

文章编号: 0258-7025(2004)04-0469-04

用于消除振动影响的光纤电流传感器结构

焦斌亮, 王朝晖, 郑绳萱

(燕山大学光电子系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 与传统电磁式电流互感器相比, 基于法拉第效应的光纤电流传感器有许多明显的优点, 因而获得了广泛的研究。光纤的固有双折射是影响传感器精度的主要原因, 如何消除双折射也是研究的关键问题。这种双折射不仅与光纤本身的性能有关, 还与工作时的环境温度、振动等因素有关。当传感头受到强烈振动时, 所产生的机械应力将使传感光纤的固有双折射发生变化, 影响输出光的偏振态, 使传感器精度下降。提出了一种对称型的传感器结构, 采用两套相同的光源及探测器, 使传感光纤中形成传播方向相反的两束光, 利用应力双折射的互易性补偿振动影响。实验表明, 该结构可使传感器性能得到明显的改善, 在 10 g 的振动强度下, 测量结果的线性度达到了 $\pm 0.3\%$ 以下。

关键词 传感器技术; 光纤电流传感器; 应力双折射; 法拉第效应; 机械振动

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

A Configuration of Optical Fiber Current Transducer for Elimination of Vibration Effect

JIAO Bin-liang, WANG Zhao-hui, ZHENG Sheng-xuan

(Department of Opto-Electronics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Optical fiber current transducers based on Faraday effect have a lot of advantages over conventional current transducers and have been studied extensively. The intrinsic birefringence of the sensing fiber is the main cause which affects the measuring precision, and how to eliminate it is the key research topic. The birefringence is not only affected by the features of fiber itself but also is under the influence of environment factors such as temperature and vibration. When a optical fiber current transducer is intensely vibrated, the mechanical stress will change the intrinsic birefringence of the sensing fiber, affecting the output light state of polarization and deteriorating the measuring precision. In this paper a symmetrical transducer configuration with two identical light sources and photodiodes is presented. Two counter-propagating light beams are formed in the sensing fiber and stress-induced linear birefringence is compensated by its reciprocal nature. The experimental results show that this configuration can obviously improve the performance of the transducer and the signal linearity is achieved under $\pm 0.3\%$ with the sensor head exposed to a vibration level of acceleration 10 g.

Key words transducer technique; optical fiber current transducer; stress birefringence; Faraday effect; mechanical vibration

1 引言

在电力系统中, 由于计量和继电保护的需要, 对高压输电线路中的电流进行实时测量是必须的。传

统的方法是采用电磁式电流互感器(CT)。由于高压隔离及消除电磁干扰的需要, 传统电流互感器的体积非常庞大, 造价也很高。从理论上讲, 基于法拉第效应的光纤电流互感器(OCT)可以从根本上解

收稿日期: 2003-07-22; 收到修改稿日期: 2003-11-18

基金项目: 河北省教委自然科学基金(2001266)资助项目。

作者简介: 焦斌亮(1964—), 男, 燕山大学光电子系副教授, 硕士, 主要从事光纤传感器及 CCD 应用技术研究。E-mail: jbl@ysu.edu.cn

决电流互感器的高压隔离问题,此外,在频率特性、动态范围、数据接口及系统造价等方面,光纤电流互感器也有明显的优势。

光纤电流互感器的基本原理是磁致旋光(法拉第)效应,采用光纤圈作为传感头,被测电流导线穿过其中,通过测量线偏振光经过光纤圈时偏振面偏转的角度获得被测电流值,传感头和有源器件之间也通过光纤连接,此所谓全光纤结构。但由于光纤的固有双折射和光纤圈的应力双折射影响线偏振光的偏振态,严重时甚至会淹没法拉第旋转,为此,一种折衷方案是采用块状材料作为传感头,光线通过内全反射形成围绕导体的闭合光路,这种光纤电流互感器称为混合结构。混合结构光纤电流互感器的缺点是玻璃材料加工困难,成本较高。采用特殊工艺对光纤圈进行处理,以消除双折射影响,是全光纤光纤电流互感器研究的主要课题,目前主要采用退火光纤和扭转光纤等方法^[1,2]。

尽管经过处理的光纤圈双折射可以忽略不计,但在光纤电流互感器实际应用时要受到振动、压力、温度等外界环境的影响。其中,机械振动会使传感头中的光学部件产生微小的相对位移,并在传感光纤中引入应力,这些都会使传感头的双折射发生变化,影响测量精度。消除振动影响的基本原理是利用法拉第效应的非互易性,即法拉第旋转角与光传播方向无关,而振动影响是互易的,可通过补偿予以消除。反射式 Sagnac 干涉仪结构^[3,4]就是利用互易补偿原理实现振动补偿的,但这种方法需要产生圆偏振光,对偏振态的控制和调试要求较高,实现困难。本文提出一种对称型的传感器结构,采用两套相同的光源及探测器,使传感光纤中形成两束传播方向相反的线偏振光,利用应力双折射的互易性实现振动补偿。

2 原 理

光纤电流传感器的基本原理如图 1 所示,起偏器产生的线偏振光进入传感光纤,并在电流磁场作用下发生偏转,用渥拉斯顿棱镜将输出光分成相互垂直的 x 分量和 y 分量,它们的相对强度就代表法拉第旋转,因而可以求得被测电流。传感光纤的特性可用琼斯矩阵表示为^[5]

$$M = \begin{pmatrix} \alpha + i\beta & -\gamma \\ \gamma & \alpha - i\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中

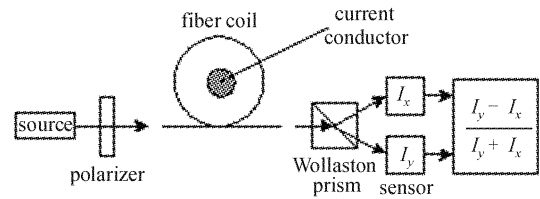


图 1 光纤电流传感器基本原理

Fig. 1 Principle of optical fiber current sensor

$$\alpha = \cos\Delta, \quad \beta = \frac{\delta}{2} \left(\frac{\sin\Delta}{\Delta} \right)$$

$$\gamma = \theta \left(\frac{\sin\Delta}{\Delta} \right), \quad \Delta = \sqrt{\theta^2 + (\delta/2)^2}$$

δ 和 θ 分别是传感光纤的线性双折射和法拉第旋转角。设入射光矢量 E 沿与 x 轴和 y 轴成 45° 的方向振动,则从光纤出射的光矢量为

$$\begin{pmatrix} E_x' \\ E_y' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E \cos 45^\circ \\ E \sin 45^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha + i\beta & -\gamma \\ \gamma & \alpha - i\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \cos 45^\circ \\ E \sin 45^\circ \end{pmatrix} \quad (2)$$

容易求出,探测器的输出 I_x 和 I_y 分别为

$$I_x = |E_x'|^2 = |E|^2 \left(\frac{1}{2} - \theta \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} \right) \quad (3a)$$

$$I_y = |E_y'|^2 = |E|^2 \left(\frac{1}{2} + \theta \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} \right) \quad (3b)$$

所以,传感器输出为

$$I = \frac{I_y - I_x}{I_y + I_x} = 2\theta \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} \quad (4)$$

可见 I 不仅与法拉第旋转角 θ 有关,还与线性双折射 δ 有关,当 δ 的值很小时,由上式可以得到

$$I = 2\theta \frac{\sin 2\Delta}{2\Delta} \approx \sin 2\theta \quad (5)$$

根据 I 值可以得到 θ 值,进而求得被测电流值。由于光纤电流互感器工作的工业环境常常存在较强的机械振动,会引起传感头光学件的相对位移,同时在光纤中产生应力,这些都会使传感头的线性双折射 δ 发生变化,由于 δ 随振动随机变化,相当于在 I 值中引入了噪声,影响系统的测量精度。但由于振动引起的 δ 变化是互易的,对光偏振态的影响与光的传播方向无关,而法拉第旋转是互易的,如果电流磁场使正向传播的线偏振光左旋,则其反向传播时必然右旋,利用这一特性可对 δ 的变化进行补偿。对称式光纤电流互感器结构如图 2 所示,两套相同的光源及探测器通过 2×1 光纤耦合器接入传感光纤的两端,经光纤偏振器 P_1, P_2 产生两个传播方向相反的线偏振光,经过传感光纤圈后由探测器 1 和 2 接收,

其输出信号分别用 I_1 和 I_2 表示。

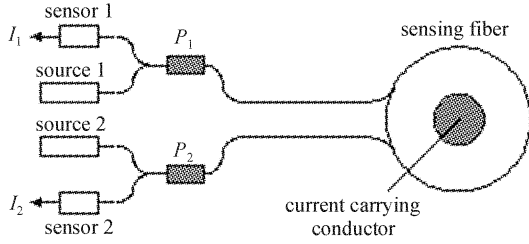


图 2 对称型光纤电流互感器结构

Fig. 2 Symmetrical OCT configuration

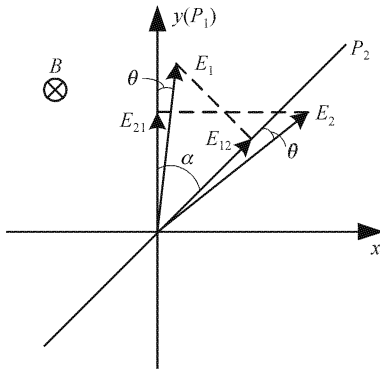


图 3 法拉第效应的非互易特性

Fig. 3 Nonreciprocal nature of the Faraday effect

图 3 表示法拉第效应的非互易特性,设偏振器 P_1 的透光轴沿 y 方向, P_2 的透光轴与 P_1 成 α 角,磁场 B 的方向沿图面向内。光源 1 通过 P_1 产生的线偏振光 E_1 经过传感光纤后产生法拉第旋转 θ , 光源 2 通过 P_2 产生的线偏振光 E_2 沿相反方向传播, 经过传感光纤后转过同样的角度 θ , 则探测器 1 接收到的光矢量是 E_2 在 P_1 上的分量 E_{21} , 探测器 2 接收到的光矢量是 E_1 在 P_2 上的分量 E_{12} , 因此, 两探测器的输出分别为

$$I_1 = \frac{1}{2} |E_{21}|^2 = \frac{1}{2} [|E_2| \cos(\alpha + \theta)]^2 \quad (6a)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} |E_{12}|^2 = \frac{1}{2} [|E_1| \cos(\alpha - \theta)]^2 \quad (6b)$$

式中的系数 $1/2$ 表示 2×1 光纤耦合器的分光比。如果取 $\alpha = \pi/4$, 以上两式可以化简为

$$I_1 = \frac{1}{4} |E_2|^2 (1 - \sin 2\theta) \quad (7a)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} |E_1|^2 (1 + \sin 2\theta) \quad (7b)$$

这是理想的输出情况, 当有振动存在时, 振动引起的线性双折射将使传感器接收到的光强发生衰减, 由于系统的对称性和线性双折射的互易性, 这种衰减对两个方向传播的光波是相等的, 这里用 $L(t)$ 表

示。同时考虑到传感器响应度、信号处理电路的增益等因素, 实际的信号输出可以表示为

$$I_1 = k_1 [1 - L(t)] [1 - \sin 2\theta(t)] \quad (8a)$$

$$I_2 = k_2 [1 - L(t)] [1 + \sin 2\theta(t)] \quad (8b)$$

其中

$$k_1 = \frac{1}{4} |E_2|^2 R_1 A_1, \quad k_2 = \frac{1}{4} |E_1|^2 R_2 A_2$$

R_1 和 R_2 分别为两个探测器的响应度, A_1 和 A_2 分别为两个探测器信号处理电路的增益。通过调节 A_1 和 A_2 可以使 $k_1 = k_2 = k$, 最后, 系统输出可表示为

$$I = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{2k[1 - L(t)][\sin 2\theta(t)]}{2k[1 - L(t)]} = \sin 2\theta(t) \quad (9)$$

$\theta(t)$ 是 t 时刻的法拉第旋转角, 对应于此时的被测电流值。

3 实验

实验所用传感头如图 4 所示, 单根单模光纤通过电流线圈中心, 线圈用单股铜缆均匀绕制 100 圈。采用单根光纤的目的是为了尽量减小静态时的线性双折射, 如果采用光纤圈则必须进行退火处理。光源采用波长 1300 nm 的半导体激光器, 探测器为带尾纤的 PIN 光电二极管。被测电流由 0~30 A 的直流稳压电源(可工作于稳流输出)提供。整个传感头部分按图示振动方向固定在振动台上。

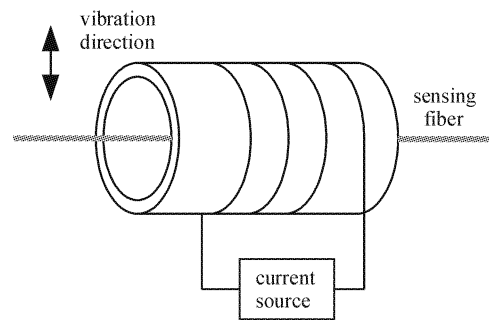


图 4 实验用传感头

Fig. 4 Sensing head for the experiment

图 5 是信号处理电路框图, I_1 和 I_2 代表传统的非对称型光纤电流互感器输出, I 是本文提出的对称型光纤电流互感器输出。增益控制单元用来平衡两路输出, 在被测电流为 0A 时将两路输出 I_1 和 I_2 调成相等, 即 $I = 0$ 。实验时用电压表测试不同电流时的信号值。

实验时振动台的加速度选为 10 g, 频率从 20

Hz 到 1 kHz 自动扫描。图 6(a), (b) 分别是测得的 I_1 和 I 与被测电流的关系曲线。可以看出, 对称型结构的输出信号比非对称结构有很大改善, 计算表明, 其输出信号线性度小于 $\pm 0.3\%$ 。

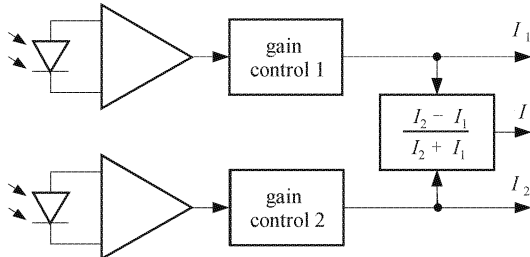


图 5 信号处理电路框图

Fig. 5 Block diagram of the signal processing circuit

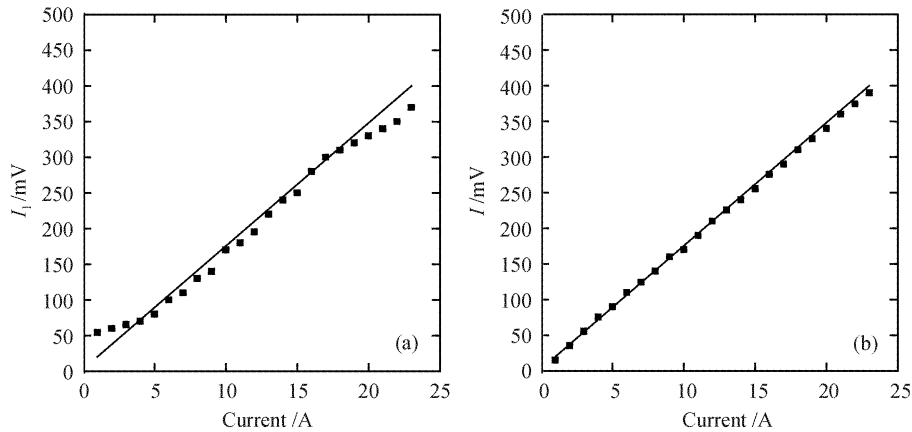


图 6 I_1 (a) 及 I (b) 与被测电流之间的关系

Fig. 6 Relation between I_1 (a) and I (b) with the current

参 考 文 献

- 1 A. H. Rose, Z. B. Ren, G. W. Day. Twisting and annealing optical fiber for current sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11):2492~2498
- 2 A. H. Rose, R. J. Espejo, R. M. Craig. Annealed fiber: properties and applications [J]. *IEEE Proc.*, 1998, **4947**:397~398
- 3 J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho. In-line sagnac

4 结 论

实验表明, 对称型光纤电流互感器结构对机械振动引起的传感光纤线性双折射有良好的补偿作用, 使光纤电流互感器输出信号的线性度达到了 $\pm 0.3\%$ 的精度。但必须注意的是, 这种对称结构是建立在传感光纤本身的静态双折射可以忽略不计的基础上的, 实际应用时的光纤电流互感器传感头通常是多圈光纤圈, 存在较大的应力双折射, 这种双折射还与环境温度密切相关, 必须采取特殊措施进行处理。此外, 这种结构对两路信号处理电路的增益一致性要求严格, 电路的长期工作稳定性还需要进一步研究。

interferometer current sensor [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, **11**(1):116~121

- 4 K. Bohnert, P. Gabus, H. Brändle. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2):267~276
- 5 Liao Yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 191~193

廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 191~193