纤电流互感器可以逐步代替传统的电流互感器,具有很高的经济效益。

光纤电流互感器按光纤在系统中的作用通常分为两类:一类是光纤只作为传感头和控制与处理单元之间的传光元件;另一类是光纤同时也是传感头的功能元件的全光纤结构。尽管第二类方案早在 1973 年就被提出^[1],并且也进行了大量的研究,但至今仍没有实用可靠的商业产品。其最大的困难在于传感光纤中存在着各种形式的双折射。当受费尔德(Verdet)常数影响的法拉第旋转角与由于光纤中的双折射而引起的旋转角可以相比拟时,前者将会被后者所抑制。由于普通硅光纤的费尔德常数很小(633 nm 时为 4.68×10^{-6} rad/A),因此,为了得到高的灵敏度,就必须将光纤传感头绕很多圈。而这同时又会增加本征双折射和弯曲引起的线性双折射,从而使灵敏度远远低于理论的预计值。第一类方案通常用高费尔德常数的块状玻璃制成传感头。它不受光纤中存在的本征双折射及弯曲引起的线性双折射的影响,温度双折射和应力双折射效应也都比较小。另外,通过结构设计可以消除内反射引起的偏振态变化,实现无信号时的保偏性。因此其稳定性和灵敏度均优于全光纤结构^[2]。

目前,在块状结构光纤电流互感器中一般采用多模光纤作为传光光纤,并需要较为复杂的退偏措施。尽管如此,作为传光单元的光纤仍然存在偏振态的随机扰动,从而造成检测误差。本文提出了一种新的系统结构,如图 1 所示:由光纤 1(单模)输入的光经偏振分束器 1 后

* 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”资助课题。

收稿日期:1998-06-01;收到修改稿日期:1998-12-01

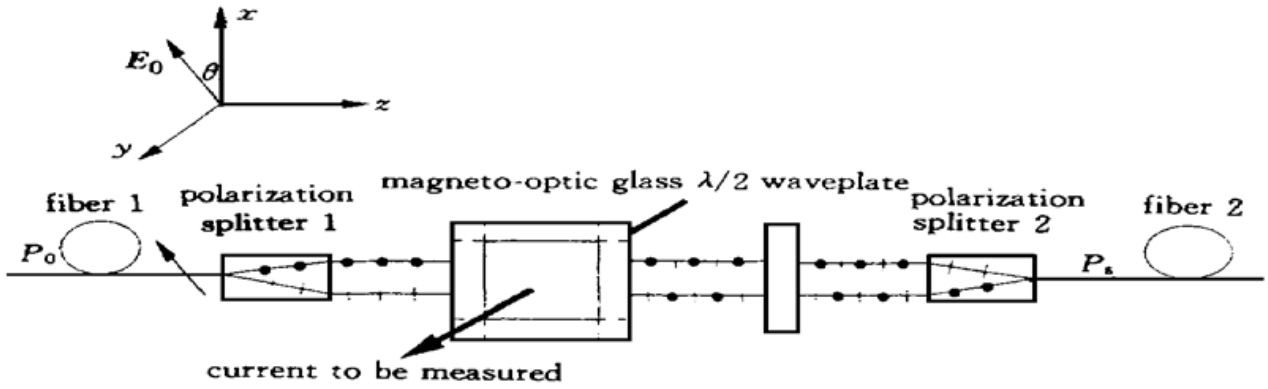


Fig. 1 Schematic of the polarization state compensation

被分为两束相互正交的线偏振光，它们在磁光玻璃传感头内相互平行地独立传播，出射后两束光的偏振面由于法拉第效应而发生旋转，再经过 $\lambda/2$ 波片进行适当的相位调整，然后经偏振分束器 2 将它们各自的一个偏振面的光(而这两束光的偏振面又相互正交)进行合束，最后用光纤 2 导出进行检测。这种结构可以大幅度减小输入光偏振态的影响，传光光纤中偏振态的随机扰动的影响也大为降低，因此能显著提高光纤电流互感器的性能。

2 分 析

设输入光强 $P_0 = A^2$, A 为光场振幅。因为任意偏振态的光都可以看作是线偏振光的叠加，所以这里仅考虑入射到偏振分束器 1 的光为某一角度的线偏振光的情况。用琼斯(Jones)矩阵将这束线偏振光表示为如下形式:

$$E_0 = A \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

θ 为偏振面与 x 轴的夹角。这束光经过偏振分束器 1 后，分解为两束相互正交的线偏振光，可分别表示为:

$$\begin{aligned} E_1^{(1)} &= A \sin \theta \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ E_2^{(1)} &= A \cos \theta \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

这两束线偏振光先后经过磁光玻璃和 $\lambda/2$ 波片后的偏振态分别用 $E_i^{(2)}$ 和 $E_i^{(3)}$ 表示, $i = 1, 2$ 分别代表两束线偏振光。在磁光玻璃内, 在待测电流引起的磁场的的作用下, 两束线偏振光的偏振面转过相同的角度, 设为 ϕ , 则此过程的传输矩阵为^[3]:

$$G_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \tag{3}$$

从而可得磁光玻璃出射光的表示式为:

$$\begin{aligned} E_1^{(2)} &= G_1 E_1^{(1)} = A \sin \theta \begin{bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} \\ E_2^{(2)} &= G_1 E_2^{(1)} = A \cos \theta \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4}$$

为了实现正交检测, 获得随 ϕ 线性变化(近似)的光信号, 在系统中加入了一个 $\lambda/2$ 波片。设其

快轴与 x 轴成 α 角, 则此波片的传输矩阵为:

$$G_2 = \begin{bmatrix} -i \cos 2\alpha & -i \sin 2\alpha \\ -i \sin 2\alpha & i \cos 2\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

经过 $\lambda/2$ 波片后, 两束光的偏振态为:

$$\begin{aligned} E_1^{(3)} &= G_2 E_1^{(2)} = iA \sin \theta \begin{bmatrix} \sin(\phi - 2\alpha) \\ \cos(\phi - 2\alpha) \end{bmatrix} \\ E_2^{(3)} &= G_2 E_2^{(2)} = iA \cos \theta \begin{bmatrix} -\cos(\phi - 2\alpha) \\ \sin(\phi - 2\alpha) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

最后, 再经过一个偏振分束器, 分别将 $E_1^{(3)}$ 的 x 分量和 $E_2^{(3)}$ 的 y 分量合成在一起, 得到输出信号光:

$$E_s = x[iA \sin \theta \sin(\phi - 2\alpha)] + y[iA \cos \theta \sin(\phi - 2\alpha)] \quad (7)$$

其光强为:

$$\begin{aligned} P_s &= |iA \sin \theta \sin(\phi - 2\alpha)|^2 + |iA \cos \theta \sin(\phi - 2\alpha)|^2 = \\ &A^2 \sin^2(\phi - 2\alpha) = P_0 \sin^2(\phi - 2\alpha) = \\ &P_0/2 - (P_0/2) \cos[2(\phi - 2\alpha)] \end{aligned} \quad (8)$$

可见, 输出信号光的光强与 θ 无关, 即与输入光的偏振态和光纤 1 中的偏振态扰动无关。光纤 2 只需传输光强信号, 无需偏振态控制。此信号光经过接收及处理电路后, 可以得到与输入光强 P_0 无关的信号输出:

$$S_{out} = \cos[2(\phi - 2\alpha)] \quad (9)$$

若取 $\alpha = 22.5^\circ$, 则当 $\phi \ll 1$ 时有:

$$S_{out} = \sin 2\phi \approx 2\phi \quad (10)$$

由于 ϕ 角与待测电流成线性关系, 这样就实现了线性检测。

3 实验结果

实验中采用的测试系统如图 2 所示。半导体激光器(LD)用作为光源, 其输出光经光纤 1 耦合进偏振控制器, 由偏振控制器输出的线偏振光入射到带偏振态补偿的传感单元(包括磁光玻璃, 两个偏振分束器和一个 $\lambda/2$ 波片, 具体结构参见图 1), 传感单元的输出信号光经光纤 2 耦合进 PIN 探测器, 探测器的输出信号经放大器放大后输入计算机进行分析和处理。实验中主要测试的性能参数是系统的偏振灵敏度和探测精度。系统的偏振灵敏度由下式定义:

$$S_P = -10 \log \left[1 - \left| \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}} \right| \right] \quad (11)$$

通过调整偏振控制器改变入射传感单元的线偏振光的偏振态, 传感单元的输出光强将随之而变化。 P_{max} 为输出光强的最大值, P_{min} 为输出光强的最小值。实验结果表明, 采用偏振态自动补偿措施后, 系统的偏振灵敏度仅为 0.05 dB。

为了测试系统的探测精度, 只需将偏振控制器(图 2 的虚线框部分)去掉即可。系统的探

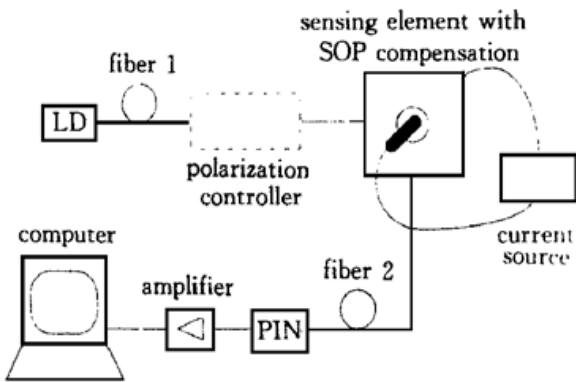


Fig. 2 Schematic of experimental system

测精度定义为:

$$S_D = (I_d - I_0) / I_0 \quad (12)$$

式中, I_d 为探测电流值, I_0 为实际电流值。

一般的块状结构光纤电流互感器系统只在传感头内进行偏振控制, 以消除内反射引起的偏振态变化, 如常用的双层光路结构。但由于传光光纤中偏振态的扰动, 输出信号的波动比较大。而采用了上述偏振态控制方案后, 输出信号质量大为改善, 探测灵敏度显著提高。对比结果如图 3 所示。

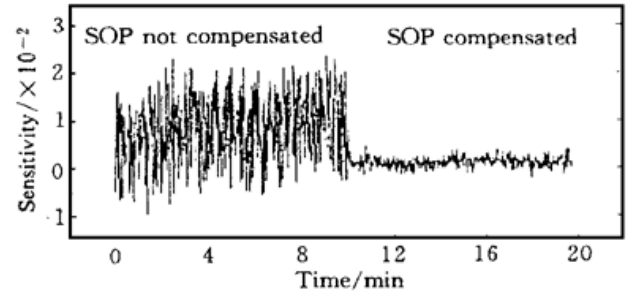


Fig.3 Impact for sensitivity of polarization state compensation (Current: 200 A)

结 论 提出了一种对块状结构光纤电流互感器中的传光光纤进行偏振态补偿的方案。这种新结构采用单模光纤输入, 多模光纤输出。输入光纤采用单模光纤, 使入射到传感单元的光束质量大为提高, 由传感单元到多模输出光纤的耦合损耗显著降低。对输入光纤偏振态扰动的自动补偿使检测精度提高了大约 10 倍, 同时使系统的稳定性也得到明显改善。这种新方案使光纤电流互感器的实用化和产品化又向前迈进了一步。

参 考 文 献

- [1] Rogers J A. Optical technique for measurement of current at high voltage. *Proc. IEE*, 1973, **120**(1): 261 ~ 267
- [2] Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W *et al.*. Recent progress in optical current sensing techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(7): 3097~ 3111
- [3] 梁铨廷. 物理光学, 北京: 机械工业出版社, 1987. 86~ 88

Polarization State Auto-Compensated Optical Fiber Current Transducer

He Jingyi Liu Deming Zhang Xinliang Huang Dexiu

(Department of Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(Received 1 June 1998; revised 1 December 1998)

Abstract A novel bulk type of optical fiber current transducer (OFCT) is presented, in which the state of polarization of the fiber is auto-compensated. Theoretical analysis and experimental results are given. The new structure considerably improves the stability and the accuracy of OFCT.

Key words optical fiber current transducer, state of polarization auto compensation, Farady effect.