

超磁致伸缩材料在不同外部条件下的磁滞模型预测*

闫洪波[#] 黄海涛^{#†} 汪建新 黄健 谢凯

(内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010)

(2024年8月30日收到; 2024年9月24日收到修改稿)

超磁致伸缩材料的磁滞模型随着激励幅值、偏磁情况、激励频率的变化模型参数也会发生变化, 现有的磁滞模型无法预测三种外部条件同时变化所带来的影响. 本文通过传统 Jiles-Atherton (J-A) 动态模型解释磁滞损耗机理, 根据运行条件和材料特性建立关系式来反映外界条件变化. 针对 J-A 模型建立与激励幅值相关的关系式, 针对剩余损耗建立起剩余损耗系数与激励幅值和偏磁情况的关系式, 同时利用分数阶对系统的涡流损耗重新进行定义, 从而得到修正后的磁滞模型. 文中利用遗传算法对不同运行条件下的试验数据进行模型参数辨识, 根据模型参数以及运行条件得到相应的修正系数. 通过模型的仿真情况, 验证了修正后模型的精度, 分析了涡流和剩余损耗的影响因素以及对模型预测的影响; 通过对磁滞模型进行评估, 对比了磁滞曲线与磁滞损耗的误差情况. 结果表明, 修正后的模型能够对不同的激励进行高精度预测, 低频时忽略动态损耗会造成较大误差, 且涡流和剩余损耗对磁滞模型精度具有较大影响, 在对具体磁滞情况进行分析时利用磁滞曲线进行评估更为准确.

关键词: 超磁致伸缩材料, Jiles-Atherton 动态模型, 涡流损耗, 剩余损耗

PACS: 85.70.Ec, 75.80.+q, 75.60.Ej, 75.60.-d

DOI: 10.7498/aps.73.20241219

CSTR: 32037.14.aps.73.20241219

1 引言

目前, 随着在微观领域的发展, 传统的精度要求已经无法满足精度需求越来越高的精密加工、精确测量等领域^[1,2]. 超磁致伸缩驱动器凭借纳米级的输出精度以及超磁致伸缩材料 (giant magnetostrictive materials, GMM) 较大的磁致伸缩量而被广泛应用于航空航天、医疗器械、制冷等高精度领域^[3,4], 其磁致伸缩原理如图 1 所示. 在实际应用中往往因为工况不同而改变其运行条件, 例如超声波清洗中针对不同材料和污垢需要调节激励幅值和频率, 医疗成像中根据需求不同需要改变激励频率, 振动测试中为满足不同的测试标准和材料特性

需要调整激励幅值和频率, 机器人控制中为适应负载需要实时调节激励幅值、偏磁、频率以实现高精度定位, 能量收集中为获得最大化能量的输出需要调节激励幅值和偏置大小. 由于激励幅值、偏磁、频率发生变化, GMM 的磁致伸缩特性也会发生改变, 其磁滞模型参数会随着激励不同而发生变化. 而传统 GMM 的磁滞模型需要大量的试验数据进

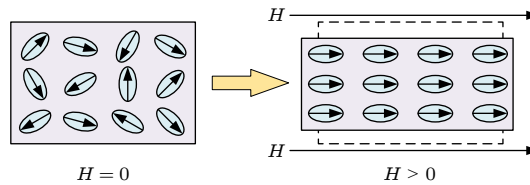


图 1 GMM 磁致伸缩原理

Fig. 1. GMM magnetostrictive principle.

* 国家自然科学基金 (批准号: 52266005) 资助的课题.

[#] 同等贡献作者.

[†] 通信作者. E-mail: 937293023@qq.com

行辨识以满足不同激励情况下的高精度预测, 这大大增加了该材料的应用难度. 缺少一种能够实现多参数(激励幅值、偏磁、频率)作用下的 J-A 磁滞修正模型, 以满足 GMM 磁滞模型的高精度预测.

J-A 模型因其辨识参数少、物理意义明确而被广泛使用. 近年来较多学者对不同工况下的 J-A 模型进行了研究, 其中包含温度、预压应力、激励波形等^[5-7], 并在研究过程中发现了一系列规律. 当系统的设计参数确定时, 系统的输出就只与激励情况有关, 当系统的激励情况发生变化时, GMM 的磁滞模型参数也会发生变化. 目前关于磁滞模型的研究大多同时只包含激励幅值、偏磁、频率三项参数的一项或两项. 王洋和刘志珍等^[8]对偏置情况下的磁滞模型进行研究, 发现偏磁情况与静态磁滞模型无关, 静态磁滞模型只与激励幅值有关; 刘任和李琳^[9]对于偏磁情况下的磁滞模型进行分析发现偏磁大小也与涡流损耗无关, 结合二者的研究发现偏磁大小只影响剩余损耗, 而激励幅值同时影响静态磁滞模型和剩余损耗. 澹台乐琰等^[10]通过引入直流分量, 推导了直流偏磁下无磁滞磁化曲线及磁化强度修正式, 该模型通过将偏置场与激励场的磁化情况进行分离, 提出了以磁场强度为变量的适用于直流偏磁工况的静态 J-A 磁滞修正模型. 刘任等^[11]研究了非正弦激励下含偏置小磁滞回环的复杂磁滞回线, 引入了两个控制其不可逆磁化分量变化的比例因子, 同时发现对 J-A 模型的钉扎系数和磁畴内耦合平均场参数随磁密幅值变化而变化, 对不同波形时的通用参数更新从而实现磁滞模型的优化, 并验证了三次、五次、九次谐波情况下的模型精度. Zhang 等^[12,13]分别将 J-A 磁滞模型、Preisach 模型与分数阶导数结合, 通过铁磁材料的动态磁滞回线模拟与损耗计算发现分数阶在涡流上的应用能够在较大的频率范围提供较为精确的仿真结果. Liu 等^[14]基于分数阶导数实现对损耗分离理论框架下的涡流损耗项进行改进并与静态 Energetic 模型结合实现对硅钢材料高频损耗的精确预测. 这些研究虽然在拓展传统磁滞模型应用的同时提高了模型的精度, 但是没有考虑三项参数同时变化的情况, 对激励情况进行全方面考虑能够拓展 J-A 磁滞模型的应用范围, 更符合实际情况.

目前现有传统的磁滞模型为获得较高的模型精度, 需对特定激励下试验数据进行单独辨识, 这

种方法成本较高, 所以在实际应用时, 通常希望存在一个通用的公式在降低时间成本的同时保证模型精度. 有学者基于某些工况建立了特定的通用公式以满足需求, Hamimid 等^[15]对小参数激励幅值下的 J-A 模型进行研究, 发现 J-A 模型的 a , α , k 参数与磁感应强度呈指数相关, 并建立了小参数滞回模型. Liu 等^[16]在此基础上对公式进行了拓展, 将 c 也做了修正, 并将其应用到 GMM 的磁滞模型预测中, 实现了对 GMM 小参数激励幅值的磁滞模型高精度预测. 以上两项研究只针对正弦小参数激励幅值下的通用磁滞模型, 并没有考虑偏磁和频率变化所带来的影响. 而 Meng 等^[17]建立了一种 S 型曲线, 并对 a , k 系数进行修正, 实现了静态情况下的变幅值与偏磁情况下的磁滞模型预测. 该项研究更进一步研究了变幅值和偏磁情况所带来的影响, 但也忽略了频率这一因素. 陈彬等^[18]利用分数阶导数对 J-A 磁滞模型的涡流损耗进行重新定义研究了直流偏磁情况下的涡流损耗系数和分数阶次的全局最优解, 并对剩余损耗统计参数提出了归一化有理函数表达式, 修正后的模型相比传统 J-A 模型精度更高. 这一研究同时考虑了偏磁和频率因素, 但忽略了变幅值所带来的影响. 以上都是基于不同工况下为了节约计算成本所建立的通用模型, 虽然这些模型都涉及了一项或两项变激励情况, 但现实情况中随着 GMM 应用的拓展已经不局限于单独改变激励中的一项或两项, 因此需要一个通用模型能同时满足幅值、偏磁、频率变化时, 对系统磁滞曲线的高精度预测.

针对上述情况, 本文为解决不同激励情况下的 GMM 磁滞模型预测问题, 通过对激励幅值、频率、偏磁进行研究, 通过运行条件建立相关模型参数的修正式, 以满足不同激励情况下的 GMM 磁滞曲线高精度预测. 文中依据材料特性对涡流损耗引入分数阶理论, 基于幅值对 J-A 模型部分参数进行修正, 基于幅值和偏磁情况对剩余损耗系数进行修正, 分别修正因为幅值、频率以及偏磁变化对磁滞模型参数产生的影响. 文中在传统模型中增加了一项分数阶, 并利用遗传算法对试验所得的磁滞曲线进行参数辨识, 后续对得到的参数结合运行条件进行处理并进一步辨识, 先后得到所需的 15 项参数. 利用修正模型对低频情况的动态损耗进行研究, 发现忽略低频时的动态损耗会使高频仿真产生

较大误差. 通过对比不同激励情况下的磁滞模型仿真结果, 并对涡流损耗和剩余损耗进行分析, 发现修正后的磁滞模型拟合精度较高且更符合实际情况. 通过对不同激励下的损耗进行分析, 得到损耗误差与频率的关系, 并从不同视角对磁滞损耗和磁滞曲线进行分析, 发现磁滞曲线对系统的精度评估更具备说服力.

2 J-A 磁滞模型分析

传统磁滞模型需考虑 GMM 棒的动态损耗, 根据损耗分离理论, GMM 棒的总损耗可分为磁滞损耗、涡流损耗以及剩余损耗^[19], 如 (1) 式所示:

$$\begin{aligned} & \mu_0 \delta_m \int M_{an} dH_e \\ &= \mu_0 \delta_m \int M dH_e + \mu_0 k \delta (1 - c) \int dM_{irr} \\ & \quad + k_e \int \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt + k_a \int \left(\frac{dB}{dt} \right)^{3/2} dt, \quad (1) \end{aligned}$$

其中, M 为磁化强度, H_e 为有效磁场强度, c 为可逆系数, k 为牵制系数, B 为磁感应强度, t 为时间, M_{irr} 为不可逆磁化强度, M_{an} 为无磁滞磁化强度, μ_0 为真空磁导率, k_e 为涡流损耗系数, k_a 为剩余损耗系数, k_e 和 k_a 与 GMM 棒的形状尺寸有关, 对 GMM 棒处理后其系数也会发生变化. δ_m 为避免出现非物理负磁化率引入的参数, 当 $\text{sign}(dH/dt) \times (M_{an} - M) \geq 0$ 时为 1, 当 $\text{sign}(dH/dt) \times (M_{an} - M) < 0$ 时为 0, H 为磁场强度.

J-A 模型是以静态磁滞模型为基础后续引入动态损耗, 当磁感应强度不变时会使总损耗增加, 当磁场强度不变时 J-A 模型的参数会发生变化. 现有研究发现利用场分离理论能够提高磁滞模型精度^[20]:

$$H = \frac{NI}{k_g l} - k_e \frac{dB}{dt} - k_a \text{sign} \left(\frac{dB}{dt} \right) \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1/2}, \quad (2)$$

其中, k_g 为漏磁系数, l 为 GMM 长度, N 为线圈匝数, I 为线圈电流.

磁滞损耗部分通常在准静态情况下获得, 频率较低时涡流损耗和剩余损耗较小, 在处理时通常忽略, 同时将 GMM 棒内的磁场等效为均匀磁场, 该情况下的模型通常称为准静态磁滞模型. 这种模型只需辨识 5 个参数, 一般只适用于低频情况, 然而在需要较高的磁滞精度时涡流损耗和剩余损耗也需考虑.

传统 J-A 模型如 (3) 式所示:

$$\begin{cases} H_e = H + \alpha M, \\ M_{an} = M_s \left(\coth \frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e} \right), \\ M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}), \\ M = M_{rev} + M_{irr}, \\ B = \mu_0(H + M), \\ \frac{dM}{dH} = \frac{\delta_m(M_{an} - M) + k \delta c \frac{dM_{an}}{dH_e}}{k \delta - \alpha \delta_m(M_{an} - M) - k \delta c \alpha \frac{dM_{an}}{dH_e}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, M_{rev} 为可逆磁化强度, M_s 为饱和磁化强度, a 为形状系数.

在较多情况中由于 GMM 的涡流损耗影响明显, 为抑制涡流损耗对 GMM 棒进行切割后粘接, 但切割后的易碎、脱胶等问题会对实际应用产生较大影响. 对未被切割的 GMM 进行分析, 在低频激励磁场下工作时, 由于驱动器内部磁场均匀性较高, 可将 GMM 内部看成均匀磁场, 由麦克斯韦定律和法拉第电磁感应定理可得在 GMM 棒 r 处的感生电动势为

$$E = \frac{d\phi}{dt} = \pi r^2 \frac{dB}{dt}, \quad (4)$$

其中, ϕ 为半径 r 处的磁通. 在 r 处的微元电阻为

$$R = \frac{\rho(2\pi r)}{l dr}, \quad (5)$$

其中, ρ 为 GMM 棒的电阻率. 对半径积分得到 GMM 棒的涡流损耗:

$$P_{cl} = \int_0^{r_0} \frac{E^2}{R} dr = \frac{\pi l r_0^4}{8\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2, \quad (6)$$

其中, r_0 为 GMM 棒半径.

GMM 在高频磁场中产生的涡流也会生成与驱动磁场相反的磁场来抑制换能器内部的磁场, 该抑制磁场越靠近中心处磁场强度越大, 因此 GMM 棒内部磁场会趋向集中于表面产生集肤效应. 其中有效磁场能够达到的材料径向深度为集肤深度 δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{f \pi \mu_0 \mu_r}}, \quad (7)$$

其中, μ_r 为 GMM 棒的相对磁导率.

通过将集肤深度以内看成均匀磁场, 集肤深度以外无磁场. 故集肤效应下 GMM 棒的涡流损耗:

$$P_{cl} = \int_{r_0-\delta}^{r_0} \frac{E^2}{R} dr = \frac{\pi l}{8\rho} [r_0^4 - (r_0 - \delta)^4] \left(\frac{dB}{dt} \right)^2, \quad (8)$$

其中, 当 $r_0 - \delta > 0$ 时才考虑集肤情况.

GMM 棒中单位体积的涡流损耗:

$$W_{cl} = \frac{P_{cl}}{\pi r_0^2 l} = k_{cl} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2. \quad (9)$$

在此基础上有学者提出一种分数阶涡流损耗模型, 利用分数阶给予更高的自由度以提高磁滞模型精度, 实现宽频激励下的高精度预测, 其中 R-L 分数阶微积分因为更符合系统的实际情况而被引入, 引入分数阶后的涡流场:

$$H_{cl} = k_{cl0} {}^{RL}D_t^p B(t), \quad (10)$$

R-L 分数阶定义为^[21]:

$${}^{RL}D_{a_0}^p f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-p)} \frac{d^n}{dt^n} \left[\int_{a_0}^t (t-x)^{n-p-1} f(x) dx \right], \quad (11)$$

其中, $n = [p]$, Γ 为 Gamma 函数, p 为分数阶次, a_0 为初始时刻.

图 2 中通过改变分数阶次磁滞模型出现了不同的特征, 随着分数阶的减小磁滞曲线面积减小, 涡流损耗对系统的影响随着分数阶次的变化而变化. 由于涡流损耗的频率相关性, 这一现象在频率增加时更为明显, 随着激励频率由图 2(a) 的 100 Hz 增大到图 2(b) 的 400 Hz, 磁滞曲线面积增大 $p = 1.1 > p = 1 > p = 0.9$. 考虑到分数阶情况下随激励频率 f 增大系统与整数阶情况差异逐渐明显, 这也解释了磁滞模型随着频率的升高误差逐渐明显的现象.

关于系统的剩余损耗, 发现未偏磁情况下利用相同的剩余损耗系数对不同激励幅值下的磁滞模型进行仿真, 得到了较高的仿真精度. 通过假设不同激励幅值下的剩余损耗相同, 根据对材料的磁畴

分布特性进行分析, 得到剩余损耗系数:

$$k_a = \sqrt{\sigma \pi r_0^2 G V_0}, \quad (12)$$

其中, $G = 0.1375$ 为无量纲参数, σ 为 GMM 的电导率, V_0 为损耗统计参数.

Wang 和 Liu^[22] 提出偏磁下静态磁滞模型参数不发生改变, Liu 和 Li^[23] 发现偏磁情况下剩余损耗中的 $V_0(B_p, B_d)$ 随激励幅值和偏磁大小的变化而变化, 由此建立偏磁情况下的剩余损耗的关系式:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_a &= \sqrt{\sigma \pi r_0^2 G V_0(B_p, B_d)} \\ &= \sqrt{\sigma \pi r_0^2 G V_0 \left(1 + w_1 \cdot B_d^{w_2} \cdot e^{w_3 \cdot B_p^{0.5}} \right)}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, w_1, w_2, w_3 分别为剩余损耗的三项修正系数.

在改变激励频率时发现随着激励频率的升高, 涡流和剩余损耗也随之变大, 导致对 GMM 棒实际作用的有效磁场强度减小, 因此不以输入磁场强度作为 J-A 模型修正系数的基础参数而把磁感应强度作为基础参数. 根据 Wei 等^[24] 的研究了解到当磁感应强度发生变化时, 其磁滞模型的参数也会发生变化. 在此基础上, 建立关于激励幅值的磁滞参数修正模型, 如 (14) 式所示

$$\begin{cases} \tilde{\alpha} = \alpha e^{\lambda_\alpha (B_{p1} - B_{p2})}, \\ \tilde{c} = c e^{\lambda_c (B_{p1} - B_{p2})}, \\ \tilde{k} = k e^{\lambda_k (B_{p1} - B_{p2})}, \\ \tilde{a} = a e^{\lambda_a (B_{p1} - B_{p2})}, \end{cases} \quad (14)$$

其中, B_{p1}, B_{p2} 分别为辨识初始磁滞曲线的激励幅值和目标磁滞曲线的幅值, $\lambda_\alpha, \lambda_c, \lambda_k, \lambda_a$ 分别为激

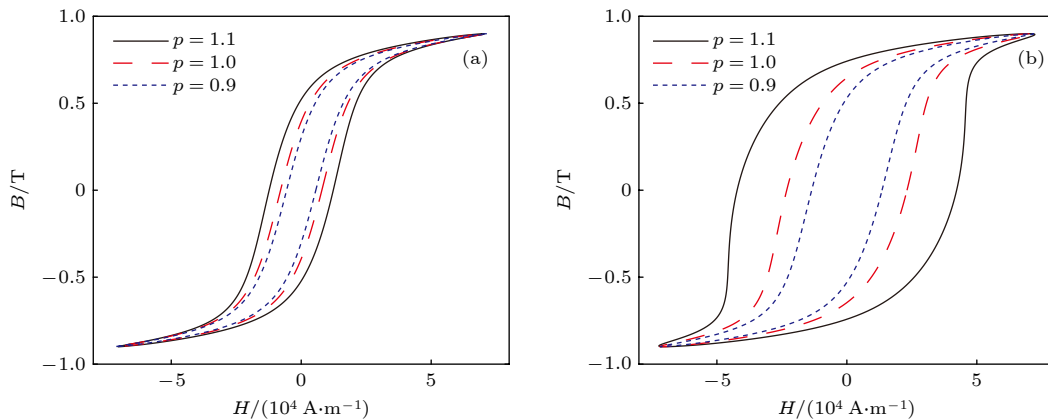


图 2 不同分数阶下的磁滞曲线特征 (a) $f = 100$ Hz; (b) $f = 400$ Hz

Fig. 2. Characterization of hysteresis curves at different fractional orders: (a) $f = 100$ Hz; (b) $f = 400$ Hz.

励幅值不同时对应参数的修正系数.

综合三项损耗的修正情况得到修正后的磁滞模型公式:

$$\begin{cases} H = \frac{NI}{k_g l} - k_{e10}^{RL} D_i^p B(t) - \tilde{k}_a \text{sign} \left(\frac{dB}{dt} \right) \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1/2}, \\ \frac{dM}{dH} = \frac{\delta_m (M_{an} - M) + \tilde{k} \delta \tilde{c} \frac{dM_{an}}{dH_e}}{\tilde{k} \delta - \tilde{\alpha} \delta_m (M_{an} - M) - \tilde{k} \delta \tilde{c} \tilde{\alpha} \frac{dM_{an}}{dH_e}}. \end{cases} \quad (15)$$

通过仿真得到的磁滞曲线误差:

$$R_{ef} = \frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z (B_{E_i} - B_{M_i})^2}, \quad (16)$$

其中, z 为取样点的数目, B_E 为仿真得到的磁感应强度, B_M 为试验得到的磁感应强度.

3 试验情况

GMA 结构简图如图 3 所示, 系统通过激励线圈提供所需的激励磁场, 激励线圈直接提供系统所需的两种磁场, 通过预紧螺栓调节碟簧的预压应力以此改善磁机耦合特性, 导向块、导磁片等部件调节磁场分布、减小系统的漏磁系数, 利用感应线圈计算磁感应强度. 通过控制线圈的输入电压控制系统的激励幅值、偏置大小和频率. 系统的主要相关参数见表 1.

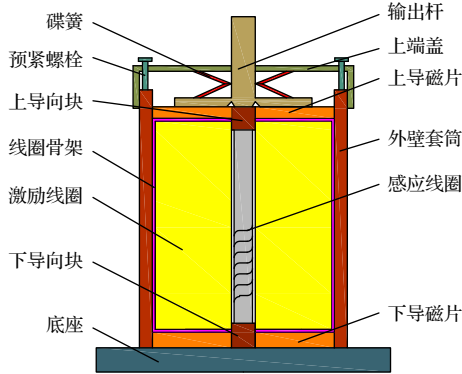


图 3 GMA 结构示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the GMA structure.

考虑到在低频情况下若忽略涡流损耗和剩余损耗, 可能会对后续参数预测产生影响, 因此对系统模型参数直接进行辨识, 通过不同正弦偏压激励下所得的 U - B 曲线, 利用遗传算法得到模型的试验曲线辨识参数, 修正后的模型参数见表 2.

表 1 GMA 系统主要相关参数

Table 1. GMA system main relevant parameters.

名称	符号	单位	数值
GMM棒长	l	m	0.08
GMM直径	D	m	0.0128
GMM质量	m_2	kg	0.12
GMM棒相对磁导率	μ_r	—	9
GMM棒电阻率	ρ	$\Omega \cdot m$	6×10^{-7}
激励线圈匝数	N	—	1000
真空磁导率	μ_0	$H \cdot m^{-1}$	$4\pi \times 10^{-7}$
漏磁系数	k_g	—	1.1
饱和磁滞伸缩系数	λ_s	10^{-6}	1100

表 2 修改后的模型辨识参数

Table 2. Modified model parameter identification.

系数	数值	系数	数值	系数	数值
α	0.01812	λ_α	-0.613	k_{cl}	8.533
c	0.3899	λ_c	2.393	k_a	21.03
k	4407	λ_k	-0.933	w_1	9.35×10^8
a	16179	λ_a	0.7	w_2	3.97
M_s	695000	p	1.07	w_3	-29.35

试验的流程示意如图 4 所示. 通过输入电压以及电流的传递函数计算得到激励电流, 通过 GMM 棒参数计算涡流损耗系数, 将激励电流与涡流损耗系数代入 (15) 式得到磁场强度公式, 并通过试验所得的磁滞曲线参数利用遗传算法进行参数辨识, 得到所需的 α , c , k , a , M_s , p , k_a , 其中 B_p , B_d 由试验数据得到, 利用 (14) 式得到修正系数 λ_α , λ_c , λ_k , λ_a , 根据多组试验数据对 k_a 的修正系数进行辨

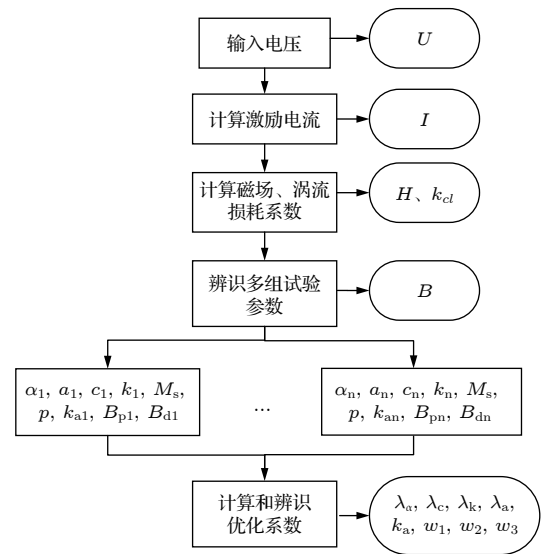


图 4 试验流程示意图

Fig. 4. Schematic diagram of test procedure.

识得到优参数 w_1, w_2, w_3 和原始 k_a . 将得到的参数代入 (15) 式中, 根据输入电压进行仿真得到 $B-U$ 曲线, 通过 (16) 式的误差情况从而评估修正后的模型.

遗传算法设计中, 初始计算针对 $\alpha, c, k, a, M_s, p, k_a$ 设置未知数个数为 7 并设计初始范围, 该范围应尽量大些以获得更多的可能性 (通过调试不断缩减范围提高遗传算法的效率以及方便对多组数据进行参数辨识), 适应度函数选用 (16) 式的误差公式, 种群大小设计为 500, 选择方法为轮盘赌选择, 交叉操作为二进制交叉, 变异操作为随机变异, 函数容差为 10^{-6} , 终止条件为最大迭代设计为 1000 或适应度的平均变化小于函数容差. 后续利用所得到的 k_a 对 w_1, w_2, w_3 和原始 k_a 进行辨识, 其中未知数设置为 4, 其他设置与上文一致.

线圈的电流传递函数如 (17) 式所示 [25]:

$$G(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{8999.9916075s + 33333302.25}{s^2 + 11316.06 + 33333302.25} \quad (17)$$

从图 5 可以明显看到在 20 Hz, 0—5 V 激励情况下, 忽略涡流损耗和剩余损耗只考虑磁滞损耗仿真时, 其与试验曲线存在明显误差, 误差从原来的 3.43×10^{-5} 增大到 9.52×10^{-5} , 仿真曲线在试验曲线的基础上向内缩小. 因此在实际应用 J-A 模型时不能简单地将 GMM 棒的低频激励看作只有磁滞损耗.

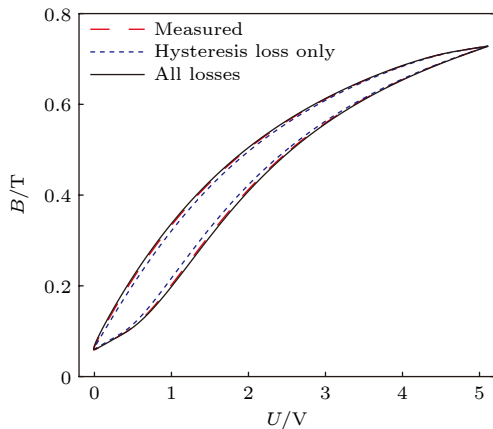


图 5 低频情况下涡流损耗和剩余损耗对磁滞特性的影响
Fig. 5. Current loss and residual loss on low frequency hysteresis characteristics.

通过 (1) 式得到 GMM 的总损耗与磁滞损耗、涡流损耗、剩余损耗有关, 在低频时忽略涡流损耗与剩余损耗, 在高频时又将两项损耗引入公式会低估这两项损耗. 由于涡流损耗与剩余损耗与激励频

率相关, 模型不精确会使误差放大, 因此在进行 GMM 磁滞模型预测时需要低频的涡流损耗与剩余损耗进行分析辨识.

针对不同激励情况传统磁滞模型仿真方法有两种, 一种是针对当前激励进行参数辨识, 从而得到较高的仿真精度, 但这需要较高的时间与计算成本, 且实际情况中激励变化的范围较广, 这种情况难以应用于现实. 另一种是以一组测定的仿真数据对其他激励进行仿真, 这种情况会产生较大的误差. 这两种方法都有各自的局限性, 所以需要一种既能满足仿真精度又能减少计算成本的模型来满足任意激励下的仿真预测. 图 6(a), (b) 中 0—3 V, 0—4 V, 20 Hz 工况时以 0—5 V 参数进行仿真时误差为 1.56×10^{-4} , 8×10^{-5} , 参数修正后进行仿真时误差为 3.98×10^{-5} , 5.94×10^{-5} , 两组激励情况都显示修正后的模型精度更高, 且随着激励变化逐渐加剧, 误差情况也会更加明显, 同时 0—3 V, 0—4 V

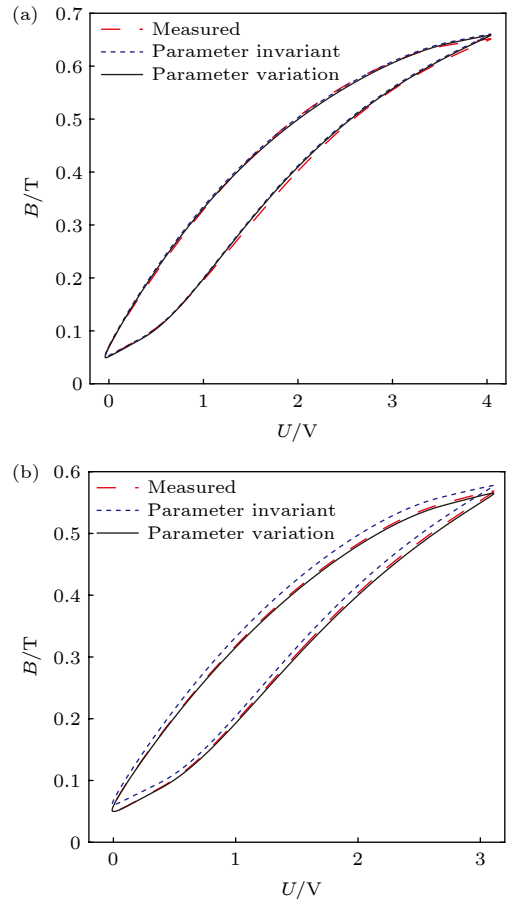


图 6 不同激励下 GMM 棒磁滞特性 (a) U (0—4 V); (b) U (0—3 V)

Fig. 6. Hysteresis characteristics of the GMM rod under different excitations: (a) U (0—4 V); (b) U (0—3 V).

激励下使用 0—5 V 的参数进行仿真时磁滞曲线向上偏移. 通过比较修正模型与第二种方法的误差情况, 能够较清楚地发现修正后的模型能够在变激励情况下获得了较高的磁滞模型精度. 修正后的模型在模型参数确定情况下, 能够对任意激励进行仿真, 在降低计算成本的同时提高模型精度.

通过图 6 中得到激励幅值和偏压情况发生变化时模型参数也会发生变化, 考虑到系统的激励电压不变, 增大激励频率时, 系统的涡流场和剩余损耗场对系统的影响逐渐增大导致实际对 GMM 的作用磁场变小相当于改变了激励幅值与偏压情况. 通过试验得到磁感应强度在表 3 列出, 将其代入修正后的模型进行仿真得到的磁滞曲线如图 7 所示. 可以看到修正后的磁滞模型仿真结果虽然与试验相比仍存在误差, 但相较于参数不变的仿真情况, 修正后的曲线拟合程度更高, 误差 R_{ef} 最大为 9.89×10^{-4} , 参数不变情况下的磁滞曲线在频率升高后存在明显偏移. 在 0—4 V 激励情况下随着激励频率的增加 J-A 模型的系统参数需要改变, 通过改变磁滞模型参数可以得到更高的磁滞拟合度. 当频率

为 500 Hz, 600 Hz 时可以明显发现, 以 20 Hz 时的模型参数进行仿真曲线存在较大偏移, 这种情况与图 6 中随着激励幅值降低时模型参数不变时磁滞曲线偏移情况一致.

系统在引入频率变化后涡流场和剩余损耗场对 GMM 产生作用, 使得不同频率下的激励幅值与偏置情况不同, 而激励幅值与偏置又会反作用于

表 3 不同激励下的磁感应强度

Table 3. Magnetic induction at various excitations.

U/V	f/Hz	B_{min}/T	B_{max}/T	B_p/T	B_d/T
0—5	20	0.066	0.7038	0.3189	0.3849
0—4	20	0.0504	0.669	0.3093	0.3597
0—4	100	0.056	0.661	0.3025	0.3585
0—4	200	0.059	0.66	0.3005	0.3595
0—4	300	0.09	0.676	0.293	0.383
0—4	400	0.124	0.65	0.263	0.387
0—4	500	0.153	0.636	0.2415	0.3945
0—4	600	0.182	0.612	0.215	0.397
0—3	20	0.0499	0.5686	0.25935	0.30925
0—3	200	0.0559	0.5832	0.26365	0.31955
0—3	400	0.107	0.536	0.2145	0.3215
0—3	600	0.16	0.48	0.16	0.32

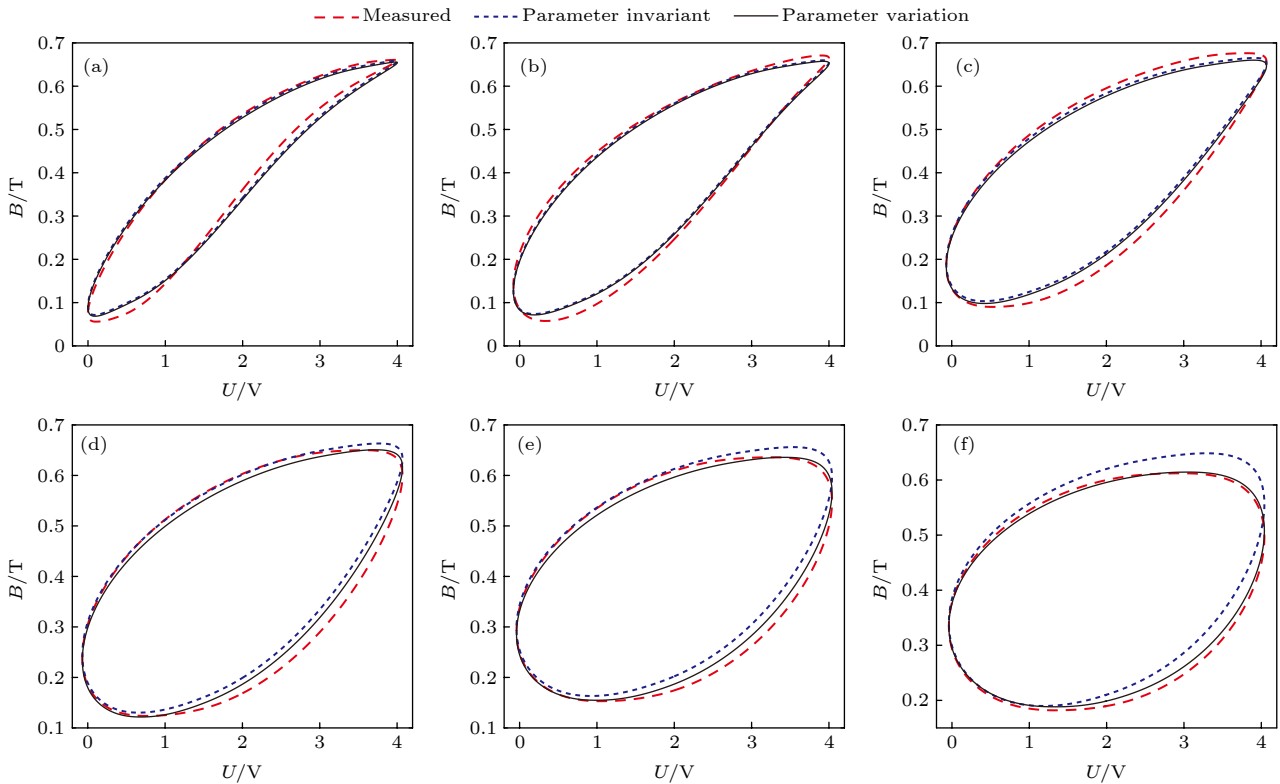


图 7 0—4 V 激励下磁感应强度随频率变化动态特性 (a) $f = 100$ Hz; (b) $f = 200$ Hz; (c) $f = 300$ Hz; (d) $f = 400$ Hz; (e) $f = 500$ Hz; (f) $f = 600$ Hz

Fig. 7. Dynamic characterization of magnetic inductance with frequency under 0—4 V excitation. (a) $f = 100$ Hz; (b) $f = 200$ Hz; (c) $f = 300$ Hz; (d) $f = 400$ Hz; (e) $f = 500$ Hz; (f) $f = 600$ Hz.

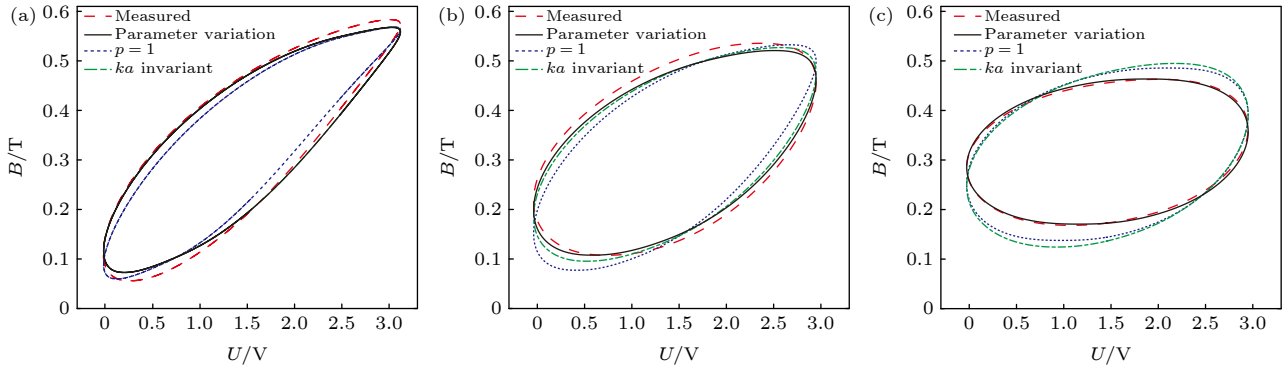

 图 8 0—3 V 激励下磁感应强度随频率变化动态特性 (a) $f = 200$ Hz; (b) $f = 400$ Hz; (c) $f = 600$ Hz

Fig. 8. Dynamic characterization of magnetic inductance with frequency under 0–3 V excitation: (a) $f = 200$ Hz; (b) $f = 400$ Hz; (c) $f = 600$ Hz.

系统的 J-A 模型与剩余损耗, 这使得不同频率下的磁滞模型参数不同. 传统模型中利用一组数据仿真所有激励情况下的磁滞曲线可以明显发现随着激励情况发生变化磁滞曲线误差也逐渐增大, 而修正后的模型参数会随着激励的变化而变化, 通过修正可以得到最佳的磁滞模型参数.

为深入研究涡流损耗与剩余损耗对磁滞曲线的影响, 分析了 0—3 V 的磁滞曲线预测情况. 对涡流损耗的分数阶进行研究, 对比传统整数阶与分数阶情况下的涡流损耗对磁滞模型的影响; 同时令剩余损耗参数保持不变 (与 0—3 V, 20 Hz 时相同), 观察磁滞曲线变化情况.

图 8 中以优化模型对 0—3 V 激励进行预测, 发现其磁滞曲线与试验曲线基本一致, 结合上文优化后的模型对磁滞曲线的预测情况, 表明优化后的磁滞模型能够对不同激励下的磁滞曲线进行高精度预测.

通过研究图 8 中的涡流对磁滞模型预测的影响, 发现整数阶时的涡流损耗造成的误差会随着激励频率的升高而增大. 同时结合图 2 中不同分数阶次的仿真情况得到, 当模型的阶次小于材料的实际阶次时, 预测的磁滞曲线会内缩, 预测的涡流损耗偏小; 反之预测的磁滞曲线会外扩, 预测的涡流损耗偏大, 且随着激励频率的升高两种情况都会导致预测误差越来越大.

同时从图 8 中发现当剩余损耗系数保持不变时随着激励幅值与偏置情况变化其磁滞曲线误差会越来越大, 结合 (13) 式与表 3 的数据分析, 当偏置磁场为零时剩余损耗系数不变, 当偏置磁场不变激励幅值增大时剩余损耗系数减小, 当激励幅值不变偏置磁场增大时剩余损耗系数也随之增大. 当两者

同时发生变化时需要实际分析两项参数对剩余损耗系数的影响情况.

通过分析得到, 涡流损耗的分数阶是材料的特性, 会随着频率变化对磁滞曲线的预测产生较大影响, 需要准确获得材料涡流的分数阶次以提高模型的精度. 剩余损耗与激励幅值和偏置磁场相关, 通过剩余损耗关系式可以建立起剩余损耗与激励幅值和偏磁大小的关系, 使剩余损耗随着激励情况的变化而变化, 从而提高剩余损耗的精度. 文中通过优化涡流损耗和剩余损耗, 有效提高了磁滞模型的精度.

4 磁滞模型评估

传统磁滞模型评估存在两种方法, 一种是对磁滞损耗进行评估, 这种方法能够评估在单位时间内或单位周期内做了多少功 [26], 另一种是对磁滞曲线进行评估, 这种方法能够评估瞬时情况下的系统误差. 通过对系统的损耗和磁滞曲线误差进行比较, 从而分析两种方法对于 GMA 系统输出的影响.

系统单位时间的磁能损耗公式:

$$W = fVS, \quad (18)$$

其中, V 为 GMM 棒体积, S 为 B - H 磁滞曲线面积. 由 (18) 式可以得到单位周期的磁能损耗公式:

$$W = VS. \quad (19)$$

磁能损耗的相对误差:

$$\varepsilon = \frac{|W_{\text{emu}} - W_{\text{mea}}|}{W_{\text{mea}}} \times 100\%, \quad (20)$$

其中, W_{emu} 为仿真得到的磁能损耗, W_{mea} 为试验得到的磁能损耗.

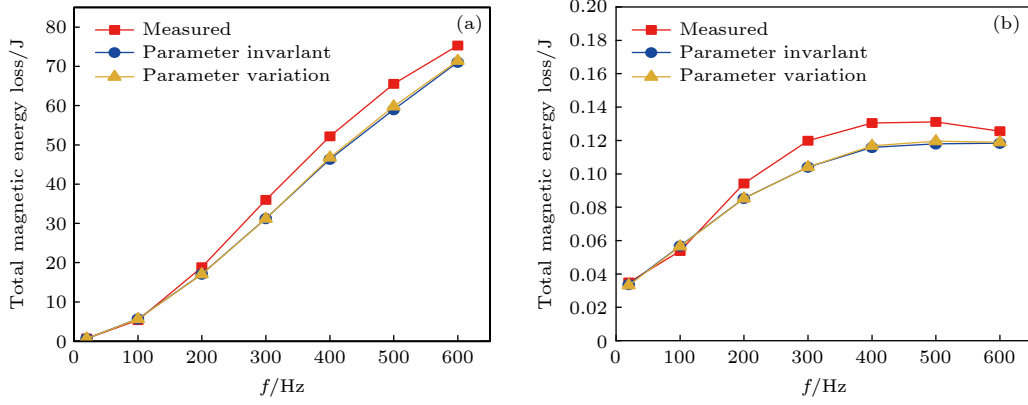


图 9 0—4 V 不同激励频率下的系统损耗 (a) 单位时间的系统损耗; (b) 单位周期的系统损耗

Fig. 9. System losses at various excitation frequencies from 0–4 V: (a) System loss per unit time; (b) system loss per unit cycle.

从图 9 发现在修正后参数不变的磁能损耗和参数变化下的磁能损耗都小于试验测量的磁能损耗, 这与实际情况相符 (导磁体、感应线圈等部件会产生相应的损耗), 这从损耗方面证明了修正后的磁滞模型更符合实际情况. 两种情况的磁能损耗较为接近, 但从表 4 的磁滞曲线误差情况发现修正后的磁滞模型精度更高. 参数不变情况的磁滞曲线相较于试验磁滞曲线偏离部分虽然造成了误差较大情况, 但是在偏离后的面积与参数变化情况接近, 因此在考虑 GMM 磁滞模型时不应该只简单地考虑能量损耗, 而应该考虑具体的磁滞曲线情况, 磁致伸缩换能器的位移等需要磁滞曲线作为重要参考依据. 从图 9(b) 中发现单位周期的能量损耗极为接近, 从损耗角度分析随着频率的升高每个周期的误差进行叠加, 即使磁滞曲线的误差较小, 最后所得的能量损耗会出现较大的误差情况, 这种误差在模型初始设计就存在且会随着频率的升高逐渐放大, 但无论误差多大最终需要回归到磁滞曲线中进行分析, 这点从 (20) 式的单位周期的相对误差与单位时间的相对误差相同就可以看出, 相对误差公式进行化简之后, 就只与磁滞曲线面积相关, 与频率和 GMM 棒体积无关. 但从相对误差中只能看出仿真的磁滞曲线面积与试验曲线的面积情况, 无法准确得到仿真和试验曲线的拟合程度, 只能依靠曲线的误差 R_{ef} 对模型的精度进行判断.

现有的磁滞模型评估方式中, 对损耗进行评估时只能得到单位周期或者单位时间内的系统损耗情况, 无法得到具体某一时刻的磁滞情况, 这种方式适用于对系统能量损耗的评估, 比较适合变压器、电机等能量损耗的研究. 对磁滞曲线进行评估

时能够得到相应的磁滞情况, 通过磁滞情况可以推导出 GMM 的磁致伸缩量, 这种方式比较适合对具体过程的研究.

表 4 0—4 V 不同频率激励下磁能损耗误差和磁滞曲线误差情况

Table 4. Magnetic energy loss error and hysteresis curve error under different frequency excitation from 0–4 V.

f/Hz	ε		R_{ef}	
	$\varepsilon_{\text{emu1}}/\%$	$\varepsilon_{\text{emu2}}/\%$	R_{ef1}	R_{ef2}
20	3.35	4.63	8×10^{-5}	5.94×10^{-5}
100	5.73	5.24	4.01×10^{-4}	4.21×10^{-4}
200	9.41	9.51	5.55×10^{-4}	5.82×10^{-4}
300	13.18	13.21	9.3×10^{-4}	8.79×10^{-4}
400	11.17	10.4	1.53×10^{-3}	9.89×10^{-4}
500	10.03	8.79	1.96×10^{-3}	9.42×10^{-4}
600	5.62	5.19	2.54×10^{-3}	6.17×10^{-4}

注: $\varepsilon_{\text{emu1}}$ 为参数未变化的相对损耗误差, $\varepsilon_{\text{emu2}}$ 为参数修正后的相对损耗误差, R_{ef1} 为参数未变化的磁滞曲线误差, R_{ef2} 为参数修正后的磁滞曲线误差.

5 结论与展望

为解决现有 GMM 随激励 (激励幅值、偏置、频率) 范围逐渐扩大所带来的磁滞曲线预测问题, 本文在前人的基础上对传统磁滞模型进行修正, 通过激励情况修正相关的磁滞模型参数. 修正后的模型本质是针对不同的激励情况定义相对应的磁滞模型参数. 利用修正后的模型分析涡流损耗和剩余损耗对磁滞曲线的仿真影响, 发现在忽略涡流和剩余损耗时磁滞曲线出现明显的内缩现象, 结果表明低频情况下不能忽略 GMM 的涡流和剩余损耗. 通过对比不同激励下的磁滞曲线仿真情况, 分析了

涡流和剩余损耗对磁滞曲线预测的影响,同时证明了修正后的模型相较于传统方法具有更高的精度以及更小的计算成本.

磁滞模型精度的评估中评估磁滞曲线更为准确,通过其能够具体研究 GMM 的滞回特性. 通过损耗评估磁滞模型时,无法了解磁滞曲线是否偏转,只能知道单位周期损耗或单位时间损耗. 从单位时间进行评估时,由于单位周期损耗的误差累计随着频率增大误差会急剧明显,因此评估损耗误差时较多情况对损耗的相对误差进行分析.

本文提出修正后的磁滞模型能够改善不同激励下传统磁滞模型精度低、工作成本高等问题,为 GMM 的磁滞模型预测提供了一个更准确且更方便的模型;该模型也为后续研究 GMA 系统的输出特性、控制等领域提供了基础. 文中修正后的磁滞模型不仅适用于 GMM,也适用于其他材料的磁滞模型预测,为研究变激励情况下的磁滞模型提供了新的研究视角.

参考文献

- [1] Yang Z J, Li J H, Zhou Z G, Gong J X, Bao X Q, Gao X X 2022 *Metals* **12** 341
- [2] Yamaura S, Nakajima T, Kamata Y, Sasaki T, Sekiguchi T 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **514** 167260
- [3] Yu C F, Wu G, Wang Y, Xiao Z H, Duan Y Y, Chen Z 2022 *IEEE Access* **10** 43501
- [4] Li Y S 2023 *Shock Vib.* **2023** 7379276
- [5] Liu Y G, Gao X H, Li Y L 2016 *Sensor. Actuat. APhys.* **250** 7
- [6] Sablik M J, Jiles D C 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 5402
- [7] Unniachanparambil G M, Kulkarni S V 2019 *IET Electr. Power App.* **13** 2090
- [8] Wang Y, Liu Z Z 2017 *Proc. CSEE* **37** 313 (in Chinese) [王洋, 刘志珍 2017 *中国电机工程学报* **37** 313]
- [9] Liu R, Li L 2019 *High Volt. Eng.* **45** 4062 (in Chinese) [刘任, 李琳 2019 *高电压技术* **45** 4062]
- [10] Tantai L Y, Han X Q, Wang L, Yuan T J 2020 *Power Syst. Technol.* **44** 122 (in Chinese) [澹台乐琰, 韩肖清, 王磊, 袁铁江 2020 *电网技术* **44** 122]
- [11] Liu R, Gu C Y, Sun J D, Tang B 2024 *Proc. CSEE* **1** 1 (in Chinese) [刘任, 顾朝阳, 孙江东, 唐波 2024 *中国电机工程学报* **1** 1]
- [12] Zhang B, Gupta B, Ducharne B, Sébald G, Uchimoto T 2018 *IEEE T. Mang.* **54** 7301605
- [13] Zhang B, Gupta B, Ducharne B, Sébald G, Uchimoto T 2018 *IEEE T. Mang.* **54** 6100204
- [14] Liu R, Li L 2021 *IEEE T. Power Electr.* **36** 2009
- [15] Hamimid M, Mimoune S M, Feliachi M 2012 *Physica B* **407** 2438
- [16] Liu Y G, Gao X H, Chen C X 2016 *Math. Probl. Eng.* **2016** 2609069
- [17] Meng A H, Zhu J M, Kong M, He H L 2013 *IEEE T. Mang.* **49** 552
- [18] Chen B, Qin X B, Tang B, Liu R, Zhang J G, Wan N N 2022 *Proc. CSEE* **42** 4590 (in Chinese) [陈彬, 秦小彬, 唐波, 刘任, 张建功, 万妮娜 2022 *中国电机工程学报* **42** 4590]
- [19] Li Y, Zhu L H, Zhu J G 2018 *IEEE T. Mang.* **54** 1300105
- [20] Baghel A P S, Kulkarni S V 2014 *IEEE T. Mang.* **50** 7009004
- [21] Jumarie G 2009 *Appl. Math. Lett.* **22** 1659
- [22] Wang Y, Liu Z Z 2016 *IEEE T Appl. Supercon.* **26** 0608905
- [23] Liu R, Li L 2019 *IEEE T. Mang.* **55** 7501404
- [24] Wei Y F, Yang X, Chen Y K, Zheng H B, Su L L 2022 *IEEE T. Mang.* **58** 7300909
- [25] Zhu Y C, Yang X L, Wereley N M 2016 *Smart Mater. Struct.* **25** 085030
- [26] Du R Y, Robertson P 2015 *UKSim* (Cambridge: Emmanuel Coll) p432

Prediction of hysteresis model at different external conditions for giant magnetostrictive materials^{*}

Yan Hong-Bo[#] Huang Hai-Tao^{#†} Wang Jian-Xin Huang Jian Xie Kai

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

(Received 30 August 2024; revised manuscript received 24 September 2024)

Abstract

The hysteresis model of giant magnetostrictive materials (GMMs) changes with model parameters: the excitation amplitude, bias condition and excitation frequency. The existing hysteresis model is unable to predict the effects of simultaneous changes in the three external conditions. In this paper, the hysteresis loss mechanism is explained by using the traditional Jiles-Atherton (J-A) dynamic model, and the relation equation is established according to the operating conditions and material properties to respond to the changes of external conditions. For the J-A model, the relationship equation related to the excitation amplitude is established, and the relationship equation relating the residual loss coefficient to the excitation amplitude and the bias condition is established for the residual loss, while the eddy current loss of the system is redefined by using the fractional order to obtain the modified hysteresis model. In the paper, the genetic algorithm is used to identify the model parameters of the test data under different operating conditions, and the corresponding correction coefficients are obtained according to the model parameters and the operating conditions. The accuracy of the modified model is verified by simulating the model and analyzing the influences of eddy currents and residual losses and their effects on the model predictions. The hysteresis model is evaluated to compare the hysteresis curves with the hysteresis losses in terms of errors. The results show that the modified model is capable of predicting various excitations with high accuracy, and that neglecting dynamic losses at low frequencies results in large errors. If the model order of the eddy current loss is smaller than the actual order of the material, the predicted hysteresis curve will be contracted inward and the predicted eddy current loss will be small; on the contrary, the predicted hysteresis curve will be expanded outward and the predicted eddy current loss will be large, and with the increase of the excitation frequency, both cases will cause the prediction error to become larger and larger. When the bias magnetic field is zero, the residual loss coefficient is unchanged; when the bias magnetic field is kept constant, the excitation amplitude increases and the residual loss coefficient decreases; when the excitation amplitude is unchanged, the bias magnetic field increases and the residual loss coefficient also increases. When both the bias magnetic field and the excitation amplitude change at the same time, it is necessary to conduct an actual analysis of their corresponding residual loss coefficients. Using hysteresis curves to evaluate hysteresis is more accurate.

Keywords: giant magnetostrictive materials, Jiles-Atherton dynamic model, eddy current loss, residual loss

PACS: 85.70.Ec, 75.80.+q, 75.60.Ej, 75.60.-d

DOI: [10.7498/aps.73.20241219](https://doi.org/10.7498/aps.73.20241219)

CSTR: [32037.14.aps.73.20241219](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20241219)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52266005).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: 937293023@qq.com

超磁致伸缩材料在不同外部条件下的磁滞模型预测

闫洪波 黄海涛 汪建新 黄健 谢凯

Prediction of hysteresis model at different external conditions for giant magnetostrictive materials

Yan Hong-Bo Huang Hai-Tao Wang Jian-Xin Huang Jian Xie Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 228501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241219

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241219>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

γ -Fe₄N软磁复合材料的磁性及损耗特性

Magnetic and loss characteristics of γ -Fe₄N soft magnetic composites

物理学报. 2023, 72(13): 137501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222352>

缺陷对铁单质薄膜磁致伸缩与磁矩演化的影响

Effect of defects on magnetostriction and magnetic moment evolution of iron thin films

物理学报. 2022, 71(1): 017502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211177>

基于材料组分信息的高居里温度铁磁材料预测

Prediction of ferromagnetic materials with high Curie temperature based on material composition information

物理学报. 2023, 72(18): 180202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230382>

一种具有动态磁负刚度薄膜声学超材料的低频隔声特性

Low-frequency sound insulation performance of novel membrane acoustic metamaterial with dynamic negative stiffness

物理学报. 2022, 71(21): 214301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221058>

低损耗材料微波介电性能测试中识别TE_{01δ}模式的新方法

A new method for identifying TE_{01δ} mode during microwave dielectric measurements of low-loss materials

物理学报. 2020, 69(12): 128401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200275>

基于机器学习的磁流变弹性体磁致储能模量的快速准确表征

Fast and accurate characterization of magnetorheological elastomers based on machine learning

物理学报. 2024, 73(16): 165101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240482>