

光学学报

一种基于磁致伸缩效应和光纤光栅的电流传感器

董富宁, 杨庆*, 罗曼丹, 陈柠, 廖伟

重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030

摘要 提出一种基于超磁致伸缩材料(GMM)和光纤光栅(FBG)的无源非接触型电流传感器,利用 COMSOL 软件对参考 GMM 位置以及聚磁装置预留伸缩空间大小及方向、截面边长和上方开口长度等参数进行分析和优化,保证传感 FBG 粘接区域内的磁力线密集且均匀分布,最后通过双光栅-强度解调系统实现电流信号的温度无关性测量。传感器交直流特性测试表明,传感器在 0.8~3.5 A 的直流输入下的灵敏度为 249.75 mV/A,线性相关系数高达 0.9942;在 1.6 A 的偏置电流作用下,传感器对 50 Hz~6.5 kHz 的正弦输入信号具有良好的响应能力。同时传感器的温度特性测试证明,双光栅-强度解调方法可在很大程度上消除环境温度变化对输出电压的影响。本文提出的传感器具有体积小、结构简单、性能稳定和成本低等优点,并且具有温度无关特性。

关键词 光纤光学; 电流传感; 磁致伸缩效应; 光纤光栅; 双光栅-强度解调法

中图分类号 TN98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0806001

Current Sensor Based on Magnetostriction and Fiber Bragg Grating

Dong Funing, Yang Qing*, Luo Mandan, Chen Ning, Liao Wei

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract A passive and non-contact current sensor based on giant magnetostrictive material (GMM) and fiber Bragg grating (FBG) is proposed. The position of reference GMM, the size and direction of the reserved expansion space of the magnetic concentrator, the side length of the cross section and the length of the upper opening are analyzed and optimized by COMSOL software, so as to ensure the dense and uniform distribution of magnetic force lines in the bonding area of the sensing FBG. Finally, the temperature independence of the current signal is measured by the double grating-intensity demodulation system. The alternating current (AC) and direct current (DC) characteristic test of the sensor shows that the sensitivity of the sensor is 249.75 mV/A under the DC input of 0.8~3.5 A, and the linear correlation coefficient is as high as 0.9942. Under the action of a bias current of 1.6 A, the sensor has a good response ability to the sinusoidal input signal of 50 Hz~6.5 kHz. At the same time, the test of the temperature characteristic of the sensor shows that the double grating-intensity demodulation method can eliminate the influence of ambient temperature on the output voltage to a great extent. The sensor proposed in this paper has the advantages of small size, simple structure, stable performance, and low cost, and has temperature-independent characteristics.

Key words fiber optics; current sensor; magnetostriction; fiber Bragg grating; double grating-intensity demodulation method

1 引言

电流测量装置是电力系统中电能计量、继电保

护以及智能控制的关键设备,其精度及可靠性与电力系统的安全可靠运行密切相关^[1]。目前,随着电网规模的不断扩大,智能电网已成为电网发展的必

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-10-02; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52077019)

通信作者: *yangqing@cqu.edu.cn

然趋势,传统的电流互感器存在易铁磁谐振和磁饱和、动态测量范围小、结构复杂以及安全性较低等问题,无法满足新兴智能化电网对电流监测的需求^[2-3]。因此,不断改进并发展与智能电网相匹配的电流传感与测量技术对实现电网的智能控制和保证电网的安全稳定运行至关重要。

光纤光栅(FBG)是一种具有可靠性高、实用性强和可波分复用等优点的光学无源器件,并且对应力和温度极其敏感^[4-6]。超磁致伸缩材料(GMM)与压电材料和传统的磁致伸缩材料相比,具有磁致伸缩系数大和响应速度快等优点,并且广泛地应用于换能和驱动,有较成熟的工程应用基础^[7-8]。将 GMM 和 FBG 结合起来的电流传感器具有光学传感的优势,而且不受光纤线性双折射的影响,并且不需要额外的供能电路,是电流传感领域的研究热点^[9-10]。但至目前,对于此类传感器的研究还存在解调系统复杂、工作频率低以及难以消除温度影响等方面的不足。美国 GE 公司的 Satpathi 小组^[11-12]开发了一种应用于高压领域的 GMM-FBG 电流传感设备,利用铁磁材料叠片组成磁路系统可约束并引导母线电流所产生的磁场沿 GMM 棒的应变方向取向,但实验测试中应变在 60 Hz 的电流激励下就有 30°以上的相移,无法继续提升频率,并且没有考虑到温度对传感器的影响。文献[13]建立了硅钢片导磁回路、永磁体以及 GMM-FBG 单元所构成的电流传感系统,利用粗波分复用器线性边带解调的方法实现了工频电流信号的检测,但温度变化对测量结果造成的影响同样未得到更深入的研究。Chiang 等^[14]将一个 FBG 的一半粘在 GMM 上,另一半粘在与 GMM 热膨胀系数基本相等的合金上,采用光强度解调的方法对波长偏移信号进行解调,该传感器可以减小温度的影响,但不能完全消除,最终完成了工频和直流信号的测试。文献[15]在偏置磁场强度大小相等、方向相反的磁路中分别放入了两个参数一致的 GMM-FBG 传感单元,将两个传感单元 FBG 中心波长之差作为输出信息,此种传感方式可以消除温度的影响,但测试频率较低,并且使得传感器的制作成本翻倍。综上,目前基于 GMM 与 FBG 的电流传感器普遍使用法-珀可调谐滤波器和光谱仪等设备对 FBG 中心波长进行解调,解调系统结构复杂,成本高,还可能引入附加误差。另外,对于此类传感器的大多数研究仅限于对直流和工频信号的测量,并且无法在电流传感的同时消除温度对传感单元的影响。

基于此,本文提出了一种基于 GMM 和 FBG 的新型电流传感器,利用了结构简单、成本低廉的双光栅-强度解调方式对 FBG 中心波长的偏移量进行解调,理论上完全消除了温度对传感性能的影响,并且最后完成了传感器在直流和频率为 50 Hz ~ 6.5 kHz 的交流信号下的测量,这大大拓展了测量频带,实现了传感器整体性能的提升。本文主要从三部分进行分析,分别为传感器工作原理的简单介绍、传感器的设计和优化方案以及传感器交直流特性测试结果和温度特性测试结果的讨论分析。

2 传感器的工作原理

2.1 传感单元

传感器的传感单元由圆柱形 GMM 与 FBG 通过光学胶水粘接而成,其是利用 GMM 的磁致伸缩效应和应力下 FBG 中心波长发生偏移的原理对输入电流信号进行耦合传感的。其中,GMM 的磁致伸缩效应是指其内部在外加磁场的作用下会产生畴壁位移和磁畴转动,对外表现为自身的线性伸缩现象^[16]。GMM 的磁致伸缩应变-磁场曲线如图 1 所示,其中 H 为磁场, ϵ 为应变。从图 1 可以看到,GMM 的磁致伸缩效应具有单极性特征,将曲线分为起始段 $0 \leq |H| < H_1$ 、线性段 $H_1 \leq |H| < H_2$ 以及饱和段 $|H| > H_2$,线性段的曲线斜率最大且线性度良好,此为传感器的实际应用区间^[17]。

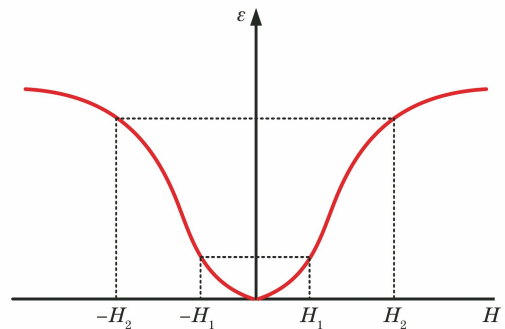


图 1 GMM 的磁致伸缩应变-磁场曲线

Fig. 1 Magnetostrictive strain-magnetic field curve of GMM

GMM 的轴向磁致应变 ϵ 与同方向磁场 H 的关系可表示为

$$\epsilon = \Delta L/L = CH^2, \quad (1)$$

式中: L 、 ΔL 和 C 分别为 GMM 的长度、长度的变化值和应变系数。(1)式是一个偶函数。在线性工作区间,可以将(1)式简化为

$$\epsilon = \Delta L/L = CH. \quad (2)$$

在光栅部分,GMM 在磁场作用下发生的伸缩会引起粘接在其上的传感 FBG 发生轴向伸缩,致使传感 FBG 反射光谱的中心波长发生偏移^[18]。除此之外,环境温度也会导致 FBG 中心波长发生偏移。在温度和应变的共同作用下,中心波长的偏移^[19-20]可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = (1 - \rho_e) \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{\text{FBG}}} + (\alpha + \eta)\Delta T, \quad (3)$$

式中: λ_c 和 $\Delta\lambda_c$ 分别为 FBG 中心波长和中心波长偏移量; L_{FBG} 和 ΔL_{FBG} 分别为 FBG 栅区长度和栅区长度形变量; ρ_e 、 α 和 η 分别为 FBG 弹光系数、热膨胀系数和热光系数。根据传感器的工作原理,FBG 栅区长度形变量即为 GMM 在磁场作用下经光学胶水传递给 FBG 的形变量,即 $\Delta L \approx \Delta L_{\text{FBG}}$ 。综合(2)式和(3)式,在线性工作区间,波长变化量与待测磁场之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = (1 - \rho_e) \frac{CHL}{L_{\text{FBG}}} + (\alpha + \eta)\Delta T. \quad (4)$$

由(4)式可知,FBG 中心波长偏移量与输入磁场和温度变化均呈线性关系。其中,温度变化与输入信号无关,其是影响 FBG 中心波长发生偏移的环境因素。如果可以忽略温度的影响,(4)式可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_c}{H} = (1 - \rho_e) \frac{CL}{L_{\text{FBG}}} \lambda_c. \quad (5)$$

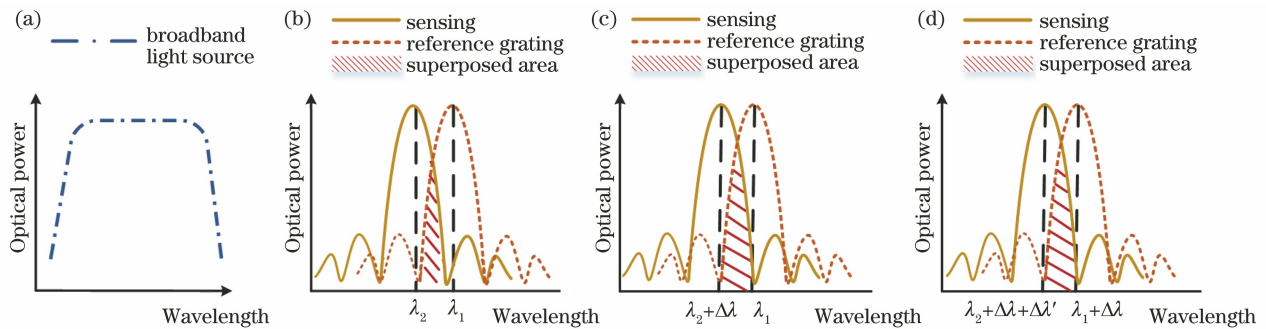


图 2 双光栅-强度解调方法的基本原理。(a)宽带光源光谱图;(b)传感 FBG 和参考 FBG 的反射光谱图;

(c)应力作用下反射光谱的变化情况;(d)应力和温度共同作用下反射光谱的变化情况

Fig. 2 Basic principle of double grating-intensity demodulation method. (a) Spectrum of broadband light source; (b) reflection spectrum of sensing FBG and reference FBG; (c) change of reflection spectrum under stress; (d) change of reflection spectrum under combined action of stress and temperature

3 传感器的设计与优化

3.1 传感器的整体结构

本文提出的 GMM-FBG 电流传感器测试系统如图 3 所示,其中 AC 为交流,DC 为直流。方形聚磁环采用的是具有高磁导率、低损耗和低矫顽力的铁基纳米晶软磁材料,主要作用是聚合被测电

因此,在电流传感中需要采取温度补偿措施来消除温度对输出信息的影响,使得传感器的输出信息仅与输入电流信号相关。

2.2 解调单元

电流传感器的解调单元包括与传感 GMM-FBG 结构相同,但不受磁场作用的参考 GMM-FBG。其中传感 FBG 与参考 FBG 的材料相同(热膨胀系数与热光系数基本一致),中心波长相近(两光栅光谱有一定的交叠部分)。解调原理如图 2 所示,其中图 2(a)为宽带光源光谱图,图 2(b)为参考 FBG 和传感 FBG 的反射光谱图, λ_1 和 λ_2 分别为参考 FBG 和传感 FBG 的中心波长。在磁场作用下,当环境温度无变化时,传感 GMM 发生形变,进而带动传感 FBG 的反射光谱向长波长的方向移动, λ_2 偏移量为 $\Delta\lambda$,参考 FBG 的反射光谱则固定不动,两个光谱的交叠部分仅随输入电流信号的变化而变化,如 2(c)所示;当环境温度发生变化时,由于传感 FBG 和参考 FBG 的弹光系数和热光系数均相同,两个 FBG 的反射光谱同时向同一方向并以相同的步长发生平移,结果如图 2(d)所示,参考 FBG 和传感 FBG 的中心波长在图 2(c)的基础上均增加了 $\Delta\lambda'$,此时两光谱的交叠面积不受温度的影响,由此从原理上消除了环境温度变化为传感器带来的测量误差。

流所产生的磁场,为 GMM 提供相对均匀的强磁场,同时消除外界磁场的干扰。除此之外,对磁环内外 4 个拐角采用 8 mm 的圆角半径设计以改善拐角处磁场分布不均匀的现象。传感 GMM-FBG 置于方形磁环上方开口处并在其轴向形变的方向上预留一定的伸缩空间,防止 GMM 在交流磁场下反复伸缩而带动磁环发生振动,致使测试系统

不稳定。为了保持 FBG 的应变响应能力以及避免在 FBG 伸缩时啁啾现象的发生,将 FBG 拉直并固定于 GMM 两端,再利用光学胶水将其沿 GMM 的轴向方向均匀粘接,粘接过程中尽量减少粘接厚度。实验中,选定传感 FBG 和参考 FBG 栅区长度

均为 10 mm,反射率达到 90% 以上,中心波长分别为 1449.971 nm 和 1550.033 nm,这保证了两个 FBG 反射光谱具有适当的初始交叠部分,并且在 GMM 达到磁饱和前,叠加部分的面积随输入电流同向变化。

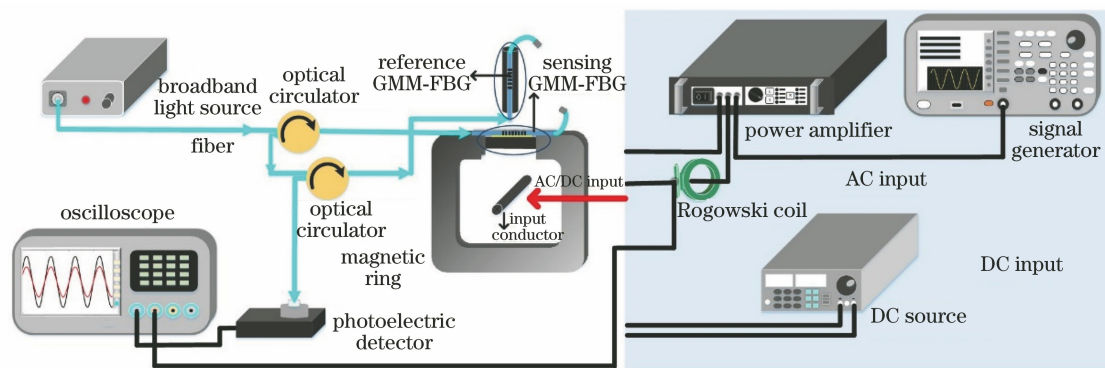


图 3 传感器测试系统的原理图
Fig. 3 Schematic of sensor test system

3.2 传感器的优化设计

传感 GMM 内部磁场的大小和分布均匀程度直接影响了传感器的输出灵敏度和稳定性,对其中起决定作用的聚磁环进行优化设计可有效提高传感器的输出性能。利用有限元软件 COMSOL 分析和优化传感器参考 GMM 位置以及聚磁装置预留伸缩空间大小及方向、截面边长和上方开口长度等参数对 GMM 内部磁场变化的影响。图 4 为 200 A 的输入电流下,在传感 GMM 右侧留有 0.5 mm 的伸缩间隙时系统的磁通密度分布图,磁环内部边长为 80 mm,外部边长为 120 mm,厚度为 20 mm,两个 GMM 长为 20 mm,半径为 3 mm,定义此时参考 GMM 与传感 GMM 相距为 0。图 5 为此种情况下传感 GMM 和参考 GMM 中轴线的轴向磁通密度曲线。研究中所用的 FBG 栅区长度为 10 mm,因此需要保证 GMM 均匀形变区域大于 10 mm,现将

中轴线从左到右 12 mm 内的区间视为光栅粘接区域,将此区间磁场均匀度系数 m 定义为

$$m = (B_{\max} - B_{\min}) / B_{\max}, \quad (6)$$

式中: B_{\max} 和 B_{\min} 分别为光栅粘接区域内中轴线的轴向磁通密度最大值和最小值。将此区域内的磁场大小 p 定义为此区域内中轴线的轴向磁通密度平均值,以此对不同参数下的 GMM 磁场分布情况进行分析。

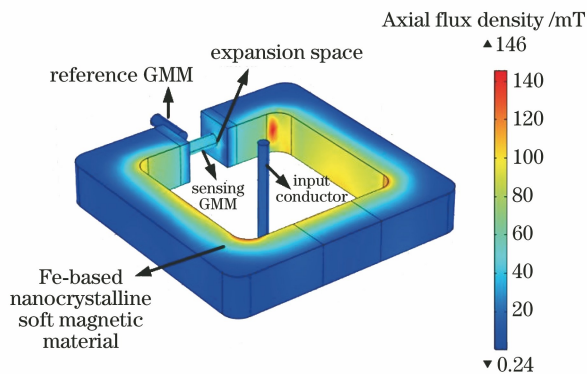


图 4 系统的磁通密度分布图
Fig. 4 Magnetic flux density distribution of system

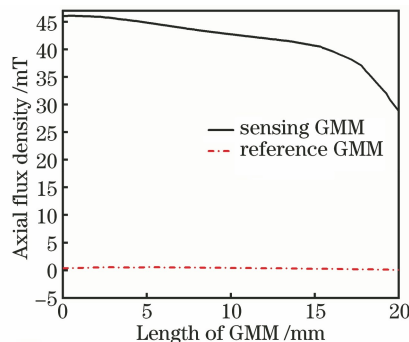


图 5 传感 GMM 与参考 GMM 的轴向磁通密度分布曲线
Fig. 5 Axial flux density distribution curves of sensing GMM and reference GMM

3.2.1 参考 GMM 位置

传感器采用了双光栅-强度解调法,参考 GMM-FBG 仅用来补偿传感 GMM-FBG 所受温度的影响,因此需要保证其不受磁场作用。图 6(a) 和图 6(b) 分别为参考 GMM 和传感 GMM 的磁场大小 p 和磁场均匀度系数 m 随参考 GMM 与聚磁环之间距离的变化情况。从图 6 可以看出:在 -20 ~ -10 mm 的距离之间,传感 GMM 与参考 GMM 存

在接触部分且接触部分不断减小,参考 GMM 中轴线的磁场方向由负转为正,磁场强度的最大值为 1.32 mT,磁场均匀度系数 m 的最小值为 1.24,表现出极不均匀的状态;同时此过程中传感 GMM 的磁场分布受参考 GMM 位置的影响不断减小,表现出磁场强度不断增大,磁场均匀度不断提高;当距离

继续增大时,参考 GMM 与传感 GMM 不再有交叠的部分,参考 GMM 的 p 值逐渐减小并趋于 0,传感 GMM 的 p 值和 m 值趋于稳定值,不再受参考 GMM 位置的影响。因此将参考 GMM 位置定于距离聚磁环 20 mm 处,使其在不受磁场影响的同时能够保证传感器的封装体积最小。

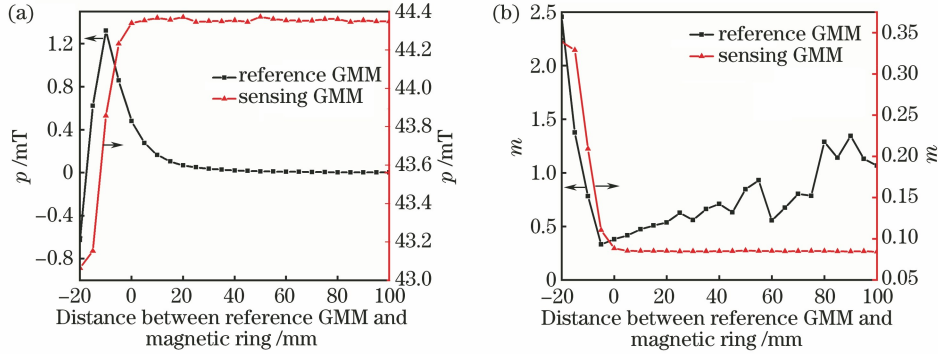


图 6 传感 GMM 和参考 GMM 的磁场分布与参考 GMM 位置的关系。(a) p 值随参考 GMM 位置变化的曲线;
(b) m 值随参考 GMM 位置变化的曲线

Fig. 6 Relationship among magnetic field distribution of sensing GMM and reference GMM and position of reference GMM. (a) Curve of p values changing with reference GMM position; (b) curves of m values changing with reference GMM position

3.2.2 预留伸缩空间大小以及方向

传感 GMM 在磁场作用下发生磁致伸缩,为此需要在形变方向上预留一定的伸缩空间,其可以在磁环内部或者外部空气间隙中。在这两种情况下预留 0~5 mm 的伸缩间隙,传感 GMM 的磁场大小 p 和磁场均匀度系数 m 随间隙变化的曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出:当伸缩空间不存在时, p 值最大, m 值接近于 0,传感 GMM 内部磁场最强并且分布对称;当预留伸缩空间为空气间隙时,随着空间间隙的增大,磁场回路的等效磁阻增加, p 值不断减小,并且漏磁增多,导致传感 GMM 的磁场分布对称性明显下降, m 值逐渐增大。伸缩空间同截面的

剩余区域由聚磁材料代替了空气间隙,伸缩空间在磁芯内部相比在磁芯外部,漏磁大大降低,增强了传感 GMM 内部磁通密度的幅值和磁场分布的对称性, m 值和 p 值在 0.5~5.0 mm 的伸缩空间内波动不明显。实验中 GMM 磁致伸缩系数可达 2×10^{-3} ,按长度 5 cm 计算的话,其伸长量可达 0.1 mm。根据仿真结果并结合工程实际应用,在磁芯内部开一个深为 0.5 mm 的凹槽作为伸缩空间。

3.2.3 聚磁环截面边长

固定聚磁环内部边长为 80 mm、传感 GMM 长为 20 mm、传感 GMM 的半径为 3 mm 和磁芯内部留有 0.5 mm 深的伸缩空间,当聚磁环截面边长从 6 mm 改变到 40 mm 时,传感 GMM 的磁场大小 p 、磁场均匀度系数 m 随聚磁环截面边长变化的曲线如图 8 所示。由图 8 可知:当截面边长在 6~34 mm 之间增大时,更多磁力线被引导进入传感 GMM 内部,则 p 值增大,并且随着截面边长的增加,传感 GMM 在聚磁环开口处的体积比减小,聚磁环开口处两边相当于更加均匀的磁极,此时 GMM 内部磁场均匀度显著提高,则 m 值最终达到 0.05;但当截面边长大于 34 mm 时,截面面积远大于聚磁环上方的开口间隙,并且 GMM 磁导率本身较低,因此磁力线极易通过空气间隙形成回路,此时聚磁环的漏磁效果强于聚磁效果,造成传感 GMM 的 p 值随之减小, m 值有回升的趋势,但不明显。

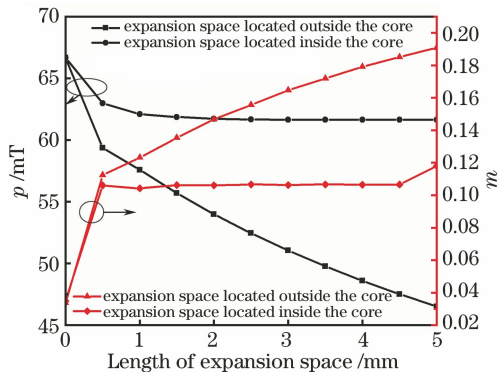


图 7 p 和 m 与预留伸缩空间长度的关系
Fig. 7 Relationship among p , m and length of reserved expansion space

为此,不能一味地增加聚磁环截面边长,并且考虑到当截面边长增加时,聚磁环体积和质量以及损耗会相继增加,所以选择截面边长为 20 mm,此时传感 GMM 的磁场均匀度系数 m 小于 0.1,这可以保证传感 GMM 带动 FBG 稳定形变。

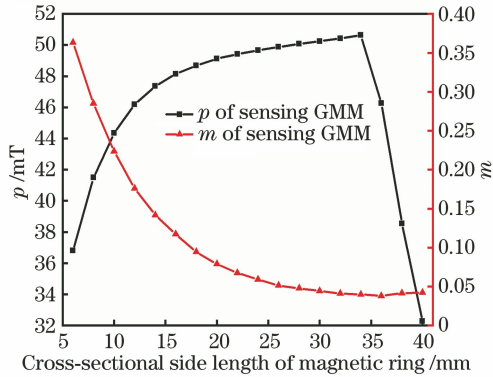


图 8 传感 GMM 磁场分布与磁环截面边长的关系

Fig. 8 Relationship between magnetic field distribution of sensing GMM and cross-sectional side length of magnetic ring

3.2.4 聚磁环上方开口长度

固定聚磁环内部边长为 80 mm、截面边长为 20 mm、传感 GMM 的半径为 3 mm 和磁芯内部留有 0.5 mm 深的伸缩空间,对聚磁环上方开口长度在 14~40 mm 之间的传感 GMM 内部磁场分布情况进行分析,如图 9 所示。从图 9 可以看到:当开口长度增大时,磁路中空气间隙增大,等效磁阻随之增大,传感 GMM 的 p 值不断减小;当开口长度为 40 mm 时, p 值下降了 56%;当开口长度在 14~18 mm 之间时,开口长度与 FBG 栅区粘接区域长度相差较大,传感 GMM 内部的磁场分布对称性得到提升, m 值减小至 0.066;随着开口长度的继续增加, B_{max} 与 B_{min} 的差值几乎不变,但两者由于空气间隙内漏磁的增加而同时减小, m 值增大。综合考虑磁场大小和分布均匀度,本文在磁环上方切割长为 20 mm 的空气间隙,同时 GMM 长度选定为 20 mm。

通过仿真分析,设定实验所用的 GMM 半径为 3 mm,长度为 20 mm,方形聚磁装置外部边长为 120 mm,内部边长为 80 mm,截面边长为 20 mm,并在磁芯内部预留 0.5 mm 深的伸缩空间。为了降低输入电流,利用磁环缠绕线圈的方式代替中间单个电流导线。在磁环两臂分别对称缠绕 200 匝线圈,利用 0~10 A 的直流源提供直流输入信号。在磁环下方缠绕 400 匝线圈,利用信号发生器结合功率放大器来提供交流输入信号。

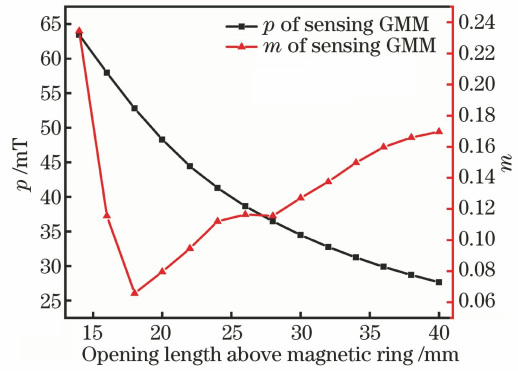


图 9 p 和 m 与聚磁环上方开口长度的关系

Fig. 9 Relationship among p , m , and opening length above magnetic ring

4 实验测试与分析

4.1 直流特性测试

实验过程中,设置直流源的输出电流为 0,以 0.1 A 为间隔不断增加电流,直到输出电压不再变化,证明 GMM 出现磁饱和。将示波器调至直流耦合模式,读取光电探测器中输入光强的变化情况,图 10 为传感器的输入输出关系曲线。从图 10 可以看出:当电流在 0~0.7 A 之间变化时,输出电压缓慢变化,曲线斜率较小;当在 0.8~2.5 A 之间变化时,曲线处于线性区,输入输出的灵敏度最高;在 2.5 A 电流之后,曲线逐渐平缓;在 2.8 A 电流以后曲线进入饱和状态。通过比较可知,传感器输入输出关系曲线的变化规律与 GMM 应变-磁场关系曲线一致,说明双光栅-强度解调方式具有较宽的工作范围,并且线性度良好,可真实反映输入电流的变化情况。对曲线线性区进行拟合分析,可得出此时输入输出线性相关系数 (R^2) 高达 0.9942,灵敏度为 249.75 mV/A。

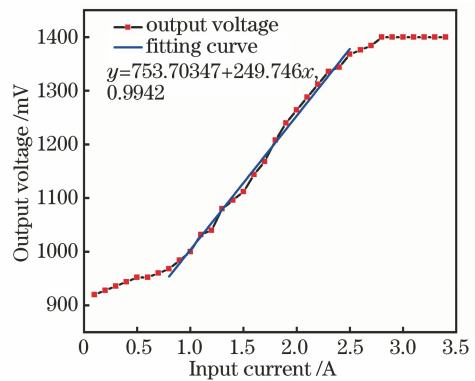


图 10 传感器的直流特性曲线

Fig. 10 DC characteristic curves of sensor

4.2 交流特性测试

实验中利用信号发生器和功率放大器并联合使

用输出正弦交流信号至聚磁环下臂的交流线圈,将此回路中的电流信号作为输入电流信号,同时将光电探测器的输出信号作为传感器的输出信号。由于 GMM 应变与磁场强度呈偶函数关系,所以传感器在交流电流下呈现倍频效应,如图 11 所示。从图 11 可以看到,当输入 1 A 电流、50 Hz 频率的信号时,传感器的输出频率为 100 Hz。此时传感器工作在图 11 的初始缓慢变化阶段,灵敏度仅为 90 mV/A,其未处于线性工作区间。为了使交流特性测试下的输出与输入有良好的跟随关系,基于传感器的直流特性测试结果可知,在交流特性测试之前,利用直流源在磁环两臂的直流线圈中施加 1.6 A 的偏置电流,以此确定交流测试的静态工作点在非线性区的中间位置,在消除倍频效应的同时增大交流输出的线性度和灵敏度。在实际电力系统中,GMM 磁场-应变特性曲线是固定的,因此最佳偏置磁场的强度是固定的,可以在传感器外部结构确定的情况下选用合适的永磁体嵌入磁环中以提供偏置磁场,以此达到提升交流特性的目的。实验过程中通过直接调节直流源的输出大小来确定最佳偏置点,可有效避免更换永磁体带来的麻烦。

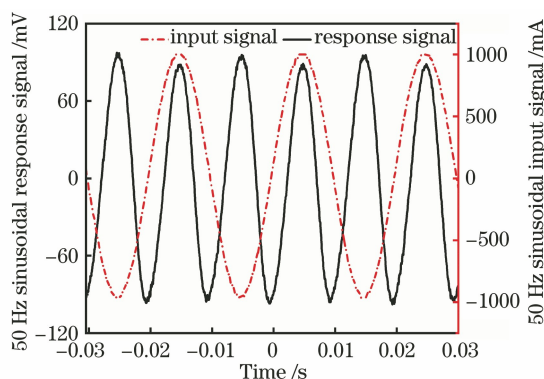


图 11 未加偏置电流时传感器的输入输出关系

Fig. 11 Input/output relation of sensor without bias current

施加偏置电流后,传感器的输入电流保持在 0.2 A,对传感器进行幅频特性测试,表 1 和图 12 分别为传感器各频率所对应的幅值数据和根据数据绘制的幅频特性曲线。从表 1 和图 12 可以看出,在 50 Hz~6.5 kHz 的频率之间,传感器的频率响应大致平坦,输出幅值在 40.65~50.00 mV 之间波动,最大增益不超过 1 dB;当频率在 6.5~8.0 kHz 之间增加时,传感器的输出信号幅值显著增大,幅频特性曲线快速上升,其峰值频率出现在 8 kHz,此时幅值升至 130 mV,增益高达 9.15 dB,传感器无法稳定工作;当输入信号频率继续增大至 10.0 kHz 时,输出幅

值快速下降至 46.64 mV,增益仅为 0.25 dB,此时已恢复到了低频平坦响应增益范围。通过实验可知,此传感器在 50 Hz~6.5 kHz 的频率之间响应良好,可将其视为传感器的频率工作范围。

表 1 传感器在不同频率下的输出幅值

Table 1 Output amplitude of sensor at different frequencies

| Frequency / kHz | Amplitude / mV | Frequency / kHz | Amplitude / mV |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 0.05 | 50.00 | 5.50 | 40.65 |
| 0.50 | 42.65 | 6.00 | 40.65 |
| 1.00 | 45.32 | 6.50 | 48.35 |
| 1.50 | 45.32 | 7.00 | 56.32 |
| 2.00 | 45.32 | 7.50 | 73.33 |
| 2.50 | 45.32 | 8.00 | 130.00 |
| 3.00 | 45.32 | 8.50 | 82.00 |
| 3.50 | 45.32 | 9.00 | 60.65 |
| 4.00 | 45.32 | 9.50 | 50.62 |
| 4.50 | 45.32 | 10.00 | 46.64 |
| 5.00 | 44.00 | | |

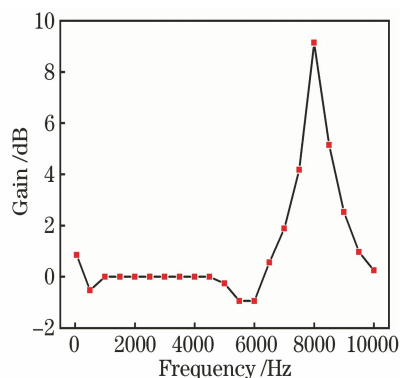


图 12 传感器的幅频特性曲线

Fig. 12 Amplitude frequency characteristic curve of sensor

图 13(a)~13(e)是输入电流幅值为 0.2 A,频率分别为 50.0,2.0,4.0,6.5,8.0,10.0 kHz 的输入输出关系曲线。经过分析可以得出,输出电压存在相位延迟的现象,此种现象在高频处会显得更加明显,6.5 kHz 频率下的最大相位延迟达到 16.52°,8 kHz 与 10 kHz 频率下的相位延迟均超过 25°。出现上述现象的原因在于传感器中 GMM 内部存在磁畴结构,响应信号不能立即随着输入信号的变化而变化,并且随着输入频率的提高,GMM 体内磁畴旋转和磁畴壁运动加剧,磁滞损耗增加,因此输出滞后特性也更加明显。但是从整体波形可以看出,传感器对 50 Hz~6.5 kHz 频率之间的正弦波信号的响应良好,信号并未出现明显的畸变和延迟现象。

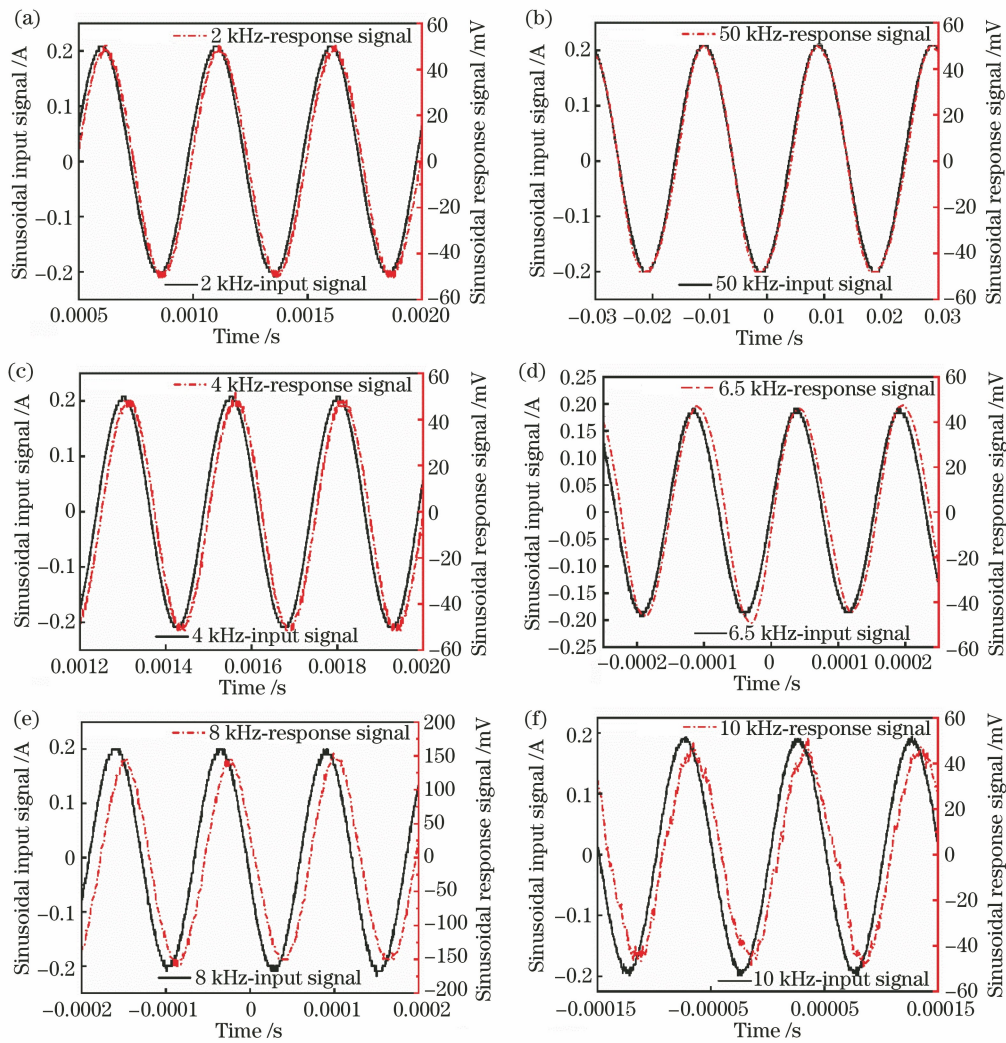


图 13 不同频率下的正弦输入输出曲线。(a) 50.0 Hz; (b) 2.0 kHz; (c) 4.0 kHz; (d) 6.5 kHz; (e) 8.0 kHz; (f) 10.0 kHz

Fig. 13 Sinusoidal input-output curves at different frequencies. (a) 50.0 Hz; (b) 2.0 kHz; (c) 4.0 kHz; (d) 6.5 kHz; (e) 8.0 kHz; (f) 10.0 kHz

4.3 温度特性测试

本文提出的传感器采用了双光栅-强度解调方法,具有温度无关的特性。利用 RHL-100L 型可编程温控箱对传感器的温度特性进行测试,为了避免温控箱内部风向对传感器局部环境温度的影响,将传感器放入一个规则纸箱中,光纤和导线通过箱子侧面开口接入和引出。除此之外,在温控箱中接入了一个温度传感器的接头,当温度传感器显示的温度与程序上的温度一致后开始测试,这最大限度地保证了测试的有效性。考虑到 FBG 的温度耐受性,选择实验温度范围为 0~60 °C,温度变化梯度设置为 2 °C。表 2 为输入频率为 1.0 kHz、幅值为 0.5 A 的电流下每隔 10 °C 输出信号的幅值和相位大小,传感器温度特性测试系统的布局如图 14 所示,图 15 为根据温度特性测试结果绘制的输出幅值

表 2 传感器在不同温度下的输出幅值和相位差

Table 2 Sensor output amplitude and phase difference at different temperatures

| Temperature / °C | Amplitude / mV | Phase difference / (°) |
|------------------|----------------|------------------------|
| 0 | 100.00 | -12.96 |
| 10 | 103.35 | -11.00 |
| 20 | 105.00 | -9.70 |
| 30 | 105.20 | -9.28 |
| 40 | 105.95 | -9.10 |
| 50 | 106.50 | -8.64 |
| 60 | 108.23 | -8.56 |

和相位的变化曲线。从实验结果可以看出:在 0~60 °C 的温度范围内,相位差有不明显的随温度升高而减小的趋势,最大相位差波动范围为 4.4°;幅值增益随温度的升高而缓慢减小并趋于稳定,最大幅值差达到 8.23 mV,增益波动范围为 0.68 dB。其

中推测光学胶水的基本性质受温度的影响发生了可逆变化,如胶水软化等,从而直接影响了传感器的输出信号相位。GMM 内部磁畴随温度升高而发生不规则运动,从而导致磁致伸缩系数的减小,这是影响幅值增益变化的主要原因,并且温度越高所引起的热

扰动对 GMM 磁致伸缩系数的影响很大。温度传感特性实验结果表明,传感器中所使用的双光栅解调方法不仅能够对变化的两光谱叠加面积信息进行有效解调,在 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度之间也能有效抵消大部分环境温度变化为电流传感器测量带来的误差。

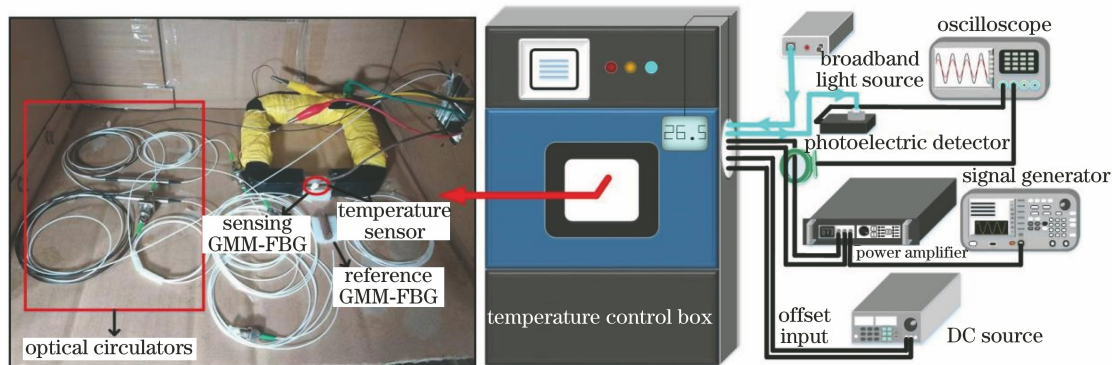


图 14 传感器温度特性测试系统的布局图

Fig. 14 Layout diagram of sensor temperature characteristic test system

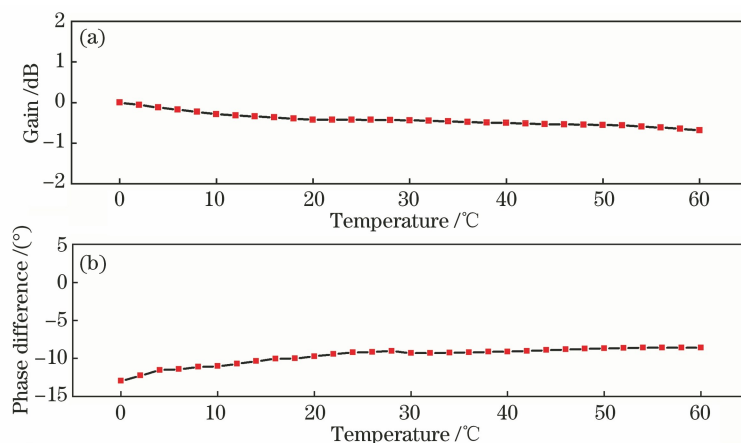


图 15 传感器的温度特性测试曲线。(a)增益;(b)相位差

Fig. 15 Temperature characteristic test curves of sensor. (a) Gain; (b) phase difference

5 结 论

本文提出了一种基于 GMM 和 FBG 的电流传感器,利用导磁性能优异的铁基纳米晶软磁材料聚合输入电流所产生的磁场作用于 GMM,致使其产生形变从而带动粘接于其上的 FBG 中心波长发生偏移,最后通过双光栅-强度解调系统实现此偏移的传感,进而推出被测电流的大小。经过对传感器参考 GMM 位置以及聚磁装置预留伸缩空间大小及方向、截面边长和上方开口长度等参数的仿真分析和优化,加强了传感 FBG 粘接区域内的磁力线密度和分布均匀度,提升了传感器的线性度和灵敏度。该传感器在 $0.8\sim 3.5\text{ A}$ 的直流输入下线性相关系数达到 0.9942 ,灵敏度为 249.75 mV/A ;在

$50\text{ Hz}\sim 6.5\text{ kHz}$ 的正弦输入下信号并未明显地出现畸变和延迟的现象,响应良好;温度特性实验同时表明,传感器在 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度之间性能稳定。此传感器具有体积小、灵敏度高和成本低等优点,但其传感频率和输入输出线性度等重要性能会受到 GMM 固有磁滞问题的限制,传感范围会受到 GMM 磁饱和特性的限制。因此,若对传感单元中 GMM 材料的性能进行进一步的研究与改进,将会大大提高此传感器的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Morello R, Mukhopadhyay S C, Liu Z, et al. Advances on sensing technologies for smart cities and power grids: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7596-7610.

- [2] Yang Q, Sun S P, Sima W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
- [3] Haji M M, Vahidi B, Hosseinian S H. Current transformer saturation detection using Gaussian mixture models[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2013, 11(1): 79-87.
- [4] Ding X D, Zhang Y M, Song Y M, et al. Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106003.
丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106003.
- [5] Alvarez-Botero G, Baron F E, Cano C C, et al. Optical sensing using fiber Bragg gratings: fundamentals and applications [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2017, 20(2): 33-38.
- [6] Liu Y Q, Guo Z Y, Liu Z G, et al. Fiber grating sensor with enhanced pressure and temperature sensitivity[J]. Chinese Physics Letters, 2000, 17(2): 115-116.
- [7] Wakiwaka H, Aoki K, Yoshikawa T, et al. Maximum output of a low frequency sound source using giant magnetostrictive material[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1997, 258(1/2): 87-92.
- [8] Liu J H, Jiang C B, Xu H B. Giant magnetostrictive materials[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(5): 1319-1326.
- [9] Kumai T, Nakabayashi H, Hirata Y, et al. Field trial of optical current transformer using optical fiber as Faraday sensor [C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 21-25, 2002, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2002: 920-925.
- [10] Zhou D P, Dong Y. Anti-interference of current sensing fiber in all-fiber current sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006002.
周东平, 董毅. 全光纤电流传感器中电流传感光纤的抗干扰研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1006002.
- [11] 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.
- [12] Satpathi D, Moore J A, Ennis M G. Terfenol-D based optical current transducer [C] // SENSORS, 2003 IEEE, October 22-24, 2003, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2003: 403-408.
- [13] Xiong Y L, Zhao H, Zhang J, et al. 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, 等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 949-953.
- [14] Chiang K S, Kancheti R, Rastogi V. Temperature-compensated fiber-Bragg-grating-based magnetostrictive sensor for DC and AC currents[J]. Optical Engineering, 2003, 42(7): 1906-1909.
- [15] Zhao H, Sun F F, Yang Y Q, et al. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor[J]. Optics Communications, 2013, 308: 64-69.
- [16] Liang Y R, Zheng X J. Experimental researches on magneto-thermo-mechanical characterization of terfenol-D[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2007, 20(4): 283-288.
- [17] Hristoforou E, Ktena A. Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 316(2): 372-378.
- [18] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [19] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206007.
- [20] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.