

局域共振声学超材料耦合效应研究

项兴华¹, 雷怡俊¹, 胡志明¹, 刘金涛²

(1. 国网浙江省电力有限公司丽水水力发电厂, 浙江 丽水 323000;

2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对传统的声学超材料存在降噪频率窄、造价成本过高、实现难度大等诸多问题,提出一种带柔性薄膜结构的 Helmholtz 共振腔声学超材料结构,以局域共振耦合效应现象为出发点,推导出 Helmholtz 共振腔和柔性薄膜的数学模型。运用 COMSOL Multiphysics 软件对模型进行仿真分析,研究表明,该结构产生了 2 个局域共振峰值。为了实现对声学超材料消声频带的控制,向薄膜内注入液体。实验测试表明,当注液量从 0 增至 35 mL 时,薄膜峰值处的共振频率从 612 Hz 偏移至 446 Hz,偏移量为 166 Hz。所设计的局域共振声学超材料在频带范围内对低频噪声具有良好的控制效果,为声学超材料的设计提供了一种方法。

关键词:局域共振;声学超材料;噪声;Helmholtz 共振腔

中图分类号:V216.5⁺4;TN704 **文献标识码:**A

Coupling Effect of Local Resonance in Acoustic Metamaterials

XIANG Xinghua¹, LEI Yijun¹, HU Zhiming¹, LIU Jintao²

(1. Jinshuitan Hydroelectric Power Plant of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China;

2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Traditional acoustic metamaterials face issues including narrow noise reduction frequency range, high cost, and difficulty in implementation. To address these problems, a Helmholtz resonant cavity acoustic metamaterial structure with a flexible thin film is proposed. Starting from the phenomenon of local resonance coupling effects, mathematical models of the Helmholtz resonant cavity and the flexible thin film are derived. These models are simulated and analyzed using COMSOL Multiphysics software. The results show that the structure produces two local resonance peaks. To achieve control over the noise reduction frequency band of the acoustic metamaterial, liquid is injected into the thin film. Experimental results show that when the injection volume increases from 0 to 35 mL, the resonance frequency of the thin film shifts from 612 Hz to 446 Hz, resulting in a displacement of 166 Hz. The designed local resonance acoustic metamaterial effectively controls low-frequency noise within the specified frequency band, providing a novel approach for the design of acoustic metamaterials.

Key words: local resonance; acoustic metamaterials; noise; Helmholtz resonant cavity

0 引言

噪声的控制^[1-5],尤其是对低频噪声进行控制与研究近年来不断被提上议程。低频噪声的频率变化范围约为 20~500 Hz。采用传统的降噪减振方法只能实现对中高频噪声的控制^[6-7]。由于低频噪声具有不易衰减、传播距离远、穿透能力强等特点^[8],传统的降噪方法不能对其实现较好的控制^[9],所以,需要采用一些新型的材料以有效地控制低频

噪声。

声学超材料不同结构之间存在差异,相互组合后能有效地控制低频噪声,有着较广泛的应用。声学超材料是一种具备周期性的复合结构材料,在达到亚波长结构尺寸时,结构内会产生局域共振,并使弹性波(声波)受到抑制,出现负等效特性^[10-11]。在声学超材料的发展过程中,薄膜型声学超材料因质量小、降噪效率高而逐步成为重点研究方向。局

收稿日期:2024-04-15

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目“具有降低水路管道结露功能并具有节能降耗效果的复合涂层体系的开发与应用”(JYJO-2023-013)

作者简介:项兴华(1975-),男,浙江省遂昌县人,硕士,高级工程师。

域共振型声子晶体以及声学超材料逐渐受到关注,且该领域的相关研究发现:局域共振型结构构造具备显著的弹性波带隙特点,在其带隙频率范围内能明显抑制结构振动^[12-13]。

当前的研究主要关注如何拓宽声学超材料的带隙范围,以及如何在更低频段取得更好的衰减声波或振动。2018年,刘一鸣等^[14]使用小试件模型分析了附加“弹簧-质量”局域共振结构对复合板结构隔声性能的影响,验证了局域共振结构可显著增加复合结构在“弹簧-质量”固有频率处的隔声量。2013年,张思文等^[15]提出了一种新型局域共振复合单元声子晶体结构,并联合有限元分析方法对结构的带隙机理及低频共振带隙特性进行了分析研究。共振带隙产生的频率位置由所对应的局域共振模态的固有频率决定,并且带隙宽度与局域共振模态的品质因子及其与基体之间的耦合作用强度有一定关联。2018年,温卓群等^[16]提出了基于局域共振原理的力学超材料结构,并使用该材料设计了一种新型的中低频被动减振结构,通过改变超材料单元结构可有效调控减振带隙的位置与带宽。

综上所述,声学超材料由于具有独特的频带结构、双负参数等区别于其他常规材料的性质,从而能够抑制噪声的传播,为宽频声波的控制提供了新方向。但现有的声学超材料在噪声控制过程中仍存在以下不足:对于弹簧质量系统的研究大部分采用近似处理与模型理想化,具有一定的局限性;使用单一的局域共振效应,未将消声频带进行拓宽,限制了声学超材料的应用。因此,本文对 Helmholtz 共振效应与弹簧质量系统共振效应进行声学消声分析与研究并进行解耦,为声学超材料宽频降噪提供了一种方法。

1 声学超材料结构模型

图1为提出的局域共振声学超材料结构。在传统 Helmholtz 共振器的基础上,将柔性薄膜置于圆柱型 Helmholtz 腔,将空腔分割开。一方面声压从管道入口处进入,穿过共振腔的颈部进入腔体,在结构尺寸远小于声波的波长时,将共振腔等效为集中参数系统。Helmholtz 腔颈部呈活塞运动的空气柱,等效于机械系统中的质量块,空腔内的空气等效于机械系统中的弹簧。当噪声进入的声波频率

与 Helmholtz 腔的共振频率一致时,与 Helmholtz 共振腔发生共振,空气柱发生剧烈活塞运动,与壁面摩擦生热,将声能转换为热能,消耗了能量,达到噪声抑制的目的;另一方面, Helmholtz 共振系统可以等效为一个弹簧质量系统,颈部的空气质量等效为质量块,腔体内的空气等效成空气弹簧,柔性薄膜的集中质量等效为质心处的质量块,在柔性薄膜的应力发生变化时形成等效弹簧,导致柔性薄膜的固有频率发生变化,在声波传播下产生振动,当噪声频率与柔性薄膜的固有频率相同时产生共振效应,达到消声的目的。这两种结构构成局域共振耦合效应,两者结合能够扩大噪声控制的频率范围。

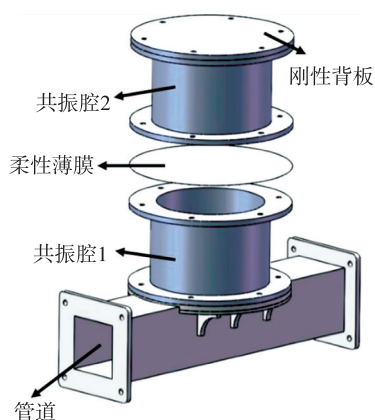


图1 局域共振声学超材料结构

1.1 Helmholtz 共振腔数学模型

声波在 Helmholtz 腔内的传播会受其抑制,传播过程如图2所示。当入射波 p_i 入射到腔内时,将产生反射波 p_r 、透射波 p_t 和入射波 p_b 。

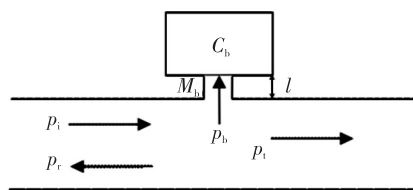


图2 Helmholtz 型共振器声波传播示意图

空腔中的声压大小与质点的速度有关,有:

$$v_i = \frac{p_i}{\rho_0 c_0} \quad (1)$$

$$v_r = \frac{p_r}{\rho_0 c_0} \quad (2)$$

$$v_b = \frac{p_b}{S_b Z_b} \quad (3)$$

式中: S_b 为 Helmholtz 腔的小孔截面积; Z_b 为声阻

抗,且有 $Z_b = R_b + jX_b$ 。根据声压与体积速度的连续条件^[17]可得:

$$p_i + p_r = p_t = p_b \quad (4)$$

$$U_i + U_r = U_t + U_b \quad (5)$$

联立式(1)-(5)可得:

$$\frac{sp_i}{\rho_0 c_0} - \frac{sp_r}{\rho_0 c_0} = \frac{sp_t}{\rho_0 c_0} + \frac{p_b}{Z_b} \quad (6)$$

声强透射系数 t_1 为

$$t_1 = \frac{1}{1 + \frac{(\rho_0 c_0)^2}{4S^2 \left(\omega M_b - \frac{1}{\omega C_b} \right)^2}} \quad (7)$$

式中: M_b 为声质量,且有 $M_b = l\rho_0/S_b$, l 为短管长度; $C_b = V_b/\rho_0 c_0^2$ 为声容, V_b 为 Helmholtz 腔体积。

当 $f^2 = 1/(4\pi^2 M_b C_b)$ 时,透射系数为 0。由此可知,声质量与声容会影响结构的透射系数,即结构的几何尺寸会影响透射系数,得到 Helmholtz 腔的共振频率:

$$f = \frac{C}{2\pi\sqrt{l_c V}} \quad (8)$$

式中: C 为声速; V 为共振腔的体积。

1.2 薄膜结构振动方程

由于采用的柔性薄膜较薄,为简化研究过程,假设膜沿厚度方向的应力大小始终无变化,此时,薄膜的振动问题能简化为平面问题,薄膜的振动方程^[18]:

$$\frac{EK^2}{\rho(1-\nu^2)} \nabla^4 \eta + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

式中: η 为任意一点垂直于板中心面上的位移; K 为截面回转半径,且满足 $K = \frac{h}{\sqrt{12}}$; h 为薄膜厚度; ν 为泊松比。

采用分离变量法并使用边界条件,把薄膜的四周固定,当半径为 a 时,得到:

$$AJ_0(ka) + BI_0(ka) = 0 \quad (10)$$

$$-AJ_1(ka) + BI_1(ka) = 0 \quad (11)$$

式中 $I_1(ka)$ 为一阶柱贝塞尔函数。进而推导出薄膜振动频率为

$$f_n = \frac{\mu_n^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad (12)$$

由式(12)可知,薄膜的振动频率不仅与材料特性相关,还与薄膜的厚度、半径有关。

2 声学性能有限元仿真分析

2.1 有限元模型的建立

图 3 为建立的超材料空气模型。该结构的设计尺寸为管道口 $R = 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 长度 $L = 290 \text{ mm}$, Helmholtz 腔高 $H = 100 \text{ mm}$, 颈部半径 $r_1 = 4 \text{ mm}$, 高 $h = 6 \text{ mm}$, 柔性薄膜半径 $r_2 = 50 \text{ mm}$, 厚为 1 mm 。利用 COMSOL Multiphysics 5.3a 软件对声学超材料进行仿真。进行参数化扫描时,设定参数 $k = 0 \sim 3$, 对覆盖不可约布里渊区边缘的波数进行扫描,计算声子晶体的频率响应,利用软件中的声固耦合物理场模块求解结构的传递损失。材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 E/Pa	泊松比 ν
Helmholtz 腔	19 000	3×10^9	0.393
柔性薄膜	980	2×10^5	0.490

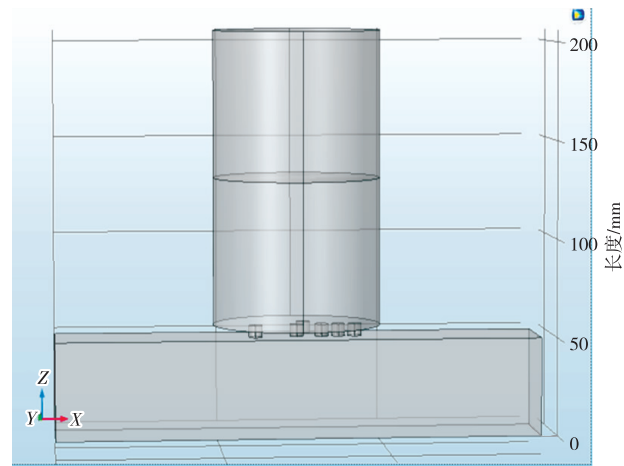


图 3 声学超材料有限元模型

2.2 仿真结果与分析

图 4 为声学超材料的带隙图。图中共有 2 个带隙。220 ~ 340 Hz 频率区间内产生声禁带,为 Helmholtz 腔共振带隙,当噪声从管道经过颈部进入 Helmholtz 腔的声波频率与 Helmholtz 腔的共振频率一致时,声能转化为热能,达到降噪的目的。460 ~ 610 Hz 频率区间内产生声禁带,为柔性薄膜带隙,属于 Bragg 带隙,只有存在周期性结构时,才会产生 Bragg 带隙。噪声在 Helmholtz 腔与入射波、反射波和透射波之间存在相互耦合作用,使结构在周期性的频域内发生变化,从而影响该频率噪声的传递,产生声禁带。当噪声继续传播并经过柔

性薄膜,噪声频率与柔性薄膜的固有频率相同时产生共振效应。在上述2个频率区间内,声学超材料可以抑制声波的传播。

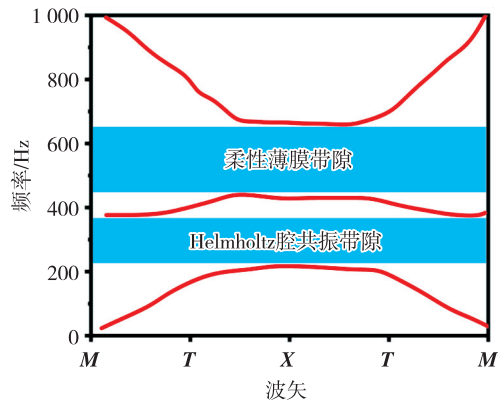


图4 带隙图

图5为200 Hz声压分布图,由图可看出,管道入口处声压较高。当噪声从颈部传递到Helmholtz腔内时,由于当前噪声频率与Helmholtz腔的共振频率一致,Helmholtz腔发生共振,此时腔内声压达到最大,声能转化为热能,与腔壁发生碰撞,达到了消声的目的。噪声经过颈部流向出口,此时出口处的声压降低约45 dB,消声完成。因此,当频率为200 Hz时,Helmholtz腔起到消声作用,验证了模型的正确性。

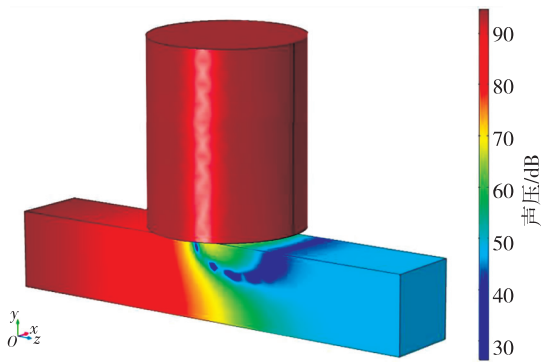


图5 200 Hz声压分布图

图6为声学超材料的传递损失图。图中存在2个明显的传递损失峰值,分别为195 Hz和610 Hz。根据图4、5可以判定195 Hz为Helmholtz腔的共振峰值,610 Hz为柔性薄膜的共振峰值,2个峰值协同强化。同时对2个频率范围内的噪声进行降噪,扩大了噪声控制的频率范围,实现了局域共振消声耦合效应。传递损失幅值达到33 dB和22 dB,可以进行较大幅值的降噪,验证了模型的正确性。

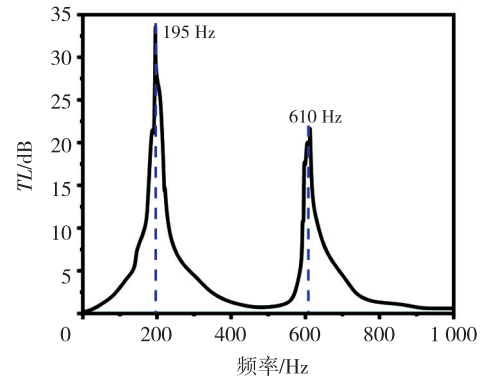


图6 声学超材料传递损失图

3 声学性能测试

图7为搭建的声学性能测试平台,采用双负载法进行声学超材料性能测试。计算机发出的不同频率的噪声信号从扬声器进入声学管道,经过颈部进入所设计的声学超材料内部,经降噪后的噪声再从颈部流出声学管道。利用采集卡采集噪声特征,采样频率为10 kHz。通过传声器收集噪声信号。经过信号转换得到声学超材料的传递损失曲线,如图8所示。为了拓宽噪声控制的频带,采用在柔性薄膜上注液的方式进行声学性能测试。

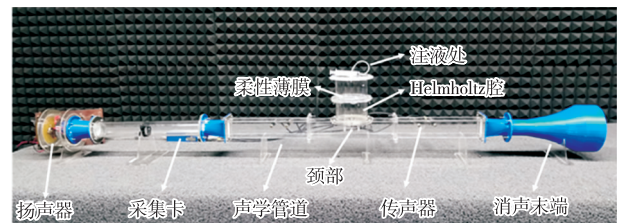


图7 声学性能测试平台

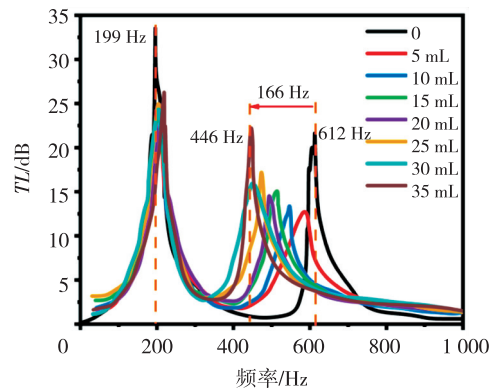


图8 传递损失曲线

由图8可看出,当注液量为0时,在199 Hz和612 Hz处出现2个传递损失峰值。在峰值处对噪声固定频率进行消声能够达到较好的消声效果,与仿真结果一致。其中199 Hz为Helmholtz腔的共

振频率,612 Hz 为柔性薄膜的共振频率。当噪声频率与两者共振频率相同时,声能转化为热能,从而消除噪声。随着注液量从 0 增加到 35 mL,柔性薄膜峰值处的共振频率从 612 Hz 偏移到 446 Hz,频率偏移量为 166 Hz,而 Helmholtz 腔峰值处的共振频率基本保持在 200 Hz 左右。这主要是因为 Helmholtz 腔体的体积不随注液量的增加发生改变,但是柔性薄膜的弹性系数会随着注液量的增加发生变化,薄膜的厚度变薄,等效半径变大,其弹簧-质量系统的共振频率发生变化,进而导致频率的偏移。由于上述过程中柔性薄膜的变化发生在整个腔体内,腔体总体积并未发生变化,故而 Helmholtz 腔系统的共振频率无变化,199 Hz 处的第一个传递损失峰值并不会发生偏移。将实验材料的规格参数和几何参数代入式(8)、(12),分别求得共振频率 $f_1=183$ Hz, $f_2=625$ Hz,计算出的理论峰值频率与实验所得峰值频率基本相近,在误差允许范围内,证明了所推导理论的正确性与合理性。

4 结束语

本文设计了一种局域共振声学超材料结构,在其结构模型的基础上建立了该系统的数学模型,分别推导了 Helmholtz 腔和柔性薄膜的共振频率。使用有限元软件建立声学超材料结构模型进行仿真分析,得出 220~340 Hz 为 Helmholtz 腔共振带隙,460~610 Hz 为柔性薄膜带隙,且该结构在 195 Hz 和 610 Hz 处产生传递损失峰值。进行声学性能测试,通过注液改变柔性薄膜的弹性系数以控制固有频率,注液量从 0 增加到 35 mL 时,柔性薄膜峰值处的共振频率从 612 Hz 偏移到了 446 Hz,频率偏移量为 166 Hz,实现了宽频降噪。与现有的声学超材料结构相比,增强了对低频声波传递过程的操控能力,拓宽了低频噪声的消声范围,抑制了噪声频带,为声学工程中低频噪声控制困难的问题提供了一种新的解决方案。

参考文献:

- [1] LAI Y, WU Y, SHENG P, et al. Hybrid elastic solids [J]. *Nature Materials*, 2011, 10: 620-624.
- [2] 宋春生, 杨琪, 贾博, 等. 圆柱空腔橡胶层局域共振声子晶体双层板减振特性分析[J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(1): 15-21.
- [3] 孙维鹏, 沈名钊, 钟可欣, 等. 双侧亥姆霍兹声学超材料带隙特性[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(23): 144-150.
- [4] 吴健, 白晓春, 肖勇, 等. 一种多频局域共振型声子晶体板的低频带隙与减振特性[J]. *物理学报*, 2016, 65: 064602.
- [5] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 双局域共振效应声学超材料消声性能[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(1): 52-59.
- [6] 梅军, 马冠聪, 杨旻, 等. 暗声学超材料研究[J]. *物理*, 2012, 41(7): 425-433.
- [7] 李建宝, 汪越胜, 张传增. 二维声子晶体微腔能带结构的有限元分析与设计[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(3): 649-655.
- [8] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(5): 054301.
- [9] 姜久龙, 姚宏, 杜军, 等. 双开口 Helmholtz 局域共振周期结构低频带隙特性研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(6): 064301.
- [10] 祁鹏山, 杜军, 姜久龙, 等. 双局域共振机制声子晶体带隙特性研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(10): 144-147.
- [11] 李锁斌, 窦益华, 陈天宁, 等. 局域共振型周期结构振动带隙形成机理[J]. *西安交通大学学报*, 2019(6): 1-8.
- [12] 柯满竹, 邱春印, 彭莎莎, 等. 声学超构材料[J]. *物理*, 2012, 41(10): 663-668.
- [13] AO X Y, CHAN C T. Complex band structures and effective medium descriptions of periodic acoustic composite systems [J]. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2009, 80(23): 308-310.
- [14] 刘一鸣, 闫森森, 靳国永, 等. 基于有限元法的局域共振复合板隔声特性研究[C]//兰州: 2018 中国西部声学学术交流会议论文集, 2018: 4.
- [15] 张思文, 吴九汇. 局域共振复合单元声子晶体结构的低频带隙特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 305-313.
- [16] 温卓群, 王鹏飞, 张雁, 等. 面向大尺度结构的力学超材料减振技术[J]. *航空学报*, 2018, 39(增 1): 155-159.
- [17] 吕海峰, 王普浩, 叶俊杰, 等. 局域共振型声学超材料及其噪声控制[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(7): 1369-1375.
- [18] 张晓光. 双局域共振声学超材料声学性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.