

激光与光电子学进展

双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的建模分析

郁聪, 张家洪*, 赵振刚, 李英娜, 李川

昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500

摘要 针对基于超磁致伸缩材料的光纤布拉格光栅(GMM-FBG)电流传感器响应灵敏度低和温度补偿效果差的问题,提出并设计了一种双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器。首先,构建了该传感器的理论模型,并用 COMSOL 软件仿真了 2 个硅钢片之间的距离对 2 个 FBG 应变变量差值的影响,得到了合理的磁路间距。然后,针对 FBG 的栅区长度,进行了参数优化。最后,考虑到磁路间距和 FBG 的栅区长度,仿真得到 2 个 FBG 应变变量差值与被测电流之间的关系。结果表明,当磁路间距为 16 mm,环境温度为 20~70 °C 时,2 个 FBG 上的温度变化趋势基本一致。当 FBG 的栅区长度为 10 mm,输入电流为 0~100 A 时,传感器的灵敏度为 45.4 pm/A;当 FBG 解调仪的分辨率为 1.64 pm 时,最小可测电流为 0.036 A。

关键词 光纤光学; 电流传感器; 光纤布拉格光栅; 磁致伸缩材料; 温度

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706004

Modeling and Analysis of Double-Ring Lever Type GMM-FBG Current Sensor

Yu Cong, Zhang Jiahong*, Zhao Zhengang, Li Yingna, Li Chuan

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract This paper aims at the problems of low response sensitivity and poor temperature compensation effect of fiber Bragg grating (FBG) current sensor based on giant magnetostrictive material (GMM) to propose and design a double-ring lever type GMM-FBG current sensor. First, the theoretical model of the sensor is constructed and the influence of the distance between two silicon-steel sheets on the two FBG strain differences is simulated using COMSOL software to obtain a reasonable magnetic-circuit spacing. Second, parameters are optimized for the FBG grid length. Finally, considering the magnetic-circuit spacing and the FBG grid length, the relationship between the difference of two FBG strain variables and the measured current is obtained via simulation. The results show that at 16 mm magnetic-circuit spacing and 20–70 °C ambient temperature, the temperature change trends on the two FBG are the same. When the FBG grid length is 10 mm, the input current is 0–100 A, and the sensitivity of the sensor is 45.4 pm/A. When the resolution of the FBG demodulator is 1.64 pm, the minimum measurable current is 0.036 A.

Key words fiber optics; current sensor; fiber Bragg grating; magnetostrictive material; temperature

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2020-10-03; 修回日期: 2020-11-08; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61765009, 51667011, 61962031)

通信作者: *zjh_mit@163.com

1 引言

基于超磁致伸缩材料^[1-3]的光纤布拉格光栅(GMM-FBG)电流传感器是一种新型光学电流传感器^[4-6],具有响应速度快、结构简单、抗磁干扰能力强等优点;且相比全光纤电流传感器,GMM-FBG 电流传感器不会产生线性双折射^[7-9]。因此,GMM-FBG 电流传感器在电力系统、电力监测等领域具有广阔的应用前景。GMM-FBG 电流传感器的原理是当 GMM 受到被测电流产生的磁场作用时,会发生轴向拉伸,从而带动 GMM 上粘贴的 FBG 发生应变,使 FBG 的中心波长产生漂移。同时,环境温度的变化也会使 FBG 的中心波长产生漂移^[10-12]。

人们对 GMM-FBG 电流传感器^[13-16]进行了大量研究,张伟超等^[17]设计了具有高 GMM 磁耦率和均匀磁场分布的磁路结构,同时利用数学拟合方法建立了具有温度补偿系数的 GMM-FBG 电流传感模型。刘杰等^[18]提出了一种正交解调方法,主要利用分布式反馈半导体激光器去除温度对 FBG 波长漂移的影响,该传感器的最小可测电流为 0.33 A,最大可测电流为 293.25 A,灵敏度为 11.4 pm/A。刘杰等^[19]提出了一种基于双 FBG 结构的电流互感器,利用与 GMM 具有相同热膨胀系数的蒙乃尔合金材料进行温度补偿。该传感器的电流可测范围为 0.3~12.6 A,系统的传感灵敏度可达到 6.812×

10⁻³ nm/A。目前,对 GMM-FBG 电流传感器的研究主要集中在温度补偿方面,对其测量范围和电流响应灵敏度的提高还有待进一步研究。

为了提高 GMM-FBG 电流传感器的灵敏度并解决温度补偿问题,本文对带温度补偿的高灵敏度双环杠杆式 GMM-FBG 结构进行优化,验证了对系统进行温度补偿的可行性并对优化结果进行了分析。仿真结果表明,该传感器具有较高的灵敏度,同时可以解决环境温度变化对 FBG 中心波长的影响,为后续设计具有温度补偿的高灵敏度 GMM-FBG 电流传感器提供了理论依据。

2 传感器的结构及工作原理

2.1 传感器的结构

图 1 为双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的结构示意图。其中,传感器由 2 个环形硅钢片构成,2 个环形硅钢片上被切割出大小相同的间隙,以放置 GMM 及不锈钢。将 2 个圆柱形 GMM 的上端面分别粘贴在 2 间隙的上端面,下端面粘贴在不锈钢条的上端面。在不锈钢条的下端面放置不锈钢支点,形成杠杆式结构。将 FBG 粘贴在不锈钢条右端面和支撑材料上,引出光栅尾纤连接光纤解调仪。在 2 个硅钢片上绕制方向相反的线圈,利用直流(DC)电源供电,提供方向相反的偏置磁场。

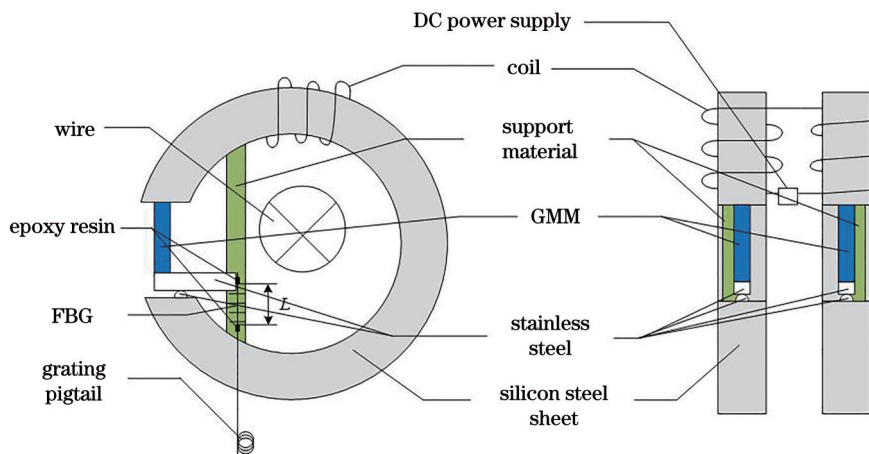


图 1 双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的结构

Fig. 1 Structure of double-ring lever type GMM-FBG current sensor

2.2 传感器的工作原理

光从 FBG 一端入射,光纤内部的光栅相当于波长频带反射器,会反射部分光波,反射光波的中心波长 λ_B 可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅的周期, n_{eff} 和 Λ 均为温度和应变的函数。当 FBG 只受到轴向应力的作用时,会发生轴向应变,轴向应变 ϵ 与 FBG 中心波长的变化关系可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon, \quad (2)$$

式中, P_e 为有效光弹系数, 硅纤介质的 P_e 约为 0.22。当 FBG 只受温度影响时, 温度 T 与 FBG 中心波长之间的变化关系可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T, \quad (3)$$

式中, α_Λ 和 α_n 分别为光纤的热膨胀系数与热光系数, 掺锗光纤的 α_Λ 和 α_n 分别为 0.55×10^{-6} 和 8.6×10^{-6} 。

当导线通入直流电, 在 2 个环形硅钢片上会聚导线周围的磁场时, 会形成聚磁回路。由于导线同时穿过 2 个硅钢片, 即 2 个硅钢片上的磁场均为 H_1 , 根据电磁感应原理得到磁场 H_1 为

$$H_1 = \frac{I}{2\pi r}, \quad (4)$$

式中, I 为被测电流, r 为硅钢片的半径。当线圈通入电流 i 时, 由于 2 线圈绕制方向不同, 因此, 线圈在 2 个硅钢片上聚集的偏置磁场方向也不同, 但线圈的匝数和电流大小相同, 导致 2 个硅钢片上聚集了大小相同、方向相反的偏置磁场 H_2 , 可表示为

$$H_2 = Ni, \quad (5)$$

式中, N 为线圈匝数。GMM 置于硅钢片的缺口处, 由于 GMM 的相对磁导率小于硅钢片的相对磁导率, 即 GMM 上的磁场小于硅钢片上的磁场, 2 个 GMM 上的磁场 H_3 和 H_4 可表示为

$$H_3 = \beta_1(H_2 + H_1), \quad (6)$$

$$H_4 = \beta_2(H_2 - H_1), \quad (7)$$

式中, β_1 和 β_2 为 2 磁路的漏磁系数, 且 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_0$ 。GMM 受到磁场作用时, 会发生磁化, 沿轴向拉伸时, 2 个 GMM 的位移量 Δl_1 和 Δl_2 与磁场 H_3 和 H_4 的关系可表示为

$$\Delta l_1 = k_1 H_3 h_1, \quad (8)$$

$$\Delta l_2 = k_2 H_4 h_2, \quad (9)$$

式中, k_1 和 k_2 分别为 2 个 GMM 的磁致伸缩系数, h_1 和 h_2 为 2 个 GMM 的高度, 且 $k_1 = k_2 = k$, $h_1 = h_2 = h$ 。GMM 带动不锈钢条的左端往下移动, 由杠杆原理可知, 不锈钢条的右侧会带动 FBG 沿 y 轴向上移动, 2 个 FBG 的位移量 Δl_3 和 Δl_4 可表示为

$$\Delta l_3 = \frac{l_2}{l_1} \Delta l_1, \quad (10)$$

$$\Delta l_4 = \frac{l_4}{l_3} \Delta l_2, \quad (11)$$

式中, l_2 和 l_4 分别为 2 个 FBG 端面到不锈钢支点的距离, l_1 和 l_3 分别为 2 个 GMM 到不锈钢支点的距离。由于 2 个不锈钢条的长度相同, 即 $l_2 = l_4$, $l_1 =$

l_3 , 则 FBG 上的应变变量可表示为

$$\epsilon_1 = \Delta l_3 / L_1, \quad (12)$$

$$\epsilon_2 = \Delta l_4 / L_2, \quad (13)$$

式中, L_1 和 L_2 分别为 2 个 FBG 的栅区长度, 若 2 个 FBG 的栅区长度相同, 即 $L_1 = L_2 = L$, 则被测电流 I 与 FBG 应变变量之间的关系可表示为

$$\epsilon_1 = \frac{l_2 kh \beta (Ni + I/2\pi r)}{l_1 L}, \quad (14)$$

$$\epsilon_2 = \frac{l_2 kh \beta (Ni - I/2\pi r)}{l_1 L}。 \quad (15)$$

考虑到温度的影响, 被测电流 I 与 FBG 中心波长变化量之间的变化关系可表示为

$$\Delta\lambda_{B1} = \lambda_{B1} [(1 - P_e)\epsilon_1 + (\alpha_{\Lambda 1} + \alpha_{n1})\Delta T], \quad (16)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \lambda_{B2} [(1 - P_e)\epsilon_2 + (\alpha_{\Lambda 2} + \alpha_{n2})\Delta T]。 \quad (17)$$

若 2 个 FBG 的参数相同, 则 $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = \lambda_B$, $\alpha_{\Lambda 1} = \alpha_{\Lambda 2} = \alpha_\Lambda$, $\alpha_{n1} = \alpha_{n2} = \alpha_n$ 。为了去除温度的影响, 用(16)式减去(17)式, 得到

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\epsilon = \lambda_B(1 - P_e)\frac{l_2 kh \beta I}{\pi r l_1 L}。 \quad (18)$$

从(18)式可以发现, 若已知 2 个 FBG 应变变量的差值 $\Delta\epsilon$, 就能得到不受温度影响的被测电流 I 。

3 传感器的参数优化

3.1 磁路间距优化

双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器是对称结构, 2 个硅钢片之间的磁场会相互影响, 因此, 需要考虑 2 个硅钢片的距离与磁场之间的关系。线圈厚度会影响磁路间距, 2 线圈如果位于硅钢片右侧, 就需要考虑线圈的厚度; 若将 2 线圈错开, 则只需考虑单线圈的厚度, 具体结构如图 2 所示。因此, 需要验证线圈位置对传感器造成的影响可以忽略。为方便计算, 用 COMSOL 软件建立单环 GMM-FBG 电流传感器, 只改变线圈位置。由传感器的理论公式可知, FBG 的应变变量与磁场有关, 因此, 可通过仿真线圈的位置和磁场之间的关系进行验证。若导线电流 $I = 0$ A, 线圈电流 $i = 0.8$ A, 线圈匝数 $N = 500$, 当线圈位于硅钢片的右侧(模型 1)时, 传感器的结构如图 2(a) 所示, GMM 上的磁场为 12442.06 A/m; 当线圈位于硅钢片的上方(模型 2)时, 传感器的结构如图 2(b) 所示, GMM 上的磁场为 12859.3 A/m。可以发现, 线圈位置造成的影响大约为 3%, 可近似忽略。

在 COMSOL 软件中建立三维模型, 其中, 硅钢

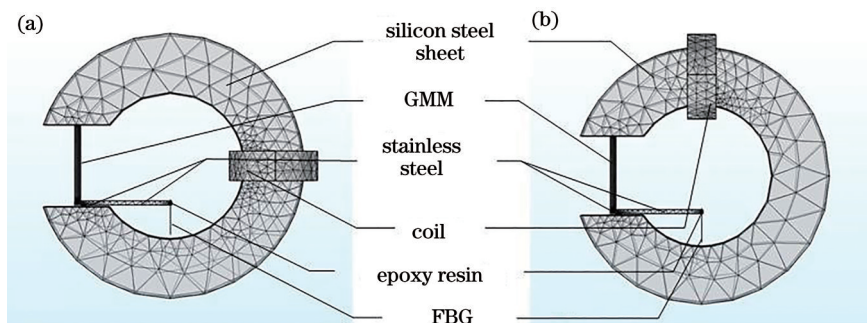


图 2 线圈在不同位置时的模型结构。(a)模型 1;(b)模型 2

Fig. 2 Model structure of the coil in different positions. (a) Model 1; (b) model 2

片的内直径为 50 mm,外直径为 90 mm,厚度为 12 mm。用长为 26 mm,底面半径为 1 mm 的圆柱作为 GMM,不锈钢条的尺寸为 32 mm×2 mm×1.4 mm,线圈的长为 10 mm,其内径为 26 mm,外径为 30 mm。建立半球体、长方体、圆柱体分别作为不锈钢支点、环氧树脂胶、光纤光栅,构建的几何模型如图 3 所示。设置硅钢片的相对磁导率为 2000,

GMM 的相对磁导率为 8,空气的相对磁导率为 1,不锈钢的相对磁导率为 1,GMM 的磁致伸缩系数为 0.0015,线圈电流 $i=0.8\text{ A}$,线圈匝数 $N=500$ 。在固体力学场下,添加磁致伸缩模块,将 FBG 的下端面设置为固定约束,在磁场模块下添加外部电流密度、磁致伸缩模块和线圈,且 2 个线圈的电流方向不同。

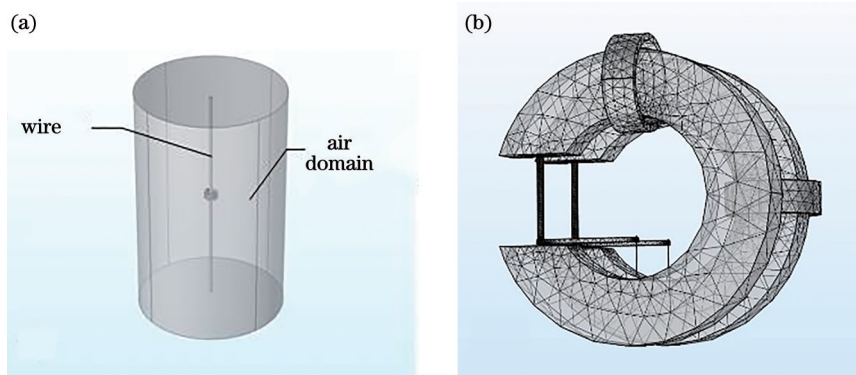


图 3 几何建模。(a)整体模型;(b)局部模型

Fig. 3 Geometric modeling. (a) Overall model; (b) partial model

仿真得到 2 个磁环的距离与 2 个 FBG 应变变量之间的关系如图 4 所示,可以发现,在导线电流 $I=100\text{ A}$,线圈电流 $i=0.8\text{ A}$, $N=500$,2 个硅钢片之间的距离为 10~19 mm 时,2 个 FBG 应变量的差值变化范围为 $3617.1 \times 10^{-6} \sim 3673.256 \times 10^{-6}$;当 2 个硅钢片之间的距离为 10~15 mm 时,2 个 FBG 应变量的差值呈上升趋势,变化范围为 $3617.1 \times 10^{-6} \sim 3673.256 \times 10^{-6}$;当 2 个硅钢片之间的距离为 16~19 mm 时,2 个 FBG 应变量的差值趋于稳定,变化范围为 $3665.135 \times 10^{-6} \sim 3664.869 \times 10^{-6}$ 。考虑到 2 个硅钢片的距离过远会增加制作难度,因此,将 2 个硅钢片之间的距离设置为 16 mm。

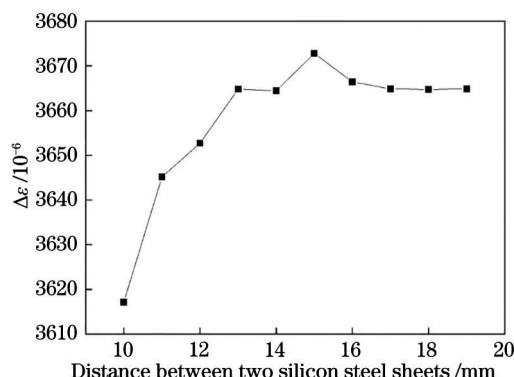


图 4 硅钢片之间的距离与 $\Delta\varepsilon$ 的关系

Fig. 4 Relationship between the distance between silicon steel sheets and $\Delta\varepsilon$

3.2 FBG 栅区长度的优化与结果分析

由双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的工作原理可知,为了保证传感器的灵敏度,需使应变作用在 FBG 的栅区段。由(12)式、(13)式可知,FBG 的栅区长度决定了传感器的灵敏度。当被测电流 $I = 100\text{ A}$ 时,改变 2 个 FBG 的栅区长度,仿真得到的 $\Delta\epsilon$ 如图 5 所示。可以发现,栅区长度 L 在 7~11.5 mm 范围内变化时,2 个 FBG 的应变差值变化范围为 $3560.628 \times 10^{-6} \sim 2543.244 \times 10^{-6}$ 。随着栅区长度的增加,2 个 FBG 的应变差值逐渐呈线性下降趋势,与理论分析结果一致。考虑到实验室可提供的 FBG 栅区长度,仿真时选择 FBG 的栅区

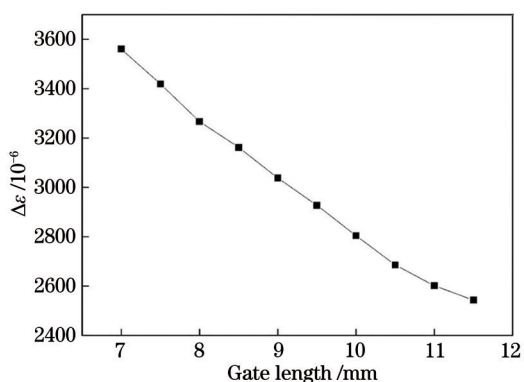


图 5 FBG 的 L 与 $\Delta\epsilon$ 之间的关系

Fig. 5 Relationship between L and $\Delta\epsilon$ of the FBG

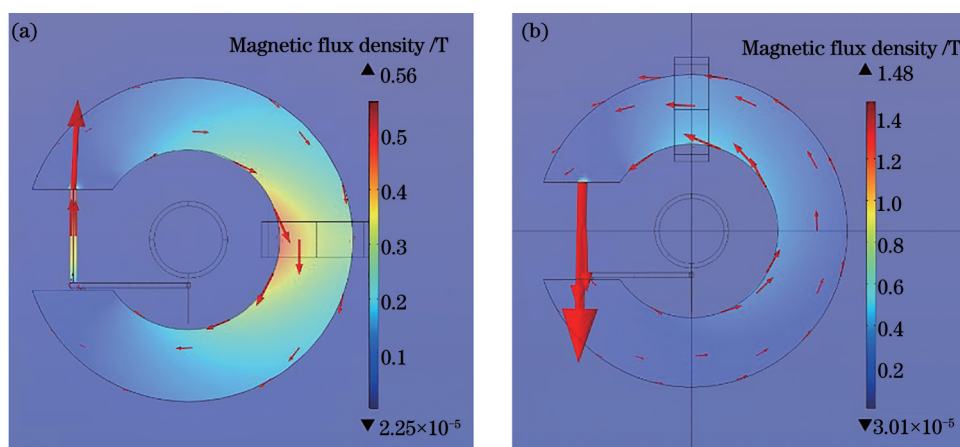


图 6 硅钢片的磁场分布。(a)上环磁场;(b)下环磁场

Fig. 6 Magnetic field distribution of silicon steel sheet. (a) Upper ring magnetic field; (b) lower ring magnetic field

仿真得到被测电流 I 与 2 个 FBG 应变差值 $\Delta\epsilon$ 之间的关系如图 8 所示,可以发现,当被测电流 I 从 0 A 增加到 100 A,线圈电流恒定时,2 个 FBG 的应变差值 $\Delta\epsilon$ 从 0 增加到 3664.557×10^{-6} 。由(16)式可知,已知应变差值 $\Delta\epsilon$,可直接代入已知的初始中心波长,计算出中心波长的变化量。考虑到实验

长度 $L = 10\text{ mm}$ 。

当被测电流 $I = 100\text{ A}$,线圈电流 $i = 0.8\text{ A}$,线圈匝数 $N = 500$ 时,利用图 3 中的几何模型结合磁路间距和 FBG 的栅区优化结果进行仿真,得到双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的磁场分布如图 6 所示。图 6(a)为线圈产生的磁场方向与导线电流产生的磁场方向相反情况下的磁场分布图,由右手螺旋定则可知,线圈产生的磁场为逆时针方向,导线电流沿 z 轴正方向;由安培定则可知,导线产生的磁场沿顺时针方向,两磁场相互抵消,但线圈产生的磁场大于导线产生的磁场,因此,硅钢片上的磁场沿逆时针方向。图 6(b)为线圈产生的磁场方向与导线电流产生的磁场方向相同情况下的磁场分布图,由右手螺旋定则可知,线圈产生的磁场为顺时针方向,导线电流沿 z 轴正方向;由安培定则可知,导线产生的磁场沿顺时针方向,两磁场叠加,因此,硅钢片上的磁场沿顺时针方向,理论分析结果与仿真结果一致。传感器沿 y 轴的应变分布如图 7 所示,其中,空白部分和非空白部分分别表示线圈与导线通入电流、线圈与导线没有通入电流时的情况。可以发现,不锈钢右端沿 y 轴正方向移动时,FBG 上端向左移动,下端固定不变,原因是光纤材料较硬,会有向 x 轴正方向的位移,但位移量较小可以忽略不计。

室使用的 FBG 初始中心波长为 1590 nm,应变灵敏度系数为 $1.24\text{ pm}/10^{-6}$,FBG 解调仪的分辨率为 1.64 pm,计算得到 FBG 中心波长的变化量范围为 0~4544.05 pm。综上所述,双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的灵敏度为 45.4 pm/A,最小可测电流为 0.036 A。

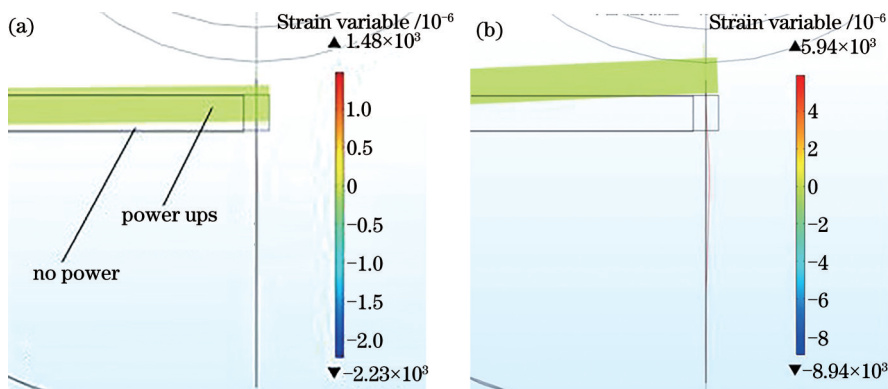


图 7 沿 y 轴的应变场分布图。(a) 上环; (b) 下环

Fig. 7 Strain field distribution along the y axis. (a) Upper ring; (b) lower ring

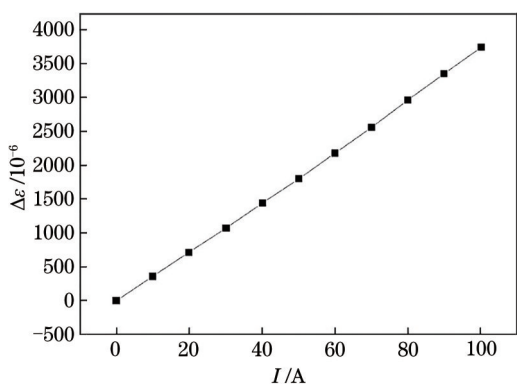


图 8 被测电流 I 与 $\Delta\epsilon$ 之间的关系

Fig. 8 Relationship between measured current I and $\Delta\epsilon$

4 传感器的温度补偿分析

温度变化是影响 GMM-FBG 电流传感器准确性的关键因素,因此,利用 COMSOL 软件进行温度变化仿真。由 (16) 式~(18) 式可知,若 2 个 FBG 的参数相同,即 2 个 FBG 受到的温度影响也相同。在 COMSOL 软件中导入图 3 的几何模型,几何模型的材料设置不变,空气域设置为层流物理

场。在层流物理场下,设置空气的流速并添加空气的入口和出口,将几何模型全部设置为传热物理场,将传感器与导线设置为固体,空气域设置为流体,添加 FBG 的热通量。进行网格划分时,基于用户划分网格,因为光纤的尺寸为 mm 级,因此,设置网格划分单元的尺寸为 0.01 mm,使用常规的自由四面体网格。用稳态求解器求解双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器温度场的分布,利用辅助扫描,计算环境温度 20~70 °C 范围内 FBG 上温度的变化并进行后处理,仿真结果如图 9 所示。2 个 FBG 上的温度与环境温度变化之间的关系如图 10 所示,可以发现,在被测电流 $I=100$ A,线圈电流 $i=0.8$ A, $N=500$,2 个硅钢片之间的距离为 16 mm,环境温度在 20~70 °C 范围内变化时,2 个 FBG 上的温度变化范围为 20~70 °C,与环境温度基本一致。

图 11 为 FBG1 与 FBG2 的温度差,可以发现,FBG1 上的温度变化与 FBG2 上的温度变化相同,其温度差可以近似忽略。综上所述,若 FBG1 与 FBG2 的参数相同,则环境温度变化对 FBG1 与

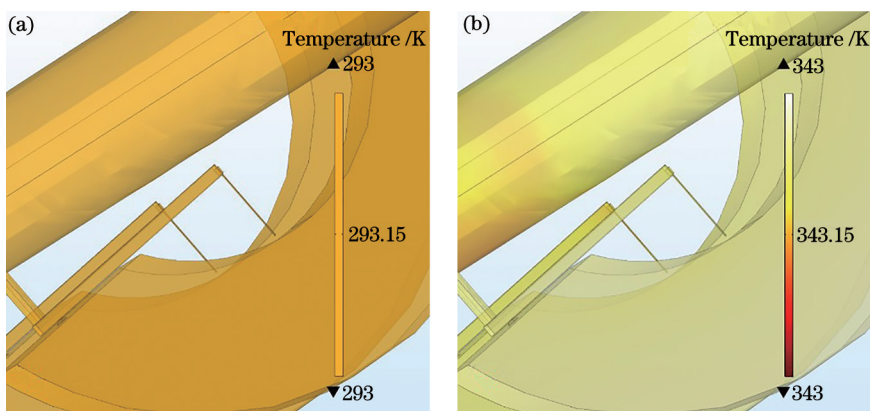


图 9 温度分布图。(a) 20 °C; (b) 70 °C

Fig. 9 Temperature distribution map. (a) 20 °C; (b) 70 °C

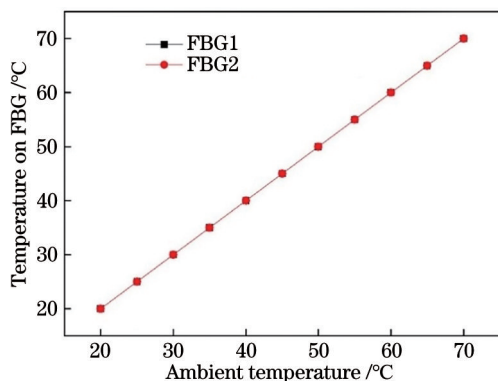


图 10 FBG 上的温度与环境温度之间的关系

Fig. 10 Relationship between temperature on FBG and ambient temperature

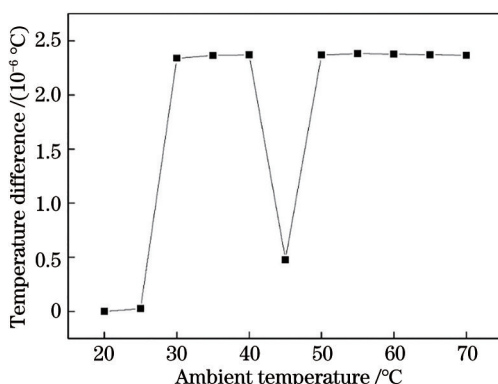


图 11 FBG1 与 FBG2 的温度差值

Fig. 11 Temperature difference between FBG1 and FBG2

FBG2 造成的中心波长变化相同,即双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器具有温度补偿的能力。

5 结 论

针对 GMM-FBG 电流传感器灵敏度不足和温度补偿的问题,设计了一种带温度补偿的高灵敏度双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器,分析了双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的工作原理,构建了理论模型。此外,通过 COMSOL 软件得到磁路间距的合理距离,验证了温度补偿的可行性,并优化了 FBG 栅区的长度。实验结果表明,当磁路间距为 16 mm,FBG 栅区长度为 10 mm,输入电流为 0~100 A 时,该传感器的灵敏度为 45.4 pm/A;当 FBG 解调仪的分辨率为 1.64 pm 时,该传感器的最小可测电流为 0.036 A。综上所述,这种带温度补偿的双环杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的灵敏度较高,可为后续设计更高灵敏度且带温度补偿的 GMM-FBG 电流传感器提供依据。

参 考 文 献

- [1] Afzal M, Kari L, Arteaga I L, et al. Adaptive control of normal load at the friction interface of bladed disks using giant magnetostrictive material[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(8): 1111-1125.
- [2] Ma R, Zhang W T, Wang Z G, et al. Magnetic sensor based on Terfenol-D materials and fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0306006.
马瑞, 张文涛, 王兆刚, 等. 基于 Terfenol-D 材料和光纤光栅法布里珀罗腔的磁场传感器[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0306006.
- [3] Liu J H, Jiang C B, Xu H B, et al. Giant magnetostrictive materials[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(5): 1319-1326.
- [4] Ding G P, Zhang S C, Cao H, et al. Flux density measurement of radial magnetic bearing with a rotating rotor based on fiber Bragg grating-giant magnetostrictive material sensors[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(17): 4975-4981.
- [5] Sun F F. Research of GMM fiber current sensor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
孙菲菲. GMM 光纤电流传感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [6] Yu J, Wang X X, Zhang C X, et al. Online monitoring and controlling technique of loop gain of fiber optic current sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1010003.
于佳, 王夏霄, 张春熹, 等. 光纤电流传感器环路增益在线监测及控制技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1010003.
- [7] Li Y S, Li X, Liu J, et al. Mechanism analysis and modeling on the sensing of fiber-optical current transformers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(23): 6560-6569, 6624.
李岩松, 李霞, 刘君, 等. 全光纤电流互感器传感机理建模分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(23): 6560-6569, 6624.
- [8] Li X. Modeling analysis and experimental study on sensing mechanism of all-fiber optical current transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
李霞. 全光纤电流互感器传感机理建模分析与实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [9] Li Y S, Wang B, Liu J, et al. Optimization analysis and experiment study on measurement performance

- of all-fiber optical current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4146-4153.
- 李岩松, 王兵, 刘君, 等. 全光纤电流互感器测量性能的优化分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4146-4153.
- [10] Lai Y B. Structural optimization and temperature characteristic analysis of GMM-FBG fiber current sensor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- 来永宝. GMM-FBG 光纤电流传感器结构优化及温度特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [11] Chen Y F, Wan H D, Chen Q, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0110001.
- 陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0110001.
- [12] Zong S Y, Wen X Y, Zhang D S, et al. Mach-Zehnder interferometer based on fiber core mismatch and core-offset splicing for the simultaneous sensing of temperature and refractive index[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170607.
- 宗书尧, 文晓艳, 张东生, 等. 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170607.
- [13] Sun F F, Zhao H, Zhang K Y, et al. Hysteresis prediction and error correction of GMM current transformer[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(7): 85-90.
- 孙菲菲, 赵洪, 张开玉, 等. GMM 电流传感器的磁滞回线预测及误差校正[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(7): 85-90.
- [14] Ren N K, Xiong Y L, Wu M Z, et al. Fiber-optic current sensor head based on the giant magnetostrictive materials[J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2016, 9(6): 129-136.
- [15] Han P, Du G L. Research on multi-physics field factors and data driven model of giant magnetostrictive actuator based on FBG sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103235P.
- [16] Yu C, Zhang J H, Zhao Z G, et al. GMM-FBG fiber optic current sensor simulation design[J]. Optical Technique, 2020, 46(4): 415-419.
- 郁聪, 张家洪, 赵振刚, 等. 杠杆式 GMM-FBG 电流传感器的仿真设计[J]. 光学技术, 2020, 46(4): 415-419.
- [17] Zhang W C, Lai Y B, Zhao H, et al. Structural optimization and temperature characteristic analysis of GMM-FBG fiber current sensor[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(6): 104-111.
- 张伟超, 来永宝, 赵洪, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器结构优化及温补模型[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(6): 104-111.
- [18] Liu J, Zhao H, Wang P, et al. High accuracy current transformers with an automatic temperature tracking system based on FBG[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 141-147, 22.
- 刘杰, 赵洪, 王鹏, 等. 可温度自动跟踪的高精度光纤光栅电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 141-147, 22.
- [19] Liu J, Yu X Y, Guo W M, et al. Design of current transformer based on double fiber Bragg gratings[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 330-333.
- 刘杰, 于效宇, 郭文敏, 等. 基于双光纤布拉格光栅结构的电流互感器设计[J]. 半导体光电, 2013, 34(2): 330-333.