

DOI: 10.7652/xjtuxb201902012

电工钢片矢量磁特性测量系统的设计与优化

师泯夏, 侯志强, 张芊, 邱爱慈, 李军浩
(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高电工钢片矢量磁特性测量系统的磁化均匀度与励磁效率,提出在磁极表面添加导磁物质的系统优化设计方法。首先基于有限元分析,通过改变气隙间隔与屏蔽层位置,减弱正交磁极耦合与杂散干扰,设计一种磁化均匀度高的几何励磁结构;然后利用序列二次规划,确定导磁物质最优磁导率,减小磁路间磁阻,从而降低励磁功率需求;最后搭建矢量磁特性测量系统并对其磁化性能进行评估。仿真与实验结果表明,对矢量磁特性测量系统进行优化后,不同激励下磁通密度的波形系数偏差较优化前减小了 57.1%,磁化均匀度明显提高;系统优化后,相同激励下磁通密度幅值较优化前增大了 58.6%,励磁功率需求下降。

关键词: 电工钢片;磁特性;有限元分析;测量系统

中图分类号: TM 936 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0088-08

A Design and Optimization Method for Measurement Systems of Vector Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets

SHI Minxia, HOU Zhiqiang, ZHANG Qian, QIU Aici, LI Junhao
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A magnetic material is added on the surface of a magnetic pole to improve the magnetization uniformity and exciting capability for measurement systems of vector magnetic properties of electrical steel sheets. An exciting structure with high magnetization uniformity is designed based on finite element analysis by changing the space of air gap and the position of shield and decreasing magnetic pole coupling and stray interference. Then the structure is optimized by a sequential quadratic programming method, and the optimal value of magnetic material permeability is calculated to reduce the magnetic resistance between magnetic circuits and the demand of exciting power. The measurement system of vector magnetic properties is finally established, and the magnetization performance of the system is evaluated. Simulation and experimental results show that the waveform error of magnetic flux density decreases by 57.1% after optimization, and the uniformity of magnetization increases. The amplitude of magnetic flux density under the same excitation increases by 58.6%, and the demand for the exciting power reduces.

Keywords: electric steel sheet; magnetic properties; finite element analysis; measurement system

电工钢片作为电力变压器、异步电机等电磁机 构的铁芯材料,其磁化过程与电力设备的温升损耗、

收稿日期: 2018-06-04。 作者简介: 师泯夏(1993—),女,博士生;李军浩(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800100)。

网络出版时间: 2018-12-06 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181206.1741.006.html>

振动噪声等工作性能密切相关,因此准确测量与模拟钢片的电磁特性,有利于电工装备励磁性能的深入研究和新型高效能电机的研发设计。电力设备铁芯中同时存在交变与旋转两种磁化方式,目前测量一维交变磁特性的爱泼斯坦法与单片测量法均被纳入了 IEC 60404-2,3 标准^[1-2],利用旋转磁场的矢量磁特性来描述电机铁芯的磁化问题,其完善性与准确性也被广泛认可,相应的测量方法已有提出^[3]。旋转磁场主要分布于变压器铁芯 T 型接口与电动机定子铁芯中,其磁通矢量轨迹在磁化周期内为椭圆或畸变椭圆^[4],且旋转损耗通常高于一维交变损耗^[5-6],所以测量电工钢片的二维矢量磁特性,建立考虑旋转磁化的矢量磁滞模型,可提高铁芯性能的模拟精度,深化电工钢片磁化过程的研究。

早期对矢量磁特性的研究方法可分为两种,一种方法是通过机械扭矩计来测量转矩或角速度,从而计算矢量磁滞^[7],但这种方法所需的扭矩磁强计,机械结构复杂,制作难度大。另一种方法是利用热电偶来测量旋转损耗引起的样片比热与温升,但由于温度传感器安装校准困难,且易受环境温度的影响,测量灵敏度较低,使得该方法目前应用受限^[8]。Enokizono 等提出的场量法(field-metric method)^[9-11],是通过磁通场强复合式传感器来测量矢量磁化特征参量,并利用坡印廷定律得到旋转损耗^[12-14]。该方法测量灵敏度高,通用性好,是目前广泛运用于矢量磁特性研究的测量方法。

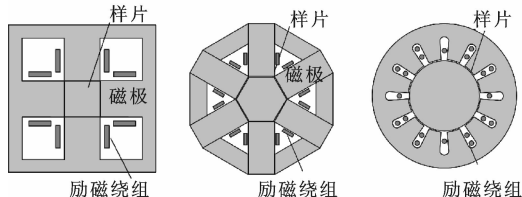
场量法采用的励磁装置主要可分为 3 种^[15]:具有两相电源的四凸极励磁装置^[13]、具有三相电源的六凸极励磁装置^[16-17]和电机定子铁心式励磁装置^[18-21]。然而,由于这 3 种励磁装置的磁化均匀度与励磁能力有限,导致测量过程中,磁通的波形控制与反馈调节难度增大,因此由这种励磁装置组成的矢量磁特性测量系统尚处于实验室研发阶段。

本文提出在磁极表面添加导磁物质,并基于有限元分析与二次序列规划,计算导磁物质磁导率最优解,以提高系统的测量准确度与励磁效率。首先以方形电工钢片磁化均匀度为目标,通过建立有限元模型,设计了矢量磁特性测量系统的几何励磁结构;然后为优化结构的励磁能力,利用序列二次规划,求取磁极表面导磁物质的磁导率最优解;最后设计搭建了磁化均匀、励磁功率需求低的矢量磁特性测量系统,实测并评估优化后系统的励磁性能,并与仿真结果进行对比。

1 矢量磁特性测量系统励磁方式

1.1 不同结构的励磁机理

在电工钢片中激励旋转磁场的励磁装置主要可分为 3 类:四凸极励磁装置、六凸极励磁装置和定子铁心式励磁装置。3 类励磁结构示意图如图 1 所示。



(a) 四凸极励磁 (b) 六凸极励磁 (c) 定子铁心式励磁

图 1 矢量磁特性测量系统励磁结构示意图

具有两相电源的四凸极励磁装置,其样片形状为圆形或方形。四凸极装置的励磁原理是利用方位正交的两组磁极,在样片中产生相位相交的正弦磁通,方形样片的磁化条件如下

$$\begin{cases} B_x = B_{\max} \cos\theta \cos\tau - \alpha B_{\max} \sin\theta \sin\tau \\ B_y = B_{\max} \sin\theta \cos\tau + \alpha B_{\max} \cos\theta \sin\tau \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau = \omega t$, ω 为磁化角频率; B_x 与 B_y 分别为样片内部磁通密度在 x 、 y 方向的分量; $B_{\max}$ 为矢量磁通密度椭圆轨迹的长轴长度; $B_{\min}$ 为矢量磁通密度椭圆轨迹的短轴长度; θ 为椭圆轨迹长轴与 x 方向的夹角; α 为椭圆轨迹长短轴长度之比, $\alpha = B_{\min}/B_{\max}$ 。

旋转磁场的磁通轨迹如图 2 所示。

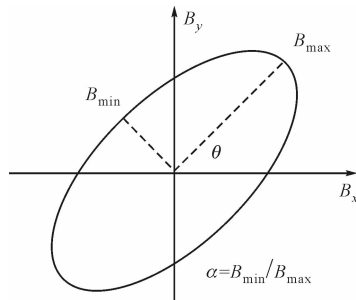


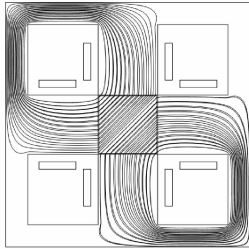
图 2 旋转磁场磁通轨迹

为实现更接近椭圆的波形控制,六凸极励磁装置采用多磁极三相励磁结构,在六边形或圆形样片中产生旋转磁场。定子铁心式励磁装置,采用感应电机式结构,两相励磁绕组正交分布,在圆形样片中激励旋转磁场。

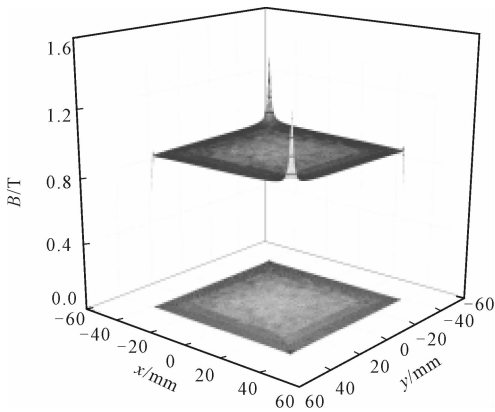
1.2 矢量磁特性测量系统励磁方式对比

本文基于有限元分析,研究不同励磁结构对样片磁化均匀度的影响。建立不同励磁结构和不同形状样片的有限元模型,在不计磁滞效应的前提下,添

加包含饱和效应的非线性 $B-H$ 曲线来模拟磁极、样片的磁性能。电路模块中添加外部电路电压源元件,模拟线圈激励,以实现电磁耦合,并采用极细化网格划分进行计算。当样片中磁场被激励至 1 T 时,不同励磁结构的磁力线分布与样片的磁通密度分布如图 3~图 7 所示。



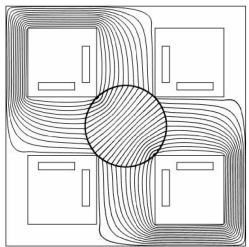
(a) 方形样片四凸极结构磁力线分布



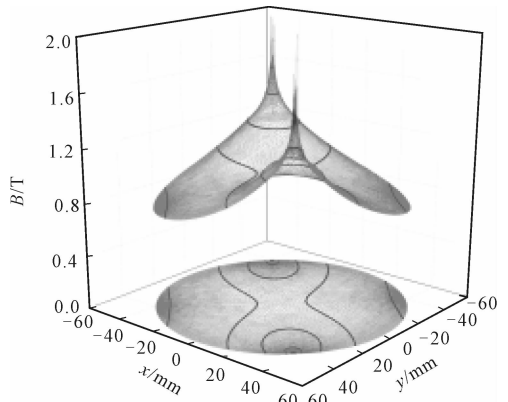
(b) 四凸极结构方形样片磁通密度分布

图 3 方形样片四凸极结构磁力线分布与磁通密度分布

从图 3b 与图 4b 可知,由于正交磁极的相互作用,四凸极励磁结构的样片顶角处磁通密度幅值突变,且圆形样片对应的磁极为凹面而非平面,磁极两侧存在尖点,曲率变化大,因此与方形样片相比,圆形样片边缘处磁通密度幅值突变程度更大。同理,对比图 5b 与图 6b 可知,六凸极励磁结构中,圆形样片边缘处磁通密度的增幅与六边形样片相比更大,因此对于四凸极和六凸极励磁结构来说,方形样片和六边形样片的磁化更加均匀。

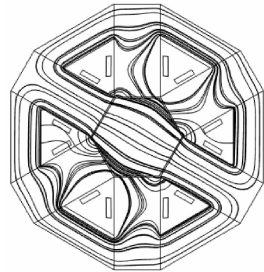


(a) 圆形样片四凸极结构磁力线分布

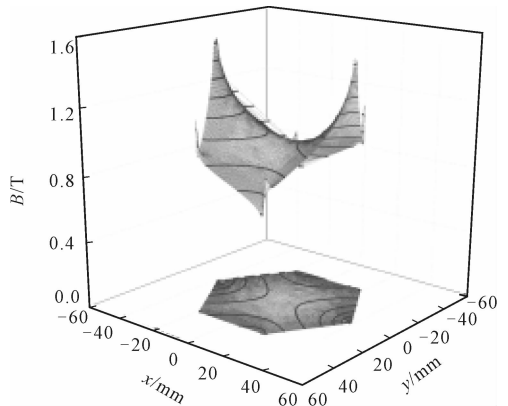


(b) 四凸极结构圆形样片磁通密度分布

图 4 圆形样片四凸极结构磁力线分布与磁通密度分布



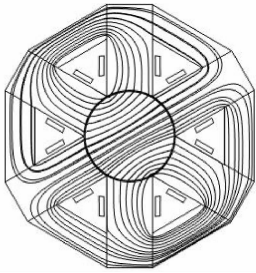
(a) 六边形样片六凸极结构磁力线分布



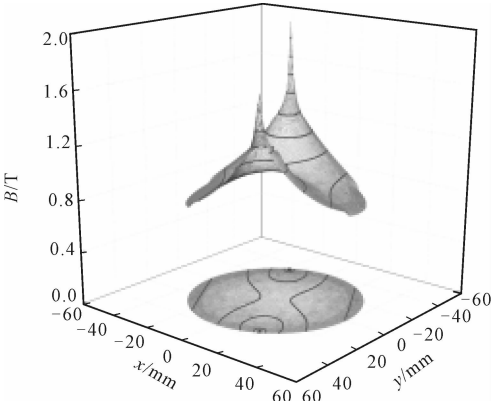
(b) 六凸极结构六边形样片磁通密度分布

图 5 六边形样片六凸极结构磁力线分布与磁通密度分布

对比图 3a、图 5a 与图 7a 可知,方形样片四凸极励磁结构的磁力线分布相对均匀,磁化均匀的区域较大。六凸极结构样片的磁通密度均匀程度介于四凸极励磁结构与定子铁心式励磁结构之间,这是由于多磁极间的磁路耦合影响了样片磁场分布的均匀度,但三相励磁的方式可补偿由磁路不对称导致的不同磁化角度下磁化状态的差异。从图 7a、7b 可以看出,定子铁心式励磁结构由于齿与槽导磁性能的差异导致磁力线分布不均,齿槽效应使得圆形样片边缘处的磁通密度幅值呈周期性变化且振荡剧烈。

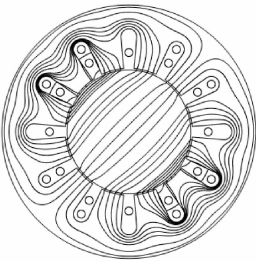


(a)圆形样片六凸极结构磁力线分布

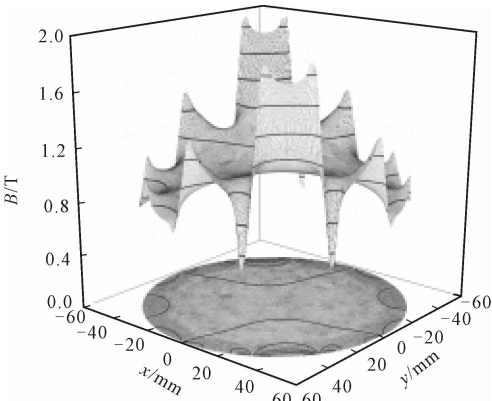


(b)六凸极结构圆形样片磁通密度分布

图 6 圆形样片六凸极结构磁力线分布与磁通密度分布



(a)定子铁心式结构磁力线分布



(b)定子铁心式结构样片磁通密度分布

图 7 定子铁心式结构磁力线分布与样片磁通密度分布

从上述分析可知,设计基于方形单片四凸极励磁结构的矢量磁特性测量系统,可使样片表面磁场分布

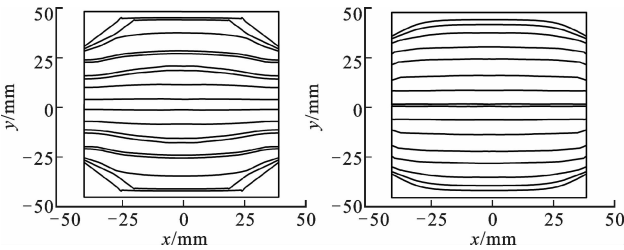
相对均匀,从而减小系统测量误差。

2 矢量磁特性测量系统设计

2.1 矢量磁特性测量系统励磁结构的几何设计

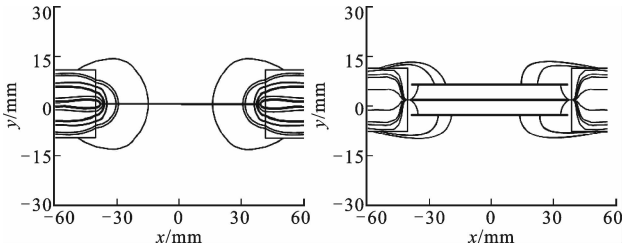
为提高样片的磁化均匀度,本文基于方形单片四凸极励磁装置,通过改变气隙间隔与屏蔽层位置,对矢量磁特性测量系统的励磁结构进行几何设计。方形样片为牌号 30ZH110 的电工钢片。设定有限元计算时励磁结构的几何参数初始值:长宽和宽度分别为 78 mm,厚度为 0.3 mm,样片与磁极间初始气隙间隔为 1 mm,屏蔽层与样片距离为 4 mm。

正交磁极的耦合作用与杂散磁场的分布会影响励磁结构的磁化均匀度。磁路的耦合程度与方形样片的磁化强度正相关。磁场强度增大,正交磁极相互吸引,磁通波形的反馈控制难度增大。有限元计算结果如图 8 所示。无气隙间隔时,磁极间磁阻较小,靠近正交磁极的磁力线曲率增大,方形样片磁通密度分布的均匀度受到影响。增加气隙间隔后,磁极间的耦合程度减弱,大部分磁力线经方形样片与水平磁极闭合,使得水平磁极间的漏磁减少、样片磁化均匀的区域增大。因此,磁极与方形样片间的气隙间隔可减弱磁路耦合。



(a)未加气隙间隔

(b)加气隙间隔



(c)未加屏蔽层

(d)加屏蔽层

图 8 几何设计前后励磁结构的磁力线分布

部分杂散磁通经空气与磁极闭合,导致方形样片边界的磁化弱于中部,增加屏蔽层可弱化外部磁场的干扰,由图 8c、8d 可知,杂散磁通经空气与屏蔽层闭合,内部屏蔽空间中,流经方形样片的磁力线分布均匀,外部杂散干扰被有效滤除,测量准确度大幅提高。

本文以方形样片磁化均匀度作为目标,设计励磁结构的几何尺寸,通过三维有限元计算及参数化扫描,确定气隙间隔距离 x_1 、屏蔽层与样片距离 x_2 ,这一组独立变量的最优尺寸。由于传感器中的 B 线圈通过测量感应电压,积分计算得到磁通密度,其磁通密度测量值为 B 线圈捆扎区域的磁通密度均值,因此为量化样片磁通密度分布的均匀度,可引入相对均方误差 Δ ,其表达式^[22]如下

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{B(x,y) - B(0,0)}{B(0,0)} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $B(x,y)$ 为 B 线圈捆扎区域各点的磁通密度值; $B(0,0)$ 为方形样片几何中点的磁通密度值; n 为网格划分点数。

当方形样片磁通密度分布完全均匀时,误差 Δ 等于 0,磁化均匀度与相对均方误差负相关。 x_1 阈值为 $[0, 2]$ mm, x_2 阈值为 $[1, 9]$ mm,参数扫描间隔为 1 mm。当方形样片中点磁化至 1 T 左右时,磁通密度的相对均方误差如图 9 所示。

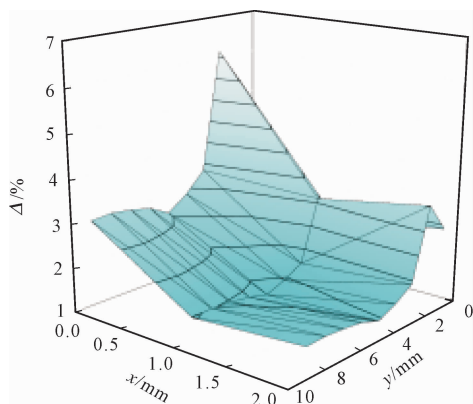


图9 磁通密度相对均方误差

由有限元计算结果可得,当气隙间隔为 1 mm、屏蔽层距样片 5 mm 时,方形样片磁通密度的相对均方误差最小,励磁结构的磁化均匀度最优。经计算,无屏蔽层无气隙间隔的情况下,磁通密度相对均方误差为 5.21%,励磁结构几何设计后,磁通密度相对均方误差为 1.29%,与设计前相比降低了 75.24%,因此设计后结构的磁化均匀度有了大幅度提高。而且由于 B 线圈测量信号为线圈匝绕面积的感应电压均值,因此方形样片表面磁场分布均匀,此时磁通密度测量值更能反映样片中点的磁场分布情况。

2.2 矢量磁特性测量系统励磁结构的优化

上述的几何设计增大了方形样片磁化均匀的区域,减小了磁通密度的测量误差,但与无屏蔽层无气

隙间隔的情况相比,磁路磁阻增大,方形样片达到相同磁化条件时的功率需求提高,该结构励磁能力降低,而在磁极与样片间加入导磁物质可改善这一问题。除相对均方误差外,本文引入磁动势幅值 F 作为结构优化的目标函数, $F = NI$,即方形样片磁化至相同磁通密度所需的磁动势幅值, N 为励磁绕组匝数, I 为励磁电流幅值。磁化均匀度与励磁能力的函数阈值不同,需以优化前的函数值为基准进行离差标准化处理

$$f^*(\mu_r) = \frac{f(\mu_r) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (3)$$

式中: $f^*(\mu_r)$ 为标准化后的函数值; $f(\mu_r)$ 为目标函数真值; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别为目标函数的上下限; μ_r 为导磁物质的相对磁导率。

离差标准化处理后,不同磁导率对应的目标函数值如图 10 所示。导磁物质磁导率与磁动势幅值负相关,与相对均方误差正相关。磁导率增大,磁路磁阻减小,该结构励磁能力增强。但此时磁路耦合程度加强,正交磁极相互吸引,磁场分布的均匀度下降,使得 B 线圈测量的磁通密度均值与方形样片中点磁通密度真值之间的误差增大。因此需要在保证磁场分布均匀度的前提下,提高励磁能力,所以需要求解磁导率最优解。

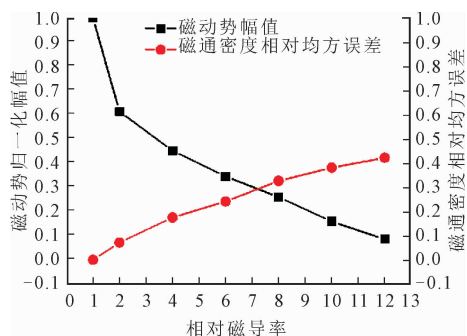


图10 不同磁导率对应的目标函数值

为优化目标函数,需求解函数的综合最小值,将目标函数曲线进行多项式拟合,利用序列二次规划法(SQP),将优化问题转化为多目标规划问题

$$\min \gamma \quad \left. \begin{aligned} F(x) - w\gamma &\leq g; \quad b_l \leq x \leq b_u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

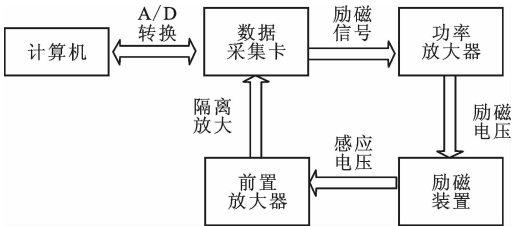
式中: γ 为松弛变量; $F(x)$ 为目标函数; w 为多目标规划权重; g 为欲达目标; b_u 、 b_l 为自变量上下限。

二次规划在每个迭代点构建非线性约束 QP 子问题,子问题的最优解为下一步迭代搜索的主方向,利用价值罚函数进行线搜索来规定迭代步长。通过目标规划求解可知,当目标函数取最小值时,自变量

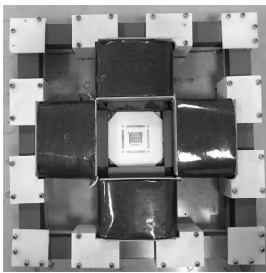
相对磁导率 $\mu_r=7.261\ 5$, 标准化后磁动势幅值、相对均方误差值均为 $0.292\ 1$, 该最优解对应图 10 中目标函数的交点。添加导磁物质后, 相对均方误差值增大 29.21% , 磁通密度测量精准度略微降低, 但此时方形样片磁化至相同磁通密度所需的磁动势幅值与优化前相比降低了 70.79% , 该结构励磁效率提高, 电源功率需求大幅下降。

2.3 矢量磁特性测量系统的搭建

对励磁结构进行几何设计与优化后, 本文搭建了矢量磁特性测量系统, 该系统由 5 部分组成: 采样率 $1.25\ \text{MS/s}$ 的数据采集卡、最大功率 $150\ \text{W}$ 的功率放大器、方形样片四凸极励磁装置、增益 $60\ \text{dB}$ 的前置放大器、磁通场强复合式传感器。Analogy Input/Output 数据采集卡可产生励磁信号, 功率放大器将该信号放大后作为激励电压加至励磁装置的激励绕组, 传感器产生的感应电压经前置放大器滤除干扰信号后, 传输至 Analogy Input/Output 数据采集卡进行波形控制与反馈调节, 矢量磁特性测量系统见图 11。励磁绕组采用 4 层螺旋式分布, 以减弱励磁导体间的趋肤效应; 传感器采用双绞线形式, 以避免空间杂散磁场干扰。



(a) 矢量磁特性测量系统硬件平台结构



(b) 矢量磁特性测量系统实物 (c) 励磁装置实物

图 11 矢量磁特性测量系统

3 矢量磁特性测量系统性能评估

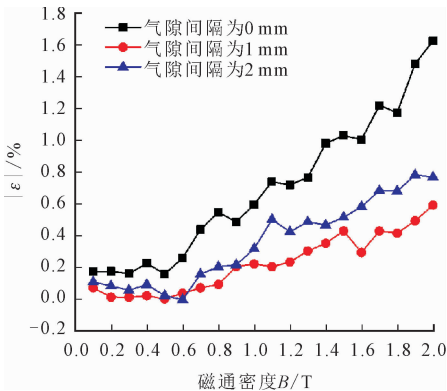
3.1 矢量磁特性测量系统几何设计的性能评估

为对比几何设计对方形样片磁化均匀度的影响, 本文引入磁通密度的波形系数

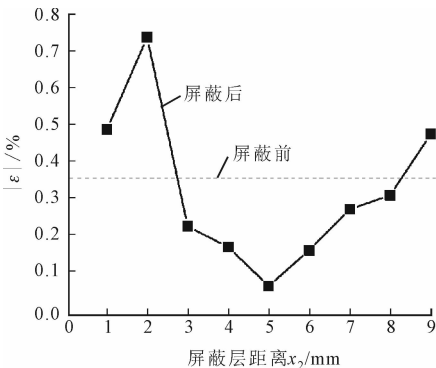
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B(t)^2 dt} / \left(\frac{1}{T} \int_0^T |B(t)| dt \right) \quad (5)$$

式中: T 为磁化周期。

鉴于传感器的测量面积有限, 磁通密度测量值为有效区域的信号均值。方形样片磁化完全均匀的情况下, 磁通密度波形为标准正弦, 则波形系数 $\sigma_s=1.110\ 73$, 取磁通密度测量值的波形系数偏差 $|\epsilon|=(\sigma-\sigma_s)/\sigma_s$ 作为磁化均匀度的评判标准。在不同气隙间隔与屏蔽层位置的情况下, 磁通密度波形系数偏差的测量结果如图 12 所示。



(a) 不同气隙间隔



(b) 屏蔽前后情况

图 12 磁通密度波形系数偏差

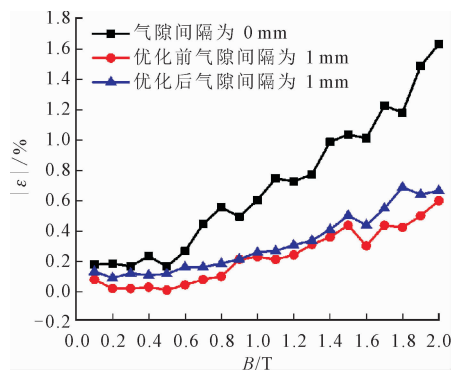
由图 12a 可知, 正交磁极的耦合程度、媒质磁化的非线性均与磁化强度相关, 因此波形系数偏差与磁通密度幅值正相关。气隙间隔可增大磁路磁阻, 减弱正交磁极耦合, 因此达到相同磁化条件时, 有气隙间隔的励磁结构磁化更加均匀。但间隔过大则会造成水平磁路磁阻过大、励磁能力减弱, 且水平磁极间漏磁增多, 方形样片磁化均匀的区域减小, 因此气隙间隔为 $1\ \text{mm}$ 时, 磁通密度波形系数偏差最小。

由图 12b 可知, 无屏蔽层时, 磁通密度波形系数偏差的测量值为 0.355% , 与有屏蔽层时的测量值对比可知, 增加屏蔽层可避免外部杂散磁场的干扰,

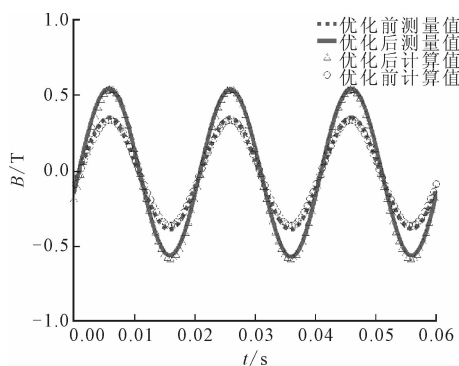
提高传感器测量精准度。若屏蔽层距离过小,水平磁极间部分均匀分布的磁力线会被屏蔽层吸引,使得方形样片磁化均匀度降低,励磁功率需求提高;若屏蔽层距离过大,会使空间中的部分杂散磁通经样片中部闭合,此时外部干扰未被有效滤除。因此,屏蔽层与方形样片距离 5 mm 时对应的波形系数偏差最小。结合有限元分析的结果可知,波形系数偏差和相对均方误差相对应,测量结果与几何设计预期相吻合。

3.2 矢量磁特性测量系统优化前后的性能对比

矢量磁特性测量系统性能评判准则为磁化均匀度与励磁能力,引入相同激励下的磁通密度幅值作为励磁能力的评估标准。配制相对磁导率为 7.3 左右的导磁胶加至磁极表面,不同磁化条件下波形系数偏差与相同激励时磁通密度的测量结果如图 13 所示。



(a) 波形系数偏差



(b) 相同激励时磁通密度

图 13 矢量磁特性测量系统性能评估

由图 13a 可知,不同磁化条件下,无气隙间隔时波形系数偏差为 0.176% 至 1.632%,而对比优化前后,波形系数偏差接近,为 0.01% 至 0.707%,因此经几何设计和优化后,波形系数偏差减小 57.1%,方形样片总体磁化均匀度提高。由图 13b 可知,相同激励下优化后磁通密度幅值为 0.547 T,与优化

前磁通密度幅值 0.345 T 相比,磁通密度增幅为 0.202 T,优化后幅值增大了 58.6%,励磁装置的功率需求下降,矢量磁特性测量系统励磁能力较优化前有了大幅提升。实验结果表明,优化前后磁通密度波形的测量值与有限元计算值基本吻合,验证了设计、优化的可靠性。

4 结 论

本文通过在磁极表面添加导磁物质,以改进矢量磁特性测量系统性能,并以磁化均匀度与励磁能力为准则,对优化后的测量系统进行了评估,得到主要结论如下:

(1) 3 种主要励磁结构中,方形样片四凸极结构磁化均匀的区域最大,有利于磁通的波形控制与反馈调节,基于方形样片的矢量磁特性测量系统最能满足测量精准度需求;

(2) 正交磁极的耦合与杂散磁场的分布会影响方形样片磁通密度分布的均匀度,增加气隙间隔和屏蔽层可增大磁路磁阻、弱化杂散干扰,有限元分析与实验测量结果表明,气隙间隔距离 1 mm、屏蔽层距样片 5 mm 的几何结构性能最优。

(3) 在磁极表面添加相对磁导率 7.3 左右的导磁物质可增强系统励磁能力,优化后整体磁化均匀度提高,励磁功率需求降低。

参考文献:

- [1] IEC. Magnetic materials: Part 2 methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame; IEC 60404-2 [S]. Geneva, Switzerland; IEC, 1996.
- [2] IEC. Magnetic materials: Part 3 methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of single sheet tester; IEC 60404-3 [S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2002.
- [3] TAKERU S, TAKASHI T, MASATO E. Improvement of integration-type dynamic E&S modeling [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1126-1129.
- [4] GUO Y G, ZHU J G, LIN Z W, et al. Measurement and modeling of core losses of soft magnetic composites under 3-D magnetic excitations in rotating motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3925-3927.
- [5] NAOKI K, TAKASHI T, MASATO E. Loss evaluation of an induction motor model core by vector magnetic characteristic analysis [J]. IEEE Transactions on

- Magnetics, 2011, 47(5): 1098-1101.
- [6] 张艳丽, 李玉梅, 刘洋, 等. 考虑不同磁特性模型的感应电机铁心损耗分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 120-126.
ZHANG Yanli, LI Yumei, LIU Yang, et al. Analysis of core losses in induction motors considering different magnetic property models [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 120-126.
- [7] GUO Y G, ZHU J G. Measurement and modeling of rotational core losses of soft magnetic materials used in electrical machines: a review [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(2): 279-290.
- [8] ZHU J G. Numerical modeling of magnetic materials for computer aided design of electromagnetic devices [D]. Sydney, Australia: University of Technology, 1994: 56-60.
- [9] ENOKIZONO M, SIEVERT J D. Numerical analysis of accuracy of rotational magnetic loss measurement apparatus [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 5(9): 742-748.
- [10] YAMAGASHIRA M, WAKABAYASHI D, ENOKIZONO M. Vector magnetic properties and 2-D magnetostriiction of various electrical steel sheets under rotating flux condition [J]. IEEE Translation Journal on Magnetics, 2014, 50(4): 6786403.
- [11] 张艳丽, 刘洋, 谢德馨, 等. 一种考虑硅钢片旋转损耗的三相变压器铁心损耗简化计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 126-131.
ZHANG Yanli, LIU Yang, XIE Dexin, et al. A simplified calculation method of core losses considering rotating losses of electrical steel sheets in three-phase transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 126-131.
- [12] 刘洋, 张艳丽, 谢德馨, 等. 考虑硅钢片二维矢量磁特性的复数 E&S 模型 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 144-149.
LIU Yang, ZHANG Yanli, XIE Dexin, et al. A complex E&S model considering 2D vector magnetic properties of silicon steel sheet [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 144-149.
- [13] URATA S, ENOKIZONO M, TODAKA T, et al. The calculation considered two-dimensional vector magnetic properties depending on frequency of transformers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 687-690.
- [14] SHINGO Z, TAKASHI T, ENOKIZONO M. Vector magnetic characteristic analysis of a surface permanent magnet motor by means of complex E&S modeling [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 967-970.
- [15] JOHANNES S. Two-dimensional magnetic measurements: history and achievements of the workshop [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, 87(9): 2-10.
- [16] ZHANG Yanli, EUM Y H, LI Wei, et al. An improved modeling of vector magnetic properties of electrical steel sheet for FEM application and its experimental verification [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1162-1165.
- [17] HASENZAGL A, WEISER B, PFÜTZNER H. Novel 3-phase excited single sheet tester for rotational magnetization [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 160(7): 180-182.
- [18] HELMUT P, EDIN M, HIROI Y. Rotational magnetization in transformer cores: a review [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(11): 4523-4533.
- [19] DE LA BARRIERE O, APPINO C, FIORILLO F, et al. A novel magnetizer for 2D broadband characterization of steel sheets and soft magnetic composites [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 48(2/3): 239-245.
- [20] WANJIKU J. Shielding of the Z-component of the magnetic field in a 2-D magnetizer with a deep yoke [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2289-2296.
- [21] KAWANO H. Vector magnetic hysteresis measurement of nonoriented electrical steel sheets under unidirectional compressive stress applied by piezoelectric actuators [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 7924378.
- [22] 陈龙, 汪友华, 赵浚宇, 等. 超微晶合金旋转磁特性测量用励磁系统的设计与优化 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 19-27.
CHEN Long, WANG Youhua, ZHAO Hanyu, et al. Design and optimization of a magnetizer for high frequency rotational magnetic characterization for nanocrystalline alloy [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2016, 31(22): 19-27.

(编辑 刘杨)