

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.02.016

光电器件研究与应用

基于超磁致伸缩材料的 FBG 电流传感系统

陈 霄^{1,2}, 易永仙^{1,2}, 范 洁^{1,2}, 周 玉^{1,2}, 姜明顺³, 隋青美³

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 国家电网公司电能计量重点实验室, 南京 211103;
3. 山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘要: 基于 GMM(超磁致伸缩材料)的 FBG(光纤布拉格光栅)电流传感器具有光学电流传感器的优点。利用自行配制的环氧树脂胶将 FBG 与 GMM 封装为一体作为传感器探头,通过增加偏置磁场改变传感器的静态工作点,采用高频性能良好的铁氧体材料作为导磁回路,约束交变电流产生的磁场并引导进入传感器探头,进而将电流的变化转变成为 FBG 的波长变化,通过 FBG 解调系统实现电流测量。通过实验对该传感器的静态和动态响应进行测试,取得了良好的实验结果。

关键词: 电流传感器;超磁致伸缩材料;光纤布拉格光栅

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2016)02-0050-03

FBG Current Sensing System Based on Giant Magnetostrictive Material

CHEN Xiao^{1,2}, YI Yong-xian^{1,2}, FAN Jie^{1,2}, ZHOU Yu^{1,2}, JIANG Ming-shun³, SUI Qing-mei³

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. State Grid Key Laboratory of Electric Power Metrology, Nanjing 211103, China; 3. School of Control Science and Engineering, Jinan 250061, China)

Abstract: The current sensor based on Giant Magnetostrictive Material (GMM) and Fiber Bragg Grating (FBG) has the advantages of optical current sensor. In this paper, a sensor probe is formed by combining FBG and GMM using home-made epoxy glue. The static operation point of sensor is changed by adding a bias magnetic field. Ferrite material with good high-frequency performance is used as magnetism-guided loop to confine and send the magnetic field into the sensor probe. The magnetic field is generated by the alternating current. Then the change of current is turned into the wavelength shift of FBG. Thus the current measurement can be realized through the FBG demodulation system. Static and dynamic responses of the sensor are tested experimentally. The experimental result shows that the proposed method can effectively measure the current.

Key words: current sensor; giant magnetostrictive material; fiber Bragg grating

0 引言

基于 GMM(超磁致伸缩材料)的 FBG(光纤布拉格光栅)电流传感器具有光学电流互感器的优点^[1-3],且不受光纤线性双折射的影响^[4-5],近年来受到国内外研究者的极大关注。美国 GE 公司的 D. Satpathi 等人用铁磁材料叠片组成回路,以此约束并引导母线电流磁场沿 GMM 棒应变方向取向,并用 FBG 检测 GMM 棒在磁场下的应变,结果表明,在 700 A 电流以内传感器有很好的线性响应^[6]。D. Reily 等人组建了基于 GMM-FBG 的电流互感器,采用螺线管结构实现电磁转换,并利用钕钴磁体产生偏置磁场,实验证明,该电流互感器可以同时测量电流和温度,测量范围分别是 0.3~1.0 A 和 18~90 °C^[7]。国内的熊艳玲等人首次提出了将 GMM-FBG 传感器放置在通电螺线管里,实现了工频电流的测量。但在传感器的静态和动态特性方向仍有较大的研究空间^[8]。

本文利用环氧树脂胶将 FBG 与 GMM 封装为一体作为传感器探头,通过增加偏置磁场改变传感器的静态工作点,采用高频性能良好的铁氧体材料作为导磁回路,约束交变电流产生的磁场并引导其进入传感器探头,进而将电流的变化转变成 FBG 波长的变化,从而实现电流测量。通过实验对传感器的静态和动态响应进行了测试,取得了良好的实验结果。

1 GMM-FBG 电流传感机理

1.1 GMM 的磁致伸缩效应

GMM 是一种在常温和低场 ($\mu_0 H_s < 0.3 \text{ T}$) 下具有很大磁致伸缩应变的稀土合金材料,组分为 $\text{Tb}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_{2-y}$ ($x \approx 0.3, y \approx 0.5 \sim 0.8$) 的 Terfenol-D 合金棒材。与传统的压电陶瓷相比,它具有磁致伸缩系数大、响应速度快和磁致伸缩曲线性好等优点。当 GMM 处于磁场中时,其形变值与磁感应强度 H 的关系为

收稿日期:2015-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174018);山东大学基本科研业务费资助项目(2014YQ009)

作者简介:陈霄(1985—),男,江苏连云港人。工程师,博士,主要从事新型检测技术和电力计量方面的研究。

$$\frac{\Delta L}{L} = \sum_{n=1}^{\infty} CH^2, \quad (1)$$

式中, L 、 ΔL 和 C 分别为 GMM 的长度、长度的变化值和伸缩系数。在实际应用时,通常采用 GMM 的轴向应变,其值为

$$\epsilon_m = \Delta L/L = CH^2, \quad (2)$$

可见, GMM 的轴向应变与外界磁场的强度可以近似看成二次方关系,在实际应用中,一般取它的线性区^[9]。

1.2 基于 FBG 的磁场测量原理

根据耦合模理论, FBG 的反射中心波长 λ_B 取决于 FBG 的周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 。利用 FBG 对应变进行测量时,由应变引起的中心波长漂移量可由下式给出:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}} \cdot \Lambda, \quad (3)$$

式中, $\Delta\Lambda$ 为光纤在应力作用下的弹性形变; Δn_{eff} 是由光纤的弹光效应引起的有效折射率的变化。

根据材料力学原理与弹光理论,可求得应变导致的 FBG 中心波长的漂移量:

$$\Delta\lambda_B = \left\{ 1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \cdot \epsilon_z \lambda_B, \quad (4)$$

在式(4)中引入 FBG 相对波长应变灵敏度系数 K_ϵ , K_ϵ 的表达式为

$$K_\epsilon = \left\{ 1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \lambda_B, \quad (5)$$

可得出

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \cdot \epsilon_z, \quad (6)$$

式(6)即为 FBG 由弹性形变和弹光效应引起的波长漂移对于纵向应变的灵敏度系数。采用纯石英制成光纤,可以得出 $K_\epsilon = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

2 传感器设计

在设计传感器时,将 FBG 粘贴在 GMM 元件表层构成磁场传感装置, GMM 在气隙磁场中受到磁场作用, GMM 元件沿磁场方向发生纵向应变。粘贴在 GMM 元件上的 FBG 检测到 GMM 元件的应变,并产生相应的波长偏移。在工作过程中,为避免受到拉伸应力的作用,针对 GMM 在剪切力和扭曲力的作用下容易产生断裂的问题,利用强磁铁形成偏置磁场, FBG 中心波长负向偏移 0.6 nm 左右的工作点。

选择 FBG 的中心波长为 1536.275 nm , 3 dB 带宽为 0.25 nm , 隔离度大于 15 dB 。利用加工的有机玻璃工装固定封装有 FBG 的 GMM 一端,并在一

侧增设强磁铁。在强磁铁形成的偏置磁场的作用下,制作后的 FBG 磁场传感器的中心波长为 1536.877 nm 。

3 测试系统设计及实验研究

3.1 GMM-FBG 传感器测试系统设计

本文设计的 GMM-FBG 传感器测试系统如图 1 所示。系统主要包括 FBG 磁场传感器、FBG 解调仪、U 型线圈、直流电源、信号发生器以及互导型功率放大器等。其中, U 型线圈磁芯是由硅钢片叠制而成,实验中采用的硅钢片厚度为 0.5 mm , 用 60 片硅钢片叠成两个 U 型硅钢磁芯, 每个 30 片, 用 0.8 mm 的漆包线对该硅钢磁芯进行绕制。直流电源提供静态磁场, 信号发生器与功率放大器实现动态磁场, FBG 解调仪用来检测传感器的波长偏移。磁场装置的设计是将两块 U 型硅钢磁芯线圈相对放置, 并固定其相对位置, 当线圈中的电流发生变化时, 空气气隙的磁场将发生变化。

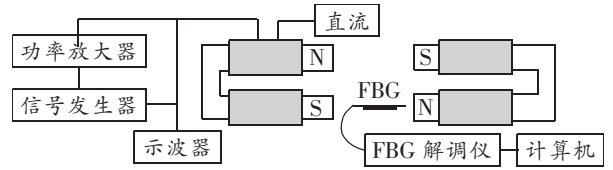


图 1 传感器测试系统

3.2 静态实验

打开直流电源, 调节电源输出为 $0 \sim 5 \text{ A}$, 以 0.2 A 为间隔, 每调节一次, 记录电流数值以及对应的 FBG 中心波长值, 重复 $2 \sim 3$ 次, 对测得的数据取平均。实验测得输入电流与 GMM-FBG 传感器波长漂移量之间的关系如图 2 所示。可以看出, 随着电流强度的加大, FBG 的中心波长向长波长方向移动, 且具有良好的响应。

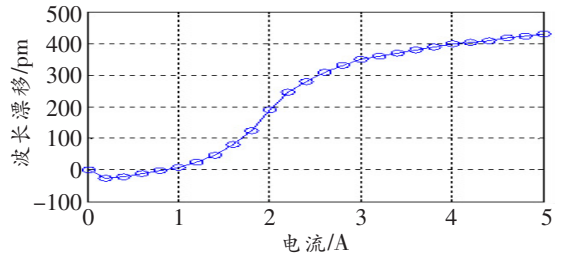


图 2 传感器的静态测试

3.3 动态实验

对 U 型线圈加载动态电流, 对 GMM-FBG 传感器进行动态实验测试, 实验条件为对线圈输入幅值相同频率不同的电流, 测量传感器的中心波长变

化与气隙中磁感应强度之间的关系。设置 U 型线圈间的空气气隙宽度为 5 mm。调节信号发生器的输出信号为正弦波,峰峰值为 3 V,频率分别设置为 10、20、50 和 100 Hz。测得传感器的动态响应如图 3 所示。可以看出,在 0~100 Hz 范围内,传感器响应波形无失真,能够准确响应交流电流的变化。

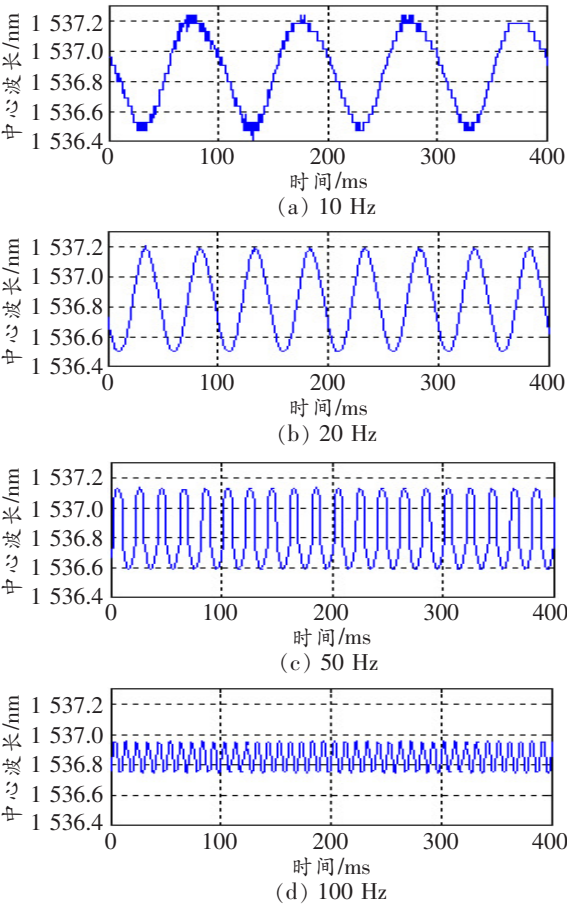


图 3 传感器的动态测试

4 结束语

本文将 FBG 和 GMM 封装成传感器探头,使用铁氧体材料作为导磁回路,通过交变电流产生的磁

场原理来监测电流变化。使用 FBG 的波长表征磁场变化,从而实现电流测量。对传感器的静态和动态响应进行了测试,静态实验表明,随着电流强度的加大,FBG 中心波长向长波长方向移动,且具有良好的响应;动态试验表明,传感器在 0~100 Hz 范围内能够准确地响应交流电流的变化。该研究为电流的准确检测提供了一种新的方法。

参考文献:

[1] 陈铭明,卢树峰,包玉树,等. 光学电流互感器实时误差分析系统的设计 [J]. 江苏电机工程, 2013,32(2): 47—49.

[2] 秦冉,王倩倩,杨世海,等. 全光纤电流互感器现场运行误差特性研究 [J]. 江苏电机工程, 2013,32(2): 7—9.

[3] Sedlar M, Paulicka I, Sayer M. Optical fiber magnetic field sensors with ceramic magnetostrictive jackets[J]. Applied Optics, 1996,35(27): 5340—5344.

[4] 张碧芸. 基于光纤光栅的磁力轴承磁场传感与测量系统 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

[5] 张健,及洪泉,远振海,等. 光学电流互感器及其应用评述 [J]. 高压电技术, 2007,33(5): 32—36.

[6] Satpathi D, Moore J A, Ennis M G. Design of a Terfenol-D Based Fiber-Optic Current Transducer [J]. IEEE Sensors Journal, 2005,5(5): 1057—1065.

[7] Reilly D, Willshire A J, Fusiek G, et al. A fiber-bragg-grating-based sensor for simultaneous ac current and temperature measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6): 1539—1542.

[8] 熊燕玲,赵洪,张剑,等. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅交流电流传感系统 [J]. 电工技术学报, 2006,21(4): 16—19.

[9] 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.

欢迎来稿 刊登广告