第 50 卷 第 2 期：725-736　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 725-736
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230664

特高压并联电抗器铁芯振动及噪声特征研究

杨　帆[1]，张相杰[1]，王鹏博[1]，罗汉武[2]，李　昉[2]，李文震[2]
（1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044;
2. 国网内蒙古东部电力有限公司，通辽 028000）

摘　要：特高压并联电抗器因其铁芯是以铁芯饼与气隙垫块交替堆叠而成的结构特点，导致其运行过程中振动强度远超同电压等级的变压器，易出现振动超标等问题，现有计算方法对特高压并联电抗器铁芯振动特征还无法准确表征。鉴于此，该文针对 1 台特高压并联电抗器的铁芯振动机理及产生的噪声进行研究，结合磁-结构-声多场耦合分析，对铁芯所受麦克斯韦力及磁致伸缩力进行仿真计算，将结构场计算结果进行快速傅里叶变换后作为载荷激励进而计算由电抗器振动产生的噪声，并单独分析磁致伸缩力和麦克斯韦力对电抗器铁芯振动造成的影响。结果表明：电抗器运行过程中电抗器铁芯旁轭中部产生的振动最剧烈，电抗器周围产生的噪声最大。对比麦克斯韦力与磁致伸缩力对电抗器铁芯振动的影响发现，同时考虑两个力时铁芯振动小于未考虑磁致伸缩力的情况，证明影响电抗器铁芯振动的两个力存在相互衰减作用。

关键词：特高压并联电抗器；多物理场耦合计算；振动噪声；磁致伸缩；麦克斯韦力

Study on the Vibration and Noise Characteristics of the Iron Core in Ultra-high Voltage Shunt Reactor

YANG Fan[1], ZHANG Xiangjie[1], WANG Pengbo[1], LUO Hanwu[2], LI Fang[2], LI Wenzhen[2]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company, Tongliao 028000, China)

Abstract: The iron core in UHV shunt reactor possesses a characteristic structure that the core cake and air gap pads alternately are stacked into a structure, thus the operation of its vibration intensity is far more than the same voltage level of the transformer, and problems such as vibration is prone to exceed the standard may occur. The existing calculation methods for UHV shunt reactor core vibration characteristics can not be accurately characterized. Thereby, aiming to study the core vibration mechanism and noise generated by one UHV shunt reactor, this paper combines the magnetic-structural-acoustic multi-field coupling analysis, simulates and calculates the Maxwell force and magnetostrictive force on the core, then calculates the noise generated by the vibration of the reactor by using the results of the structural field as a load excitation after the fast Fourier transform, and analyzes the magnetostrictive force and Maxwell force on the vibration of the reactor individually. The effects of magnetostrictive force and Maxwell's force on reactor core vibration are analyzed separately. The results show that the vibration in the middle of the reactor core side yoke is the most intense during the reactor operation, and the noise generated around the reactor is the largest. Comparison of Maxwell's force and magnetostrictive force on the vibration of the reactor core reveals that the vibration of the core is smaller than that without considering the magnetostrictive force, which proves that the two forces affecting the vibration of the reactor core have a mutual attenuation effect.

Key words: ultra-high voltage shunt reactor; multi-physics field coupling calculations; vibration noise; magnetostriction; Maxwell force

0　引言

特高压并联电抗器在电网中的主要作用是补偿长距离线路的电容效应和抑制工频电压升高，主要应用于特高压交流输电工程中。因特高压并联电抗器铁芯是以铁芯饼与气隙垫块交替堆叠而成的结构特点及自身工作原理，其振动强度较同电压等级的变压器更大。研究特高压并联电抗器本体尤其是其铁芯的振动问题，才能针对其振动机理设计合理

基金资助项目：国网内蒙古东部电力有限公司科技项目(SGTYHT/20-JS-221)。
Project supported by Science and Technology Project of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company (SGTYHT/20-JS-221).

的减振方案，对保障特高压电网的可靠运行至关重要。

近年来，国内外开展的有关并联电抗器振动研究工作主要集中在试验测试和建模仿真计算两方面。在试验测试方面，文献[1]采用光纤传感器测量了 1 台单柱式特高压并联电抗器铁轭及油箱外位置的振动位移及加速度；文献[2]搭建并联电抗器等效模型并针对不同激励下电抗器铁芯饼及铁轭处振动位移、加速度和外部噪声进行测量分析，提出了相关振动参数的优化测量方案；文献[3]针对特高压并联电抗器运行时振动及噪声进行测量分析总结了振动加速度、位移及噪声的频谱分布规律。文献[4-9]测量分析了特高压并联电抗器油箱的振动和外部噪声特征，总结了电抗器本体的振动信号以 100 Hz 基频为主，且振动加速度与运行电压线性相关。文献[10]对高压并联电抗器铁芯结构和油箱的模态进行计算分析，验证了在电抗器运行过程中一般不会发生共振问题。上述文献从试验测试角度测量分析了箱壁振动特征或非运行状态下的振动参数及外部噪声，但由于特高压并联电抗器内部存在复杂的电磁干扰，无法确保传感器的测量精度，且在特高压并联电抗器内部布置传感器需对其结构进行改造，实施难度较大，同时无法清晰反映电抗器内部铁芯的振动特征，较难获得实际样机的铁芯振动参数，故需要结合仿真计算针对电抗器内部铁芯振动机理展开研究。在建模仿真计算方面，文献[11]从多场耦合角度分析了电抗器振动及噪声分布，将电磁力作为载荷激励进行结构-噪声耦合，仿真计算了电抗器各处的噪声。文献[12]指出电抗器振动由铁芯硅钢叠片的磁致伸缩效应、铁芯饼与气隙交界处的麦克斯韦及绕组受力引起，其中绕组受力约占铁芯受力的 10%。文献[13-14]采用磁-结构场耦合模型分析了电抗器铁芯的振动特征，并利用有限元仿真模型研究了电抗器铁芯振动与气隙材料参数的相关性。文献[15]测量了多种激励下应力对硅钢片磁性能的影响，并仿真分析了多种激励下简单结构电抗器的振动特性。文献[16]考虑了硅钢片材料的磁致伸缩特性，分析单柱式电抗器绕组及铁芯振动特征，提出了相关减振措施。文献[17]分析了计及铁芯叠片规则及流固耦合下单柱式和双柱式特高压并联电抗器铁芯振动特性，对比分析了两种结构电抗器振动参数的差异。文献[18]分析了未考虑磁致伸缩影响下的特高压并联电抗器振动特性，提出了几种控制铁芯振动的方法。文献[19-20]分别提出了提取磁致伸缩模型中特征参数的算法，并对干式铁芯电抗器的结构优化进行研究，得出了电抗器的减振设计方案。文献[21]从特高压并联电抗器振动机理出发，研究了基于气隙结构的电抗器减振方案，并对所提出的方案进行仿真验证。上述研究更多针对电压等级较低的电抗器结构开展，较少考虑铁芯所受磁致伸缩力对振动造成的影响，且耦合电抗器声场的研究较少，对电抗器铁芯振动噪声的研究多集中在试验测试方面。

综上所述，目前针对特高压并联电抗器振动的研究主要集中在电抗器外部的试验测试分析，对内部振动机理的研究分析较少。且现有研究大多针对结构相对简单的电抗器类型，同时大多仿真弱化了磁致伸缩对电抗器振动造成的影响，仅针对电磁力对电抗器振动造成的影响进行分析，结合磁-结构-噪声的电抗器多场耦合的分析较少。

本文以特高压并联电抗器为研究对象，首先针对其内部铁芯振动产生的机理进行分析，然后结合磁-结构-声多物理场耦合，对电抗器铁芯中磁场、麦克斯韦力和磁致伸缩力分布规律及电抗器外部噪声分布特点进行研究，分析了电抗器振动参数的频域特征，并研究了引起电抗器铁芯振动两种力之间的相互作用。研究结果可为电抗器结构设计、运行状态分析及减振分析提供参考。

1 特高压并联电抗器内部结构及电抗器铁芯振动机理

1.1 特高压并联电抗器内部结构

截至目前，我国在运特高压并联电抗器按结构可分为：单柱式、双柱式和单柱双器身式，其中超过 50%的在运特高压并联电抗器的铁芯结构为双柱式，且双柱式电抗器铁芯内部磁路及磁场分布较单柱式更复杂。本文选择双柱式铁芯结构的特高压并联电抗器作为研究对象。图 1 为 1 台 BKDF320000/1000 型号的特高压并联电抗器内部结构示意图，主要包括铁轭、绕组、压紧系统、磁分路、铁芯饼、气隙等结构。其中，绕组材料为铜，铁轭及铁芯饼材料为硅钢，夹件(压紧系统)及外壳材料为 Q235 钢，气隙材料为大理石，铁芯与箱壁之间为变压器油。

1.2 铁芯振动机理

特高压并联电抗器铁芯振动主要过程如下：铁芯通过绕组励磁后，产生交变磁场，由硅钢叠片叠

制而成的铁芯饼、铁轭、及磁分路在交变磁场作用下发生磁致伸缩现象；同时在交变磁通穿过高磁导率的铁芯饼与低磁导率的气隙交界处时，会产生交变的电磁力，即麦克斯韦力。电抗器铁芯在磁致伸缩力和麦克斯韦力的共同作用下振动。

磁致伸缩力原理如图 2 所示，图中黑点代表原子核，箭头代表原子磁矩，椭圆代表原子核外电子云。图 2(a)描述了居里温度(T_c)以上顺磁状态下磁性材料内部原子磁矩的杂乱排布状态，此时原子对外长度为 L_0；图 2(b)描述了在 T_c 温度以下未加磁场时，原子磁矩在自发磁化状态下平行排列状态，此时原子对外长度为 L_1；图 2(c)描述了在 T_c 温度以下时，施加垂直方向磁场后，原子磁矩和电子云旋转 90°取向排列状态，此时原子对外长度为 L_2[22]。

结合图 1 所示电抗器结构可知，电抗器铁芯柱是由铁芯饼与气隙结构交替堆叠而成，交变磁通通过两种磁导率不同介质的交界处时产生了麦克斯韦力。具体表现为沿磁力线方向的张力和垂直磁力线方向的压力，麦克斯韦力作用示意图如图 3 所示。

2　特高压并联电抗器多物理场耦合仿真计算

2.1　铁芯振动噪声计算方法

工频正弦交变场下，忽略位移电流，磁场计算麦克斯韦方程及本构关系为：

$$\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}\\ \boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；μ 为介质磁导率；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度。

引入磁矢位$\nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}$可得磁场基本微分方程：

$$\nabla\times\nu\nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{J}\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为磁矢位；ν 为介质磁阻率，满足$\nu=1/\mu$；$\boldsymbol{J}$为绕组激励电流密度，满足$\boldsymbol{J}=NI/S$(N为绕组匝数，$\boldsymbol{I}$ 为绕组励磁电流，S 为绕组截面积)。

特高压并联电抗器铁芯振动简要描述为：铁芯在电磁外力下在变压器油内呈周期性振动，电磁外力即磁致伸缩力和麦克斯韦力：

$$\boldsymbol{M}\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t^2}+\boldsymbol{C}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{Max}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为铁芯的质量矩阵；$\boldsymbol{u}$ 为铁芯位移矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 为铁芯的刚度矩阵，可由铁芯材料及结构尺寸算得；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{Max}}$ 为麦克斯韦力矩阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}}$ 为磁致伸缩力矩阵；t 为时间。

计算中忽略铁芯阻尼影响，即 $\boldsymbol{C}$=0，故式(3)

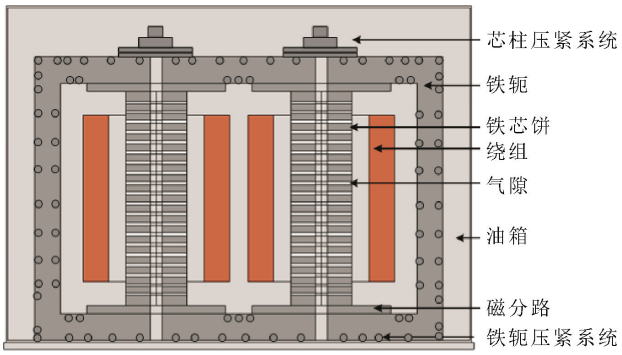


图 1　特高压并联电抗器内部结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of the internal structure of an UHV shunt reactor

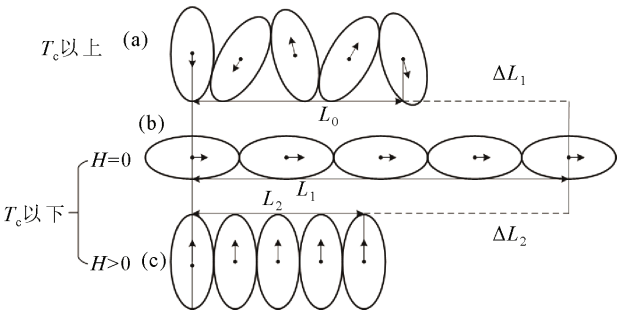


图 2　硅钢磁致伸缩原理示意图

Fig.2　Schematic diagram of the magnetostrictive principle of silicon steel

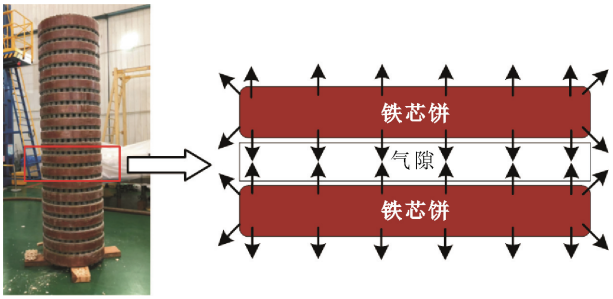


图 3　麦克斯韦力作用示意图

Fig.3　Schematic of Maxwell forces

简化后为：

$$\boldsymbol{M}\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t^2}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{F}\tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为铁芯受力，$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{Max}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{mag}}$。

对式(4)中求得的铁芯位移进行求导，得到铁芯振动速度，同时将空气视为理想介质，声波的运动方程、连续方程、及状态方程如下：

$$\rho_0\left(\frac{\partial\upsilon_x}{\partial t}+\frac{\partial\upsilon_y}{\partial t}+\frac{\partial\upsilon_z}{\partial t}\right)=-\left(\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial p}{\partial z}\right)\tag{5}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=-\rho_0\left(\frac{\partial\upsilon_x}{\partial t}+\frac{\partial\upsilon_y}{\partial t}+\frac{\partial\upsilon_z}{\partial t}\right)\tag{6}$$

$$p=c_0^2\rho\tag{7}$$

式中：ρ 为媒介密度增量；ρ_0 为流体密度；v_x、v_y、v_z 分别为铁芯沿 x、y、z 方向的振动速度；p 为空间各点声压；c_0 为声速。

将声压转化为声压级 L_p 可表示为：

$$L_p = 20\lg\frac{p_e}{p_0} \tag{8}$$

式中：p_e 为声压有效值；p_0 为基准声压。

2.2 电抗器多物理场耦合模型建立

在仿真计算时，为使模型计算结果更符合实际设备，在准确表示铁芯结构特点的前提下，对模型作出以下规定以提高计算效率：1）因为计算电抗器铁芯振动时可不考虑铁芯散热，故将每层气隙中的大理石垫片等效为 1 片；2）将铁轭下表面设为固定约束条件，简化箱体固定结构；3）简化螺栓与连接件，以载荷形式均匀加在铁芯柱上，以辊支承代替结构夹件；4）模型包含铁芯、绕组、铁轭、磁分路、油箱等主体部分。考虑了铁芯柱中间放置固定杆的空隙结构，铁芯材料的磁致伸缩参数设置是根据对材料的磁致伸缩特性曲线测量后进行提取得到饱和磁致伸缩系数、饱和磁化强度等[19]。在计算磁场和固体力学的研究中均将铁芯域设置为磁致伸缩材料，同时在多物理场研究的磁致伸缩中添加铁芯域，完成铁芯材料磁致伸缩的设置。计算铁芯所受的磁致伸缩力，再将麦克斯韦力作为载荷施加在铁芯结构表面。简化后建立的电抗器模型如图 4 所示。模型参数如表 1 所示。

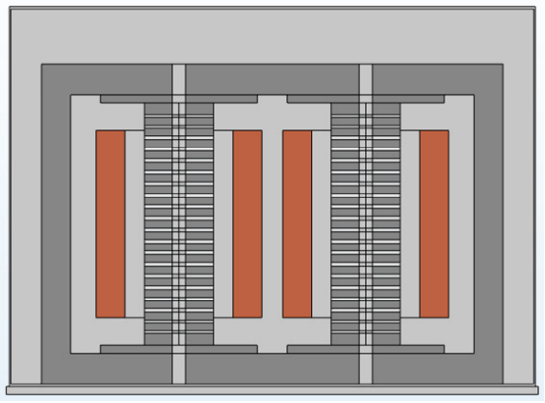


图 4 电抗器模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of the reactor model

表 1 特高压并联电抗器参数

Table 1 Parameters of EHV shunt reactors

参数	数值
频率 f/Hz	50
额定容量/MVA	320
额定电压/kV	$1100/\sqrt{3}$
额定电流/A	503.9
硅钢片密度/(kg·m^{-3})	7650
硅钢片杨氏模量/MPa	1.5×10^5
硅钢片泊松比	0.27
硅钢片饱和磁致伸缩系数	1.185×10^{-6}
硅钢片饱和磁化强度/(A·m^{-1})	1.934×10^6
气隙密度/(kg·m^{-3})	2600
气隙杨氏模量/MPa	5.5×10^5
气隙泊松比	0.45

特高压并联电抗器磁-结构-声场多物理场耦合计算方法流程图如图 5 所示。

步骤 1：计算由绕组激励产生的磁场，并计算麦克斯韦力与磁致伸缩力。

步骤 2：将计算得到的麦克斯韦力和磁致伸缩力作为载荷耦合到结构场中。

步骤 3：在结构场中计算出铁芯受力、振动位移、加速度等振动参数。

步骤 4：将所受应力进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform，FFT)得到对应的频率与幅值。

步骤 5：将应力作为声场的噪声源，求解得到电抗器周围声压级、声功率级及外场声压级等声场参数。

3 电抗器多物理场耦合仿真结果分析

3.1 电抗器铁芯磁场及磁路分析

电抗器绕组通入 50 Hz 的正弦交流电，图 6(a)所示电流为峰值时铁芯磁通密度分布，可以看出磁场最大值出现在芯柱端部及铁轭中间处，此时铁芯内部磁路如图 6(b)所示，其中实线和虚线分别为两个绕组产生的磁通方向。

通过铁芯内部磁路图 6(b)可看出，在铁芯柱及上下铁轭中间区域两绕组励磁产生的磁通同向，相互叠加；在旁轭和上下铁轭两侧区域产生的磁通反向，相互抵消，与图 6(a)所示云图分布相符。

3.2 磁-结构场耦合分析结果

由 1.2 节铁芯振动机理分析可知，相邻两个铁芯饼面上产生的麦克斯韦力方向相反，边界载荷如图 7 所示，局部放大图可以看出相邻铁芯饼呈相吸趋势。

麦克斯韦力和磁致伸缩力共同作用于铁芯上导致了铁芯振动。一个电流周期内铁芯振动位移和加速度云图如图 8 所示。

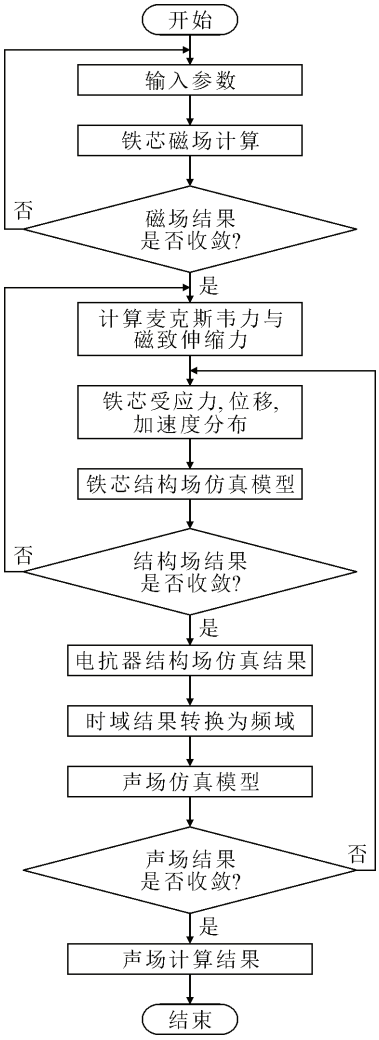


图 5　磁-结构-声耦合场耦合计算流程图

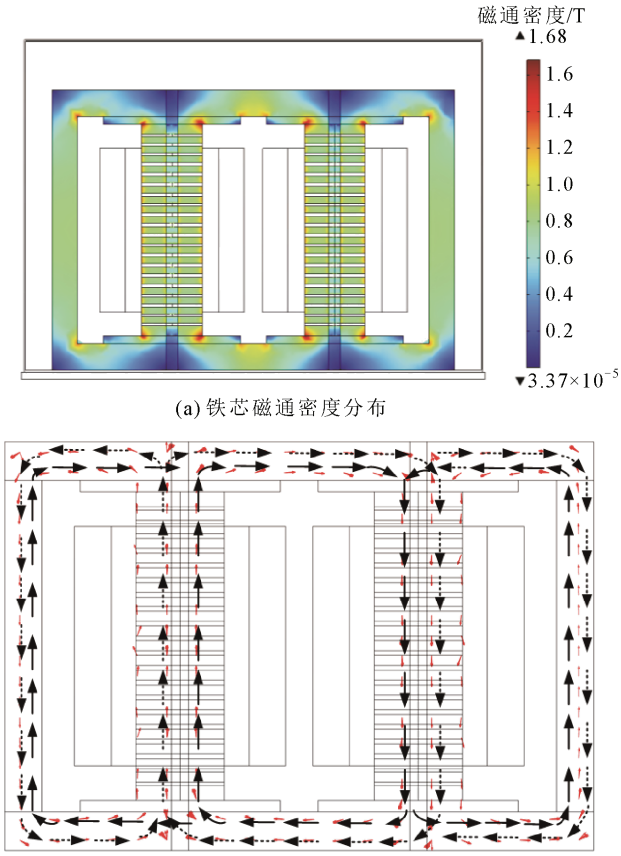
Fig.5　Flow chart of the magnetic-structural-acoustic coupling field coupling calculation

从图 8 铁芯位移和加速度分布云图可得：电抗器铁芯结构中，铁芯旁轭处振动最剧烈，其次是铁芯柱顶部及磁分路处；位移和加速度在铁芯结构上的分布基本对称。

根据位移及加速度云图结果在电抗器铁芯上振动剧烈处选取 4 个观测点，进一步分析电抗器铁芯在工频激励周期内的振动参数。因电抗器铁芯振动具有对称性，选取的 4 个观测点位置说明如表 2 所示，各观测点具体布局示意图如图 9 所示。

为清晰直观分析 4 个观测点上的振动参数，图 10 表示了各观测点上振动参数随时间变化的曲线。图 10(a)为 4 个观测点的振动位移，图 10(b)为 4 个观测点的振动加速度。

为分析各观测点处振动强度，表 3 列出来计算得到各观测点的振动位移和加速度平均值。



(a) 铁芯磁通密度分布

(b) 铁芯内部磁路图

图 6　铁芯磁通密度及磁路图

Fig.6　Core flux density and magnetic circuit diagram

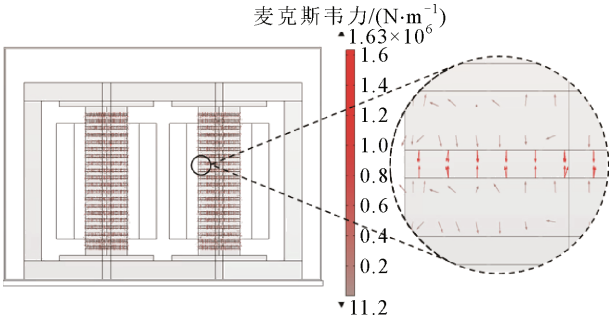


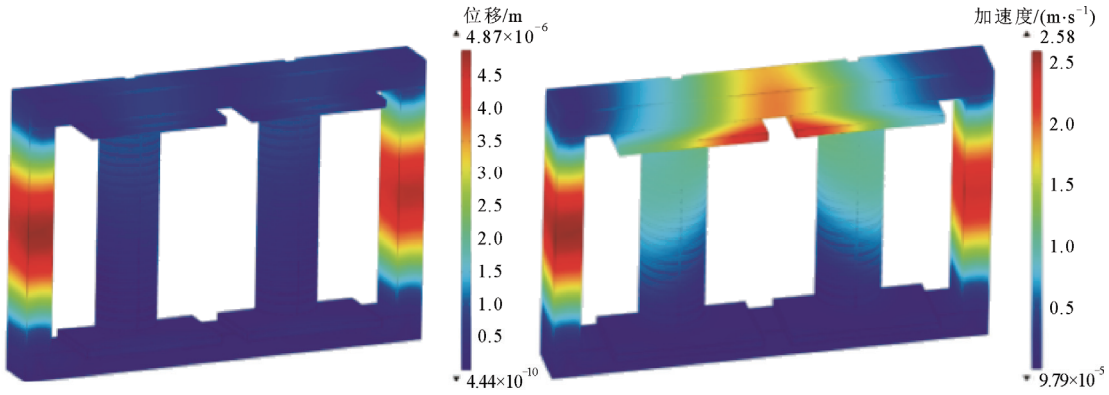
图 7　铁芯饼间麦克斯韦力示意图

Fig.7　Schematic diagram of Maxwell's forces between the iron cores

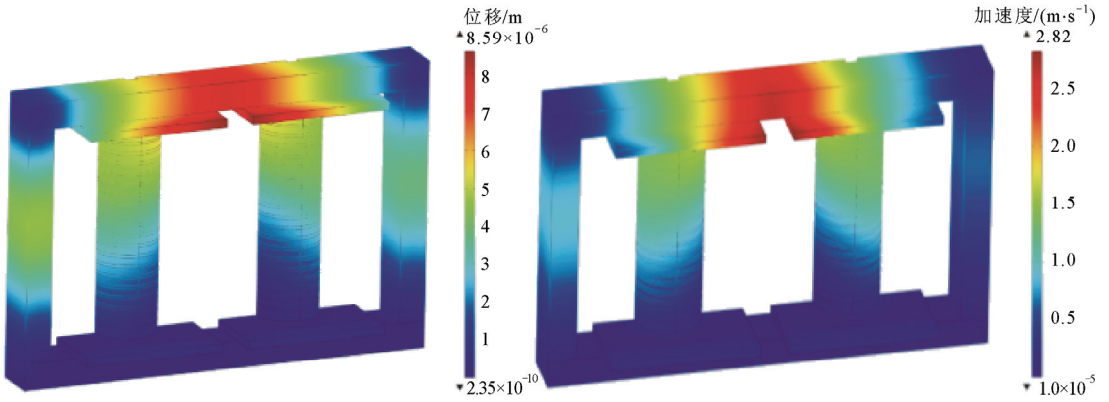
表 2　模型观测点位置

Table 2　Location of model observation points

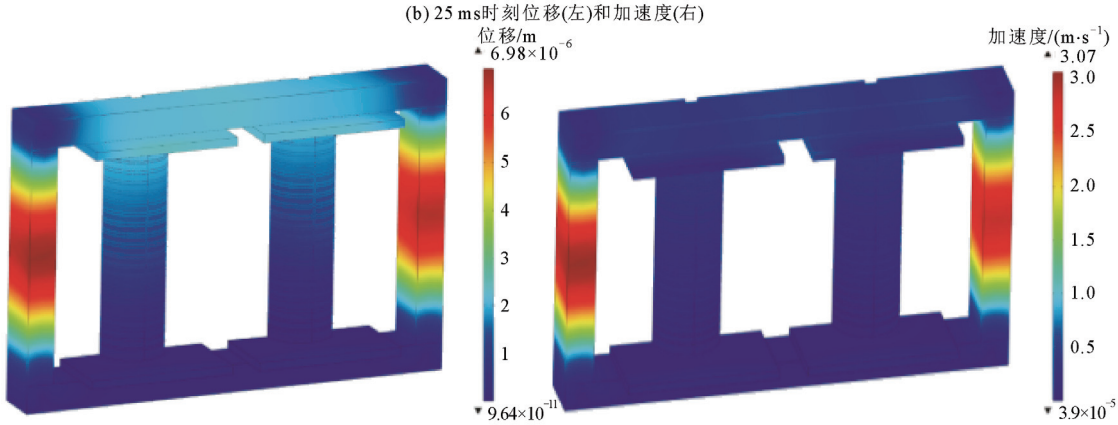
测点编号	位置
1	铁上表面中心
2	上磁分路内侧
3	旁轭内侧中部
4	旁轭外侧中部



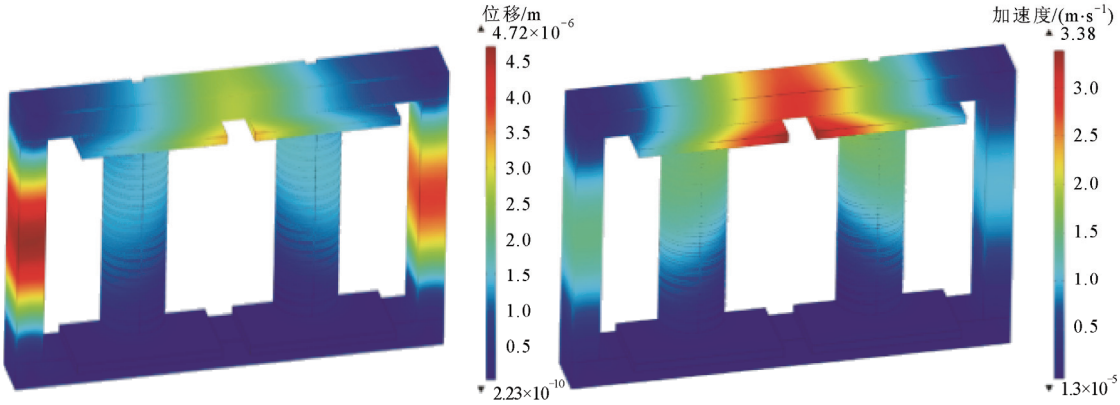
(a) 22.5 ms时刻位移(左)和加速度(右)



(b) 25 ms时刻位移(左)和加速度(右)



(c) 27.5 ms时刻位移(左)和加速度(右)



(d) 30 ms时刻位移(左)和加速度(右)

图 8 铁芯振动位移和加速度

Fig.8 Core vibration displacement and acceleration

铁芯振动加速度和位移均证明：工频激励周期内，测点 3、4 所在铁芯旁轭处铁芯振动最剧烈，振动加速度最大值为 5.928 m/s^2，振动位移最大值为 14.181 μm。

由表 3 可见，周期内观测点 3 处铁芯振动的平均值最大，且从 0~0.15 s 为一个近似周期变化，故为分析电抗器铁芯振动参数的特征，将观测点 3 处振动位移、加速度和所受应力的时域结果进行 FFT 变换到频域上，时域与频域对比结果如图 11 所示。

通过频谱分析可见，电抗器铁芯振动位移、加速度及应力均在 100 Hz 处达到最大，故电抗器铁芯振动信号频率以 100 Hz 为主，同时包含少量倍频信号。

3.3　结构-声场耦合分析

将结构场计算得到的应力作为载荷激励，再将计算得到电抗器铁芯的振动速度及位移耦合至声场作为噪声源，计算分析由电抗器振动在其周围产生的声压与声压级等参数。取空气域为半径 8 m 的球体，电抗器周围的声压及声压级分布如图 12 所示。

从图 12 可见，电抗器周围噪声信号也是以 100 Hz 为主，电抗器周围的声压级最大为 89.9 dB。因电抗器结构的对称性，电抗器外部声压级测点通常

表 3　各观测点振动参数平均值

Table 3　Average value of vibration parameters at each observation point

观测点	位移平均值/μm	加速度平均值/(m·s^{-2})
观测点 1	3.227	1.278
观测点 2	3.594	1.537
观测点 3	5.126	2.518
观测点 4	4.985	2.108

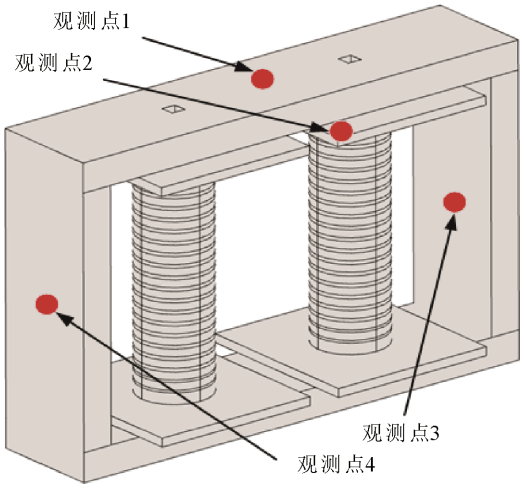


图 9　观测点示意图

Fig.9　Diagram of the observation point

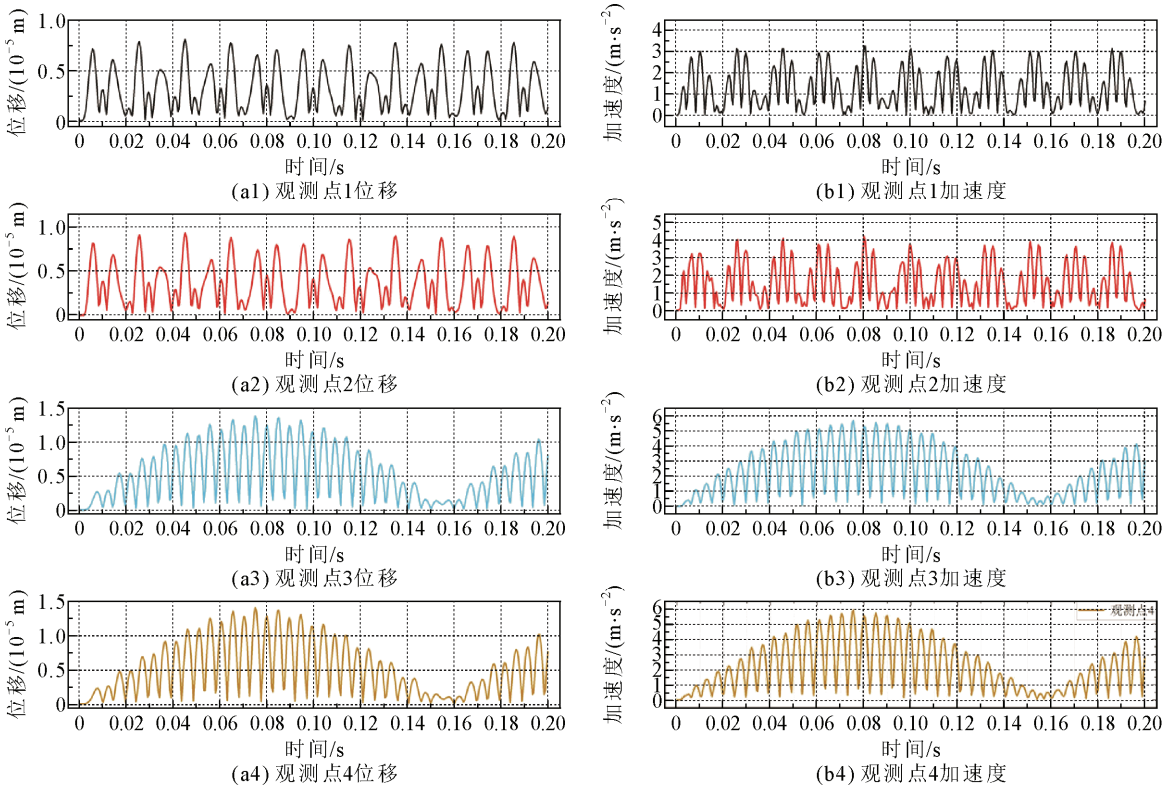


图 10　各测点加速度及位移

Fig.10　Acceleration and displacement at each measurement point

布设在电抗器外立面距离 L=1 m、高 h=1.5 m 的轮廓线上[5-6]，本文根据电抗器铁芯振动云图分布，在外侧轮廓线上选取正面中心处、侧面中心及角落处 5 个测点对电抗器周围噪声进行分析。测点布置示意图如图 13 所示，不同频率下各测点声压级如图 14 所示。

从不同频率下各测点声压级可以看出，电抗器噪声在 100 Hz 处的分量最大，侧面的噪声大于正面，达到 82.96 dB，与图 12 所示声场计算结果相互验证。

图 15 为电抗器 A 计权声功率级频谱分布情况，可看出 100 Hz 为中心的 1/3 倍频带 A 计权声功率级最大。

表 4 为大量测试所得的电抗器周围噪声数据[4]。相比之下，因仿真未考虑环境及风扇噪声，故存在一定误差。

图 16 为电抗器周围外场声压级分布，可看出电抗器侧面的声压级较大，与前面得到的振动电抗器铁芯最剧烈处位于旁轭这一结论相符[6]。

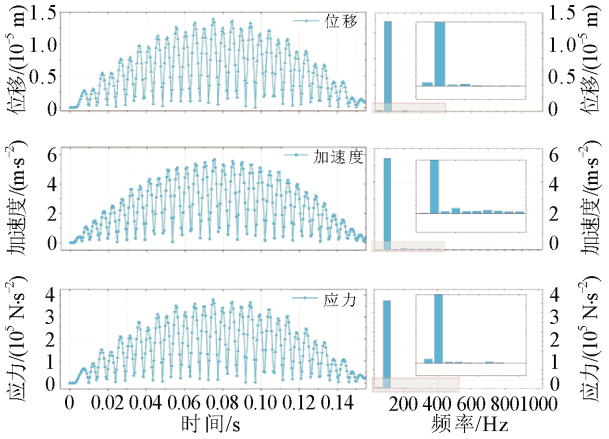


图 11 观测点 3 位移、加速度、应力时域和频谱

Fig.11 Measurement point 3 displacement, acceleration, stress spectrum

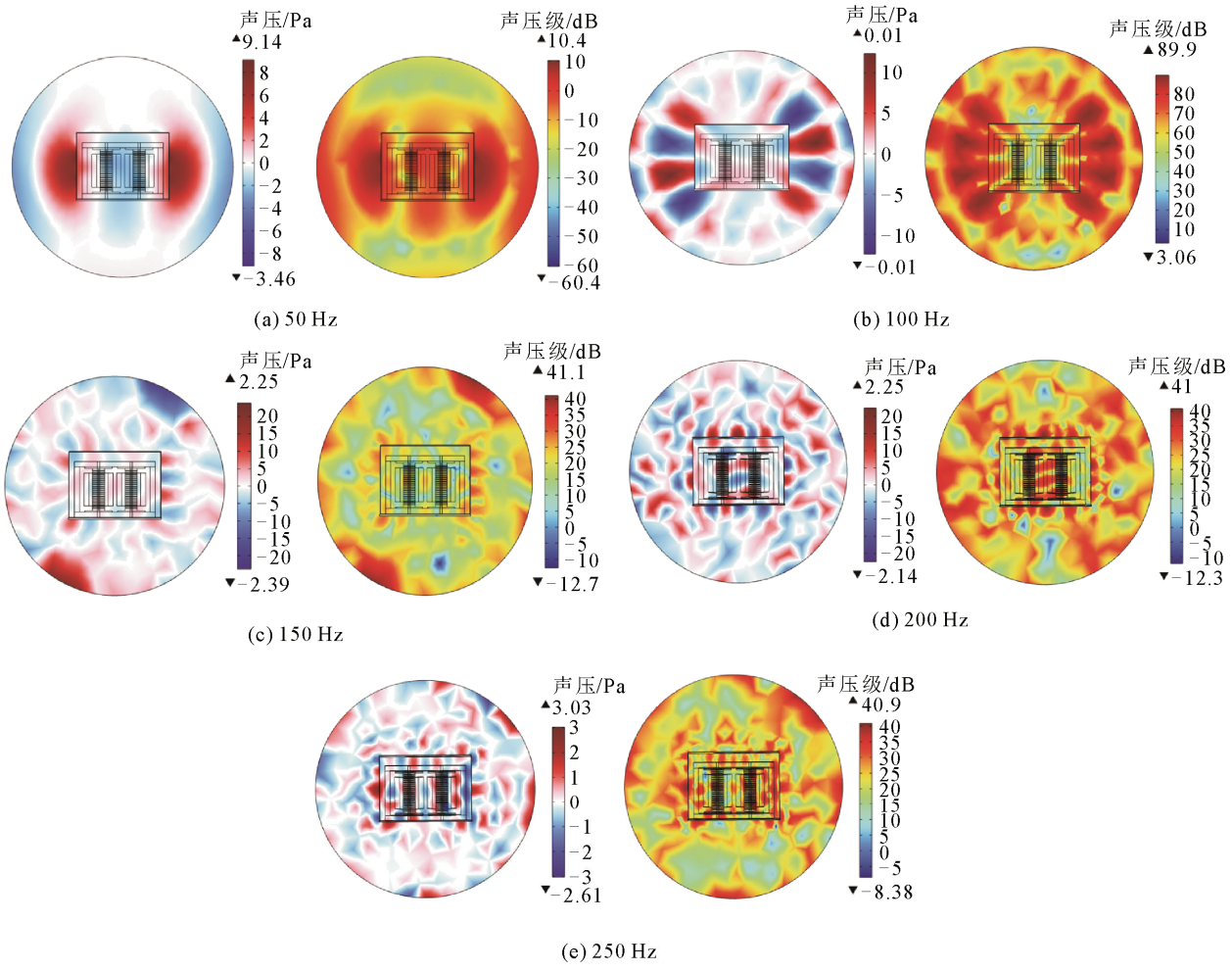


图 12 电抗器声压及声压级

Fig.12 Sound pressure and sound pressure level of reactors

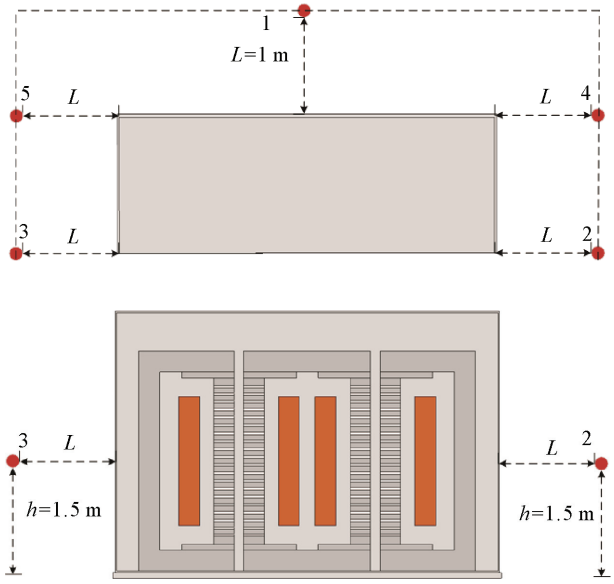


图 13　声压级测点分布

Fig.13　Distribution of sound pressure level measurement points

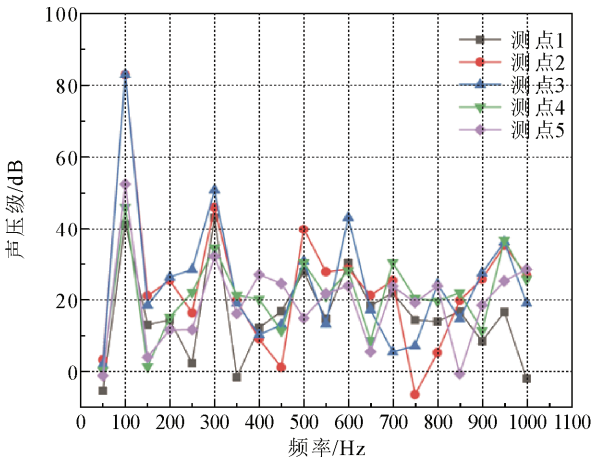


图 14　各测点声压级

Fig.14　Sound pressure level at each measurement point

4　磁致伸缩力和麦克斯韦力对铁芯振动的影响分析

目前已有研究较少考虑磁致伸缩力对电抗器铁芯振动的影响，故本章进一步探究了磁致伸缩力和麦克斯韦力对电抗器铁芯振动造成的影响，研究分析了考虑磁致伸缩力和未考虑磁致伸缩力(仅考虑麦克斯韦力)情况下电抗器铁芯振动结果。观测点 3 处铁芯振动最剧烈，图 17 所示为 3 种情况下测点 3 处时域上振动位移和加速度变化曲线。同时因一个工频激励周期中铁芯内主磁通变化两次方向，故磁致伸缩力和麦克斯韦力的主频率均为 100 Hz，图

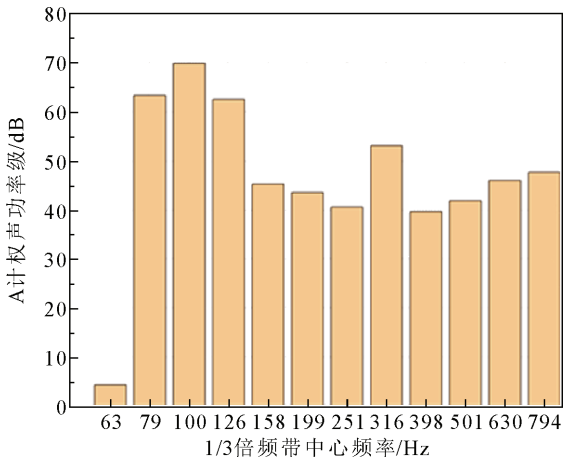


图 15　A 计权声功率级频谱分布

Fig.15　A weighted sound power level spectral distribution

表 4　电抗器声功率级

Table 4　Reactor sound power level

电压等级/kV	额定容量/MVA	声功率级/dB
500	50	85~91
	70	86~93
750	100	87~95
	120	88~96
1000	200	90~98
	240	92~98
	320	95~102

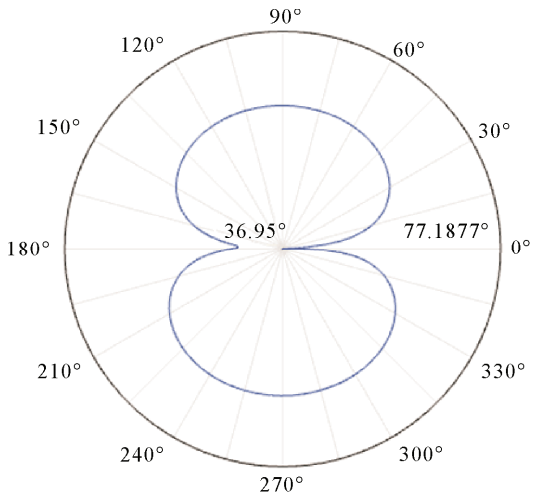


图 16　外场声压级分布

Fig.16　Outfield sound pressure level distribution

18 对比分析了 100 Hz 处 3 种情况下铁芯振动情况。

从图 17 所示测点 3 处时域上铁芯振动位移、加速度变化曲线和图 18 所示铁芯所受位移和应力在频域上的云图分布、铁芯形变结果可看出，磁致伸缩力作用方向与麦克斯韦力相反，且在与麦克斯韦力耦合作用后会使铁芯所受总力小于未考虑磁致

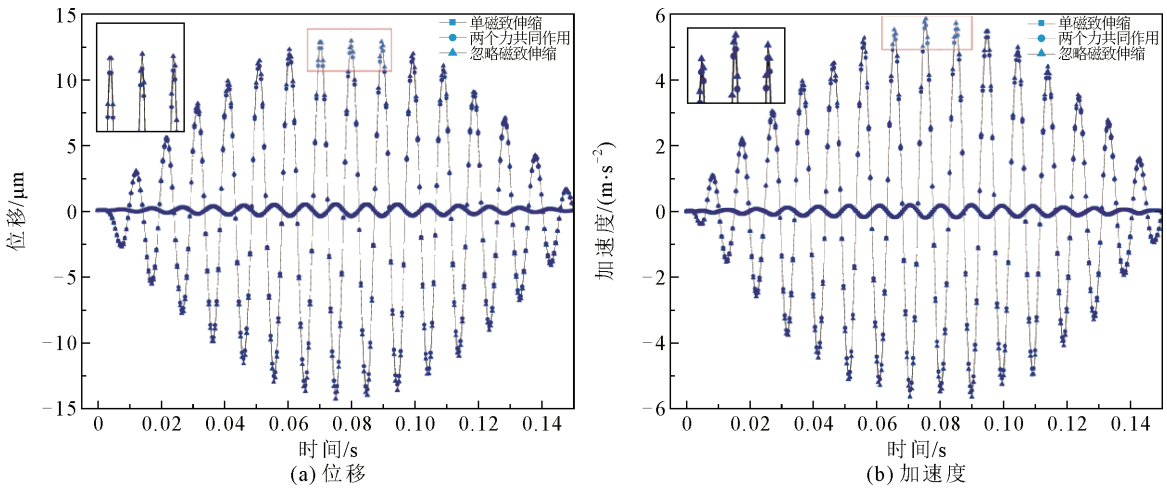


图 17 测点 3 处位移分量对比

Fig.17 Comparison of displacement components at measurement point 3

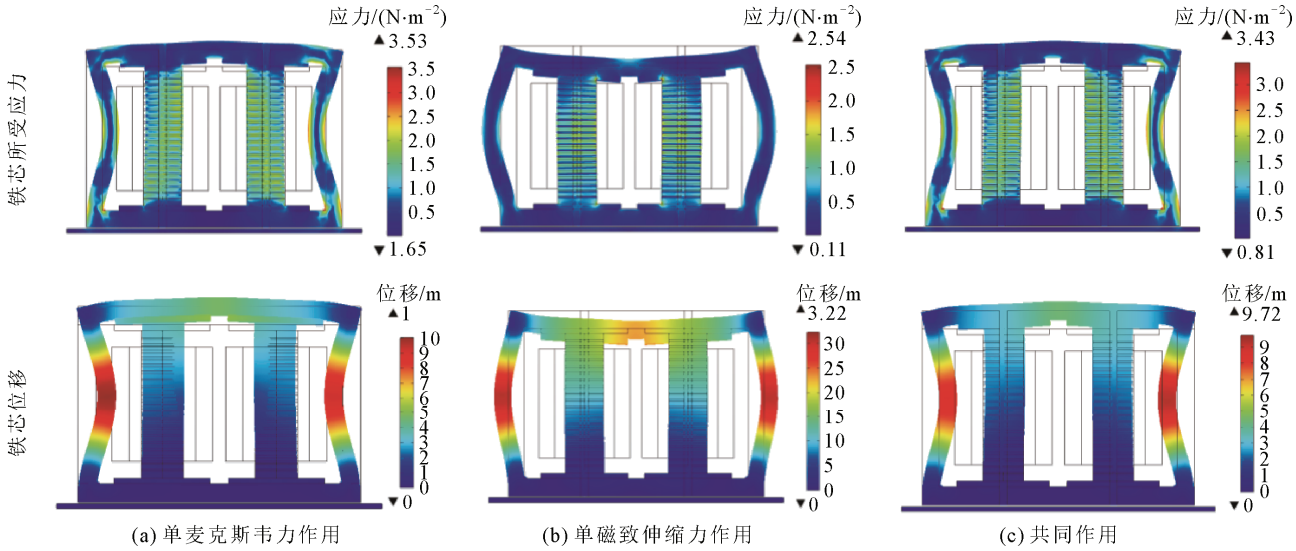


图 18 3 种情况下铁芯受力及位移对比

Fig.18 Comparison of core forces and displacements in three case

伸缩力的情况。铁芯振动方向在磁致伸缩力单独作用时与忽略磁致伸缩力的作用时相反，故 2 个力共同作用会导致铁芯振动衰减。

由图 17 中的局部放大图(三角符号为忽略磁致伸缩力，圆圈符合为两个力共同作用)也能清晰看出：相比忽略磁致伸缩力作用，两个力共同作用时铁芯的位移和加速度会减小，证明了磁致伸缩力与麦克斯韦力对电抗器铁芯振动造成的影响会相互衰减。由图 17 所示观测点 3 位移和加速度的时域变化曲线可见，两个力引起的铁芯振动明显反向。在电抗器设计减振方面，根据这一特性可选用具有较高磁感的取向硅钢作为电抗器铁芯材料，扩大两个力的衰减作用，使铁芯在两个力作用后的应变减小，从而降低电抗器铁芯的振动，以达到减振效果。

5 结论

1）本文主要研究了特高压并联电抗器内部结构、铁芯振动机理，建立了特高压并联电抗器模型，通过磁-结构-声场的多物理场耦合分析，采用有限元法对电抗器振动过程进行仿真，系统分析了电抗器振动机理及周围噪声的分布特性，探究了磁致伸缩力和麦克斯韦力分别对电抗器铁芯振动的影响。

2）特高压并联电抗器铁芯所受的磁致伸缩力和麦克斯韦力均以 100 Hz 为主频，故电抗器铁芯本体振动信号和噪声信号也是以 100 Hz 为主，同时仿真得到电抗器的 A 计权声功率级约为 90 dB。因仿

真未考虑环境及风扇噪声，故与变电站中电抗器噪声实测值相比存在一定误差。

3）分别研究麦克斯韦力和磁致伸缩力对特高压并联电抗器铁芯振动的影响，验证了麦克斯韦力和磁致伸缩力耦合作用后会使电抗器铁芯所受总力小于未考虑磁致伸缩力的情况。且从铁芯所受应力和振动位移云图分布、形变和时域上振动位移、加速度变化曲线均可看出：当两个力共同作用时，铁芯振动小于忽略磁致伸缩力的情况，证明这两个力之间存在相互衰减作用。可根据这一特性对电抗器铁芯材料进行优化，选用具有较高磁感的硅钢材料，扩大两个力之间的衰减作用，从而降低电抗器铁芯的振动，在电抗器的设计上实现减振。

参考文献　References

[1] 葛德馨. 特高压并联电抗器铁心振动研究及仿真分析[D]. 济南：山东大学，2017.
GE Dexin. Research and simulation on core vibration of UHV shunt reactor[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2017.

[2] 常　晨，刘兰荣，卢美林，等. 并联电抗器等效模型的振动噪声特性试验研究[J]. 电气技术，2019，20(2)：37-41，47.
CHANG Chen, LIU Lanrong, LU Meilin, et al. Investigates the characteristics of vibration and noise based on the equivalent model to shunt reactor[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(2): 37-41, 47.

[3] 谭黎军，陈洪波，欧　强，等. 特高压并联电抗器运行振动与噪声特性研究[J]. 变压器，2016，53(7)：43-46.
TAN Lijun, CHEN Hongbo, OU Qiang, et al. Research on vibration and noise characteristics of UHV shunt reactor[J]. Transformer, 2016, 53(7): 43-46.

[4] 周　兵，王延召，胡静竹，等. 并联电抗器振动特性及声功率级计算[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3685-3692.
ZHOU Bing, WANG Yanzhao, HU Jingzhu, et al. Vibration characteristics and acoustic power level calculation of shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3685-3692.

[5] 周　兵，宋　倩，倪　园，等. 高压并联电抗器噪声特性及控制[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1819-1826.
ZHOU Bing, SONG Qian, NI Yuan, et al. Noise characteristics of high-voltage shunt reactors and its control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1819-1826.

[6] 倪　园，周　兵，裴春明，等. 1000 kV 特高压并联电抗器周围声波干涉特性分析[J]. 高电压技术，2014，40(12)：3926-3932.
NI Yuan, ZHOU Bing, PEI Chunming, et al. Characteristics analysis of acoustic interference around 1000 kV UHV shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3926-3932.

[7] 周　兵，王延召，胡静竹，等. 基于振动测量的并联电抗器声场计算[J]. 高压电器，2019，55(11)：105-112.
ZHOU Bing, WANG Yanzhao, HU Jingzhu, et al. Sound field calculation of shunt reactor based on vibration measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 105-112.

[8] 高树国，张明文，吴书煜，等. 基于振动感知的油浸式电抗器松动故障检测方法[J]. 振动与冲击，2022，41(11)：42-49.
GAO Shuguo, ZHANG Mingwen, WU Shuyu, et al. Loose fault detection method of oil immersed reactor based on vibration perception[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(11): 42-49.

[9] 张鹏宁，李　琳，程志光，等. 并联电抗器与变压器模型铁心振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5273-5281.
ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5273-5281.

[10] 栾　涛. 750 kV 油浸式并联电抗器电磁与振动研究[D]. 大连：大连理工大学，2015.
LUAN Tao. Research on electromagnetism and vibration of 750 kV oil-immersed shunt reactor[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2015.

[11] 吴书煜，马宏忠，姜　宁，等. 基于多物理场耦合的特高压并联电抗器振动噪声仿真分析与实验研究[J]. 电力自动化设备，2020，40(3)：122-127.
WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 122-127.

[12] ROSSI M, LE BESNERAIS J. Vibration reduction of inductors under magnetostrictive and Maxwell forces excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(12): 8403406.

[13] ZHANG P N, LI L. Vibration properties of two-stage magnetic-valve controllable reactor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 9400404.

[14] ZHANG P N, LI L, CHENG Z G, 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): 9400205.

[15] 张凌云. 铁心本体振动噪声特性的实验与仿真研究[D]. 保定：华北电力大学，2021.
ZHANG Lingyun. Experimental and simulation study on vibration and noise characteristics of core body[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2021.

[16] 张鹏宁，李　琳，聂京凯，等. 考虑铁心磁致伸缩与绕组受力的高压并联电抗器振动研究[J]. 电工技术学报，2018，33(13)：3130-3139.
ZHANG Pengning, LI Lin, NIE Jingkai, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3130-3139.

[17] 律方成，郭佳熠，程涣超，等. 计及铁心叠片规则与流-固耦合的特高压并联电抗器铁心振动计算方法[J]. 电网技术，2021，45(2)：802-810.
LÜ Fangcheng, GUO Jiayi, CHENG Huanchao, et al. Calculation of UHV shunt reactor core vibration considering core lamination rules and fluid-solid coupling[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 802-810.

[18] 王革鹏，金文德，曾向阳，等. 特高压并联电抗器铁心振动的分析与控制研究[J]. 电工技术学报，2022，37(9)：2190-2198.
WANG Gepeng, JIN Wende, ZENG Xiangyang, et al. Analysis and control research on core vibration of UHV shunt reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2190-2198.

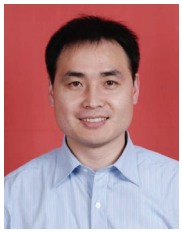
[19] 袁发庭，姬睿氢，吕　凯，等. 考虑硅钢片磁致伸缩特性的干式铁芯电抗器铁芯振动分析及优化[J]. 高电压技术，2023，49(4)：

1486-1494.
YUAN Fating, JI Ruiqing, LÜ Kai, et al. Vibration analysis and optimization of dry-type core reactor with silicon steel sheet magnetostrictive model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 2190-2198.

[20] 袁发庭，陈步康，陈　炜，等. 基于电磁–结构力场耦合的铁芯电抗器振动特性分析及优化方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2374-2385.
YUAN Fating, CHEN Bukang, CHEN Wei, et al. Vibration characteristic analysis and optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-structural force field coupling[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2374-2385.

[21] 郭佳熠，耿江海，律方成，等. 基于气隙结构的特高压并联电抗器铁芯减振技术[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3892-3900.
GUO Jiayi, GENG Jianghai, LÜ Fangcheng, et al. Vibration reduction technology of UHV shunt reactor core based on air gap structure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3892-3900.

[22] 严　密，彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州：浙江大学出版社，2006：254.
YAN Mi, PENG Xiaoling. Fundamentals of magnetism and magnetic materials[M]. Hangzhou, China: Zhejiang University Press, 2006: 254.



杨　帆(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作
E-mail: yangfancqu@gmail.com

YANG Fan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-04-21　修回日期　2023-08-12　　编辑　卫李静