

迷宫式声学超材料降噪分析

王帅杰¹, 徐传燕^{1*}, 黄显利¹, 李永生², 邢其森¹, 刘永利¹, 刘润达¹

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东省高速养护集团有限公司, 山东 济南 250032

摘要:为解决传统降噪系统效率低、设计复杂、噪声控制效果不稳定等问题,基于声学超材料设计一种迷宫式超材料结构,采用 COMSOL 软件仿真分析迷宫式声学超材料对声波传播方向及不同频率声波的影响,通过试验验证超材料个数对噪声声压级的影响。仿真结果表明:迷宫式声学超材料改变声波的传播方向,形成异常反射以降低噪声声压级;超材料厚度与声波频率有关,可针对不同频率的噪声设计超材料结构,实现精准降噪。试验结果表明:声波频率为 2 kHz 时,采用迷宫式声学超材料可使声压级均方根从 83.47 dB 降至 74.85 dB,噪声明显降低;随着超材料个数增加,声压级均方根持续降低,降噪效果越好,但超材料个数过多导致整体结构质量增大,建议实际应用时选择一组(2 个)或两组(4 个)超材料,此时降噪效果较佳。

关键词:声学超材料;噪声控制;异常反射;声压级均方根

中图分类号:U462

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0058-06

引用格式:王帅杰,徐传燕,黄显利,等. 迷宫式声学超材料降噪分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(4):58-63.

WANG Shuaijie, XU Chuanyan, HUANG Xianli, et al. Noise reduction analysis of a maze-type acoustic metamaterial[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4):58-63.

0 引言

运输车辆空调噪声主要由鼓风机、冷凝机、管道、出风口等部件产生,若噪声过高,影响驾乘的舒适性,甚至影响消费者购买意愿。传统车内降噪方法存在一定的局限性,需要在车内安置体积大、制作工艺要求高、结构复杂、经济性差的吸声材料,且吸声性能有限,降噪效果不可控,容易受温度、湿度影响,难以在不改变汽车结构的条件下有效控制空调噪声^[1]。为了降低运输车辆空调噪声,为驾乘人员提供安静的行驶环境,各大车企、航空、造船等领域相关生产厂家与空调供应商投入了大量资源开展空调系统的研发。

近年来,声学领域超材料受到了广泛关注,声学超材料为人工设计的一种复合结构,具有声体结构小、降噪频率可控的特点^[2],通过精密的微观结构(如迷宫式)设计,声学超材料表现出传统材料无法实现的声学特性,例如等效负质量密度或负弹性模量、负反射、负折射等现象,这些特性结束了传统噪声控制方法中依赖不匹配阻抗或黏性损耗控制噪声的方法,为车辆空调降噪提供了新的研究方法。李炎^[3]设计了一种可调声子晶体,实现声学结构几何变形与材料的非线性协同,降低了噪声;Seo 等^[4]采用串联和并联两种形式阵列研究管道中的亥姆霍兹共振腔,发现利用等效阻抗分析方法,管道降噪效果明显;Back

收稿日期:2025-06-20

基金项目:高端外国专家引进计划项目(G2023023002L);山东省自然科学基金项目(ZR2020ME126);山东省科技型中小企业提升计划项目(2023TSGC0288);山东省高校青年创新科技计划项目(2021KJ039)

第一作者简介:王帅杰(2000—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:1253629936@qq.com。

***通信作者简介:**徐传燕(1981—),女,山东临沂人,教授,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:xcy@sdjtu.edu.com。

等^[5]开发设计了基于主动电气控制系统的降噪方法,该方法可主动调整暖通空调声波的幅度和相位,具有直接重构声学频谱的优势;Yang等^[6]研究一种局域共振型声子晶体时发现,在某些频率可实现等效质量密度,首次提出了“局域共振型声学超材料”概念;张海龙^[7]提出了基于声子晶体带隙的宽带声屏障、基于 Fano 共振原理的全向声屏障和基于声学超表面的超薄隔声管道,突破传统质量定律,通过声子晶体方向带隙调控声波实现低反射、开放式的声学结构;黄瑞宁^[8]对设计的超材料进行了声学性能仿真和分析,发现采用突破传统“Z”字型的设计结构可明显降低噪声,该研究为低频隔声与声波调控提供了新思路;祝雪丰等^[9]对超材料再声隐身斗篷进行了研究,通过局域共振结构实现等效负模量和负密度,突破传统材料的限制。

现有研究多集中于仿真分析,相关的试验研究较匮乏,本文中基于广义斯涅尔定律^[10]、费马原理^[11]设计具有吸声功能的迷宫式声学超材料,使其通过特殊的声学结构产生异常反射,改变声波传播方向,并对迷宫式声学超材料降噪效果进行试验验证,为该类超材料的工程实际应用提供参考。

1 超材料结构设计

1.1 设计基础

传统声波材料传播过程中,入射角等于反射角,声波按固定路径传播。对于声学超材料,当入射波入射到一个任意设计的具有突变相位的超材料表面时,声波传播不再遵循入射角等于反射角的规律,而是形成了异常反射现象。

由于不同设计结构对声音产生不同的反射,因而可根据不同的降噪需求设计反射平面结构,改变声波反射与折射方向,实现对车辆噪声抑制。

声波波长^[12]

$$\lambda = c/f, \quad (1)$$

式中: c 为在声波空气中的传播速度, $c=340$ m/s; f 为声波频率,Hz。

波相位

$$\theta = k_0 n r = 2\pi n r / \lambda, \quad (2)$$

式中: k_0 为空气中的波数, n 为超材料中介质的折射系数, r 为声波在超材料中的几何行程。

超材料相位的计算式^[13]为:

$$\varphi(x) = (0.016x^2 - 0.338x + 2.192)\pi, \quad (3)$$

式中: x 为以 cm 为单位的超材料相位与超材料的距离的数值。

斯涅尔反射定律指在一个介质中当一束声波以一个角度射到另一个平面时,这个声波再以相同的角度反射回这个介质。当反射平面与入射平面不共面时,入射角与反射角满足广义斯涅耳定律和费马原理,即:

$$\sin \theta_r = \sin \theta_i + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad (4)$$

式中: θ_r 为声波到某一平面处的反射角, $^\circ$; θ_i 为声波到某一平面处的入射角, $^\circ$; $d\varphi(x)/dx$ 为表面引入的梯度波相位分布。

1.2 结构设计

本文中设计的超材料由 8 个独立空腔组成,空气充满整个空腔,在空腔外边缘流动。入射波进入管道,通过折射和反射使入射波相位延迟,导致反射波角度发生偏转。声学超材料厚度与噪声频域有关,超材料厚度 $h=0.128\lambda$ 。由于高频对结构要求小,为方便试验验证,本文中仿真和试验选取的噪声频率 $f=2$ kHz,声波为平面波。

根据式(4)设计的超材料结构参数如图 1 所示。由图 1 可知:设计的超材料长度为 8.00 cm,厚度为 2.18 cm,超材料拉伸后实体结构如图 2 所示。

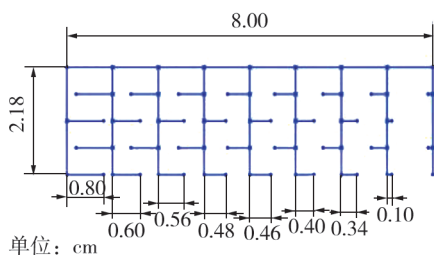


图1 超材料结构参数

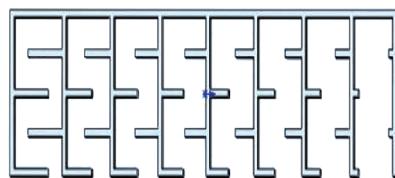


图2 超材料结构实体图

2 迷宫式声学超材料仿真分析

本文中采用尺寸为 $1.0\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的方管模拟管道,利用 SolidWorks 软件构建迷宫式声学超材料与方形实体结构结合的复合模型,结合声学理论进行噪声频率特性分析。

为实现复杂结构建模,通过几何剖分获取声学超材料与方管连接面的关键截面构型,该建模方法可保留关键声学特征,降低计算复杂度,同时确保边界条件准确;在建模过程中,设置边界条件为模拟无限周期结构,通过调整几何参数实现平面波入射角的精确控制,为后续频域分析提供可靠的理论模型。建立的二维模型如图 3 所示,边界设置为:初始频率 $f_0=0$,声速 $c=340\text{ m/s}$,最大频率 $f_{\max}=5\text{ kHz}$,波长 $\lambda_a=c/f_{\max}$,网格最大尺寸为 $\lambda_a/5$,密度为 1.21 kg/m^3 。



图3 二维模型

为保证建模准确,提高模型计算效率,并为后续分析传递损失提供可靠的离散化基础,采用以下优化措施:1)基于声学压力模块,引入硬边界条件约束方管,进行稳态仿真;2)硬声场边界为超材料声场边界,结合边界设置匹配平面波入射激励和端口;3)通过平面波传播特性构建入射压力场,使压力场相位延迟与迷宫式声学超材料的折射、反射相位梯度形成耦合共振效应,实现无限周期结构;4)在方管实施映射,利用映射正交性划分方管网格;5)针对迷宫式超材料的复杂结构特征,通过网格独立性验证确定自由三角网格为最优方案。方管及超材料的网格质量满足声学传播模拟精度要求,方管映射及超材料网格分别如图 4、5 所示。

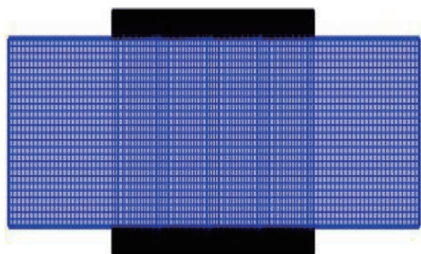


图4 方管映射



图5 超材料网格

超材料改变入射波和反射波的传播方向,形成异常反射,上边界的异常反射使得入射波传播方向角度改变约 $\pi/2$,进入下边界,下边界的异常反射使得反射波传播方向角度改变约 $\pi/2$,使入射波噪声尽可能按照原路径返回并不会传出,降低入射波产生的噪声。超材料传播方向示意图 6 所示。

放置超材料与不放置超材料时方管声压变化如图 7 所示。由图 7 可知:对于放置超材料的方管,入射平面波经超材料后,传播方向发生改变,

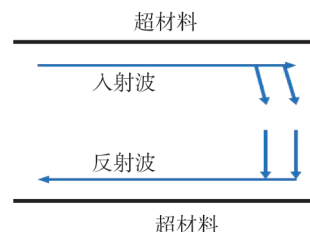


图6 传播方向示意

噪声降低;对于未放置超材料的方管中,平面波经超材料后传播方向未发生改变,噪声未降低。

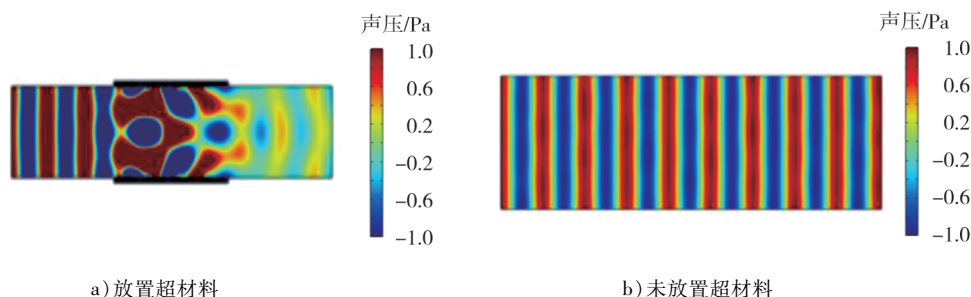


图7 放置与不放置超材料时方管声压变化

采用超材料在声波频率分别为0、1 000、2 000、3 000 Hz时,进行有限元仿真模拟,声压与声波发出距离的关系曲线如图8所示。采用COMSOL软件计算传递因数(输出声波声压均方根与输入声波声压均方根的比),评价降噪效果,结果如图9所示。

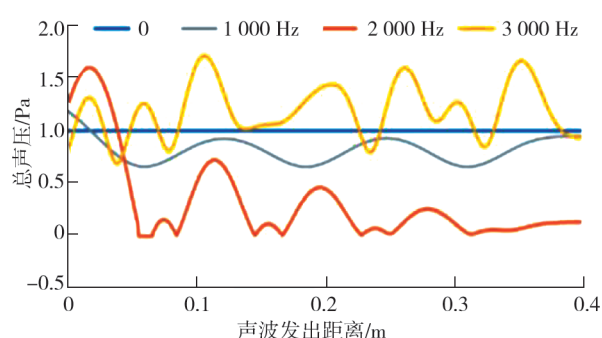


图8 总声压与声波发出距离的关系曲线

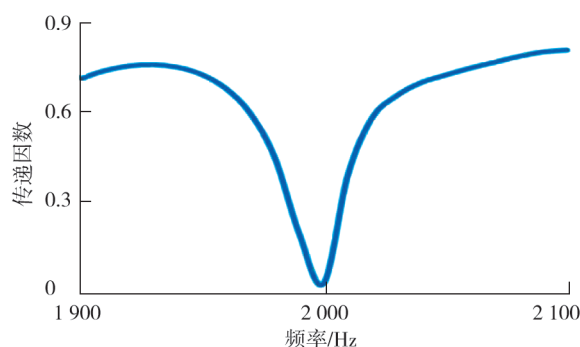


图9 传递因数与频率的关系曲线

由图8可知:声波频率为0时,声压并未发生改变,为1 Pa;声波频率为2 000 Hz时,在超材料的作用下,声压减小,逐渐降低到约为0 Pa;在声波频率为1 000、3 000 Hz时,声压基本没有变化,约为1 Pa。

由图9可知:当输入声波频率接近超材料局域共振频率(2 000 Hz)时,传递因数表现出显著的衰减特性。仿真结果表明超材料在声波频率为2 000 Hz时,降噪效果最好,说明了超材料可实现对特定频率的精准降噪。

3 试验验证

为了验证声学超材料的降噪效果,进行噪声声压级试验。试验选择开放式环境,试验设备包括LMS SCADAS信号采集器、PCB传声器、倍思蓝牙音箱、聚氯乙烯方管。信号采集系统分析试验数据,传声器收集试验数据,音箱播放特定频率声音,聚氯乙烯方管模拟管道。

在方管一端放置音箱,模拟声源,另一端放置传声器、信号采集系统;将声源与传声器轴线对齐,可有效降低近场反射干扰;理论分析表明超材料的降噪效果与结构参数显著相关^[13]。为分析不同数量的超材料对试验结果的影响,在方管中间位置选择放置一组(2个)、两组(4个)、三组(6个)超材料及不放置超材料进行噪声声压级(以A计权)对比,声压级对比结果如图10所示。

由图10可知:超材料个数分别为0、2、4、6时,频率为2 000 Hz的声波对应的声压级分别为82.41、73.80、68.65、65.44 dB,声压级均方根分别为83.47、78.21、75.42、74.85 dB;超材料的层数与布局均对降噪有一定的影响,超材料数越多,声压级均方根不断降低,降噪效果越好,原因为超材料个数增加,引发多重反射干涉,可使特定频段降噪效果明显。但超材料数过多会导致结构质量增大,建议工程中应用一

组(2个)或两组(4个)超材料。

在不改变原降噪系统结构的前提下,加装体积较小的紧凑型迷宫式声学超材料可降低精准频率下的声波噪声,该方法对降低汽车空调、鼓风机等噪声有一定的参考价值。

4 结论

1) 迷宫式声学超材料可在不显著增加声学材料结构体积的前提下,改变传统声学传播路径,采用异常反射改变入射波和反射波的传播方向,使声音沿着原路径传播,实现对噪声的抑制。

2) 声学超材料厚度与噪声频率有关,可根据噪声频率实现精准降噪;声学超材料的个数越多,降噪效果越好,但超材料数过多会导致整体结构质量增大,建议工程中应用一组(2个)或两组(4个)超材料。

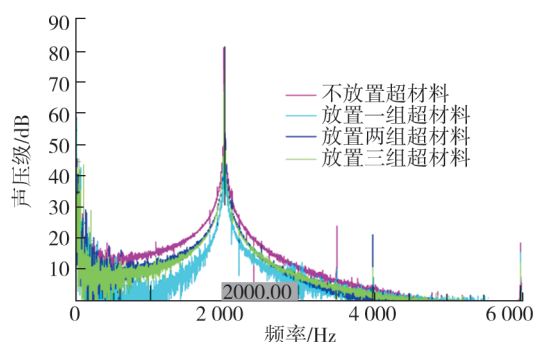


图10 不同超材料个数声压级对比

参考文献:

- [1] 张海龙,朱一凡,梁彬,等. 基于相位调制的隔声管道[C]//中国声学学会. 2016年全国声学学术会议论文集. 武汉:中国声学学会,2016:68-69.
- [2] 丁玥文,苗志军,司泽宇,等. 声透镜指向性换能器研究[J]. 压电与声光,2022,44(3):352-356.
- [3] 李焱. 可控声学超材料/超表面的拓扑优化设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2024.
- [4] SEO S, KIM Y. Silencer design by using array resonators for low-frequency band noise reduction[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(4):2332-2338.
- [5] BACK J, LEE S K, MIN L S, et al. Design and implementation of comfort-quality HVAC sound inside a vehicle cabin[J]. Applied Acoustics, 2021, 177:107940.
- [6] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20):204301.
- [7] 张海龙. 基于声学超材料的声屏障与隔声管道的研究[D]. 南京:南京大学,2018.
- [8] 黄瑞宁. 迷宫型声学超材料设计和声学性能数值仿真分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2024.
- [9] 祝雪丰,梁彬,程建春. 声超常材料与声隐身斗篷[J]. 现代物理知识,2012,24(2):40-46.
- [10] 朱一凡,梁彬,程建春. 广义斯奈尔定律与声超表面[J]. 应用声学,2018,37(1):53-62.
- [11] 张思宇,王伟. 基于费马原理的光学元件成像规律探究[J]. 实验科学与技术,2022,20(6):141-146.
- [12] ZHANG H L, ZHU Y F, LIANG B, et al. Sound insulation in a hollow pipe with subwavelength thickness[J]. Scientific Reports, 2017, 7:44106.
- [13] 梁彬,杨京,张海龙,等. 一种超薄双向声阻隔通道:CN105845122A[P]. 2016-08-10.

Noise reduction analysis of a maze-type acoustic metamaterial

WANG Shuaijie¹, XU Chuanyan^{1*}, HUANG Xianli¹, LI Yongsheng²,
XING Qisen¹, LIU Yongli¹, LIU Runda¹

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong High Speed Maintenance Group Co., Ltd., Jinan 250032, China

Abstract: To solve the problems of low efficiency, complex design, and unstable noise control in traditional noise reduction systems, a maze-type metamaterial structure is designed based on acoustic metamaterials. The COMSOL software is used to simulate and analyze the influence of the maze-type acoustic metamaterials on the

propagation direction of sound waves and sound waves of different frequencies. The influence of the number of metamaterials on the noise sound pressure is verified through experiments. The simulation results show that the maze-type acoustic metamaterials change the propagation direction of sound waves, forming abnormal reflection to reduce the noise sound pressure; the thickness of the metamaterials is related to the frequency of sound waves, and the metamaterial structure can be designed for different frequency noises, which can achieve precise noise control. The experimental results show that when the sound wave frequency is 2 kHz, using maze-type acoustic metamaterials can reduce the root mean square of sound pressure level from 83.47 dB to 74.85 dB, and the noise is significantly reduced; as the number of metamaterials increases, root mean square of the sound pressure level continues to decrease, and the noise reduction effect is better, but too many metamaterials lead to an increase in the overall mass of the, it is recommended to choose a group (2 pieces) or two groups (4 pieces) when used in practice, and the noise reduction effect of metamaterials is better at time.

Keywords: acoustic metamaterial; noise control; abnormal reflection; root mean square of sound pressure level

(责任编辑:胡晓燕)

.....
(上接第 25 页)

The influence of steel strip spacing on the clamping load of a proton exchange membrane fuel cell stack

LIU Haitao^{1,2}, BAI Shuzhan^{1*}, WU Minghua², YANG Rongchang², XI Fuqiang²

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Guochuang Fuel Cell Technology Innovation Center Co., Ltd., Weifang 261000, China

Abstract: To improve the efficiency, stability, and service life of proton exchange membrane fuel cell stacks, a typical large-scale proton exchange membrane fuel cell stack is taken as the research object. An equivalent stiffness model is used to analyze the magnitude of the clamping load of the stack and its uniform distribution in the stack components. At the same time, the porosity and contact resistance values corresponding to different stack clamping load are calculated. The optimal clamping load values and selection criteria for fuel cell stacks under different steel strip spacing conditions are proposed. The results show that as the spacing between steel strips increases, the corresponding optimal clamping load shows an increasing trend. Taking the spacing between steel strips of 40 mm as an example, the corresponding clamping load of 32.8 kN is optimal, and the clamping load is judged to be within a reasonable range based on the stress standard deviation and strain standard deviation. At this point, the corresponding contact resistance is 5.35 $\mu\Omega$, and the porosity is 0.747.

Keywords: fuel cell; equivalent stiffness model; clamping load; porosity; contact resistance; steel strip spacing

(责任编辑:刘丽君)