

# 考虑 $\Delta E$ 效应的磁控电抗器振动特性分析

闫荣格<sup>1,2</sup>, 张晓杰<sup>1,2</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130;  
2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

**摘要:**在磁控电抗器气隙填充负超磁致伸缩材料能够减振。但是超磁致伸缩材料的杨氏模量  $E$  在磁场中会发生变化,即具有  $\Delta E$  效应。本文针对这一特点,基于有限元法建立了考虑垫块  $\Delta E$  效应的磁控电抗器电磁-机械耦合模型,对磁控电抗器的振动特性进行了分析,最后对定制的磁控电抗器样机的振动加速度进行了实验测量,仿真和实验结果验证了所建立数学模型的正确性,为电工装备减振降噪提供了理论依据。

**关键词:**负超磁致伸缩材料;磁控电抗器; $\Delta E$  效应;有限元法

**DOI:** 10.12067/ATEEE1909048      **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0001-08      **中图分类号:** TM474

## 1 引言

在电力系统中,磁控电抗器常用于限制短路电流、抑制电网谐波及补偿系统的无功功率。磁控电抗器的特殊结构以及交直流共同激励的工作方式决定了它的振动比较剧烈。磁控电抗器的振动和噪声在造成噪声污染的同时还会影响电抗器的长期稳定运行。因此研究电抗器的振动特性对电抗器的减振降噪具有重要意义。

为了对电抗器的振动进行更准确地分析,张鹏宁测量了硅钢片在轧制方向和垂直轧制方向上的磁特性,并将测得数据应用到电抗器的振动研究中<sup>[1]</sup>。贲彤、刘松、郜玉香和刘怀文等分别从磁化各向异性、三维磁特性、内部应力以及直流偏磁等方面研究了磁控电抗器的振动特性,得到了较为准确的电抗器振动数据<sup>[2-5]</sup>。田聪和杨意妹分别从导致电抗器振动的电磁力和磁致伸缩两个方面分析了电抗器的振动特性<sup>[6,7]</sup>。高旭对附加谐波激励情况下的电抗器振动特性进行了研究<sup>[8]</sup>。在电抗器减振方面,M. Kuwata 等人研制了一种带有胶黏涂层晶粒取向硅钢片,不仅省略了电抗器铁心上的固定通孔,还使电抗器的振动减小<sup>[9]</sup>。Yanhui Gao 建立了考虑磁致伸缩和电磁力的三维仿真模型,发现铁轭

处振动较大,并且气隙填充材料的硬度会影响电抗器的振动位移。通过选择垫块材料的最佳硬度,减小了电抗器的振动噪声<sup>[10,11]</sup>。赵路娜设计了一种低振动电抗器,即在电抗器气隙中添加负超磁致伸缩材料,使电抗器原有的正形变与负超磁致伸缩材料产生的负形变相抵消从而使整体振动减小<sup>[12,13]</sup>。但是由于超磁致伸缩材料的  $\Delta E$  效应<sup>[14]</sup>,该电抗器的振动特性有待进一步研究。

本文首先对负超磁致伸缩材料的磁特性以及其  $\Delta E$  效应进行了测量。然后基于有限元方法,建立了考虑垫块  $\Delta E$  效应的磁控电抗器电磁-机械耦合数值模型,对磁控电抗器铁心的应力以及振动加速度进行了分析。最后对气隙填充负超磁致伸缩减振材料的磁控电抗器样机的振动加速度进行了测量。仿真和实验结果验证了所建立数学模型的正确性,为电工装备减振降噪提供了理论依据。

## 2 负超磁致伸缩材料磁特性的测量

负超磁致伸缩材料是指在磁化过程中沿磁场方向缩短,而垂直于磁场方向伸长的一类磁材料,如  $\text{SmFe}_2$ <sup>[15]</sup>。它们能在磁场的作用下产生巨大伸缩形变,具有应变值高、磁导率较低<sup>[16]</sup>和磁致伸缩各向异性低的特点。

收稿日期: 2019-09-25  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51777054)  
作者简介: 闫荣格(1969-),女,河北籍,教授,博士,研究方向为电工理论与新技术;  
张晓杰(1994-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术。

本文所用负磁致伸缩材料为钐铁合金,样件尺寸为  $\Phi 8\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ ,采用多参数磁特性测试系统对其磁特性进行测量,测量系统如图 1 所示。测量时,通过交直流绕组提供激励磁场。在样品上粘贴的应变片与霍尔芯片分别测得应变和磁场强度;缠在样品中央的探测线圈测得磁感应强度;在不同的直流偏置磁场中,旋转加压手轮改变压力并测得相应的应变值。

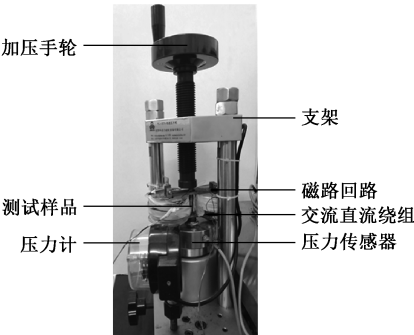


图 1 多参数磁特性测试系统  
Fig.1 Multi-parameters magnetic properties testing system

测得的磁化和磁致伸缩特性如图 2 所示。当磁场强度达到6 000 A/m后,磁通密度变化缓慢,此时达到饱和,饱和磁通密度值  $B_s = 1.89\text{ T}$ 。随磁场强度的增加,材料产生负的磁致伸缩,其饱和值  $\lambda_s = -183.4\text{ }\mu\text{m/m}$ 。所测得的杨氏模量变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,材料的杨氏模量随着磁通密度的增加而减小,说明材料随着偏置磁场的增加而“软化”。

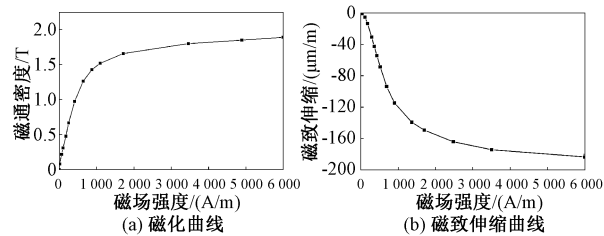


图 2 钐铁合金的磁特性曲线  
Fig.2 Magnetic properties of samarium-iron alloy

3 负超磁致伸缩材料的厚度计算

本文采用钐铁合金替代传统气隙填充材料环氧树脂。为了保证填入钐铁合金材料后磁控电抗器的电感保持不变,需要对钐铁合金垫块的厚度进行计算。本文以一台填充 2 mm 环氧树脂垫块的裂心式磁控电抗器为参考,计算钐铁合金垫块的厚度值。

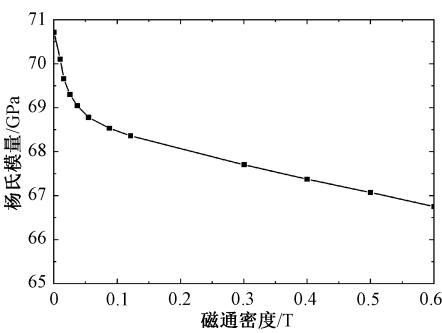


图 3 钐铁合金材料的  $\Delta E$  效应  
Fig.3  $\Delta E$  effect of samarium-iron alloy

在此设环氧树脂垫块厚度为  $\delta_1$ ,钐铁合金垫块的厚度为  $\delta_2$ ,其他参数分别如图 4 所示。

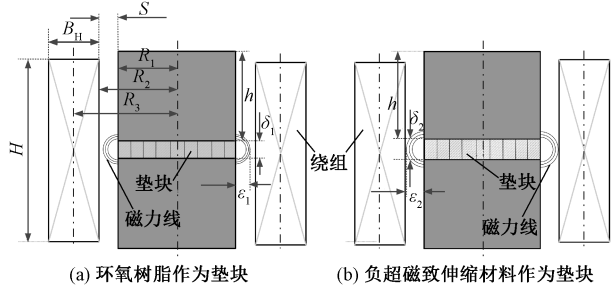


图 4 气隙处铁心和绕组尺寸  
Fig.4 Sizes of iron core and winding at air gap part

3.1 环氧树脂作为垫块时参数计算

对于以环氧树脂作为垫块的磁控电抗器,垫块处铁心的参数如表 1 所示。

表 1 环氧树脂垫块处尺寸参数  
Tab.1 Reactor parameters at epoxy resin block part  
(单位:m)

参 数	数 值
线圈高度 $H_c$	0.085
线圈幅向宽度 $B_H$	0.015
铁心等效直径 $R_1$	0.022 57
铁心饼高度 $h$	0.044
环氧树脂垫块厚度 $\delta_1$	0.002
线圈等效内径 $R_2$	0.024 82

由于磁通衍射现象,气隙处等效导磁面积向外扩大的宽度  $\varepsilon_1$  为:

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_1}{\pi} \ln \left( \frac{h + \delta_1}{\delta_1} \right) \tag{1}$$

气隙处的总等效导磁面积  $A_{\delta 1}$  为:

$$A_{\delta 1} = 2\varepsilon_1(a_m + b_m + 2\varepsilon_1) + S_c \tag{2}$$

式中,  $a_m$ 、 $b_m$  分别为铁心截面最大长度和最大宽度;

$S_c$  为铁心的截面积。电抗器的主电感  $L_{m1}$  为:

$$L_{m1} = \mu_0 \frac{W^2 A_{\delta 1}}{n \delta_1} \quad (3)$$

式中,  $W$  表示交流线圈匝数, 为 410 匝;  $n$  表示交流磁路气隙个数, 本文为 2 个。由于漏磁通的存在, 电抗器的总电感还包括漏电感。在绕组与铁心柱之间的间隙内, 磁力线与全部安匝相交链。其漏磁链为:

$$\Psi_\sigma = W\Phi = WF_m \Lambda_{m1} \quad (4)$$

其中, 线圈总磁动势  $F_m = WI$ 。磁导  $\Lambda_{m1}$  为:

$$\Lambda_{m1} = \mu_0 \rho_L \frac{A_Q}{H_c} \quad (5)$$

其中,  $A_Q$  为等效漏磁面积;  $\rho_L$  为漏磁系数。

$$\rho_L = 1 - \frac{2(B_H + S)}{\pi H_c} \quad (6)$$

式中,  $S$  为绕组与铁心柱之间的距离。绕组与铁心柱之间的间隙部分以及绕组所在区域的等效漏磁面积分别为:

$$\begin{cases} A_{Q1} = \pi R_2^2 - S_c \\ A_{Q2} = \frac{2}{3} \pi B_H (R_3 - \frac{1}{2} B_H) \end{cases} \quad (7)$$

上述两部分漏磁通所产生的总漏磁链为:

$$\Psi_\sigma = \Psi_{1\sigma} + \Psi_{2\sigma} = W^2 I \mu_0 \rho_L \frac{A_Q}{H_c} = W^2 I \mu_0 \rho_L \frac{A_{Q1} + A_{Q2}}{H_c} \quad (8)$$

因此, 漏电感为:

$$L_\sigma = \frac{\Psi_\sigma}{I} = W^2 \mu_0 \rho_L \frac{A_Q}{H_c} \quad (9)$$

电抗器总电感为:

$$L = L_{m1} + L_\sigma \quad (10)$$

经过计算, 以环氧树脂为垫块填充气隙的电抗器总电感为 105.173 mH。

### 3.2 钕铁合金材料作为垫块时参数计算

磁控电抗器气隙中填充钕铁合金材料作为垫块时, 由于材料本身具有一定的磁导率, 因此应计算填充材料的厚度, 以保持磁控电抗器的电感不发生变化。其部分尺寸如图 4(b) 所示。

根据以环氧树脂为垫块的电抗器电感的计算公式, 新垫块的加入对漏电感的影响不大, 主要会对主电感产生影响。钕铁合金作为垫块时电抗器的主电感为:

$$L_{m2} = W^2 \mu_r \mu_0 \frac{A_{\delta 2}}{n \delta_2} \quad (11)$$

为保证电抗器电感基本不变, 令  $L_{m1} = L_{m2}$ , 可得:

$$\mu_r \frac{A_{\delta 2}}{\delta_2} = \frac{A_{\delta 1}}{\delta_1} \Rightarrow A_{\delta 2} = \frac{A_{\delta 1} \delta_2}{\mu_r \delta_1} \quad (12)$$

$$A_{\delta 2} = 2 \frac{\delta_2}{\pi} \ln\left(\frac{h + \delta_2}{\delta_2}\right) [a_m + b_m + 2 \frac{\delta_2}{\pi} \ln\left(\frac{h + \delta_2}{\delta_2}\right)] + S_c \quad (13)$$

根据式 (12) 和式 (13), 可以得出气隙等效导磁面积与钕铁合金垫块厚度的关系如图 5 所示, 可以解出当垫块厚度为 8.3 mm 时, 填入新材料后电抗器的电感基本不变。

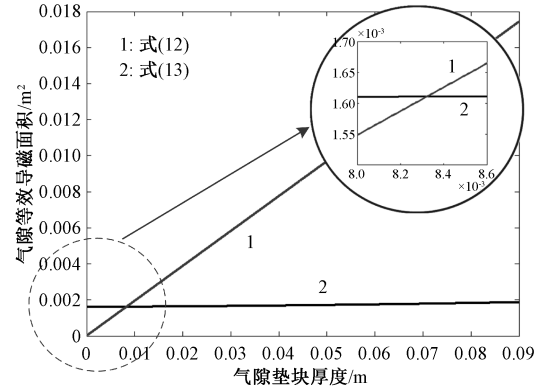


图 5 气隙等效导磁面积与钕铁合金垫块厚度的关系  
Fig.5 Relationship between thickness of samarium-iron alloy block and equivalent magnetic permeability area

## 4 磁控电抗器振动的数值分析模型

为了计算磁控电抗器的应力分布以及振动特性, 首先对系统的总能量进行分析。磁控电抗器系统的能量包括磁场能、电流位能、磁边界上的位能、磁致伸缩能、应变能和外力的位能。磁控电抗器的能量泛函可以表示为:

$$\begin{aligned} I = & \int_{\Omega_1} \left( \int_0^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} \right) d\Omega - \int_{\Omega_1} \left( \int_0^A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \right) d\Omega - \\ & \int_{\Gamma_1} \left[ \int_0^A (\mathbf{H} \times \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{A} \right] d\Gamma + \int_{\Omega_2} (\boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega + \\ & \int_{\Omega_2} \left( \int_0^\epsilon \boldsymbol{\sigma} \cdot d\boldsymbol{\epsilon} \right) d\Omega - \int_{\Gamma_2} (\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{u}) d\Gamma - \int_{\Omega_2} (\mathbf{f}^\Omega \cdot \mathbf{u}) d\Omega \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分别为电磁场和机械场的分析域;  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  为磁场和机械场的边界;  $\mathbf{f}^T$  和  $\mathbf{f}^\Omega$  分别为外力的面密度和体密度;  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  分别为磁感应强度和磁场强度;  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力张量;  $\boldsymbol{\epsilon}$  为应变张量; 总能量泛函包含了电磁-机械耦合项  $\int_{\Omega_2} (\boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega$ , 它反映了电磁

场和机械场的强耦合特征,其中  $d$  是磁致伸缩系数,表示磁致伸缩随磁场的变化率,用  $d=d\lambda/dH$  表示。

根据狄利克雷边界条件,可知磁场边界上的位能为 0,即:

$$I = \int_{\Omega_1} \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 \right] dx dy - \int_{\Omega_1} \mathbf{J} A dx dy + \int_{\Omega_2} d \left[ \frac{\partial A}{\partial y} \cdot \frac{E(\mathbf{B})}{1-\alpha^2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \alpha \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \frac{E(\mathbf{B})}{1-\alpha^2} \left( \alpha \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] dx dy + \int_{\Omega_2} \frac{1}{2} \left\{ \frac{E(\mathbf{B})}{(1-\alpha^2)} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{E(\mathbf{B})}{2(1+\alpha)} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (16)$$

式中,  $E(\mathbf{B})$  为杨氏模量,它是关于磁感应强度的函数,在铁心域内,杨氏模量为常数;在垫块域内,杨氏模量与磁感应强度相关,它们的关系通过实验测得;  $\alpha$  为泊松比;  $\mu$  为铁心材料的磁导率,满足  $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$ 。

根据泛函求取极值的条件,即可得到节点矢量磁位  $\mathbf{A}$  和振动位移  $\mathbf{u}$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial A_{ji}} = \sum_e \frac{\partial I^e}{\partial A_{ji}^e} = 0 \\ \frac{\partial I}{\partial u_{ij}} = \sum_e \frac{\partial I^e}{\partial u_{ij}^e} = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \cdots n; j = x, y \quad (17)$$

## 5 仿真结果分析

本文中所用电抗器仿真结构如图 6 所示,在图 6 中,铁心中柱上绕制直流绕组,起着控制铁心磁通饱和程度进而调节电抗器电感的作用。两侧铁心柱上绕制交流绕组,产生交流磁通。仿真时所加激励为 220 V 工频电压,直流激励分别为 0 A、1 A、2 A、3 A、4 A。这里以直流激励为 4 A 的仿真结果为例进行分析。

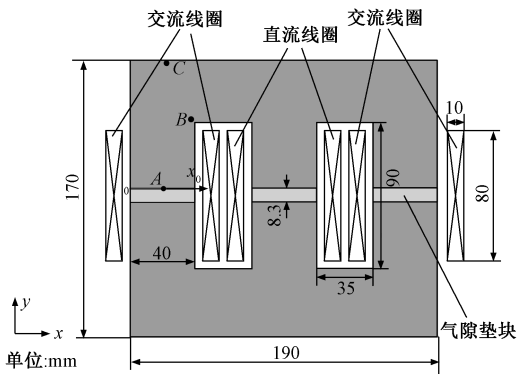


图 6 磁控电抗器结构

Fig.6 Structure of magnetically controlled reactor

电抗器工作时,铁心中交、直流磁通方向如图 7 所示,从仿真结果可以看出,交流磁通经由上下铁轭和两旁柱闭合,直流磁通从中柱分散到两旁柱。图 8 给出了两旁柱内磁通变化结果。结果表明直流绕组通入直流控制电流后,在交流磁通的每个周期,两

$$\int_{\Gamma_2} \left[ \int_0^1 (\mathbf{H} \times \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{A} \right] d\Gamma = 0 \quad (15)$$

对能量泛函在直角坐标系下进行坐标展开:

旁柱各有一边达到饱和状态,从而实现对电抗器电感的调节。

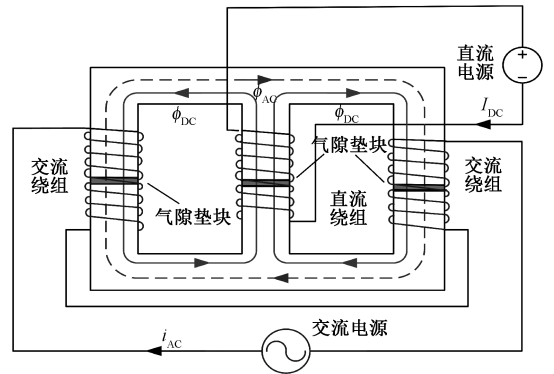


图 7 磁控电抗器铁心中磁通方向示意

Fig.7 Magnetic flux direction of magnetically controlled reactor

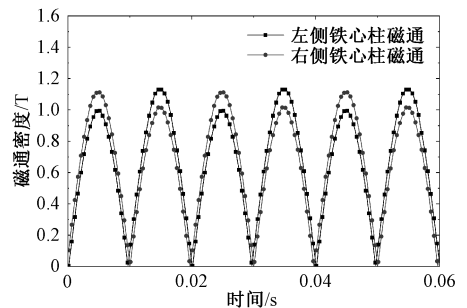


图 8 电抗器左右柱磁通密度大小与时间的关系

Fig.8 Relationship between magnetic flux density and time in two side columns of iron core

以图 6 中过点 A 的坐标轴为参考位置,垫块上表面的应力值与坐标的关系如图 9 所示。从图 9 中可以看出,气隙垫块上表面的应力主要集中在边缘部分,垫块上表面中心处的应力较小。边缘应力最大值达到了  $1.44 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。应力集中的区域会使铁心的振动过大。因此,对气隙垫块上表面 A 点、上铁轭拐角 B 点和位移较大的上铁轭处 C 点的振动应力随时间变化曲线进行分析,各测点位置如图 6 所示,结果如图 10 所示。随着直流电流的增加,各点的应力值呈现半周期增大,半周期减小的趋势。这是因为随



着直流电流的增加,直流磁通分别对两旁柱内的交流磁通助磁与去磁的效果更加明显。 $B$  点的应力要大于  $A$  点和  $C$  点,因  $B$  点位于拐角处,磁通较集中,应力较大。选择直流电流为 0 A、4 A 时各点的振动加速度进行分析,结果如图 11 所示。

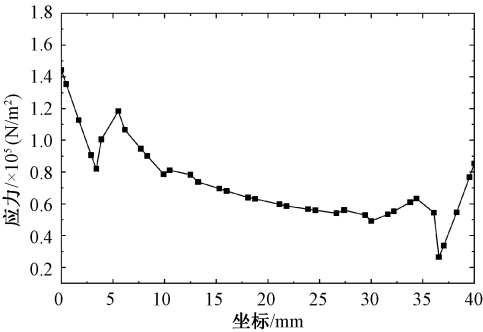


图 9 左侧气隙垫块上表面应力分布  
Fig.9 Stress distribution on upper surface of left samarium-iron alloy block

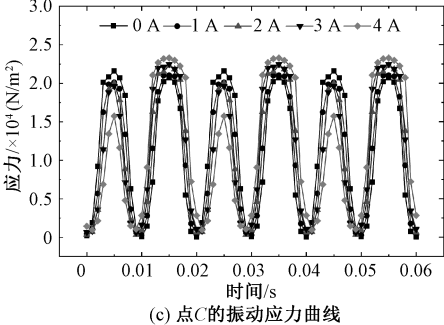
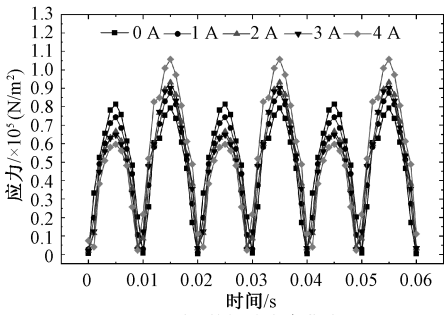
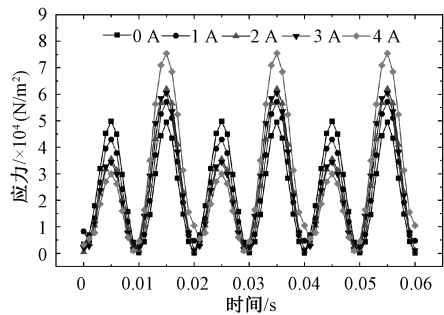


图 10 不同控制电流下  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点应力随时间的变化  
Fig.10 Relationship between stress and time under different DC currents at point  $A$ ,  $B$ , and  $C$

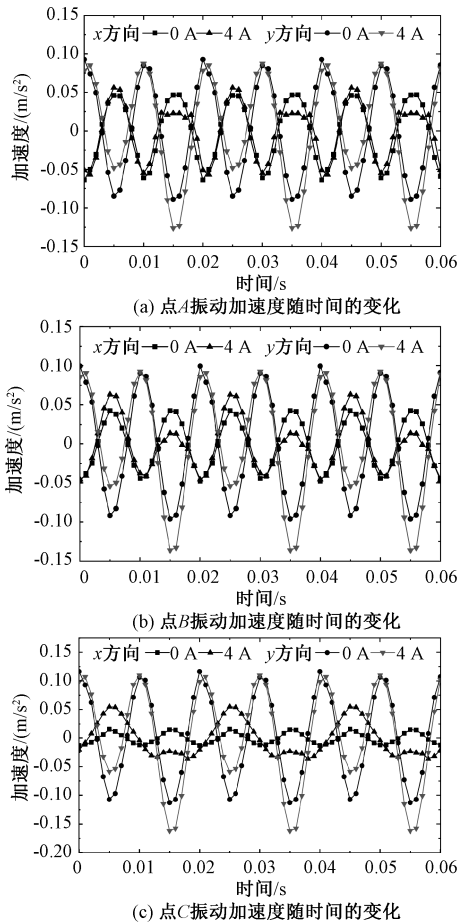


图 11  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点振动加速度随时间的变化  
Fig.11 Relationship between vibration stress and time at point  $A$ ,  $B$ , and  $C$

从三点振动加速度曲线中可看出三点的振动加速度依次增大,即距离电抗器底部越远,振动加速度越大,并且各点振动加速度  $y$  方向分量大于  $x$  方向分量。由于直流电流的注入会对电抗器的侧柱磁通产生半周期助磁、半周期去磁的效果,当直流磁通对一侧铁心柱助磁时,此铁心柱上各点应力和振动加速度增大;当直流磁通对铁心柱去磁时,应力减小,振动加速度减小。

6 振动实验

为了对上述分析结果进行验证,定制了电抗器样机,样机额定电压为 220 V,交流绕组 410 匝,直流绕组 645 匝。首先使用 GWINSTEK LCR 测量仪对电抗器样机的电感量进行了测量,如图 12 所示,实测电感值为 109.985 mH,计算值与测量值误差小于 5%,满足国标 GB/T 1094.6-2011 对电抗器电抗值容许偏差的要求。采用德国 HEAD acoustic 公司

的振动噪声测试系统 SQuadriga II 对上述样机的振动进行测量。测量时,加速度传感器贴在铁心表面,磁控电抗器测试系统如图 13 所示。

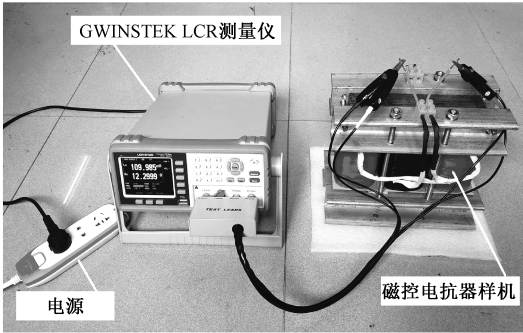


图 12 磁控电抗器电感测试实物图  
Fig.12 Inductance measurement of magnetically controlled reactor

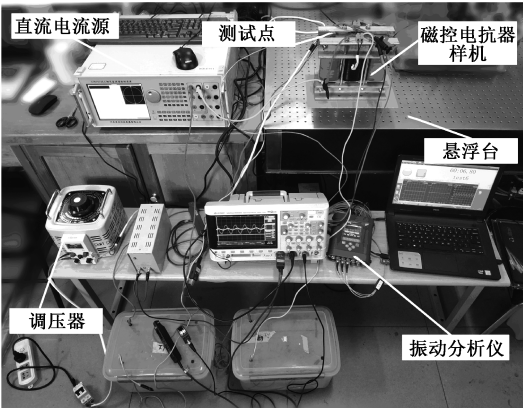


图 13 磁控电抗器振动测试系统  
Fig.13 Vibration measurement of magnetically controlled reactor

由于气隙被绕组包裹,无法测得气隙处的振动数据,因此对铁心的上铁轭拐角点  $B$  和上表面点  $C$  的振动加速度进行测量。实验过程中,控制绕组所加直流电流分别为  $0\text{ A}$  和  $4\text{ A}$ 。所测得的数据如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,随着直流电流的增加,各点的振动加速度有所增大。点  $B$  和点  $C$  振动加速度的测量值与仿真结果相比,在变化趋势上基本相同;在加速度的数值上,测量值要大于计算值。为了反应加速度曲线整体的变化情况,点  $B$  和点  $C$  的振动加速度计算值与实验测量值的最大值对比如表 2 所示。

由表 2 中加速度计算值和测量值的对比结果可知,铁心表面加速度实测值与计算值之间存在一定的误差,造成这种误差的原因主要为:

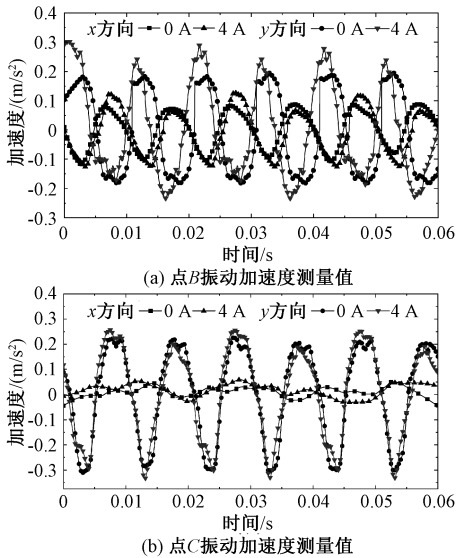


图 14 点  $B$  和点  $C$  振动加速度测量值  
Fig.14 Vibration acceleration measurements at point  $B$  and  $C$

表 2 点  $B$  和点  $C$  的振动加速度计算值  
与实验测量值对比

Tab.2 Comparison of calculated and experimental accelerations at point $B$ and $C$				
测试点	直流电流 /A	加速度 方向	计算值 /( $\text{m/s}^2$ )	测量值 /( $\text{m/s}^2$ )
$B$	0	$x$ 方向	0.042 27	0.088 24
		$y$ 方向	0.099 28	0.194 91
	4	$x$ 方向	0.063 17	0.279 57
		$y$ 方向	0.092 49	0.302 34
$C$	0	$x$ 方向	0.015 55	0.051 45
		$y$ 方向	0.116 39	0.226 32
	4	$x$ 方向	0.054 97	0.058 88
		$y$ 方向	0.109 67	0.257 42

- (1)夹件等机械部件对铁心的振动有一定的影响。
- (2)绕组的振动、气隙附近的空气振动以及电抗器器身的机械摩擦等均对实验结果有一定的影响。

但是总体来看加速度的测量值与仿真值的变化趋势基本一致:随着直流电流的增大,磁控电抗器的振动均增大;而且振动加速度的仿真波形与实验波形基本一致。说明本文所建立的电磁-机械耦合模型具有一定的正确性。

## 7 结论

本文针对实际工况下,负超磁致伸缩材料垫块具有  $\Delta E$  效应的问题,建立了考虑这一效应的电磁-机械耦合模型,对磁控电抗器的振动特性进行了仿真和实验分析,得到以下结论:

(1) 钕铁合金的杨氏模量变化较大, 可达 6%。在磁场作用下, 垫块会发生一定程度的“软化”, 从而对气隙处的振动仿真值产生一定的影响。

(2) 在铁心气隙处, 应力主要集中在铁心的外边缘, 而铁心柱中心应力较小。

(3) 磁控电抗器的振动位移和应力随所加直流偏磁电流的增加而增大。说明随着直流偏磁电流的增加, 振动对电抗器铁心造成的危害越大。

(4) 实验测得的振动加速度大于计算值, 这是由于其他部件对铁心振动有一定的约束作用。但是振动加速度测量值与仿真值的变化趋势基本一致。

仿真和实验结果验证了所建立的数学模型具有一定的正确性, 为电工装备减振降噪提供理论依据。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Zhang P, Li L, Cheng Z, et al. Study on vibration of iron core of transformer and reactor based on maxwell stress and anisotropic magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55 (2): 1-5.
- [ 2 ] Ben T, Yang Q, Yan R, et al. Magnetically controlled saturable reactor core vibration under practical working conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53 (6): 1-4.
- [ 3 ] 刘松, 祝丽花, 王斌, 等 (Liu Song, Zhu Lihua, Wang Bin, et al.). 基于三维磁特性电抗器电磁振动分析 (Electromagnetic vibration analysis of reactor based on three-dimensional magnetic properties) [J]. 电气应用 (Electrotechnical Application), 2019, 38 (3): 35-40.
- [ 4 ] 闫荣格, 郜玉香, 贡彤, 等 (Yan Rongge, Gao Yuxiang, Ben Tong, et al.). 直流偏磁下磁饱和电抗器铁心电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 27-33.
- [ 5 ] Yan R, Liu H, Ben T, et al. Research on stress of magnetically controlled saturable reactor under practical working conditions [A]. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) [C]. Sydney, NSW, 2017.
- [ 6 ] 田聪, 李琳, 宋雅昊, 等 (Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al.). 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究 (Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 64-70.
- [ 7 ] 杨意妹, 祝丽花, 王斌, 等 (Yang Yimei, Zhu Lihua, Wang Bin, et al.). 考虑磁致伸缩效应的可控饱和并联电抗器电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of controllable saturable reactor considering magnetostrictive effects) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 40-45.
- [ 8 ] Yan R, Gao X, Zhu L, et al. Research on three-dimensional stress distribution of reactor core [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-4.
- [ 9 ] Kuwata M, Nogawa S, Takahashi N, et al. Development of molded-core-type gapped iron-core reactor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (10): 4066-4068.
- [ 10 ] Gao Y, Muramatsu K, Hatim M, et al. Design of a reactor driven by inverter power supply to reduce the noise considering electromagnetism and magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (6): 2179-2182.
- [ 11 ] Gao Y, Muramatsu K, Fujiwara K, et al. Vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4789-4792.
- [ 12 ] 闫荣格, 赵路娜, 贡彤, 等 (Yan Rongge, Zhao Lina, Ben Tong, et al.). 基于负超磁致伸缩效应电抗器减振新方法的研究 (A new vibration reduction method for reactors using NGMM) [J]. 振动与冲击 (Journal of Vibration and Shock), 2018, 37 (19): 254-258.
- [ 13 ] Yan R, Zhao L, Tong B, et al. Design of lower vibration reactor [A]. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, (ICEMS) [C]. Sydney, NSW, 2017.
- [ 14 ] Meng Yanan, Fu Li. Application and development research on giant magnetostrictive apparatus [A]. 2010 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering [C]. Kyoto, Japam, 2010. 2: 442-445.
- [ 15 ] 窦青青 (Dou Qingqing). SmNdFe 负超磁致伸缩材料研究 (Study on negative magnetostrictive SmNdFe materials) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2012.
- [ 16 ] 袁惠群, 孙华刚 (Yuan Huiqun, Sun Huagang). 超磁致伸缩材料内部磁场特性及材料参数对其影响分析 (Inner magnetic field characteristic of giant magnetostrictive materials and effects of the materials parameters on the characteristic) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2008, 28 (30): 119-124.

## Vibration analysis of magnetic controllable reactor considering $\Delta E$ effect

YAN Rong-ge<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-jie<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,  
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,  
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** The vibration of magnetic controllable reactor (MCR) can be damped by filling the gap of reactor core with negative giant magnetostrictive material (NGMM). However, the Young's modulus  $E$  of NGMM changes in magnetic field, that is, has  $\Delta E$  effect. In this paper, an electromagnetic-mechanical coupled model of MCR considering the  $\Delta E$  effect is established based on the finite element method. Then the vibration properties of MCR are analyzed. Finally, the vibration acceleration of a MCR sample is measured. The simulation and experimental results verify the correctness of the established mathematical model. This thesis provides a theoretical basis to reduce the vibration of the electrical equipment.

**Key words:** giant magnetostrictive material; magnetic controllable reactor;  $\Delta E$  effect; finite element method