



·前沿技术与交叉科学·

光纤陀螺仪双层加热片设计与磁场分析*

张 岩¹, 符鑫哲¹, 朱奎宝¹, 王川川², 盖祥虎¹, 韩子腾¹

(1. 河北科技大学 电气工程学院, 石家庄 050018; 2. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 在复杂电磁环境中, 磁场干扰是光纤陀螺仪产生误差的主要原因之一。为了减小光纤陀螺仪台体中加热片产生的磁场对陀螺仪精度的影响, 设计了双层加热片结构, 并采用有限元方法对单、双层加热片上方光纤环位置处的磁场进行对比分析, 根据分析结果计算磁场对光纤陀螺仪精度的影响, 结果表明: 两种加热片在光纤环位置处磁场均为非均匀磁场, 光纤环距离加热片较近处的磁通密度呈现环状分布, 距离加热片较远处的磁通密度呈中心强周围弱分布; 随着光纤环平面与加热片间的距离增加, 光纤环平面上单层加热片的磁通密度最大值约为双层加热片的 30 至 122 倍; 双层加热片磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差随磁场方向与光纤环之间的角度呈现倾斜正弦变化; 单层和双层加热片在光纤环下表面处产生的磁场磁敏感相位误差分别为 1.299×10^{-10} rad 和 5.572×10^{-12} rad。以上结果证明了双层加热片磁场对光纤陀螺仪的干扰远小于单层加热片, 双层加热片产生的电磁干扰更小, 更有利于提升光纤陀螺仪的精度。

关键词: 光纤陀螺仪; 磁场计算; 光纤环; 加热片; 磁敏感相位差

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220360

Design and magnetic field analysis of double-layer heating plate for fiber optic gyroscope

Zhang Yan¹, Fu Xinzhe¹, Zhu Kuibao¹, Wang Chuanchuan², Ge Xianghu¹, Han Ziteng¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects of Electronic Information Systems, Luoyang 471003, China)

Abstract: In a complex electromagnetic environment, magnetic field interference is one of the main reasons for the error of fiber optic gyroscopes. To reduce the influence of the magnetic field generated by the heating plate in the body of the fiber optic gyroscope on the accuracy of the gyroscope, a double-layer heating plate structure is designed, and a comparative analysis of the magnetic field at the fiber optic ring position above the single-layer and double-layer heating plates is carried out by using the finite element method, and the influence of the magnetic field on the accuracy of the fiber optic gyroscope is calculated based on the analysis results. The results show that the magnetic field of both heating plates is non-uniform at the location of the fiber optic ring. The magnetic flux density near the fiber optic ring to the heating plate has a ring-like distribution, while the magnetic flux density away from the heating plate has a strong center and weak center distribution. With the increase in the distance between the fiber ring plane and the heating plate, the maximum magnetic flux density of the single-layer heating plate on the fiber ring plane is about 30 to 122 times that of the double-layer heating plate. The magnetic sensitivity phase error of the fiber optic gyroscope varies sinusoidally with the direction of the magnetic field and the angle between the fiber ring. The phase errors of the magnetic field on the lower surface of the fiber ring are 1.299×10^{-10} rad and 5.572×10^{-12} rad, respectively. The above results prove that the magnetic field of the double-layer heating plate interferes with the fiber-optic gyroscope much less than that of the single-layer heating plate and that the electromagnetic interference generated by the double-layer heating plate is much smaller, which is more conducive to improving the accuracy of the fiber-optic gyroscope.

Key words: fiber optic gyroscope, magnetic field calculation, fiber coil, heating plate, magnetic sensitive phase difference

* 收稿日期: 2022-12-31; 修订日期: 2023-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61801480); 河北省自然科学基金项目(E2019208443); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021202)

联系方式: 张 岩, yanyanfly163@163.com。

光纤陀螺仪的核心部件光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的新型角速度传感器^[1], 作为高精度惯性导航设备在航空、航天、航海等领域, 发挥着重要作用^[2-6]。然而, 光纤陀螺对环境温度和周围磁场具有很强的敏感性, 容易受到磁场和温度的干扰, 进而影响光纤陀螺精度和稳定性^[7-11]。通常磁场干扰源包括地磁场以及光纤陀螺仪台体内部电机、加热片、电路板等器件辐射的磁场。为了保持运行中光纤陀螺仪内部温度恒定, 减小温度变化对光纤陀螺仪的影响, 通常在光纤陀螺仪台体内部, 光纤环下方安装金属加热片进行温度补偿, 金属加热片应用的同时产生了干扰磁场。

目前, 针对外部磁场影响光纤陀螺的研究主要集中在外部地磁场和光纤陀螺仪台体内部电路板辐射磁场对光纤陀螺仪的影响。其中, 文献 [12] 研究了地磁场对光纤陀螺仪的零偏影响机理, 得出了地磁场影响光纤陀螺仪产生误差的规律。同时, 鲁军、殷建玲等人对光纤陀螺仪内部电路板辐射磁场产生的磁敏感性相位误差进行了研究^[13-14]; 针对不同磁场特性, 文献 [15] 对于光纤陀螺在交直流磁场中的磁敏感性进行了研究, 但是关于光纤陀螺仪中加热片干扰磁场对光纤陀螺精度影响分析相对较少。

为降低加热片产生磁场对光纤陀螺仪精度的影响, 本文以光纤陀螺仪台体中加热片为研究对象, 根据磁场叠加原理设计了双层加热片结构。使用有限元方法分析了单层和双层加热片的磁场分布特性, 并对比两种加热片产生的磁场对光纤陀螺仪的影响, 说明双层加热片产生的磁场干扰更小, 有利于提升光纤陀螺仪的精度。

1 光纤陀螺仪双层加热片结构设计

在低温环境下, 加热片通常放置在光纤陀螺仪光纤环正下方进行温度补偿。以某型号加热片为例, 该加热片为单层圆型薄片结构, 整体厚度 0.30 mm, 上下表面各有 0.10 mm 厚度的聚酰亚胺绝缘层, 如图 1 所示。其中, 加热片由一根厚度为 0.10 mm 的镍铬合金加热丝以接线端为起点沿半圆形轨迹反复弯折回绕, 并不断向中心靠近, 最终回绕至另一接线端, 构成非闭合的圆形轴对称结构, 对称轴两侧保持一定间隙。

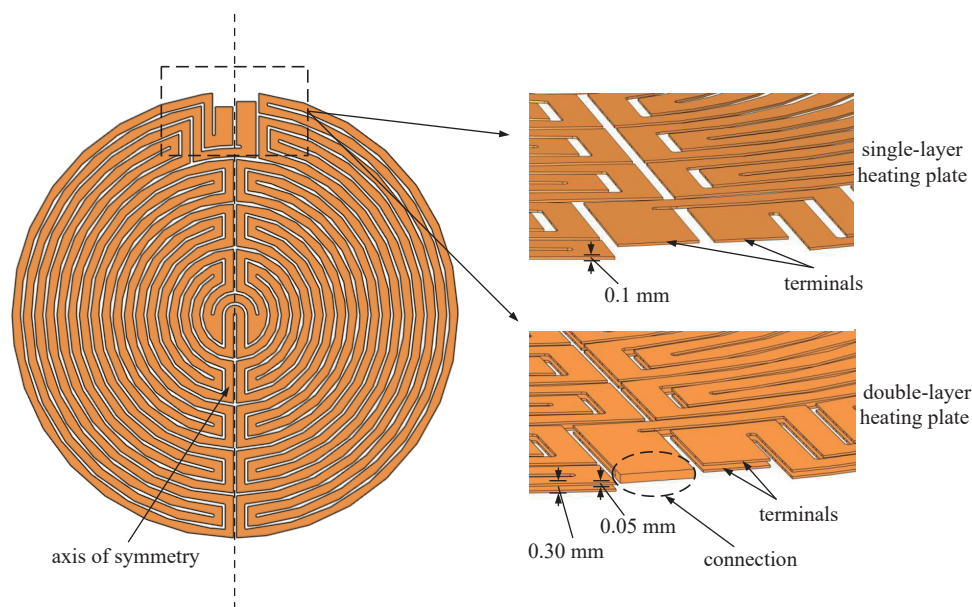


Fig. 1 Schematic diagram of single and double layer heating plates

图 1 单、双层加热片示意图

为减小单层加热片磁场对光纤陀螺仪测量精度的影响, 需要对加热片进行进一步消磁。根据麦克斯韦电磁方程组可知, 运动的电荷激发磁场, 在空间中任一点的磁场是空间中电流产生的。因此, 为减小加热片磁场设计了如图 1 所示的双层加热片结构, 双层加热片利用两片结构相同的单层加热片进行层叠, 并将上下两层加热丝接线端首尾进行串接, 空间上两层加热片中加热丝分布对称。当双层加热片通入稳定电流时, 上下两层加热丝对应位置电流大小相同方向相反, 磁场和电流的关系可以利用毕奥-萨伐尔定律描述^[16], 公式为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\mathbf{I} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (1)$$

式中: $d\mathbf{B}$ 为电流元 $d\mathbf{I}$ 产生的微小磁场, $\hat{\mathbf{r}}$ 为从电流元指向观察点的单位矢量, r 为电流元到观察点的距离, μ_0 为真空中的磁导率。

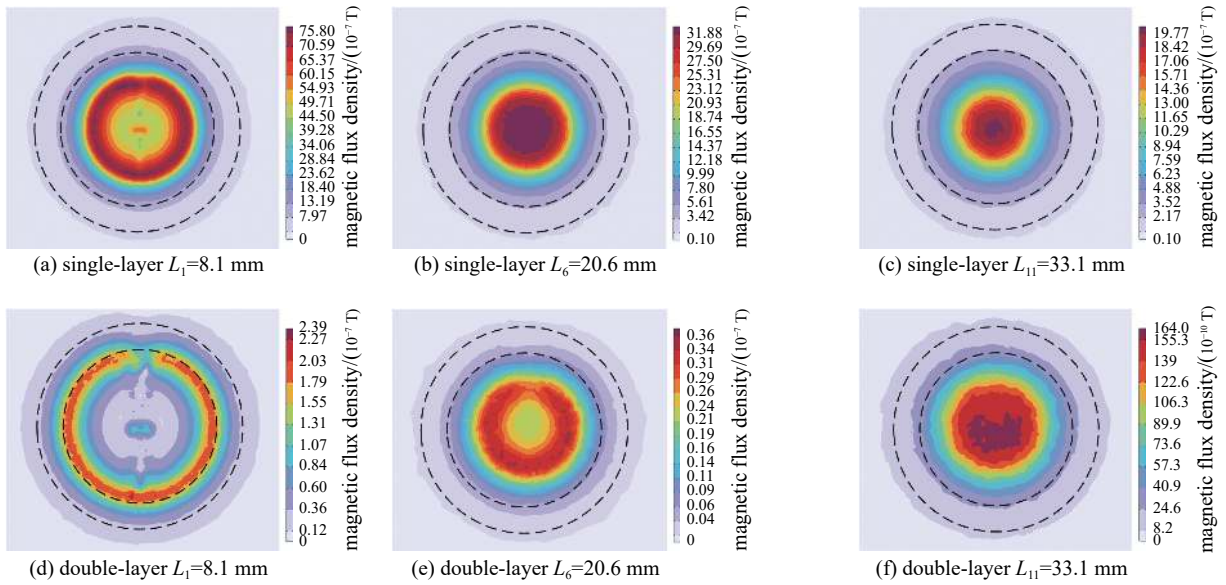


Fig. 4 Magnetic flux density distribution at different distances above the heating sheet

图 4 加热片上方不同距离平面磁通密度分布

根据计算结果可以看出,单双层加热片产生的磁场为非均匀磁场,光纤环空间位置平面距单、双层加热片上表面越远,该平面处磁通密度越小。在 $L_1=8.1\text{ mm}$ 处的磁通密度大小整体呈现环状分布,如图 4(a)、(d)所示。在 $L_6=20.6\text{ mm}$ 、 $L_{11}=33.1\text{ mm}$ 处平面,其磁通密度仍为环状分布但强度逐渐过度到中心强周围弱,如图 4(b)~(f)所示。单层加热片和双层加热片磁场在空间平面上最大磁通密度如表 1 所示。

表 1 单、双层加热片磁场在空间平面上最大磁通密度值

Table 1 Maximum magnetic flux density value of single and double heating pad magnetic field in the spatial plane

| n | L/mm | maximum value of magnetic flux density | | maximum flux density multiplier |
|-----|---------------|----------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | | of single-layer heating pad/T | of double-layer heating pad/T | |
| 1 | 8.1 | 8.063×10^{-6} | 2.691×10^{-7} | 30 |
| 2 | 10.6 | 6.235×10^{-6} | 1.312×10^{-7} | 48 |
| 3 | 13.1 | 5.007×10^{-6} | 9.560×10^{-8} | 52 |
| 4 | 15.6 | 4.259×10^{-6} | 6.630×10^{-8} | 64 |
| 5 | 18.1 | 3.779×10^{-6} | 4.610×10^{-8} | 82 |
| 6 | 20.6 | 3.328×10^{-6} | 3.960×10^{-8} | 84 |
| 7 | 23.1 | 3.002×10^{-6} | 3.070×10^{-8} | 98 |
| 8 | 25.6 | 2.741×10^{-6} | 2.610×10^{-8} | 105 |
| 9 | 28.1 | 2.490×10^{-6} | 2.350×10^{-8} | 106 |
| 10 | 30.6 | 2.259×10^{-6} | 2.080×10^{-8} | 109 |
| 11 | 33.1 | 2.063×10^{-6} | 1.690×10^{-8} | 122 |

从表 1 中可以看出,随平面距离的增加单、双层加热片磁场在平面上的磁通密度最大值逐渐降低。对比单、双层加热片磁通密度最大值,在距离最近 L_1 平面上双层加热片磁场最大磁通密度值为单层加热片的 1/30,在 L_6 平面双层加热片磁场最大磁通密度值为单层加热片的 1/84,而在 L_{11} 平面双层加热片磁场最大磁通密度值为单层加热片 1/122,可见磁场强度上双层加热片磁场强度远小于单层加热片磁场强度且随距离的增加双层加热片磁场强度衰减速度大于单层加热片,在远距离具有更好的消磁性能。

进一步对 L_1 、 L_6 、 L_{11} 三个光纤环空间平面 L_d 上的磁通密度进行分析。分析结果如图 5 所示,图中绿色虚线区域为光纤环所在区域(0~14 mm、102~116 mm),可以发现,随平面距离 L_n 的增大,在光纤环所在区域单、双层加热片磁通密度均减小,并且其峰值从光纤环附近区域逐渐靠向光纤环中心,其中在光纤环区域单层加热片平均磁通密度是双层加热片的 50 倍。

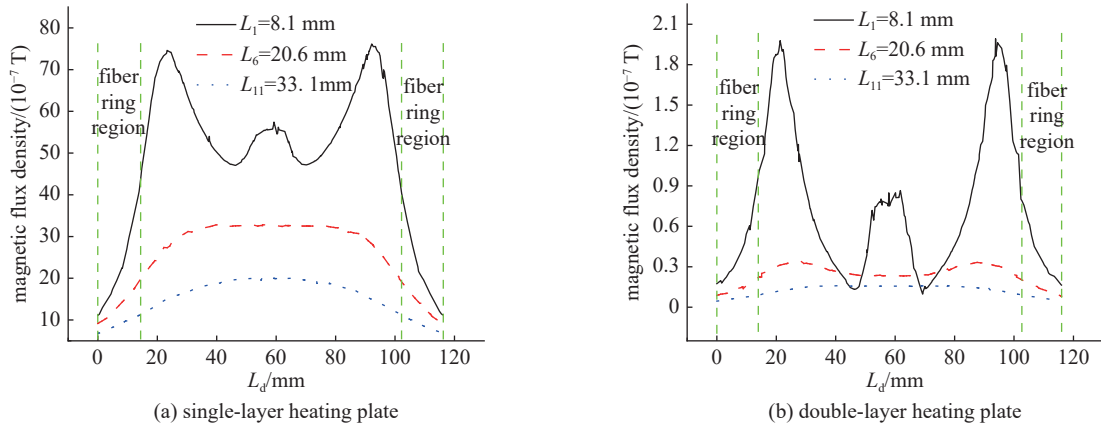


Fig. 5 Magnetic flux density on the fiber ring with L_d diameter

图 5 光纤环直径 L_d 距离上加热片磁通密度大小

由于圆形加热片磁场具有一定的对称性且为非均匀磁场,所以对光纤环空间位置处 A 、 B 、 C 三点的加热片磁场磁通密度进行计算,得到了 A 、 B 、 C 三点的磁通密度大小随 L_n 的变化情况,如图 6 所示。

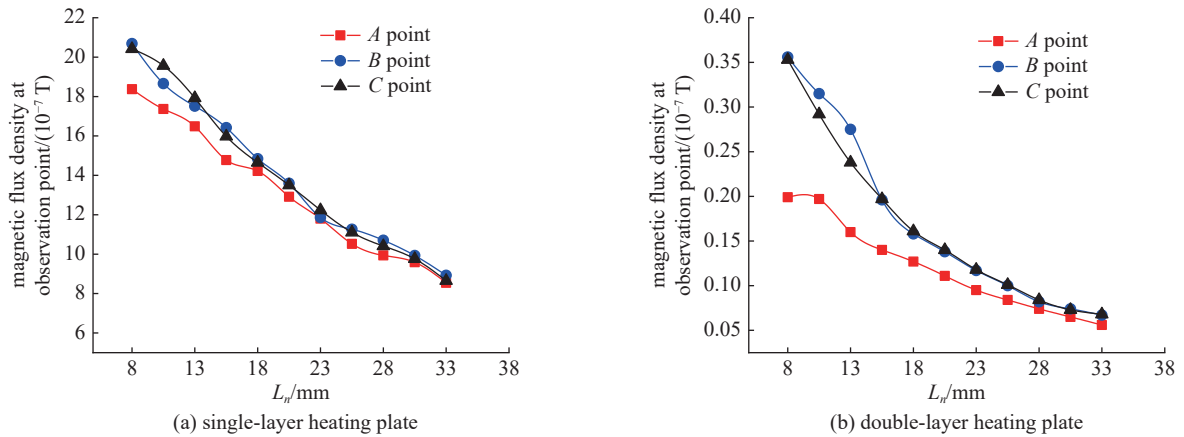


Fig. 6 Magnetic flux density of heating plate at the observation point of optical fiber ring

图 6 光纤环观测点处加热片磁通密度大小

根据图 6 可知,单层加热片 A 、 B 、 C 三个点处磁通密度随 L_n 的变大逐渐减小,其中 B 、 C 两点磁通密度大小和变化趋势接近,相比于 A 点较大。单层加热片距光纤环空间平面距离为 L_1 时,该平面 A 、 B 、 C 三点处磁通密度最大值分别为 1.837×10^{-6} T、 2.068×10^{-6} T、 2.041×10^{-6} T,对比双层加热片距离光纤环空间相同高度平面, A 、 B 、 C 三点的最大磁通密度为 1.990×10^{-8} T、 3.560×10^{-8} T、 3.53×10^{-6} T,在相同高度 $L_n(n=1, 2, 3, \dots, 11)$ 下,单层加热片磁场磁通密度最大值是双层加热片的 50-90 倍。双层加热片磁场中 B 、 C 两点变化趋势与单层加热片相同, A 点磁通密度随 $L_n(n=1, 2, 3, \dots, 11)$ 的增大先保持平稳再缓慢下降。

为进一步分析双层加热片磁场分布特点,对双层加热片的加热丝厚度以及上下两层加热片之间的距离做出调整。在激励电流源大小一定的情况下,计算双层加热片中加热丝厚度及加热片间距对空间平面磁场强度的影响。固定电流源电流大小为 0.56 A,两层加热片间距为 $d=0.1$ mm,设置加热丝厚度为 $t_n(n=1, 2, 3, 4, 5)$,其中 $t_1=0.10$ mm、 $t_2=0.15$ mm、 $t_3=0.20$ mm、 $t_4=0.25$ mm、 $t_5=0.30$ mm。另外,固定加热丝厚度为 $t=0.1$ mm,设置两层加热片间距为 $d_n(n=1, 2, 3, 4, 5)$,其中 $d_1=0.10$ mm、 $d_2=0.15$ mm、 $d_3=0.20$ mm、 $d_4=0.25$ mm、 $d_5=0.30$ mm。计算结果如图 7 所示。

通过观察图 7(a),可以发现双层加热片中上下两层加热片间距一定时,增加加热丝的厚度会显著增强空间磁场的磁场强度,减弱双层加热片的消磁能力。同时,在图 7(b)中可以看出,当加热片中加热丝厚度保持不变时,增加上下两层加热片间距也会降低消磁性能。因此,通过减小双层加热片中加热丝的厚度和上下两层加热片间距,可以提升加热片的消磁性能,能够有效地降低空间磁场强度,该结论与公式(4)磁场叠加消磁原理分析一致。

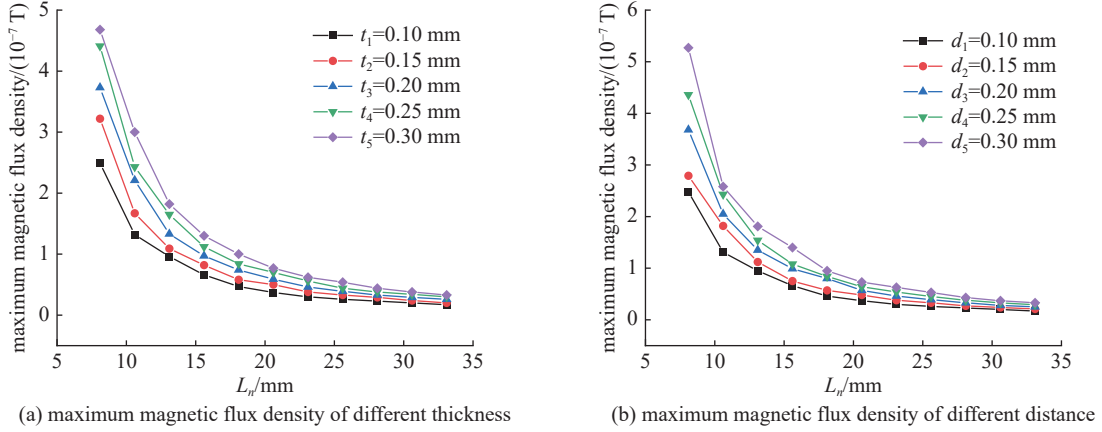


Fig. 7 Distribution curve of maximum magnetic flux density for different thickness and spacing of double-layer heating pad wires in the spatial plane

图 7 双层加热片不同加热丝厚度及加热片间距在空间平面上磁通密度最大值分布曲线

3 加热片磁场对陀螺仪影响分析

光纤环在外部磁场干扰下会产生磁光法拉第效应,该效应是光纤陀螺仪磁场误差的主要原因。通过对加热片上表面不同高度磁场的仿真,发现随着距离的增加单层加热片和双层加热片的磁场强度均有所下将,并且磁通密度分布特点和磁场方向也随之发生改变。

选取距离加热片上表面 $L_1=8.1\text{ mm}$ 、 $L_6=20.6\text{ mm}$ 、 $L_{11}=33.1\text{ mm}$ 三个光纤环空间平面,分别在这些平面上建立坐标系并确定磁场源中心位置和角度如图 8 所示,并利用矩阵光学和光传输理论^[21],推导出非均匀磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位差表达式(5),计算加热片产生的磁场对光纤陀螺仪的磁敏感相位误差。

非均匀磁场对光纤陀螺仪的磁敏感相位误差表达式为

$$\Delta\phi_{\text{非}} = \frac{4VB'_0}{\Delta\beta} \int_0^{2\pi} \tau(\theta) \frac{r \cdot (R+r) \sin(\theta - \theta'_0)}{[R+r+\text{rcos}(\theta - \theta'_0)]^2 + [\text{rsin}(\theta - \theta'_0)]^2} d\theta \quad (5)$$

式中: V 为沃尔德常数, $V=8.5 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{mT}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; $\Delta\beta$ 为光纤固有线性双折, $\Delta\beta=600\pi \text{ rad/m}$; B'_0 为平行于线圈平面磁场均匀分布的区域 S 中最大磁感应强度点; $\tau(\theta)$ 为光纤扭转角度,对于保偏光纤可认为单位长度光纤偏振轴扭转率沿光纤是均匀的,所以 $\tau(\theta)=\tau_0=0.1 \text{ rad/m}$; θ'_0 为磁场方向相对基准轴的角度; θ 为磁场方向与光纤环所成角度; R 为磁场源与光纤环边缘的距离,其中 R 为正数表示磁场源在光纤环外,负数表示磁场源在光纤环内; r 为光纤环半径在此取值 0.058 m 。

通过对单、双层加热片磁场分析得到了 L_1 、 L_6 、 L_{11} 三个平面上磁场参数如表 2 所示。将加热片磁场参数带入非均匀磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差表达式(5)中,通过计算得到加热片磁场与光纤陀螺仪磁敏感相位误差的关系,如图 9 所示。

通过观察图 9 可知,加热片磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差随距离 L_n 的增加而减小,双层加热片磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差与角度之间呈现倾斜正弦关系。单层和双层加热片产生的磁场磁敏感相位误差最大值如表 3 所示,相同距离 L_n 单层加热片产生的辐射磁场磁敏感相位误差均远大于双层加热片,且当 $L_n=8.1\text{ mm}$ 时单层和双层加热片磁敏感相位误差最大值分别为 $1.299 \times 10^{-10} \text{ rad}$ 和 $5.572 \times 10^{-12} \text{ rad}$,此距离下双层加热片磁场对陀螺仪的干扰是单层加热片干扰的 23 倍,可见双层加热片设计更有利于减小加热片磁场对光纤陀螺仪的电磁干扰,提升光纤陀螺仪精度和稳定性。

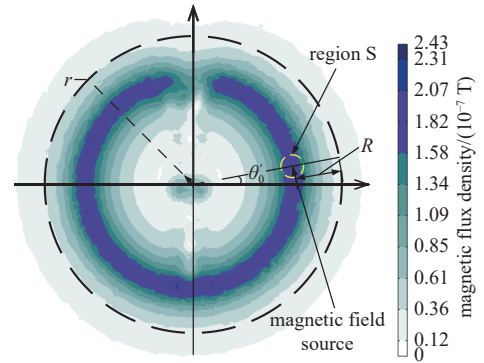


Fig. 8 Coordinate distribution of magnetic field in the optical fiber ring plane $L_1=8.1\text{ mm}$ away from the surface of the double-layer heating plate

图 8 距离双层加热片表面 $L_1=8.1\text{ mm}$ 平面磁场坐标分布

表 2 加热片磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差计算参数

Table 2 Calculation parameters of phase error of fiber optic gyroscope sensitivity to heating plate magnetic field

| heating plate | n | L/mm | R/m | $\theta'_\theta/(\text{°})$ | B'_θ/T |
|---------------|-----|---------------|--------------|-----------------------------|------------------------|
| single-layer | 1 | 8.100 | -0.024 | -176.251 | 8.063×10^{-6} |
| | 6 | 20.600 | -0.041 | -17.341 | 3.328×10^{-6} |
| | 11 | 33.100 | -0.053 | -171.174 | 2.063×10^{-6} |
| double-layer | 1 | 8.100 | -0.020 | 9.356 | 2.691×10^{-7} |
| | 6 | 20.600 | -0.027 | -69.422 | 3.960×10^{-8} |
| | 11 | 33.100 | -0.038 | -160.012 | 1.690×10^{-8} |

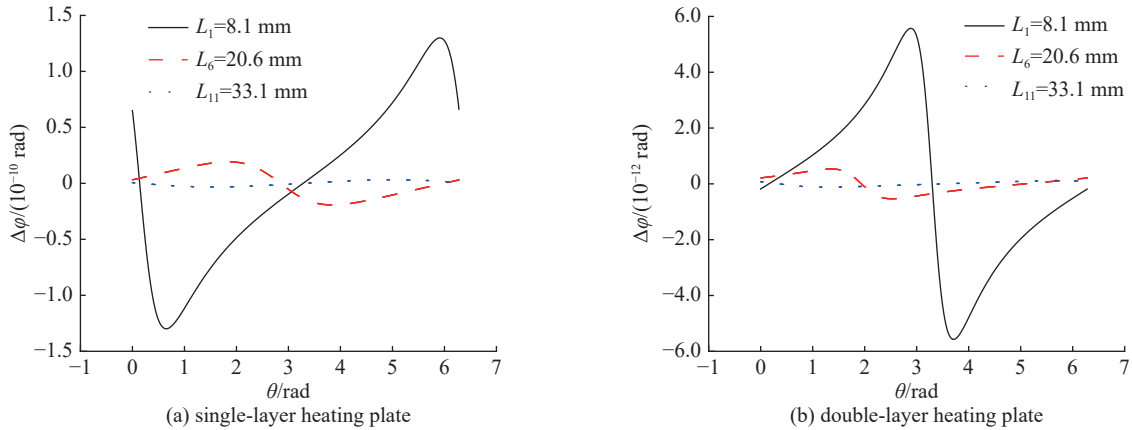
Fig. 9 Gyro phase error caused by magnetic field in the bisector plane of the fiber ring distance from the heating plate L_n 图 9 距离加热片 L_n 的光纤环等分平面上磁场产生的陀螺相位误差

表 3 加热片上表面不同距离磁场对陀螺仪产生的磁敏感相位误差最大值

Table 3 Maximum phase errors of the gyroscope induced by the magnetic field at different distances on the surface of the heating plate

| n | L/mm | phase error of single layer heating plate/rad | phase error of double layer heater/rad |
|-----|---------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | 8.1 | 1.299×10^{-10} | 5.572×10^{-12} |
| 6 | 20.6 | 1.925×10^{-11} | 5.343×10^{-13} |
| 11 | 33.1 | 3.232×10^{-12} | 1.193×10^{-13} |

4 结 论

本文针对光纤陀螺仪台体中加热片磁场对光纤陀螺仪的影响,设计双层加热片结构。通过对单层加热片和双层加热片的磁场进行分析得到以下结论。

1)分析发现两种加热片辐射磁场均为非均匀磁场,加热片距离较近的平面磁通密度呈现环状分布,当距离增加时平面上的磁通密度仍为环状分布但强度逐渐过渡到中心强周围弱,加热片空间磁通密度的分布与加热片中加热丝的绕制结构相关。

2)随着光纤环平面与加热片距离的距离增加,光纤环平面上单层加热片的磁通密度最大值约为双层加热片的 30 至 122 倍,并且双层加热片中加热丝厚度增加导致双层加热片消磁能力降低,同时上下两层加热片之间距离增加时也会削弱双层加热片的消磁能力。

3)根据仿真结果,计算了加热片产生的辐射磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差的大小。双层加热片磁场对光纤陀螺仪磁敏感相位误差随着磁场方向与光纤环之间的角度呈现倾斜正弦变化;光纤环下表面空间平面上,单层加热片辐射磁场对陀螺仪的干扰是双层加热片干扰的 23 倍。所以,双层加热片结构设计减小了光纤陀螺仪内部的电磁干扰,有助于提升光纤陀螺仪的精度。

参考文献:

- [1] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Zhang Guicai. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing:

- National Defense Industry Press, 2008)
- [2] Nayak J. Fiber-optic gyroscopes: from design to production [Invited][J]. *Applied Optics*, 2011, 50(25): E152-E161.
- [3] 王婷婷, 王晓伟, 金靖, 等. 空间用光纤陀螺辐射诱导磁场误差变化机理研究[J]. 半导体光电, 2022, 43(4): 689-696. (Wang Tingting, Wang Xiaowei, Jin Jing, et al. Study on the variation mechanism of radiation-induced magnetic field error in space fiber optic gyroscope[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(4): 689-696)
- [4] 李家鞞, 刘德文, 陈华江, 等. 弹载微小化三轴一体光纤陀螺组合设计[J]. 飞控与探测, 2022, 5(3): 78-83. (Li Jiawei, Liu Dewen, Chen Huajiang, et al. Design of miniature three-axis integrated fiber optic gyroscope for guided missile[J]. *Flight Control and Detection*, 2022, 5(3): 78-83)
- [5] 赵坤, 胡小毛, 刘伯晗. 舰船长航时光纤陀螺惯导系统技术及其未来发展[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(3): 281-287. (Zhao Kun, Hu Xiaomao, Liu Bohan. Long-endurance fiber optic gyroscope INS for ships and its development trends[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(3): 281-287)
- [6] 张旭, 周鹏辉. 光纤陀螺仪及其在航空领域的应用前景[J]. 黑龙江科技信息, 2012(17): 79. (Zhang Xu, Zhou Penghui. Fiber optic gyroscope and its Application prospect in aviation field[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2012(17): 79)
- [7] 周闻青, 费宇明, 洪桂杰, 等. 高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 220-227. (Zhou Wenqing, Fei Yuming, Hong Guijie, et al. Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 220-227)
- [8] 毛彩虹, 宫兆涛, 牟旭东, 等. 有限差分法在光纤陀螺温度场研究中的应用[J]. 压电与声光, 2003, 25(2): 98-101. (Mao Caihong, Gong Zhaotao, Mou Xudong, et al. Finite difference method for temperature field in fiber optical gyroscope[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2003, 25(2): 98-101)
- [9] 冯丽爽, 南书志, 金靖. 光纤陀螺温度建模及补偿技术研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(5): 939-941,1049. (Feng Lishuang, Nan Shuzhi, Jin Jing. Research on modeling and compensation technology for temperature errors of FOG[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(5): 939-941,1049)
- [10] 白俊卿, 张科, 耿为盟. 光纤陀螺惯导系统温度建模与补偿技术研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 201-203. (Bai Junqing, Zhang Ke, Geng Weimeng. The research for FOG inertial navigation system of modeling and temperature compensation technology[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(2): 201-203)
- [11] 陈一平, 梁瑾, 张登伟, 等. 光纤陀螺磁温耦合效应[J]. 光子学报, 2018, 47: 0506005. (Chen Yiping, Liang Cui, Zhang Dengwei, et al. Magnetic-temperature coupling effect of a fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47: 0506005)
- [12] 湛尧周, 王夏霄, 高洋洋, 等. 地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响机理研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 147-150. (Chen Yaozhou, Wang Xiaoxiao, Gao Yangyang, et al. Research on the influence mechanism of earth's magnetic field on zero bias of high precision FOG[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(1): 147-150)
- [13] 鲁军, 殷建玲, 刘磊, 等. 光纤陀螺电路辐射磁场的测试[J]. 无线电工程, 2020, 50(8): 678-682. (Lu Jun, Yin Jianling, Liu Lei, et al. Testing on radiation magnetic field of FOG circuit[J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(8): 678-682)
- [14] 肖程, 刘军, 殷建玲, 等. 光纤陀螺在球面非均匀磁场中的磁敏感性研究[J]. 光学仪器, 2014, 36(5): 426-431. (Xiao Cheng, Liu Jun, Yin Jianling, et al. Research on magnetic sensibility of fiber optic gyroscope in the spherical inhomogeneous magnetic field[J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(5): 426-431)
- [15] 谭曦, 刘军, 殷建玲, 等. 光纤陀螺在直流及交变磁场中的磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2012, 39: 0905006. (Tan Xi, Liu Jun, Yin Jianling, et al. Magnetic sensitivity studies of fiber optic gyroscope in direct current and alternating current magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39: 0905006)
- [16] Erlichson H. The experiments of Biot and Savart concerning the force exerted by a current on a magnetic needle[J]. *Am J Phys*, 1998, 66(5): 385-391.
- [17] 张登伟, 牟旭东, 舒晓武, 等. 单模光纤环轴向磁场问题的理论研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 672-675. (Zhang Dengwei, Mou Xudong, Shu Xiaowu, et al. Theory study on axial magnetic field in single-mode fiber loop[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(3): 672-675)
- [18] 王夏霄, 秦祎, 于佳, 等. 光纤陀螺保偏光纤环几何轴向磁敏感性理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 100-105. (Wang Xiaoxiao, Qin Yi, Yu Jia, et al. Theoretical study on geometric axial magnetic sensitivity of polarizing fiber ring of fiber optic gyroscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 100-105)
- [19] 王夏霄, 冯志芳, 秦祎, 等. 光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42: 0805005. (Wang Xiaoxiao, Feng Zhifang, Qin Yi, et al. Study on the axial magnetic field sensitivity in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0805005)
- [20] 王夏霄, 宋凝芳, 张春熹, 等. 光纤陀螺磁敏感性的试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1116-1120. (Wang Xiaoxiao, Song Ningfang, Zhang Chunxi, et al. Experiment study on magnet sensitivity of fiber optic gyro[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(10): 1116-1120)
- [21] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Zhang Weixu. Fiber optic gyro and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008)