第 49 卷 第 6 期：2385-2396 高电压技术 Vol.49, No.6: 2385-2396
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230237

桥臂电抗器的振动噪声分析与控制

侯世英[1]，王留洋[1]，杨　帆[1]，王革鹏[2]，姜　慧[1]，王鹏博[1]
（1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)，重庆 400044;
2. 西安西电变压器有限责任公司，西安 710077）

摘　要：桥臂电抗器受到交变电磁力作用而处于振动状态，产生的噪声引起了不可忽视的环境干扰问题。针对该问题，根据关键参数计算结果建立了桥臂电抗器的电磁–振动–声多场耦合模型，分析了桥臂电抗器主要振动频率特性和噪声辐射方向效应，研究了交直流复合工况和边界吸声系数对噪声的影响规律。结果表明：噪声分布的方向性主要由固有频率振型决定，直流与交流分量的相互作用将影响噪声分布的主要方向；提升周围边界吸声系数可以降低声压级水平。进一步获得了加隔音装置后电抗器的声场仿真结果，利用正交试验和方差分析研究了隔音装置参数对声压级水平和材料用量的影响程度，构建了基于 Kriging 代理模型的隔音装置多目标优化模型。优化后结构的降噪效果显著，其中声压级水平下降 15.2%，隔音装置材料用量减少 8.9%。
关键词：桥臂电抗器；有限元方法；振动噪声特性；交直流复合工况；优化设计

Vibration Noise Analysis and Control of Bridge Arm Reactor

HOU Shiying[1], WANG Liuyang[1], YANG Fan[1], WANG Gepeng[2], JIANG Hui[1], WANG Pengbo[1]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The vibration of bridge arm reactors due to alternating electromagnetic forces has caused non-negligible noise pollution for the environment. Aiming at the problem, we establish an electromagnetic-vibration-acoustic field model of the bridge arm reactor based on the calculation of key parameters. The main vibration frequency characteristics of the bridge arm reactor and the effect of noise radiation direction are analyzed. The influence of AC/DC complex conditions and boundary absorption coefficients on noise is studied. The results show that the directivity of noise distribution is mainly determined by vibration shapes at an inherent frequency, and the interaction of DC and AC components will affect the main direction of noise distribution. The sound pressure level can be reduced by enhancing the surrounding boundary absorption coefficient. Then, the sound field simulation results with sound insulation device are obtained. Orthogonal tests and analysis of variance methods are used to study the influence of sound insulation device parameters on the sound pressure level (SPL) and material usage. A multi-objective optimization model for the sound insulation device based on the Kriging agent model is constructed. The noise reduction effect of the optimized structure is significant, with a 15.2% decrease in sound pressure level and an 8.9% reduction in the material consumption of the sound insulation device.
Key words: bridge arm reactor; finite element method; vibration and noise characteristics; AC-DC compound conditions; optimization design

0　引言

作为换流器中的关键器件，桥臂电抗器电流大、无铁芯、以空气为导磁介质的结构方式造成严重的漏磁现象，成为换流站内的主要噪声源之一，对设备安全及周围环境产生了负面影响。为有效治理换流站噪声问题，研究桥臂电抗器等设备的振动噪声机理具有重要的工程意义。

目前，国内外许多学者从理论分析、仿真研究和试验手段等多种方法来做好实际工况下干式空心电抗器的振动噪声分析准备工作。文献[1]研究了空心电抗器绕组在不同电流激励下的电磁力变化规律，为电抗器减振降噪提供了一定依据；文献[2-4]考虑匝间绝缘缺陷影响，通过试验测得干式空心电抗器的振动分布特性，但缺少对振动产生机理的研究；文献[5-7]开展了干式空心电抗器试验模态特征分析和振动产生机理研究，为改进设备的共振问题提供了重要依据；文献[8-9]虽然通过实测发现电抗

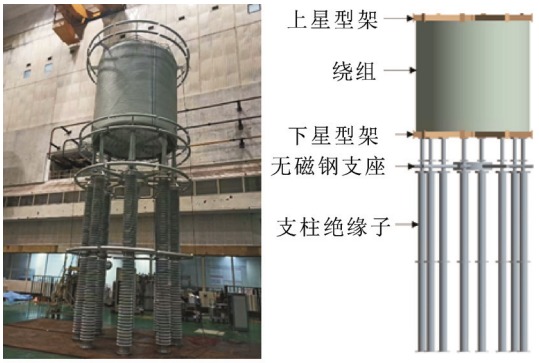
基金资助项目：国家重点研发计划 (2021YFB2401701)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401701).

器包封表面的振动并不均匀分布，将导致声场分布存在一定的方向效应，但对其产生原因认识不足；文献[10]通过对干式空心电抗器开展振动测试，探讨了谐波激励下噪声产生的机理。以往对电抗器的研究大多集中在交流激励，很少有文献开展桥臂电抗器交直流复合大电流工况下振动频谱及噪声空间分布特性的研究，也没有考虑周围边界条件对噪声传播的影响。为抑制噪声和指导桥臂电抗器的隔音装置设计，还需要进行关键参数的影响分析。

针对以上问题，本文基于电磁–振动–声耦合场，分析了交流、交直流复合电流工况下桥臂电抗器的振动特性及噪声传播方向效应；在此基础上，探究仿真模型边界吸声系数对桥臂电抗器声场计算的影响，获得了加隔音装置前后电抗器的声场仿真结果；最后，利用正交试验和方差分析研究了隔音装置参数对降噪效果和材料用量的影响程度，进而提出优化设计方案。本文研究内容对于桥臂电抗器噪声问题的治理具有重要意义。

1 桥臂电抗器基本结构和关键参数计算

该桥臂电抗器由 6 个并联同轴包封组成，每个包封是许多细导线用浸渍环氧树脂的玻璃纤维丝缠绕，经高温固化[11]后形成的牢固坚实整体；沿径向均匀布置的撑条形成包封间绝缘和散热气道；上下两端通过星形架将其夹紧并提供足够的机械强度，包封内部线圈通过星形架上的接线臂引出；绝缘支撑件为电抗器提供机械支撑，并满足抗震需求。实际桥臂电抗器结构及等效模型如图 1 所示。



(a) 实际设备结构 (b) 3维等效模型

图 1 桥臂电抗器的结构

Fig.1 The structure of bridge arm reactor

首先，在不考虑高频率下集肤效应对线圈电阻的影响以及不同温度导致的电阻率不同，即假设线圈电阻不变的前提下，根据电路模型(图 2)得出计算方程组[12]为

$$\begin{cases}(\mathrm{j}\omega L_i + R_i)\boldsymbol{I}_i + \mathrm{j}\omega \sum\limits_{\substack{j=1,i=1\\ j\neq i}}^{n} M_{ij}\boldsymbol{I}_j = \boldsymbol{U}_{\mathrm{N}} \\ \boldsymbol{I}_1 + \boldsymbol{I}_2 + \boldsymbol{I}_3 + \cdots + \boldsymbol{I}_n = \boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}\end{cases} \tag{1}$$

式中：n 为桥臂电抗器的总包封数；R_i、L_i 为第 i 个包封的电阻和电感；M_{ij} 为第 i 和第 j 个包封之间的互感；$\boldsymbol{I}_i$、$\boldsymbol{I}_j$ 分别为第 i 和第 j 个包封上的电流向量；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}$ 为桥臂电抗器的额定电压向量；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$ 为桥臂电抗器的额定电流向量；ω 为角频率。

根据电磁学中的 Neumann 公式及 Bartky 变换法[13]，可以对方程组中的自感和互感系数进行求解，结果表示为

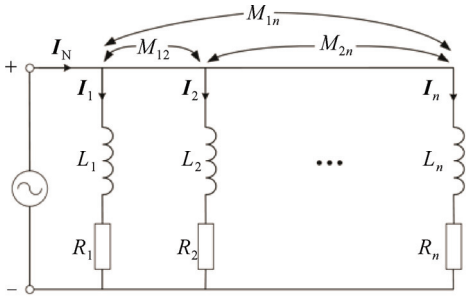


图 2 包封的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of encapsulations

$$\begin{cases}L_i = n_i n_i f_i \\ M_{ij} = n_i n_j g_{ij}\end{cases} \tag{2}$$

式中：n_i、n_j 分别为第 i 层和第 j 层包封的线圈匝数；f_i、g_{ij} 分别为线圈的自感几何系数和互感几何系数，其大小取决于线圈的平均直径 D_i、高度及线圈相互间位置。

进一步，考虑电抗器每层线圈的电阻与电抗相比很小，可忽略电阻的影响，即认为电流相位相同，当各包封电流相位相等时，各层电阻电压相等，即各层交流电流按各层电阻分布且各层交流、直流电流分配一致。同时，考虑到各层线圈导线尺寸较小，且电抗器的工作频率较低，故认为每层线圈的交流电阻与其直流电阻近似相等。经以上简化，将式(2)代入式(1)中，得到每层包封的匝数计算结果为

$$\begin{cases}n_1 = \dfrac{U_{\mathrm{N}}}{\omega(n_1 f_1 I_1 + n_2 g_{12} I_2 + \cdots + n_n g_{1n} I_n)} \\ n_2 = \dfrac{U_{\mathrm{N}}}{\omega(n_1 g_{21} I_1 + n_2 f_2 I_2 + \cdots + n_n g_{2n} I_n)} \\ \vdots \\ n_n = \dfrac{U_{\mathrm{N}}}{\omega(n_1 g_{n1} I_1 + n_2 g_{n2} I_2 + \cdots + n_n f_n I_n)} \\ I_1 + I_2 + \cdots I_n = I_{\mathrm{N}} \\ R_1 I_1 = R_2 I_2 = \cdots = R_n I_n\end{cases} \tag{3}$$

式中：$R_i=\dfrac{\rho n_i \pi D_i}{S_i}$；$\rho$ 为线圈电阻率；S_i 为线圈的截面积，如果考虑并绕数，求得的电阻值还需要除以该数值。

对于上述方程组，如果在已知包封基本结构参数的条件下，就可以确定每层包封的缠绕匝数[14]；反之，以各包封的匝数、直径、厚度、高度为设计变量，则需将表 1 中电抗器的电感值等参数作为基本等式约束条件[15]，附加最大温升 T_{max}、最大电流密度 J_{max} 为不等式约束条件，建立相应研究对象的优化模型，从而得到满足各项性能指标的设计结果，表 2 为桥臂电抗器结构及关键参数。

2　桥臂电抗器振动噪声仿真模型

本文根据桥臂电抗器关键参数，利用有限元仿真软件建立了 3 维等效模型，考虑到计算的精度和时长，仿真模型做了如下等效[16]：1）忽略支撑结构配件、撑条等对电抗器噪音的影响；2）模型中包封线圈、星型架和绝缘支柱等参数与实际相同；3）整个计算域为正方体空气域。根据图 3 所示的耦合作用图，开展桥臂电抗器多物理场建模仿真。

2.1　电磁场仿真

桥臂电抗器各绕组等效为电感与电阻串联的支路，各支路并联后通入交流电流激励，产生的电磁场与电流等物理量之间的关系满足麦克斯韦方程组，描述求解区域电磁场的关系遵循泊松基本方程，如式(4)[17]所示。

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{A}_\theta}{\partial z^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial (r\boldsymbol{A}_\theta)}{\partial r}\right)=-\mu \boldsymbol{J} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{A}_\theta$ 为矢量磁位周向分量；z、θ、r 分别为高度坐标、角度与半径；μ 为导线磁导率；$\boldsymbol{J}$ 为传导电流密度。

在仿真过程中，设置瞬态磁场求解器，基于场–路耦合模型对包封设置外电路，添加激励为工频 50 Hz 的交流电流源(1091 A)，并根据表 2 设置绕组匝数和外电路电阻参数。

为合理利用计算资源，在磁场仿真中，只考虑包封和星型架部件，忽略影响较小的支撑结构件；对包封等大面积区域采用六面体网格，星型架等狭小区域适当采用自由四面体网格划分，并使用尺寸控制和网格质量约束划分结果。

2.2　振动仿真

2.2.1　模态分析

模态分析是动力学分析的基础，用于求解桥臂电抗器结构的固有特性，包括频率、振型、振型参与系数等。在假设结构质量矩阵与刚度矩阵不变，忽略阻尼作用的条件下，振动微分方程为

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}''+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=0 \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵；$\boldsymbol{x}''$ 为加速度矢量；$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵；$\boldsymbol{x}$ 为位移矢量。

桥臂电抗器的自由振动可写为简谐振动形式，其位移函数为 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\varphi}_i \sin(\omega_i t)$，代入式(5)得到结构无阻尼自由振动的特征方程为

$$(\boldsymbol{K}-\omega_i^2 \boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}_i=0 \tag{6}$$

表 1　桥臂电抗器基本工况

Table 1　Basic parameters of bridge arm reactor

物理量	数值
系统电压/kV	550(直流)+30(交流)
额定电流/A	1263
交流电流分量/A	1091
直流电流分量/A	635
二次谐波电流分量/A	22
最大电流/A	1333
额定电感/mH	75
热点温升/K	115
平均温升/K	100
冷却方式	AN
绝缘等级	F

表 2　桥臂电抗器基本结构及关键参数

Table 2　Basic structural and key parameters of bridge arm reactor

包封序号	内径/mm	外径/mm	高度/mm	匝数	电阻/Ω
1	1456.16	1497.90	2907.4	207.67	0.135 33
2	1405.36	1424.74	2907.4	210.68	0.294 48
3	1355.11	1373.92	2907.4	215.28	0.308 52
4	1305.50	1323.70	2907.4	223.26	0.330 74
5	1254.01	1274.08	2907.4	234.09	0.316 82
6	1180.21	1224.20	2907.4	252.15	0.158 93

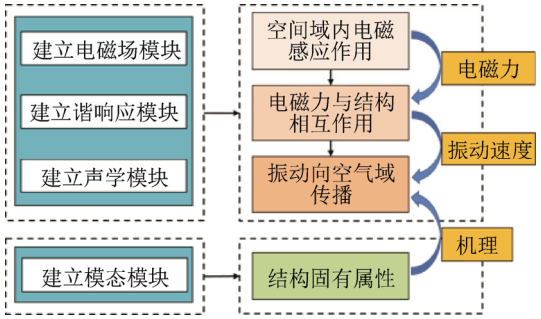


图 3　多物理场耦合作用图

Fig.3　Coupling diagram of multi-physics field

式中：$\boldsymbol{\varphi}_i$为第i阶模态振型特征向量；ω_i为第i阶固有频率；t为时间。

通过式(6)即可获得桥臂电抗器固有频率与模态振型，从而分析其振动变化规律。

2.2.2 谐响应分析

桥臂电抗器振动可以理解为在周期变化载荷的作用下，结构以载荷频率做简谐运动，运动方程为

$$\boldsymbol{Mx''}+\boldsymbol{Kx}=\boldsymbol{F} \tag{7}$$

式中$\boldsymbol{F}$为电抗器所受电磁力矢量。

桥臂电抗器中工频电流通过产生的磁场相互作用，形成2倍工频的电磁力；电磁力与磁感应强度和通入电流的乘积成正比，与电流的平方成正比；工频、谐波电流与直流电流交互作用，形成与工频、谐波电流同频率的振动磁场力，而谐波电流占比较小，同样的直流放大倍数，可以忽略，则$i(t)=A+B\sin(2\pi ft)$，进一步得

$$F=ki^2(t)=k(A+B\sin(2\pi ft))^2=k(A^2+2AB\sin(2\pi ft)+\frac{B^2}{2}(1-\cos(2\pi\times 2ft))) \tag{8}$$

式中：k为比例系数；f为电流频率；i为激励电流；A为直流电流分量；B为交流电流分量的幅值。

2.3 声场仿真

桥臂电抗器声源[18]主要来自包封，包封线圈受电磁力作用产生振动，通过星型架等传至其他结构件，进而扩散到设备外部及空气中，在周围空间内叠加干涉，成为可听噪声。

声音在空气中的波动满足流体动力斯托克斯方程，即在产生、传播过程中遵循媒质的运动方程、连续方程和状态方程。

$$\begin{cases}\dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial^2 p}{\partial t^2}-\nabla^2 p=0\\ \rho\dfrac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t}=-\nabla p\end{cases} \tag{9}$$

式中：p为空间中不同位置的声压；ρ为流体(空气)密度；c为声速，$c=\sqrt{E/\rho}$；E为空气的体积模量；$\boldsymbol{v}$为振动速度。

由于星型架对包封线圈具有加固作用，因此设置星型架上下与包封接触边界为绑定，即振动位移为零；考虑到工程实际为开放边界，设置计算域四周与顶部边界为辐射条件，用于吸收边界上声波；而电抗器放置于地面上，则设定支柱绝缘子与地面固定，地面为刚性墙反射边界[19]。

桥臂电抗器基本材料参数见表3。

另外，网格的疏密程度直接影响到声场仿真计算的准确性。为了兼顾计算精度和计算速度，采用自适应尺寸调整剖分网格，在靠近包封线圈和星形架位置处网格剖分密集，在远离包封线圈位置网格剖分稀疏，见图4。

3 仿真计算结果及考虑隔音装置的桥臂电抗器抑噪性能分析

3.1 电磁–振动仿真计算结果

3.1.1 电磁场仿真结果

根据上述计算方法，完成瞬态电磁场[20]的计算，通过后处理得到0.5 s时刻的磁场、电磁力分布结果，见图5(从外至内层依次为包封1—6)。

观察仿真结果，桥臂电抗器磁场发散，轴向沿几何中心对称分布，内外分布不对称，内部线圈磁场强度远大于外部线圈磁场强度。对于整个电抗器设备，内层线圈轴线磁通大，而外部线圈则是径向磁通大，磁通密度最大区域出现在最内层线圈中部，数值为0.12 T，最小值出现在最外层线圈中部。

进一步分析包封电磁力的分布特性，在径向方向上，电磁力与几何尺寸中心不对称，从内外两侧向中间压缩线圈，试图使电抗器变薄；在轴向方向上，电磁力与轴向尺寸中心对称，从上下两端向线圈中间压缩线圈，试图使电抗器高度减小。整体来看，轴向与径向电磁力分布都极不均匀，外层端部

表3 桥臂电抗器基本材料参数

Table 3 Basic material parameters of bridge arm reactor

材料	密度 /(kg·m^{-3})	杨氏模量 /Pa	泊松比	动力黏度 /(kg·m^{-1}·s^{-1})
铝合金	2700	7×10^{10}	0.33	
结构钢	7850	2×10^{11}	0.3	
支柱绝缘子	2072	1.57×10^{11}	0.3	
空气	1.225			1.79×10^{-5}

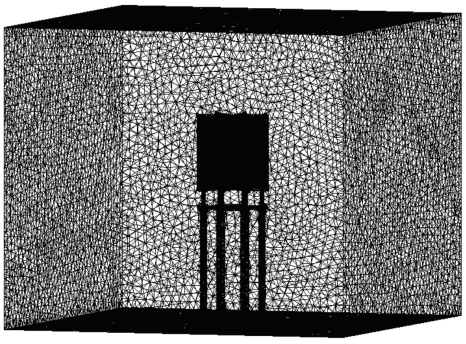


图4 网格剖分结果

Fig.4 Results of mesh generation

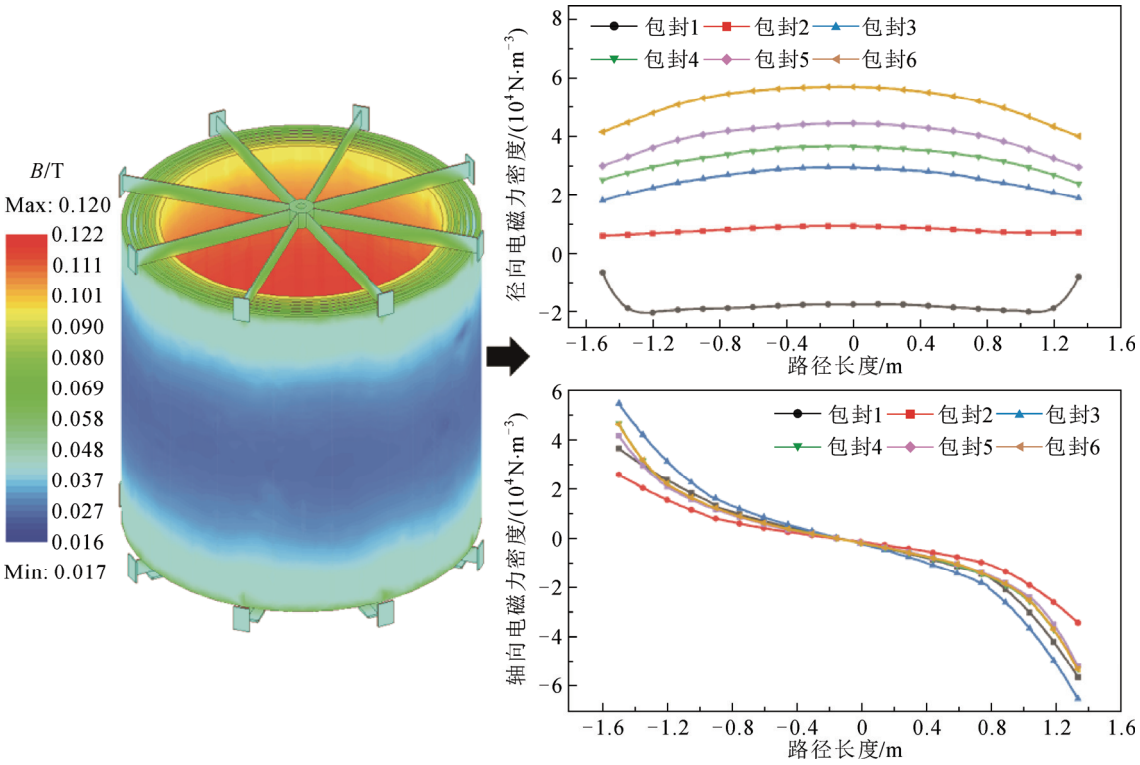


图 5　电磁场及包封中轴线上电磁力分布

Fig.5　Electromagnetic field and electromagnetic force distribution on the central axis of encapsulations

轴向力大，内层线圈中部的径向力大，包封受到的径向力略大于轴向力，容易发生扭转变形。

3.1.2　模态分析结果

利用模态分析获得固有频率，与激励频率进行对比，找出设计中薄弱部分。理论上改变结构参数和材料特性可以改变固有频率，避免共振。

由图 6、7 可知，在不同阶数下，桥臂电抗器的固有频率与模态振型相差较大。通常只关注低频模态，其有效质量更大，更容易被激励起来。在自由状态下，前 6 阶固有频率基本为 0，随着阶数增加，固有频率也逐渐增大，模态振型发生在包封径向上，结合电磁力仿真结果，包封受到的径向力远大于轴向，与模态振型规律一致，在参数设计阶段需考虑相关措施进行约束；有约束的状态下，固有频率明显变大，且施加预应力对固有频率与模态振型几乎没有影响。

3.1.3　谐响应分析结果

磁场力作用下桥臂电抗器的振动可以看作是多自由度系统的强迫振动，如果不考虑其他非线性因素，则振动响应与磁场力之间满足线性关系，振动的频率应与磁场力的频率相同。

由图 8 分析可知，X、Y 轴方向的频谱曲线中，振幅(平均值)数量级为 10^{-10} m，而 Z 轴方向的振幅数量级为 10^{-9} m，包封振动以 Z 轴方向为主，应变最大值可达 0.499 μm。桥臂电抗器以 100 Hz 及其倍频振动，与前面电抗器振动和电流关系的理论分析相一致。应变位移的频率响应以 100 Hz 时幅值最大，且随倍频增加时，振动幅值逐渐减弱并稳定在一数值。

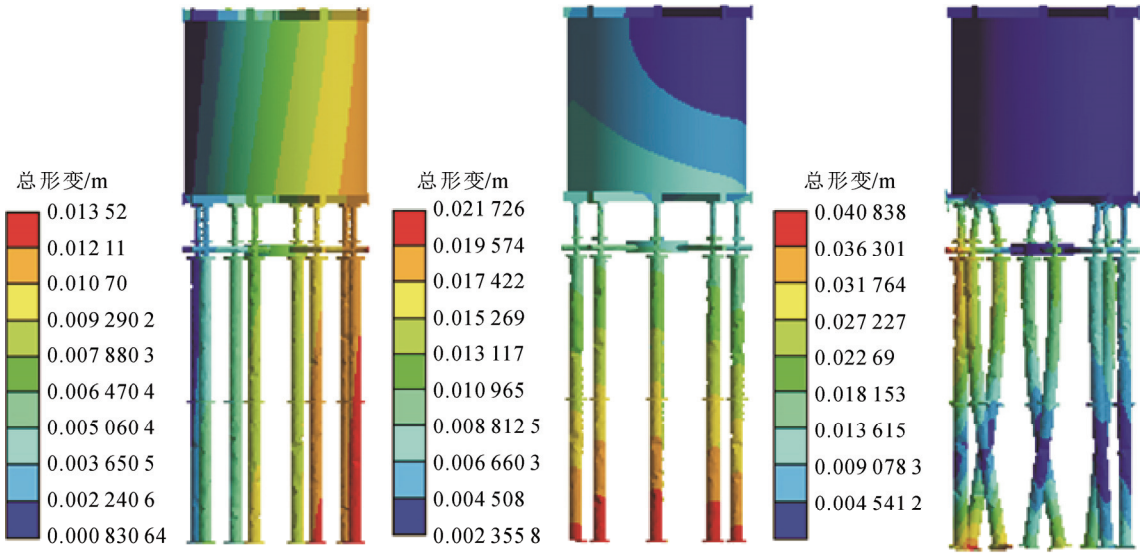
桥臂电抗器在实际运行工况中承受电流幅值相当的交直流复合大电流，进一步在外电路叠加直流电流源，观察电抗器振动情况。

考虑直流工况后，随着电流幅值增大，振动幅值增大，但不影响频率分布规律，这是因为直流作用下的电磁力为恒定电磁力，对桥臂电抗器结构影响只有形变效果，无振动效果；由于工频交流与直流电流相互作用，使得 50 Hz 频率的振动幅值增加，但 100 Hz 仍然占主导地位；包封振动不仅与电磁力相关，还与振型及固有频率相关，伴随着电流幅值的增加及位移响应滞后激励载荷，将会对噪声传播产生影响。

3.2　声场计算结果与试验对比

3.2.1　声场仿真结果

本样机用于欧洲海上风电，根据 IEC 60067-10:2016 标准[21]对声压测量点的规定：测点位于距发射



(a) 1阶0 Hz (b) 2阶0 Hz (c) 30阶27.184 Hz

图 6 不同模态下的振型组图

Fig.6 Vibration type diagram in different modes

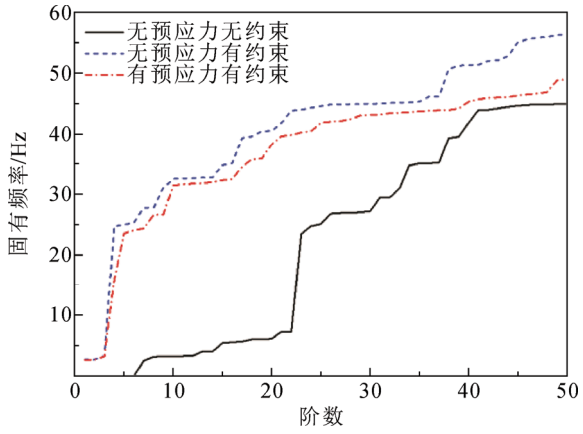


图 7 不同状态下的固有频率

Fig.7 Inherent frequency at different states

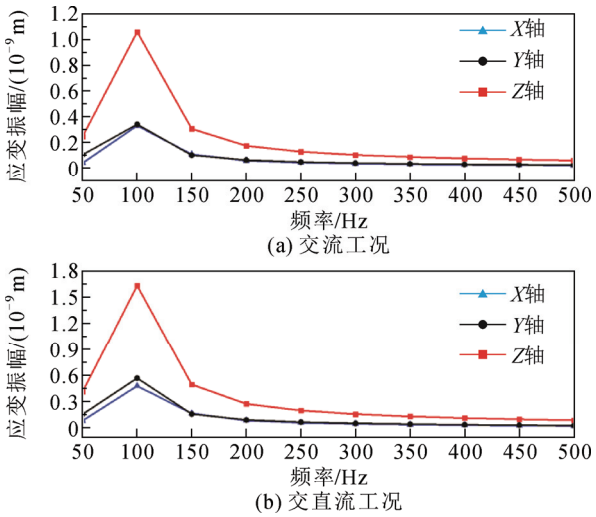


图 8 不同频率下包封的应变位移

Fig.8 Strain amplitude at different frequencies of encapsulations

面外侧 3 m 处，高度在线圈本体高度的 1/2(点 A)和绝缘子的 1/2(点 B)处。相比国标测试标准，该模型采用加密测点方案，围绕试品布置 30 个均匀分布的测点，求得平均声压级[22]，见表 4。

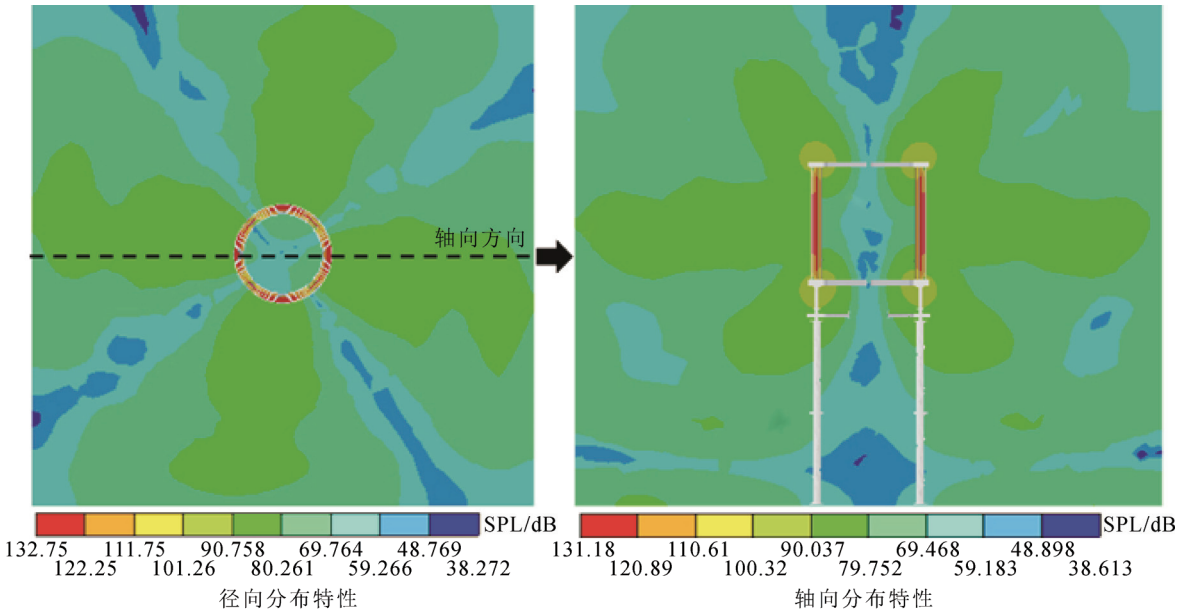
由表 4 可得，在交流工况下，50、100 Hz 平均声压级水平分别为 53.1、77.4 dB；在交直流工况下，50、100 Hz 平均声压级水平分别为 56.2、77.5 dB。对比仿真结果，50 Hz 频率声压级水平略有提升，直流分量对电抗器整体声压级幅值的改变不明显，在合成声压级中 100 Hz 对应的声压级水平仍然为主频率；由于直流分量与工频交流的共同作用，50 Hz 下声压级幅值改变较其他频率更高。桥臂电抗器周围 30 个测点中声压级幅值所在位置不同，这是由于噪音传播过程存在方向效应。

表 4 不同频率下的测点声压级(SPL)

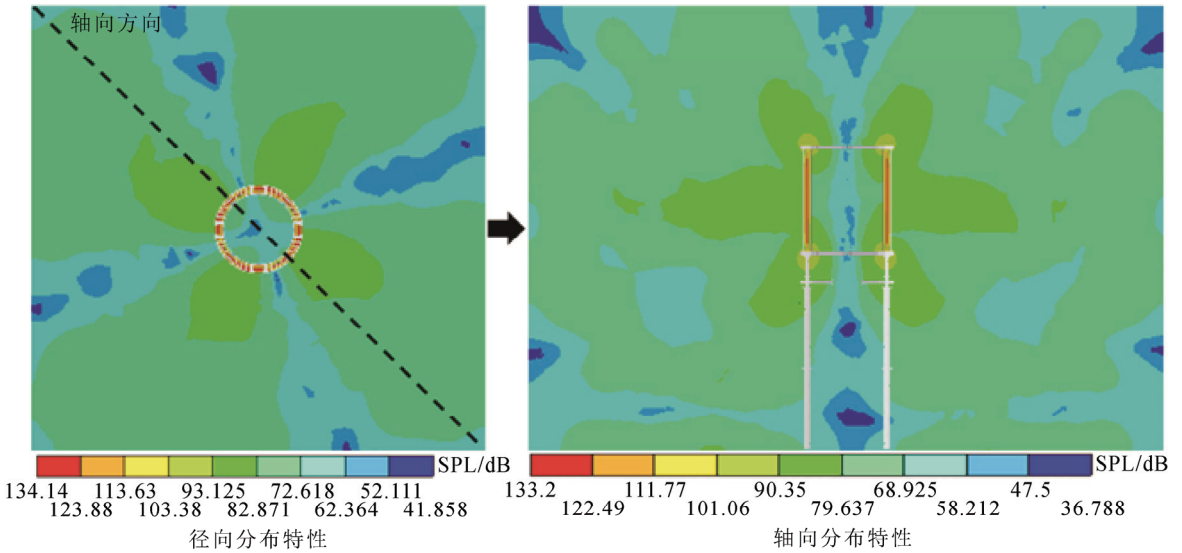
Table 4 Sound pressure level (SPL) of measurement points at different frequencies

频率/Hz		50	100	150	200	250	300
测点 A 声压级/dB	交流	56.0	79.9	60.1	67.5	56.6	54.0
	交直流	58.9	80.0	62.5	67.1	57.7	48.5
测点 B 声压级/dB	交流	42.2	71.6	62.0	64.0	57.3	50.6
	交直流	45.2	71.0	64.5	66.3	59.4	46.8

由图 9 分析可知，桥臂电抗器噪声传播具有明



(a) 交流噪声分布特性



(b) 交直流噪声分布特性

图 9　噪声分布的方向效应(100 Hz)

Fig.9　Directional effect of noise distribution (100 Hz)

显的方向性，当频率为 100 Hz 时，从轴向平面观察，主瓣模数为 2，声能量在水平方向辐射强度最大，旁瓣模数为 4，声能量向垂直方向扩散，衰减增多；从径向平面观察，主瓣模数为 4，噪声分布特性比较对称；其中，图 9(b)是在图 9(a)方向上偏转接近 45°得到的分布结果，表明直流分量与交流分量的相互作用影响振动相位，进而改变了噪声传播[23]的主要方向。

用坐标 (m,n) 来描述电抗器的模态振型，其中 m 表示振型的轴向半波数，n 表示振型的环向波数。结合模态分析，不难发现与噪声传播方向效应相匹配的是振型及固有频率。电流激励引起的振动与相应固有频率振型叠加，受星型架约束形成类似“呼吸”的振动模态，带动其附近的空气层质点产生运动，不断压缩、膨胀又带动了下一邻近空气层质点的压缩、膨胀运动。如此由近及远相互影响，决定了噪声传播的方向性(见图 10)。

3.2.2　声级测定试验验证

对试品施加 50 Hz、1233 A 试验电流[24]，声级测试点距线圈表面 3 m，高度在线圈本体高度的 1/2 和绝缘子的 1/2，围绕试品布置 30 个均匀分布的测点。声级测点分布图如图 11。

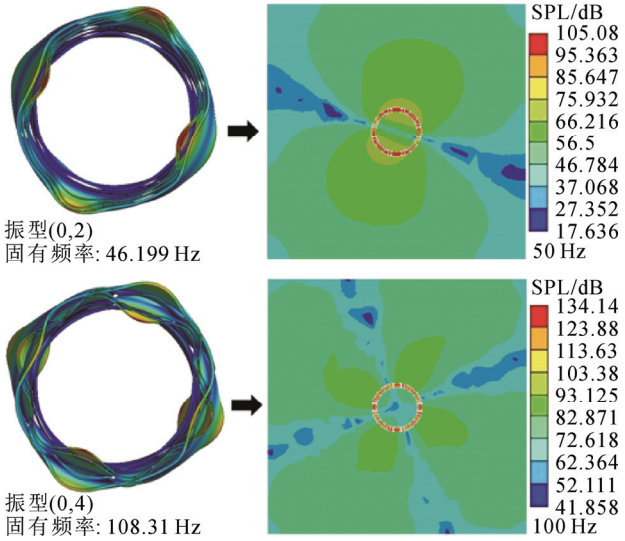


图 10 噪声分布与振型的对应关系

Fig.10 Relation between noise distribution and mode shapes

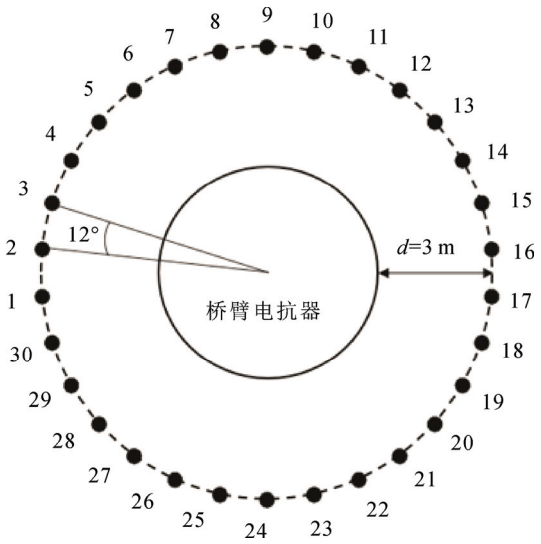


图 11 声级测点分布图

Fig.11 Distribution of sound level measurement points

同样，对桥臂电抗器仿真模型通入相同的电流，得到 A 计权声压级(单位：dB(A))，并根据式(10)计算各测点的平均 A 计权声压级为

$$\bar{L}_{\mathrm{pA0}}=10\lg\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{0.1L_{\mathrm{pA}i}}\right) \tag{10}$$

式中：N 为测点总数；$L_{\mathrm{pA}i}$ 为 A 计权声压值；$\bar{L}_{\mathrm{pA0}}$ 为平均 A 计权声压级。

由表 5 可知，试验测量结果为 57.1 dB(A)，本文建立的考虑了支柱绝缘子四周加密测点的仿真模型计算结果为 60.4 dB(A)，噪声声压级实测值与计算值之间的相对误差为 5.78%，小于仅考虑包封绕组模型的 10.1%，验证了有限元仿真的正确性，也证明了加密测点模型的优越性。

3.3 边界吸声系数对桥臂电抗器声场的影响

本文仿真模型中将四周边界条件设置为辐射边界(全吸收)、地面设置为刚性墙边界(全反射)，噪音分布特性为较理想化周围环境条件下的计算结果。而实际上，墙面、地面吸声系数会影响声场中声波的干涉，因此本文采用多组墙面、地面吸声系数，分别计算 100 Hz 频率的声压级水平。

3.3.1 墙面吸声对桥臂电抗器声场的影响

在该算例中，仍设置地面为刚性壁面，分别设置周围墙面不同的吸声系数(0.1~0.9)，得到如图 12 所示测点声压级计算结果。

图 12 数值结果显示，当四周墙面吸声系数为 0.1 时，测点声压为 81.8 dB；墙面吸声系数为 0.9 时，测点声压为 77.5 dB，随着吸声能力增强，测点声压越低，从而证实墙面吸收了部分声辐射能量。当吸声系数为 1 时，等效于模型设置的辐射边界。因此，墙面采用吸声材料在一定程度上起到控制噪声的作用，实际应用中可以作为控制测点噪声等级的辅助手段。

表 5 测试与仿真结果对比

Table 5 Comparison of test and simulation results

频率/Hz	计权声压级实测值/dB(A)	计权声压级计算值/dB(A)		相对误差/%	
		加密测点模型	仅包封模型	加密测点模型	仅包封模型
50	57.1	60.4	62.9	5.78	10.1

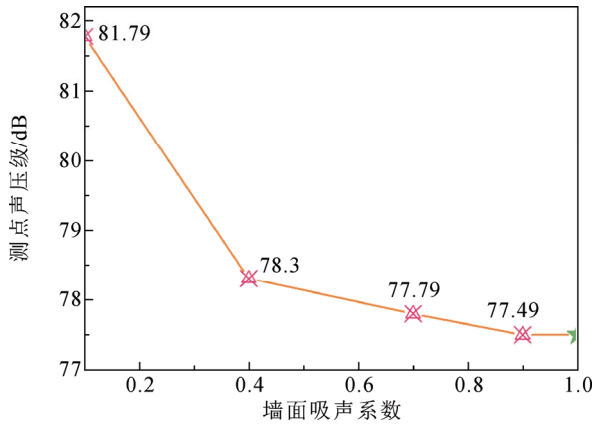


图 12 不同墙面吸声系数下测点声压级水平

Fig.12 Sound pressure level at measurement points with different wall absorption coefficients

3.3.2 地面吸声对桥臂电抗器声场的影响

进一步，设置四周墙面为辐射边界，即吸收系

数约等于 1，分别设置地面的不同吸声系数(0.1~0.9)，得到如图 13 所示测点声压级计算结果。

由图 13 可知，地面吸声系数为 0.1 时，测点声压为 77.6 dB；地面吸声系数为 0.9 时，测点声压为 78.1 dB，随吸声系数增加，地面对部分声辐射能量的反射减少，测点声压反而有小幅度提升。这是因为垂直方向的声波反射干涉了水平方向的声波传递，当声辐射能量大部分被吸收时，水平方向的声波传递更强。

3.4　加隔音装置的声场仿真结果

通过研究边界吸声系数对桥臂电抗器噪声传播的影响，发现在设备四周设置吸声材料对噪声的抑制效果明显。因此，需要考虑加隔音装置[25]下电抗器的声场分布特点。

本文主要针对交直流复合工况 100 Hz 频率下桥臂电抗器隔音装置开展研究，其基本结构如图 14，通常采用聚酯材料。

图 15 显示，桥臂电抗器噪声传播主要方向不变，部分声波在隔音装置内部和包封之间发生反射，由于聚酯材料对声音的阻隔(声音传播速度比铝材质小很多)，使得测点声压级减小。计算隔音装置 3 m 外测点声压级数值为 68.6 dB，相比未加隔音装置时降低 8.9 dB，隔音装置抑噪作用显著。

4　桥臂电抗器隔音装置优化设计

影响隔音装置(计及遮雨帽内吸音材料)的主要结构参数有 6 个，通常各参数取值范围如下：x_1 为 1.67~2.07m，x_2 为 0.1~0.3 m，x_3 为 0.1~0.3m，x_4 为 1.18~1.38 m，x_5 为 0.1~0.3 m，x_6 为 0.2~0.4 m。

4.1　基于正交试验的因素方差分析

如果直接构建以全部结构参数为自变量，以平均声压级、材料用量(体积)为响应的近似模型，则会因自变量数目较多、多物理场 3 维模型参数化建模困难等原因，造成采集样本点成倍增加或数学模型精度低的问题，因此采用正交试验设计并进行变量的显著度分析[26]。

选取 6 个结构参数构成样本空间，每个结构的取值则为影响因素，将每个因素等分为 L、M、H，3 个优化水平，形成 $L_{18}(3^7)$ 正交表(见表 6)。

然后将每组数据代入多物理场仿真进行计算得到相应的 SPL 值。利用方差分析法，评价隔音装置结构参数对其噪声阻断性能和材料用量影响的显著性，剔除影响较小的结构参数，从而减小近似模

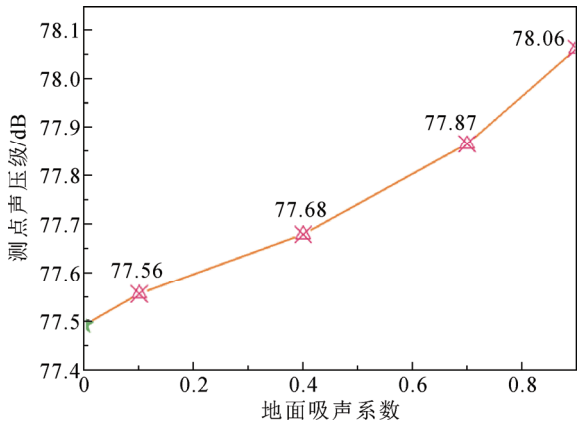


图 13　不同地面吸声系数下测点声压级水平

Fig.13　Sound pressure level at measurement points with different ground absorption coefficient

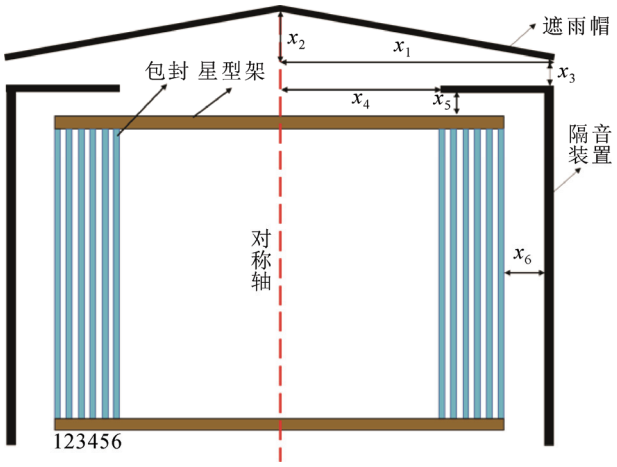


图 14　隔音装置的基本结构

Fig.14　Basic structure of sound insulation device

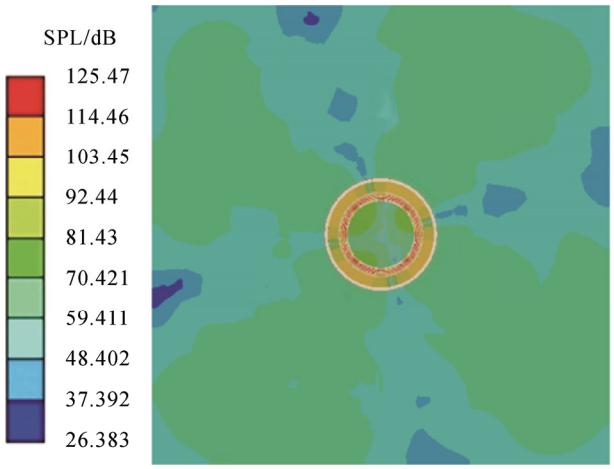


图 15　加隔音装置后声场仿真结果

Fig.15　Simulation result of sound field with sound insulation device

表 6 正交试验结果

Table 6 Orthogonal experiment results

试验	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	SPL/dB	材料用量/m³
1	M	M	L	M	M	M	71.9	6.40
2	L	H	H	M	M	M	69.6	5.82
3	H	L	L	M	H	H	72.7	5.86
4	H	L	H	M	L	M	68.6	6.18
5	M	L	M	H	H	M	72.5	6.44
6	L	M	L	H	H	M	73.4	5.86
7	L	L	M	L	M	H	72.8	6.24
8	M	L	H	H	M	L	61	5.63
9	L	M	H	H	L	H	71.1	5.96
10	H	H	M	H	L	H	72.3	6.44
11	M	H	L	L	L	M	72.2	6.01
12	M	M	M	M	L	L	57.5	5.60
13	H	M	H	L	H	L	58.6	6.16
14	H	H	L	H	M	L	58.4	5.88
15	L	L	L	L	L	L	57.1	5.44
16	H	M	M	L	M	M	74.7	6.38
17	L	H	M	M	H	L	56.1	5.60
18	M	H	H	L	H	H	72.6	6.60

型的因子数，使得在不需要增加样本点的同时，提高近似模型的可信度。分别计算各因素的偏差平方和、试验误差平均方差和、F 值等，得到各因素显著水平分析及方差见表 7。

综合表 7 数据，可以判断 x_4、x_6 对试验结果影响较为显著，x_1、x_2、x_3、x_5 对试验结果影响不显著。因此，在下一步进行代理模型优化时，仅将 x_4、x_6 作为优化变量进行拉丁超立方抽样，保持其他变量为均值水平，构建样本空间(见表 8)。

4.2 基于 MOGA-Kriging 模型的优化设计

代理模型的目的是建立待修正参数和结构响应之间的显式关系。代理模型可选的基函数有 Kriging、多项式函数、径向基函数等，一般常用 Kriging 建立代理模型。Kriging 模型[27]将响应函数假设为一个随机过程，由多项式全局近似模型和局部偏差项组成，其表达式为

$$\boldsymbol{y}(x)=\boldsymbol{g}(x)+\boldsymbol{Z}(x) \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{g}(x)$为随机过程 $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{y}(x)$ 的均值，提供全局近似模拟，其具体形式可表示为 $\boldsymbol{g}(x)=\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(x)\beta$，$\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(x)$ 为回归模型；β 为回归模型的待定系数；$\boldsymbol{Z}(x)$提供局部偏差的近似模拟。

根据表 8 的样本空间及仿真结果构建了桥臂电抗器测点声压级、材料用量与隔音装置结构参数之间的 Kriging 近似模型，其响应关系如图 16。

为优化隔音装置结构参数，获得更好的降噪效果，采用多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)进行优化设计。MOGA 算法是基于受控精英概念的流行非支配排序遗传算法 II 的变体，支持多个目标和约束，旨在寻找全局最优解。

表 7 方差分析表

Table 7 Table of variance analysis

性能指标	因素	偏差平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平
SPL	x_1	5.031	2	2.516	0.046	0.955
	x_2	3.028	2	1.514	0.028	0.973
	x_3	2.058	2	1.029	0.019	0.981
	x_4	15.908	2	7.954	0.149	0.863
	x_5	8.268	2	4.134	0.077	0.927
	x_6	775.647	2	387.823	137.193	
	误差	1.635	2			
材料用量	x_1	0.391	2	0.196	1.805	0.198
	x_2	0.033	2	0.017	0.126	0.883
	x_3	0.139	2	0.069	0.555	0.586
	x_4	0.159	2	0.080	0.644	0.539
	x_5	0.074	2	0.037	0.287	0.754
	x_6	1.015	2	0.508	7.608	0.005
	误差	0.081	2			

表 8 样本空间及仿真结果

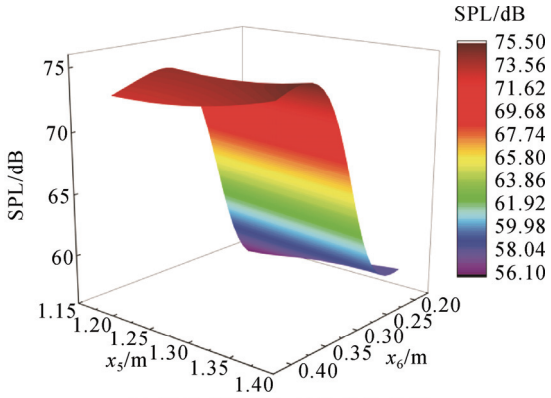
Table 8 Sample Space and the simulation results

试验编号	x_4 /m	x_6 /m	SPL/dB	材料用量/m³
1	1.258	0.233	59.3	5.8424
2	1.324	0.278	66.3	5.9395
3	1.191	0.211	56.9	5.8189
4	1.302	0.3	71.7	6.0339
5	1.213	0.367	73.7	6.3339
6	1.369	0.256	60.6	5.8263
7	1.280	0.389	73.4	6.3589
8	1.347	0.344	74	6.1498
9	1.236	0.322	75.2	6.1633

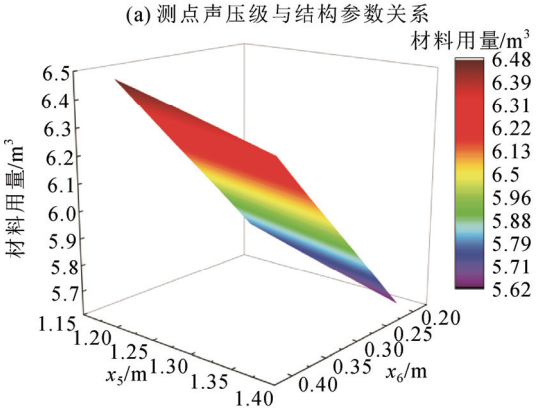
基于上述的 Kriging 近似模型，结合 MOGA 优化算法，获得了最佳的遮雨帽和隔音装置结构参数，如表 9 所示。

根据表 9 的最优结构参数，在保持桥臂电抗器电气和结构参数恒定的条件下，进行声场仿真计算，得到优化前后测点声压级分布如图 17 所示。

对图 17 测点进行平均声压级数值计算，得到最优结构参数下的降噪结果为 58.2 dB，相比于优化前的 68.6 dB 降低 15.2%；材料用量为 5.63 m³，相比优化前的 6.18 m³ 减少 8.9%，仿真结果验证了优化方法的正确性。为进一步降低测点声压级水平，可以根据图 9(b)噪音传播方向在隔音装置内部增设吸声片。



(a) 测点声压级与结构参数关系



(b) 材料用量与结构参数关系

图 16　Kriging 近似模型

Fig.16　Kriging approximation model

表 9　最优结构参数

Table 9　Optimal structural parameters

优化变量	x_1 /m	x_2 /m	x_3 /m	x_4 /m	x_5 /m	x_6 /m
优化值	1.876	0.2	0.2	1.38	0.2	0.2

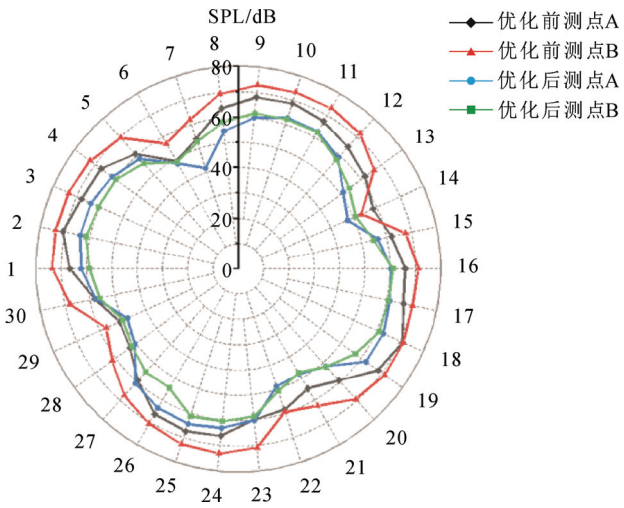


图 17　优化前后声压级分布

Fig.17　Sound pressure level distribution before and after optimization

最后，桥臂电抗器降噪构件的设计还需考虑运行条件等综合因素，加装隔音装置后，部分包封线圈温升大幅度增加，因此，降噪构件所用材料也必须满足温升、绝缘要求。将温升等作为协同优化目标，本文提出的优化设计思路同样适用。

5　结论

1）桥臂电抗器受交流电磁力作用产生受迫振动且主要振动频率为 100 Hz。交直流复合工况下，直流分量与交流分量相互作用使 50 Hz 频率下的振动效应增强。

2）在振动频率 100 Hz 下，声音传播呈现明显的方向性，主要是由固有频率振型决定并受星型架固定作用影响，噪声自相邻星型架之间向周围辐射形成方向效应；直流分量与交流分量的相互作用将影响声音传播的主要方向；随四周墙面吸声系数增加，声压级水平明显降低，随地面吸声系数增加，声压级变化幅值较小且略有升高。

3）通过正交试验和方差分析研究隔音装置结构参数对声压级水平和材料用量的影响，结果表明 x_4、x_6 对试验结果影响较为显著，x_3 影响程度最低。基于 MOGA-Kriging 优化模型获得的最优结构参数组合使得桥臂电抗器测点声压级降低 15.2%，材料用量减少 8.9%。提出了在降噪装置内部沿声音传播方向增设吸声片的降噪方案。

参考文献　References

[1] 褚凡武，付　颖，王　琦，等. 不同工况下干式空心滤波电抗器稳态磁场及电磁力分布规律[J]. 高压电器，2019，55(11)：41-47.
ZHU Fanwu, FU Ying, WANG Qi, et al. Distributions of steady-state magnetic field and electromagnetic force of a dry-type air-core filter reactor under different operating conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 41-47.

[2] 祝令瑜，杜一鸣，高　璐，等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3201-3209.
ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry-type air-core reactor with turn-to-turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.

[3] XIAO Y, CAO J A, XIONG X, et al. Research on vibration measurement method and analysis of air-core reactor[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.

[4] 应承伟，李水清，王文华，等. 基于多物理场耦合的车载空心电抗器振动特性研究[J]. 机电工程，2018，35(3)：293-297.
YING Chengwei, LI Shuiqing, WANG Wenhua, et al. Random vibration characteristics of air core reactor based on multi-physics field coupling theory[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(3): 293-297.

[5] 张嵩阳，何　强，肖伟民，等. 干式空心电抗器的试验模态特征分析[J]. 应用声学，2020，39(5)：730-735.
ZHANG Songyang, HE Qiang, XIAO Weimin, et al. Experimental

modal analysis of dry-type air-core reactor on eigensystem realization algorithm method[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(5): 730-735.

[6] 宋新伟. 干式空心电抗器振动特性研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018.
SONG Xinwei. Research on vibration characteristics of dry-type air-core reactor[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2018.

[7] 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.

[8] 何 强，樊 超，王 斌，等. 基于加密测点的干式空心平波电抗器声场分布特性[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(6)：78-82.
HE Qiang, FAN Chao, WANG Bin, et al. Acoustic field distribution characteristics of dry-type air-core smoothing reactor based on encryption measuring point[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 78-82.

[9] 胡春江，刘 康，张广东，等. 正弦波电流激励下干式空心电抗器的振动与噪声特性分析[J]. 变压器，2021，58(9)：51-55.
HU Chunjiang, LIU Kang, ZHANG Guangdong, et al. Analysis of vibration and noise characteristics of dry-type air-core reactors under sine-wave current excitation[J]. Transformer, 2021, 58(9): 51-55.

[10] GAO L, JI S C, ZHU L Y, 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.

[11] 陈图腾. 特高压直流平波电抗器运行状态研究[M]. 北京：中国水利水电出版社，2016.
CHEN Tuteng. Research on operation state of UHV DC smoothing reactor[M]. Beijing, China: China Water & Power Press, 2016.

[12] 魏新劳. 大型干式空心电力电抗器设计计算相关理论研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2002.
WEI Xinlao. Research on design and calculation of large dry-type air-core power reactor[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2002.

[13] 郑莉平，孙 强，刘小河，等. 干式空心电抗器设计和计算方法[J]. 电工技术学报，2003，18(4)：81-84，93.
ZHENG Liping, SUN Qiang, LIU Xiaohe, et al. Design and calculation methods of dry-type air reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 81-84, 93.

[14] 陈乔夫，马晓久. 多层并联空心电抗器的支路电流计算[J]. 变压器，1994，31(4)：35-38.
CHEN Qiaofu, MA Xiaojiu. Branch current calculation of multilayer shunt air-core reactor[J]. Transformer, 1994, 31(4): 35-38.

[15] 侯启鑫，李庆民，邹 亮，等. 桥臂电抗器轴向分割结构的优化设计方法[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3946-3954.
HOU Qixin, LI Qingmin, ZOU Liang, et al. Optimized methodology of axial partition structure for bridge arm reactor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3946-3954.

[16] GNING P, LANFRANCHI V, DAUCHEZ N. Influence of the multi-component electrical feed of air-core industrial reactors on their sound radiation[J]. Acta Acustica, 2020, 4(4): 14.

[17] 阎秀恪，杨桂平，洛君婷，等. 空心电力电抗器的磁场研究与环流计算[J]. 变压器，2010，47(6)：1-4，9.
YAN Xiuke, YANG Guiping, LUO Junting, et al. Magnetic field research and circulating current calculation of power reactor with air core[J]. Transformer, 2010, 47(6): 1-4, 9.

[18] 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]. Ji'nan, China: Shandong University, 2021.

[19] 蔡 萱，马玉圣，许 超. 特高压变电站电抗器复杂声场的研究与控制[J]. 噪声与振动控制，2020，40(5)：187-191.
CAI Xuan, MA Yusheng, XU Chao. Research and control of complex sound field of high voltage reactor in UHV substations[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(5): 187-191.

[20] 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, China: Wuhan University, 2014.

[21] Power transformers-part 10: determination of sound levels: IEC 60076-10: 2016[S], 2016.

[22] LILIEN J L. Acoustic noise generated by air power reactor in open-air substation[J]. European Transactions on Electrical Power, 2006, 16(3): 297-310.

[23] 胡雨龙，李 兴，赵 明. 高压直流换流站噪声综合治理[J]. 南方电网技术，2009，3(1)：49-52.
HU Yulong, LI Xing, ZHAO Ming. Comprehensive control and treatment of HVDC converter station noise[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 49-52.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第 6 部分：电抗器：GB/T 1094.6—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers—part 6: reactors: GB/T 1094.6—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.

[25] 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.

[26] 李伟平，冯子农，单喜乐，等. 基于正交试验的矿用车驾驶室多参数优化设计[J]. 机械强度，2018，40(6)：1356-1363.
LI Weiping, FENG Zinong, SHAN Xile, et al. Multi-parameter optimization design of mining truck's cab based on orthogonal experimental[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(6): 1356-1363.

[27] 袁发庭，姬睿氢，吕 凯，等. 考虑硅钢片磁致伸缩特性的干式铁心电抗器铁心振动分析及优化[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 mode[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1486-1494.



侯世英
1962—，女，博士，教授
主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、新能源发电及变换器拓扑与控制等
E-mail: Houshiying@cqu.edu.cn

HOU Shiying
Ph.D., Professor



杨 帆(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电工装备多物理场计算与数字孪生技术、太赫兹成像方法及应用
E-mail: yangfan@cqu.edu.cn

YANG Fan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-02-22 修回日期 2023-05-10 编辑 卫李静