

基于光纤迈克耳孙干涉仪调解技术的光纤光栅电流传感技术研究

樊彦恩 武帅 贺胜男 李丹丹 王凯 陈信伟

中国电子科技集团第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 将光纤布拉格光栅(FBG)粘贴在超磁致伸缩材料(GMM)上,两端加永磁体材料建立偏置磁场以确定系统静态磁场工作点,采用环氧树脂密封绝缘,放置在电流形成的磁场中,构成光纤电流传感器。利用光纤迈克耳孙干涉仪线性边带对光纤光栅交变应变解调,实现了对交流电流信号的检测。实验测得,在传感器线性输出范围内,可探测到的最大线性电流幅值为1700 A,传感系统电平/电流灵敏度为0.68 mV/A。该电流传感装置具有结构简单,体积小,成本低,为今后电力系统中电流检测装置的研制提供了一种选择。

关键词 光纤光学; 光学电流传感器; 光纤布拉格光栅; 光纤迈克耳孙干涉仪

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080602

Research on Current Sensing Technology Using Fiber Bragg Grating Demodulated by Fiber Michelson Interferometer

Fan Yanen Wu Shuai He Shengnan Li Dandan Wang Kai Chen Xinwei

China Electronics Technology Group Corporation NO.38 Research Institute, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract An fiber current sensor is constructed by placing the gain magnetostrictive material (GMM) on fiber Bragg grating (FBG) system in current-induced magnetic field. The permanent magnet material is added at the two ends of GMM-FBG to form a static working point in bias magnetic field for the system. Besides, the GMM-FBG and permanent magnetic material are sealed by epoxy resin in order to insulate from external environment. Fiber Michelson interferometer linear sideband is used to demodulate the alternating strain on FBG to realize alternating current signal detection. The experimental results show that the maximum detected current is 1700 A and the voltage/current sensitivity is 0.68 mV/A when the system is working in linear region. The proposed current sensing device with simple structure, small volume and low cost provides an alternative choice for future current detecting device in power system.

Key words fiber optics; optical current sensor; fiber Bragg grating; fiber Michelson interferometer

OCIS codes 060.2370; 120.3180; 050.2770; 230.1150; 260.2160

1 引言

随着电力工业的不断发展,对在电力量计环节和继电保护中起重要作用的电流传感器技术要求越来越高。传统的电磁式电流互感器存在着磁饱和、铁磁谐振、频带窄、动态范围小、有油易燃易爆等问题,而光学电流传感器具有绝缘性好、抗电磁干扰^[1]、频带宽、动态范围大,无二次开路产生高压的危险及漏油爆炸等危险,近些年其研究进展十分迅速^[2-5],应用领域不断扩大。但至目前,法拉第磁光效应传感方案仍然受线性双折射问题和环境温度因素的影响^[6-7],光电混合式解决方案仍然的高电位电子电路供电问题及电子电路可靠性问题一直没有很好的解决。

经过十几年的研究和开发,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术已成为光纤传感中可靠性最高、实用性最强的传感技术。超磁致伸缩材料(GMM)具有伸缩系数大、机电耦合系数高、响应速度快等优点,广泛地应用于换能和驱动。将GMM与FBG组合(简称为GMM-FBG)作为传感器进行电流传感的方案成本低,而且不需

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-16; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1206c0805001)、国防计量技术基础科研项目(JSJC2013210C042)

作者简介: 樊彦恩(1985-),女,硕士,助理工程师,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: fanyanen@163.com

要复杂的电隔离,成为近年来研究的一个热点^[8-11]。本文采用GMM-FBG作为工频交流电流传感器,提出了利用光纤迈克耳孙干涉仪(MI)的干涉光谱在某一区域与波长的近似线性关系对FBG波长信息进行解调,实现了对交流电流信号的检测。该电流传感装置具有结构简单,体积小,成本低,为今后电力系统中电流检测装置的研制提供了新思路。

2 引言

GMM与FBG组合测量工频电流的系统原理图如图1所示。FBG电流传感器是在保持环境温度不变的情况下,通过激励电流(由汇流排产生)产生磁场作用到GMM上,从而引起FBG的应变实现电流传感。

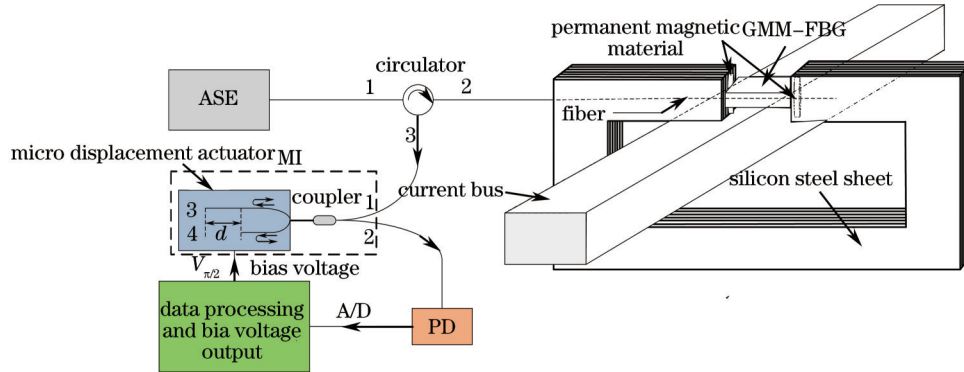


图1 实验装置原理图

Fig.1 Principle diagram of experimental setup

已知磁场强度和电流成线性关系^[8]:

$$H = ki, \quad (1)$$

式中 k 为常数。

永磁材料产生的偏置磁场,使驱动器工作在线性区。因此,FBG受到的应变和磁场也是线性关系:

$$\varepsilon = BH, \quad (2)$$

式中 B 为常数。将(1)式代入(2)式中,就可以得到FBG受到的应变和待测电流的关系:

$$\varepsilon = B'i, \quad (3)$$

式中 B' 为常数。当应力作用于FBG时,纤芯有效折射率和栅格周期的变化导致FBG中心波长漂移为^[8]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = (1 - P_e)\varepsilon, \quad (4)$$

式中 λ_B 为FBG的反射谱中心波长, n_{eff} 为栅区的纤芯有效折射率, Λ 为FBG的栅格周期, P_e 为有效光弹系数,在硅纤介质中, P_e 约为0.22。将(3)式代入(4)式就可以得到FBG中心波长漂移和待测电流之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = Ci, \quad (5)$$

式中 C 为常数。因此,只要解调出FBG中心波长的漂移量,就可以实现电流的测量。利用MI干涉光谱在某一区域与波长的近似线性关系建立数学模型,实现了对FBG中心波长信息的解调。

如图1所示,从FBG反射回来中心波长为 λ_B 的光经环行器和耦合器进入MI,得到干涉信号为

$$I = I_1 R_1 + I_2 R_2 + 2\sqrt{I_1 R_1 I_2 R_2} \cos \varphi(\lambda_B), \quad (6)$$

$$\varphi(\lambda_B) = \frac{4\pi nd}{\lambda_B} + \varphi_0, \quad (7)$$

式中 I_1 和 I_2 为MI两个干涉臂的光强, R_1 和 R_2 分别为对应的两个干涉臂端面反射率, n 为光纤的折射率, d 为两干涉臂的长度差, φ_0 为干涉谱初始相位。当待测交流电流加载到汇流排上时,FBG中心波长 λ_B 就会改变,进而MI干涉谱的相位变为

$$\Delta\varphi(\lambda_B) = \frac{4\pi nd}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} + \varphi_0, \quad (8)$$

将(5)和(8)式代入(6)式,

$$I = I_1 R_1 + I_2 R_2 + 2\sqrt{I_1 R_1 I_2 R_2} \cos\left(C \frac{4\pi n d}{\lambda_B} i + \varphi_0\right), \quad (9)$$

调整 MI 干涉谱的初始相位, 使得 $\varphi_0 = \pi/2$, 如图 2 灰色区域所示。待测交流电流可以表示为 $i = I_0 \sin(2\pi f t)$, 则干涉光强可以表示为

$$I = A - B \sin\left(C \frac{4\pi n d}{\lambda_B} i\right) = A - B \sin\left[C I_0 \frac{4\pi n d}{\lambda_B} \sin(2\pi f t)\right], \quad (10)$$

这样就可以根据光电探测器输出的电压大小, 实现对交流电流的测量。

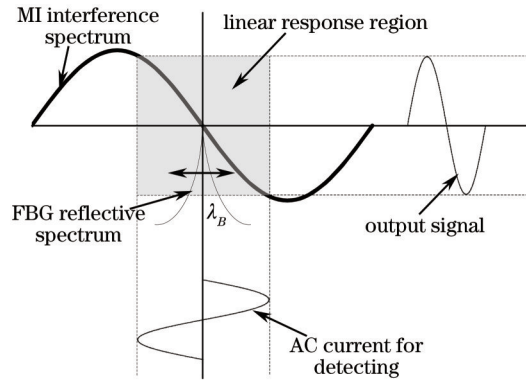


图 2 光纤电流传感器解调原理

Fig.2 Demodulation principle of fiber current sensor

3 光纤电流传感器实验结果

3.1 实验装置介绍

光纤电流传感实验装置原理图如图 1 所示。该实验装置由宽带放大自发辐射(ASE)光源传感部分、解调部分、光电转换部分、数据处理和直流偏置电压电路组成。传感器部分以汇流排作为激励源, 由硅钢片、永磁铁和 GMM-FBG 组成磁路系统。其中, 永磁材料产生偏置磁场, 使驱动器工作在线性区或避免驱动器发生倍频问题。解调部分的 MI 由微位移器和光纤耦合器构成。光电探测器(PD)采用中国电子科技集团第四十四研究所生产的 GT322D 型系列 InGaAs 探测器。

ASE 平坦区的波长范围为 1530 ~ 1570 nm。传感部分的实物图如图 3 所示。其中硅钢片、永磁铁和 GMM-FBG 由红色环氧树脂密封, 起到和外界高压绝缘的作用。FBG 反射光谱由光纤输出, 中心波长 $\lambda_B \approx 1550$ nm。

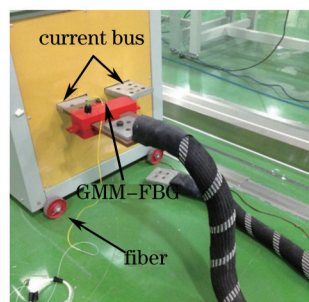


图 3 光纤电流传感器实物图

Fig.3 Object graph of fiber current sensor

解调部分的 MI 实物图如图 4(a) 所示。将一个 2×2 单模光纤耦合器的端口 3 和 4 分别镀上金属高反膜就构成了光纤 MI。将 MI 的光纤干涉臂用胶水(UV60LOT300, THORLABS)固定在微位移器的表面, 最后采用环氧树脂密封, 以减少外界环境对 MI 干涉光谱的影响。MI 传感臂和参考臂的臂长差为 243 mm, 对应的干涉谱自由光谱区为 3.3 nm, 如图 4(b) 所示。其中, 微位移器是根据实验参数计算, 从成都汇通西电电子有限公司定制的, 位移精度可以达到 0.01 mm。微位移器的两端引出两根电线, 直流偏置电压加载在电线两端, 来调整 MI 的初始相位。

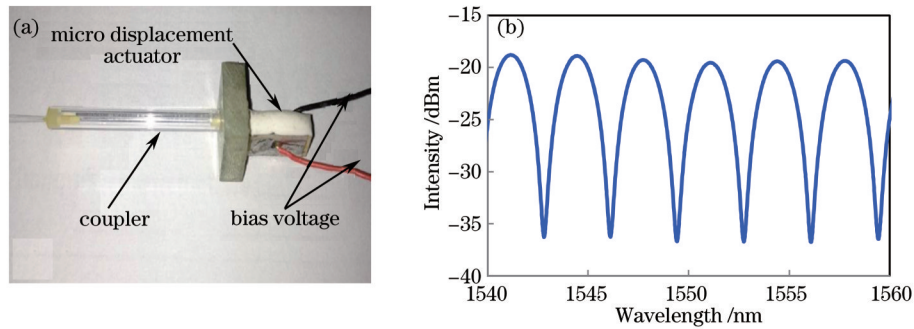


图4 (a) MI实物图; (b) 对应的MI干涉谱

Fig.4 (a) Object graph of MI; (b) corresponding interference fringe of MI

3.2 传感系统预校准

如图1所示, ASE发出的光从环形器端口1入射, 从端口2透射进入FBG, 经FBG反射, 从端口3输出中心波长为 λ_b 的反射谱耦合进入MI。该反射光谱从耦合器端口1入射, 经传感臂和参考臂端面反射, 在端口2输出干涉信号, 然后由PD转化为电压信号, 经A/D采集后进行数据处理。在加载交流电流信号之前, 需要调整微位移器的直流偏置电压, 使MI干涉谱的初始相位 $\varphi_0 = \pi/2$ 。直流偏置电压从0逐步增大, 使得FBG中心波长遍历MI半个自由光谱区, 与此同时, A/D采集每一个直流偏置电压对应的PD输出的电压信号。最后采用线性插值的方法得出MI初始相位 $\varphi_0 = \pi/2$ 对应的直流偏置电压 $V_{\pi/2}$, 并将微位移器的偏置电压保持在 $V_{\pi/2}$ 不变。

3.3 实验结果分析

将交流电流的幅值从小到大逐渐加载在汇流排上, 可以得到PD输出的电压信号和待测电流幅值的线性关系趋势线, 如图5所示。从图中可以看出, 实验数据的线性相关性为99.06%。在传感器线性输出范围内, 可探测到的最大线性电流幅值为1700 A, 最小电流幅值为100 A, 传感系统电平/电流灵敏度为0.68 mV/A。继续增大待测电流的幅值, FBG中心波长进入MI干涉光谱非线性区, 输出电压信号就会发生畸变。减小MI两个干涉臂的臂长差可以增大传感器线性输出范围, 并且臂长差越短, 外界对MI的影响越小, 但是这样就会牺牲传感器的灵敏度。传感器的灵敏度和动态范围始终是系统中相互制约的两个参数。

线性边带解调方案对光强稳定性的要求比较高, 如果将光源光强进行实时监测, 实现对传感器输出信号的实时补偿, 也可以提高系统稳定性。

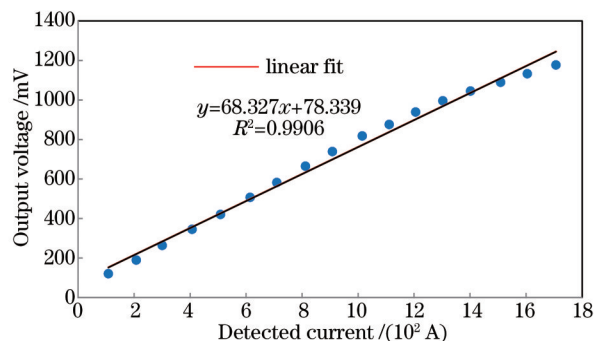


图5 PD输出电压和被测电流之间的关系

Fig.5 Relationship between PD output voltage and detected current

3.4 温度特性分析

以上实验均建立在GMM-FBG不受周围环境温度影响的基础上。实际上, GMM应变特性和FBG传感特性都与温度有关。因此, 对GMM-FBG组合的传感系统进行了温度特性实验, 并介绍了目前普遍采用的温度补偿方案。

将汇流排连同红色环氧树脂密封的硅钢片、永磁铁和GMM-FBG放入高低温交变箱中。在汇流排加载工频电流, 电流幅值保持不变(303 A)。开启高低温交变箱, 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 每 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 记录一组数据, 得到实测温度与PD输出电压的关系, 如图6所示。通过实验数据分析可得, 在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, PD输出电

压变化了 120 mV,因而,在实际应用中必须采取温度补偿技术,来确保传感系统的稳定性。可以借鉴比较简单可行的补偿方案。其中,易本顺等^[12]提出了两种简单的磁致伸缩调制型 FBG 的温度补偿方法,利用磁场和磁致伸缩材料对 FBG 的布拉格波长进行调制,将一对 FBG 按特定的结构固定,使得磁致伸缩效应对两只 FBG 的布拉格波长的调制效果相互叠加而温度的影响相互抵消,补偿后的磁场调制型 FBG 温度在 22 °C~80 °C 的范围内,波长变化仅为 0.11 nm。将在今后的研究工作中建立 GMM-FBG 组合的传感系统温度输入-输出关系,对不同温度下检测的电流信号实现温度补偿。

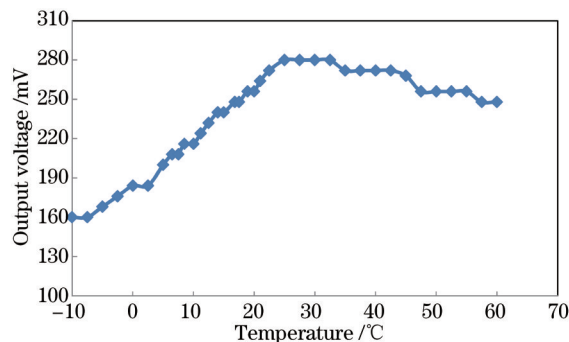


图 6 PD 输出电压和温度之间的关系

Fig.6 Relationship between PD output voltage and temperature

4 结 论

研制了应用于电力工程的工频电流传感装置,采用 GMM-FBG 作为工频交流电流传感器,通过激励电流产生磁场作用到 GMM 上,从而引起 FBG 交变应变,实现了对交流电流的传感。然后采用线性边带解调方案,利用 MI 干涉光谱在某一区域与波长的近似线性关系,研制了可用于 FBG 应变信号解调的解调器,解决了交变电流传感波长信息解调问题。实验结果表明,在传感器线性输出范围内,可探测到的最大线性电流幅值为 1700 A,最小电流幅值为 100 A,传感系统电平/电流灵敏度为 0.68 mV/A。由于 GMM 应变特性和 FBG 传感特性都与温度有关,对传感系统进行了温度特性实验。该电流传感装置具有结构简单,体积小,成本低,为今后电力系统中电流检测装置的研制提供了一种选择。

参 考 文 献

- 1 Yang Xueyu, Liao Yanbiao, Wu Gengsheng. Analysis of detection system of fiber current sensors[J]. Chinese J Lasers, 1985, 14(5): 312-316.
杨雪郁, 廖延彪, 吴庚生. 光纤电流传感器监测系统的分析[J]. 中国激光, 1985, 14(5): 312-316.
- 2 Wang Tingyun, Luo Chengmu, TianYuxin. Study on optical current transformer in power system[J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(1): 38-41.
王廷云, 罗承沐, 田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 38-41.
- 3 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.
- 4 Xu Shiqing, Dai Shixun, Zhang Junjie, *et al.*. Recent progress of all fiber optic current sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(1): 41-45.
徐时清, 戴世勋, 张军杰, 等. 全光纤电流传感器研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(1): 41-45.
- 5 Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Zhaoyang, *et al.*. A new all digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 77-80.
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 77-80.
- 6 Kang Chong, Lü Wenlei, 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, 等. 光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.
- 7 Li Chongzhen, Wu Baojian. Evolution of polarized state in linearly birefringent magneto-optic fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3153-3158.
李崇真, 武保剑. 线双折射磁光光纤光栅中光偏振态演化[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3153-3158.

- 8 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian. Research on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 949-953.
熊燕玲, 赵洪, 张剑. 基于光纤光栅的光学电流互感器[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 949-953.
- 9 Liao Bangquan, Feng Dejun, Zhao Qida, *et al.*. Theoretical and experimental research on fiber Bragg grating electric current sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9): 1092-1095.
廖帮全, 冯德军, 赵启大, 等. 光纤布拉格光栅电流传感的理论和实验研究[J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1092-1095.
- 10 Zhou Wangmin, Wei Zhiwu, Li Wenbo, *et al.*. Novel fiber Bragg grating large current sensor insensitive to temperature [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2133-2137.
周王民, 魏志武, 李文博, 等. 温度不敏感光纤光栅大电流传感器[J]. 高压电技术, 2009, 35(9): 2133-2137.
- 11 H Zhao, F Sun, Y Yang, *et al.*. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor[J]. Opt Commun, 2013, 308: 64-69.
- 12 Yi Benshun, Hu Ruimin, Zhu Zibi, *et al.*. Temperature compensation techniques for fiber Bragg gratings tuned by magnetostrictive transducers[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1085-1088.
易本顺, 胡瑞敏, 朱子碧, 等. 磁致伸缩调制型光纤 Bragg 光栅的温度补偿方法[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1085-1088.

栏目编辑: 苏 岑