

一种变压器噪声控制用吸隔声装置 开发*

党乐¹ 田一² 崔亚茹¹ 史昌明¹ 聂京凯² 佟敏¹

摘要: 针对声源设备本体的噪声控制技术近年来获得重点研究, 尤其是在电网领域, 由于变压器低频噪声影响, 许多变电站面临厂界噪声超标风险。文中研发了一种变压器本体降噪用吸隔声装置, 首先基于阻抗复合原理, 通过微穿孔板、硅酸铝纤维毡的复合, 设计了带有中间腔的吸声构件; 随后通过橡塑共混工艺, 加工了室温下具有阻尼峰值的橡胶, 制备了约束阻尼隔声构件; 最后, 将吸隔声构件复合, 定型了变压器用吸声装置, 并进行应用测试。结果表明, 110 kV50 MVA 变压器安装该装置后, 噪声声压级由 65 dB (A) 下降至 56 dB (A)。

关键词: 阻抗复合; 约束阻尼; 吸隔声装置; 阻尼橡胶; 变压器降噪

Development of a Sound Absorption and Insulation Device for Transformers Noise Control

Le DANG, Yi TIAN, Yaru CUI, Changmin SHI, Jingkai NIE, Min TONG

Abstract: In recent years, the noise control technology for sound source equipment has received significant research attention, especially in the field of power grids. Due to the influence of low-frequency noise from transformers, many substations face the risk of exceeding factory boundary noise standards. This article develops a sound absorption and insulation device for transformer body noise reduction. Firstly, based on the impedance composite principle, a sound absorption component with an intermediate cavity is designed by combining micro perforated plates and aluminum silicate fiber felt. Subsequently, rubber with damping peaks at room temperature is processed through rubber plastic blending technology, and constrained damping sound insulation components are prepared. Finally, the sound absorption and insulation components were

收稿日期: XXXX-XX-XX

修回日期: XXXX-XX-XX

接受日期: XXXX-XX-XX

基金: 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院科技项目(526604220006)。

composite, and the sound absorption device for transformers was finalized and tested for application. The results show that after the installation of the 110 kV50 MVA transformer, the noise sound pressure level decreases from 65 dB(A) to 56 dB(A).

Keywords: impedance composite; constrained damping; sound absorption and insulation device; damping rubber; transformer noise reduction

0 引言

近年来,国家高度重视噪声扰民等环保问题,出台了多项噪声类法律法规。同时,人民群众环保意识普遍提升,对生活环境也提出更高要求,居民区周边的噪声超标工业企业,均需进行降噪改造。目前,应用较为成熟的噪声控制技术为采用吸声、隔声、消声和隔振等辅助降噪措施,切断噪声传播途径^[1-4]。但该类技术未能从根源上消除噪声影响,且各类辅助降噪措施的安装容易干涉消防、影响检修。为此,针对声源设备的本体降噪技术已成为未来降噪的主要趋势。

在电网领域,变压器、电抗器作为主要声源设备,其服役工况条件较为复杂^[5-8],设备铁心构件因磁致伸缩产生振动,通过绝缘油和器身底座传递至油箱,产生振动放大,很容易出现噪声振动水平超标的情况,对周边生态环境带来负面影响^[9-11]。为抑制声源设备噪声的产生与传递,国内外学者对设备本体降噪技术开展了大量研究^[12-15],包括通过低磁致伸缩取向硅钢的应用,以及接缝结构优化,降低铁心噪声的产生^[16-17];通过器身阻尼垫、油箱内壁阻尼板的应用,控制器身—油箱间的振动,取得了良好的降噪效果^[18-21]。如文[16]采用低磁致伸缩硅钢 B30P105-LM,其磁致伸缩加速度水平降低 1.5 dB(A);文[18]在油箱内设置了去耦覆盖层,有效降噪量 7.1 dB(A);文[19]在电抗器铁心与油箱之间设置橡胶—纸板复合隔振装置,隔振效率不小于 75%。该类本体降噪装置均位于油箱内部,长期承受油浸、高温、器身载荷等影响,对材料的耐老化性能提出了较高要求,同时改变了设备内部电气结构设计。为此,现有本体降噪技术逐渐重视油箱外的装置开发^[22-26]。文[22]设计了变压器基础隔振措施,隔振效率 99% 以上;文[24]分析了变压器的油箱降噪措施,包括提高油箱刚度、加强铁内填充材料、使用双层油箱等;部分厂家引进日本的隔音壁技术,在油箱外侧设置隔声挡板,一定程度上降低了噪声水平。但由于现有的降噪材料、装置在设计时未考虑变压器噪声的频谱特征,其降噪效果有限。为此,文中在测试分析变压器近场噪声的基础上,通过低频吸声结构与隔声结构的研制与复合,开发了一种油箱外降噪用吸隔声装置,实现了对变压器的良好声学密封,有效降低了设备噪声水平。

1 理论分析

吸声材料主要分为多孔阻性吸声材料与共振吸声材料，前者通过增加厚度与容重提升低频吸声系数，后者通过控制背腔尺寸，调整共振频率至低频段优化低频吸声。但前者低频性能提升效率低，增加材料的重量与成本，后者的宽频吸声效果较差。为此，人们提成阻抗复合吸声结构，将共振吸声材料与多孔阻性吸声材料复合。

首先分析共振材料的声学性能影响参数，文中选用常用的微穿孔板进行设计，其声阻抗率为^[27-30]

$$Z_m = \begin{cases} \frac{32\mu l}{d^2} + j\frac{4}{3}\omega\rho_0 l & x < 1 \\ \frac{32\mu l}{\Phi d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}xd}{8l} \right) \\ + j\frac{\omega\rho_0 l}{\Phi} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{1}{2}x^2}} + \frac{8d}{3\pi l} \right) & 1 < x < 10 \\ \sqrt{2\rho_0\mu\omega} \frac{2l}{d} + j\omega\rho_0 l \left(1 + \frac{2}{d} \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho_0}} \right) & x > 10 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： μ 为运动粘滞系数； ρ_0 为空气密度； l 为微孔长度； d 为微孔直径； ω 为角频率； Φ 为孔隙率； $x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\mu}}$ 。

采用传递矩阵法，微穿孔板的传递矩阵为

$$T_{MMP} = \begin{bmatrix} 1 & Z_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于阻性降噪材料，其传递矩阵为

$$T_D = \begin{bmatrix} \cos(kD) & i\rho \sin(kD) \\ \frac{i \sin(kD)}{\rho c} & \cos(kD) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中： k 为材料的波数，且满足 $k=2\pi f/c$ ， c 为介质中的声速； D 为材料的厚度； ρ 为材料的密度。其中，空气也属于一种阻性材料，其传递矩阵按照此公式计算。若存在多层降噪材料，则其传递矩阵为

$$T_D = T_{D1} \cdot T_{D2} \cdots T_{Dn} \quad (4)$$

式(4)中， T_{Dn} 为第 n 层降噪材料的传递矩阵。

由微穿孔板与多孔阻性吸声材料组成的阻抗复合吸声结构，其整体传递矩阵为

$$T_{total} = T_{MMP} \cdot T_D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

阻抗复合结构的表面声阻抗和吸声系数分别为

$$Z = \frac{a_{11}}{a_{21}} \quad (6)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (7)$$

同时，在获得传递矩阵的基础上，复合结构的透射系数为^[10]

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{2}{a_{11} + a_{22} + a_{12} \frac{k_0}{\rho_0 \omega} + a_{21} \frac{\rho_0 \omega}{k_0}} \\ &= \frac{2}{a_{11} + a_{22} + a_{12} \frac{1}{\rho_0 c_0} + a_{21} \rho_0 c_0} \end{aligned} \quad (8)$$

进而得到其计权隔声量

$$TL = 20 \lg \frac{1}{\tau} \quad (9)$$

根据上述公式可知，吸声、隔声构件的声学性能受到其尺寸、容重等参数的影响，通过该参数的优化设计，可实现降噪装置吸隔声性能的提升。

2 降噪装置开发

对待进行噪声治理的变压器进行噪声测试与频谱分析，频谱见图1。其噪声峰值主要集中在1 000 Hz以下的中低频，以100、250 Hz等为主，噪声治理时需针对该频段进行重点治理。

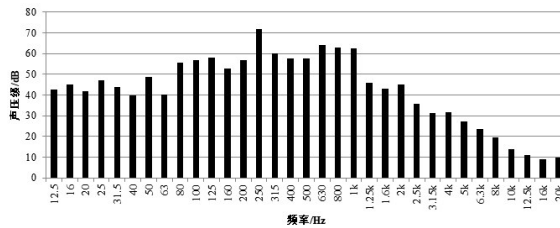


图1 变压器噪声频谱特征

Fig. 1 Transformer noise spectrum feature

2.1 吸声构件设计

常见的阻抗复合式吸声结构，由微穿孔板、多孔阻性吸声材料与背腔组成。作为一种共振吸声材料，微穿孔板的数量为单块时，其共振效应消耗的噪声声能量相对有限，故文[27]提出了双层微穿孔板的结构设计。文中为进一步提升吸声性能，设计了3块微穿孔板复合结构，并将其组成三角形。噪声垂直入射，进入该结构时，将在三角形结构内部发生多次反射与吸收，而常规方案一般将3块吸声板平行布设，噪声垂直入射后即被垂直反射，故该三角形结构的吸声性能更加优良。微穿孔板三角形结构与多孔阻性吸声材料复合后，最终结构见图2。

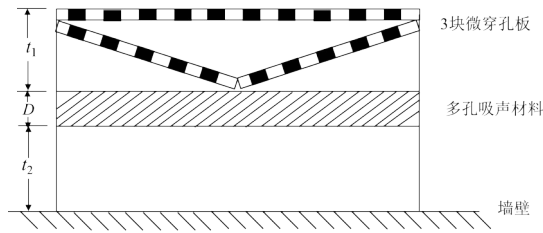


图2 阻抗复合吸声结构

Fig. 2 Impedance composite sound-absorbing structure

图2中： D 为多孔吸声材料厚度； t_1 为中间腔厚度； t_2 为背腔厚度。中间的双层微穿孔板以倾斜角 θ 布设，使得双层板之间的噪声发生多次反射，增加了对声能的耗散作用，双层板之间的空气腔厚度沿着垂直方形不断变化。对于双层板之间水平距离为 x 的点，双层微穿孔板与空气腔的传递矩阵为

$$T_{double} = \begin{bmatrix} 1 & Z_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(kx) & i\rho c \sin(kx) \\ \frac{i \sin(kx)}{\rho c} & \cos(kx) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_M \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(kt_1 - kx) & i\rho c \sin(kt_1 - kx) \\ \frac{i \sin(kt_1 - kx)}{\rho c} & \cos(kt_1 - kx) \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(10)、(5)-(7)，即可求解获得复合结构在双层板之间水平距离为 x 的点的声阻抗。当 x 由0变化为 t_1 时，双层板之间的声阻抗特性不断变化，可以看作 n 个不同阻抗特性的微穿孔板并联排布。假设微穿孔板上的微孔均匀布设，根据电声类比法，并联排布的微穿孔板，整体声阻抗为

$$Z_{total} = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{Z_i} \right]^{-1} \quad (11)$$

式(11)中， A 为微穿孔板整体面积， A_i 为水平距离 x 处对应的微穿孔板面积。由于微穿孔均匀分布，可视作 $A_i=A/n$ 。 Z_i 为根据式(9)、(5)-(7)求解出的水平距离 x 处

的声阻抗和整体吸声系数。

首先对单层微穿孔板结构参数进行设计。根据DL/T 2085—2020《变电站降噪材料和降噪装置技术要求》，降噪装置整体厚度不应超过12 cm。为减小降噪装置挤占的变压器检修空间，文中设计的降噪装置厚度不超过10 cm。最终确定其厚度0.5 mm，穿孔率0.5%，孔径0.3 mm，通过测试获得其吸声系数曲线(SAC curve, sound absorption coefficient curve)，该构件在250 Hz吸声系数高达0.76。微穿孔板吸声系数测试结果见图3。

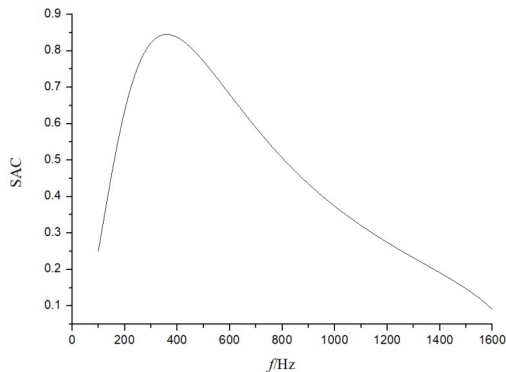


图3 微穿孔板吸声系数测试结果

Fig. 3 Test results of sound absorption coefficient for micro-perforated panel

对多孔阻性材料进行设计。在常用的玻璃棉、聚酯纤维等材料中，硅酸铝纤维导热率优良，化学稳定性高，不含粘结剂和腐蚀性物质，已在电网领域获得一定程度的应用。将微穿孔板与硅酸铝纤维毡按照图2方式复合，根据式(3)、(4)、(6)、(7)可知，吸声结构中不同材料的厚度、容重均会影响吸声性能。因此，采用Comosl软件，构建了复合吸声结构的声场仿真模型，对复合结构整体厚度、容重、纤维毡材料厚度和中间腔厚度影响依次进行分析，分4步确定各参数的最优值，具体方案见表1，其中整体厚度表示硅酸铝材料厚度与中间腔、背腔厚度之和。根据图1中变压器噪声峰值频率，仿真优化设计中主要考虑100 Hz吸声系数、250 Hz吸声系数和250~1 000 Hz平均吸声系数。由于复合装置为对称结构，建模时截取右半部分进行分析，并将左侧设置为对称边界条件，见图4。该模型最上侧为完美匹配层，入射声场向下方微穿孔板与硅酸铝纤维毡传递后，产生吸声作用并导致噪声衰减后，剩余的噪声进入背腔。根据图5中仿真结果可知，入射噪声进入微穿孔板组成的三角形结构后，发生强烈的共振效应，噪声在该结构中多次反射，导致该结构内声压水平达到90 dB以上；噪声穿透该结构后进入硅酸铝多孔材料时，声压水平发生大幅衰减，并经过硅酸铝纤维毡进一步吸收后，实现了高效的吸声治理。根

据表1的优化方案，采用Comsol仿真计算获得的吸声系数曲线见图6-9，关键吸声系数对比见表2。

表1 复合结构参数优化
Table 1 Optimization of composite structure parameters

序号	整体厚度/cm	容重/(kg·m ⁻³)	材料厚度/cm	中间腔厚度/cm
第1步	6、8、10	96	2	0
第2步	优选值	80、96、110	2	0
第3步	优选值	优选值	2、3、4	0
第4步	优选值	优选值	优选值	0、1、2

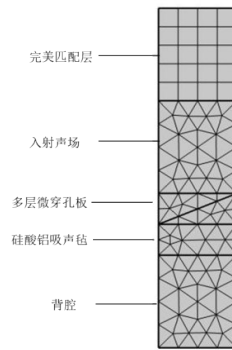


图4 吸声结构仿真模型的构建

Fig. 4 Construction of simulation model for sound absorption structure

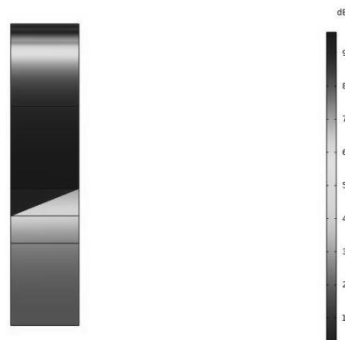


图5 阻抗复合吸声结构声场仿真分析

Fig. 5 Sound field simulation analysis of impedance composite sound absorption structure

根据表2中第1步和第2步的吸声系数对比，吸声结构整体厚度10 cm、硅酸铝容重96 kg/m³时，变压器噪声峰值频率下的吸声性能最佳；在第3步中，当材料厚

度由 2 cm 增加至 3、4 cm 时, 100 Hz 吸声系数的提升相对有限, 但 250 ~ 1 000 Hz 平均吸声系数大幅下降, 不利于中高频吸声; 在第 4 步中, 当中间腔为 1 cm 时, 吸声结构兼顾了 100 Hz 低频吸声和 250 ~ 1 000 Hz 中高频吸声需求。因此, 最终确定硅酸铝纤维毡厚度 2 cm、容重 96 kg/m³, 中间腔为 1 cm, 整体厚度 10 cm, 与微穿孔板组成的阻抗复合结构。

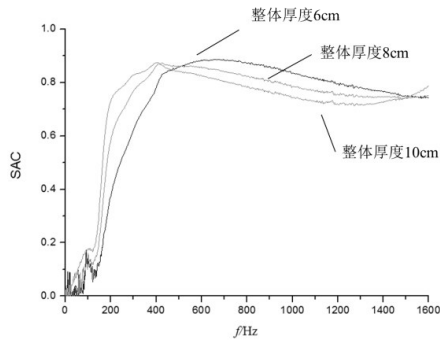


图 6 整体厚度对吸声性能影响

Fig. 6 The influence of back cavity thickness on sound absorption performance

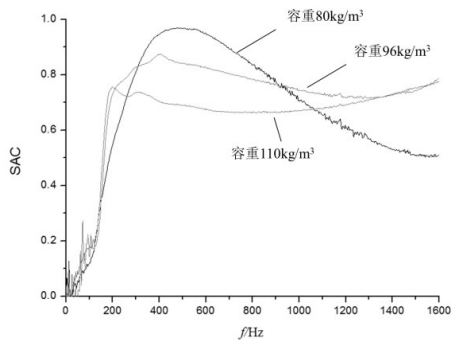


图 7 材料容重对吸声性能影响

Fig. 7 The influence of material bulk density on sound absorption performance

2.2 约束阻尼隔声构件设计

为提升隔声性能, 文中设计了约束阻尼结构的隔声板。该结构将具有阻尼作用的粘弹性材料贴附在薄板件表面, 当结构产生振动时, 粘弹性材料会随着结构变形, 产生交变的应力和应变, 从而起到抑制振动和降低噪声的作用。约束阻尼隔声结构见图 10。

为了在室温下获得较高的阻尼系数, 进而提升约束阻尼结构的整体隔声性能, 对阻尼层用橡胶的配方体系进行设计。选择了片层氧化石墨烯(GO)作为填充剂,

丁基橡胶(IIR)作为基体,进行高性能阻尼橡胶制备。该类橡胶的阻尼因子峰值温度,一般在 $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,与复合吸隔声装置的服役温度不匹配。为此,本项目利用橡塑共混方法,通过树脂添加进行改性设计。其中,基体橡胶选择丁基橡胶,该橡胶是变压器中常用的耐油密封橡胶,阻尼性能优良;采用氧化石墨烯作为补强填料,该纳米颗粒填料分散性良好,可均匀分布在橡胶基体中,增加材料相互运动的阻尼,进而优化其阻尼性能;采用201树脂作为添加剂,该添加剂有助于增加橡胶材料的服役温域范围,保证橡胶的阻尼因子峰值出现在室温附近;氧化锌可促进橡胶交联反应,改善其弹性模量等。按照表3所示的配方,通过混炼工艺制备出不同配方的橡胶样品,采用动态力学热分析仪(DMA)测试获得不同配方的橡胶阻尼系数。不同配方下阻尼橡胶的阻尼系数见图11。

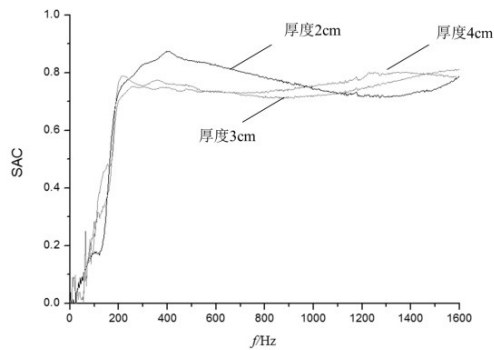


图8 材料厚度对吸声性能影响

Fig. 8 The influence of material thickness on sound absorption performance

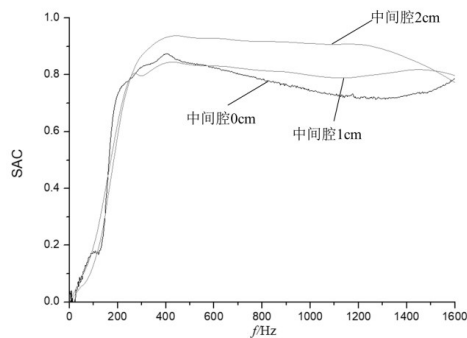


图9 中间腔厚度对吸声性能的影响

Fig. 9 The influence of intermediate cavity thickness on sound absorption performance

由图11可知,随着树脂用量的增加,阻尼损耗峰值温度也逐渐增加,从添加量为5 phr的 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近增加到添加量为40 phr的 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近。这是因为一方面橡胶交

联密度逐渐增大，橡胶玻璃化转变温度也随之有所升高，损耗峰向高温段移动；另一方面，201树脂本身玻璃化温度约为49℃，其与丁基橡胶共混后最佳阻尼区域应该在丁基橡胶和201树脂玻璃化温度之间。最终选用配方5，即1000 phr的丁基橡胶、3 phr氧化石墨烯、40 phr的201树脂和5 phr的ZnO，进行阻尼橡胶制备。对该阻尼橡胶的微观组织进行SEM分析，见图12，填料与橡胶基体之间的界面模糊，说明填料—橡胶界面作用较强，填料与橡胶有着很好的相容性。

表2 不同优化步骤中仿真计算获得的吸声系数

Table 2 SAC through simulation calculation at different optimization steps

序号	优选参数	100 Hz吸声系数	250 Hz吸声系数	250 ~ 1000 Hz平均吸声系数
第1步	整体厚度6 cm	0.08	0.43	0.77
	整体厚度8 cm	0.09	0.62	0.80
	整体厚度10 cm	0.18	0.78	0.81
第2步	容重80 kg/m ³	0.12	0.69	0.87
	容重96 kg/m³	0.18	0.78	0.81
	容重110 kg/m ³	0.14	0.72	0.68
第3步	材料厚度2 cm	0.18	0.78	0.81
	材料厚度3 cm	0.20	0.77	0.73
	材料厚度4 cm	0.21	0.75	0.74
第4步	中间腔0 cm	0.18	0.78	0.81
	中间腔1 cm	0.20	0.78	0.85
	中间腔2 cm	0.13	0.78	0.91



图10 约束阻尼隔声结构

Fig. 10 Constrained damping sound insulation structure

采用氧化石墨烯填充阻尼橡胶与双层钢板复合，开发了约束阻尼隔声板。为确定阻尼橡胶与钢板的最佳厚度组合，采用Comsol构建了隔声板声场仿真模型，见图13。该模型上下2端为完美匹配层，施加向下传递的入射声场，采用压力声学—结构力学模块仿真分析约束阻尼隔声板对噪声传播的阻挡效果，计算出背腔中透射声的声压级。由于轻量化需求，隔声板的整体厚度不超过5 mm。为此，本项目确定了3种结构方案，见表4。根据图14声场仿真分析结果，噪声入射至隔声板时，几乎未发生声透射现象，表明该隔声板具备优良的隔声性能。通过在仿真模型中板

材上方和下方设置探针，提取该位置的声压级，二者之差即位板材的隔声量，计算结果列于表4中。结果表明，2 mm钢板+1 mm橡胶+2 mm钢板的约束阻尼隔声板，其计权隔声量达到35 dB，性能最佳。

表3 改性阻尼橡胶配方设计

Table 3 Formula design of modified damping rubber

序号	成分及含量/phr			
	丁基橡胶	氧化石墨烯	201树脂	氧化锌
1	100	3	5	5
2	100	3	10	5
3	100	3	20	5
4	100	3	30	5
5	100	3	40	5

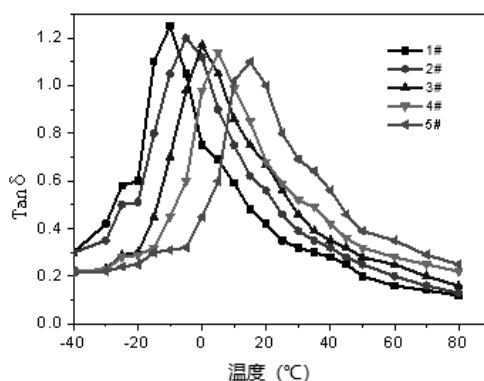


图11 不同配方下阻尼橡胶的阻尼系数

Fig. 11 Damping coefficient of damping rubber under different formulations

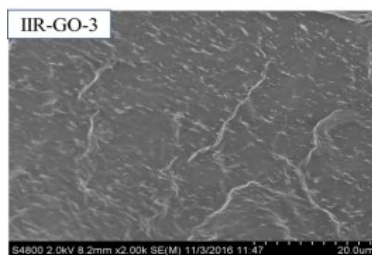


图12 阻尼橡胶微观结构图

Fig. 12 Microscopic structure diagram of damping rubber

2.3 降噪装置定型

将阻抗复合吸声结构，与约束阻尼隔声板复合，最终定型了新型吸隔声降噪装

置，见图 15。经测试可知，其计权隔声量达到 39 dB，1/3 倍频程隔声量见图 16。在 100 Hz 以上，吸隔声装置的隔声量均超过了 25 dB，对低频噪声具有良好的阻隔效果。

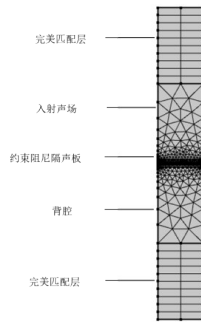


图 13 约束阻尼隔声板仿真模型构建

Fig. 13 Construction of simulation for constrained damping sound insulation board

表 4 约束阻尼隔声结构厚度优化

Table 4 Thickness optimization of constrained damping sound insulation structure

方案序号	方案 1	方案 2	方案 3
结构组成	1 mm 钢板+3 mm 阻尼橡胶+1 mm 钢板	1.5 mm 钢板+2 mm 阻尼橡胶+1.5 mm 钢板	2 mm 钢板+1 mm 橡胶+2 mm 钢板
隔声量仿真计算结果/dB	29	31	35



图 14 约束阻尼隔声板声场仿真分析

Fig. 14 Simulation analysis of sound field of constrained damping sound insulation board

3 降噪装置应用

将该复合吸隔声装置安装于 110 kV50 MVA 变压器油箱外侧、散热片内测，实现对油箱的声学密封功能。安装中，需在散热片连接处、升高座处以及油枕位置进

行开洞和封堵处理，保证吸隔声构件与变压器的良好匹配。在安装前后，按照相关标准对变压器声压级进行测试。结果表明，变压器噪声声压级由 65 dB(A)下降至 56 dB(A)，整体降噪量达到 9 dB(A)。而常规变压器厂家采用措施，其降噪效果一般为 2~3 dB(A)^[31]。在安装复合吸隔声装置前后，对变压器顶层油温进行测试，安装前油温为 68 °C，安装后为 70.3 °C，均满足变压器安全运行需求。变压器上复合吸隔声装置的安装见图 17。

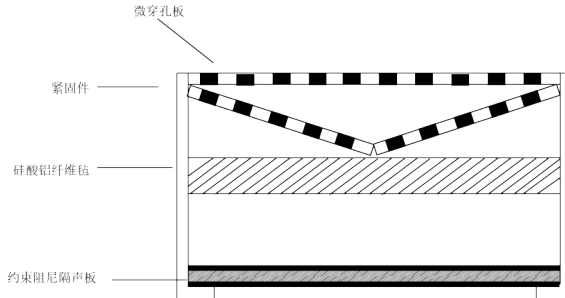


图 15 变压器用复合吸隔声装置

Fig. 15 Composite sound absorption and insulation device for transformers

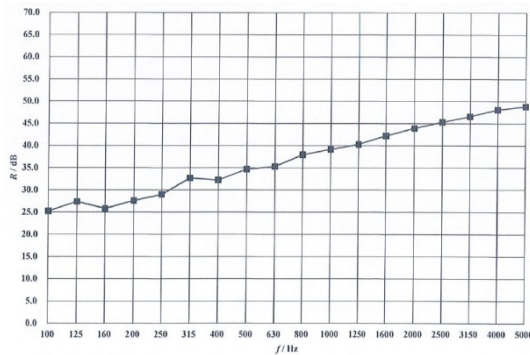


图 16 吸隔声装置的隔声性能

Fig. 16 Sound insulation performance of sound absorption and insulation devices

4 结论

文中采用传递矩阵法，分析了吸声构件与隔声构件的声学性能影响关键参数，通过阻性、共振材料复合与约束阻尼结构设计，分别开发了阻抗复合式吸声构件与约束阻尼隔声构件，并定型加工为复合吸隔声装置，在变压器上进行了应用与噪声测试。

1)设计了厚度 0.5 mm，穿孔率 0.5%，孔径 0.3 mm 的微穿孔板，加 2 cm 中间

腔，加厚度2 cm、容重 96 kg/m^3 硅酸铝，整体厚度10 cm的阻抗复合吸声构件，在250 Hz吸声系数高达0.87。

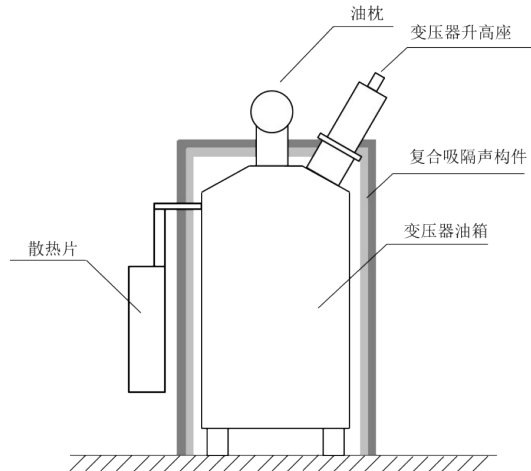


图 17 变压器上复合吸隔声装置的安装

Fig.17 Installation of composite sound absorption and insulation devices on transformers

2)通过丁基橡胶、氧化石墨烯与201树脂共混加工，制备了新型阻尼橡胶，在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 获得阻尼系数峰值。

3)设计了2 mm钢板+1 mm新型阻尼橡胶+2 mm钢板的约束阻尼隔声板，其计权隔声量达到35 dB。

4)由阻抗复合吸声构件与约束阻尼隔声构件组成的吸隔声装置，100 Hz以上的隔声量均超过了25 dB。

5)将该装置应用于110 kV50 MVA变压器上，经噪声测试，变压器噪声声压级由65 dB(A)下降至56 dB(A)，整体降噪量达到9 dB(A)。

参考文献

[1] 王广周, 韩 豫, 王磊磊, 等. 用于变压器整数阶谐波噪声的吸声超表面研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 130-137.

WANG Guangzhou, HAN Yu, WANG Leilei, et al. Research of acoustic absorption metasurface for transformer integer order harmonic noise[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 130-137.

[2] 倪 园, 王延召, 周 兵, 等. 特高压变电站厂界环境对噪声衰减影响研究[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 119-125.

NI Yuan, WANG Yanzhao, ZHOU Bing, et al. Research on effect of boundary environment on

- noise attenuation in UHV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 119-125.
- [3] 胡胜, 陈炜, 吕帮通, 等. 一种变电站消声器结构参数优化设计[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 245-248.
- HU Sheng, CHEN Wei, LV Bangtong, et al. Optimal design of structural parameters of mufflers in substations[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(3): 245-248.
- [4] 伍文科, 杜林林, 秦敬伟, 等. 干式铁芯电抗器设备振动控制措施研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(2): 214-218.
- WU Wenke, DU Linlin, QIN Jingwei, et al. Research on vibration control measures of dry-type reactor equipment[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(2): 214-218.
- [5] 陈彬, 席彬晟, 李学宝, 等. 纳米晶铁心中频变压器磁—结构场耦合数值模拟[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 172-181.
- CHEN Bin, XI Binsheng, LI Xuebao, et al. Magnetic-structural field coupling numerical simulation of medium-frequency transformer with nanocrystalline core[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 172-181.
- [6] 潘超, 安景革, 刘闯, 等. 变压器偏磁效应噪声特性的多场耦合分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 5077-5088.
- PAN Chao, AN Jingge, LIU Chuang, et al. Multi-field coupling analysis and suppression for biased magnetic noise in transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5077-5088.
- [7] 邢琳, 张帅, 李燕, 等. 间谐波激励下铁心振动噪声特性研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 78-83.
- XING Lin, ZHANG Shuai, LI Yan, et al. Vibration and noise characteristics of the core of a power transformer under interharmonic excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 78-83.
- [8] 张壮壮, 祝令瑜, 王磊磊, 等. 新型电力系统下负载因素对三相油浸式变压器振动噪声特性影响的试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 45-54.
- ZHANG Zhuangzhuang, ZHU Lingyu, WANG Leilei, et al. Test study on influence of load factors on vibration and noise characteristics of the three-phase oil immersed transformer under new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 45-54.
- [9] 钟思翀, 祝丽花, 王前超, 等. 电力变压器振动噪声分析及其有源降噪[J]. 电工技术学报, 2022, 37(s1): 11-21.
- ZHONG Sichong, ZHU Lihua, WANG Qianchao, et al. Electromagnetic vibration of power transformer and active noise reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(s1): 11-21.
- [10] 张超, 刘国强, 芦竹茂, 等. 特高压交流变压器噪声干涉及衰减特性[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 1-7.
- ZHANG Chao, LIU Guoqiang, LU Zhumao, et al. Noise interference and attenuation characteristic of UHV AC transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 1-7.
- [11] 张程, 孟飞, 郭添亨, 等. 变电站低频噪声吸声材料研究[J]. 高电压技术, 2023, 49

- (s1): 196-198.
ZHANG Cheng, MENG Fei, GUO Tianheng, et al. Research on sound absorption material for substation low-frequency noise[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(s1): 196-198.
- [12] 贲彤, 方敏, 陈龙, 等. 非晶合金铁心电抗器减振结构的电磁-机械耦合拓扑优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6553-6564.
BEN Tong, FANG Min, CHEN Long, et al. Optimization of magnetic-mechanical coupling topology for vibration damping structures of amorphous alloy core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6553-6564.
- [13] 杨帆, 张相杰, 王鹏博, 等. 特高压并联电抗器铁芯振动及噪声特征研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 751-762.
YANG Fan, ZHANG Xiangjie, WANG Pengbo, et al. Study on the vibration and noise characteristics of the Iron core in ultra-high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 751-762.
- [14] 吴晓文, 肖威, 孙静玲, 等. 采用B18R065取向硅钢片的配电变压器振动与噪声数值计算[J]. 海军工程大学学报, 2024, 36(1): 41-48.
WU Xiaowen, XIAO Wei, SUN Jingling, et al. Vibration and noise numerical calculation of distribution transformer manufactured of B18R065 oriented Silicon steel sheet[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2024, 36(1): 41-48.
- [15] 李鹏. 非晶合金变压器铁芯振动特性与噪声抑制研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
LI Peng. Research on vibration characteristics and noise suppression of amorphous alloy transformer core[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [16] 吴文庚, 陈冰斌, 高栩, 等. 10 kV/380 kV(硅钢片铁芯)变压器振动噪声特性及隔振设计[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(1): 270-274.
WU Wengeng, CHEN Bingbin, GAO Xu, et al. Noise and vibration features and vibration control of a 10 kV/380 kV transformer with silicon steel sheet core[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(1): 270-274.
- [17] 汲胜昌, 何国阳, 李丽, 等. 不同叠片接缝形式的换流变压器铁心电磁与振动特性分析[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 110-119.
JI Shengchang, HE Guoyang, LI Li, et al. Analysis of electromagnetic and vibration characteristics of converter transformer core with different lamination joint forms[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 110-119.
- [18] 莫娟, 彭宗仁. 变压器去耦覆盖层降噪技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 7-14.
MO Juan, PENG Zongren. Research on noise reduction technology of transformer decoupling coating[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 7-14.
- [19] 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.

- [20] 朱 鹏. 油浸式电抗器绕组振动分析与隔振设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
ZHU Peng. Winding vibration analysis and isolation design of oil immersed reactor[D]. Taian: Shangdong Agricultural University, 2023.
- [21] 刘道生, 李泽帅, 李 鹏, 等. 变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J]. 变压器, 2023, 60(7): 18-27.
LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. Transformer, 2023, 60(7): 18-27.
- [22] 茹传红, 曹枚根, 黄 剑, 等. 变压器类设备油箱振动预估及基础隔振技术探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 194-202.
RU Chuanhong, CAO Meigen, HUANG Jian, et al. Discussion on vibration prediction and foundation vibration isolation technology of oil tank of transformer equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 194-202.
- [23] 侯世英, 王留洋, 杨 帆, 等. 桥臂电抗器的振动噪声分析与控制[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2385-2396.
HOU Shiyong, WANG Liuyang, YANG Fan, et al. Vibration noise analysis and control of bridge arm reactor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2385-2396.
- [24] 邱建港. 电力变压器振动噪声分析及降噪方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
QIU Jiangan. Research on vibration noise analysis and noise reduction method of power transformer[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [25] LI Xing, HUANG Weichun, YU Yonghua, et al. New trends on noise reduction for power grid by acoustic metamaterials[J]. Electrical Materials and Applications, 2024, 1(2): e 70001.
- [26] LUO Jiajun, XIAO Weimin, LI Xianhui, et al. Design of tuned mass damper for the electric reactor based on finite element method[J]. Electrical Materials and Applications, 2025, 2(1): e70009.
- [27] 钱佳林, 李广军, 王瑞乾, 等. 阶梯式复合微穿孔板吸声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 262-267.
QIAN Jialin, LI Guangjun, WANG Ruiqian, et al. Study on sound absorption characteristics of stepped composite micro-perforated plates[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 262-267.
- [28] 吴佳康, 柳政卿, 王秋成. 复合微穿孔板吸声结构声学性能预测[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 203-208.
WU Jiakang, LIU Zhengqing, WANG Qiucheng. Prediction of acoustic properties of sound-absorbing structures with composite micro-perforated Panels[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(3): 203-208.
- [29] 郭梦媛, 刘崇锐, 苏文斌, 等. 高阶微穿孔型超材料低频宽带吸声机理[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(4): 192-199.
GUO Mengyuan, LIU Chongrui, SU Wenbin, et al. Low-frequency broadband absorption mechanism of high-order micro-perforated meta-materials[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(4): 192-199.

- [30] 夏兆旺, 吴项君, 杨 淇, 等. 复合隔声结构隔声性能分析及试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 129-134.
XIA Zhaowang, WU Xiangjun, YANG Qi, et al. Analysis and test of sound insulation performance of multilayer Structures[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(6): 129-134.
- [31] 杜迎辉, 牛昱浩, 魏慧杰, 等. 基于多物理场耦合的变压器噪声及降噪措施研究[J]. 电气应用, 2024, 43(2): 83-90.
DU Yinghui, NIU Yuhao, WEI Huijie, et al. Analysis of the relationship between transformer noise and various operating parameters based on multi-physics coupling[J]. Electrotechnical Application, 2024, 43(2): 83-90.

作者简介

党 乐(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事材料工程研究(E-mail: 738130071@qq.com)。