

磁通门传感器磁芯材料特性仿真研究

姜旻^{1,2} 王劲东^{*1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 磁芯材料的磁滞特性直接决定磁通门传感器的性能极限。针对现有研究缺乏标准化材料对比数据及仿真所需的 Jiles-Atherton 模型参数普遍缺失的问题，本文构建了从磁滞参数辨识到传感器性能仿真的完整评价体系。首先，利用 Sobol 全局灵敏度分析量化了微观参数对宏观磁特性的控制机理；其次，提出一种物理约束引导的混合优化 J-A 参数辨识算法，其计算效率较传统差分进化方法提升约 16 倍；在此基础上，搭建磁通门有限元仿真平台，建立了涵盖 7 种主流软磁材料的仿真参数库，并以文献实验数据验证其预测能力。利用该参数库，本文在统一激励条件下定量对比了不同材料的灵敏度特性，并揭示了磁芯微型化过程中不同磁导率材料的尺寸衰减趋同规律。该工作为磁通门传感器的材料优选与结构优化提供了定量化工具。

关键词 磁通门传感器，磁芯材料，Jiles-Atherton 模型，参数辨识，尺寸效应

中图分类号 V447

Simulation Research on Magnetic Core Material Characteristics of Fluxgate Sensors

JIANG Yang^{1, 2} WANG Jindong^{1, 2}

1 (State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract : The hysteresis characteristics of the magnetic core fundamentally dictate the performance limits of fluxgate sensors. To address the lack of standardized comparative data and the scarcity of Jiles-Atherton (J-A) model parameters required for high-fidelity simulations, this study establishes an integrated evaluation framework linking hysteresis parameter identification to sensor performance simulation. First, Sobol global sensitivity analysis is employed to quantify the governing mechanisms of microscopic parameters on macroscopic magnetic properties. Second, a physics-constrained hybrid optimization algorithm is proposed for J-A parameter identification, achieving a computational efficiency improvement of approximately 16 times compared to traditional differential evolution methods. Subsequently, a finite element simulation platform for fluxgate sensors is developed. A simulation parameter library covering seven mainstream soft magnetic materials is constructed, with its predictive capability validated against experimental

* 基金项目:

投稿日期: 2025/12/29

E-mail: wjd@nssc.ac.cn

data from the literature. Leveraging this library, the sensitivity characteristics of different materials are quantitatively compared under unified excitation conditions. Furthermore, the study reveals a convergence trend in size-dependent attenuation rates for materials with varying permeabilities during core miniaturization. This work provides a quantitative tool for the material selection and structural optimization of fluxgate sensors.

Key words: Fluxgate sensor; Magnetic core material; Jiles-Atherton model; Parameter identification; Size effect

0.引言

空间磁场作为空间物理环境基本物理量,在行星磁层动力学、太阳风磁层相互作用等研究方向中极为重要。随着深空探测任务的深入,星载磁通门传感器正朝着低噪声、高灵敏度、小型化方向演进。中国首次火星探测任务天问一号^[1],搭载的磁强计地面实测噪声低于 $10\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$; NASA Europa Clipper 木星探测器^[2]配备的三轴磁通门固有噪声约 $15\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$; 计划于2026年发射的中欧联合 SMILE 任务^[3]的双磁通门磁强计低至 $5.6\text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这些性能指标的的实现,对磁芯材料的非线性磁滞特性提出了极高要求。

目前,磁芯材料的选择主要依赖物理实验,但受限于制备工艺复杂及热处理应力难控等因素,实验周期长且成本高昂。此外,现有文献中的测试数据往往基于不同的探头结构与激励条件,缺乏横向可比性。相比之下,有限元仿真能够提供严格控制变量的标准化对比环境。然而,高保真磁通门仿真的核心在于准确复现材料的磁滞行为。传统 B-H 折线或解析函数模型忽略磁滞效应,难以准确描述磁通门的非线性响应。Jiles-Atherton (J-A)模型虽能从物理层面描述磁畴运动,然而,材料手册通常仅提供 H_c 、 B_s 、 μ_r 等宏观参数,而非仿真所需的 J-A 模型五个微观参数,限制了工程应用。

针对上述问题,本论旨在建立一套从磁滞回线参数辨识到传感器性能评价的方法。工作内容包括:首先,引入 Sobol 全局灵敏度分析,量化微观参数对宏观磁性指标的控制权重,揭示各参数对磁滞回线形态的控制机理;其次,提出一种融合物理约束的混合优化算法,实现 J-A 参数的高效逆向求解。在此基础上,基于 COMSOL 构建磁通门有限元仿真平台,并通过与文献实验数据的交叉验证确保物理有效性。最后,在标准化激励条件下定量评估材料特性及尺寸效应对传感器性能的影响,为磁通门传感器的结构优化提供理论依据。

1. 磁通门磁芯磁性参数建模与灵敏度分析

1.1 磁芯材料关键磁性参数

磁通门传感器由激励线圈、感应线圈和磁芯三部分组成。交变激励磁场作用下,磁芯交替进入正、反向饱和状态。外部待测磁场 B_{ext} 存在时,两个方向的饱和程度将产生差异,不对称的饱和导致感应电压携带外部磁场信息。二次谐波的幅值与 B_{ext} 在一定范围内呈线性正比关系,是表征传感器灵敏度的核心指标。

磁芯的非线性磁化特性是磁通门实现弱磁调制的物理基础。以下关键磁性参数直接影响传感器性能:

(1) **磁导率 μ :** 高磁导率材料在同等激励产生更大的磁通变化率,同时降低达到饱和所需的激

励电流,实现高灵敏度与低功耗的双重优势。[4]表明,退火工艺可提升非晶带材初始磁导率,进而显著提升灵敏度。

(2) **矫顽力 H_c** : 指使已饱和铁磁材料退磁至零所需的反向磁场。微观上, H_c 对应畴壁移动克服缺陷势垒的过程; 宏观上, H_c 意味着更窄的磁滞回线与更弱的巴克豪森跳变噪声, 是实现高信噪比的关键。

(3) **饱和磁感应强度 B_s** : 虽然 B_s 对灵敏度贡献次之, 但它决定了传感器的线性范围和最大输出信号幅值。选用高 B_s 材料能有效避免探头过早进入深度饱和而导致的量程截断。

(4) **磁致伸缩系数 λ_s** : 反映磁性受制造、封装、温度等机械应力影响程度。高 λ_s 会导致应力耦合进磁畴壁运动过程, 引起传感器的零点漂移和噪声升高[5]。

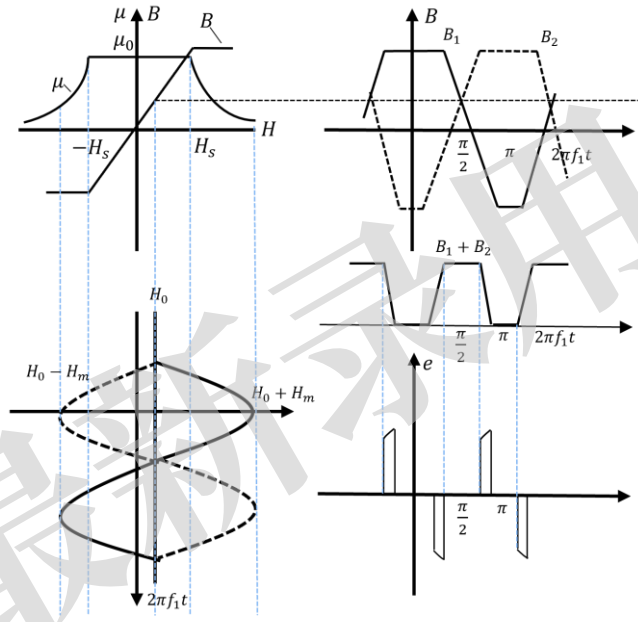


图 1 磁通门原理图(信号图解)

Fig.1 Fluxgate Schematic Diagram (Signal Diagram)

1.2 J-A 模型理论基础

为精确描述上述复杂的非线性磁化过程及磁滞损耗, 本研究采用 Jiles-Atherton(J-A)模型。该模型基于热力学与统计力学原理, 引入有效场和能量守恒概念, 使建模数据与实验数据有良好一致性[6]。假设铁磁体内存在理想的无磁滞磁化状态 M_{an} , 其遵循修正的朗之万函数分布:

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right] \quad (1)$$

其中, $H_e = H + \alpha M$ 为有效磁场。考虑到晶格缺陷引起的畴壁钉扎效应, 不可逆磁化强

度 M_{irr} 遵循以下微分方程：

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (2)$$

总磁化强度 M 由可逆磁化分量和不可逆磁化分量线性叠加构成：

$$M = cM_{an} + (1 - c)M_{irr} \quad (3)$$

J-A 模型将复杂的微观磁化机制抽象为五个具有明确物理意义的参数，这些参数在理论上分别映射着材料不同的宏观磁性特征如表 1 所示。

表 1 J-A 模型参数的物理定义、微观机理及理论宏观对

Table 1 Physical definitions, microscopic mechanisms, and theoretical macroscopic correlations of J-A model parameters

参数符号	参数名称	微观物理机理简述	理论主导的宏观指标
M_s	饱和磁化强度	原子磁矩密度极限，取决于材料化学成分与晶格结构	饱和磁感应强度 B_s
k	钉扎参数	畴壁克服晶格缺陷移动所需的能量势垒	矫顽力 H_c 、磁滞损耗
a	形状参数	表征热扰动能量与磁矩势能的竞争，决定无磁滞曲线形态	磁导率 μ
α	畴间耦合因子	描述磁畴间的平均场相互作用强度	回线矩形比、最大磁导率 μ_{max}
c	可逆系数	表征畴壁在脱钉扎前的弹性弯曲比例	初始磁导率

1.3 基于 Sobol 方法的参数灵敏度分析

表 1 仅提供了定性的理论对应关系，在实际磁化过程中，各参数往往以非线性耦合方式共同作用于宏观指标。为量化各微观参数的贡献权重并解耦其交互效应，本研究引入 Sobol 全局灵敏度分析方法^[7]。该方法基于方差分解原理，J-A 模型可视为一个非线性映射 $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_5)$ ， X_i 为模型中的 5 个参数， Y 为磁滞回线的宏观特性指标。输出 Y 的总方差 D 可分解为各参数的独立贡献及其交互作用：

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{i < j}^n D_{ij} + \sum_{i < j < k}^n D_{ijk} + \dots + D_{12\dots n} \quad (4)$$

$D_i = \text{Var}[E(Y|X_i)]$ ：表示参数 X_i 的独立作用产生的一阶方差，反映其对输出的主效应；

$D_{ij} = \text{Var}[E(Y|X_i, X_j)] - D_i - D_j$ ：表示参数 X_i 和 X_j 联合作用产生的二阶交互方差；

D_{ijk} ：及更高阶项同理，表示三个或更多参数间的高阶耦合产生的方差贡献；

基于此，定义两个核心灵敏度指标：

一阶灵敏度指数(S_i)：代表单个参数 X_i 对模型输出的独立贡献率：

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (5)$$

总效应灵敏度指数(S_{Ti})：代表该参数的主效应及其与其他所有参数交互作用的总和：

$$S_{Ti} = \frac{D_i + \sum D_{ij} + \sum D_{ijk} + \dots}{D} = 1 - \frac{D_{\sim i}}{D} \quad (6)$$

式中 $D_{\sim i}$ 表示所有不包含参数 X_i 的交互项方差之和。通过对比 S_{Ti} 与 S_i 的差值，反应参数 X_i 的交互强度，若 $S_{Ti} \approx S_i$ ，说明该参数主要独立起作用，若 $S_{Ti} \gg S_i$ 则表明该参数与其他参数存在强烈的耦合关系。

本研究采用 Saltelli^[8]采样方案生成 Sobol 序列，该方案通过构造基准矩阵 A、对照矩阵 B 与重构矩阵 C_i 三组参数样本矩阵，计算其对应的模型输出方差，并基于 Monte Carlo 积分估算各参数的一阶灵敏度指数 S_i 与总效应灵敏度指数 S_{Ti} 。本研究对 5 个 J-A 参数在矫顽力 H_c 、剩磁 B_r 、饱和磁感应强度 B_s 、最大磁导率 μ_{max} 及磁滞损耗面积五个宏观指标上进行灵敏度分析，每个指标采用 $N=1000$ 的样本量。图 2 展示了各参数对磁滞回线形态的影响规律，图 3 展示了定量化的 Sobol 灵敏度分析结果。

综合分析表明， M_s 直接决定磁滞回线的饱和幅值。 k 对矫顽力 H_c 和磁滞损耗表现出绝对主导作用，这与其表征钉扎势垒的物理意义高度一致； a 主要控制回线的斜率，较低的 a 对应高磁导率及易饱和特性； α 和 c 对回线宏观形态的影响极为微弱。上述敏感度差异为后续辨识算法设计提供了核心依据，高敏感度参数应优先约束，低敏感度参数可适当放宽搜索范围。

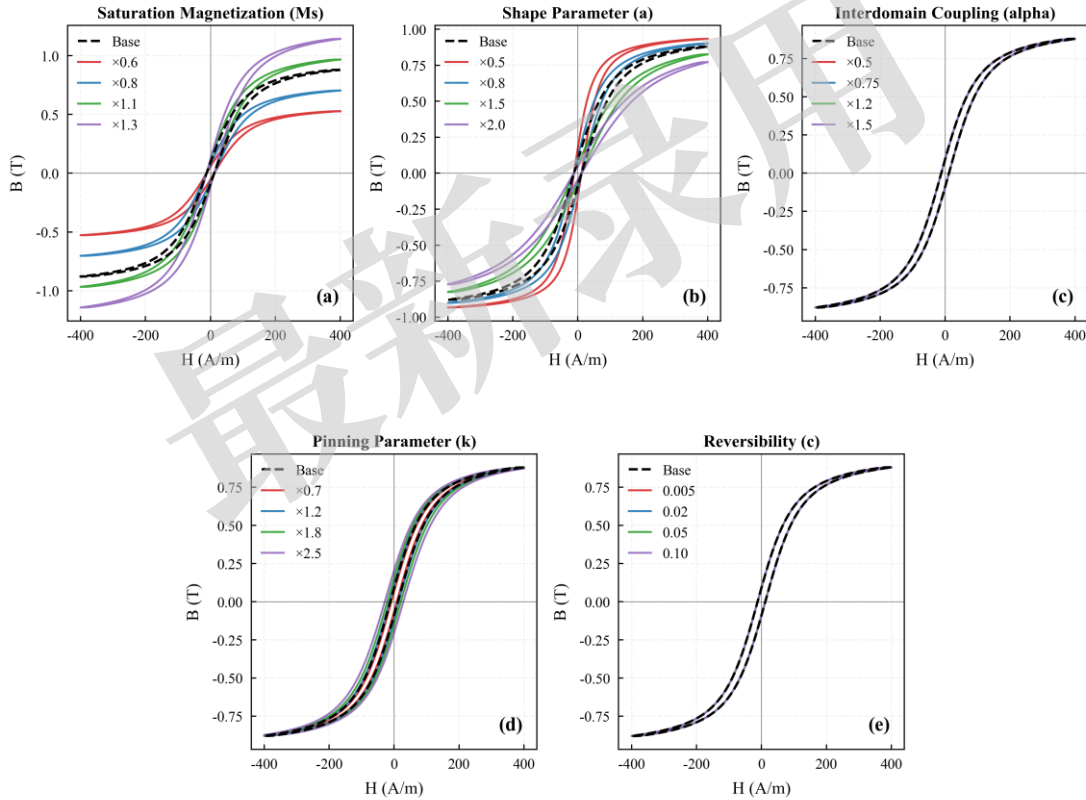


图 2 J-A 模型参数对磁滞回线形态的影响分析

Figure.2 Analysis of the influence of J-A model parameters on the shape of hysteresis loops

黑色虚线为典型纳米晶合金的参考模拟曲线 ($M_s=785062\text{A/m}$, $a=42.51\text{A/m}$, $\alpha=2\times 10^{-6}$, $k=11.93\text{A/m}$, $c=0.0158$) 彩色实线为参数变化后的结果，仿真条件: $H_{max}=400\text{A/m}$, $steps=100$ 。(a) M_s 增大使饱和磁通密度 B_s 线性增加；(b) a 增大导致初始磁化率降低，回线变平缓；(c) α 对回线形态影响极小；(d) k 增大使矫顽力 H_c 和磁滞损耗显著增加；(e) c 对回线形态影响极小。

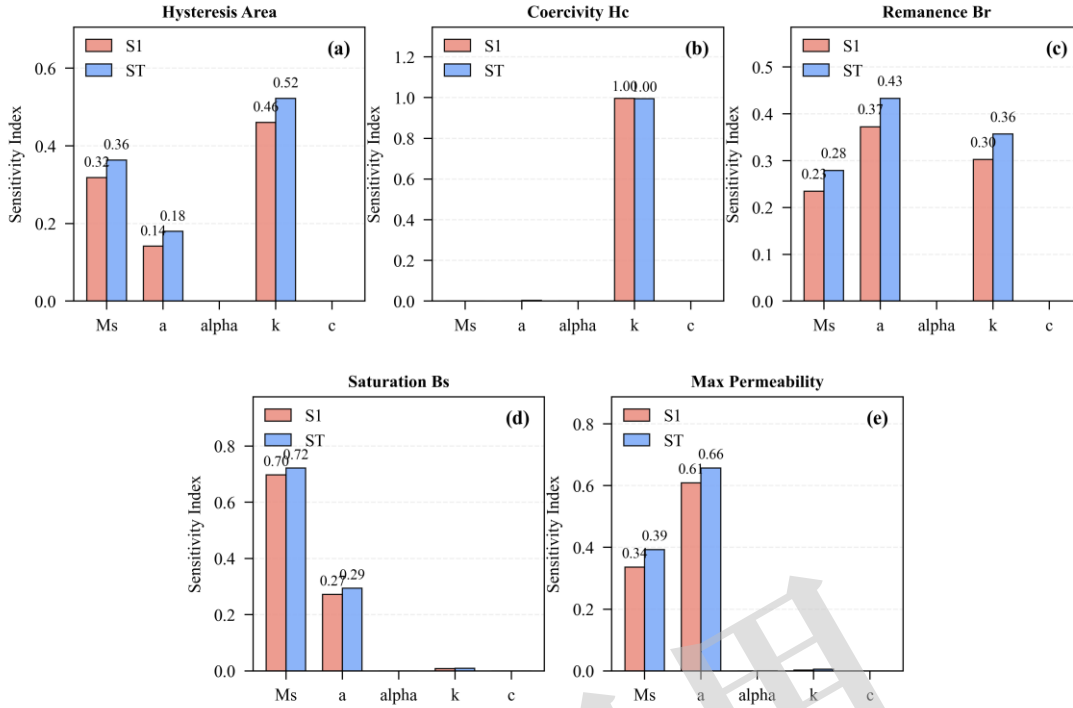


图 3 J-A 模型参数对宏观磁性指标的 Sobol 灵敏度分析

Figure 3 Sobol Sensitivity Analysis of J-A Model Parameters on Macroscopic Magnetic Indicators

2. 物理约束引导的参数辨识算法

2.1 算法设计

J-A 模型参数辨识本质上是一个高维非线性优化问题。如 1.3 节 Sobol 分析及相关文献^[9]指出, 钉扎参数 k 与形状参数 a 对的贡献权重远高于畴间耦合参数 α , 这种灵敏度失衡会在低灵敏度方向形成平坦的低曲率区域, 致使传统梯度类或单一全局优化算法陷入收敛停滞。

针对上述问题, 本文基于 Sobol 分析结果, 提出了一种物理约束引导的三阶段混合优化策略。核心在于将微观物理参数与宏观磁性特征的定量映射关系显式融入算法设计, 通过参数空间降维、区域加权损失函数以及全局-局部协同优化, 在保证全局收敛性的同时显著提升计算效率。

2.1.1 物理约束的参数空间压缩

传统差分进化算法通常采用经验设定的宽泛边界^[10], 本文基于 Sobol 分析的物理约束策略将搜索空间显著压缩。鉴于矫顽力 H_c 与 k 整体近似相等, 但材料中存在可逆磁化分量, 实测 H_c 通常略小于 k 值, 算法将其搜索范围锁定在测量值 H_c 的 0.5 至 2.0 倍区间内; 同时, 基于 M_s 与饱和磁通密度 B_s 的强相关性, 设定 M_s 的搜索边界为实验最大磁化强度的 $\pm 20\%$ 。这种物理约束策略有效排除了非物理可行解, 显著收敛了搜索域。

2.1.2 Sobol 灵敏度引导的加权损失函数

针对磁滞回线不同区域的物理重要性差异, 构建分段加权均方误差目标函数: 对参数耦合最强、拟合难度最大的膝部区赋予最高权重, 迫使算法优先修正该区域的形状误差; 对线

性度较高的矫顽力区与饱和区则分别给予中等及基础权重，从而在保证全局拟合精度的同时，强化了关键非线性特征的捕捉能力。 $M_{\text{exp}}(H_i)$ 为实验参考数据的离散采样点， $M_{\text{sim}}(H_i, \theta)$ 为 J-A 模型仿真的磁化强度， $\theta = \{M_s, a, \alpha, k, c\}$ 为待辨识的参数向量， w_i 是第*i*个数据点的权重系数。

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \left(M_{\text{exp}}(H_i) - M_{\text{sim}}(H_i, \theta) \right)^2 \quad (7)$$

表 2 磁滞回线特征区域划分与权重设计

Table 2 Division and Weight Design of Characteristic Regions in Hysteresis Loop

区域名称	区域定义	主控参数	权重	设计逻辑
膝部区	$0.5M_s < M < 0.95M_s$	M_s, a, k 耦合	$w = 6.0$	参数交互最强需最大权重放大形状误差梯度
矫顽力区	$ M < 0.2M_s$	k 线性主导	$w = 3.0$	单参数主导易于收敛，权重次之
饱和区	$ H > 0.95H_{\text{max}}$	M_s 主导	$w = 2.0$	渐近线物理行为简单，基础权重即可锁定饱和值

权重比 6:3:2 通过对比试验确定（尝试了 10:5:1、4:2:1 等配置）。选择绝对值较大的整数权重而非归一化小数权重，可避免因目标函数值量级过小而导致 L-BFGS-B 优化器的数值收敛判定失准。

2.1.3 Sobol 三阶段协同优化流程

算法采用三阶段混合设计如图 4，首先在经物理特征压缩后的可行域内随机生成初始种群，为全局搜索提供多样化的初始解。随后利用差分进化算法执行快速全局探索，通过其变异与交叉机制快速跳出局部极值，定位全局最优解所在的吸引域。最后，以差分进化算法的输出作为初值，切换至 L-BFGS-B 梯度优化算法，利用 J-A 模型在极值点附近良好的二次型特征及近似 Hessian 矩阵信息，算法得以在极小的迭代步数内快速收敛至数学精确解。

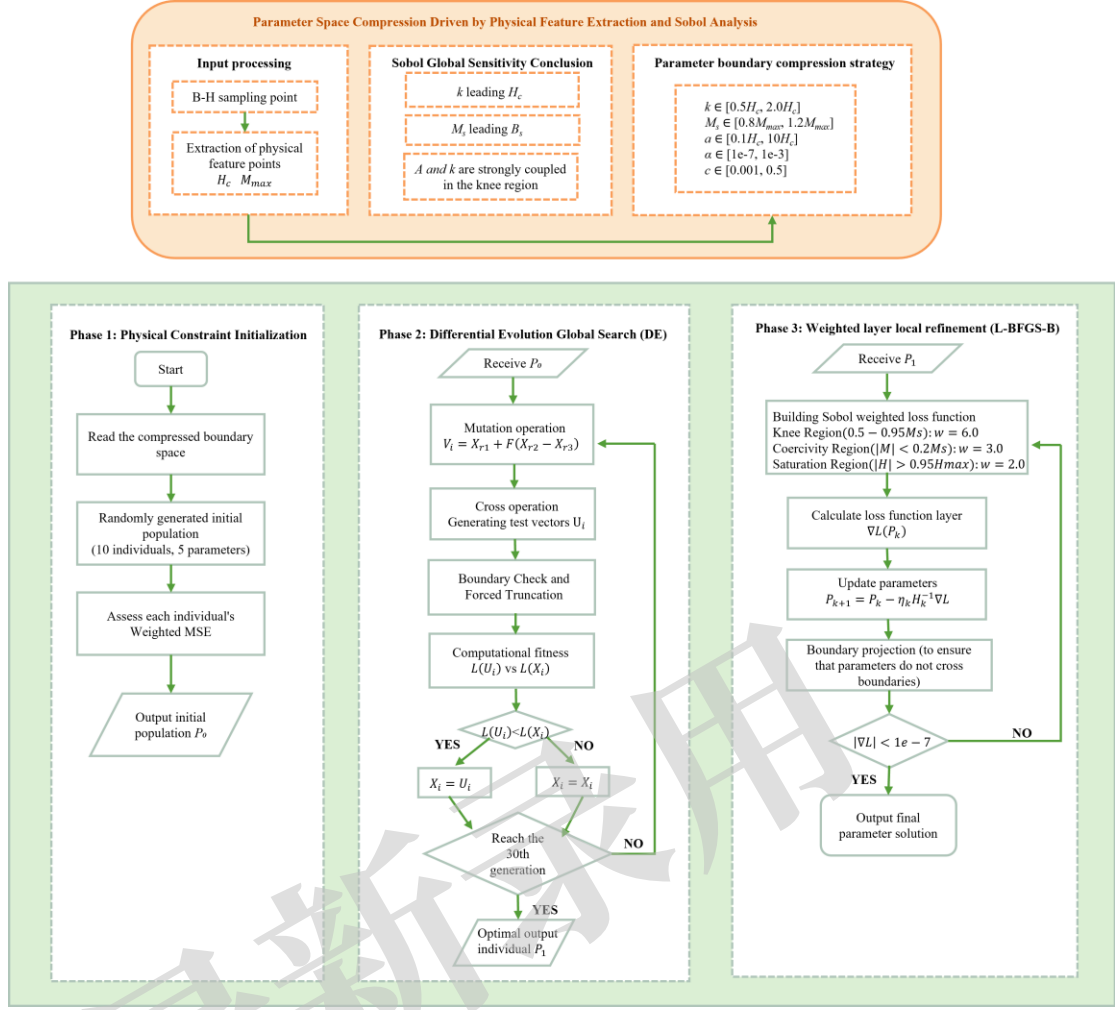


图 4 J-A 磁滞模型参数差分进化算法流程图

Figure.4 Flowchart of Differential Evolution Algorithm for J-A Hysteresis Model Parameters

(上方) 参数空间压缩策略: 基于 Sobol 分析结论及物理特征点提取压缩搜索边界; (左侧) 阶段 1 物理约束初始化: 在压缩空间内生成初始种群并评估适应度; (中间) 阶段 2 差分进化全局搜索; (右侧) 阶段 3 加权局部精修: 利用加权损失函数和 L-BFGS-B 算法实现高精度求解。

2.2 算法验证

选取文献^[1]中的纳米晶合金 B-H 曲线作为标准算例, 结果如图 5 所示, 相较于传统差分进化算法, 本文提出的三阶段混合策略在计算效率与精度上均实现显著提升: 参数辨识平均耗时由 47.30s 缩减至 2.83s, 计算效率提升约 16 倍; 拟合优度 R^2 从 0.9836 提升至 0.9846。在磁滞回线的非线性过渡区, 新算法展现出更优的物理贴合度, 证实了本文提出的参数辨识方法具有良好的精度和效率。然而, 算法层面的验证仅能证明数值求解的正确性, 尚不能说明将这些参数代入有限元仿真后能否准确预测传感器性能。为此, 下一章将构建完整的磁通门仿真模型, 并通过与文献实验数据的对比验证仿真平台的物理有效性。

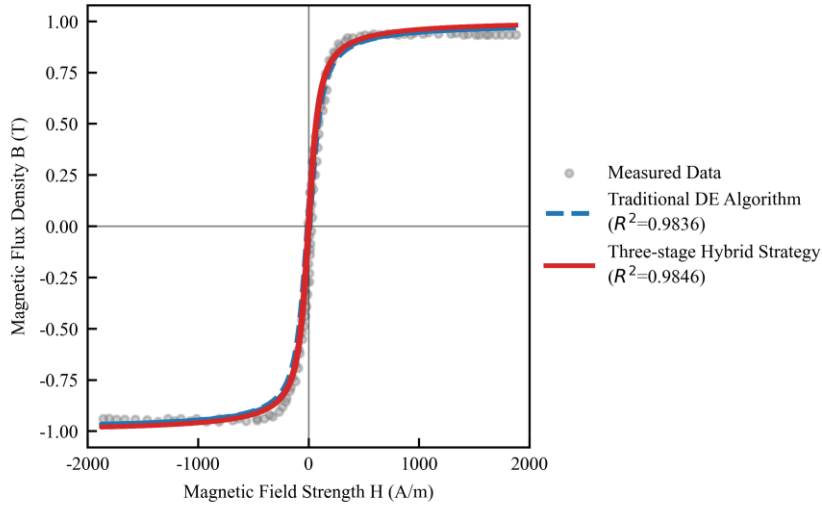


图 5 传统差分进化算法与三阶段混合策略的磁滞回线拟合效果对比

Figure.5 Comparison of hysteresis loop fitting results between the Traditional DE Algorithm and the Three-stage Hybrid Strategy.

2.3 主流软磁材料概述与参数库构建

目前应用于磁通门磁芯的材料主要分为三类：

- (1)**晶态合金（坡莫合金）**：以 6-81 钼坡莫合金为代表，具有高磁导率和极低的噪声水平（ $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级）。近期研究^[12]通过铜掺杂替代传统钼元素进一步优化了性能。然而，坡莫合金本质上受限于晶体结构，晶界对畴壁的钉扎无法完全消除^[13]，与现代非晶合金相比，通常需要较大激励电流才能饱和，不利于小型化与低功耗设计。
- (2)**非晶态合金**：通过熔体快淬工艺制备，原子呈无序排列，消除了晶界，因而具有极低矫顽力和优异软磁性。钴基非晶（如 Metglas、Vitrovac、CoFeSiB）是当前高性能传感器的标准材料。主要缺点在于性能不稳定，即使同一批次材料，性能也可能存在较大差异，这严重阻碍了大规模生产和应用^[14]。
- (3)**纳米晶合金**：以 Finemet 为代表，通过非晶基体中析出纳米尺度晶粒形成双相结构。Herzer 模型指出，当晶粒尺寸小于铁磁交换长度时，随机分布的磁晶各向异性被平均化，矫顽力大幅降低^[15]。纳米晶合金兼具非晶的低矫顽力与晶态合金的高饱和磁感应强度，且热稳定性优异。

基于 2.1 节的 J-A 模型参数求解算法，本节系统求解了 7 种材料的 J-A 参数，构建了统一仿真参数库。各材料的 B-H 曲线对比如图 7 所示，求解得到的 J-A 参数列于表 3。

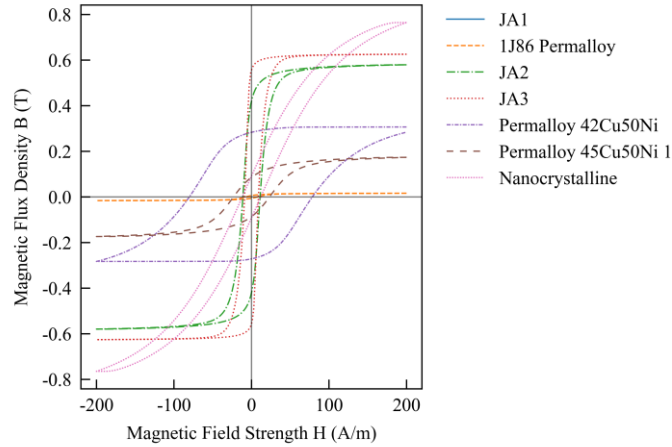


图7 参考文献中得到的七组材料磁滞回线对比

Figure.7 Comparison of seven sets of material hysteresis loops obtained from references

表3 七种材料的 J-A 模型参数

Table 3 J-A model parameters of seven materials

材料分类	材料名称/来源	M_s (A/m)	α (A/m)	α	k (A/m)	c
坡莫合金	1J86 ^[16]	1.338e4	11.74	1.99e-03	2	0.627
	42Cu50Ni ^[12]	2.82e5	17.85	2.36e-04	56.06	0.01
	45Cu50Ni ^[12]	15.44e5	24.86	3.26e-04	12.29	0.011
钴基非晶合金	JA1 ^[17]	4.37e5	0.16	8e-7	0.716	0.664
	JA2 ^[17]	4.7e5	4	2.5e-5	7	0.1
	JA3 ^[17]	5e5	1	1.12e-5	6.9	0.1
纳米晶合金	Fe _{73.5} Cu ₁ Nb ₃ Si _{13.5} B ₉ ^[11]	78.50e5	42.51	2e-06	11.93	0.016

3. 仿真环境与材料性能评价

3.1 仿真环境构建与物理有效性验证

基于 COMSOL Multiphysics 平台搭建磁通门仿真模型^[18]，模型采用典型的环状磁芯结构，固定线圈匝数、几何尺寸及激励电路参数。通过磁场与电路接口的强耦合求解感应电动势，并利用 PDE 模块实现 J-A 本构关系的动态求解。

为确保研究的可靠性，首先验证仿真平台对磁通门物理机制描述的准确性。仿真验证采用文献^[17]提供的三组 J-A 参数 JA1, JA2, JA3，该文献同时提供这三种材料的 J-A 模型参数及其在磁通门实验中的性能表现，为验证仿真器的物理可靠性提供了理想参照。将文献提供的三组 J-A 参数输入到有限元仿真模型中，在同等激励条件和几何结构下进行计算，仿真得到的二次谐波幅值呈现 $V_{2f}(JA1) > V_{2f}(JA3) > V_{2f}(JA2)$ 排序关系，与文献^[17]实验结果一致。表 4 给出了二次谐波幅值、谐波比值及排序对比的验证数据。该验证结果表明仿真平台能够准确反映不同材料特性对传感器性能的影响。

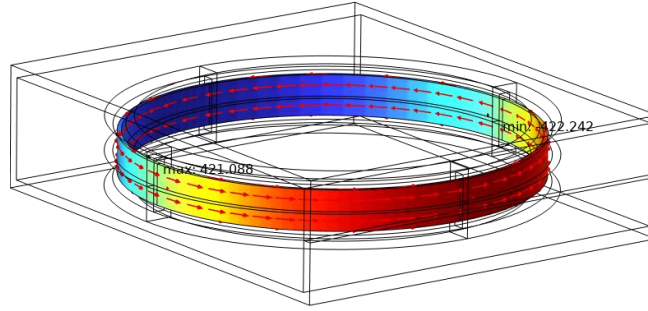


图6 环状结构磁通门几何模型

Figure.6 Geometric model of toroidal fluxgate

表4 三组材料的仿真验证结果

Table 4 Simulation verification results of the three groups of materials

材料名称	二次谐波(mV)	V_{2f}/V_{1f}	文献 ^[17] 趋势
JA1	281	525.27	最高
JA2	261	506.28	最低
JA3	272	525.27	中等

3.2 磁芯材料对传感器性能的影响

利用构建的参数库，在完全统一的几何和激励条件下，对7种材料的磁通门响应进行仿真。图8展示了各材料感应电压的频谱特性，不同材料的二次谐波幅值呈现出显著的灵敏度分化特征，可依据响应强度划分为三个典型组别以钴基非晶合金（JA1, JA2, JA3）为代表的高灵敏度组，其二次谐波幅值具有绝对优势；纳米晶合金及部分改性坡莫合金（如42Cu50Ni）次之；而以传统1J86坡莫合金为代表的常规灵敏度组，响应相对微弱。结合表3中的J-A参数，这种性能分化的物理根源可归结为以下三个关键机制。

首先，钉扎参数与形状参数的协同极小化是实现高灵敏度的核心驱动力。性能最优的钴基非晶合金得益于其钉扎参数 k 与形状参数 a 的极小化。一方面，其 k 值极低数值范围0.7~7.0 A/m，对应微弱的畴壁钉扎势垒及低噪声本底，宏观上的低矫顽力。如2.3节所述，非晶结构本征地消除了晶界钉扎位点，使 k 在微观层面自然极小化。而在晶态合金中，畴壁每次穿越晶界均需克服势阱能量，宏观上表现为高矫顽力和大 k 值。表3亦印证此机理，坡莫合金 k 值(2~56 A/m)比钴基非晶(0.7~7 A/m)高一两个数量级。另一方面，原子无序排列使磁畴旋转的能垒极低，微弱外场即可驱动大量磁畴同步响应，故其形状参数 a 处于0.16~4.0 A/m极小区间。由式(1)可知， a 越小，无磁滞磁化曲线在零场附近变化率越大，具备在微弱激励下迅速从线性区进入深度饱和的能力。从物理路径上看， k 减小直接降低了不可逆磁化过程的能量损耗， a 减小则增强了可逆磁化的信号响应速度，两者协同作用，最大化了磁芯的磁通变化率及二次谐波输出。

相比之下，形状参数对饱和磁化强度的制约作用限制了高磁感材料的性能发挥。纳米晶合金虽拥有最高的饱和磁化强度 M_s ，数值为 7.85×10^5 A/m，但其形状参数 a 过大数值为42.5 A/m，导致磁化曲线趋于平缓，难以在有限激励下达到充分饱和，高 M_s 优势无法充分发挥。反之，1J86坡莫合金虽然 k 和 a 值均优于纳米晶，但其 M_s 仅为 1.34×10^4 A/m，比钴基非晶低一个数量级。 M_s 的过低构成了性能硬约束，限制了磁通变化的绝对幅值，导致其灵敏度最

低。

综上所述，高性能磁通门磁芯的选材应追求全局优化策略：须以 M_s 处于足够量级为前提，在此基础上优先实现 k 与 a 的协同极小化，以在低功耗激励下获得最优的非线性调制能力。

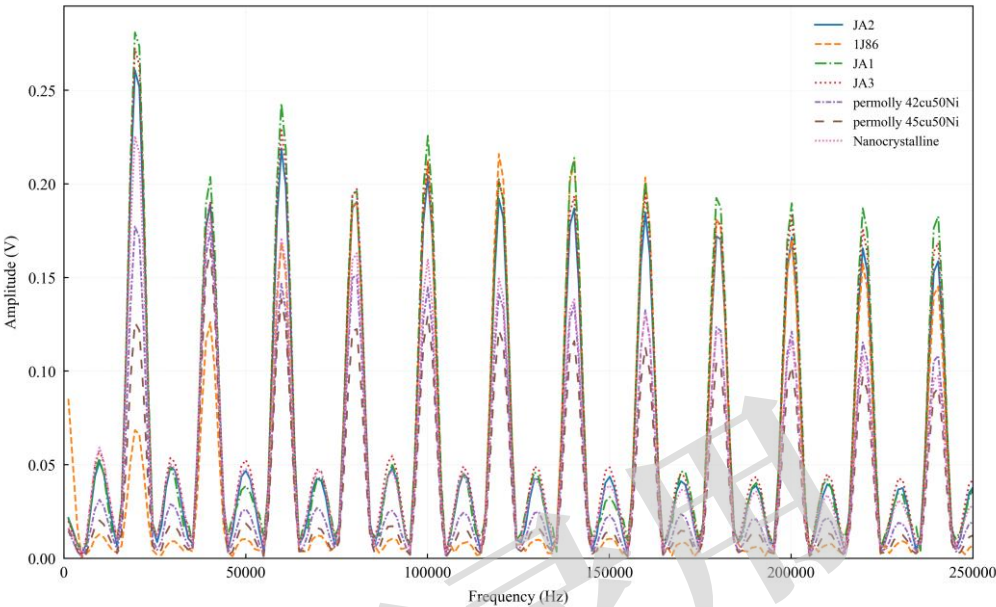


图 8 七组材料对应感应电压频谱图对比

Figure.8 Comparison of Induced Voltage Spectrograms for Seven Materials

3.3 磁芯尺寸对传感器性能的影响

3.2 节分析基于固定激励条件下的材料对比，揭示了参数组合与性能之间的内在关联。然而随着微纳卫星及便携式设备的发展，磁通门传感器的小型化需求日益迫切。磁芯尺寸减小会导致退磁因子 N 增大，进而影响有效磁导率 μ_{eff} 和传感器灵敏度。为探究不同磁芯材料在小型化过程中对尺寸效应的敏感性差异，本节选取了两种代表性材料：JA1^[17]（高磁导率非晶合金）与 1J86^[16]（传统坡莫合金），分析退磁因子与材料本征磁导率在尺寸效应中影响。

为解耦激励条件与材料属性对尺寸效应的复合影响，本研究设计如下三组对照实验。仿真方案为环形磁芯外径从 20mm 逐步缩减至 10mm，具体实验参数如表 5 所示：

表 5 磁芯小型化尺寸效应仿真实验设计

Table 5 Simulation Experiment Design for Size Effect of Magnetic Core Miniaturization

实验组	材料	激励电流	工作状态	实验目的
A	JA1 高 μ 非晶	I_{ref}	最佳饱和状态	表征高性能材料在标准工作状态下受尺寸效应的固有影响
B	1J86 低 μ 坡莫	I_{ref}	过饱和状态	在控制外部激励场不变的单一变量条件下，观察低 μ 材料的响应
C	1J86 低 μ 坡莫	$I_{ref}/20$	独立适配状态	探究当低 μ 材料回归理想工作点时的尺寸稳定性

图 9 展示了三组实验在不同磁芯直径下的二次谐波幅值变化及谐波比值特性。通过对 20mm 至 10mm 尺寸区间的仿真数据进行综合分析，观测到如下关键现象：无论是高磁导率的 JA1（组 A），还是低磁导率的 1J86（组 B 和组 C），其二次谐波输出幅值随尺寸减小的衰减倍数基本一致。即在环形磁芯直径减半的过程中，三组实验的灵敏度损失比例相近，并未因材料磁导率差异而表现出显著分化。

研究还引入二次谐波占比，即二次谐波幅值与四次、六次等高次谐波幅值之和的比率，作为信号质量评价指标。仿真数据呈现出两种截然不同的演变规律。对于理想激励下的非晶合金组 A，磁芯尺寸减小导致二次谐波占比下降，表明非线性工作区退化，频谱主导性减弱。相反坡莫合金组 B、组 C，无论处于过饱和组 B 还是低激励状态组 C，二次谐波占比均随直径减小而上升。这表明对于低磁导率材料，退磁因子增大在一定程度上抑制了过强的磁饱和效应。

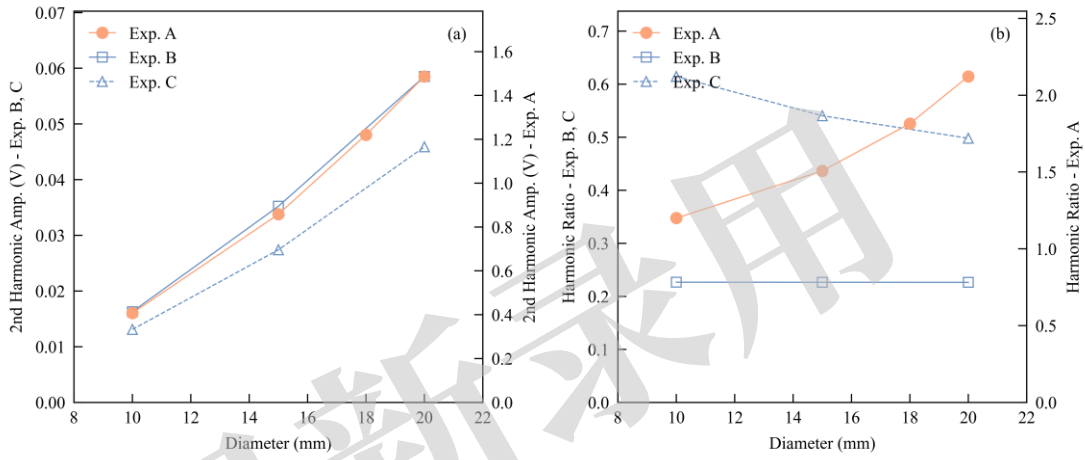


图 9 磁芯直径对二次谐波幅值的影响(a) 磁芯直径对二次谐波占比的影响(b)

Figure.9 Effect of core diameter on the amplitude of the second harmonic (a) Effect of core diameter on the proportion of the second harmonic (b)

虽然组 B 和组 C 在磁芯尺寸减小时表现出相对占比的上升，但需指出，这一现象是在系统总幅值显著衰减背景下出现。其占比增加本质上源于其他频率分量的更快速衰减，而非自身绝对幅值的增强。由于系统总能量大幅降低，这种相对占比的提升并不能在实际应用中转化为有效的性能改善。综合分析表明，在不同激励条件下，几何尺寸缩减引起的线性衰减效应始终在系统性能退化中起主导作用。这一现象的物理根源在于：环形磁芯退磁因子随尺寸减小而迅速增大，由几何结构决定的退磁因子 N 对传感器灵敏度起着绝对主导作用。有效磁导率 μ_{eff} 公式由下式给出：

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)} \approx \frac{1}{N} \quad (8)$$

对于典型的软磁材料，本征磁导率 μ_r 通常在 $10^4 \sim 10^5$ 量级，因此 $1/\mu_r$ 极小。随着磁芯小型化，退磁因子 N 迅速增大。分母中 $1/\mu_r$ 成为可忽略的高阶小量，有效磁导率近似为 $1/N$ 。因此，在环形磁芯的小型化设计中，单纯试图通过更换低磁导率材料来规避尺寸效应是无效的。材料的微小差异无法抵消几何结构退化带来的线性衰减。针对微型化需求，未来优化方

向应聚焦于结构革新与激励适配：一方面采用跑道型磁芯优化长径比以降低 N ；另一方面，对于特定尺寸和材料，需寻找更精确的适配激励，而非单纯依赖材料参数的理论优势。

4. 结论

本文针对磁通门传感器磁芯材料选型及优化设计中面临的参数缺失、对比困难等关键问题，开展了基于 Jiles-Atherton 模型的系统研究。通过建立从实验数据到仿真模型的完整技术链路，实现了不同磁芯材料性能的定量对比与物理机制解析。

(1) Sobol 全局敏感性分析表明，钉扎系数 k 对矫顽力 H_c 具有绝对主导作用，形状参数 a 主导磁化曲线斜率，饱和磁化强度 M_s 直接决定 B_s 。基于此构建的物理约束优化算法效率提升 16 倍，对实验 B-H 曲线的拟合优度 R^2 达 0.9846，为 7 种主流磁芯材料建立了统一参数库。

(2) 利用仿真计算，定量对比了不同磁芯材料对传感器灵敏度的影响，发现低钉扎系数 k 和低形状参数 a 是实现高灵敏度的关键物理基础，为传感器磁芯材料设计提供定量依据。

(3) 建立了磁通门磁芯材料性能仿真模型，实现了对于不同材料、不同磁芯尺寸的磁通门传感器性能的量化分析，为磁通门传感器优化设计提供了一种有效的技术途径。

需要指出的是，本文构建的从参数辨识到仿真评价的技术链路具有良好的可扩展性。目前参数库涵盖的 7 种主流磁芯材料仅代表了现有材料库中的有限样本。后续工作可基于本文建立的标准化评价方法，将参数库扩展至更多候选材料体系。此外利用仿真进行参数解耦，在固定背景变量的前提下，定量扫描单一参数如 a 或 k 的变化对二次谐波性能的影响，从而深化对材料磁滞特性与器件性能映射规律的理解。更有助于从经验式材料筛选转向基于目标性能的材料设计指引，为高性能磁通门传感器的工程化应用提供更为系统的技术支撑。

致谢 本文受到中国科学院攻坚专项 SPO 有效载荷-磁强计项目资助（GJ11020209）。

参考文献

- [1] LIU K, HAO X J, LI Y R, *et al.* Mars orbiter magnetometer of China's first mars mission tianwen-1[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(4): 384-389
- [2] KIVELSON M G, JIA X Z, LEE K A, *et al.* The Europa clipper magnetometer[J]. *Space Science Reviews*, 2023, **219**(6): 48
- [3] LI L, WANG J D, SONG W, *et al.* The magnetometer for the solar wind magnetosphere ionosphere link explorer[J]. *Space Science Reviews*, 2025, **221**(8): 114
- [4] XU J H, KANG S J, WANG J, *et al.* Effect of magnetic field annealing on the soft magnetic properties of CoFeSiB ribbon and its fluxgate performance[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, **576**: 170762
- [5] NADZHARYAN T A, SHAMONIN M, KRAMARENKO E Y. Theoretical modeling of magnetoactive elastomers on different scales: a state-of-the-art review[J]. *Polymers*, 2022, **14**(19): 4096
- [6] JIANG W J, SHI Y B, ZHAO W J, *et al.* Parameters identification of fluxgate magnetic core adopting the biogeography-based optimization algorithm[J]. *Sensors*, 2016, **16**(7): 979
- [7] HOMMA T, SALTELLI A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1996, **52**(1): 1-17
- [8] SALTELLI A, ANNONI P, AZZINI I, *et al.* Variance based sensitivity analysis of model output. design and estimator for the total sensitivity index[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, **181**(2): 259-270
- [9] SZEWCZYK R, NOWICKI M. Sensitivity of Jiles-Atherton model parameters identified during the optimization process[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, **1996**(1): 020046
- [10] KHEMANI V, AZARIAN M H, PECHT M G. Efficient identification of Jiles-Atherton model parameters using space-filling designs and genetic algorithms[J]. *Eng.*, 2022, **3**(3): 364-372

- [11] HRAKOVA D, RIPKA P, KMJEČ T. Enhancing performance of fluxgate sensors using annealed nanocrystalline core[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023, **59**(9): 6000609
- [12] NAROD B B, MILES D M. Copper permalloys for fluxgate magnetometer sensors[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2024, **13**(1): 131-161
- [13] MILES D M, CIURZYŃSKI M, BARONA D, *et al.* Low-noise permalloy ring cores for fluxgate magnetometers[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2019, **8**(2): 227-240
- [14] WANG B, XU W Z, ZHENG X P, *et al.* Performance of fluxgate magnetometer with cu-doped CoFeSiB amorphous microwire core[J]. *Sensors*, 2024, **24**(1): 309
- [15] CHWASTEK K, NAJGEBAUER M, JABŁOŃSKI P, *et al.* Modeling dynamic hysteresis curves in amorphous magnetic ribbons[J]. *Applied Sciences*, 2023, **13**(16): 9134
- [16] ZHAO Dongdong, LIU Si, CAO Daping. Construction and application of magnetization curve functions of toroidal permalloy cores[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2012, **43**(6): 24-28 (赵东东, 刘斯, 曹大平. 环形坡莫合金磁心的磁化曲线函数构造与应用[J]. *磁性材料及器件*, 2012, **43**(6): 24-28)
- [17] MARCONATO N. Design of integrated micro-fluxgate magnetic sensors: advantages and challenges of numerical analyses[J]. *Sensors*, 2022, **22**(3): 961
- [18] ZHANG J B, YU W C, CHEN X H, *et al.* A frequency-domain micromagnetic simulation module based on COMSOL Multiphysics[J]. *AIP Advances*, 2023, **13**(5): 055108



王劲东(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师, 现为中国科学院国家空间科学中心天气室太阳系探测组主任, 主要研究方向为高精度空间磁场探测技术与应用。邮箱: wjd@nssc.ac.cn。



姜旻, 女, 1999 生于云南昆明, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士生, 主要研究方向是磁通门磁强计仿真。邮箱 Jiang_yang7@163.com。