

# 高频变压器多层共振复合吸声结构优化与设计

陈彬<sup>1,2</sup>, 沈辰轩<sup>2</sup>, 张涛<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>3</sup>, 靳艳娇<sup>3</sup>, 万妮娜<sup>4</sup>

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学), 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002; 3. 先进输电技术全国重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司), 北京 102209; 4. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 宜昌 443002)

**摘要:** 大容量高频变压器通常处于高频方波电压激励下, 大量的电压谐波分量会造成高频变压器铁芯振动过程中含有大量的高阶振动分量, 进而引起高次谐波处声压级显著增大, 造成严重的噪声污染。为此, 该文首先设计了一种新型多层共振复合吸声结构, 基于传递矩阵法对比分析了 6 种不同吸声结构的吸声性能; 然后建立了高频变压器电磁-结构-声三维仿真模型, 分析了高频变压器加与未加复合吸声装置下声场分布特性; 在此基础上, 采用中心组合试验设计与有限元仿真相结合的方法, 获得吸声装置在不同结构参数下的声场仿真结果, 通过构建径向基神经网络模型来预测声压级, 并利用全局灵敏度分析技术研究吸声装置结构参数对声压级水平的影响程度; 最后, 基于融合正余弦和柯西变异的麻雀搜索优化算法, 获得了吸声装置最优设计参数并通过仿真验证。结果表明: 优化后的吸声结构噪声抑制效果显著, 相比未优化前声压级水平降低 10.176 dB, 验证了多层共振复合吸声结构对高频变压器具有较好的抑噪效果。

**关键词:** 电磁-结构-声场分析; 多层共振复合吸声结构; 高频变压器; 径向基神经网络; 全局灵敏度分析

## Optimization and Design of Multi-layer Resonance Composite Sound-absorbing Structure for High Frequency Transformer

CHEN Bin<sup>1,2</sup>, SHEN Chenxuan<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>, JIN Yanjiao<sup>3</sup>, WAN Nina<sup>4</sup>

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line (Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute), Beijing 102209, China; 4. Yichang Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Large-capacity high-frequency transformers (HFT) are typically under the excitation of high-frequency square wave voltage, and a large number of voltage harmonic components will cause a large number of high-order vibration components in the core vibration process of HFT, which in turn will cause a significant increase in the sound pressure level at high-order harmonics, resulting in serious noise pollution. To solve this issue, a new multi-layer resonance composite sound-absorbing structure was first designed. The sound absorption performance of six different sound-absorbing structures was compared and analyzed by using the transfer matrix method. Subsequently, a three-dimensional electromagnetic-structure-acoustic simulation model for HFT was established to analyze characteristics of the sound field distribution in the presence and absence of the composite sound-absorbing device. On this basis, a method combining central composite experimental design with finite element simulation was adopted to obtain the sound field simulation results of the sound-absorbing device under different structural parameters. Then, a radial basis function (RBF) neural network model was established to predict sound pressure levels, and global sensitivity analysis technology is used to study the influence degree of the structural parameters of the sound absorbing device on the sound pressure level. Finally, the sparrow search optimization algorithm fused with Sine-cosine and Cauchy mutation was applied to obtain the optimal design parameters of sound-absorbing device and its was verified through simulation. The simulation results show that the noise suppression effect of the optimized sound-absorbing structure is significant, and the sound pressure level is decreased by 10.176 dB compared to the non-optimized structure. Therefore, it is verified that the multi-layer resonance composite sound-absorbing structure has a good noise suppression effect on high-frequency transformers.

**Key words:** electromagnetic-structural-acoustic field analysis; multi-layer resonance composite sound-absorbing structure; high-frequency transformers; radial basis function network; global sensitivity analysis

## 0 引言

大容量高频变压器是电力系统中的核心设备,对交直流混合配电网、微电网、柔性环网等有重要意义<sup>[1-3]</sup>。然而,随着高频变压器工作频率与容量的提高以及体积的减小,使得高频变压器在服役过程中振动噪声问题愈发明显,成为制约其实现更高容量和效率的技术瓶颈<sup>[4-5]</sup>。因此,如何有效抑制振动噪声问题,确保长期安全稳定运行,成为大容量高频变压器设计中面临的关键挑战之一。

工频变压器噪声功率主要集中在 500 Hz 以下,以低频噪声为主。有源降噪因其低频、灵活可调的特性,成为工频变压器低频噪声抑制的主要手段。文献[6]针对 1 台 1 000 kV 变压器噪声特性,搭建了有源降噪系统并进行试验,在误差传声器处获得了 7 dB 的降噪效果;钟思翀等研究了不同谐波条件下变压器铁芯的磁化与磁致伸缩特性,并采用有源降噪分析方法探讨了降噪后声场分布与频率特性<sup>[7]</sup>;文献[8]建立电力变压器声源辐射模型并研究有源降噪系统,成功实现变压器空间域内的有效降噪。根据声学理论可知,高频噪声波长较短,因此在同样布放范围内,要求次级声源布放更密集且需要更多的通道数,但这也提高了系统硬件的运行速度与控制要求<sup>[9]</sup>。因此,有源降噪系统并不适用于大容量高频变压器的噪声控制,如何在更高频率范围内有效抑制高频变压器的振动噪声亟待进一步研究。

中高频噪声主要通过敷设声学覆盖层来吸收能量,削弱噪声。文献[10]通过试验分析高频变压器在非正弦激励波形下的振动噪声特性,并比较非晶合金与超薄硅钢(GT-050 与 GT-100)作为铁芯材料时的噪声差异,结果表明:通过优化铁芯材料能有效降低噪声;苏黎世联邦理工学院彭帅等利用激光扫描振动仪测量高频正弦电压激励下环形、矩形和椭圆形铁芯的振动噪声,并选择振动噪声较小的铁芯拓扑结构,从源头控制高频变压器的噪声<sup>[11]</sup>。为提高中低频的吸声性能,上海工程技术大学汪熙婷设计了两种多层吸声结构:微穿孔板+多孔材料+多孔材料(CFF)与微穿孔板+微穿孔板+多孔材料(CCF),并在相同结构参数下进行数值模拟分析,结果显示 CFF 结构的吸声性能优于 CCF,更适合中低频段的吸声需求,但两者在高频段吸声效果仍有

不足<sup>[12]</sup>;胡齐笑等研究了双层微穿孔板吸声结构的吸声特性,结果显示,在 1 000~5 000 Hz 频率范围内吸声系数均超过 0.6,但未充分利用多孔吸声材料在高频段的降噪优势,仍有进一步优化的空间<sup>[13]</sup>。综上,现有高频变压器的抑噪措施主要采用声学超材料或从声源上抑制,缺乏对高频段噪声空间分布特性的研究,目前也没有设计一款适用于大容量高频变压器的抑噪装置。因此,亟需研究在非正弦激励条件下大容量高频变压器的抑噪方法。

针对上述问题,本文以 1 台 10 kVA/5 kHz 纳米晶合金铁芯高频变压器为研究对象,利用声学理论中的共振器原理并结合理论计算,设计一种新型多层共振复合吸声结构。该结构以三聚氰胺多孔吸声材料为内层,微穿孔吸声板为外层,通过微穿孔板背后的背腔,形成一个具有共振特点的吸声结构。然后,基于传递矩阵法对 6 种不同复合吸声结构的吸声性能进行对比分析,并利用有限元法建立了高频变压器三维多物理场求解模型,分析其在未加吸声装置下的噪声特性并确定分析频率;在此基础上,采用中心组合试验与有限元仿真相结合的方法,获得了不同结构参数下的声场仿真结果。通过构建高频变压器测量点声压级水平与吸声装置结构参数之间的径向基神经网络模型来预测声压级,并利用全局灵敏度分析技术评估不同结构参数对声压级的影响。最后,基于融合正余弦和柯西变异的麻雀搜索优化算法,确定了最佳复合吸声装置的结构参数,结果表明该装置对高频变压器的振动噪声具有良好的抑制效果。本文设计的新型多层共振复合吸声结构无法直接解决变压器内部绝缘劣化问题,但在提高吸声效率、扩大吸声频率范围等方面表现出明显优势,有效减少因变压器铁芯振动产生的高频噪声,为高频变压器抑噪提供了新的思路与方法。

## 1 多层共振复合吸声结构基础理论分析

### 1.1 吸声原理分析

多孔吸声材料因其低密度和高孔隙率,具备出色的高频降噪性能<sup>[14]</sup>,而微穿孔吸声板作为共振吸声结构,表现出良好的吸声性能和广泛的适用范围。基于此本文设计了一种新型多层共振复合吸声结构,如图 1 所示,主要由多孔吸声材料、微穿孔板

与一定深度的密闭背腔组成。当声波入射到复合吸声结构表面时,一部分声能被反射,另一部分则顺着微小空隙与孔洞进入多孔吸声材料内部,由于空气的粘滞性,引起多孔材料内部产生相对运动并发生内摩擦,部分声能被耗散;此外,还有一部分声能量由多孔吸声材料透射到表面具有众多孔状结构的微穿孔板内部,由于孔径较细,孔内各层质点速度会产生温度梯度并引起摩擦,进而将声能转化为热能而被吸收,最终达到吸声的效果。

## 1.2 基础理论分析

微穿孔板(micro-perforated plate, MPP)结构可认为由大量圆形或方形微孔的薄板及板后密闭空腔构成。假设各微孔相互独立且孔径与板厚远小于声波波长,根据马氏理论,微穿孔吸声板声阻抗率 $Z_{MPP}$ 可表示为:

$$Z_{MPP} = r + j\omega m \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为角频率; $r$ 、 $m$ 分别为微穿孔吸声板的声阻与声质量,由式(2)、(3)表示; $j$ 为虚数单位。

$$r = \frac{32\mu\rho_0 t}{pd^2} \left( \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}kd}{8t} \right) \quad (2)$$

$$m = \frac{\rho_0 t}{p} \left( 1 + \left( 9 + \frac{k^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为空气运动黏性系数取 $1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ; $\rho_0$ 为空气密度,取 $1.21 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; $t$ 、 $d$ 、 $p$ 、 $b$ 分别为微穿孔吸声板的板厚、孔径、穿孔率与孔间距,对于正方形排列且形状为圆形的微孔时穿孔率 $p = \pi d^2 / 4b^2$ ; $k$ 为微穿孔吸声板常数,由式(4)表示。

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \cdot \frac{d}{2} \quad (4)$$

微穿孔吸声板的传递矩阵 $T_{MPP}$ 为:

$$T_{MPP} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{MPP} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

多孔材料(porous material, PM)主要是由连续固相骨架与填充孔隙的流体相组成。为了更准确地描述多孔材料中声波的传播和吸声机制,本文计算采用Johnson-Champoux-Allard(JCA)多孔介质声学模型,基于此模型多孔吸声材料的传递矩阵 $T_{porous}$ 为:

$$T_{porous} = \begin{bmatrix} \cos(k_p D) & jZ_p \sin(k_p D) \\ jZ_p^{-1} \sin(k_p D) & \cos(k_p D) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Z_p = \sqrt{\rho(\omega) K(\omega)} \quad (7)$$

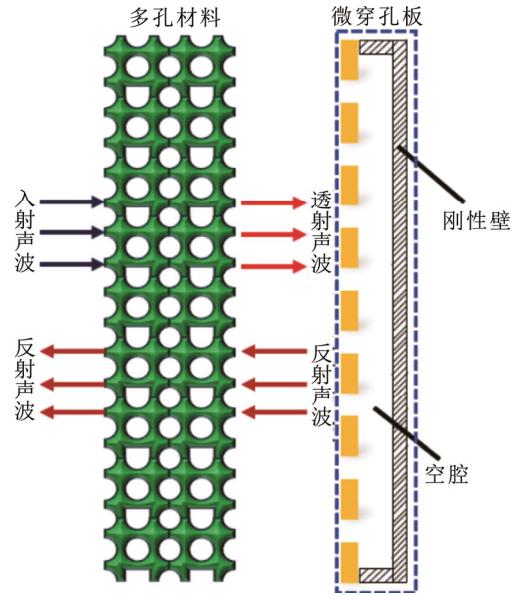


图1 多层共振复合吸声结构吸声原理

Fig.1 Sound absorption theory of multi-layer resonance composite sound-absorbing structure

$$k_p = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (8)$$

$$\rho(\omega) = \alpha_\infty \rho_0 \left( 1 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\rho_0\alpha_\infty} \left( 1 + j \frac{4\alpha_\infty^2 \eta\omega\rho_0}{(\sigma\phi A)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$$

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left[ \gamma - (\gamma - 1) \left( 1 + \frac{8\eta}{j\omega\rho_0 B^2 A_1^2} \left( 1 + j \frac{\omega\rho_0 B^2 A_1^2}{16\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

式中: $D$ 为多孔吸声材料厚度; $Z_p$ 、 $k_p$ 分别为多孔材料的声阻抗与波数; $\rho(\omega)$ 、 $K(\omega)$ 分别为多孔材料的有效密度与有效体积模量; $\alpha_\infty$ 、 $\phi$ 、 $\sigma$ 、 $A$ 、 $A_1$ 分别为多孔吸声材料的弯曲因子、孔隙率、流阻率、粘滞特征长度与热特征长度; $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $B$ 、 $P_0$ 分别为空气的比热容、密度、动力黏度、普朗特数与静态压力,分别取 $1.40$ 、 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $0.707$ 、 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

空腔结构的传递矩阵 $T_{air}$ 为:

$$T_{air} = \begin{bmatrix} \cos(k_0 D_1) & j\rho_0 c_0 \sin(k_0 D_1) \\ \frac{j\sin(k_0 D_1)}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 D_1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $D_1$ 为空腔深度; $k_0 = \omega/c_0$ 为空腔的波数; $c_0$ 为空气声速,取 $340 \text{ m}/\text{s}$ 。

### 1.3 吸声性能评判标准

吸声系数为评价吸声结构或材料吸声性能的关键参数, 因此本文通过计算吸声系数来评判不同新型多层共振复合吸声结构的性能。由于该结构属于多层结构, 声电类比法在计算时可能会产生误差, 而利用传递矩阵法则能加准确地计算吸声系数。传递矩阵法的规则为依次将每个吸声层的传递矩阵按照顺序首尾相乘得到整体复合吸声结构的传递矩阵  $T_{total}$ , 然后通过该传递矩阵计算出结构的表面阻抗  $Z_f$ , 最后由式(13)计算得到吸声系数  $\alpha$ 。

$$T_{total} = T_1 T_2 T_3 \cdots T_n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z_f/\rho_0 c_0)}{(1 + \text{Re}(Z_f/\rho_0 c_0))^2 + (\text{Im}(Z_f/\rho_0 c_0))^2} \quad (13)$$

式中:  $T_n$  为各层吸声结构的传递矩阵;  $Z_f=T_{11}/T_{21}$  为复合吸声结构的表面阻抗。

## 2 多层共振复合吸声结构设计

### 2.1 复合吸声结构设计方案

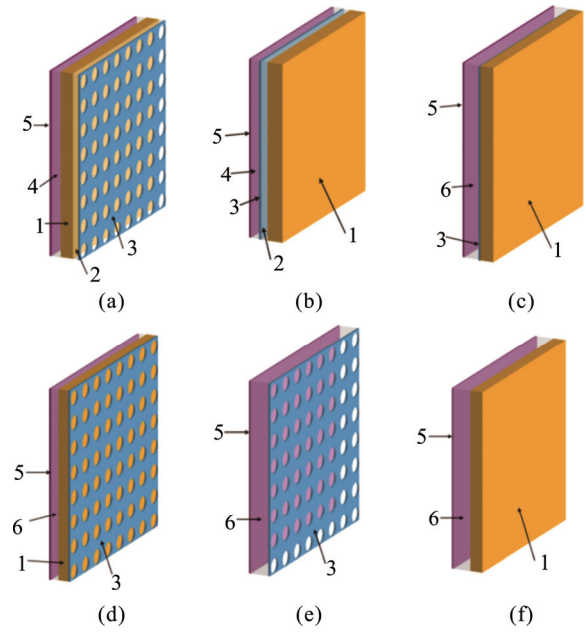
为对比不同复合吸声结构的吸声性能, 根据微穿孔板、多孔吸声材料与一定深度的密闭空腔叠加顺序不同, 形成如图 2(a)—(f)所示的 6 种不同多层共振复合吸声结构。

### 2.2 复合吸声结构吸声性能分析

结合传递矩阵法建立复合吸声结构的理论模型, 并对不同复合吸声结构的吸声系数进行理论计算, 以确定吸声性能较显著的结构。选取塑料泡沫作为多孔吸声材料, 其参数如表 1 所示, 为保持不同吸声结构的总厚度一致, 将空腔 I、II 的厚度分别设置为 5、15 mm, 结构(c)、(d)、(f)中空腔 III 的厚度设置为 20 mm、结构(e)中空腔厚度设为 30 mm, 得到图 3 所示不同吸声结构吸声特性曲线。

由图 3 可知, 在高频段(8~12 kHz)结构(b)、(c)、(f)相比于其他 3 种吸声结构吸声性能较显著, 说明多孔吸声材料放置于微穿孔板之前复合吸声结构的吸声性能较好。主要原因在于大部分声波透过多孔吸声材料进入到微穿孔板内部, 增强了声波吸收。而在其他 3 种结构中, 多孔吸声材料置于微穿孔板之后, 导致大部分声波被微穿孔吸声板反射, 从而降低了多孔吸声材料吸收声能的效果。

为进一步对比结构(b)、(c)、(f)吸声性能, 统计 3 种结构在 10 kHz 时的吸声系数及 8~12 kHz 高频



1—多孔材料; 2—空腔 I; 3—微穿孔板; 4—空腔 II; 5—刚性壁面; 6—空腔 III

图 2 不同多层共振复合吸声结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of different multi-layer resonance composite sound-absorbing structures

表 1 多孔材料与微穿孔板参数属性

Table 1 Parameter properties of PM and MPP

结构名称	特性	数值
多孔吸声材料 (塑料泡沫)	流阻率 $\sigma$ (N·s·m <sup>-4</sup> )	87 000
	弯曲因子 $\tau_\infty$	2.52
	孔隙率 $\phi$	0.97
	粘滞特征长度 $\Delta$ /m	$3.7 \times 10^{-5}$
	热特征长度 $\Delta$ /m	$1.19 \times 10^{-4}$
微穿孔板	厚度 $D$ /mm	10
	板厚 $t$ /mm	1.0
	孔径 $d$ /mm	0.5
	穿孔率 $p$	0.04

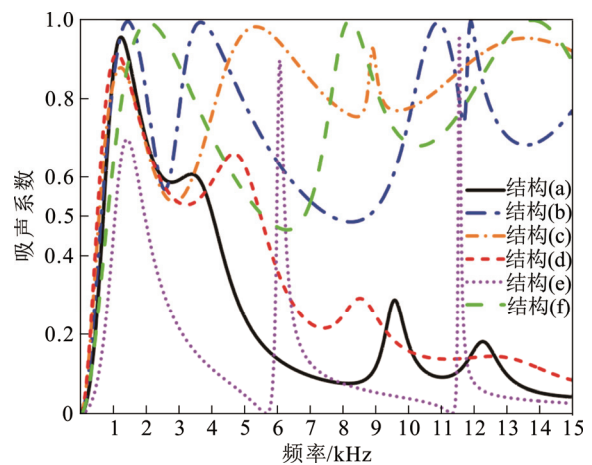


图 3 不同复合吸声结构吸声特性曲线

Fig.3 Sound absorption characteristic curves of different composite sound absorbing structures

段的平均吸声系数,如表 2 所示。从表 2 可知,3 种不同复合吸声结构在高频段内的平均吸声系数均达到 0.65 以上,结构(c)在 10 kHz 处吸声系数达到 0.775 4,高于其他两种吸声结构,故本文多层共振复合吸声结构选择吸声效果较显著的结构(c),用于后续高频变压器降噪设计。

### 2.3 多孔吸声材料吸声性能分析

复合吸声结构对于振动噪声有较好的抑制作用,而噪声的抑制效果还与多孔吸声材料的材质有关。泡沫多孔材料与纤维多孔材料具有较好的吸声性能,在吸声降噪领域中应用广泛。为对比不同吸声材料对结构(c)降噪效果的影响,本文选取了轻质玻璃棉、喷熔纤维毯两种纤维材料及聚氨酯、三聚氰胺与表 1 中塑料泡沫进行吸声性能分析,材料的参数属性如表 3 所示<sup>[15]</sup>。

通过改变多孔吸声材料的参数属性,得到结构(c)在不同多孔吸声材料 10 kHz 处的吸声系数与高频段的平均吸声系数,如表 4 所示。

综合对比可知,当多孔吸声材料选用三聚氰胺泡沫时,多层共振复合吸声结构在 10 kHz 处吸声系数达到 0.835 3,高频段的平均吸声系数高达 0.830 9,吸声性能明显优于其余 4 种吸声材料,因此本文确定多孔吸声材料为三聚氰胺泡沫。

## 3 多层共振复合吸声装置基本结构及降噪性能分析

### 3.1 基本结构及参数

本文以 1 台 5 kHz/10 kVA 高频变压器为研究对象,分析多层共振复合吸声结构对高频变压器噪声的抑制效果。其中,高频变压器的原、副边绕组均为 40 匝、额定电压为 540 V、采用 1 mm×4 mm 的扁铜线绕制而成;铁芯采用 Antainano®纳米晶合金等超薄带材卷绕制成,并采用环氧树脂+聚醚胺柔性体系的固化工艺对铁芯进行封装固化,铁芯带材间隙充分填充了固化剂,使得纳米晶铁芯为超薄磁性带材和固化剂构成的层合结构,根据铁芯绕组具体尺寸<sup>[16]</sup>建立如图 4(a)所示高频变压器三维结构。在距离高频变压器中心位置  $l_m$  远处安装多层复合吸声结构,同时考虑到高频变压器散热与工程实际等因素,将复合吸声结构安装于高频变压器四周,便于与空气流通,如图 4(b)—(c)所示,相关结构参数如表 5 所示。

表 2 不同复合吸声结构吸声性能统计

Table 2 Statistics on the sound absorption performance of different composite sound-absorbing structures

结构	10 kHz 处吸声系数	8~12 kHz 平均吸声系数
(b)	0.740 7	0.723 4
(c)	0.775 4	0.811 4
(f)	0.687 1	0.782 1

表 3 不同多孔吸声材料参数属性

Table 3 Parametric properties of different porous sound absorbing materials

多孔吸声材料声学参数	聚氨酯泡沫	三聚氰胺泡沫	轻质玻璃棉	喷熔纤维毯
流阻率 $\sigma/(N \cdot s \cdot m^{-4})$	$1.35 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4$	$9 \times 10^3$	$1.9 \times 10^4$
弯曲因子 $\tau_\infty$	1.70	1.05	1.00	1.40
孔隙率 $\phi$	0.98	0.973	0.99	0.95
粘滞特征长 $\lambda/m$	$8 \times 10^{-5}$	$6.4 \times 10^{-5}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$
热特征长 $\lambda_1/m$	$1.6 \times 10^{-4}$	$2.07 \times 10^{-4}$	$3.84 \times 10^{-4}$	$2.25 \times 10^{-4}$

表 4 不同多孔吸声材料吸声性能统计

Table 4 Statistics on the sound absorption performance of different porous sound-absorbing materials

多孔吸声材料名称	10 kHz 处吸声系数	8~12 kHz 平均吸声系数
聚氨酯泡沫	0.758 6	0.759 8
三聚氰胺泡沫	0.835 3	0.830 9
轻质玻璃棉	0.519 1	0.540 3
喷熔纤维毯	0.762 3	0.754 6
塑料泡沫	0.775 4	0.811 4

### 3.2 多物理场耦合计算

#### 3.2.1 电磁场-结构力场-声场分析理论

高频变压器正常状态运行时,磁场微分方程为:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \frac{N \mathbf{I}_w}{S_w} \mathbf{e}_w \quad (14)$$

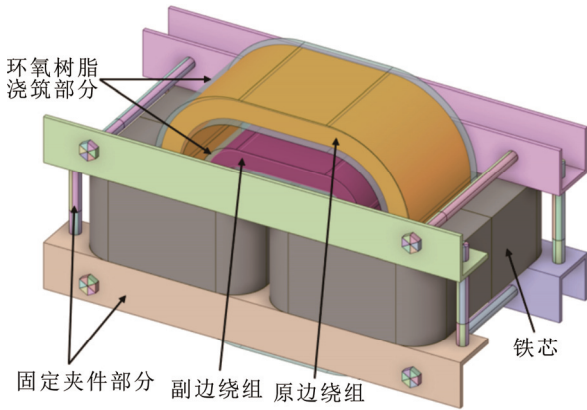
式中:  $\sigma$  为电导率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $\mu_r$  为相对磁导率;  $\mathbf{A}$  为磁矢势;  $N$  为绕组总匝数;  $\mathbf{I}_w$  为绕组电流;  $S_w$  为绕组截面积;  $\mathbf{e}_w$  为绕组电流方向矢量。

通过本构关系计算得到磁通密度  $\mathbf{B}$  之后,可由式(15)求得铁芯气隙端面处所受的麦克斯韦力  $F_{Max}$ 。

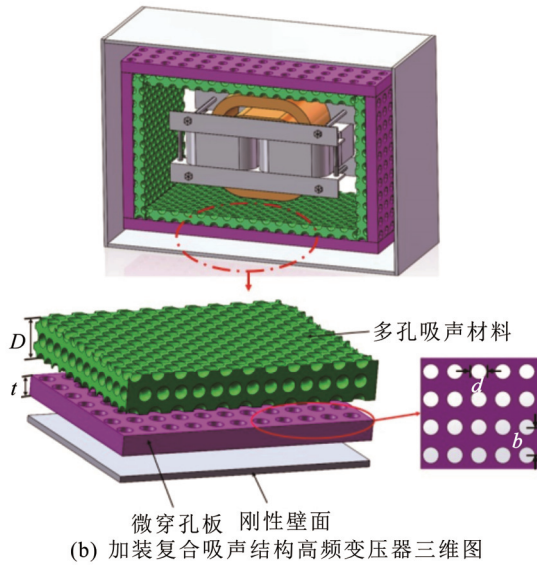
$$\mathbf{F}_{Max} = \int_S \mathbf{p}_{Max} d\mathbf{S} = \int_S \left( \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B} - \frac{1}{2\mu_0} \mathbf{B}^2 \mathbf{n} \right) d\mathbf{S} \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{p}_{Max}$  为麦克斯韦应力;  $S$  为求解表面;  $\mathbf{n}$  为求解表面法向单位矢量。

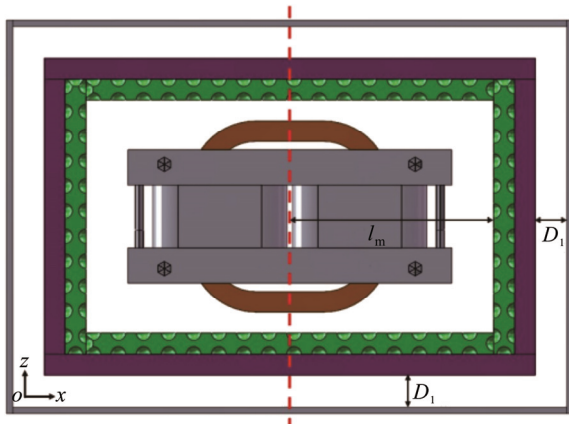
本文采用式(16)对应的磁致伸缩计算简化模型来描述铁磁材料的磁致伸缩效应,该模型充分考虑了铁磁材料内部磁畴在磁化过程中的变化情况<sup>[17-18]</sup>。



(a) 高频变压器三维结构图



(b) 加装复合吸声结构高频变压器三维图



(c) 加装复合吸声结构高频变压器xoz平面图

图4 加装复合吸声装置的高频变压器基本结构

Fig.4 The basic structure of HFT with a composite sound absorbing device

$$\varepsilon_{ms} = \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2 + \theta \frac{\lambda_s}{M_s^4} (M - M_s)^4 \quad (16)$$

$$\theta = \begin{cases} 0, & 0 < M \leq M_s \\ -2, & M > M_s \end{cases} \quad (17)$$

表5 复合吸声装置结构参数属性

Table 5 Structural parameters properties of composite sound absorption device

结构参数	数值
多孔材料厚度 $D/\text{mm}$	40
微穿孔板板厚 $t/\text{mm}$	2.0
微穿孔板孔径 $d/\text{mm}$	0.8
微穿孔板穿孔率 $p$	0.04
微穿孔板与刚性壁间空隙 $D_1/\text{mm}$	20
吸声结构距变压器中心距离 $l_m/\text{mm}$	120

式中:  $\varepsilon_{ms}$  为铁芯在磁致伸缩效应下所发生的应变;  $M$  为铁磁材料的磁化强度;  $\theta$  为简化模型中引入的阶跃函数; 频率为 5 kHz 时纳米晶铁芯饱和磁致伸缩系数  $\lambda_s$  为  $3 \times 10^{-7}$ 、磁化强度  $M_s$  为  $2 \times 10^6 \text{A/m}^{[16]}$ 。弹性力学中的应力应变关系可由式(18)计算。

$$\sigma_{ms} = C_H (\varepsilon_c - \varepsilon_{ms}) \quad (18)$$

式中:  $\sigma_{ms}$  为机械应力;  $C_H$  为刚度矩阵;  $\varepsilon_c$  为机械应力下的弹性应变。

根据式(19)对机械应力求散度, 即可求得变压器铁芯在电压激励下的磁致伸缩力  $F_v$ 。

$$F_v = -\nabla \cdot \sigma_{ms} \quad (19)$$

将高频变压器看作一个整体, 铁芯振动可简化视为在上述两种周期性变化的电磁力作用下所引起的简谐运动, 满足式(20)的控制方程。

$$M_c a(t) + K v(t) + C_H x(t) = F_{\max}(t) + F_v(t) \quad (20)$$

式中:  $M_c$ 、 $K$  分别为铁芯的质量矩阵、阻尼矩阵;  $a(t)$ 、 $v(t)$ 、 $x(t)$  分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量;  $t$  为时间。

高频变压器铁芯振动噪声传播媒介为空气, 声波在空气介质中的传播状态可以采用式(21)所示的 Helmholtz 标量波动方程表示, 即:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_0} = Q_m \quad (21)$$

式中:  $p_t$  为声压;  $q_d$  为偶极声源;  $k_{eq} = \omega/c_0$  表示波数;  $Q_m$  为单极声源。

为求解铁芯电磁振动产生的声压  $p_t$ , 本文将法向振动加速度  $a_0$  作为结构力场与声场之间耦合的桥梁, 如式(22)所示。

$$-n_0 \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p_t - q_d) \right) = -n_0 \cdot a_0 \quad (22)$$

式中:  $n_0$  为单位法向量方向;  $a_0$  为变压器铁芯表面加速度, 包括  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$  这 3 个分量。

3.2.2 材料参数与边界条件设置

本文借助 COMSOL Multiphysics 6.0 对高频变压器电磁场-结构力场-声场进行有限元模拟分析, 高频变压器的材料参数属性如表 6 所示, 纳米晶铁芯磁化曲线如图 5 所示。

高频变压器铁芯所受磁致伸缩力与铁芯切口端面处所受的麦克斯韦力可作为结构力场的体载荷条件。由于固定夹件部分对高频变压器具有加紧作用, 同时考虑变压器实际放置情况, 将下部夹件部分设置为固定约束条件, 即振动位移为零。

为方便研究多层共振复合吸声结构的吸声特性, 提高计算效率, 在压力声学模块中微穿孔吸声板结构采用内部穿孔板边界条件, 模型类型选择薄板(不计入板的热效应), 孔与孔相互作用选择默认的内置与 Fok 函数, 通过计算边界上传阻阻抗得到声学参数的吸声特性<sup>[19]</sup>; 多孔吸声材料采用多孔介质声学域边界条件, 并选择 JCA 多孔介质声学模型来定义相关声学参数, 流体选择空气。相关边界条件与有限元仿真模型如图 6 所示。

3.2.3 仿真结果分析

为分析高频变压器空载条件下的磁场分布特

表 6 高频变压器材料参数属性

Table 6 Material parameter properties for HFT

材料	参数	数值
铁芯(纳米晶合金)	相对磁导率	<i>B-H</i> 曲线
	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	—
	质量密度 ρ <sub>n</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	7 180
	杨氏模量 E <sub>n</sub> /GPa	150
	泊松比 ν <sub>n</sub>	0.30
绕组(铜)	声速 c <sub>n</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	5 890
	相对磁导率	1
	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	1.85×10 <sup>7</sup>
	质量密度 ρ <sub>n</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	8 954
	杨氏模量 E <sub>n</sub> /GPa	60
绝缘材料(环氧树脂)	泊松比 ν <sub>n</sub>	0.33
	声速 c <sub>n</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	4 700
	相对磁导率	1
	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	0
	质量密度 ρ <sub>n</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	1 400
固定夹件(冷轧钢)	杨氏模量 E <sub>n</sub> /GPa	3.78
	泊松比 ν <sub>n</sub>	0.35
	声速 c <sub>n</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	2 368
	相对磁导率	<i>B-H</i> 曲线(材料库)
	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	4.032×10 <sup>7</sup>
固定夹件(冷轧钢)	质量密度 ρ <sub>g</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	7 600
	杨氏模量 E <sub>g</sub> /GPa	195
	泊松比 ν <sub>g</sub>	0.30
固定夹件(冷轧钢)	声速 c <sub>g</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	3 230

性, 将纳米晶合金 *B-H* 曲线作为铁芯的本构关系, 采用场路耦合计算方式得到高频变压器磁通密度分布情况如图 7 所示。

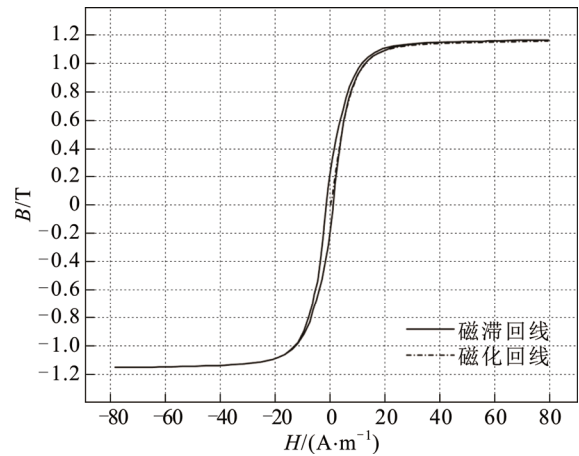
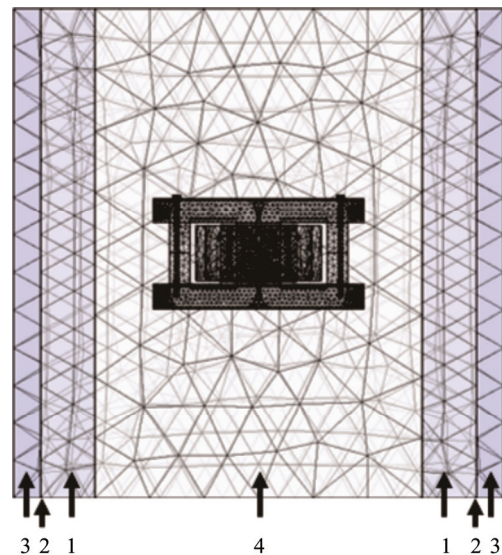


图 5 纳米晶铁芯 *B-H* 曲线

Fig.5 The *B-H* curve of nanocrystalline core



1—多孔吸声材料; 2—内部穿孔板; 3—空气腔层; 4—背景压力场

图 6 边界条件与有限元仿真模型

Fig.6 Boundary conditions and finite element simulation models

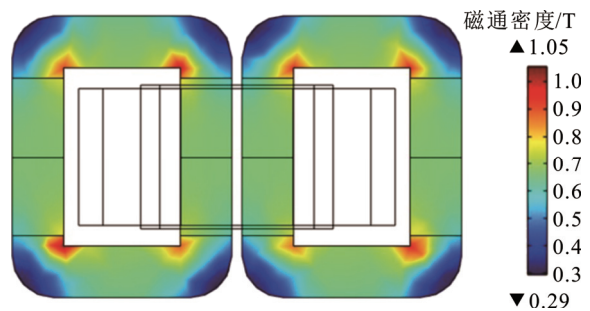


图 7 高频变压器磁场分布

Fig.7 Magnetic field of HFT

本文在铁芯表面选取 3 个测量点来进一步分析高频变压器在激励频率 5 kHz、磁通密度 0.4 T 时振动参数值, 3 个测量点布局情况如图 8 所示。

不同测量点振动加速度时域图如图 9, 可见在方波电压激励下, B 点振动加速度幅值最大、C 点次之。主要原因是 B 点位于铁芯拐角处, 内侧拐角处磁密较大, 进而造成较大的磁致伸缩应力, 使得在该应力作用下产生的振幅最大; C 点位于铁芯气隙处, 由于气隙截面处麦克斯韦力作用使得铁芯会产生相互吸引的趋势进而产生碰撞, 但由于固定夹件的加紧作用, 使得 C 点振动加速度振幅较 B 点相对较小。

根据 GB/T1094.10—2022, 测量点距离基准面 0.3 m 且测量时间不少于 30 s。本文参照该标准, 提取图 8 中测点 1(侧点)的声压级仿真值。在声场仿真中, 选用边长为 0.8 m 的正方体作为空气域, 并将变压器置于中心。本文计算初始频率 5 kHz、步长 1 kHz、总步长 15 kHz, 各频率声压级见表 7。

由表 7 可知, 高频变压器未加装复合吸声结构时, 10 kHz 频率下的声压级明显高于其他频率。因此, 本文选择 10 kHz 作为声场分析的频率, 图 10 展示了该频率下的声压级仿真云图。结果显示, 未加复合吸声结构时, 最大声压级可达 118 dB, 远超工程规定的声压级容许范围, 严重影响用电设备安全稳定运行。因此, 有必要考虑安装吸声结构, 以减少高频变压器噪声对周围环境和电力设备的影响。

根据表 5 中复合吸声装置结构参数, 得到图 11 所示高频变压器加装复合吸声结构后的声压级仿真结果。图 11 显示, 安装复合吸声装置后, 高频变压器的振动噪声大部分被吸收, 噪声向外扩散显著减少。同时, 测量点声压级为 58.178 dB, 相较于未安装吸声结构时降低了 33.398 dB, 表明复合吸声装置对高频变压器的振动噪声具有显著抑制效果。

## 4 高频变压器复合吸声结构优化设计

### 4.1 优化设计方案

为降低高频变压器产生的振动噪声, 本文设计了由微穿孔吸声板和三聚氰胺多孔吸声材料组成的复合吸声结构, 考虑到不同结构参数对降噪效果存在一定的影响, 因此对复合吸声装置的结构参数进行优化设计, 具体优化设计流程如图 12 所示。

### 4.2 优化变量选取

高频变压器测量点声压级大小能直接反映复

合吸声装置的抑噪效果, 因此以 10 kHz 频率下测量点声压级最小作为优化目标。根据复合吸声装置的结构特点, 选取微穿孔吸声板的板厚、孔径、穿孔率、微穿孔板与刚性壁间空腔深度、多孔吸声材料厚度及吸声结构距变压器中心距离作为优化变量, 相关优化变量位置如图 4(b)、(c)所示。

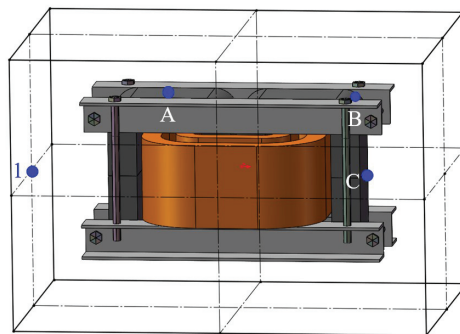


图 8 加速度与声压测量点分布情况

Fig.8 The distribution of acceleration and sound pressure measurement points

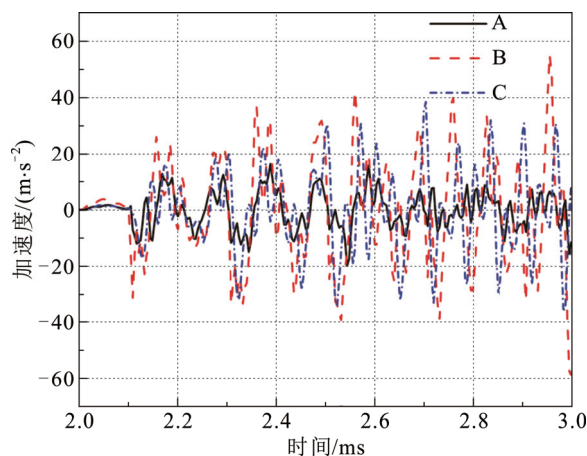


图 9 不同测量点振动加速度时域图

Fig.9 Time-domain plot of vibration acceleration at different measurement points

表 7 各频率声压级大小

Table 7 The sound pressure levels of different frequencies

频率/kHz	声压级/dB	频率/kHz	声压级/dB
5	75.240	11	87.279
6	48.326	12	78.319
7	77.797	13	80.354
8	72.489	14	78.609
9	69.413	15	88.126
10	91.576		

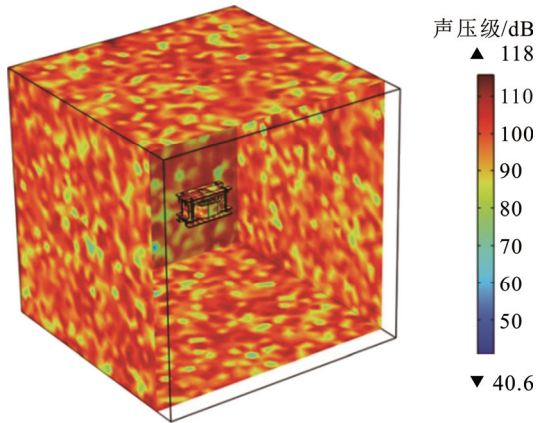


图 10 未加吸声结构声场仿真结果  
Fig.10 Simulation results of sound field in the absence of a composite sound absorbing structure

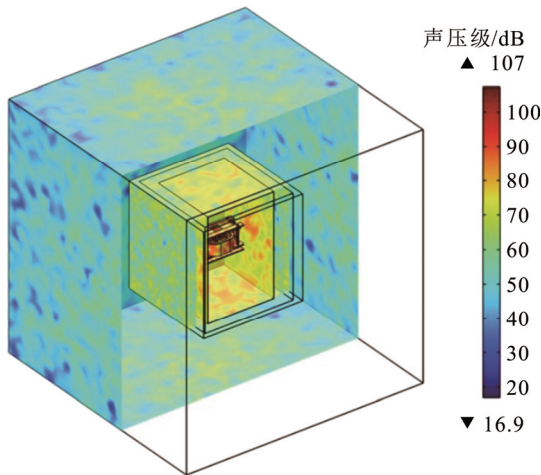


图 11 加吸声结构声场仿真结果  
Fig.11 Simulation results of sound field with a composite sound absorbing structure

复合吸声装置的优化受两个约束条件限制：一是微穿孔吸声板的结构参数，应符合工程实际应用要求；二是多孔吸声材料厚度，需受实际安装空间大小的限制<sup>[20]</sup>。基于这两个约束条件，表 8 列出了各优化变量的取值范围。

4.3 中心组合试验设计

中心组合试验设计(central composite design, CCD)适用于多因素多水平试验，具有设计简单、精度高、预测性强等优点<sup>[21]</sup>。根据优化变量取值范围，选用 CCD 方法开展试验，并通过高频变压器电磁场-结构力场-声场多物理场耦合模型，计算不同复合吸声装置结构参数下测量点的声压级，如附录表 A1 所示。由附录表 A1 可知，测量点的最高与最低声压级大小分别为 65.662、43.451 dB，这表明复

表 8 优化变量取值范围

Table 8 The value range of optimization variables

优化变量	取值范围
$D/\text{mm}$	5~25
$t/\text{mm}$	0.5~2.5
$d/\text{mm}$	0.2~1.0
$p$	0.01~0.05
$D_1/\text{mm}$	10~50
$l_m/\text{mm}$	90~130

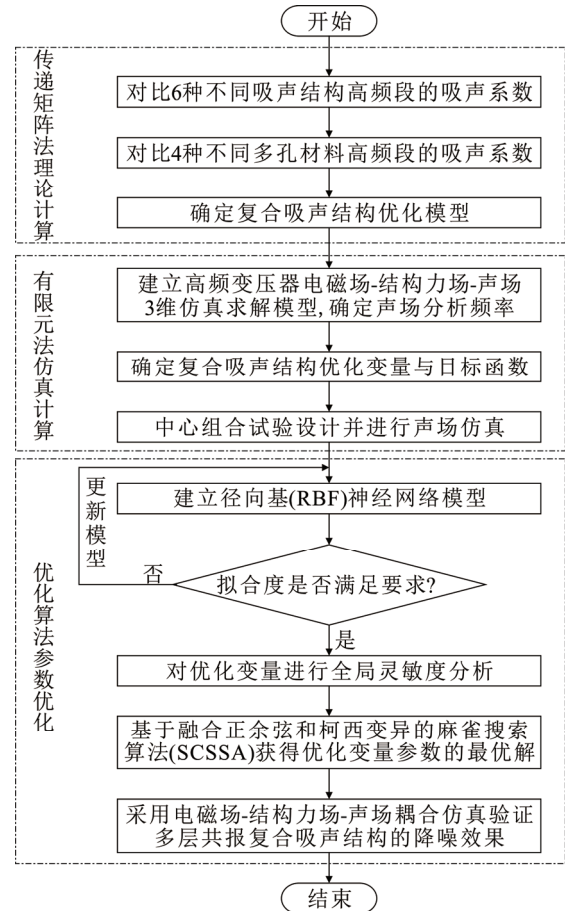


图 12 复合吸声结构优化流程图

Fig.12 Flowchart of composite sound absorption structure optimization

合吸声装置结构参数对高频变压器的振动噪声有显著影响。

4.4 径向基神经网络模型构建

径向基(radial basis function, RBF)神经网络是一种基于径向基函数的单隐层前馈型神经网络，仅具单向正向传播过程，无需误差反向传播，因此不需要反复迭代调整权值和阈值，学习速度较快<sup>[22]</sup>。其主要由输入层、隐含层与输出层组成，如图 13 所示。输入层用于接收数据；隐含层包含由各个径向基函数构成相当于神经元，负责数据对信号的反

馈处理; 输出层则结合权重系数与隐含层神经元输出, 得到最终响应结果。

本文选用高斯函数作为径向基函数  $\varphi$ , 表达式如式(23)所示。

$$\varphi(\mathbf{x}_m - \mathbf{c}_n) = e^{\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\|\mathbf{x}_m - \mathbf{c}_n\|^2\right)} \quad (23)$$

式中:  $\mathbf{c}_n$  表示第  $n$  个隐含层连接点的中心;  $\sigma$  表示基函数的宽度;  $\|\mathbf{x}_m - \mathbf{c}_n\|^2$  表示第  $m$  个输入向量  $\mathbf{x}_m$  与第  $n$  个隐含层连接点中心之间平方的欧式距离。输出层  $y_j$  的表达式如式(24)所示。

$$y_j = \sum_{i=1}^k \omega_{ij} \varphi(\mathbf{x}_m - \mathbf{c}_n) \quad (24)$$

式中:  $\omega_{ij}$  表示隐含层第  $i$  个节点到输出层第  $j$  个节点的连接权值;  $j=1, 2, \dots, n$ 。

由附录表 A1 仿真结果可知, 不同结构参数对复合吸声装置的抑噪效果有显著影响。因此, 本文以 4.2 节确定的 6 个优化变量作为输入变量, 以测量点声压级作为输出变量, 建立 RBF 神经网络模型。在 CCD 生成的 52 组试验数据中, 随机选取 42 组数据作为模型的训练集、其余 10 组数据作为预测集, 用来检测模型的准确度。当训练样本的总误差达到设定的标准时训练结束, 从而建立了复合吸声装置结构参数与高频变压器测量点声压级之间的多维非线性映射关系, 进而预测不同结构参数下的测量点声压级。

RBF 神经网络模型的预测精度高低直接影响后续优化设计问题的效果与计算精度, 因此需要对其进行误差分析。为更好地验证模型的精度, 本文选用平均误差 (average error, AE)、最大误差 (maximum error, ME) 与相关系数 (R square,  $R^2$ ) 作为该模型预测精度的评价指标, 表 9 给出 RBF 神经网络模型误差分析结果, 当模型的各项误差均低于容许值<sup>[23]</sup>时, 可认为该模型可信度较高; 当相关系数越接近 1 时, 则表明该模型的预测精度较高。

从表 9 可以看出, 该模型的 AE、ME 均远低于容许值, 表明此模型可信度较高; 相关系数  $R^2$  大于 0.9 且接近 1, 说明该模型具有较高的预测精度。由此可见, 选取的 3 个评价指标均满足相关要求, 表明该模型的拟合度较高, 从而验证了其预测的准确性, 因此所建立的 RBF 神经网络模型可用于后续的优化设计中。

#### 4.5 灵敏度分析

本文采用全局灵敏性分析技术来分析复合吸

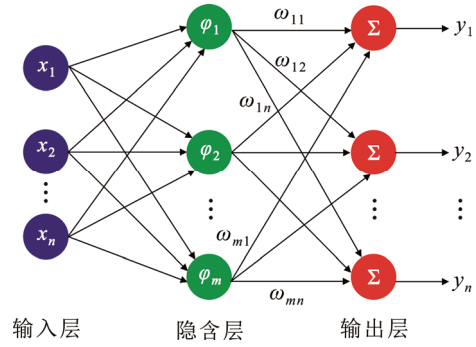


图 13 径向基神经网络模型结构

Fig.13 Structure of RBF neural network model

表 9 RBF 模型预测精度评价指标

Table 9 Evaluation index of RBF model prediction accuracy

响应目标	AE	ME	$R^2$
测量点声压级指标	0.056 49	0.097 28	0.973 69
容许值	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$\geq 0.9$

声装置的不同优化变量对高频变压器优化目标的影响规律, 一阶影响指数  $S_i$  与总效应指数  $S_{Ti}$  定义<sup>[24]</sup>为:

$$S_i = \frac{V_{X_i}(E_{X_{-i}}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (25)$$

$$S_{Ti} = \frac{E_{X_{-i}}(V_{X_i}(Y|X_{-i}))}{V(Y)} \quad (26)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  个输入参数;  $Y$  为关于  $X_i$  的输出参数;  $V_{X_i}(E_{X_{-i}}(Y|X_i))$  表示条件方差, 其中矩阵  $X_{-i}$  表示除  $X_i$  以外的所有输入参数,  $E_{X_{-i}}$  表示除  $X_i$  以外所有输入参数的期望值,  $Y|X_i$  表示  $X_i$  固定时接受除  $X_i$  外输入参数变化时的输出参数;  $V(Y)$  表示  $Y$  的总方差。

通过对优化变量参数的敏感性分析和定量评估, 可以揭示不同参数对吸声结构降噪效果的影响程度, 从而为进一步优化多层共振复合吸声结构设计提供依据。一阶响应指数主要是衡量在其他输入参数保持不变时, 单个输入参数对输出变量的直接影响程度, 而总效应指数综合考虑了参数自身的一阶效应及其与其他参数联合时对输出变量的全方位影响程度, 揭示了输入变量之间的依赖关系与交互效应。对于一阶响应指数而言, 敏感性系数越大, 表明该输入变量对输出变量的影响越显著; 当敏感系数为正时, 输入变量的增加会导致输出变量的增加, 表现为正效应; 反之则表现为负效应。

从图 14 分析可知, 多孔吸声材料厚度  $D$  的敏感性最高 ( $S=0.262$ 、 $S_T=0.438$ ), 表明多孔吸声材料

的厚度在吸声材料噪声抑制效果中起决定作用，主要是因为多孔吸声材料的吸声机制主要依赖于材料的厚度以及孔隙结构，随着厚度的增加，声波在多孔吸声材料内部的传播距离变长，增强了材料对声波的吸收能力，从而提升复合吸声结构整体的吸声性能。对于吸声结构距变压器中心距离  $l_m$  ( $S=0.2$ 、 $S_T=0.188$ ) 的敏感性也较显著，当吸声装置距离变压器较近时，声波多次反射导致其还未完全进入到吸声结构内部，从而吸声效果不佳。除此之外，该参数的  $S_T$  与  $S$  间具有较小的差异值，表明该参数与其他影响因子的交互作用对预测结果的影响相对次要。

空腔深度  $D_1$  ( $S=0.119$ 、 $S_T=0.221$ ) 与微穿孔板穿孔率  $p$  ( $S=0.241$ 、 $S_T=0.262$ ) 的敏感性也相对显著，主要是因为较高的穿孔率会增加空气流动阻力，从而提高吸声能力，而穿孔率较小时使得声波难以透过微穿孔板被反射的较多，导致吸声性能变差；当声波进入空腔时，在一定深度处入射声波与反射声波通过叠加会产生驻波效应，增强对声能的吸收，进而提高吸声性能。对于微穿孔板孔径  $d$  ( $S=0.0149$ 、 $S_T=0.152$ ) 与微穿孔板板厚  $t$  ( $S=-0.0306$ 、 $S_T=0.229$ ) 两个参数来说，虽然二者的一阶效应指数相对偏低，但它们与其他参数变量间存在显著的交互效应，会对输出变量产生一定的影响。除此之外，计算得到微穿孔板板厚  $t$  的一阶效应指数表现为负效应，主要是因为当微穿孔板的板厚逐渐增加时，会使得孔道的长度变长，进而使得声能在孔道中的传播行程变长，使得空气与孔壁接触面积增大，粘滞效应增强，导致局部声阻增大，声阻过大会导致声波无法有效进入微穿孔板的孔洞内部被耗散，削弱了吸声结构的吸声效果。该变量对吸声效果存在一定的影响，因此本文在后续优化变量寻优过程中并没有将其舍去。

4.6 基于 SCSSA 算法的优化变量分析

为优化复合吸声装置的结构参数，以达到更好的降噪效果，本文采用融合正余弦和柯西变异策略的麻雀搜索算法(sine-cosine and cauchy mutation sparrow search algorithm, SCSSA)，该算法在传统麻雀算法的基础上引入了正余弦惯性权重和柯西变异策略，旨在提高算法的全局搜索能力和全局优化能力<sup>[25]</sup>。相较于传统的麻雀算法，SCSSA 算法具有更加优秀的全局求解能力和计算效率。

基于上述求解的 RBF 神经网络模型，结合 SCSSA 优化算法，将优化算法的相关参数设置如

下：种群数量为 50、最大迭代次数为 100、发现者与警戒者比例分别为 0.8 与 0.1、安全阈值为 0.7，获得最佳的复合吸声装置结构参数，具体见表 10。

为验证优化模型的准确性，根据表 10 中给出的最优结构参数，在保持高频变压器电气与几何参数恒定的条件下，采用有限元方法进行仿真计算。图 15 展示了在最优结构参数下高频变压器声压级仿真云图。最优参数下高频变压器测量点的声压级

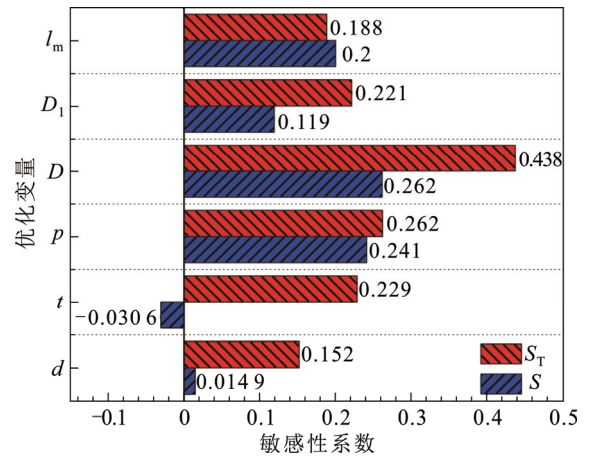


图 14 优化变量对高频变压器优化目标的敏感值

Fig.14 The sensitivity of optimization parameters to HFT optimization objectives

表 10 结构参数优化结果

Table 10 Structure parameters optimization results

变量	$d/mm$	$t/mm$	$p$	$D/mm$	$l_m/mm$	$D_1/mm$	声压级/dB
优化前	0.8	2.0	0.04	20	120	40	58.178
优化后	0.6	1.5	0.02	18	130	12	48.002

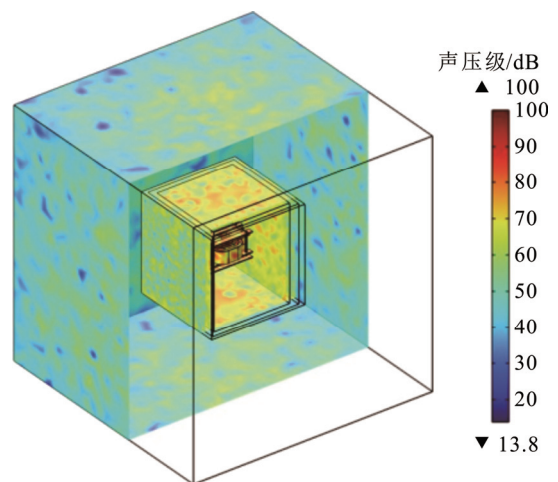


图 15 最优参数下高频变压器声压级分布

Fig.15 Sound pressure level distribution of HFT under optimal parameters

为 48.002 dB, 相比于优化前降低 10.176 dB, 这表明建立的优化模型具有一定的可靠性, 优化方法可以有效的降低高频变压器的振动噪声。

为进一步验证多层共振复合吸声装置在最优结构参数下对高频变压器的降噪效果, 分别提取了在有复合吸声装置的情况下, 不同测量点的声压级数据。根据 GB/T1094.10—2022 国家标准, 声压级的测量轮廓面应距离基准发射面 0.3 m, 因此将数据提取点设置在距离高频变压器中心位置 0.3 m 的圆周上且每隔 2° 设置一个提取点, 并规定逆时针为正方向。图 16 为数据提取点的分布示意图, 共选取 181 个数据点进行分析。图 17 显示了有无复合吸声装置时不同测量点的声压级大小, 由图 17 可明显看出, 多层共振复合吸声装置显著降低了高频变压器的整体声压级, 这为后续预制舱式变电站箱体材料的选择和制作提供了新的手段与参考依据。

## 5 结论

本文以 1 台 5 kHz/10 kVA 高频变压器为研究对象, 以振动噪声为优化目标, 建立了高频变压器电磁场-结构力学-声学三维仿真求解模型。设计了一个多层共振复合吸声装置, 分析其对高频变压器降噪效果的影响, 并通过算法优化获得了最优的结构参数, 得到以下结论:

1) 高频变压器在方波电压激励下, 主要受到由磁致伸缩力与麦克斯韦力共同作用的电磁力影响, 导致铁芯振动并产生噪声, 振动频率与其激励频率密切相关。通过对比不同多层共振复合吸声结构在高频段的吸声性能可知, 将多孔吸声材料放置在微穿孔吸声板之前, 能有效提升复合吸声装置的吸声性能且平均吸声系数达到 0.811 4。

2) 通过中心组合试验设计与有限元仿真分析相结合, 得到不同结构参数下测量点声压级大小, 并建立了不同结构参数与测量点声压级大小间的 RBF 神经网络模型, 所构建的模型能较好地预测声压级大小; 此外, 采用灵敏度分析技术评估不同结构参数对高频变压器振动噪声的影响程度, 结果显示: 各参数总效应指数均呈现出正效应且多孔吸声材料的厚度在吸声材料噪声抑制效果中起决定作用。

3) 基于 RBF 神经网络模型并采用 SCSSA 优化算法对复合吸声装置结构参数进行优化。结果表明: 在最优结构参数下高频变压器测点声压级降低了 10.176 dB, 复合吸声装置表现出更好的抑噪效果。

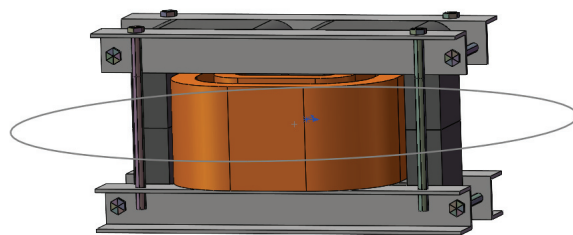


图 16 数据提取点示意图

Fig.16 Schematic diagram of the data extraction points

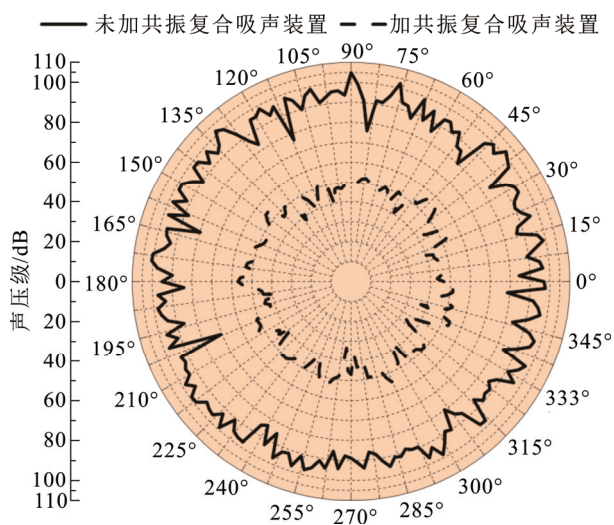


图 17 声压级极坐标图

Fig.17 Polar diagram of sound pressure level

本文的研究工作有望为高频变压器及其他电力设备的噪声控制提供新的技术途径与实现手段, 减少噪声对周围环境及电力设备的影响, 同时, 为推动声学材料及其相关理论进一步发展具有重要的参考意义。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

## 参考文献 References

- [1] 王威望, 刘莹, 何杰峰, 等. 高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3362-3373.  
WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3362-3373.
- [2] 张鹏宁, 向雪岩, 李伟, 等. 面向电力电子变压器的高频变压器技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4996-5011.  
ZHANG Pengning, XIANG Xueyan, LI Wei, et al. High frequency transformer technology for power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4996-5011.
- [3] 曹辰, 路敦林, 徐博文, 等. 基于弹性力学-热力学的变压器铁芯磁致伸缩振动模型与松动故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2146-2157.  
CAO Chen, LU Dunlin, XU Bowen, et al. Magnetostrictive vibration

- model and loosening fault diagnosis method of transformer core based on elastodynamics-thermodynamics[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(5): 2146-2157.
- [4] 张鹏宁. 复杂工况下软磁材料磁致伸缩特性与电力设备铁心振动研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.  
ZHANG Pengning. Research on magnetostrictive properties of soft magnetic materials and vibration of electrical power equipment core under complex working conditions[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2019.
- [5] 张鹏宁, 李伟, 李朋阳, 等. 纳米晶高频变压器优化设计与实验验证[J]. *高电压技术*, 2024, 50(10): 4475-4486.  
ZHANG Pengning, LI Wei, LI Pengyang, et al. Optimization design and experimental verification of nanocrystalline high-frequency transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(10): 4475-4486.
- [6] 李彩莲. 特高压变压器噪声特性及其有源降噪系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.  
LI Cailian. Research on noise characteristics and active noise reduction system of UHV transformer[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2017.
- [7] 钟思翀, 祝丽花, 王前超, 等. 电力变压器振动噪声分析及有源降噪[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(增刊1): 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(Supplement 1): 11-21.
- [8] 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 Jianguang. Research on vibration noise analysis and noise reduction method of power transformer[D]. Nanchang, China: Nanchang University, 2022.
- [9] 亢银柱, 张超, 刘国强, 等. 声子晶体材料与有源控制相结合的宽频噪声抑制方法[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(17): 188-193.  
KANG Yinzhu, ZHANG Chao, LIU Guoqiang, et al. Broadband noise suppression method based on combination of phononic crystal material and active noise control system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(17): 188-193.
- [10] LI Y J, YANG Z T, ZHANG C G, et al. Vibration and noise measurement of medium-high frequency transformer cores under non-sinusoidal excitation[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, 58(8): 8401405.
- [11] SHUAI P, BIELA J. Influence of material properties and geometric shape of magnetic cores on acoustic noise emission of medium-frequency transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(10): 7916-7931.
- [12] 汪熙婷. 多层吸声材料结构设计与性能优化[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.  
WANG Xiting. Structural design and performance optimization of multilayer sound-absorbing materials[D]. Shanghai, China: Shanghai University of Engineering Science, 2021.
- [13] 胡齐笑. 基于传递矩阵法的微穿孔吸声体性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.  
HU Qixiao. Study on performance of micro-perforated absorber based on transfer matrix method[D]. Wuhan, China: Hubei University of Technology, 2019.
- [14] 程修妍, 荣吉利, 谌相宇, 等. 多孔材料在整流罩内中高频降噪的应用与优化研究[J]. *宇航学报*, 2018, 39(4): 383-391.  
CHENG Xiuyan, RONG Jili, CHEN Xiangyu, et al. Analysis and optimization for medium and high frequency noise attenuation of rocket fairings with porous material[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(4): 383-391.
- [15] 胡永松. 多孔吸声材料的减振降噪分析及其在整流罩中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.  
HU Yongsong. Vibration and noise reduction of porous sound absorbing materials and its application in fairing[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2022.
- [16] 陈彬, 沈辰轩, 刘洋, 等. 高频变压器电磁场-结构力场-声场求解及特性分析[J]. *高电压技术*, 2024, 50(10): 4459-4474.  
CHEN Bin, SHEN Chenxuan, LIU Yang, et al. Solution and characteristic analysis of high-frequency transformer based on electromagnetic field-structural force field-acoustic field[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(10): 4459-4474.
- [17] KÜPPERS D, KRANZ J, HUBERT A. Coercivity and domain structure of silicon-iron single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(2): 608-609.
- [18] ARAI S, MIZOKAMI M, YABUMOTO M. Magnetostriction of grain oriented Si-Fe and its domain model[J]. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2011, 87(9B): 20-23.
- [19] 靳一帆. 新型微穿孔管消声器的设计及研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.  
JIN Yifan. Design and study of a new micro-perforated tube muffler[D]. Yinchuan, China: Ningxia University, 2023.
- [20] 武海权. 双层吸声体功能性优化设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.  
WU Haiquan. Study on functional optimization design of double-layer acoustic absorber[D]. Changchun, China: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [21] FISCHBACH A, STORK J, ZAEFFERER M, et al. Analyzing capabilities of Latin hypercube designs compared to classical experimental design methods[C]//*Proceedings of the 25th Workshop Computational Intelligence*. Dortmund, Germany: Technische Universität Dortmund, 2015: 255-269.
- [22] 孟峰利. 基于机器学习的风电机组齿轮油抗氧化性能分析方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.  
MENG Fengli. Research on analytical method of antioxidant performance of fine gear oil based on machine learning[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020.
- [23] 郭宇轩. 高速列车体悬挂牵引传动系统动态特性及优化研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.  
GUO Yuxuan. Study on dynamic characteristics and optimization of high speed train body suspension traction drive system[D]. Beijing, China: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [24] SONG T F, LIU H J, ZHANG Q, et al. Multi-physics and multi-objective optimisation design of interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles[J]. *IET Electric Power Applications*, 2020, 14(11): 2243-2254.
- [25] 李爱莲, 全凌霄, 崔桂梅, 等. 融合正弦余弦和柯西变异的麻雀搜索算法[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(3): 91-99.  
LI Ailian, QUAN Lingxiang, CUI Guimei, et al. Sparrow search algorithm combining sine-cosine and Cauchy mutation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(3): 91-99.



CHEN Bin  
Ph.D.

Associate professor  
Corresponding author



SHEN Chenxuan

陈彬(通信作者)

1989—, 男, 博士, 副教授

主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、  
电工新材料综合特性模拟与测量技术的研究工作  
E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

沈辰轩

1999—, 男, 硕士生

主要从事高频变压器振动噪声特性分析及降噪结  
构设计与优化方面的研究工作  
E-mail: 1158644990@qq.com

# 附录 A

表 A1 中心组合试验设计计算结果

Table A1 Calculation results of the central combination design

序号	$d/mm$	$t/mm$	$p$	$D/mm$	$l_m/mm$	$D_1/mm$	声压级/dB
1	0.8	2.0	0.02	10	120	40	57.277
2	0.8	1.0	0.04	10	100	20	55.577
3	0.6	1.5	0.03	15	110	10	46.778
4	0.8	2.0	0.02	10	100	20	44.433
5	0.8	2.0	0.04	20	100	20	58.548
6	0.4	2.0	0.04	20	100	40	52.615
7	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.384
8	0.8	2.0	0.04	10	100	40	62.081
9	0.6	2.5	0.03	15	110	30	50.811
10	0.4	1.0	0.02	10	120	40	60.350
11	0.8	1.0	0.02	20	100	20	59.461
12	0.4	2.0	0.02	20	120	40	50.468
13	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.606
14	0.4	2.0	0.04	20	120	20	53.163
15	0.6	1.5	0.03	5	110	30	49.206
16	0.4	2.0	0.02	10	120	20	60.570
17	0.8	2.0	0.04	20	120	40	51.336
18	0.8	2.0	0.04	10	120	20	64.541
19	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.384
20	0.6	1.5	0.05	15	110	30	52.749
21	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.606
22	0.4	1.0	0.04	10	100	40	62.014
23	0.4	2.0	0.04	10	100	20	58.725
24	0.6	1.5	0.03	15	110	50	52.237
25	0.4	2.0	0.02	20	100	20	60.835
26	0.6	1.5	0.03	15	130	30	43.451
27	0.4	1.0	0.02	20	100	40	52.660
28	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.606
29	0.8	1.0	0.04	20	100	40	53.992
30	1.0	1.5	0.03	15	110	30	50.129
31	0.4	1.0	0.04	20	100	20	52.763
32	0.4	1.0	0.02	20	120	20	52.341
33	0.6	1.5	0.03	15	90	30	49.909
34	0.8	2.0	0.02	20	100	40	55.859
35	0.4	1.0	0.04	10	120	20	65.662
36	0.8	2.0	0.02	20	120	20	52.121
37	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.384
38	0.6	1.5	0.03	25	110	30	51.526
39	0.8	1.0	0.02	20	120	40	50.450
40	0.8	1.0	0.04	10	120	40	62.044
41	0.4	2.0	0.02	10	100	40	62.311
42	0.8	1.0	0.04	20	120	20	55.330
43	0.6	0.5	0.03	15	110	30	53.404
44	0.4	1.0	0.02	10	100	20	58.670
45	0.6	1.5	0.01	15	110	30	51.422
46	0.8	1.0	0.02	10	100	40	62.542
47	0.8	1.0	0.02	10	120	20	63.057
48	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.384
49	0.2	1.5	0.03	15	110	30	48.140
50	0.4	1.0	0.04	20	120	40	58.833
51	0.4	2.0	0.04	10	120	40	60.949
52	0.6	1.5	0.03	15	110	30	49.606