

Fiber Bragg Grating AC Current Measurement Based on Twin-Core Fiber Filter *

YAO Yuan^{1,2*}, YI Ben-shun¹, DONG Xiao-peng³, ZOU Yi³, XIAO Jir-sheng¹

1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Department of Information Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
3. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China

Abstract: The measurement of alternating current (AC) is realized by using fiber Bragg grating (FBG), giant magnetostriction material (GMM), and the interrogation technology of twin-core fiber filter. Based on the theoretical analysis of the principle of the FBG current measurement, the magnetostrictive effect of GMM, and the interrogation technology of twin-core fiber filter are introduced. The sensing unit of AC current measurement is constructed with GMM and FBG. When the AC exciting current is in the scope of 0 ~ 4.5 A (50 Hz) through a solenoid coil, the feasibility of AC current measurement by using this method was verified.

Key words: current measurement; fiber Bragg grating; twin-core fiber; magnetostriction effect; wavelength demodulation

EEACC:7230E;7310D

基于双芯光纤滤波器解调的光纤光栅电流测量 *

姚 远^{1,2*}, 易本顺¹, 董小鹏³, 邹毅³, 肖进胜¹

1. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;
2. 华中师范大学信息技术系, 湖北 武汉 430079;
3. 厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005

摘要: 利用光纤光栅 (Fiber Bragg grating, 简称 FBG)、超磁致伸缩材料 (Giant magnetostriction material, 简称 GMM) 和基于双芯光纤滤波器的解调系统实现了交流电流的测量。在介绍超磁致伸缩材料的磁致伸缩效应、光纤光栅检测电流原理以及双芯光纤滤波器解调原理的基础上, 借助超磁致伸缩材料和光纤光栅等构建了电流测量单元。利用设计的电流测量单元, 在施加 0 ~ 4.5 A (50 Hz) 范围的交流激励电流时, 经基于双芯光纤滤波器的解调系统解调, 验证了采用该方案检测电流的可行性。

关键词: 电流测量; 光纤光栅; 双芯光纤; 磁致伸缩效应; 波长解调

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)06-1070-05

随着电力工业的迅速发展和光纤传感器固有的优点, 使得光纤电流传感技术迅速发展, 陆续有专家和学者尝试利用具有波长调制、分辨率高、抗电磁干扰、体积小、重复性好、易构成分布式结构等优点的光纤光栅 (Fiber Bragg grating, 简称 FBG)^[1] 传感技术来制作光纤电流传感器, 并取得了一定的成果。Cavaleiro^[2] 和 Jia^[3] 提出利用附在光纤光栅周围的金属 (铝或铜) 模或金属套产生的热效应调制方

法, Zhao^[4] 等利用电磁铁产生的电磁力驱动带有光纤光栅的特定结构产生的力效应调制方法, Dong 等人采用带有高双折射光纤 Sagnac 环路滤波器的 FBG 波长解调电流传感^[5], 以及基于压电陶瓷堆/管^[6-7] 的电致伸缩效应、磁致伸缩合金^[8] 或超磁致伸缩材料 (Giant magnetostriction material, 简称 GMM)^[9-10] 的磁致伸缩效应和光纤光栅构建特定结构相结合来实现电流的测量被陆续报道, 但也存

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (60472025)

收稿日期: 2007-11-12 修改日期: 2007-12-28

在一些问题:比如无法克服环境温度的影响^[2-3,5]、复杂的结构设计^[4]、较小的测量范围^[6]、只能实现直流电流的测量^[2,9],即使可以测量交流但解调系统也十分复杂^[4,10],加之现代电力系统大多为交变电流(或电压)信号,寻找新的光纤光栅动态解调方法也是大势所趋。

当交流电流激励螺线管时,在螺线管内的超磁致伸缩材料产生相应的应变,导致粘贴在其表面的光纤光栅中心波长发生移动,经基于双芯光纤滤波器的光纤光栅波长解调系统的处理,成为光纤光栅交流电流测量的一种新方案。

1 光纤光栅电流传感器原理

超磁致伸缩材料一经发现,立即受到科技界、工业界和政府部门特别是军事部门的高度关注,它已在磁电—机换能器、声纳系统、传感器中得到广泛应用。

1.1 超磁致伸缩材料的磁致伸缩效应

超磁致伸缩材料在磁场作用下具有较大的磁致伸缩效应,当外加磁场强度较低、激励频率较低条件时磁致伸缩产生的形变可表示为^[11]:

$$\epsilon = \nu E_y^H + qH \tag{1}$$

式中: ν 为超磁致伸缩材料棒长度方向的应变变量; E_y^H 为材料在应变方向的应力; E_y^H 为给定磁场强度下 GMM 的杨氏模量; q 为磁致伸缩系数, H 为外加磁场强度。

由式(1)可知:在杨氏模量 E_y^H , 压应力 和磁致伸缩系数 q 一定时,当对 GMM 施加适当的偏置磁场和适当的预应力时,磁致应变变量 ϵ_m 和外加磁场强度 H 存在线性关系,即超磁致伸缩材料工作在线性区。假定材料的初始长度为 L , 材料变化的长度为 L_m , 则可表示为:

$$\epsilon_m = \frac{L_m}{L} = qH \tag{2}$$

螺线管的磁场强度 H 与激励电流 I_M 成正比:

$$H = kI_M \tag{3}$$

由式(2)和式(3)可得磁致伸缩材料的应变与激励电流的关系为:

$$\epsilon_m = \frac{L_m}{L} = qkI_M = k_1 I_M \tag{4}$$

1.2 光纤光栅检测交流电流原理

根据耦合模理论,则可导出光纤布拉格光栅方程^[11]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \tag{5}$$

式中: λ_B 为光纤光栅 Bragg 波长; n_{eff} 为光纤光栅纤

芯有效折射率; Λ 为光栅周期。

由式(5)可以看到,光纤光栅 Bragg 波长取决于光栅周期 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff} ,这两个参数任何一个发生变化的物理过程都将引起 Bragg 波长的漂移。假设在温度不变的条件,光纤光栅受到均匀轴向应力产生应变 ϵ_z 时,中心波长的漂移 $\Delta\lambda_B(\epsilon_z)$ 与光纤光栅轴向发生的应变 ϵ_z 的关系为:

$$\Delta\lambda_B(\epsilon_z) = \left\{ 1 - \frac{1}{2} n_{eff}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \epsilon_z \lambda_B = k_2 \epsilon_z \lambda_B \tag{6}$$

式中: $\Delta\lambda_B(\epsilon_z)$ 为光纤光栅在仅受轴向应力时中心波长的变化量, λ_B 为光纤光栅在未受力时的中心波长, P_{11} 和 P_{12} 为光弹张量的 Pockels 系数, μ 为泊松系数, $k_2 = 1 - \frac{1}{2} n_{eff}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]$ 。

由式(6)可知当温度保持不变,光纤光栅传感器的轴向应变发生改变时,光纤光栅中心反射波长会产生相应的移动。将光纤光栅粘贴在磁致伸缩材料表面,光纤光栅的轴向应变 ϵ_z 和超磁致伸缩的应变方向 ϵ_m 一致的前提下,忽略粘贴效应的影响,则将式(4)代入式(6):

$$\Delta\lambda_B(\epsilon_z) = k_2 \epsilon_z \lambda_B = k_2 k_1 I_M \lambda_B \cong k_3 I_M \tag{7}$$

式(7)可以看到,将光纤光栅沿圆柱形磁致伸缩材料轴向粘贴,在磁场作用下,磁致伸缩材料长度在轴向会发生变化,从而光纤光栅波长的移动 $\Delta\lambda_B$ 可以线性地反映被测电流 I_M 的变化,通过一定方式解调出光栅 Bragg 波长的移动,进而可以实现被测电流的大小。

基于磁致伸缩效应的 FBG 交流电流的测量与直流电流的测量在原理上是一致的,但又存在以下不同点: 解调系统需满足一定频率的交变电流信号变化的要求; 由于温度跟直流电流引起的波长变化在效果上是一样的,而交变的波长变化量与温度引起的波长变化量可以在波形上进行区分,因而在温度波动不大的环境下直流电流测量的温度补偿比交流电流测量的更复杂; 考虑磁致伸缩材料的动态响应特性及线性特性时,因为光纤光栅电流传感系统解调器输出的电压信号与螺线管是否施加偏置磁场有密切的关系,这主要由超磁致伸缩材料的一个重要特性决定的,那就是超磁致伸缩棒在正反向磁场中都是伸长的,伸长量只与磁场强度的绝对值有关,与磁场的正反方向无关,因此当不加偏磁时,规定一个方向为正,待测交流变化一个周期时,螺线管内的磁场半个周期为正,半个周期为负,此时超磁致材料棒的应变将变化两个周期,即应变的频

率将是待测信号频率的两倍,当给螺线管施加直流偏置后,即给螺线管施加偏置磁场后,就不会出现倍频现象,从而实现交流电流的测量。

1.3 基于双芯光纤滤波器的波长解调技术

光纤光栅波长的解调是光纤光栅传感器应用的关键技术之一,为了实现光纤光栅布拉格波长偏移量的检测,国内外相关研究机构与学者针对光纤光栅传感器的不同应用场合,提出并开拓了多种解调方法^[5,12,16],本文借助双芯光纤来实现光纤光栅交流电流的波长解调。

双芯光纤是利用光的消逝场在两根纤芯之间的耦合作用,实现对光功率、波长和极化态等的多种选择功能。双芯光纤的传输特性可用耦合模理论进行分析,在弱导近似下,若两纤芯参数完全相同,初始时只有中心位置光纤有输入信号,则两根光纤中传输的光功率分别近似表示为^[13-14]:

$$\begin{cases} P_1(z) = \cos^2(KL) \\ P_2(z) = \sin^2(KL) \end{cases} \quad (8)$$

其中耦合系数 $K = \frac{(2)^{\frac{1}{2}} U^2 K_0 (\frac{Wd}{a})}{aV^3 K_1^2(W)}$; $U = a \sqrt{(K_0^2 m_1^2 - \beta^2)}$; $W = a \sqrt{(\beta^2 - K_0^2 n_2^2)}$; $V = K_0 a \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$; $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\beta = \frac{m_1^2 - m_2^2}{2m_1^2}$, 为真空中光波长, β 为光纤基模的传输参数, a 是纤芯半径, d 是两光纤纤芯中心间距, L 是光纤长度, K_0 及 K_1 是零阶和一阶修正的第二类 Bessel 函数。

由式(8)可见在 Core₁ 中传输的光功率成周期性变化。实验所用的双芯光纤是包含一对相同纤芯的特种光纤,结构如图 1 所示。光纤中的两个纤芯半径均为 8 μm,其中一个纤芯位于光纤中心,另一个纤芯与位于中心纤芯的距离(圆心之间)为 14 μm,光纤外径为 125 μm,因此可与普通单模光纤良好熔接。将双芯光纤的 Core₁ 两端与单模光纤纤芯熔接,再将双芯光纤一端固定并拉直,光在一端通过单模光纤注入双芯光纤 Core₁ 中,经过两纤芯的耦合在出射端,Core₁ 的光进入单模光纤继续传输,其功率呈现周期性改变,而 Core₂ 中的光则进入单模光纤的包层逐渐衰减掉。光谱仪观察到的双芯光纤 Core₁ 透射谱如图 2 所示,经过两纤芯的耦合在出射端 Core₁ 出射的光谱在一定范围内具有线性特征,因而可作为边缘滤波器进行波长解调。该方案由于可以通过选择双芯光纤长度等参数改变滤波器的波长特性,且直接输出对应于波长变化的电信号,适用于波长可变的光纤光栅传感器,具有很大的通用性,加之采用光波导结构

具有高速的动态解调能力,可以实现高频信号的解调,是一种较好的解调方案。

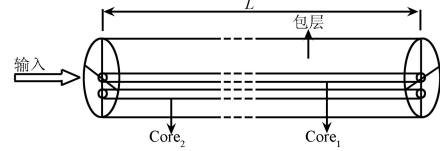


图 1 双芯光纤结构图

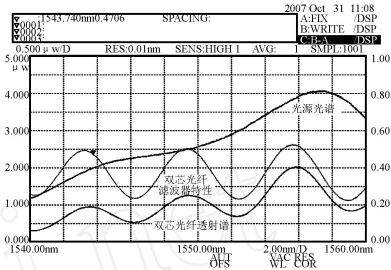


图 2 双芯光纤滤波器的测试曲线

2 实验与结果分析

光纤光栅交流电流测试系统如图 3 示意。光纤光栅中心波长为 1 550.797 nm,长度为 10 mm,经光谱仪测试的光谱见图 4 所示;ASE 为宽带光源;光电探测部分为具有隔直流的多极放大电路;双踪示波器为 TDS1002。螺线管长度为 50 mm,导线匝数 $m_1 = 500$, $m_2 = 1 000$;超磁致伸缩材料为甘肃天星稀土功能材料有限公司研制,外形为圆柱形,直径 8 mm;长度 15 mm。沿超磁致伸缩材料的轴向,将传感光纤光栅 FBG 用 SE40 光学胶粘贴于 GMM 棒上。将 GMM 棒置于螺线管的中心,磁场的强弱由螺线管的激励电流决定。

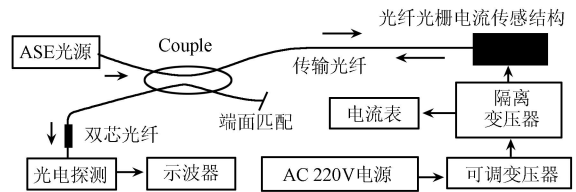


图 3 光纤光栅交流电流测试实验系统

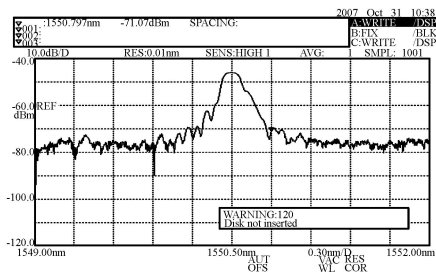


图 4 光纤光栅传感器的光谱

为克服线圈通电发热使超磁致伸缩材料棒温度升高,进而影响测量精度,在超磁致伸缩材料棒和外壳间的结构设计中,我们通过填充隔热材料、缩短

测试时间进而减缓温度对测试数据的影响,在实际工业现场可以采用水冷或电制冷结构来实现工作温度的稳定,还可以通过双光纤光栅的结构来实现传感器的温度补偿^[15]。

利用交流调压器施加 50 Hz 的交流激励电流于螺线管中,借助图 4 的测试系统,在施加直流偏置下,以 500 mA 步进,2 A、4 A、4.5 A 交流激励下(由于信号源能提供的电流大小有限,加上螺线管导线电流的限制以及大电流时螺线管发热的原因,没有进行更大电流的测试,下一步准备通过改变螺线管结构的设计进而对更大的激励电流进行测试。当信号频率升高时,螺线管的阻抗加大,更高频率的测试需要相应的功率放大器来模拟被测试的高频信号进而验证该方法对高频交流信号的测量效果),经基于双芯光纤滤波器的解调系统的电信号送入示波器见图 5、6、7 所示。由于测试的是实际电网的交流电压,且电网受各种因素的干扰,加上光电探测部分没有经过复杂的信号滤波电路处理,看到解调器输出的电压有波动并带有干扰毛刺现象,见图 5 示意。当施加 4 A 激励时,看到恢复出的完整的正弦波激励电压,见图 6 示意。

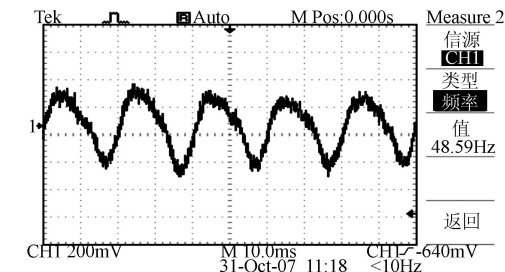


图 5 2A 激励时双芯光纤解调器输出电压特性

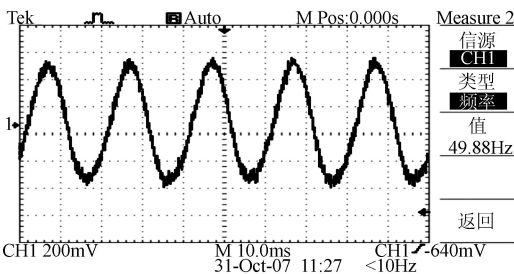


图 6 4A 激励时双芯光纤解调器输出电压特性

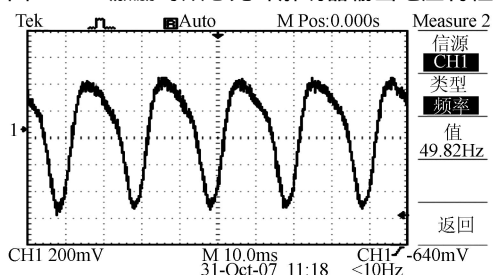


图 7 4.5A 激励时双芯光纤解调器输出电压特性

交流电流的测量是经过交流电流激励磁致伸缩材料产生位移,然后通过粘接工艺将此位移直接传递给 FBG,进而引起 Bragg 波长移动,通过解调系统将波长变化量转换为光强变化,最后经光电检测电路将光信号变为电信号,由于中间环节多且复杂,定量分析误差来源很困难。总结影响电流测量误差的主要因素有: 光纤光栅与超磁致伸缩材料的粘贴工艺、胶层厚度、粘贴角度以及粘贴剂的应力传导滞后效应等引起的误差; 磁致伸缩材料非线性响应及磁滞回线的影响; 双芯光纤滤波器的最佳工作点和解调精度的影响; 光电检测电路噪声及信号变换的误差等。

3 结束语

本文基于双芯光纤滤波器,通过光纤光栅与超磁致伸缩材料相结合,并采用设计的电流测量单元,对 0~4.5 A (50 Hz) 范围变化的交流电流进行了测试,验证了该方法的可行性,由于激励源的电压稳定性,磁致伸缩材料的磁滞特性、环境温度以及解调仪器的解调精度等影响,更高频率和更精确的测试以及光纤光栅解调系统的校准等将是下一步要做的工作。

参考文献:

- [1] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing [M]. Boston London: Artech House, 1999.
- [2] Cavaleiro P M, Araujo F M and Lobo Ribeiro A B. Metal-Coated Fibre Bragg Grating Sensor for Electric Current Metering. Electronics letters[J], 1998, 34(11): 1133-1134.
- [3] Danping, Jia, Limin, Zhao, Yinwen, Lin. A Copper Coated Fiber Bragg Grating Current Sensor [C]// Proceedings of SPIE 2005, 5642: 515-521.
- [4] Yong Zhao, Qing-yao Meng, Kun Chen. Novel Current Measurement Method Based on Fiber Bragg Grating Sensor Technology[J]. Sensors and Actuators, 2006A, 126: 112-116.
- [5] Dong X P, Chu B C B, Yi B, Chiang K S. Novel Method for the Demodulation of Wavelength Shift of Fiber Bragg Gratings [C]// Proceedings of SPIE 2001, 4579: 184-187 (APOC2001 Asia-Pacific Optical and Wireless Communications Conference, 11-15 November 2001, Beijing).
- [6] 赵洪霞, 鲍吉龙. 一种新颖的光纤光栅电流传感器[J]. 量子电子学报. 2005, 22(6): 951-954.
- [7] Lukasz Dziuda, Pawel Niewczas, James R. McDonald. Hybrid Fiber-Optic Current Sensor for Remote Monitoring of Electrical Submersible Plant[J]. IEEE Sensors, 2005: 1100-1103.
- [8] Mora J, Ll. Mart ñez-Le òn, A. D ?? ez, J. L. Cruz, M. V. Andr ? es. Simultaneous Temperature and Ac-Current Measurements for High Voltage Lines Using Fiber Bragg Gratings

- [J]. *Sensors and Actuators*, 2006A, 125:313-316.
- [9] 陈冠三. 光纤光栅电流传感器[J]. *传感技术学报*, 2000, 03, 174-176.
- [10] Satpathi D, Moore JA, Ennis, MG. Design of a Terfenol-D Based Fiber-Optic Current Transducer[J]. *IEEE sensors Journal*. 2005, 5(5):1057-1065.
- [11] 曹淑瑛, 王博文, 闫荣格, 黄文美, 等. 超磁致伸缩致动器的磁滞非线性动态模型[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11):145-149.
- [12] 姚远, 易本顺, 肖进胜. 光纤布拉格光栅传感器的波长解调技术研究进展[J]. *光通信技术*, 2007, 31(11):41-45.
- [13] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社, 第1版, 2005.
- [14] Peterka P, Kasik I, Kanka J, et al. Twin-Core Fiber Design and Preparation for Easy Splicing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(12):1656-1658.
- [15] 姚远, 易本顺, 肖进胜, 李朝辉. 光纤布拉格光栅传感器的温度补偿研究[J]. *应用激光*, 2007, 27(3):192-200.
- [16] 邹毅, 董小鹏, 李伟文, 齐洁. 采用可调双芯光纤解调的光纤光栅温度传感研究[C]// 全国第13次光纤通信暨第14届集成光学学术会议论文集, 2007, 11:355-358.



姚远(1974-),男,河南息县人. 讲师, 博士研究生. 主要研究方向为光电信息处理、信息融合、测控网络等. 发表论文多篇, yaoyuan@mail.ccnu.edu.cn

www.cnki.net