

# 谐波激励下双层包封空心电抗器的振动噪声特性研究

高璐<sup>1</sup>, 卢铃<sup>2</sup>, 祝令瑜<sup>1</sup>, 李金宇<sup>3</sup>, 汲胜昌<sup>1</sup>, 李沂新<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 国网湖南电力科学研究院, 长沙 410007;  
3. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

**摘要:** 广泛应用于高压换流站的干式空心电抗器承受频率含量丰富的谐波电流作用, 产生严重的振动及噪声污染问题。干式空心电抗器通常为多层包封结构, 文中以一台双层包封的电抗器为例, 对其在不同谐波激励下的振动及噪声特性开展了研究, 结合磁场力仿真和模态试验分析, 明确了内外层包封之间的振动响应的关系, 及整体声场的辐射特性。研究结果表明, 空心电抗器在不同谐波电流激励下的振动分布受其模态特性主导, 内外层包封的振动形态均呈现明显的波峰波谷分布, 且与临近固有频率对应的模态振型相似; 内外层包封在同一电流激励下的振动幅值和相位相近, 具有一致的振动特性; 电抗器整体在水平面的噪声辐射呈瓣状分布, 具有明显的方向性。

**关键词:** 干式空心电抗器; 谐波电流; 振动特性; 噪声分布

## Research on Vibration and Noise Characteristics of Double-layer Air-core Reactor Under Harmonic Excitation

GAO Lu<sup>1</sup>, LU Ling<sup>2</sup>, ZHU Lingyu<sup>1</sup>, LI Jingyu<sup>3</sup>, JI Shengchang<sup>1</sup>, LI Yixin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China,  
2. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410007, China, 3. China Electric Power Research Institute,  
Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Dry-type air-core reactor, which is widely used in HVDC converter stations, bears the harmonic current action of abundant frequency content, producing severe vibration and noise pollution problems. Dry-type air-core reactor is usually a multilayer package structure, in this paper, a double-layer air-core reactor is used as an example to study its vibrational and noise characteristics under different harmonic excitations. Combining magnetic force simulation and modal analysis, the relationship of vibration response between the inner and outer layer of the air-core reactor, and the radiation characteristics of the overall are clarified. The results of this study show that the vibration distribution of the air-core reactor under different harmonic current excitations is dominated by its modal characteristics. The vibration patterns of the inner and outer layer show obvious peak and trough distribution, and are similar to the mode shapes corresponding to the adjacent natural frequencies. The vibration amplitude and phase of the inner and outer layers under the same current excitation are similar, and have consistent vibration distribution; The noise radiation of the air-core reactor as a whole in the horizontal plane is distributed in a lobe-like manner, which has obvious directionality.

**Key words:** dry-type air-core reactor; harmonic currents; vibration characteristics; noise distribution

## 0 引言

随着高压直流输电工程的日益发展, 电力系统对于滤波电抗器的需求和谐波容量也随之升高。广泛应用于高压换流站的干式空心电抗器, 包括滤波电抗器、桥臂电抗器等, 承受频率含量丰富的谐波电流作用, 产生严重的振动及噪声污染问题<sup>[1-3]</sup>。目前换流站关于电抗器的噪声治理手段主要为加装隔声罩及建设隔声围墙等外部措施<sup>[4-6]</sup>, 虽然取得了一定的效果, 但也使得电抗器散热不足, 内部绝缘系统运行在高热场条件下, 影响运行可靠性和经济性<sup>[7-9]</sup>。因此, 为了从根本上改善干式空心电抗器的噪声污染问题,

需针对设备本体开展相关的振动及噪声特性研究, 从而为声源本体降噪措施的提出奠定基础。

目前, 国内外的学者、生产厂家等对干式空心电抗器的振动科技噪声特性开展了大量的研究。CIGRE和IEC的报告中提出了干式空心电抗器噪声产生的原因, 即: 流经干式空心电抗器的电流产生磁场, 流经绕组的电流和其感生磁场相互作用, 形成绕组上的电磁力——洛伦兹力, 电抗器线圈会承受较大的径向洛伦兹力而产生噪声<sup>[10]</sup>。文[11]基于磁固耦合方式, 对干式空心电抗器在电磁力下的振动开展了数值计算, 分析了工频电流激励下电抗器的振动情况, 得到

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目(5216A021003T)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5216A021003T).

了电抗器振动以径向为主、径向振动大、轴向振动较小的结论。文[12]对电抗器包封表面在工频下的振动分布开展了测量,发现表面振动并不是均匀分布的轴对称形式,且星形架下方振动偏大。上述文献主要针对的是工频电流激励下干式空心电抗器的振动特性,对于谐波并未考虑。文[13]开展了单层包封电抗器在多次谐波电流激励下的扫频实验,结合振动模态分析提出了不同谐波频率下的振动机理,并通过建立的等效有限元模型,仿真研究了结构参数对电抗器固有频率的影响规律。此外,目前对于多次谐波激励下单层包封电抗器的振动噪声特性已开展了大量实验研究工作,但由于开展此类实验需要大容量的谐波加载系统及消声室的环境,一般实验室并不具备这个条件,因此已有电抗器振动噪声特性的实验研究一般都是基于单层包封或者单次谐波的,而多次谐波多包封的研究更多的还是采用仿真计算的手段或者是现场实测<sup>[6-13-17]</sup>。因此,目前对于直流输电工程中的干式空心电抗器而言,谐波激励下多层包封时的振动噪声特性并没有开展相应的实验研究,包封间振动之间的相互关系尚未明确。

干式空心电抗器作为电力系统中的电感元件,为了提升通流及散热能力,通常设计为多层包封结构,并在包封之间用多个撑条组成的阵列隔开,庞大的外部体积、狭窄的内部空间,使得常规的振动测量手段难以应用于内部包封的振动测量。文中以一台双层包封的干式空心电抗器为例,建立了场路耦合的磁场仿真模型,得到了各层包封的磁场力分布特性;结合扫描式激光测振仪和压电式振动传感器,得到了包封在不同谐波电流频率下的振动分布特性及内外层包封振动特性的关系,以及在空间中的噪声分布特性,并结合模态实验分析了固有机特性对其振动及噪声特性的影响规律。文中工作对于进一步认识各层包封振动特性及其相互关系、多层包封电抗器振动噪声影响因素等具有指导意义,有助于降噪措施的深入研究和有效提出。

## 1 双层包封空心电抗器的磁场力特性

文中所研究的双层包封干式空心电抗器的基本结构见图 1,主要由两层包封、星形架和支撑绝缘子组成。包封内部为多层铝线圈并联绕制,浸渍环氧并固化后形成坚硬的筒状结构。内外层包封之间由撑条隔开,为自然对流提供散热通道,同时与星形架共同为包封提供一定强度的机械支撑。该电抗器电气及尺寸参数见表 1。

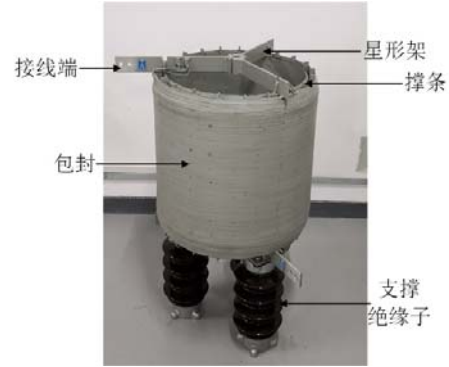


图 1 双层包封空心电抗器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the double-layer air-core reactor

表 1 双层包封空心电抗器参数

Table 1 Parameters of the double-layer air-core reactor

参数	数值
额定电感/mH	1.00
额定电流/A	220
包封高度/m	0.60
内存包封内径/m	0.500
外层包封内径/m	0.565
包封厚度/m	0.014 5

为了提高计算效率,加快计算速度,在开展干式空心电抗器的磁场仿真计算时,对模型进行一定简化处理:①不考虑集肤效应,认为导线中的电流均匀分布;②不考虑星形架上流进和流出的电流,忽略星形架对磁场分布的影响,也就是只计算包封中导线流过电流所产生的磁场。

为清晰直观地展现电抗器内外层包封磁场力的分布情况,采用三维坐标建模,导线材料定义为铝,建立空心电抗器的立体模型。在给定流过空心电抗器的电流时,由于自感和互感的影响,流过各层线圈的电流并不均匀分布,需要采用场路耦合的方法对其进行计算。场路耦合模型见图 2,通过有限元模型计算各个线圈的自感以及线圈之间的互感,将计算结果导入电路模型中计算流过各层线圈的电流,最终将电流的计算结果导回有限元模型得到电抗器的磁场分布。

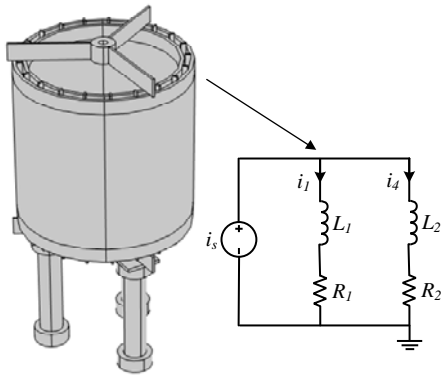


图2 双层包封电抗器场路耦合仿真模型

Fig. 2 Field circuit coupling simulation model of double-layer air-core reactor

对于空心电抗器，其感抗远大于阻抗，因此在不同的电流频率下，各层包封的电流分配比例几乎相同，最终产生的磁场分布特性也基本相同，文中以工频电流为例，对空心电抗器场路耦合仿真模型施加 220 A 电流，计算得到电抗器中的磁感应强度分布见图 3。和铁心设备相比，空心电抗器漏磁严重。磁感应强度呈对称分布，在电抗器中心部分磁感应强度较大，最大值为 22.86 mT。其中内层包封流过电流为 100.84 A，外层包封流过电流为 119.16 A。电感计算结果为 0.998 mH，和设计值 1 mH 相比误差仅为 0.2%。磁场力的计算结果见图 4，基本呈轴对称分布，主要为径向分量，越远离包封的中心水平面，电磁力的轴向分量越大，这是由于包封端部磁力线的倾斜造成的。轴向磁场力呈现出使得包封压缩的趋势，径向磁场力使内外层包封均呈现向外扩张的趋势。

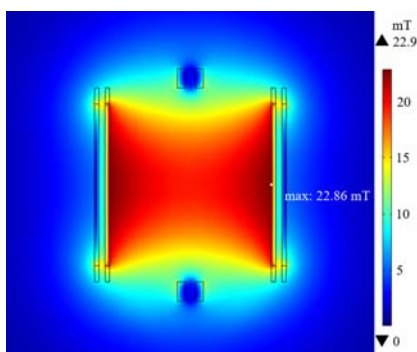


图3 磁感应强度分布截面图

Fig. 3 Cross section of magnetic induction intensity distribution

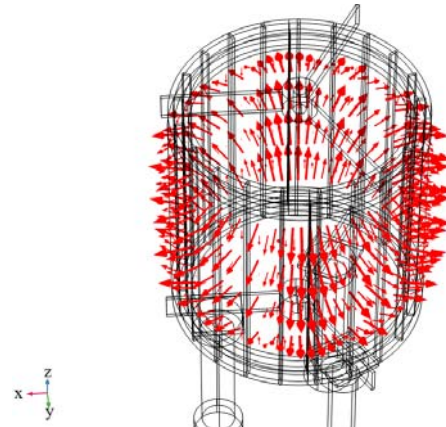


图4 电抗器磁场力分布图

Fig. 4 Magnetic force distribution of the air-core reactor

## 2 多层包封空心电抗器的实验模态分析

为了获得电抗器内外层包封之间的振动关系，首先通过模态实验的手段，来分析其固有机机械特性。电抗器模态实验平台由被试电抗器模型、锤击激励源、加速度传感器、数据采集系统及分析系统组成。使用冲击力锤 PCB086C03 在电抗器包封的某个位置上施加冲击载荷，由安装在包封不同位置的压电式振动加速度传感器 PCB352C65 拾取冲击载荷下包封的振动信号。冲击力锤和振动加速度传感器的参数分别见表 2、3。为了获得包封整体的模态特征，将 7 个加速度传感器安装在包封的不同位置处，采用固定锤击点、移动传感器的方法，最终得到所有测点的模态频响函数。

表2 压电式振动加速度传感器 PCB352C65 参数

Table 2 Parameters of piezoelectric vibration acceleration sensor PCB352C65

参数名称	数值
质量/g	2
灵敏度/[mV·(m·s <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup> ]	10
量程/(m·s <sup>-2</sup> )	500
分辨率/(m·s <sup>-2</sup> )	<0.001 6
频响范围/Hz	0.5~10 000.0
谐振频率/Hz	≥35 000

表3 压电式振动加速度传感器 PCB352C65 参数

Table 3 Parameters of impact Hammer PCB086C03

参数名称	数值
质量/kg	0.16
灵敏度(±15%)/(mV·N <sup>-1</sup> )	2.25
量程(峰值)/g	50
谐振频率/Hz	≥22 000

根据文中实验所采用的双层包封电抗器，根据其

结构特点, 分别在内层包封的内表面和外层包封的外表面, 各布置 5 行、24 列振动测点, 激振点位于包封外侧。内层包封和外层包封的 FRF 对比见图 5, 在前 400 Hz 频率范围内, 内层包封和外层包封的 FRF 曲线几乎重合; 而当频率高于 400 Hz 时, 由于力锤激励能量在传递到内层包封时的损失, 导致内层包封的振动响应有所降低。内层包封和外层包封具有几乎相同的固有频率, 其模态振型可以用一组坐标  $(m, n)$  来表示, 其中  $m$  表示包封振型的轴向半波数,  $n$  表示包封振型的环向波数。绘制前 4 阶模态振型见图 6。

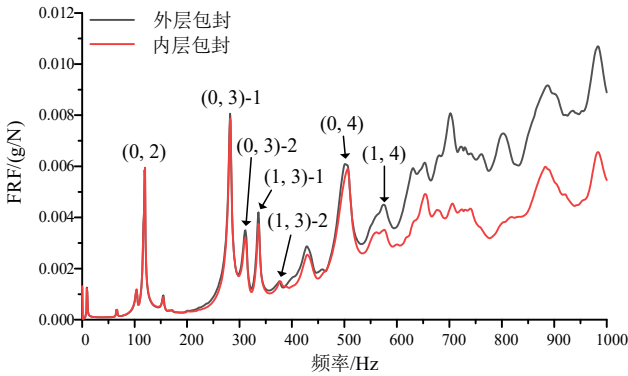


图 5 内层包封和外层包封的 FRF 曲线对比

Fig. 5 Comparison of FRF curves between inner and outer winding

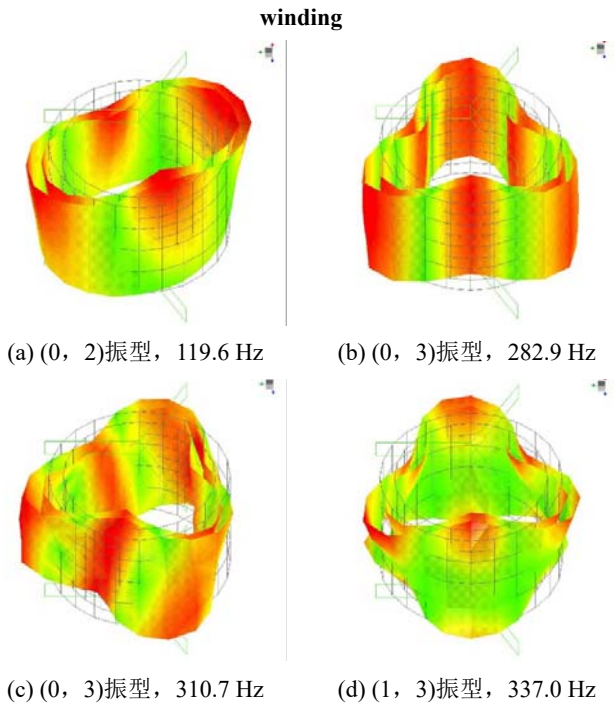


图 6 双层包封电抗器的前 4 阶模态振型

Fig. 6 The first four mode shapes of the double-layer air-core reactor

由图 6 的前 4 阶模态振型可以看出, 在同一阶固有频率下, 内层包封和外层包封具有相似的模态振

型, 这表明电抗器的内外层包封是紧密固定的整体。根据模态叠加法, 电抗器的各层包封在磁场力的激励下也将具有相似的振动形态。由于模态振型不均匀分布, 在不同电流频率的激励下, 包封表面振动也呈现不均匀分布的特征, 以下将通过实验对这一结论开展进一步的验证。

### 3 谐波激励下多层包封空心电抗器的振动特性

为了获得多层包封空心电抗器在不同谐波频率电流激励下的振动特性, 文中通过谐波加载系统对其施加频率可控的谐波电流, 通过扫描式激光测振仪来获得其外层包封表面的振动特性。谐波加载及振动测量系统见图 7, 可控谐波电源额定容量为 180 kVA, 可以实现包括工频在内的最多 10 个不同频率的谐波同时输出, 输出电流的频率范围为 50~250 0 Hz, 每个频率分量的幅值和相位连续可调, 可模拟多种滤波电抗器的运行工况。扫描式激光测振仪基于激光多普勒原理测量目标表面的二维振动特征, 可实现非接触式测量, 部分参数见表 4。

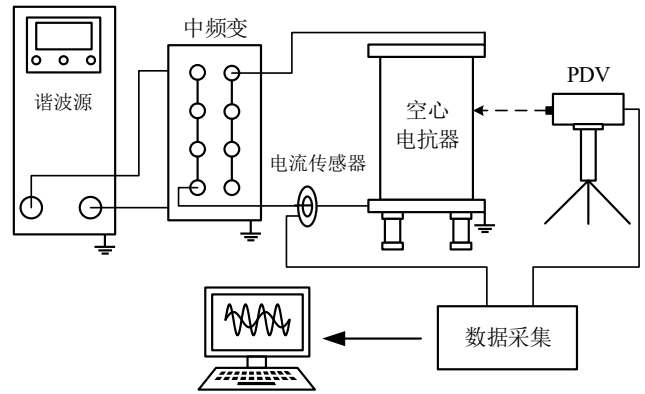


图 7 谐波加载及振动测量系统

Fig. 7 Harmonic loading and vibration measurement system

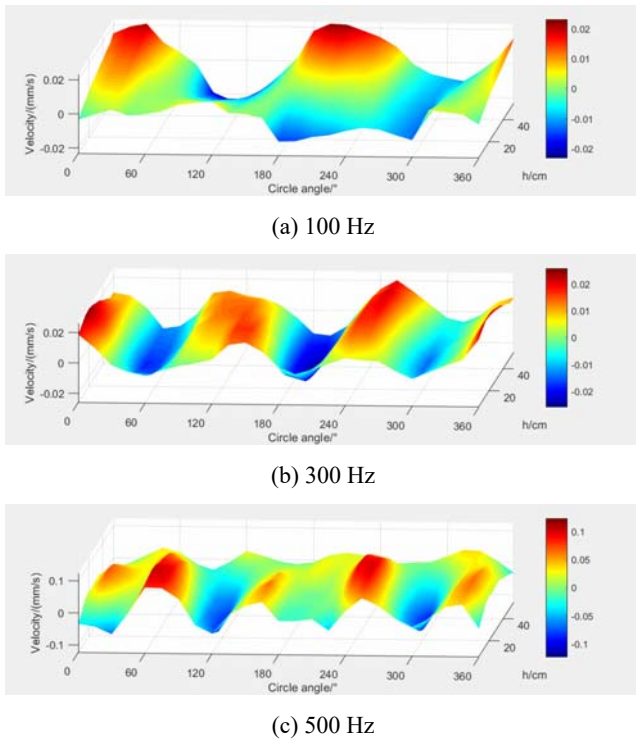
表 4 扫描式激光测振仪参数

Table 4 Parameters of the scanning vibrometer

参数名称	数值
灵敏度/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-2})$	0.007 1
量程/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.005
频率范围/kHz	0~100
测量距离/m	0.3~20.0

利用扫描式激光测振仪最终测量得到了电抗器外层包封在不同谐波频率激励下的振动分布形态, 部分频率下的结果见图 8。为了直观显示外包封的振动分布情况, 将包封的圆柱面展开为二维矩形,  $x$  坐标

为包封环向的角度,  $y$  坐标为包封的高度。包封的形变在绘图时进行了一定比例的放大, 其振动速度的大小通过  $z$  坐标及云图颜色的深浅来表示。



**图 8 电抗器外层包封在不同频率下的振动分布**  
**Fig. 8 Vibration distribution of the outer layer of the air-core reactor at different frequencies**

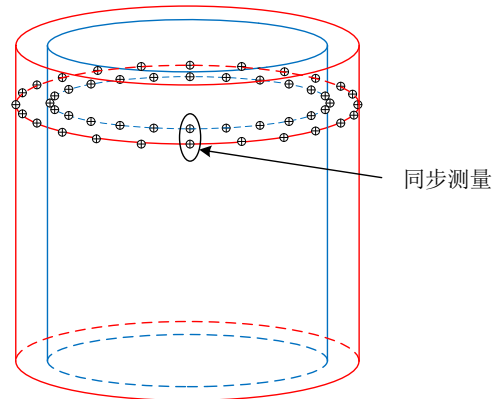
从图 8 可以看出, 电抗器外层包封的振动分布并不均匀, 包封在环向上呈近似的正弦分布, 各个测点的振动之间存在明显的相位差。以 300 Hz 为例, 包封在环向上共包含 3 对波峰和波谷, 即 3 个环向波, 与 282.9 Hz 对应的(0, 3)模态振型相似, 说明在 300 Hz 下的振动主要受(0, 3)模态振型影响, 其他频率下也存在类似的规律。

为了获得电抗器多层包封结构在电流激励下的振动特性, 在得到了外层包封振动分布的基础上, 还需对内层包封的振动情况开展研究。由于电抗器多层包封结构的限制, 内层包封的振动难以通过激光测振的方式获取, 文中以接触式的压电式传感器来测量内包封的振动, 见图 9。



**图 9 电抗器内层包封的振动测量**  
**Fig. 9 Vibration measurement of the inner layer of the air-core reactor**

为了对比内外层包封的振动特性, 在外层包封的对应位置同样布置了压电式传感器, 同步采集内外层包封的振动情况。内外层包封某一行的测点位置的示意图见图 10。采用扫频加载的方式对电抗器施加单频的激励电流, 起始电流频率 5 Hz, 频率间隔为 5 Hz, 终止频率为 650 Hz, 最终得到各个测点在电流激励下的振动频率响应曲线。



**图 10 内外层包封某一行的测点位置示意图**  
**Fig. 10 Schematic diagram of measurement point for inner and outer layer of a certain row**

分别将内层包封和外层包封的所有测点的频率响应曲线求平均, 得到内外层包封在电流激励下的振动频响曲线见图 11, 其中某个位置内外层测点在不同频率下的相位差见图 12。对比同一测点位置内外层包封在不同频率下的振动幅值与振动相位, 在低于 1 000 Hz 范围内, 内层包封和外层包封的振动响应曲线几乎相同; 在低于 800 Hz 范围内, 内层包封和外层包封在同一位置的振动相位几乎相同。当频率高于 800 Hz 时, 内外层的相位差分散性较大, 可能是由于传感器的测量误差所致。

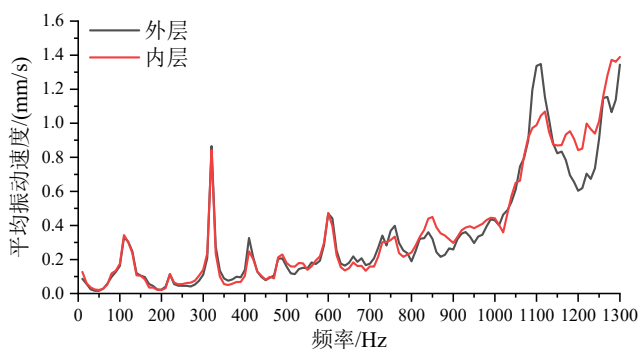


图 11 电流激励下内外层振动频率响应对比

Fig. 11 Comparison of vibration frequency response curves of inner and outer layers under current excitation

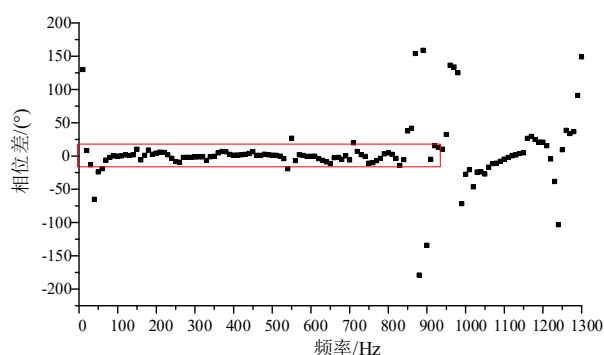
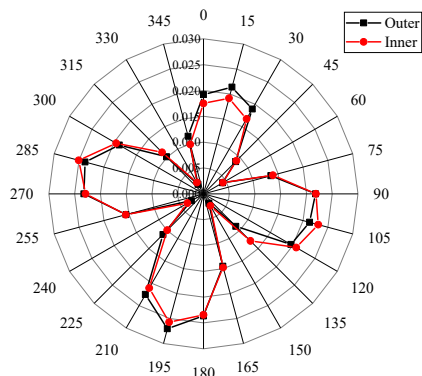


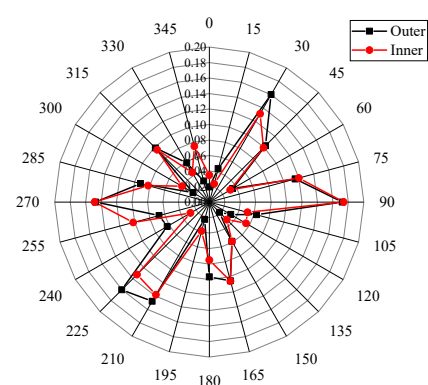
图 12 电流激励下内外层相位差

Fig. 12 The phase difference between the inner and outer layers under current excitation

进一步的，对比了内外层包封在同一环向位置的振动分布情况，部分频率下的结果见图 13，内外层包封同样呈现不均匀分布的振动特性，且振动幅值也近乎相同。综合上述研究，对于双层包封电抗器，电流激励下的内外层包封具有一致的振动特性。



(a) 150 Hz



(b) 400 Hz

图 13 内外层包封的环向振动分布对比

Fig. 13 Comparison of circumferential vibration distribution of inner and outer layer windings

#### 4 谐波激励下多层包封空心电抗器的噪声特性

相比于激光测振仪等振动测量设备，含有驻极体薄膜的传声器更容易受到磁场的干扰。此外，电抗器包封振动的不均匀分布将导致声场呈现复杂的方向性，对噪声测点的数量提出了更高的要求，进一步增大了通过实验研究电抗器噪声特性的难度。因此，文中主要采用边界元法对电抗器的噪声分布进行计算，噪声仿真模型见图 14，支撑绝缘子的振动可以忽略，因此仅对包封和星形架进行建模；考虑到包封厚度远小于其半径，认为包封内表面和外表面的振动速度相同。根据测得的包封表面径向振动速度，逐点对电抗器内外层包封表面进行赋值，如图 13 中包封表面的红色点即为速度边界条件的作用点。设定地面为全反射面，利用间接边界元法对整个空间的声场分布进行计算。

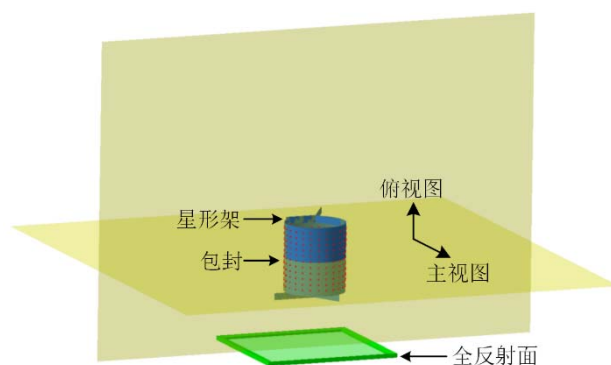
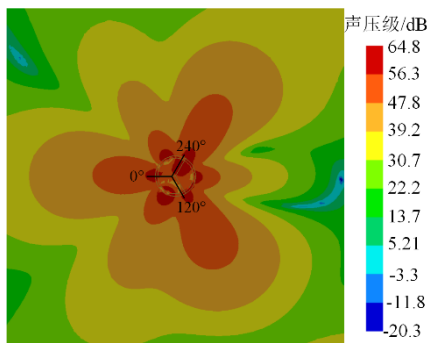


图 14 电抗器噪声仿真模型

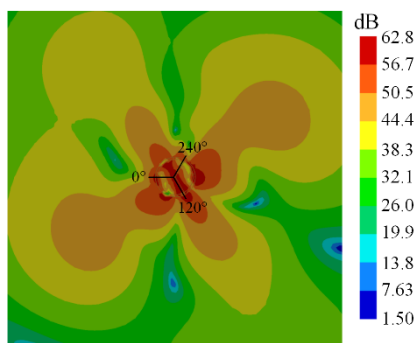
Fig. 14 Noise simulation model of air-core reactor

部分频率下的声场仿真结果见图 15，电抗器在水平面的噪声分布呈现出明显的方向性，即“瓣状”分布，且主瓣数量与临近固有频率对应的模态振型一

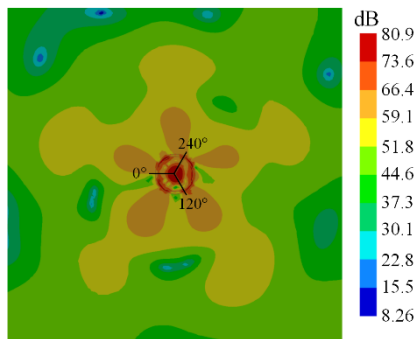
致,表明多层电抗器的噪声分布特性也受到其固有机械特性的影响。



(b) 400 Hz



(c) 550 Hz



(d) 800 Hz

图 15 不同频率下电抗器在水平面的噪声分布

Fig. 15 Noise distribution of the reactor in the horizontal plane at different frequencies

## 5 结论

针对滤波电抗器多层包封振动及相互关系尚不明确的问题,文中利用一台双层包封干式空心电抗器,开展了振动模态及谐波激励下的振动特性实验研究,并将振动结果输入到噪声仿真计算模型中,分析其噪声分布特性,主要得到以下结论:

1)双层包封电抗器在 0~1 000 Hz 范围内存在多阶固有频率,其模态振型由若干个环向波和轴向半波组成,且内外层包封在同一固有频率下的模态振型一

致;

2)对于双层包封电抗器,电流激励下内层包封和外层包封在同一位置的振动幅值和相位相近,具有一致的振动特性,且其振动特性主要受其模态特性的影响,振动形态与临近固有频率对应的模态振型相似;

3)在实验得到双层包封的振动情况的基础上,将其作为输入量对电抗器噪声进行了仿真计算,在电流激励下电抗器噪声特性同样受其模态特性主导,噪声辐射呈现明显的方向性,主瓣数与模态振型的环向波数一致。

文中主要采用双层包封电抗器对包封间振动特性及相互关系进行了研究,并获得了其声场分布特性及主要影响因素,对于更多层包封具有一定的启发意义。后续将继续开展相关研究,弄清多层包封间振动的传递关系及其对辐射噪声特性的影响。

## 参考文献:

- [1] 曹浩, 吴晓文, 卢铃, 等. 基于波束形成声成像技术的某±800 kV 换流站噪声源识别[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 171-176.  
CAO Hao, WU Xiaowen, LU Ling, et al. Noise source identification for a ±800 kV converter station based on beam-forming acoustic imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 171-176.
- [2] 旷冬伟, 冯春林, 张祖安, 等. 换流站交流滤波场噪声治理改造经验[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 290-294.  
KUANG Dongwei, FENG Chunlin, ZHANG Zuan, et al. Experience about noise control of AC filter capacitor installation in converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 290-294.
- [3] 张国英, 刘辉, 谢连科, 等. 换流变电站可听噪声频谱分析与控制技术[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 166-173.  
ZHANG Guoying, LIU Hui, XIE Lianke, et al. Analysis of audible noise caused by equipments in domestic converter station and its control measures[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 166-173.
- [4] 汲胜昌, 祝令瑜, 师愉航, 等. 一种干式空心电抗器消声结构及其制备方法: CN105845396B[P].2018-03-02.  
JI Shengchang, ZHU Lingyu, SHI Yuhang, et al. A dry-type air-core reactor noise reduction structure and its preparation method: CN105845396B[P].2018-03-02.
- [5] 陈炜, 胡胜, 卢铃, 等. 计及遮雨帽和隔音装置的空心电抗器散热性能分析及结构参数优化设计[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 64-74.  
CHEN Wei, HU Sheng, LU Ling, et al. Heat dissipation

- performance analysis of the air core reactor and structure parameters optimization design of rain cover and sound arrest[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(9): 64-74.
- [6] 陈 栋, 王丽君, 刘 飞, 等. 干式空心滤波电抗器降噪技术研究及实施[J]. *声学技术*, 2021, 40(4): 545-549.  
CHEN Dong, WANG Lijun, LIU Fei, et al. Research and implementation of noise reduction techniques for dry type hollow filter reactors[J]. *Technical Acoustics*, 2021, 40(4): 545-549.
- [7] 李金忠, 张丹丹, 徐征宇, 等. 有限元法分析隔声装置对特高压并联电抗器散热性能的影响[J]. *高电压技术*, 2017, 43(3): 822-827.  
LI Jinzhong, ZHANG Dandan, XU Zhengyu, et al. Heat dissipation performance of ultra-high voltage shunt reactor with sound insulation based on finite element method[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(3): 822-827.
- [8] WANG Q, CHEN Q, ZENG M. A CFD-taguchi combined method for numerical investigation of natural convection cooling performance of air-core reactor with noise reducing cover[J]. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 2009, 55(12): 1116-1130.
- [9] 赵文强, 侍乔明, 王永平, 等. MMC 桥臂电抗器穿墙套管故障特性及保护策略[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4): 205-212.  
ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, WANG Yongping, et al. Fault characteristics and protection strategy of MMC bridge arm reactor wall bushing[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2022, 41(4): 205-212.
- [10] CLARK M, GRISENTI A, JENSEN C, et al. HVDC stations audible noise[R]. Paris: CIGRE, 2002.
- [11] 姜志鹏. 干式空心电抗器多物理场分析及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.  
JIANG Zhipeng. Research on the multi-physical field analysis and application of dry-type air-core reactor[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [12] LILJEN J L. Acoustic noise generated by air power reactor in open-air substation[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2006, 16(3): 297-310.
- [13] 高 璐, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 高压换流站干式空心电抗器的振动产生机理及影响因素研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 5960-5970.  
GAO Lu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Study on vibration mechanism and impact factors of dry-type air-core reactor in HVDC converter stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 5960-5970.
- [14] 杨嘉萌. 干式空心电抗器绕组振动产生机理及抑制措施研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
YANG Jiameng. Study on vibration generation mechanism and suppression measures of dry-type air-core reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [15] 戴 锋, 高 爽, 宋 博, 等. 基于有限元的干式空心电抗器振动特性研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(5): 104-109.  
DAI Feng, GAO Shuang, SONG Bo, et al. Study on vibration characteristic of dry-type air-core reactor based on finite element method[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(5): 104-109.
- [16] GAO Lu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Vibration and noise characteristics of air-core reactor used in HVDC converter stations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(2): 1068-1077.
- [17] WANG Lü, WU Jian, WEI Jingyi, et al. Study on audible noise characteristics of filter capacitors and reactors in HVDC converter stations by using sound signal processing array technique[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). [S.l.]: IEEE, 2020: 1281-1285.
- 高 璐(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为滤波设备的振动与噪声机理及其减振降噪(E-mail: gaolubs@163.com)。