doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.053

棒状铁镓合金磁滞特性和功耗特性分析

翁 玲 曹晓宁 梁淑智 孙 英 黄文美 王博文 (河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130)

摘要:铁镓合金的磁滞和功耗特性是研究磁致伸缩换能器工作效率的基础特性。基于霍尔效应和法拉第电磁感应 定律设计了一套磁致伸缩材料磁特性自动测试系统,利用该系统分别测试了铁镓合金棒不同磁场频率和不同磁感 应强度下的磁滞回线,得知矫顽力和剩磁都随磁场频率和磁感应强度的增加而增加。基于磁滞回线计算了相同磁 感应强度在不同磁场频率下的电磁损耗和介质储能,通过对电磁损耗曲线进行拟合,将电磁损耗分离为磁滞、涡流 和剩余损耗。结果表明:磁感应强度为1725 mT时,磁场频率由30 Hz 增至70 Hz,电磁损耗和介质储能分别增加了 3.24 倍和1.96 倍,分离后的磁滞、涡流和剩余损耗分别增加了1.33 倍、5.26 倍和7.35 倍。磁滞损耗所占比例由 56.87% 下降至31.31%,涡流损耗所占比例由32.98% 上升至48.69%,剩余损耗所占比例略有上升。对于高频工 作条件下的铁镓换能器,通过对铁镓棒切片处理,减小了涡流损耗,提高了铁镓换能器的工作效率。

关键词:铁镓合金;磁滞特性;功耗特性;损耗分离

中图分类号:TM274 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2018)02-0411-08

Analysis of Hysteresis and Power Consumption Characteristics of Fe – Ga Rod Alloy

WENG Ling CAO Xiaoning LIANG Shuzhi SUN Ying HUANG Wenmei WANG Bowen (State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Hysteresis and power consumption characteristics of Fe – Ga alloy is the basis of working efficiency study of magnetostrictive transducers. Based on hall effect and Faraday's law of electromagnetic induction, a set of automatic testing system for magnetic properties of magnetostrictive materials was designed. By using the automatic testing system, the magnetic hysteresis curve of Fe - Ga rod alloy was tested and analyzed under different magnetic field frequencies and magnetic induction intensities. And coercive force and remanence were increased when the magnetic field frequency and magnetic induction intensity were increased respectively. By the hysteresis curve of the same magnetic induction intensity under different magnetic field frequencies, electromagnetic losses and energy storage medium were calculated. Simultaneously, electromagnetic losses were separated into three main parts of hysteresis, eddy current and residual loss. It was found that when magnetic induction intensity was 1 725 mT and magnetic field frequency was increased from 30 Hz to 70 Hz, electromagnetic loss and energy storage medium were increased by 3. 24 times and 1. 96 times respectively as well as hysteresis, eddy current and residual losses which were separated by electromagnetic loss respectively were increased by 1.33 times, 5.26 times and 7.35 times. The proportion of hysteresis loss was fallen from 56.87% to 31.31%, the proportion of eddy current loss was risen from 32.98% to 48.69%, and the proportion of residual loss remain unchanged. For the high-frequency working conditions of Fe - Ga gallon transducer, the treatment of slicing Fe – Ga rod alloy was made to reduce the eddy current loss and improve the efficiency of Fe – Ga gallon transducer.

Key words: Fe – Ga alloy; hysteresis characteristics; power consumption characteristics; segregation of losses

基金项目:国家自然科学基金项目(51201055、51777053)、河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2015085)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20140421)、河北省引进留学人员项目(CG2013003001)和教育部留学回国人员科研启动基金项目

收稿日期:2017-06-08 修回日期:2017-08-26

作者简介:翁玲(1978-),女,副教授,博士,主要从事磁性材料建模和智能器件设计研究, E-mail: llweng@163.com

0 引言

铁镓合金是新型磁致伸缩换能器能量转换的关 键部分,其磁滞特性及功耗特性对换能器的工作效 率尤为重要[1-4]。目前,科研人员对磁性材料的磁 滞特性和功耗特性进行了大量的研究,文献[5]提 出了一种模拟电工钢片复杂磁特性的矢量磁滞模 型,考虑频率、磁化历史等因素对磁滞特性的影响, 但该磁滞模型数学表达式复杂,不适于工程实践。 文献[6]介绍了静态和动态磁滞模型,将二阶低通 滤波器插入 J-A 数学模型, 近似模拟高频动态磁滞 回线,但没有考虑磁参数的变化情况。文献[7]提 出了一种利用局部磁滞回线特性进行无损检测新方 法,研究了变励磁条件下局部磁滞回线的形成机理, 并进行了仿真和实验验证。文献[8]提出了一种用 于电机损耗精细化分析的分段变系数铁耗计算模 型,对磁滞、涡流及剩余损耗进行准确分离,实现铁 耗精细化分析,但所提模型只能在特定范围内与实 测值吻合,不具有普遍应用性。文献[9]从电场、磁 场和机械应力场三场耦合角度建立磁滞模型,并通 过实验验证了模型的正确性和实用性。文献[10] 基于 J-A 磁滞模型,从能量平衡原理出发,建立了 以磁通密度作为输入量的铁芯动态磁滞损耗模型, 但理论与实测值存在一定误差,应该对模型进行修 正。文献[11] 基于 3D 磁场解析模型, 计算了无铁 芯绕组的涡流损耗,并通过实验验证发现,该模型比 传统经验公式更接近于实际。

本文首先基于霍尔效应和法拉第电磁感应原 理,运用霍尔芯片和固定线圈法间接测量铁镓合金 棒的磁场强度和磁感应强度,通过数据采集卡自动 绘制不同频率和不同磁感应强度下的磁滞回线;然 后根据磁滞回线,分析剩磁和矫顽力随频率和磁感 应强度的变化情况;最后,利用数据采集卡上的数据 计算不同磁场频率下的电磁损耗,基于 Berttotti 损 耗模型,利用曲线拟合的方法将电磁损耗进行分离。

1 测量原理和模型

电磁损耗是磁性材料在交变磁场作用下产生的 各种能量损耗的统称。在正弦交变磁场 H 条件下, 磁感应强度 B 的变化也为正弦,但由于磁滞效应两 者之间存在相位差,则

$$H = H_{\rm m} \cos(\omega t) \tag{1}$$

$$B = B_{\rm m} \cos(\omega t - \delta) \tag{2}$$

关于磁场强度的测量基于霍尔原理采用霍尔芯 片进行测量。由霍尔效应可知

$$U_{\rm H} = R_{\rm H} \frac{BI}{D} \tag{3}$$

将 $B = u_0 H$ 代入式(3)得

$$H = \frac{D}{u_0 R_{\rm H} I} U_{\rm H} \tag{4}$$

采用固定线圈法对磁感应强度进行测量,在铁 镓棒上绕制一定匝数的线圈。当铁镓棒外加磁场变 化时,线圈中的磁通量就会改变,由法拉第电磁感应 定律得

$$e = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -NS \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

对式(5)两边同时积分得

$$B = -\frac{1}{NS} \int e dt \tag{6}$$

N——铁镓棒上线圈匝数

S-----铁镓棒横截面积

e----铁镓棒上线圈感应电压

利用式(4)、(6)得到铁镓合金棒的磁场强度、 磁感应强度和损耗角(磁感应强度与磁场强度的相 位差),利用上述3个物理量对铁镓棒的电磁损耗 和磁能存储能力进行分析。

单位体积电磁损耗[12]

$$W = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} H dB = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} H_{m} \cos(\omega t) B_{m} \sin(\omega t - \delta) \omega dt =$$
$$\frac{1}{2} \omega H_{m} B_{m} \sin\delta = \pi f H_{m} B_{m} \sin\delta \qquad (7)$$

单位质量电磁损耗

$$P = \frac{1}{\rho} W = \frac{1}{\rho} \pi f H_{\rm m} B_{\rm m} \sin \delta \tag{8}$$

单位体积介质储能^[13]

$$W' = \frac{1}{2} H_{\rm m} B_{\rm m} \cos\delta \tag{9}$$

单位质量介质储能

$$P' = \frac{1}{\rho} f W' = \frac{1}{2\rho} f H_{\rm m} B_{\rm m} \cos\delta \qquad (10)$$

式中 f---磁场频率 p---材料密度

电磁损耗的分离模型多种多样,目前应用最为 广泛的是意大利学者 Berttotti 总结提出的损耗分离 法^[14]。在正弦交变磁场下,单位质量的电磁损耗由 磁滞损耗 P_h、涡流损耗 P_e和剩余损耗 P_e组成

$$P = P_{\rm h} + P_{\rm e} + P_{\rm c} = \frac{1}{\rho} (K_{\rm h} B_{\rm m}^2 f + K_{\rm e} B_{\rm m}^2 f^2 + K_{\rm c} B_{\rm m}^{3/2} f^{3/2})$$
(11)

式中 K,——磁滞损耗系数

K。——涡流损耗系数

K.——剩余损耗系数

对于低频磁场而言,电磁损耗与频率呈指数 关系

$$P = e^{a + bf} \tag{12}$$

利用式(11)对电磁损耗进行分离,需对式(12) 进行泰勒展开,忽略高次项得

$$P = e^{a + bf} = e^{a} + be^{a}f + \frac{1}{2}b^{2}e^{a}f^{2} + o(f^{2}) \quad (13)$$

式(13)中,a、b是对不同频率下的电磁损耗数 值进行曲线拟合而得, $\frac{1}{2}b^2e^af^2$ 对应分离后的涡流损 耗, be^af 对应分离后的磁滞损耗, e^a 对应分离后的剩 余损耗。

涡流损耗可以通过涡流截止频率来反映^[15],涡 流截止频率越高,涡流损耗越小。

$$f_{\rm c} = \frac{2\rho'}{\pi d^2 u_{\rm r} u_0} \tag{1}$$

4)

式中 f.——涡流截止频率

ho'——材料电阻率

u_r——材料相对磁导率

d----材料切片厚度

2 实验平台

本实验的测试系统由 4 部分构成:施加磁场部 分、信号检测部分、信号采集部分和数据处理部分。 施加磁场部分包括:信号发生器、功率放大器和励磁 线圈,其中的励磁线圈主要由导磁回路、线圈、不锈 钢螺栓和不锈钢帽构成。信号测量部分包括:磁通 计和霍尔芯片。霍尔芯片用来采集铁镓棒上的磁场 强度,磁通计通过绕在铁镓棒上的线圈来采集铁镓 棒上的磁感应强度。信号采集部分为数据采集卡, 数据采集卡相当于示波器,用来采集霍尔芯片上的 磁场强度波形和磁通计上的磁感应强度波形。数据 处理部分为 PC 机上的软件,数据采集卡将采集的 数据传送到 PC 机上的软件,数据采集卡将采集的 数据传送到 PC 机上,软件可以绘制 H-t 图、B-t图和 B-H图。测量系统结构如图 1 所示。

施加磁场部分的工作原理:由信号发生器产生 特定频率的正弦波,通过功率放大器将其放大,功率 放大器的输出端接到励磁线圈上,在励磁线圈的周 围产生了正弦交变磁场,交变的磁场通过硅钢片将 磁场导入到铁镓棒中。励磁线圈的结构如图 2 所 示,由上(下)不锈钢帽、上(下)导磁体(硅钢片叠加



Fig. 1 Structure diagram of testing system

而成)、线圈(采用 AWG19 型号漆包线绕制而成,线径0.912 mm。每个线圈有525 匝,内径30 mm,外径100 mm)和铁镓材料放置区构成。导磁回路部分由40 片厚度0.5 mm 的硅钢片叠加而成,是励磁线圈磁路的主要部分。为了使励磁线圈产生的励磁磁场尽可能多地分布在导磁回路上,减少漏磁,采用螺栓和铝板将上下导磁回路模块连成一个整体的回路。 左右2个线圈套在铝板上,产生方向相同磁场,磁力线在铁镓合金棒处汇集。通过预先的切割使得叠加后的上、下回路模块中部各有一个直径15 mm 的孔洞,以便上不锈钢帽和下不锈钢帽伸入导磁回路模块直径15 mm 的孔中与铁镓合金棒粘接,形成一个完整的磁路。



图 2 励磁线圈的结构图

Fig. 2 Structure diagram of excitation coil
1. 上导磁体 2. 上不锈钢帽 3. 导磁回路 4. 线圈 5. 下导磁体 6. 下不锈钢帽 7. 铁镓棒放置区

信号检测部分的工作原理:对于铁镓棒上磁场 强度的测量,采用 A1321LUA 型霍尔芯片,该芯片可 以测量 10⁻⁷~10 T 范围内的恒定磁场,也可测量频 率为1 Hz~100 MHz、磁感应强度达5 T 的交变磁 场,以及脉冲持续时间为几十微秒的脉冲磁场,尤其 在小间隙空间内磁场的测量上具有显著的优越 性^[16-17]。利用式(4)计算出磁场强度。对于铁镓棒 上磁感应强度的测量,采用固定线圈法,利用式(6)计 算出磁感应强度。固定线圈法既可用于测量恒定磁 场,也可用于测量交变磁场。

信号采集部分由数据采集卡完成,该采集卡包括上、中、下3个模块,上层为液晶显示控制模块,中 层为单片机模块,下层包括 USB 采集卡和运放电路 模块,同时 USB 采集卡模块外接 PC 机。数据采集 卡的结构如图3所示。液晶显示控制模块主要功能 是驱动屏幕,显示波形数据,判断触摸点位,传输触 摸信号至液晶显示控制器和单片机。单片机模块主 要对数据采集卡进行控制。运放电路模块和 USB 采集卡功能分别是放大信号和接收信号并传输至单 片机和 PC 机。



Fig. 3 Structure diagram of data acquisition card

数据处理部分是软件 Sysdbg 32(采用 Visual Studio 2008 与 Matlab 混编而成),实时将采集数据的波形显示在计算机上,并在结束采集后将数据转化为 txt 文件或 excel 文件保存。通过调用 Matlab 程序可以绘制相应的磁滞回线。图 4 为测试系统的实物图。



 Fig. 4
 Real picture of testing system

 1.数据采集卡
 2.磁通计
 3.信号发生器
 4.功率放大器

 5. 压片机
 6. 励磁线圈
 7. 计算机
 8. 霍尔芯片

3 实验结果及分析

首先分析了铁镓合金棒的动态磁滞回线,从 磁滞回线得到了矫顽力和剩磁 2 个重要的磁特性 参数,然后分析了 2 种不同条件下磁滞曲线的变 化情况:相同磁感应强度下不同磁场频率和相同 磁场频率下不同磁感应强度。最后,通过式(8)、 (10)计算出相应的电磁损耗和介质储能,根据电 磁损耗机理,将其分为磁滞损耗、涡流损耗和剩余 损耗,并利用式(11)、(13)对电磁损耗进行分离, 分析了不同磁场频率下各损耗占总电磁损耗的比 例,并对铁镓换能器工作在高频时,提出了减小涡 流损耗的措施。

3.1 不同磁场频率下的磁滞特性

图 5 为在磁感应强度为 1 725 mT, 交变励磁磁 场频率分别为 30、40、50、60、70 Hz 情况下测得的 一组动态磁滞回线。由图 5 可见, 动态磁滞曲线 为不规则椭圆形, 当励磁磁场频率增加, 磁滞曲线 横向变宽, 面积不断增大, 相应的电磁损耗也越 大。在相同的磁感应强度下,磁场频率越高,所需 的磁场强度越大,说明磁场频率的增加促进了铁 镓合金中磁畴转动和磁畴壁移动,使得磁场能量 损耗增加,故所需磁场强度也要相应的增大。铁 镓合金棒在不同磁场频率下曲线 AB 基本重合,说 明在频率变化不大的情况下,磁感应强度的大小 主要受磁场强度的影响。曲线 BC 则不再重合,而 是磁场频率高的曲线越不容易下降,说明磁场频 率越高,铁镓合金棒中磁畴的平均动能越高,磁介 质中的储能也越大,当外界磁场下降时,相应的磁 感应强度下降也越慢。



Fig. 5 Dynamic hysteresis curved under different frequencies

图 6 为磁感应强度为 1 725 mT, 交变励磁磁场 频率分别为 30、35、40、45、50、55、60、65、70 Hz 情况 下测得的矫顽力分别为 1.753、1.978、2.202、 2.230、2.257、2.397、2.537、2.615、2.693 kA/m, 剩 磁分别为 568.7、620.3、671.8、686.2、700.6、718.4、 736.2、753.5、770.7 mT。由图 6 可见,随着磁场频 率增加,铁镓合金棒的矫顽力和剩磁都增大。矫顽 力随磁场频率的增长率呈下降趋势,在 30~40 Hz 频率段上增长率最大,在 40~70 Hz 频率段上近似 线性增加。矫顽力来源于不可逆磁化过程,说明磁 场频率越高,不可逆磁化程度越大,相应的矫顽力越 大。剩磁随磁场频率的增加,增长率呈波动性下降 趋势,在 30~40 Hz 频率段上增长率最大,40~50 Hz 频率段上增长率最小,50~70 Hz 频率段上增长率 不断减小,说明剩磁对低频磁场变化敏感。



Fig. 6 Remanence and coercivity under different frequencies

3.2 不同磁感应强度下的磁滞特性

图 7 为励磁磁场频率为 70 Hz,磁感应强度分别 为785、1000、1160、1500、1725mT测得的一组动 态磁滞回线。由图7可见,动态磁滞曲线为一系列 同心椭圆,当磁感应强度增加,磁滞曲线拉伸变宽变 高,面积不断增大,相应的电磁损耗也越大。相同励 磁频率、不同磁感应强度下的动态回线顶点连成的 线称为动态磁化曲线^[18-19]。由动态磁化曲线可以 看出,随着磁场强度增加,磁感应强度也相应增加, 但增长速率越来越慢,当磁场强度达到7kA/m,磁 感应强度对应1.5T时,动态磁化曲线达到饱和点, 再增加磁场强度,磁感应强度变化不大。与静态铁 镓合金曲线相比,饱和点处的磁场强度和磁感应强 度都相应增加,说明在动态磁场的作用下,磁畴的转 动和磁畴壁的移动程度加剧,铁镓介质中消耗的能 量增加,要想达到饱和点,需要外界提供更大的磁场 强度。



magnetic induction intensities

图 8 为励磁磁场频率为 70 Hz,磁感应强度分别 为785、890、1000、1080、1160、1330、1500、1610、 1725 mT测得的矫顽力分别为1.022、1.268、1.522、 2.158、2.800、2.890、3.020、3.123、3.230 kA/m, 剩 磁分别为 331.5、376.1、420.7、455.8、491.2、515.4、 539.5、555.2、570.9 mT。由图 8 可见,随着磁感应 强度增加,铁镓合金棒的矫顽力和剩磁都增大。矫 顽力随磁感应强度的增加,增长率先快速增加之后 趋于平缓,在1000~1160 mT 矫顽力增幅最大,在 1160~1725 mT 矫顽力增幅趋于平缓。说明在较 高的磁感应强度下,矫顽力受其影响较小。剩磁随 磁感应强度的增加,增长率呈下降趋势,在785~ 1160 mT 增长率最大 目 呈线 性 增 加, 在 1 160~ 1725 mT 增长率减小仍呈线性增加,说明剩磁在磁 感应强度较低的情况下,受其影响较大;在磁感应强 度较高的情况下,受其影响较小。

3.3 不同频率下的功耗特性

图 9 为式(8)、(10) 在磁感应强度为 1 725 mT, 不



同磁场频率时计算的电磁损耗和介质储能。由图9 可见,随着磁场频率的增加,铁镓合金棒的电磁损耗 和介质储能均增加,但电磁损耗增加的幅度要远大 于介质储能增加的幅度。说明在动态强磁场磁化的 过程中,磁场提供的能量大部分消耗在不可逆磁畴 壁之间转动和移动过程中的摩擦和碰撞,而只有很 少部分能量被磁畴自身吸收转化为磁畴运动的动能 上,提高了磁畴运动速度,促进了磁畴在外加磁场的 重新排列。由式(8)可知,在一定频率范围内,损耗 角、最大磁场强度以及最大磁感应强度变化不大,因 此电磁损耗可以近似看作磁场频率的指数函数关 系,磁场频率的变化对电磁损耗的大小起着关键的 作用。



media under different frequencies

图 10 为利用图 9 实验结果得到的电磁损耗和 介质储能所占比例与磁场频率的关系。由图 10 可 以看出,在磁感应强度一定时,随着磁场频率的增 加,电磁损耗所占的比例不断增加,介质储能所占的 比例不断下降。说明随着磁场频率的增加,不可逆 磁畴运动加剧,相互之间的摩擦和碰撞频率加快,使 得电磁损耗所占的比例增加;不可逆磁畴壁之间由 于碰撞频率加快,对应的磁畴平均动能减少,相应的 介质储能所占比例下降。





图 11 为利用式(13)与曲线拟合法,对磁感应 强度为1725 mT的电磁损耗进行分离,得到了不同 频率下的磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。由图 11 可见,随着磁场频率的增加,涡流损耗迅速增加,剩 余损耗快速增加,磁滞损耗线性增加。动态磁化过 程的电磁损耗为单位质量的被测样品经过一周转动 磁化后的能量损耗,包含磁滞损耗、涡流损耗和剩余 损耗。由式(11)可知,在动态交变磁场条件下,磁 滞损耗主要与磁感应强度有关,涡流损耗主要与磁 场频率有关,剩余损耗与磁场频率和磁感应强度都 有关。磁滞损耗原于磁性材料中的不可逆磁化过 程,随着磁场频率的增加,不可逆磁畴的转动和磁畴 壁的移动程度增加,损耗的能量增大,相应的磁滞损 耗也增大。在动态磁场作用下,磁性导体内由电磁 感应产生涡流,使磁体发热,即涡流损耗^[20-21]。涡 流损耗实质是由磁性材料引起的欧姆损耗,与磁感 应强度的变化率有关,而磁场频率越高,磁感应强度 变化率越大,产生的感应电压和感应电流也越大,对 应的涡流损耗也越大。剩余损耗主要由磁畴壁共振 和自然共振引起,与磁材料特性和工作频率有关,磁 场频率越高,对应的剩余损耗也越大。





由式(12): *P* = e^{*a*+*b*}对电磁损耗进行曲线拟合后,第一次拟合*a* = 2.984, *b* = 0.035, 拟合误差为

0.062%,运用式(13): $P = e^{a+bf} = e^{a} + be^{a}f + \frac{1}{2}b^{2}e^{a}f^{2} + o(f^{2}),泰勒展开成相应的常数项、一次项系数、二次项系数,即分别对应分离后的剩余损耗、磁滞损耗、涡流损耗,将高次项部分进行第2次拟合<math>a = 1.77$,b = 0.043,拟合误差为0.051%,同理进行第3次拟合a = 0.39,b = 0.056,拟合误差为0.046%,此时剩余高次项部分占总损耗的2.71%,即电磁损耗分离误差为2.71%。

图 12 分析了在不同磁场频率下,磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗占电磁损耗的比例情况。由 图 12 可见,随着磁场频率的增加,涡流损耗所占的 比例迅速上升,磁滞损耗所占的比例不断下降,剩余 损耗所占的比例略有上升。说明对于铁镓合金棒而 言,在低频磁场时,磁滞损耗是电磁损耗的主要部 分;在高频磁场时,涡流损耗是电磁损耗的主要部 分;在高频磁场时,涡流损耗是电磁损耗的主要部 分,对电磁损耗起决定作用。对于剩余损耗而言,在 30~50 Hz 其所占比例基本不变,但在 50~70 Hz 其 所占比例又略有上升,原因在于磁场频率较高时,达 到了铁镓合金磁畴壁共振频率,加剧了磁畴壁之间 的摩擦和碰撞,使得剩余损耗所占比例略有提高。



图 12 不同频率下各损耗所占比例 Fig. 12 Proportion of loss under different frequencies

由式(14)可知,对于铁镓换能器而言,在高频 磁场工作条件下,为了减少铁镓棒上的涡流损耗,可 以对铁镓棒进行切片处理,而且铁镓棒的切片厚度 越小,涡流截止频率越大,涡流损耗越小。将铁镓棒 沿径向切成薄片,再将薄片进行粘接,通过增大铁镓 棒的电阻,来减小铁镓棒上的涡流,进而减小了高频 磁场下的涡流损耗,提高铁镓换能器的工作效率。

4 结论

(1)铁镓合金棒在相同磁感应强度下,随着磁场频率增加,动态磁滞回线面积增大,对应电磁损耗增大,矫顽力和剩磁增加。在相同磁场频率下,随着磁感应强度增加,动态磁滞回线为一系列同心椭圆,磁滞回线变宽变高,面积不断增大,电磁损耗增大,

矫顽力和剩磁增加。

(2) 在磁感应强度为 1 725 mT 时, 磁场频率由
30 Hz 增至 70 Hz, 电磁损耗和介质储能分别增加了
3. 24 倍和 1. 96 倍, 分离后的磁滞、涡流和剩余损耗
分别增加了 1. 33 倍、5. 26 倍和 7. 35 倍。磁滞损耗

所占比例由 56.87% 下降至 31.31%,涡流损耗所占 比例由 32.98% 上升至 48.69%,剩余损耗所占比例 略有上升。对于高频工作条件下的铁镓换能器,通 过对铁镓棒切片处理,减小了涡流损耗,提高了铁镓 换能器的工作效率。

- 参考文献
- 翁玲,赵青,孙英,等.考虑附加涡流损失的 Galfenol 合金动态滞后建模与实验[J/OL].农业机械学报,2016,47(4):399-405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160452&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.052.

WENG L, ZHAO Q, SUN Y, et al. Dynamic hysteresis model and experiment of Galfenol alloy considering excess eddy current losses [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):399 - 405. (in Chinese)

- 2 HUANG W, LI Y, WENG L, et al. Multifield coupling model with dynamic losses for giant magnetostrictive transducer[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1-5.
- 3 REDDY S M, PARK J J, NA S, et al. Electrochemical synthesis of magnetostrictive Fe Ga/Cu multilayered nanowire arrays with tailored magnetic response[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(24):4677 4683.
- 4 ATULASIMHA J, FLATAU A B. A review of magnetostrictive iron-gallium alloys [J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(4):4462-4473.
- 5 张艳丽,何厚键,谢德馨,等. 基于二维磁特性测量的电工钢片矢量磁滞模型[J]. 中国电机工程学报,2010,30(3):130-135. ZHANG Yanli, HE Houjian, XIE Dexing, et al. Vector magnetic hysteresis model of electrical steel sheets based on twodimensional magnetic property measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3):130-135. (in Chinese)
- 6 刘小军,石玉,赵宝林.一种高频动态磁滞回线的 PSpice 电路模型研究[J].磁性材料及器件,2011,42(5):60-63. LIU Xiaojun, SHI Yu, ZHAO Baolin. Study for a PSpice-based circuit model of high frequency dynamic hysteresis loop[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2011,42(5):60-63. (in Chinese)
- 7 吴德会,李雪松,黄一民,等.利用局部磁滞回线特性的无损检测新方法[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2207-2214.
 WU Dehui, LI Xuesong,HUANG Yimin, et al. New nondestructive test method with empirical research using local hysteretic loop characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10):2207-2214. (in Chinese)
- 8 张冬冬,赵海森,王义龙,等.用于电机损耗精细化分析的分段变系数铁耗计算模型[J].电工技术学报,2016,31(15): 16-24.

ZHANG Dongdong, ZHAO Haisen, WANG Yilong, et al. A piecewise variable coefficient model for precise analysis on iron losses of electrical machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15):16-24. (in Chinese)

- 9 赵章荣,隋晓梅,邬义杰,等. 超磁致伸缩执行器全耦合非线性动态有限元模型[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3):203-208. ZHAO Zhangrong, SUI Xiaomei, WU Yijie, et al. Coupling nonlinear dynamic finite element model of giant magnetostrictive actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):203-208. (in Chinese)
- 10 曹林,何金良,张波. 直流偏磁状态下电力变压器铁心动态磁滞损耗模型及验证[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(24):141-146.

CAO Lin, HE Jinliang, ZHANG Bo. Dynamic hysteresis loss model of power transformer under DC current biasing and its verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24):141-146. (in Chinese)

11 曹永娟,陶少卿,余莉. 轴向磁场无铁芯永磁电机绕组涡流损耗分析与计算[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2016, 46(6):1214-1220.

CAO Yongjuan, TAO Shaoqing, YU Li. Analysis and calculation of winding eddy current loss in stator-coreless axial-flux permanent magnet machine [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2016, 46(6):1214 - 1220. (in Chinese)

- 12 韩光泽,朱小华.介质中的电磁能量密度及其损耗[J].郑州大学学报:理学版,2012,44(3):81-86. HAN Guangze, ZHU Xiaohua. Electromagnetic energy density and loss in medium[J]. Journal of Zhengzhou University:Natural Science Edition, 2012, 44(3):81-86. (in Chinese)
- 13 GYAWALI N, OHSAWA Y, YAMAMOTO O. Power management of double-fed induction generator-based wind power system with integrated smart energy storage having superconducting magnetic energy storage/fuel-cell/electrolyser[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(6):407-421.
- 14 NICOL H E, ROEHRDANZ H. Losses in three-phase induction machines fed by PWM converter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(3):228-233.
- 15 阙燚彬,李涛涛,谢溪凌,等. 叠堆结构对超磁致伸缩材料涡流损耗影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(9): 100-105.

QUE Yibin, LI Taotao, XIE Xiling, et al. Study of the influence of stack structure on the giant magnetostrictive material eddy

current losses[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(9):100-105. (in Chinese)

16 马锃宏,李南,王汉斌,等. 温室株间电驱锄草机控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):89-93.http: //www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150113&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041 /j. issn.1000-1298.2015.01.013.

MA Zenghong, LI Nan, WANG Hanbin, et al. Control system for electric drive intra-row weeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):89-93. (in Chinese)

- 17 SIBILSKA-MRROZIEWICZ A, CZUBAJ S, ŁADYZYNSKA-KOZDRAS E, et al. The use of hall effect sensors in magnetic levitation systems [J]. Applied Mechanics & Materials, 2016, 817:271 278.
- 18 舒亮,李传,吴桂初,等. Fe-Ga 合金磁致伸缩力传感器磁化模型与特性分析[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):344-349. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150548&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.048.

SHU Liang, LI Chuan, WU Guichu, et al. Magnetization model of Fe – Ga magnetostrictive force sensor and its characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):344 – 349. (in Chinese)

- 19 USAK E, USAKOVA M. Analysis of microstructural changes in soft magnetic materials based on direct evaluation of magnetization process dynamics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(4):1-4.
- 20 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J].电工技术学报,2015, 30(6):1-9.

CHEN Ping, TANG Renyuan, TONG Wenming, et al. Permanent magnet eddy current loss and its influence of high power density permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6):1-9. (in Chinese)

21 CHEN L, WANG J, NAIR S S. An analytical method for predicting 3-D eddy current loss in permanent magnet machines based on generalized image theory [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 52(6):1-11.

(上接第 394 页)

- 10 SHIBENDU S R, AJAY K S, DILIP K P. Estimation of optimal feet forces and joint torques for on-line control of six-legged robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27: 910-917.
- 11 SHIBENDU S R, DILIP K P. Dynamic modeling, stability and energy consumption analysis of a realistic six-legged walking robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29:400 - 416.
- 12 LOC V, ROH S, KOO I M, et al. Sensing and gait planning of quadruped walking and climbing robot for traversing in complex environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58:666-675.
- 13 荣誉,金振林,曲梦可. 三自由度并联机械腿静力学分析与优化[J].农业工程学报,2012,28(20):41-49.
 RONG Yu, JIN Zhenlin, QU Mengke. Statics analysis and optimal design of 3-DOF parallel mechanical leg[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 41-49. (in Chinese)
- 14 荣誉,金振林,崔冰艳. 六足农业机器人并联腿构型分析与结构参数设计[J].农业工程学报,2012,28(15):9-14. RONG Yu, JIN Zhenlin, CUI Bingyan. Configuration analysis and structure parameter design of six-leg agricultural robot with parallel-leg mechanisms[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):9-14. (in Chinese)
- 15 WANG Zhiying, DING Xilun, ROVETTA A, et al. Mobility analysis of the typical gait of a radial symmetrical six-legged robot [J]. Mechatronics, 2011, 21:1133 - 1146.
- 16 邓宗全,刘逸群,高海波,等.液压驱动六足机器人步行腿节段长度比例研究[J].机器人,2014,36(5):544-551. DENG Zongquan, LIU Yiqun, GAO Haibo, et al. On the segment length ratio of the walking leg of a hydraulically actuated hexapod robot[J]. Robot, 2014, 36(5):544-551. (in Chinese)
- 17 刘逸群,邓宗全,刘振,等.液压驱动六足机器人一种低冲击运动规划方法[J].机械工程学报,2015,51(3):10-17. LIU Yiqun, DENG Zongquan, LIU Zhen, et al. Low-impact motion planning method of hydraulically actuated hexapod robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3):10-17. (in Chinese)
- 18 章永年,王美思,吴阳,等.五连杆足式机器人腿部机构多目标优化算法[J/OL].农业机械学报,2016,47(10):398-404.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20161052&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.052.

ZHANG Yongnian, WANG Meisi, WU Yang, et al. Multi-objective optimization algorithm of robot leg based on planar five-bar mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 398 - 404. (in Chinese)
19 王斌锐,王涛,郭振武,等. 气动肌肉四足机器人建模与滑模控制[J]. 机器人, 2017, 39(5):620 - 626.

- WANG Binrui, WANG Tao, GUO Zhenwu, et al. Modeling and sliding mode control of quadruped robot driven by pneumatic muscles[J]. Robot, 2017, 39(5):620-626. (in Chinese)
- 20 GENG D X, ZHAO J, ZHANG L. Study on bidirectional controllable flexible bending joints based on elongation artificial muscles [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44 - 47: 2883 - 2887.