

文章编号:1006-1355(2023)03-0060-06

半主动式薄膜型声学超材料超低频隔声特性研究

陈传敏^{1,2}, 乔钊熙^{1,2}, 郭兆枫³, 杜鹏宇^{1,2}, 陈 炜⁴, 刘松涛^{1,2}

(1. 华北电力大学 环境科学与工程系 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室,
河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 区域能源系统优化教育部重点实验室, 北京 102206;

3. 河北科技工程职业技术大学 资源与环境工程系, 河北 邢台 054000;

4. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙 410000)

摘要:针对变电站50 Hz的超低频噪声较难控制的特点,设计一种半主动式薄膜型声学超材料,通过仿真模拟计算其隔声特性。该材料以钕铁硼磁铁作为中心质量块负载于边界固定的橡胶薄膜上,并装配通电螺线管作为半主动控制系统。通过仿真模拟及数值分析手段对其隔声特性进行研究。通过改变电流强度准确控制中心钕铁硼磁铁质量块的受力,最终改变薄膜张力,实现隔声峰频率的控制,与一般的薄膜声学超材料相比,其具有缓解薄膜材料疲劳等优点;并对薄膜厚度以及质量块厚度、大小对薄膜型声学超材料声学特性的影响进行研究。仿真结果表明:该材料对于50 Hz的超低频噪声隔声量达到130 dB,具有优良的隔声性能。

关键词:声学;半主动式;薄膜声学超材料;超低频;隔声特性

中图分类号:TK421+.6

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2023.03.010

Study on Ultra-low Frequency Sound Insulation Characteristics of Semi-active Membrane Type Acoustic Metamaterials

CHEN Chuanmin^{1,2}, QIAO Chuanxi^{1,2}, GUO Zhaofeng³,
DU Pengyu^{1,2}, CHEN Wei⁴, LIU Songtao^{1,2}

(1. Hebei Province Key Laboratory of Cooperative Control of Multi-pollutants from Coal-fired Power Plants, Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. Key Laboratory of Regional Energy System Optimization, State Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Department of Resources and Environmental Engineering, Hebei Vocational University of Science and Technology, Xingtai 054000, Hebei, China;

4. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410000, China)

Abstract: A semi-active membrane type acoustic metamaterial is designed for the control of 50 Hz ultra-low frequency noise in substations, and its sound insulation characteristics are calculated by simulation. The material is loaded with an NdFeB magnet as the central mass block on the rubber film with the edge fixed, and equipped with an energized solenoid to form a semi-active control system. Its sound insulation characteristics are investigated by simulation and numerical analysis. By changing the current intensity, the force applied on the central magnet block is precisely controlled, resulting in a change of film tension and achieving the control of the isolation peak frequency. Compared with conventional thin film acoustic metamaterials, this material has the advantage of alleviating the fatigue failure of thin film materials. The effects of film thickness as well as mass block thickness and size on the acoustic properties of thin-film type acoustic metamaterials are investigated. The simulation results show that the material has excellent sound insulation performance with a 130 dB sound insulation capacity for ultralow frequency noise of 50 Hz.

Key words: acoustics; semi-active; thin-film acoustic metamaterial; ultralow-frequency; sound insulation property

收稿日期:2022-01-10

基金项目:国家电网公司科技资助项目

作者简介:陈传敏(1973-),男,河南省民权市人,教授,专业

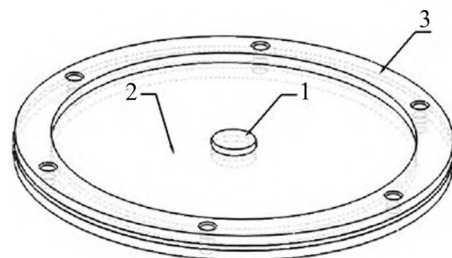
方向主要为变电站噪声控制。

E-mail: hndcm@126.com

薄膜声学超材料由于具有更好的低频声学性能,在减振降噪领域被广泛研究^[1-9]。崔洪宇等^[10]设计了一种新的薄膜超材料蜂窝夹层板,在普通蜂窝夹层板中加入薄膜型声学超材料。通过有限元分析的方法改变质量块的物理参数(形状、厚度等)对该材料的隔声特性进行分析,发现该结构蜂窝边框形状、质量块大小和薄膜预应力对该材料的隔声特性有较大的影响。胡超楠^[11]以薄膜声学超材料为研究对象,对其隔声机理进行分析,从声波的传播原理、隔声评价机制和薄膜振动等方面进行研究,通过仿真模拟和数值分析研究不同参数对其声学特性的影响,提出一种新型的薄膜型声学超表面,提高了对于低频、宽频的隔声效果。杭锐等^[12]设计了一种由电磁力控制薄膜张力的薄膜型主动声学超材料,该结构将薄膜型声学超材料置于通电螺线管内部,材料由中心吸附钕铁硼磁铁、外边界固定的薄膜组成。通过数值模拟和实验对其声学性能进行了探究,通过实验发现,该结构在 100 Hz~200 Hz 的范围内隔声量达到了 80 dB。Ning 等^[13]设计了一种由框架结构、气囊和平衡重组成的可调声学超材料。计算结果表明:在操纵过程中可调谐声学超材料可以有效抑制波在超低频带隙内的传播和振动。另外通过调节表压或气体温度能改变安全气囊的结构刚度和框架结构,可以用于低频振动和噪声的主动控制。贺子厚等^[14]针对低频噪声难消除的问题,设计了基于压电材料的可控薄膜声学超材料,该材料在天然橡胶薄膜上嵌入压电质量块,建立了材料的有限元分析模型。计算结果表明:此声学超材料在 20 Hz~1 200 Hz 频段内隔声性能良好,存在两个 50 dB 以上的隔声峰与一个可调式的隔声峰。同时可以通过改变外接电路的参数来调整电路的共振频率,从而实现对隔声性能的调控。然而,多数薄膜声学超材料的隔声频率发范围大多为 100 Hz 以上的频域,其在 20 Hz~100 Hz 超低频范围内隔声问题鲜有研究,但变电站设备等一些机械噪声主要集中在 40 Hz~100 Hz 的超低频段。且现有的薄膜声学超材料会由于使用时长而产生疲劳,将导致其隔声峰频率会发生偏移,使其降噪效果变差。因此,设计了一种半主动式的薄膜声学超材料,该材料由两块吸附在薄膜中心的钕铁硼磁铁、边界固定的橡胶薄膜和通电螺线管等组成。其具有制备过程简单、后期可调节等特点。文章对该新型薄膜声学超材料进行了数值建模与计算,对其隔声特性与影响因素进行分析,并对降噪机理进行了研究。

1 半主动式薄膜声学超材料理论分析

如图 1 所示,所设计的模型主要由两块钕铁硼磁铁吸附构成的中心质量块、天然橡胶薄膜和双层铝制框架 3 部分构成,将制备好的薄膜型声学超材料垂直置于通电螺线管内,将通电螺线管连接直流电源产生均匀磁场,将通过人工改变电流大小来控制磁场强度,从而改变磁铁受力来控制薄膜的表面张力,达到半主动调节该材料固有频率的目的。



(1-中心质量块; 2-薄膜; 3-铝制框架)

图 1 薄膜-质量块示意图

声波发射到结构型薄膜声学超材料表面时,中心质量块随薄膜产生局域共振,消耗声能量,使声波无法通过,实现隔声的目标。由薄膜理论可知,边界固定、中心附加质量块的薄膜运动方程^[15]为:

$$\rho_m \hbar \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + \rho_s \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \gamma \nabla^2 \omega = p_i + p_r + p_t \quad (1)$$

式中: \hbar 为跃阶函数, ρ_m 和 ρ_s 分别是中心质量块和薄膜面密度; γ 是薄膜张力; ∇ 是拉普拉斯算符; p_i 、 p_r 和 p_t 分别是入射声压、反射声压和透射声压; ω 是薄膜上一点在时间 t 轴上的横向位移。对模型在整个膜结构表面积分,根据模态函数的正交性可得:

$$[\omega^2 (\mathbf{M} + \mathbf{Q}) - \mathbf{K}] \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

式中: ω 是薄膜的圆频率; \mathbf{M} 是薄膜面密度矩阵; \mathbf{Q} 是中心质量块质量矩阵; \mathbf{K} 是薄膜张力矩阵; \mathbf{q} 是特性向量矩阵。

当中心质量块随着薄膜一起振动时,系统固有频率 f 为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{e1}}{(M_{e1} + M_m)}} \quad (3)$$

式中: K_{e1} 是等效弹性系数; M_{e1} 是膜圆心处等效质量; M_m 是中心质量块等效质量。

由式(3)可知,改变薄膜和质量块的相关参数可以改变薄膜型声学超材料的振动固有频率。当入射声波频率与结构频率相近时发生共振,此时声损失最小,隔声特性最差;当质量块处薄膜与其周围的薄膜发生反向共振时,相当于薄膜整体上位移为0,声损失最大,隔声性能最好,此时整个系统的频率即为反共振频率。

钕铁硼磁铁在通电螺线管内所受的轴向磁力方程^[12]可表示为:

$$F \approx \left[\frac{1}{1 + \alpha(L_1 - \Delta_z)} - \frac{1}{1 + \alpha(L_2 - \Delta_z)} \right] \times \frac{1.5A_g B_g \times \mu_0 \cdot (N/L) \cdot I}{(4865)^2} \quad (4)$$

式中: Δ_z 是中心质量块随薄膜振动的轴向位移(与声波同向取正,与声波反向取负), A_g 是中心质量块面积, B_g 是钕铁硼磁铁磁化强度, α 是修正系数,取为3~5。 μ_0 是真空磁导率, N 是螺线管线圈匝数, L 是螺线管长度, I 是电流大小。

由结构固有频率方程和磁铁受力方程可知,所设计的半主动式薄膜声学超材料在输入直流电后钕铁硼磁铁受到轴向力 F 作用,当声波入射到薄膜上时,中心质量块随薄膜产生局域共振,薄膜张力对质量块有一个反向的恢复力,而磁铁的质量块受到的轴向磁力强化了这个恢复力,增强了薄膜张力组成的刚度 K_{e1} ,进而达到了控制薄膜隔声固有频率的目的。

2 半主动式薄膜声学超材料仿真模型建立

图2显示了本文提出的半主动式薄膜声学超材料的元胞结构,它由3个部分组成:螺线管、中心质量块和薄膜。薄膜上钕铁硼磁铁的 N 极与通电后螺线管 N 极方向一致。其中,中心质量块是直径为12.0 mm、厚度为2.0 mm的钕铁硼磁铁,螺线管内径为50 mm,螺线管长度为200 mm,线圈匝数为800匝,薄膜是厚度为1.5 mm的乳胶橡胶。元胞尺寸为100 mm,材料参数如表1所示。

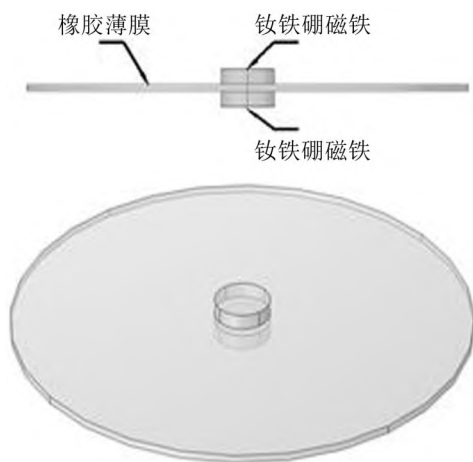


图2 半主动式的薄膜超材料的元胞示意图

声传输损失STL是评价声学材料声学特性的重要物理量,又称为隔声量。STL越大,隔声性能越

表1 材料参数

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/Pa	ν
钕铁硼磁铁	7 500	1.535×10^8	0.24
橡胶薄膜	1 000	7×10^6	0.49

好。分析隔声性能的频率取在超低频范围(20 Hz~100 Hz),求解步长为1 Hz,利用声固磁耦合模拟方法,在平面波前传输区和后传输区各取一积分面,分别对声波功率进行面积分,并代入声传输损失公式,即可得到平面波通过该结构装置的声传输损失。仿真时依据驻波管测量原理建立有限元模型如图3所示。

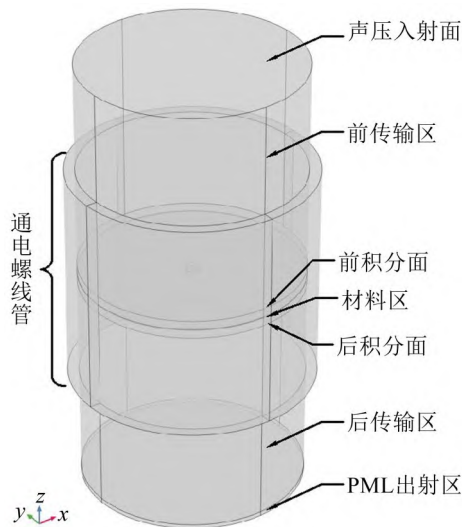


图3 声传输损失有限元模型

从顶部到底部分别为声压入射面、前传输区、前积分面 P_1 、材料区、后积分面 P_2 、后传输区和PML出射区,外部套筒为通电螺线管。初始条件定义为从入射面向下射入一个压力大小为1 Pa的平面波,将通道边界设置为硬声场边界,采用极端细化尺寸对模型进行极细化网格划分。通过有限元进行频域稳态计算,则待测材料的STL可以通过式(5)求出。

$$\text{STL} = 20 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (5)$$

式中: P_1 为入射声压(Pa),其值为1 Pa; P_2 为出射区的声压(Pa)。

3 半主动薄膜声学超材料的声学特性

为了获得在50 Hz附近有最好的超低频隔声特性的声学超材料,现对选定材料在不同结构参数下利用COMSOL Multiphysics 5.6有限元仿真软件进行仿真模拟计算,分别对中心质量块厚度、中心质量块直径和薄膜厚度等参数在20 Hz~80 Hz的频率范围内进行仿真模拟,针对变电站噪声特性在一定范围内选出具有最佳隔声特性的材料参数。

由图4可知,将中心质量块的直径、厚度以及薄膜的厚度作为影响因子进行参数化数值计算,当中心质量块直径为12.0 mm、厚度为2.0 mm,薄膜厚度为1.5 mm时,其声传输损失不仅在51 Hz处达到了130 dB,而且在44 Hz~58 Hz的频率范围内,均在50 dB以上,隔声频带具有宽频特性。针对变电站噪声峰值在50 Hz处的特点,采用结构的材料具有优良的隔声性能。接下来探究该结构参数下薄膜声学超材料的低频隔声特性与隔声机理。

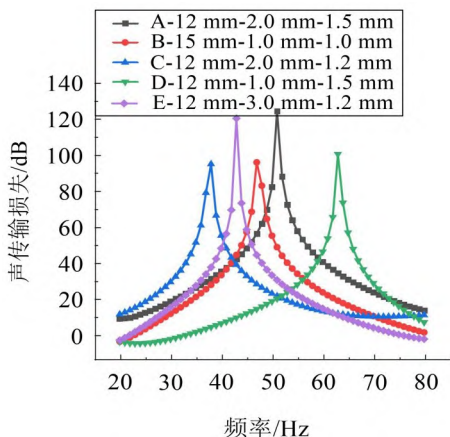
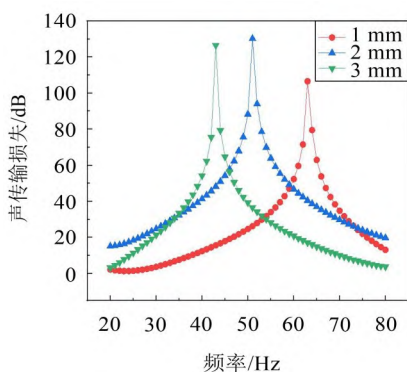
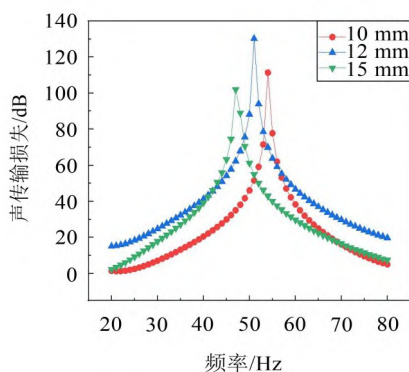


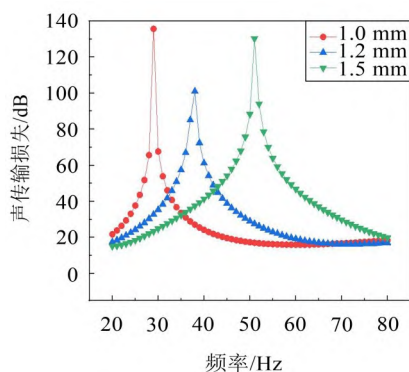
图4 不同材料参数下该结构隔声曲线



(a) 质量块厚度对隔声量的影响



(b) 质量块直径对隔声量的影响



(c) 薄膜厚度对隔声量的影响

图5 半主动式薄膜声学超材料低频隔声特性的影响因素

mm时,在51 Hz处隔声量达到了130 dB。当中心质量块直径为12.0 mm、厚度为2.0 mm,薄膜厚度为1.5 mm时,其声传输损失不仅在51 Hz处达到了130 dB,而且在44 Hz~58 Hz的频率范围内声传输损失在50 dB以上,具有宽频特性。针对变电站噪声峰值在50 Hz处的特点,该材料具有优良的隔声性能。

3.2 磁场对薄膜反共振频率的影响

由图6可知随着电流强度变大,薄膜张力呈线性增大。当电流为0时,1.5 mm的天然橡胶薄膜的张力为 5.7×10^{-5} N,当电流增大时,薄膜张力随电流递增。

从图7所示仿真计算结果可以看出,未加电流

3.1 隔声特性单一影响因素分析

根据所建立的声学超材料模型,采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.6 对半主动式薄膜型声学超材料的声学特性进行数值分析。

为了研究半主动式薄膜声学超材料的超低频隔声特性,对中心质量块的直径、厚度以及薄膜的厚度作为影响因子进行参数化数值计算,仿真计算结果如图5所示。

由图5(a)可知,当质量块厚度以1.0 mm的步长从1.0 mm增加到3.0 mm时,声传输损失峰值分别出现在63 Hz、51 Hz、43 Hz处,呈现出向低频偏移的趋势。在63 Hz处的隔声量达到了106 dB,在51 Hz处的隔声量达到了130 dB,在43 Hz处的隔声量达到了126 dB。由图5(b)可知,随着质量块直径从10.0 mm增加到12.0 mm和15.0 mm时,隔声峰频率与图5(a)所示一致,向低频偏移,在54 Hz、51 Hz、47 Hz处所示,隔声量分别达到111 dB、130 dB和101 dB。然而从图5(c)可以看出,随着薄膜厚度的增加,隔声峰频率呈现出向高频移动的趋势,当厚度为1.0 mm时,在29 Hz处隔声量达到了135 dB,当厚度为1.2 mm时,在38 Hz处隔声量达到了100 dB,厚度为1.5

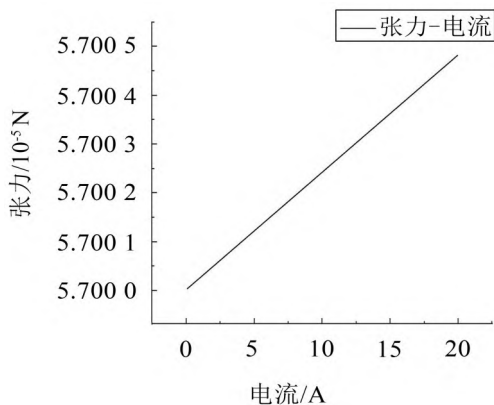


图6 电流强度对薄膜张力影响曲线

时,该材料在51 Hz处的隔声量达到了130 dB,该结构的薄膜型声学超材料针对变电站低频噪

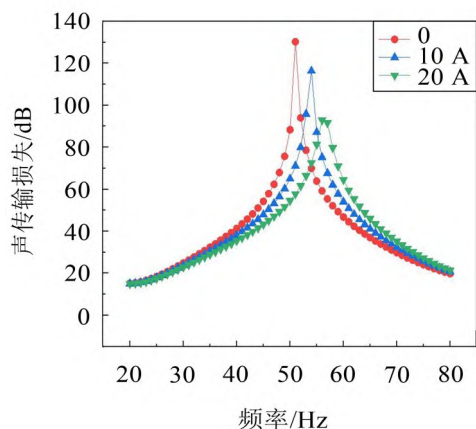


图7 不同电流强度下材料隔声曲线

声有着优良的隔声性能。

另外在所研究的20 Hz~80 Hz频率范围内,随着电流变大,声学超材料隔声峰频率向高频移动,因此所设计的半主动式薄膜声学超材料可以解决薄膜材料由于疲劳软化导致隔声峰频率偏移问题。通过调节电流的方式给中心磁铁施加轴向电磁力可以在低频范围内调节隔声峰,实现了对于薄膜声学超材料隔声峰的非接触式半主动控制。

4 机理分析

为了探究半主动式薄膜声学超材料的隔声降噪机理,分别在声传输损失的峰值频率和谷值频率处计算声强流线、振型位移和声压级。图8(b)和图9(b)分别为谷值21 Hz处的声强流线复合振动位移图和振型位移图,可以看到在21 Hz处,振子与声波形成同相位共振,声波可以几乎无损失穿过薄膜超材料。通过图10(b)可看出,由于共振效应,声波经过薄膜超材料后的声压级增加了约2.6 dB。

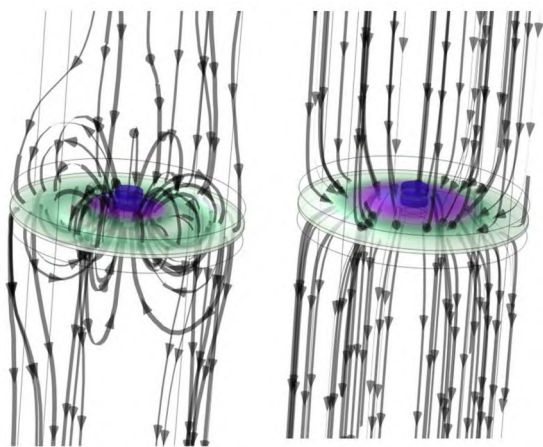


图8 半主动式薄膜声学超材料声强流线云图

图8(a)和图9(a)分别为峰值51 Hz处的声强流线复合振动位移图和振型位移图,可以看到在51 Hz处,振子与声波形成反相位共振,声波能量在这种振

动模态下不断被耗散。通过图10(a)可看出,由于反共振效应,声波经过薄膜超材料后的声压级降低了约53 dB。

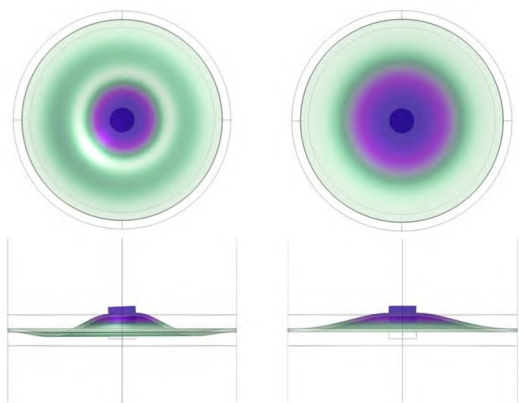


图9 半主动式薄膜声学超材料振型位移云图

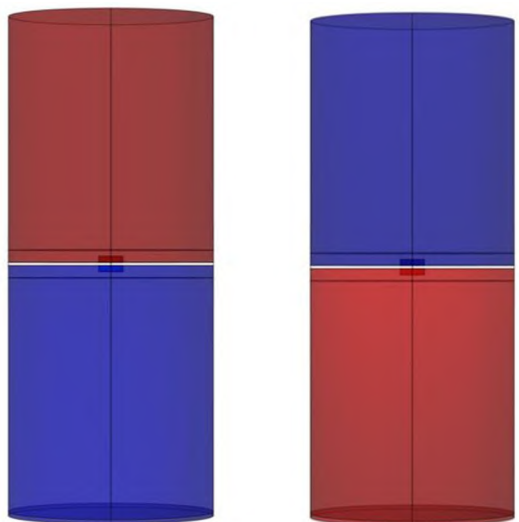


图10 半主动式薄膜声学超材料声压级云图

5 结语

(1) 文中设计的半主动式薄膜声学超材料结构简单,高效稳定。通过仿真可知,理论上通过改变电流强度来控制薄膜中心质量块的受力,可实现薄膜声学超材料声传输损失峰值定向移动。另外仿真结果表明:该材料声传输损失峰值在51 Hz处达到了130 dB,且在44 Hz~58 Hz的频率范围内,声传输损失在50 dB以上,具有宽频特性,能有效解决变电站50 Hz左右的超低频噪声,缓解因材料疲劳出现的隔声峰值频率偏移情况。

(2) 通过对其隔声特性的影响因素进行研究,发现随着中心质量块直径的增加,声传输损失峰值频率向低频移动;随着中心质量块厚度的增加,声传输损失峰值频率向低频移动;随薄膜厚度的增加,声传输损失峰值频率向高频移动;当中心质量块直径是

12.0 mm、厚度为2.0 mm,薄膜厚度为1.5 mm时,其在50 Hz处的隔声特性最优。

(3) 通过对其降噪机理的研究,可发现声传输损失峰值出现的原因确实是因为超材料与声波产生了反相位共振,从而使声波能量不断被耗散。声传输损失谷值出现的原因因为超材料与声波产生了同相位共振,从而加强声波的传递。研究结论可为薄膜声学超材料的设计提供新思路,在低频降噪领域具有潜在应用价值。

参考文献:

- [1] 贾豫冬,王嘉琦. 超人工结构,超常规性能,超前景应用[J]. 中国材料进展,2020,39(11):802.
- [2] PAGE J H, SHENG P, SCHRIEMER H P, et al. Group velocity in strongly scattering media[J]. Science 1996, 271, 5249(1996): 634-637.
- [3] SONG H, DING X, CUI Z, et al. Research progress and development trends of acoustic metamaterials[J]. Molecules, 2021, 26(13): 4018
- [4] 吴九汇,马富银,张思文,等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述[J]. 机械工程学报,2016,52(13):68-78.
- [5] CAI M, TIAN H, LIU H, et al. Low frequency sound insulation performance of asymmetric coupled-membrane acoustic metamaterials[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2019, 15(5): 1006-1015.
- [6] 曹瑞. 薄膜型声学超材料隔声性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2015.
- [7] CHEN P, HABERMAN M R, GHATTAS O. Optimal design of acoustic metamaterial cloaks under uncertainty[J]. Journal of Computational Physics, 2021, 431(15): 110114.
- [8] 孟德世,李丽君,李敏. 声学超材料的结构设计概述[J]. 功能材料与器件学报,2021,27(2):67-76.
- [9] LIN Q, LIN Q, WANG Y, et al. Sound insulation performance of sandwich structure compounded with a resonant acoustic metamaterial[J]. Composite Structures, 2021, 273(1): 114312.
- [10] 崔洪宇,杜艳梅,王海关. 不同形状质量块的声学超材料结构隔声特性研究[J]. 舰船科学技术,2021,43(5):33-36.
- [11] 胡超楠. 薄膜型声学超表面设计与可调节性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2020.
- [12] 杭锐,吴卫国,曾天成. 基于电磁力调谐的薄膜主动声学超材料[J]. 噪声与振动控制,2019,39(6):66-70.
- [13] NING S, YAN Z, CHU D, et al. Ultralow-frequency tunable acoustic metamaterials through tuning gauge pressure and gas temperature[J]. Extreme Mechanics Letters, 2021, 44: 101218.
- [14] 贺子厚,赵静波,姚宏,等. 基于压电材料的薄膜声学超材料隔声性能研究[J]. 物理学报,2019,68(13):179-190.
- [15] 党煜莹,王珂. 薄膜型声学超材料隔声特性分析[C]//2018年全国声学大会论文集A. 物理声学(含声超构材料).2018:2.

(上接第52页)

- [12] 胡世同,邱子桢,陈勇,等. 基于多物理场耦合永磁同步电机边带电磁噪声分析[J]. 噪声与振动控制,2021,41(6):155-159.
- [13] 于立,吴咏梅,孙林楠,等. 航空并列式混合励磁无刷直流发电机短路特性研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(14):4994-5003.
- [14] 林楠,王东,魏锟,等. 高速混合励磁发电机的结构及调压性能[J]. 电工技术学报,2016,31(7):19-25.
- [15] 吕智勇,王东,林楠,等. 高速交错磁极混合励磁发电机直流侧短路电流分析计算[J]. 电工技术学报,2020,35(11):2396-2405.
- [16] FAN Y, QU G Y, TAN C. Design and analysis of a new five-phase dual-stator consequent-pole brushless hybrid excitation machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(1): 1-10.
- [17] 樊英,郭占川,高大威,等. 电动汽车用混合励磁电机交流励磁对振动特性的影响[J]. 汽车安全与节能学报,2018,9(4):469-476.
- [18] 苏武,王东,魏锟,等. 交错磁极混合励磁同步发电机径向电磁力波分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(24): 7869-7879+8224.
- [19] 艾春洋,蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机电磁力的有限元计算[J]. 电机与控制应用,2021,48(3): 49-54.
- [20] 赵国新,张宇,葛红岩,等. 偏心磁极永磁电机气隙磁密解析计算方法研究[J]. 电机与控制学报,2020,24(6): 25-31.
- [21] 何志瞧,麻建中,杨敏,等. 改进型偏心磁极对表贴式永磁电机性能影响研究[J]. 微电机,2021,54(10):39-43.
- [22] ZARKO D, BAN D, LIPO T A. Analytical solution for electromagnetic torque in surface permanent magnet motors using conformal mapping[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7): 2943-2954.
- [23] ZARKO D, BAN D, LIPO T A. Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air gap permeance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1828-1837.