

A Design of a Solenoid-Concentrated Magnetic Optical Current Transformer Based on COMSOL

Xiangqi Kong¹, Kaixin Liu¹, Jichao Ma², Qiang Wang¹, Xin Dai¹, Bian Jin¹, Feifei Sun^{1*}, Tao Shen^{1#}

¹Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

²The Second Surveying and Mapping Institute of Heilongjiang Province, Harbin Heilongjiang

Email: *sunfeifeipp@163.com, #taoshenchina@163.com

Received: Aug. 26th, 2019; accepted: Sep. 9th, 2019; published: Sep. 16th, 2019

Abstract

Aiming at the low monitoring value of electromagnetic field strength in the form of single-wire wound magneto-optical medium commonly used in traditional optical current sensors, an optical current sensing structure combining magnetic material ferrite and magneto-optical medium is designed. The simulation analysis of COMSOL shows that the designed sensing structure can monitor and measure the magnetic field through optical sensing, and then achieve the purpose of measuring current. Compared with the traditional structure, the measured magnetic field strength value is increased by 3.05 times. The optimum radius and optimum axial intercept of the coil are obtained.

Keywords

Optical Current Sensor, Magneto-Optical Glass, Ferrite Magnetic Ring, COMSOL

一种基于COMSOL的螺线管聚磁式光学电流传感器设计

孔祥琦¹, 刘凯欣¹, 马骥超², 王强¹, 代鑫¹, 金边¹, 孙菲菲^{1*}, 沈涛^{1#}

¹哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江第二测绘工程院, 黑龙江 哈尔滨

Email: *sunfeifeipp@163.com, #taoshenchina@163.com

*#通讯作者。

文章引用: 孔祥琦, 刘凯欣, 马骥超, 王强, 代鑫, 金边, 孙菲菲, 沈涛. 一种基于 COMSOL 的螺线管聚磁式光学电流传感器设计[J]. 光电子, 2019, 9(3): 120-128. DOI: 10.12677/oe.2019.93018

收稿日期：2019年8月26日；录用日期：2019年9月9日；发布日期：2019年9月16日

摘要

针对传统光学电流传感器中常用的单导线缠绕磁光介质形式存在的对电磁场强度监测值较低的问题，设计了一种通过磁性材料铁氧体和磁光介质结合的光学电流传感结构。COMSOL仿真分析表明，设计的传感结构能通过光学传感进行监控测量磁场，进而达到测量电流的目的，并且与传统结构相比，测得的磁场强度值提高了3.05倍，进一步得到了线圈的最佳半径和最佳轴向截距。

关键词

光学电流传感器，磁光玻璃，铁氧体磁环，COMSOL

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在电力的传输中，随着电压等级的提高，传统电网传输线的监测存在着一些列缺点，光学电流传感器(Optical Current Sensor: OCS)已经开始用于实时的监测传感[1] [2]，但由于其测量磁场强度值较低，不能在传感中高效测量磁场，进而测得电流，因此没有大规模使用。针对传统的单导线缠绕磁光介质形式传感器存在的测量磁场强度值较低的问题[3] [4]，本文通过 COMSOL5.3 仿真提出了一种通过磁性材料铁氧体和磁光介质结合的光学电流传感结构。其工作原理为电流线圈缠绕磁性材料铁氧体上产生磁场，磁场通过法拉第效应改变入射线偏振光的偏振方向，并在出射端测量法拉第转角，即依据从而通过法拉第效应，由磁场的变化，进而磁场的强弱变化，推导出电流变化关系。与传统的单导线环绕磁光介质型传感器相比较，在增加了磁性材料铁氧体磁环后其所测得的磁场强度提高了 3.05 倍，这将对法拉第转角的测量精度起到很大的提高作用，从而能够更加准确的进行对电流的测量[5]。

2. 基于磁光效应的光学电流传感器工作原理

光学电流传感器的基本原理是基于法拉第效应[6]。法拉第效应是指一束线偏振光沿外加磁场方向通过置于磁场中的介质时，由于左、右旋圆偏振光在铁磁体中的折射率不同偏化方向转过一定角度 θ (法拉第转角)的现，透射光的偏振化方向于入射光的偏象，偏转角的表达式由式(1)所示。

$$\theta = HLV \quad (1)$$

其中， V 为 Verdet 常数，是物质固有的比例系数。假设磁场为均匀，在其他条件不变的情况下，根据测得的偏转角度计算出磁感应强度 B 表达式由式(2)表示。

$$B = \frac{\theta}{VL} \quad (2)$$

3. 电绕光结构传感器的设计

3.1. 单导线环绕磁光玻璃型传感器

图 1 为传统的 OCS 理论图，线圈所环绕的长方体为磁光玻璃，线圈为单导线环绕而成。线圈的一端为电流的输入端，通入电流 $I_{\text{入}}$ ，线圈的另一端为电流的输出端，记为 $I_{\text{出}}$ 。在磁光玻璃的两端接入一根光纤，左端作为光的输入端，记为 $P_{\text{入}}$ ，右端作为输出端，记为 $P_{\text{出}}$ 。从而通过法拉第效应，由磁场的变化，进而对整个系统进行监测。如图 1 所示为这种电绕磁光玻璃的立体结构设计图，外部线圈缠在内部的磁光玻璃上。

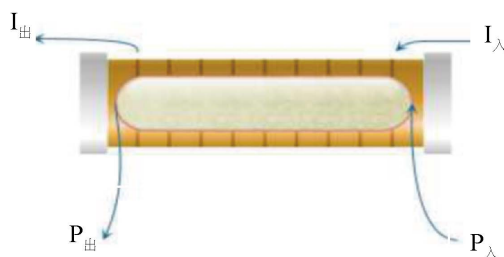


Figure 1. OCS structure of traditional electro-optic magneto-optic glass

图 1. 传统电绕磁光玻璃 OCS 结构

3.2. 几何模型

如图 2 所示，围绕在线圈外部的球形区域是无限元域，把它设置为空气层，作为研究目标的边界，球形的中心区域是磁光玻璃，用 ZF-3 磁光玻璃型号，环绕在磁光玻璃外部的是线圈。完成基础几何模型的构建后，进行简化计算量，在不失真的情况下得到图 2 所示，为二维轴对称几何建模图形。

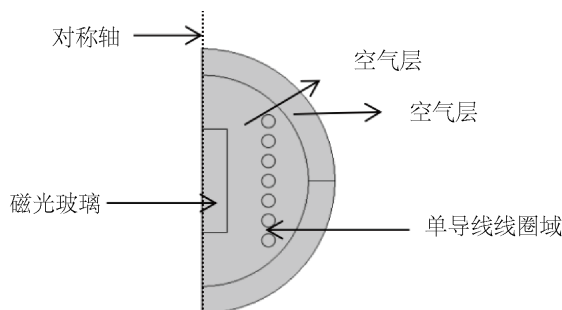


Figure 2. Two-dimensional axisymmetric structure of the traditional structural model

图 2. 传统结构模型的二维轴对称结构

集中在了线圈区域的内部。在通电 1000 A 的初始情况下，这种模型的磁场强度非常之低，最大值在右图中可以估计大约为 0.38 T。磁场强度值非常低，按式(1)计算得到的法拉第旋转角 θ 约为 0.59 rad，因其值很小，不利于后续的计算电流等参量。

3.3. 材料模型

在本模型中，空气域的部分采用材料库内置的 Air 空气模型，螺线管导体线圈采用纯铜材料，嵌套的磁光玻璃部分采用重火石玻璃 CDGM-ZF(ZF-3)材料[7]，铁氧体环的部分采用 MnFe_2O_4 固体材料[8]。

3.4. 仿真结果分析

如图 3 为表面的磁通密度模分布图，如图可见通电线圈附近的磁场强度最大，其幅值成凹字型向内部递减，在线圈的外部区域的磁场强度几乎为零，主要集中在了线圈区域的内部。在通电 1000 A 的初始情况下，这种模型的磁场强度非常之低，最大值在右图中可以估计大约为 0.38 T。磁场强度值非常低，按式(1)计算得到的法拉第旋转角 θ 约为 0.59 rad，因其值很小，不利于后续的计算电流等参量。

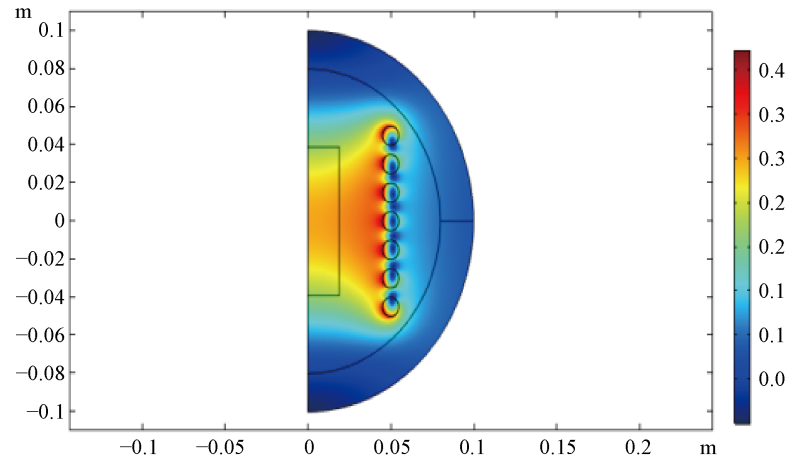


Figure 3. Magnetic flux density mode distribution map on the surface
图 3. 表面的磁通密度模分布图

4. 集磁环式型传感器设计

如图 4 为集磁环式型传感器设计的理论图，线圈的一端为电流的输入端，通入电流 I_{λ} ，线圈的另一端为电流的输出端，记为 $I_{\text{出}}$ 。在磁光玻璃的两端接入一根光纤，左端作为光的输入端，记为 P_{λ} ，右端作为输出端，记为 $P_{\text{出}}$ 。从而通过法拉第效应，测得不同的磁场强度。

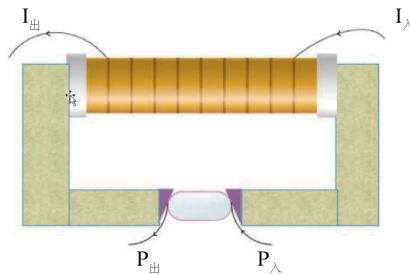


Figure 4. Theoretical diagram of magnetic ring type sensor
图 4. 集磁环式传感器理论图

所环绕的环形壁为铁氧体磁环，线圈环绕铁氧体壁。

4.1. 几何模型

对集磁环式型传感器建模分析，在传统光学电流传感器的基础上，对模型加以改动，得到了如上述图 4 结构的传感器。如图 4 所示，在该模型的结构图的基础上，在 COMSOL5.3 软件中进行建模分析，得到几何模型如图 5 所示[9]。

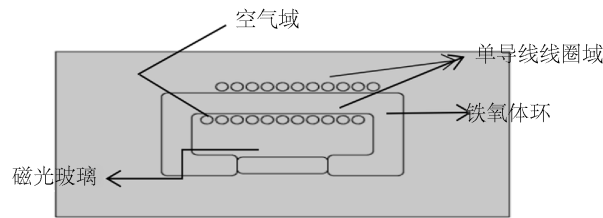


Figure 5. Magnetic-collecting ring type sensor
图 5. 集磁环式型传感器

4.2. 材料模型

选用铁氧体磁环，将其做成长方体的形状，在其臂上缠绕单导线环绕而成的线圈，在电磁场模型的边界条件下，建立了该模型中的材料相较传统结构，多了铁氧体磁环，具体材料数值如下表 1 所示。

Table 1. Material detail of each part of Magnetic Ring Sensor
表 1. 集磁环式传感器各部分材料明细

部件	材料	相对磁导率	电导率	相对介电常数
空间	空气	1	1	1
载流导体	铜	1	59980000	12400000
磁光材料	锰锌铁氧体	5000	0.004	12400000
磁性材料	ZF-3 玻璃	1	0	3.8

4.2.1. 物理场理论方程

在 COMSOL5.3 Multiphysics 中 2D 模型基础上，根据模型的边界条件和外界对线圈施加电流对该模型建模，求解磁失势，其电磁场控制方程如下所示：

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

$$J = \sigma E + J_e \quad (5)$$

$$B = \nabla \times A \quad (6)$$

其中 J 为电流密度， H 为磁场强度， σ 为材料的电导率， E 为电场强度， J_e 为感应电流密度， V 为电势， B 为磁感应强度， A 为磁矢量势。

4.2.2. 设定边界条件

模型的边界是空气，设定其边界条件为磁绝缘，方程如下所示：

$$n \times A = 0 \quad (7)$$

4.2.3. 设定初始值

初始值用来描述物理场的初始状态，是有限元模型的重要物理参数。初始条件设置如下：矢量磁位 A 为 0，有限长螺线管中通入电流为 1000 A。

4.3. 仿真结果讨论与分析

图 6 是 z 分量的磁场强度分布图，由图 6 可以看出磁场聚集在线圈内部及铁氧体磁环中，在磁光玻璃处发生磁光效应。

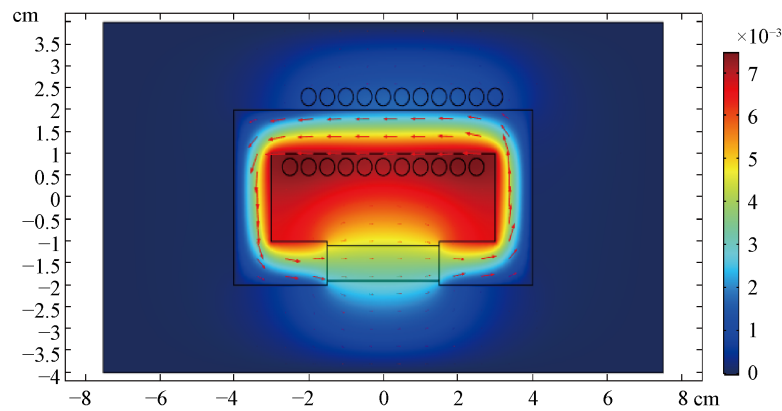


Figure 6. Distribution of magnetic field intensity of z component
图 6. z 分量的磁场强度分布

对两模型中的三项数值进行计算得到如下表的结果：

如表 2 可见，对两种不同结构的光学电流传感器，在均通电流为 10000 A 下的对应的磁场强度(磁通密度模)。将其与传统模型进行对比发现传统模型在没有铁氧体磁环的情况下的各截点处的磁场强度值以及整个几何表面的平均值、最大值和最小值与添加了铁氧体磁环之后的集磁环式型结构相比，每个值均低于后者，在电流一定的情形之下，通过增加了铁氧体的磁环，改变了模型的结构之后，由式(1)计算而得的法拉第旋转角度值 θ 为 1.80 rad，场强的分布以及各点的分布值均提高了 3.05 倍。因此，本模型在测量中能够更为精准。

Table 2. Numerical comparison of two models

表 2. 两种模型的数值对比

	表面场强平均值	表面场强最大值	表面场强最小值
传统模型传感器	0.033619 T	0.10113 T	3.2337×10^{-5} T
集磁环式传感器	0.11962 T	2.7753 T	1.8488×10^{-7} T

5. 集磁环式型传感器分析

对集磁环式型传感器进行进一步分析，选择三项主要参数进行研究，分别为变化的初始电流、变化的环绕线圈的轴向截距、变化的线圈半径。考虑到实际测量点和电流产生磁场点的位置关系，在仿真中选取两个截点进行分析如图 7 所示，图(a)为磁光玻璃中心处，图(b)为线圈所环绕的铁氧体磁环的中心位置。

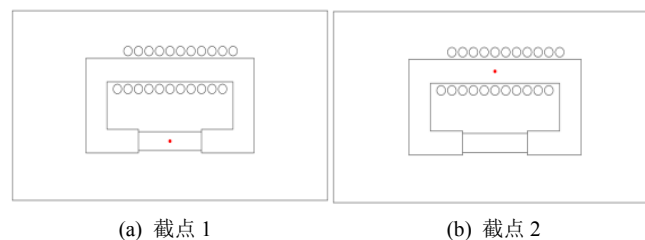


Figure 7. Study on the research and cutting point of magnetic-collecting ring type sensor

图 7. 集磁环式型传感器研究截点

5.1. 变化的初始电流

设定的初始电流是 1000 A，对其进行参数化扫描后，以 100 A 为步长，最高取到 10000 A。如图 7 所示，选取磁光玻璃中心点处进行研究。结果如图 8 所示，随着初始电流的增加，选取的二维截点处的磁场强度的变化均呈现一个规则的线性变化趋势，铁氧体环内的磁场强度的变化和其环绕的区域内侧的磁场强度变化趋势一致，磁光效应所导致磁光玻璃处的变化幅度较小。

图 9 为磁光玻璃中心处磁场强度与线圈环绕铁氧体环中心磁场强度之间的对应关系，由图 9 可见，通过测量磁光玻璃中心处磁场强度可以得到线圈环绕铁氧体环中心磁场强度的大小。

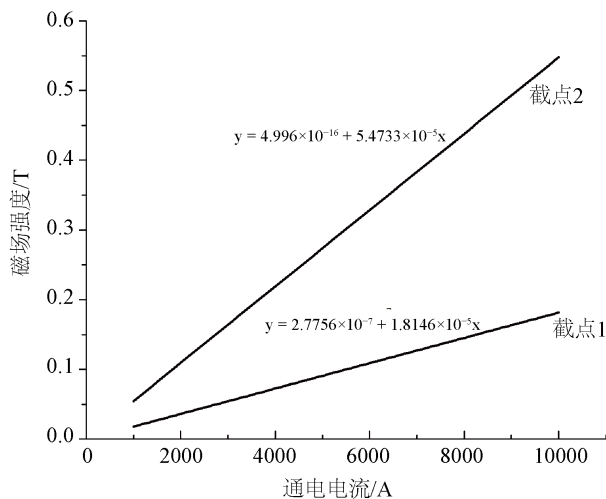


Figure 8. Study on the research and cutting point of magnetic-collecting ring type sensor

图 8. 磁场强度随电流的变化

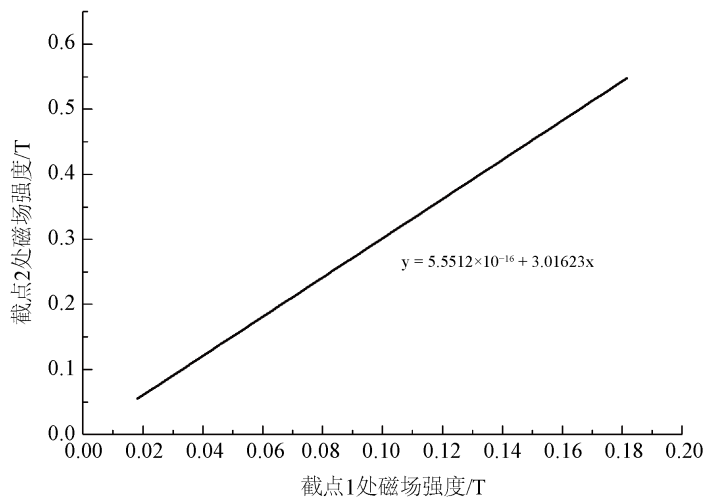


Figure 9. Correspondence diagram of two cut points

图 9. 两个截点的对应关系图

5.2. 变化的线圈轴向截距

取上述截点 1 进行分析，得到磁场强度随环绕线圈的轴向截距的变化的走向趋势如图 10 所示。

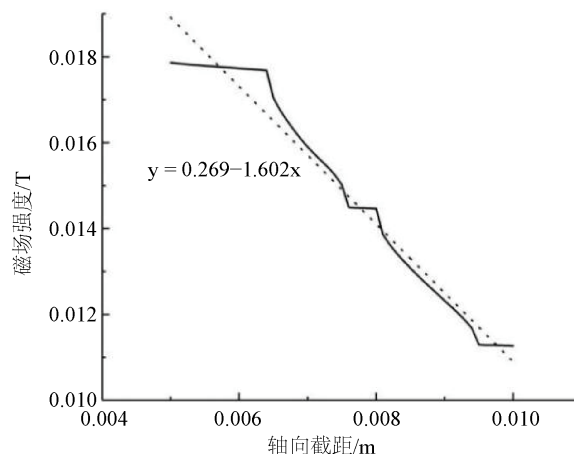


Figure 10. Variation of magnetic field intensity with axial intercept around coil

图 10. 磁场强度随环绕线圈轴向截距的变化

通过图 10，可以看出磁场强度随环绕线圈轴向截距的变化大体呈现近似线性的走向趋势，当线圈的轴向截距大小处于 0.006~0.009 m 的范围内的時候，线性性质较为明显。

5.3. 变化的线圈的半径

对截点 1 分析，如图 11 所示。通过图 11 发现当线圈的半径处于 0.0026~0.0038 m 时，磁场的变化趋于稳定，呈线性关系。

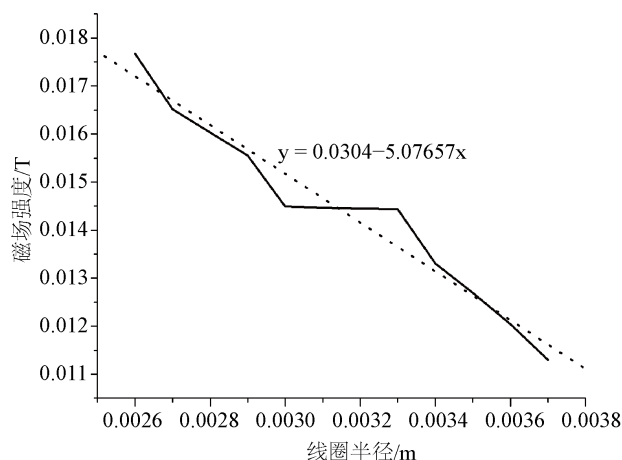


Figure 11. Variation of magnetic field intensity with changing coil radius

图 11. 磁场强度随变化的线圈半径的变化

6. 结束语

设计了精度高于传统结构 3.05 倍的磁性材料铁氧体和磁光介质结合的光学电流传感器，Comsol 仿真表明，在线圈的半径处于 4~4.5 mm 之间、线圈的轴向截距在 4~6 mm 之间时，可以得到稳定性较好的磁场分布。基于现阶段已相对成熟的电流传感器技术，本仿真结构相比于已提出的电流传感器[10][11][12]，拥有着更高的灵敏性能和更好的稳定性能，研究结论对光学电流传感器的实际设计亦具有借鉴意义。

参考文献

- [1] Liu, T., Han, J. and Hu, H. (2017) Optical Current Sensor with Dual-Wavelength Configuration for Improving Temperature Robustness. *IEEE Photonics Journal*, **9**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2639286>
- [2] Haiwen, Y. and Dawei, D. (2017) Development of a Wireless Sensor Network with Optical Electric Sensor for Electric Field Measurement. *Wireless Personal Communications*, **97**, 2191-2205. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4603-7>
- [3] 谭巧, 徐启峰, 黄奕钊, 等. 一种基于径向偏振解调的线性光学电流传感器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 205-210.
- [4] 李长胜, 崔翔. 光学电功率传感器研究综述[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 153-164.
- [5] 刘强, 张晓雨, 刘懿莹, 等. 弯曲光纤布拉格光栅靶式流量传感器的研究[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 336-340.
- [6] 王夏霄, 张宇宁, 于佳, 等. 便携式光纤电流互感器传感头设计[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 24-29.
- [7] Chen, Q., Chen, Q., Wang, H., Wang, G.M. and Yin, S. (2017) Magneto Optical Properties of Rare Earth Tb₂O₃ Doped PbO-Bi₂O₃-B₂O₃ Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **470**, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.008>
- [8] Zhou, X.W., Geng, Z.W., Liu, R.M., *et al.* (2018) Influence of Ba Substitutions on Microstructure and Magnetic Properties of La-Ca-Co System Permanent Ferrite. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **32**, 1-7.
- [9] Benziada, M.A., Boubakeur, A. and Mekhaldi, A. (2017) Numerical Simulation of the Barrier Effect on the Electric Field Distribution in Point-Plane Air Gaps Using COMSOL Multiphysics. *2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes*, Boumerdes, 29-31 October 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8192031>
- [10] 娄凤伟, 郑绳植, 王海明. 一种新型光纤电流互感器[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 782-784.
- [11] 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.
- [12] 胡浩亮, 黄俊昌, 夏历, 等. 全光纤电流互感器长期温度稳定特性研究[J]. 电工电气, 2019(1): 5-9.