光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024030301

基于遗传算法的磁自抑制加热器的设计与优化

刘彦彦[1,2,3]，祝　静[1,2,3*]，谭志成[1,2,3]，刘晓飞[4]，王　帅[5]，祝连庆[1,2,3]

（1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192；
2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室，北京 100016；
3. 广州南沙光子感知技术研究院，广州 南沙 511462；4. 北京航天测控技术有限公司，北京 100041；
5. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院，合肥 230009）

摘　要： 超低磁噪声(0～10 nT)的碱金属加热技术是无自旋交换弛豫原子磁力仪实现超高灵敏度的关键，文章提出一种基于遗传算法的磁自抑制加热器多目标优化设计方法。该方法基于毕奥-萨伐尔定律推导目标函数新模型，优化的目标包括加热丝的长度、宽度、厚度和电流方向4类(18个)参数，以此获取加热器最佳磁自抑制性能。利用有限元分析方法，仿真分析了目标区域的磁场分布和温度分布，结果表明：加热器在目标区域的中心区域产生0.02 nT/mA的平均磁场和180.34 ℃的平均温度。实验测试结果显示：目标区域的磁通密度取值在0.13 nT/mA和0.14 nT/mA范围内，这表明加热器的磁场自抑制性能较好。该研究有助于进一步提高原子磁力仪的性能。

关键词： 无自旋交换弛豫原子磁力仪；磁自抑制；遗传算法；毕奥-萨伐尔定律

中图分类号： TM936　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0576－09

Optimal Design of Heater with Magnetic Field Self-suppression Based on Genetic Algorithm

LIU Yanyan[1,2,3], ZHU Jing[1,2,3], TAN Zhicheng[1,2,3], LIU Xiaofei[4], WANG Shuai[5], ZHU Lianqing[1,2,3]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, CHN; 3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, CHN; 4. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd, Beijing 100041, CHN; 5. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

Abstract: The ultra-low magnetic noise (＜10 nT) of alkali metal heating technique is critical for achieving ultra-high sensitivity in spin-exchange relaxation-free atomic magnetometers. In this study, a multi-objective optimization and design method for a magnetic-field self-suppression heater based on a genetic algorithm was proposed. A novel objective function model based on the Biot-Savart law was derived, and four types of parameters were used for the optimization objectives (a total of 18), including the length, width, thickness, and current direction of the heating wire, in order to obtain the best magnetic self-suppression performance from the heater. Using the finite element analysis method, the magnetic field distribution and temperature distribution in the target region were simulated and analyzed, and the results showed that the heater produced an average magnetic field of 0.02 nT/mA and an average temperature of 180.34 ℃ in the center of the target region. Experimental tests confirmed that the magnetic flux density in the target region fell within the range of 0.13～0.14 nT/mA, which indicated that the heater had a better self-suppressing performance for the magnetic field.

收稿日期：2024－03－03.

*通信作者：祝　静

This work contributes to further enhancing the performance of atomic magnetometers.

Key words: spin-exchange relaxation-free (SERF) atomic magnetometers; magnetic field self-suppression; genetic algorithm; Biot-Savart law

0 引言

无自旋交换弛豫(Serf)原子磁力仪是目前理论灵敏度(0.01 fT/Hz$^{1/2}$)[1]最高的磁力仪之一,在生物医学[2-3]、航空航天技术[4-5]和地磁勘探[6]等领域有良好的应用前景。超低磁噪声(0～10 nT)和高温环境是碱金属原子实现 Serf 状态的关键[7-8]。根据碱金属原子种类和浓度的不同,需要将碱金属原子加热到 100～200 ℃[9-10],使目标区域内部原子密度达到 10^{13}～10^{14} cm^{-3}。

超低磁噪声的碱金属加热技术主要有热气流加热法[11-12]、激光加热法[13-14]和电加热法[15]。热气流加热法的优点是功率大、无磁干扰,但温度控制精度低且易受大气流的干扰[16]。激光加热法不会引入额外的磁场,常用于加热低功率的微型仪器[17]。电加热法具有控制精度高、应用灵活等优点,因此,大多数原子磁力仪都采用电加热法[18-19],但在电加热方式下会不可避免地产生干扰磁场[20]。

研制具有磁自抑制作用的电加热器是当前研究的热点[21-25]。2022 年,Lu 等设计了单层的磁场自抑制的加热器结构,利用遗传算法对每个加热丝线圈的尺寸和电流方向进行了优化,以减小目标区域中的磁场[21]。Liang 等通过对单层和多层加热器中加热丝产生的磁场进行定量分析,得出了在单层加热器中,产生 2^N 多极磁矩的传导模式具有更优越的磁抵消效果。同时,多层结构也应形成 2^N 多极磁矩,以提高磁抑制性能[22]。所以,典型的磁自抑制加热器原理是各层之间相邻导线通相反方向的电流,使其产生的磁场相互抵消[23]。2023 年,Liu 等采用遗传算法优化了具有磁场自抑制功能的双层电加热器结构,当电流为 10 mA 时,磁场为 3.052 0 nT[24]。Shao 等提出了一种双平面加热器的优化设计方法,对加热器的结构参数和电流方向进行优化,结果表明双平面加热结构在目标区域的中心位置产生的平均磁场为 0.06 nT/mA[25]。然而,加热器结构优化局限于二维平面,对于加热器中加热丝优化结构参数只包括长度和电流方向,没有同时考虑厚度和宽度,限制了磁自抑制效果的提高。

本文提出了一种基于遗传算法的磁自抑制加热器多目标优化设计方法,推导了基于毕奥-萨伐尔定律的目标函数新模型,优化目标包括加热丝的长度、宽度、厚度和电流方向 4 类(18 个)参数。设计了双层磁自抑制加热器结构,利用有限元方法对优化后的加热器进行了磁场分布和温度分布的仿真,并实验验证了其磁场和温度性能。

1 理论和方法

1.1 毕奥-萨伐尔定律

毕奥-萨伐尔定律是描述恒定电流产生磁场的方程[26]。电流元在空间中任意点 P 处所激发的磁场为[27]:

$$\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_V \boldsymbol{J}\,\mathrm{d}V'\times\frac{\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|^3} \tag{1}$$

式中,真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ N/A^2,V'是线圈的体积,V 是线圈计算域的体积,$\boldsymbol{r}$ 是指向点 P 的位置矢量,$\boldsymbol{r}'$是指向电流元 $\boldsymbol{J}\,\mathrm{d}V$ 的位置矢量,$\boldsymbol{J}$ 是电流的密度。

假设电流恒定,则 $\boldsymbol{J}dV=Ids$。因此,公式(1)可改写为:

$$\boldsymbol{B}=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\iiint_V \mathrm{d}\boldsymbol{s}\times\frac{\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|^3} \tag{2}$$

磁自抑制加热器采用方形加热丝线圈结构,如图 1(b)所示。加热丝线圈由 1,2,3 和 4 的四根导线组成。L 表示加热丝线圈的长度,加热丝 1,2,3 和 4 的长度分别为 $2L_i$,$2L_i-2w$,$2L_i$ 和 $2L_i-2w$,i 表示第 i 圈。所有加热丝线圈的宽度为 w、厚度为 t。加热丝 1,2,3 和 4 在空间任意点 P 上产生的磁场分别为 $\boldsymbol{B}_1$,$\boldsymbol{B}_2$,$\boldsymbol{B}_3$ 和 $\boldsymbol{B}_4$,其计算公式为:

$$\boldsymbol{B}_1(x,y,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{-L_i}^{L_i}\int_{-w-L_i}^{L_i}\int_0^t\frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{i}&\boldsymbol{j}&\boldsymbol{k}\\ dx'&dy'&dz'\\ x-x'&y-y'&z-z'\end{bmatrix} \tag{3}$$

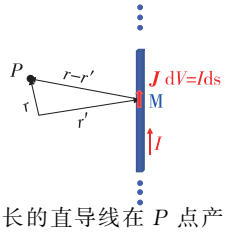
$$\boldsymbol{B}_2(x,y,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{-L_i+w}^{L_i-w}\int_{-w}^{L_i}\int_0^t\frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{i}&\boldsymbol{j}&\boldsymbol{k}\\ dx'&dy'&dz'\\ x-x'&y-y'&z-z'\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{B}_3(x,y,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{-L_i}^{-L_i+w}\int_{-L_i}^{L_i}\int_{0}^{t}\frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k}\\ dx' & dy' & dz'\\ x-x' & y-y' & z-z'\end{bmatrix} \tag{5}$$

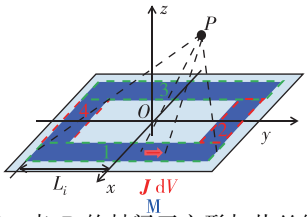
$$\boldsymbol{B}_4(x,y,z)=\frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{L_i-w}^{L_i}\int_{-L_i+w}^{-L_i}\int_{0}^{t}\frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k}\\ dx' & dy' & dz'\\ x-x' & y-y' & z-z'\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{k}$ 分别为沿 x，y，z 轴的单位向量；(x,y,z)为 P 点在空间中的坐标；(x',y',z')为方形加热丝线圈电流元件的坐标。

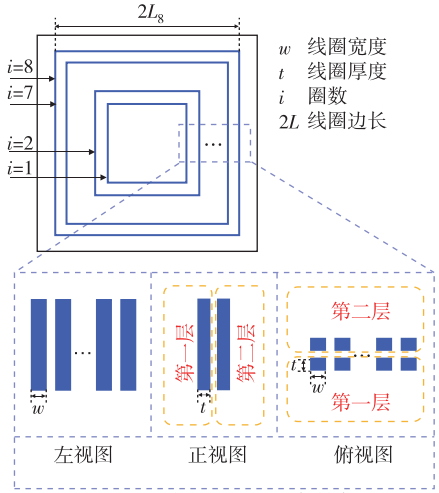
在单层电加热器中，产生 2^N 多极磁矩的传导模式具有更好的磁抵消效果[22]。由于电加热器大小的限制，加热丝线圈的数量设计为 8($N=3$)。加热器结构如图 1(c)所示。



(a) 无限长的直导线在 P 点产生的磁场



(b) 空间中任意一点 P 的封闭正方形加热丝线圈产生的磁场



(c) 双层加热器的基本结构

图 1　两种情况下所产生的磁场和基本结构

在任意点 P 处，单层加热器结构产生的磁场为：

$$\boldsymbol{B}_P(x,y,z)=\sum_{i=1}^{8}\boldsymbol{B}_i(x,y,z)=\sum_{i=1}^{8}(\boldsymbol{B}_1+\boldsymbol{B}_2+\boldsymbol{B}_3+\boldsymbol{B}_4) \tag{7}$$

1.2　方法

1.2.1　遗传算法

遗传算法的基本思想是模拟自然界生物进化的遗传机制和原理，逐步逼近最优解[28]。利用遗传算法优化每个方形加热丝线圈的结构参数和电流方向。结构参数包括加热丝线圈的长度($2L$)、宽度(w)和厚度(t)。遗传算法流程图[29]如图 2 所示。

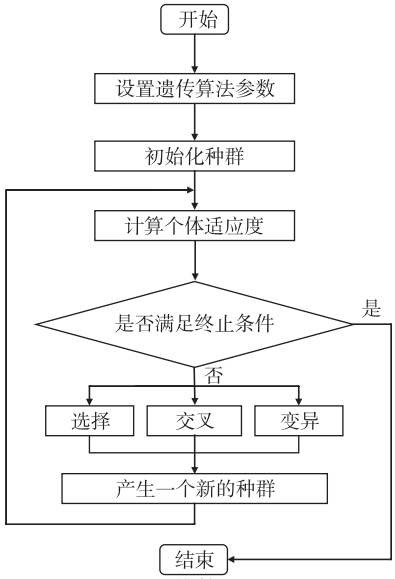


图 2　遗传算法流程图

目标区域(边长为 10 mm)被分成 8 个大小相等的小立方体(边长为 5 mm)。小立方体中心位置的磁场定义为 $\boldsymbol{B}_{P1}-\boldsymbol{B}_{P8}$，目标区域中心位置磁场定义为 $\boldsymbol{B}_{P0}$。9 个位置磁场之和定义为 $\boldsymbol{B}_{min}$($\boldsymbol{B}_{min}=\boldsymbol{B}_{P0}+\boldsymbol{B}_{P1}+\boldsymbol{B}_{P2}+\boldsymbol{B}_{P3}+\boldsymbol{B}_{P4}+\boldsymbol{B}_{P5}+\boldsymbol{B}_{P6}+\boldsymbol{B}_{P7}+\boldsymbol{B}_{P8}$)。$\boldsymbol{B}_{min}$ 作为遗传算法中的目标函数，则适应度函数 f 的表达式为：

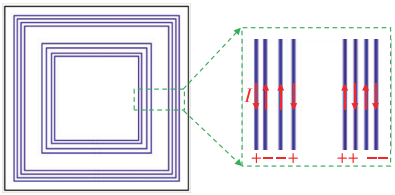
$$f=\frac{1}{\boldsymbol{B}_{min}} \tag{8}$$

适应度函数 f 用于优化 4 类参数(L，w，t 和每个线圈的电流方向)，优化结果得到最小值 $\boldsymbol{B}_{min}$。其中 $L=[L_1,L_2,L_3,L_4,L_5,L_6,L_7,L_8]$，$I=[I_1,I_2,I_3,I_4,I_5,I_6,I_7,I_8]$。

遗传算法的约束条件由导热壳尺寸限制和经验值确定，具体为(单位：mm)：$L_{i+1}-L_i>=0.4$；$5<$

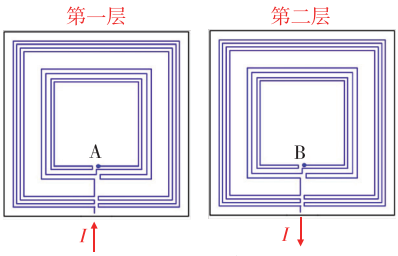
L_i < 12;0.2 =< w <=0.4;0.02 =< t <=0.08。

优化后结构参数详见表 1。磁自抑制加热器的结构布局如图 3 所示,其中箭头表示电流方向。



箭头表示电流方向

(a) 加热丝的优化结构



A, B: 过孔

(b) 实际定制加工的结构

图 3 磁自抑制加热器的结构布局示意图

表 1 加热器结构参数优化结果

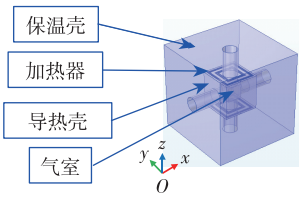
i	1	2	3	4	5	6	7	8
L/mm	5.49	5.89	6.57	7.15	9.42	9.89	10.37	10.80
电流方向	+	−	−	+	−	+	−	+
w/mm	0.2							
t/mm	0.02							

图 3(b)是实际定制的加热丝线圈结构布局。设计为一种双层加热器结构,通过在两层中施加相反的电流来抑制磁噪声。A 和 B 表示过孔,用于连接第一层和第二层的加热丝导线。相反的电流 I 分别接在电流源的正负极上。

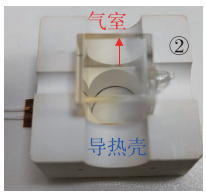
1.2.2 有限元分析方法

磁自抑制加热器磁场的有限元仿真流程分为六步。第一步,构建加热模块的模型结构,如图 4(a)所示,主要由气室(目标区域)、导热壳、加热器、保温壳组成,其中加热器放置在保温壳的两侧。气室的边长为 10 mm、导热壳的边长为 27 mm、保温壳的边长为 60 mm。第二步,设置加热模块的材料。气室的材料为耐热玻璃,内部是钾原子。气室被导热壳包裹,导热壳的材料为氮化硼。最外层是聚四氟乙烯保温壳,其作用是减少加热时的热损失。第三步,物理场选择“AC/DC→电磁场→磁场”。第四步,对所建的模型进行网格划分。第五步,进行稳态分析求解。第六步,求解完毕后,绘制气室内的磁场分布图。

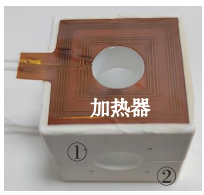
磁自抑制加热器温度仿真流程同样分为六步,前两步与磁场仿真流程相同。第三步,添加“传热→固体传热”物理场,边界热源设置为加热器。第四步,对模型进行网格划分。第五步,进行稳态分析。第六步,气室内温度达到 180 ℃后,绘制气室内温度分布图。



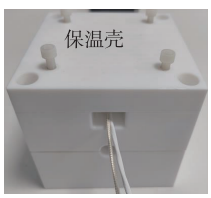
(a) 加热模块仿真模型



(b) 导热壳和气室照片



(c) 加热器照片



(d) 保温壳照片

图 4 加热模块仿真模型及其照片

1.2.3 实验方法

加热器的加热丝材料为康铜,在 25 ℃的室温下,使用万用表测得该结构的电阻为 142 Ω。图 4(b)~(d)为加热模块的照片,包括导热壳、加热器、保温壳和气室。气室是 Serf 原子磁力仪的核心敏感元件,内部温度要达到 180 ℃才能实现钾原子的 Serf 状态[30]。加热模块的组装方式:气室置于导热壳内,如图 4(b)所示;由图 4(c)可见,两片加热器分别放置在导热壳的上下两侧,通过双绞线使其与精密电流源相连;加热模块最外层为保温壳,如图 4(d)所示。

本文分别对磁自抑制加热器的磁场和温度性能进行了测试。加热器磁场性能测试设备包括精密电

流源(型号 MPS-3303)、磁通门磁强计(型号 CH-330)和磁屏蔽筒。精密电流源供电给加热器,磁通门磁强计用于测量加热器产生的磁场,磁屏蔽筒作用是消除环境磁场。通过检测电流源产生的电流与磁场的关系,研究了加热器的磁场性能。电流分别设置为 50,100,150 和 200 mA。

温度性能测试的设备包括精密电流源(型号 MPS-3303)和温度传感器(PT1000),其中精密电流源的作用是给加热器供电,同时使用 PT1000 实时测量加热器温度。通过研究温度与时间的关系来分析加热器的温度性能。

2　结果与讨论

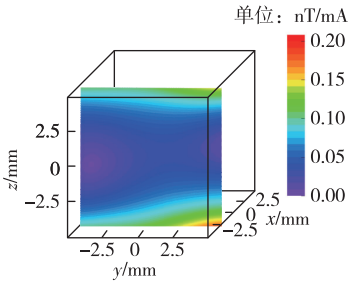
2.1　仿真结果

采用有限元分析方法对目标区域的磁通密度和温度分布进行了仿真分析。图 5 为目标区域中加热器产生的磁场。$\Delta \boldsymbol{B}$ 为磁通密度梯度,$\Delta \boldsymbol{B}_{y=0}$ 表示在 $y=0$ mm 线上的磁通密度梯度。图 5(a)所示为 $x=-2.5$ mm 平面上的磁通密度。当 $y=0$ mm 时,随着 z 从 -2.5 mm 增大到 2.5 mm,磁场从 0.05 nT/mA 减小到 0.03 nT/mA($x=-2.5$ mm,$y=0$ mm,$z=0$ mm),然后增大到 0.05 nT/mA。$\Delta \boldsymbol{B}_{y=0}$ 等于 0.02 nT/mA。

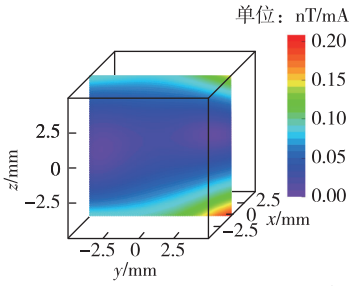
图 5(b)～(f)分别为 $x=0$ mm,$x=2.5$ mm,$y=-2.5$ mm,$y=0$ mm,$y=2.5$ mm 平面上的磁通密度。在 y 方向上,这些平面上的磁通密度同样是先减小后增大,与图 5(a)相同。加热器位于气室的上下两侧,磁通密度在靠近加热器区域时较高。

图 5(g)～(i)分别为 $z=-2.5$ mm,$z=0$ mm 和 $z=2.5$ mm 平面上的磁通密度。$\boldsymbol{B}_{max}$ 和 $\boldsymbol{B}_{min}$ 分别表示磁通密度的最大值和最小值。图 5(g)～(i)的 $\boldsymbol{B}_{max}$ 和 $\boldsymbol{B}_{min}$ 分别为 0.12 和 0.02 nT/mA,0.08 和 0.007 nT/mA,0.1 和 0.02 nT/mA。其中,$\Delta \boldsymbol{B}_{z=-2.5\text{ mm}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{z=0\text{ mm}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{z=2.5\text{ mm}}$ 分别为 $z=-2.5$ mm,$z=0$ mm,$z=2.5$ mm 平面上的磁通密度梯度。$\Delta \boldsymbol{B}_{z=-2.5\text{ mm}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{z=0\text{ mm}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{z=2.5\text{ mm}}$ 分别为 0.10,0.073,0.08 nT/mA。$\Delta \boldsymbol{B}$ 的值在 $z=0$ mm 平面上取得最小值。

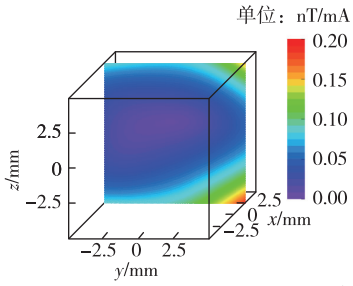
$\Delta \boldsymbol{B}_{x\text{-plane}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{y\text{-plane}}$,$\Delta \boldsymbol{B}_{z\text{-plane}}$ 分别表示 x,y,z 平面上的 $\Delta \boldsymbol{B}$,其值分别为 0.194,0.142,0.10 nT/mA。加热器在目标区域的中心区域产生 0.02 nT/mA 的平均磁场,证明了基于遗传算法优化磁自抑制加热器的有效性。



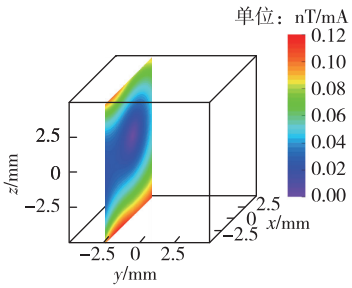
(a) $x=-2.5$ mm 平面上的磁通密度



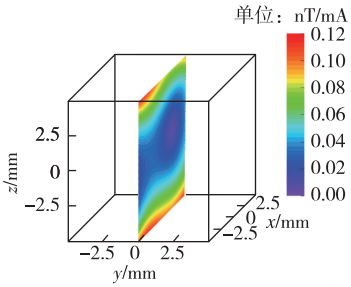
(b) $x=0$ mm 平面上的磁通密度



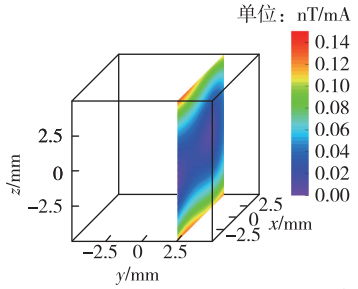
(c) $x=2.5$ mm 平面上的磁通密度



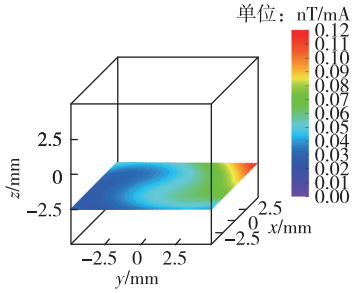
(d) $y=-2.5$ mm 平面上的磁通密度



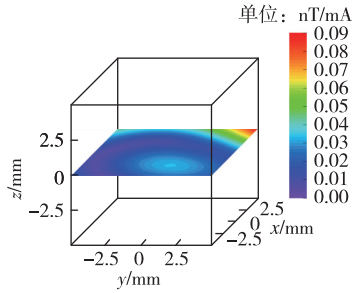
(e) $y=0$ mm 平面上的磁通密度



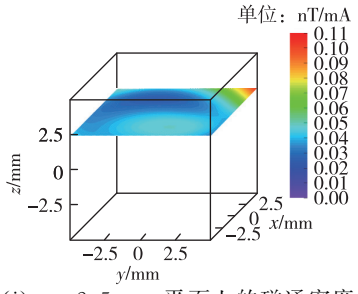
(f) $y=2.5$ mm 平面上的磁通密度



(g) $z=-2.5$ mm 平面上的磁通密度



(h) $z=0$ mm 平面上的磁通密度

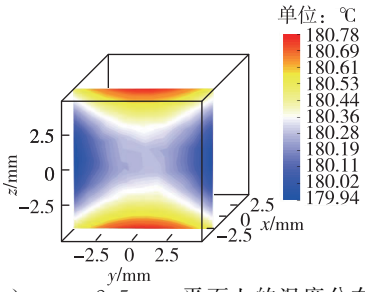


(i) $z=2.5$ mm 平面上的磁通密度

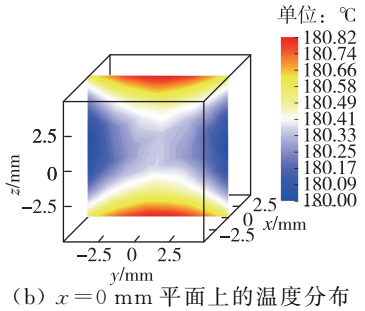
图 5 磁场分布图

图 6 是目标区域温度分布图。180.00～180.40 ℃之间区域定义为均匀区(S)。$S_{x=-2.5}$,$S_{x=0}$,$S_{x=2.5}$,$S_{y=-2.5}$,$S_{y=0}$,$S_{y=2.5}$,$S_{z=-2.5}$,$S_{z=0}$ 和 $S_{z=2.5}$ 分别表示 $x=-2.5$ mm,$x=0$ mm,$x=2.5$ mm,$y=-2.5$ mm,$y=0$ mm,$y=2.5$ mm,$z=-2.5$ mm,$z=0$ mm,$z=2.5$ mm 平面的均匀区面积。$\Delta T_{y=-2.5}$,$\Delta T_{y=0}$ 和 $\Delta T_{y=2.5}$ 表示 $y=-2.5$ mm,$y=0$ mm 和 $y=2.5$ mm 三条直线上的温差。

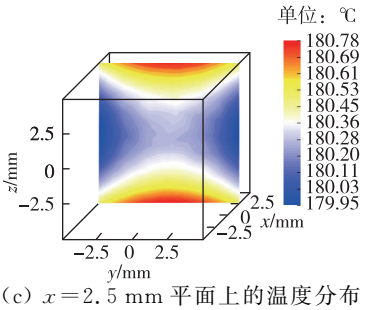
图 6(a)是 $x=-2.5$ mm 平面上的温度分布。均匀区形状为 $y=0$ mm,$z=0$ mm 轴对称蝴蝶结形,$S_{x=-2.5}=77$ mm^2;当 $y=0$ mm 时,z 从 -2.5 mm 增至 2.5 mm,T 从 180.38 ℃降至 180.26 ℃($x=-2.5$ mm,$y=0$ mm,$z=0$ mm),后又升至 180.39 ℃,$\Delta T_{y=0}=0.13$ ℃。$\Delta T_{y=-2.5}=0.14$ ℃,且 $\Delta T_{y=-2.5}>\Delta T_{y=0}$。$\Delta T_{y=2.5}=\Delta T_{y=0}=0.13$ ℃。



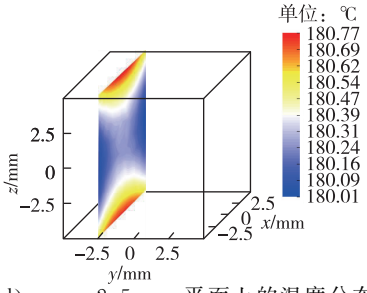
(a) $x=-2.5$ mm 平面上的温度分布



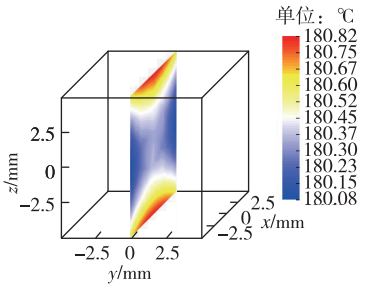
(b) $x=0$ mm 平面上的温度分布



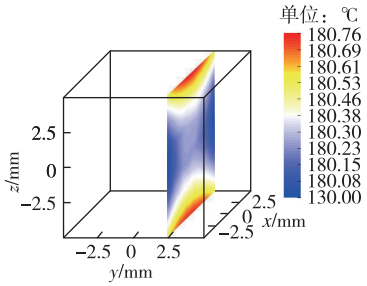
(c) $x=2.5$ mm 平面上的温度分布



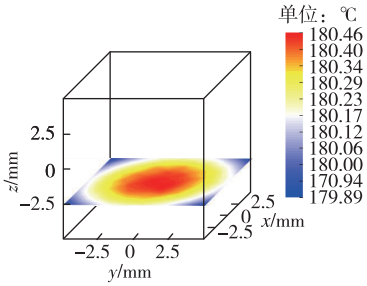
(d) $y=-2.5$ mm 平面上的温度分布



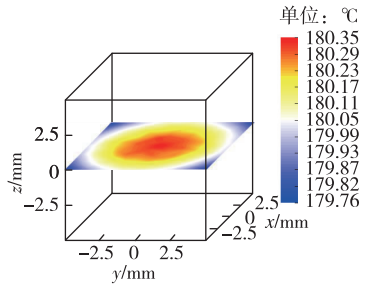
(e) $y=0$ mm 平面上的温度分布



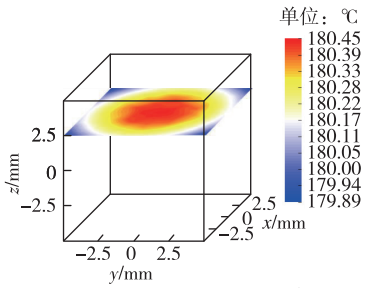
(f) $y=2.5$ mm 平面上的温度分布



(g) $z=-2.5$ mm 平面上的温度分布



(h) $z=0$ mm 平面上的温度分布



(i) $z=2.5$ mm 平面上的温度分布

图 6　温度分布图

图 6(b)～(f)分别是 $x=0$ mm，$x=2.5$ mm，$y=-2.5$ mm，$y=0$ mm，$y=2.5$ mm 平面上的温度分布，分布图同样呈现出蝴蝶结形。$S_{x=0}$，$S_{x=2.5}$，$S_{y=-2.5}$，$S_{y=0}$，$S_{y=2.5}$ 分别等于 70，77，77，70 和 77 mm^2。靠近加热器的区域温度较高。其中$x=-2.5$ mm，$x=2.5$ mm，$y=-2.5$ mm，$y=2.5$ mm 平面的均匀区面积相等，而 $x=0$ mm，$y=0$ mm 平面的均匀区面积相等。

图 6(g)显示了 $z=-2.5$ mm 平面上的温度分布，均匀区呈圆形，$S_{z=-2.5}=80$ mm^2。当 $z=-2.5$ mm 时，y 从−2.5 m 增加到 2.5 mm，温度从 180.38 ℃上升到 180.45 ℃($x=0$ mm，$y=0$ mm，$z=-2.5$ mm)，随后下降至 180.38 ℃。$\Delta T_{y=0}=0.07$ ℃，$\Delta T_{y=2.5}=0.05$ ℃，$\Delta T_{y=-2.5}=0.07$ ℃，即 $\Delta T_{y=2.5}<\Delta T_{y=0}=T_{y=-2.5}$。

图 6(h)～(i)分别是 $z=0$ mm 和 $z=2.5$ mm 平面上的温度分布，温度分布图呈圆形。$S_{z=0}$ 和 $S_{z=2.5}$ 均等于 80 mm^2。目标区域中心位置温度最高，平均为 180.34 ℃。平面总面积为 100 mm^2，温度分布均匀区面积占总面积的 70%～80%，证明加热器在整个目标区域内产生的温度分布是均匀的。

2.2　实验结果

实验结果如图 7 所示，详细磁场值如表 2 所示。其中，$\boldsymbol{B}'_x$，$\boldsymbol{B}'_y$，$\boldsymbol{B}'_z$ 分别表示 x，y，z 轴方向的磁场值。总磁场 $\boldsymbol{B}'$和磁通量密度 $\boldsymbol{B}$ 分别可由公式(9)、(10)求得。由表 2 可知，目标区域内的磁通密度取值在 0.13 和 0.14 nT/mA 范围内。

$$\boldsymbol{B}'=\sqrt{\boldsymbol{B}'^2_x+\boldsymbol{B}'^2_y+\boldsymbol{B}'^2_z} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{B}=\frac{\boldsymbol{B}'}{I} \tag{10}$$

表 2　CH-330F 随电流变化的测量结果

I/mA	$\boldsymbol{B}'_x$/nT	$\boldsymbol{B}'_y$/nT	$\boldsymbol{B}'_z$/nT	$\boldsymbol{B}'$/nT	$\boldsymbol{B}$/(nT·mA^{-1})
50	4.3	−3.1	−4.3	6.83	0.14
100	8.6	−6.2	−8.2	13.40	0.13
150	12.3	−9.3	−11.4	19.18	0.13
200	16.4	−12.4	−14.4	25.10	0.13

图 7(a)为实验和仿真的电流与磁场的关系图。蓝线表示测量磁场，随着电流从 50 mA 增加到 200 mA，磁场从 6.83 nT 线性增加到 25.10 nT。红线表示仿真磁场，当电流从 50 mA 增加到 200 mA 时，仿真磁场从 0.63 nT 线性增加到 2.53 nT。当电流相等时，实验磁场大于仿真磁场，误差主要是由实验中一系列连接线产生的干扰磁场造成的[24]。

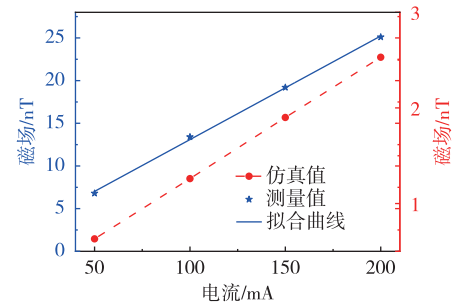
电加热器产生的磁场随电流呈线性变化，因此测量数据可以拟合在一条直线上，拟合函数为：

$$\boldsymbol{B}'=kI+b \tag{11}$$

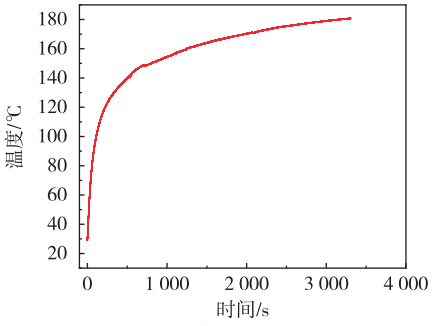
式中，单位电流产生的磁场 $k=0.121\,4$ nT/mA，磁屏蔽内的剩余磁场 $b=0.95$ nT，回归系数为 0.998 8。k 和 b 的值可由 Origin 计算得到。与文献[23]中系数 $k=0.221\,5$ 和文献[27]中系数 $k=0.250\,2$ 相比，本文的系数 k 值较小，说明加热器产生的磁场干扰较小。

图 7(b)为 PT1000 实验测得的温度值，插图是加热器实物图。由图可见，优化后的加热器温度达

到了钾原子处于 Serf 态的 180 ℃。为了提高加热速度，此时电流为 200 mA，产生的磁场为 25.1 nT。测量磁场存在误差，主要来源于双绞线和导线连接处产生的干扰磁场。



(a) 实验和仿真的磁场与电流的关系图



(b) 温度随时间变化图

图 7 实验测试结果

3 结论

本文提出了一种基于遗传算法的磁自抑制加热器多目标优化设计方法，推导了基于毕奥-萨伐尔定律的目标函数新模型，优化目标包括加热丝的长度、宽度、厚度和电流方向 4 类(18 个)参数，从而获取加热器最佳磁自抑制性能。设计了双层、8 圈加热丝的加热器结构，利用有限元分析方法，仿真分析了目标区域的磁场分布和温度分布，结果表明：加热器在目标区域的中心区域产生 0.02 nT/mA 的平均磁场和 180.34 ℃的平均温度，整个气室内的磁通密度低于 0.2 nT/mA。实验测试结果显示：目标区域的磁通密度取值在 0.13 和 0.14 nT/mA 范围内。

参考文献：

[1] Dang H, Maloof A C, Romalis M V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(15): 151110.

[2] Ding Z, Han B, Tang J. Single-beam miniaturized atomic magnetometer with square-wave modulation for magnetoencephalography[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2020, 70: 1-6.

[3] Nardelli N V, Perry A R, Krzyzewski S P, et al. A conformal array of microfabricated optically-pumped first-order gradiometers for magnetoencephalography[J]. EPJ Quantum Technol., 2020, 7(1): 11.

[4] Bennett J S, Vyhnalek B E, Greenall H, et al. Precision magnetometers for aerospace applications: A review[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5568.

[5] Carletta S, Teofilatto P, Farissi M S. A magnetometer-only attitude determination strategy for small satellites: Design of the algorithm and hardware-in-the-loop testing[J]. Aerospace, 2020, 7(1): 3.

[6] Liu L, Lu Y, Zhuang X, et al. Noise analysis in pre-amplifier circuits associated to highly sensitive optically-pumped magnetometers for geomagnetic applications[J]. Appl. Sci.-Basel, 2020, 10(20): 7172.

[7] Kim Y J, Chu P-H, Savukov I, et al. Experimental limit on an exotic parity-odd spin- and velocity-dependent interaction using an optically polarized vapor[J]. Nat. Commun., 2019, 10(1): 2245.

[8] Li J, Quan W, Zhou B, et al. SERF atomic magnetometer-recent advances and applications: A review[J]. IEEE Sens. J., 2018, 18(20): 8198-8207.

[9] Seltzer S J. Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry[D]. Princeton: Princeton University, 2008.

[10] Zhang S, Lu J, Ye M, et al. Optimal operating temperature of miniaturized optically pumped magnetometers[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2022, 71: 1-7.

[11] Ledbetter M, Savukov I, Acosta V, et al. Spin-exchange-relaxation-free magnetometry with Cs vapor[J]. Phys. Rev. A, 2008, 77(3): 033408.

[12] Taue S, Sugihara Y, Kobayashi T, et al. Development of a highly sensitive optically pumped atomic magnetometer for biomagnetic field measurements: A phantom study[J]. IEEE Trans. Magn., 2010, 46(9): 3635-3638.

[13] Sheng D, Perry A R, Krzyzewski S P, et al. A microfabricated optically-pumped magnetic gradiometer[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 110(3): 031106.

[14] Alem O, Mhaskar R, Jiménez-Martínez R, et al. Magnetic field imaging with microfabricated optically-pumped magnetometers[J]. Opt. Express, 2017, 25(7): 7849-7858.

[15] Ma Y, Chen Y, Zhao L, et al. The micro-fabrication and performance analysis of non-magnetic heating chip for miniaturized SERF atomic magnetometer[J]. J. Magn. Magn. Mater., 2022, 557: 169495.

[16] Li Z, Wakai R T, Walker T G. Parametric modulation of an atomic magnetometer[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(13): 134105.

[17] Zhao T, Liu Y, Wei K, et al. Ultra-sensitive all-optical comagnetometer with laser heating[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2022, 55(16): 165103.

[18] Shah V K, Wakai R T. A compact, high performance atomic magnetometer for biomedical applications[J]. Phys. Med. Biol., 2013, 58(22): 8153.

[19] Yin Y, Zhou B, Yin K, et al. Comprehensive influence of modulated and bias magnetic fields on an atomic magnetometer[J]. Meas. Sci. Technol., 2021, 32(5): 055004.

[20] Lu J, Wang J, Yang K, et al. In-situ measurement of electrical-heating-induced magnetic field for an atomic magnetometer[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1826.

[21] Lu J, Lu C, Wang S, et al. Optimized electric heater configuration design with magnetic-field self-suppression using genetic algorithm[J]. Sens. Actuators A, 2022, 344: 113758.

[22] Liang X, Zhou X, Fang J, et al. A quadra-layered multipole moment heating film with self-cancellation of magnetic field [J]. IEEE Trans. Magn., 2020, 56(12): 1-11.

[23] Liang X, Liu Z, Die H, et al. MEMS non-magnetic electric heating chip for spin-exchange-relaxation-free (SERF) magnetometer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 88461-88471.

[24] Liu X, Zhu J, Wang S, et al. Structure optimization of non-magnetic electric heating film for spin exchange relaxation free magnetometer[J]. Sens. Int., 2023, 4: 100233.

[25] Shao Q, Lei X, Jiang L, et al. Comprehensive structural parameter optimal design of electric heaters with magnetic field suppression for atomic sensors [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2023, 72: 1-10.

[26] Jackson J D. Classical Electrodynamics [M]. Hoboken: Wiley, 1999.

[27] Volkmar C, Baruth T, Simon J, et al. Arbitrarily shaped coils' inductance simulation based on a 3-dimensional solution of the Biot-Savart law[C]// Proc. of the 36th Inter. Spring Seminar on Electronics Technology, 2013: 210-215.

[28] Lambora A, Gupta K, Chopra K. Genetic algorithm-A literature review[C]// Proc. of the 2019 Inter. Conf. on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), 2019: 380-384.

[29] Katoch S, Chauhan S S, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools Appl., 2021, 80: 8091-8126.

[30] Fu Y, Wang Z, Xing L, et al. Suppression of nonuniform magnetic fields in magnetic shielding system for SERF co-magnetometer[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2022, 71: 1-8.

作者简介：

刘彦彦(1998—)，女，河北省邯郸市人，硕士研究生，主要研究方向为无自旋交换弛豫(SERF)原子磁力仪的无磁加热方法；

祝　静(1991—)，女，山东省德州市人，硕士研究生导师，主要研究方向为检测技术及仪器、太赫兹光谱应用。