

局域共振声学超材料的汽车顶棚减振设计与仿真

孙航¹, 孟祥成², 陈秀锋^{1,*}, 靳昕¹, 韦树龄¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东佳联保险公估有限公司, 烟台 264001)

摘要: 汽车顶棚减振是控制车内噪声危害的主要方式之一, 但传统降噪材料的选用严重影响了降噪效果, 声学超材料以其良好的减振效果为解决车内噪声问题提供了新的思路。设计了一种螺旋声学超材料单胞结构, 确定单胞几何参数及材料参数, 并对单胞模型镜像处理得到共振单元组有限元模型, 仿真模拟证明该共振单元组在 35 Hz 左右达到减振效果。对简化汽车顶棚的有限元模型进行仿真实验, 结果表明设计的声学超材料具有良好减振效果。

关键词: 声学超材料; 局域共振; 减振; 汽车顶棚

中图分类号: U465.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0128-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.016

Design and simulation of local resonance acoustic metamaterial for automotive roof vibration reduction

SUN Hang¹, MENG Xiangcheng², CHEN Xiufeng^{1,*}, JIN Xin¹, WEI Shuling¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Shandong Jialian Insurance Surveyors and Loss Adjusters Co., Ltd., Yantai 264001, China)

Abstract: Automobile roof vibration reduction is one of the main ways to control the harm of automobile interior noise, but the selection of traditional noise reduction materials seriously affects its effectiveness. Acoustic metamaterials provide new ideas for solving the problem of automobile interior noise with their good vibration reduction effect. This paper designs a spiral acoustic metamaterial unit cell structure, determines the geometric and material parameters of the unit cell, and obtains a finite element model of the resonant element group through mirror processing of the unit cell model. Simulation results show that the resonant element group achieves vibration reduction effect at around 35 Hz. Simulation experiments are conducted on the finite element model of the simplified automobile roof, and the results show that the acoustic metamaterial designed in this paper has good vibration reduction effect.

Key words: acoustic metamaterial; local resonance; vibration reduction; automotive roof

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MG058)

作者简介: 孙航(2001—), 男, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为交通系统分析与控制优化。E-mail: 905374949@qq.com。

* 通信作者: 陈秀峰(1977—), 男, 山东济南人。博士, 副教授, 主要从事城市交通控制方面的研究。

E-mail: chenxiufeng@qut.edu.cn。

随着现代社会的快速发展,汽车已成为人们日常生活中不可或缺的交通工具。然而,汽车在行驶过程中产生的噪声和振动,不仅会影响驾乘人员的舒适性,还会对人的身心健康造成潜在的威胁。因此,提高汽车的噪声(Noise)、振动(Vibration)与声振粗糙度(Harshness)性能即汽车的 NVH,降低车内噪声,已成为汽车制造商和研究人员关注的重点。研究表明,全球 1/3 的汽车整车问题与 NVH 相关^[1-3]。高速行驶时,汽车会产生动态噪声,包括车内和车外噪声。车内噪声主要源于发动机运转产生的机械振动以及变速箱工作时的振动,这些振动经底盘、车架和汽车顶棚传递至车身各处,影响车内噪声水平^[4]。车内噪声会对驾驶员和乘客身心健康造成危害,持续处于高噪声环境可能引发乘坐人员不良反应,增加交通事故发生概率^[5]。因此,降低车内噪声来保障驾乘人员安全、健康至关重要。

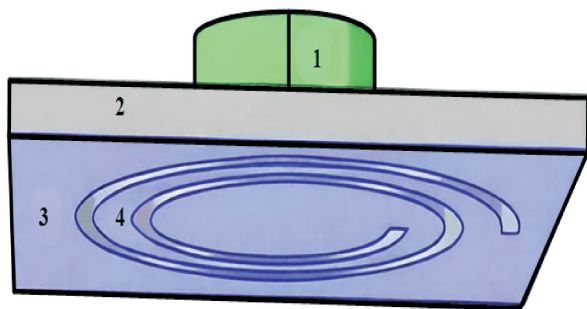
传统的降噪材料在一定程度上能够减少车内噪声,但它们往往存在一些局限性,例如,一些材料的降噪效果在特定频段内不够理想,很可能会增加车辆的质量和成本^[6]。随着声学超材料的发展,其在汽车降噪中的应用日益增多,局域共振型声学超材料为车内噪声控制提供了新思路 and 可能性^[7]。MARASINGHA-ARACHCHIGE 等^[8]提出了用于汽车前围板的声学包装双层结构隔音垫,在总体质量轻 5 kg 的情况下吸声性能更优。SIAVOSHANI 等^[9]针对汽车前围板隔音提出了新型声学超材料结构隔音垫,通过统计能量分析(Statistical Energy Analysis, SEA)计算吸、隔声性能,增加驾驶座位一侧吸声层面密度以提高隔声量。麻乘榕等^[10]针对汽车低频振动问题设计了基于局域共振机理的新型二维声学超材料结构,在低于 100 Hz 频段形成完全带隙,有效抑制了 z 方向振动弯曲波。张吉楠^[11]结合声学超材料带隙特性对发动机噪声进行有效控制,设计了减振降噪的声学超材料单胞结构。可见,设计声学超材料可作为减振降噪手段,提升车辆整体舒适性和降噪性能^[12-13]。

汽车顶棚板壳结构振动是车内中低频噪声的主要成因之一,但相关研究较少,利用声学超材料方法处理这一问题的研究更为罕见。本文的重点是探讨声学超材料的能带结构和振动特征,构建了一个螺旋的声学超材料单元结构,通过有限元模拟方法研究了有限周期排列的声学超材料单元结构的减振效果,并利用仿真验证所开发的声学超材料在汽车顶棚降低噪声方面的效果,通过深入探究声学超材料的减振机理,优化其设计和性能,有望为汽车行业提供更加有效的减振降噪解决方案,提升汽车的 NVH 性能,为驾乘人员创造更加安静、舒适的出行环境。

1 螺旋局域共振单元结构设计

本文将有机玻璃薄板作为声学超材料的基体板,在该基体板上打造出呈周期性排列的局域共振单元。通过在基体板上去除螺旋沟槽制作成螺旋梁,进而构建出有机玻璃薄板型局域共振型声学超材料,有限元模型如图 1 所示,其中,质量块采用铅材料,磁性热熔阻尼层选用黏弹性阻尼材料。

如图 2 所示,螺旋梁与圆柱体质量块可以简化为弹簧-质量块系统。该系统通过改变质量块的大小,以及悬臂梁的宽度等设计变量,调节局域共振单元的共振频率;通过控制磁性热熔阻尼层选用材料的泡孔大小、通孔或闭孔的方式来增加系统的吸声效果,从而增强减振降噪的效果。



1—质量块; 2—基体板; 3—磁性热熔阻尼层; 4—螺旋梁。

图 1 螺旋声学超材料有限元单胞模型

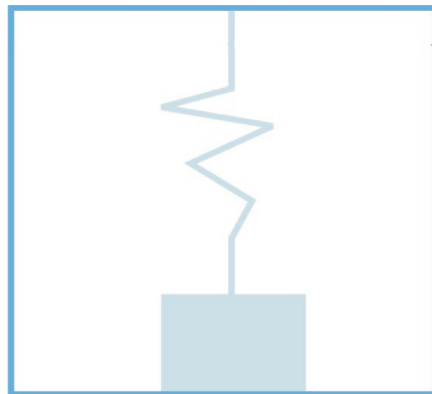


图 2 弹簧质量块简化模型

螺旋声学超材料几何单胞模型见图3,设周期结构的晶格常数为 a ,基板(有机玻璃薄板)厚度为 p ,质量块(圆柱体)半径和高度分别为 r 和 h ,螺旋梁沟槽宽度为 t ,螺旋梁宽度为 w 。螺旋梁曲率半径的控制方程为

$$\rho = \frac{(w+t)\varphi}{2\pi} \quad (1)$$

式中: ρ 为曲率半径; φ 为螺旋梁的总旋转角度。

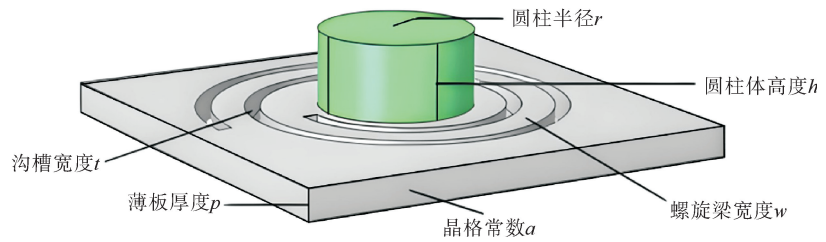


图3 螺旋声学超材料几何单胞模型

2 单胞结构几何参数设计与分析

设基板的质量为 M ,位移为 X ;圆柱体质量块的质量为 m ,位移为 x ;基体受到的激励为 F ,质量块受到的反作用力为 F_1 ,弹簧刚度系数为 k 。由牛顿第二定律和胡克定律可得

$$F - F_1 = (j\omega)^2 MX \quad (2)$$

$$F_1 = (j\omega)^2 mx \quad (3)$$

$$k(X - x) = F_1 \quad (4)$$

则系统等效质量和位移频响函数的表达式为

$$m_e = M + \frac{m\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5)$$

$$H(\omega) = \frac{X}{F} = -\frac{1}{m_e\omega^2} \quad (6)$$

式中: ω 为外部激励的角频率; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为内部弹簧振子的固有角频率; j 为工程领域标准的虚数单位,用于描述频域中振动系统的“幅值-相位”耦合特性; m_e 为系统动态等效质量; $H(\omega)$ 为系统位移频响函数。

随着外部激励角频率的改变,系统等效质量和运动状态的变化情况如表1所示。

表1 激励角频率与动态等效质量之间的相互关系

激励角频率 ω	动态等效质量 m_e	系统运动状态
$\omega = 0$	$m_e = M + m$	同步运动
$0 < \omega < \omega_0$	$m_e > 0$	同向运动
$\omega \rightarrow \omega_0$	$m_e \rightarrow \infty$	系统振动趋于静止
$\omega_0 < \omega < \omega_0 \sqrt{\frac{M+m}{M}}$	$m_e < 0$	负等效质量,反向运动
$\omega \rightarrow \omega_0 \sqrt{\frac{M+m}{m}}$	$m_e \rightarrow 0$	等效质量趋近于0,系统共振
$\omega > \omega_0 \sqrt{\frac{M+m}{M}}$	$m_e > 0$	同向运动
$\omega \rightarrow \infty$	$m_e \rightarrow M$	趋于静止

由表1可以看出,当 $\omega=0$ 或 $0 < \omega < \omega_0$ 时,系统的运动状态分别为同步、同向运动,且并未出现带隙;当 ω 与局域共振单元的 ω_0 接近时,其动态等效质量 m_e 趋近于无限大,并出现带隙^[14]。通过Comsol软件调控等效模型中 k 和 m 的大小以及局域共振单元的能带结构,得到螺旋声学超材料单胞模型和低频带隙频段,如图4、图5所示。

由图 5 单胞的带隙频段分布示意可知,解 1—解 3 为连续低频能带,对应单胞整体的刚性振动模式,如基板与质量块的同步平动,该频段内弹性波可自由传播,无减振效果;频率范围约 25~38 Hz 时为局域共振带隙,此频段内弹性波被局域共振单元阻隔,无法在超材料中传播,是减振作用的核心频段;带隙上方的高频能带,解 4—解 6 对应单胞的高阶振动模式,如螺旋梁的扭转振动,该频段弹性波虽可传播,但振动能量集中于局部结构,对汽车顶棚整体振动影响较小。

最终确定单胞的几何参数为:晶格常数 $a = 30$ mm,基板厚度 $p = 1$ mm,螺旋梁宽度 $w = 4$ mm,螺旋槽宽度 $t = 1$ mm,螺旋梁旋转角度 $\varphi = 2\pi$ (起始)、 5.75π (终止),圆柱体质量块半径 $r = 5$ mm、高度 $h = 8$ mm,磁性热熔阻尼层 0.01 mm。单胞的基板材料参数为密度 1142 kg/m^3 ,弹性模量 2 GPa,泊松比 0.389;铅材料参数为密度 11600 kg/m^3 ,弹性模量 40.8 GPa,泊松比 0.369;黏弹性阻尼材料参数为密度 1140 kg/m^3 ,弹性模量 0.06 GPa,泊松比 0.49。

图 6 为单胞一阶振型,可以观察到振动弹性波在局域共振单元内的局限性,这种特性使得振动能量有效地被吸收和阻隔,从而提升了减振效果。这一现象通常与局域共振机制密切相关。该局域共振单元的一阶固有频率为 33.477 Hz,位于带隙频段内,从而验证了动态等效参数分析的正确性。

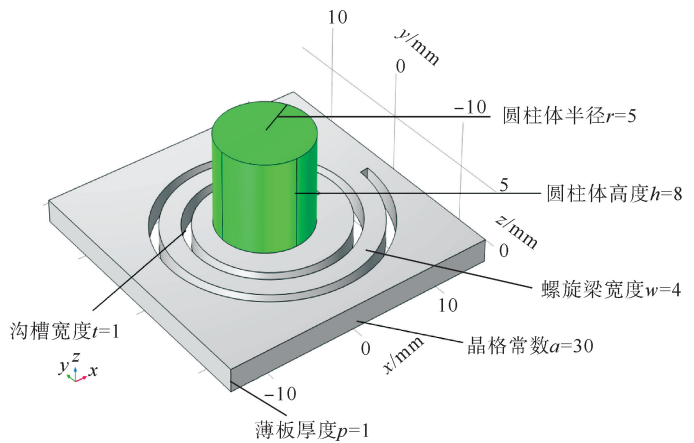


图 4 单胞模型

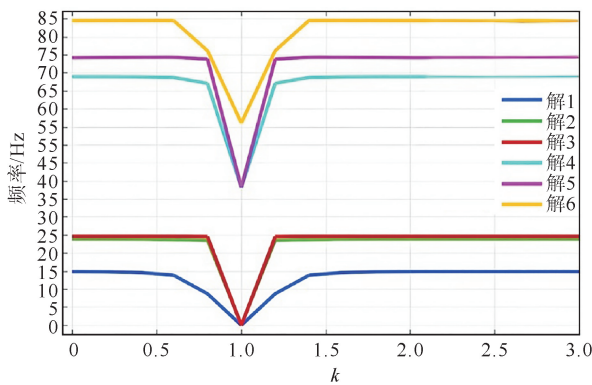


图 5 带隙频段

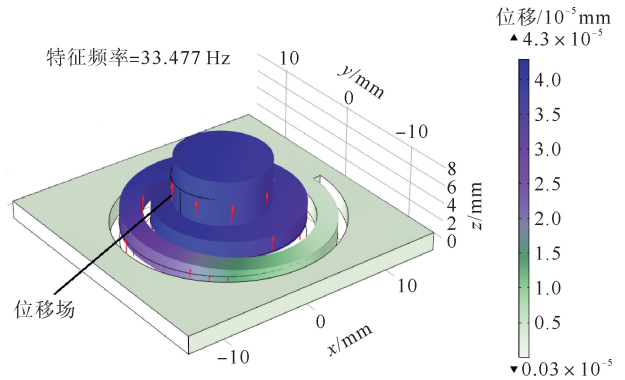


图 6 单胞一阶振型(33.477 Hz)

3 局域共振单元排布与传递率分析

为使局域共振型声学超材料能够产生更好的减振效果,需要尽可能多地布置局域共振单元。振动弹性波是由车身前挡风玻璃结构通过磁性热熔阻尼层传递的,局域共振声学超材料基板贴附在汽车顶棚靠近车身前挡风玻璃的顶棚结构上,同时应避免贴附时产生空隙^[15]。对单胞模型镜像处理,保留原有单胞模型,对镜像模型施加阵列组合, x 轴方向单胞数量为 5,建立共振单元组有限元模型,如图 7 所示。

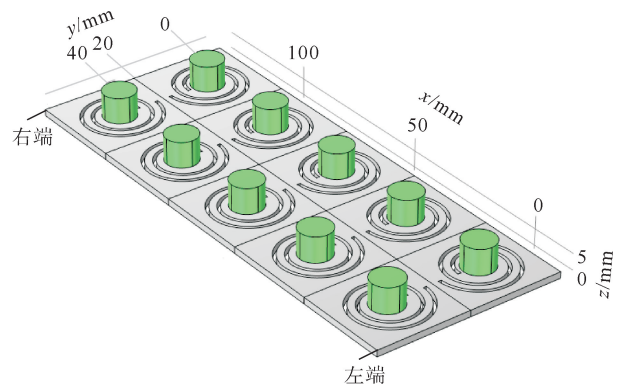


图 7 共振单元组有限元模型

采用固体力学模块,对单胞进行周期性排列。选取图7沿 x 轴方向左端2个单胞的左边界为输入端,右端2个单胞的右边界为输出端,在组件中定义变量 a_{in} (输入端加速度响应)与 a_{out} (输出端加速度响应),计算传递率 T :

$$T = 20 \lg \left(\frac{a_{out}}{a_{in}} \right) \quad (7)$$

利用 Comsol 仿真模拟软件对共振单元组进行仿真模拟,通过添加全局变量探针定义传递率 T ,添加积分1(输入端积分)、积分2(输出端积分),计算加速度响应。在固体力学中,对输入端施加 z 方向的指定位移激励,得到共振单元组位移量传递响应,如图8所示。在35 Hz时沿 x 轴左端基体板的振动峰值为 $2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$,右端基体板振动峰值为 $0.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$,产生了明显的减振效果。

为得到结构的频率响应函数,本文在 Comsol 中添加频域分析,在10~100 Hz每0.5 Hz设为1个频段进行传递率仿真,结果如图9所示。

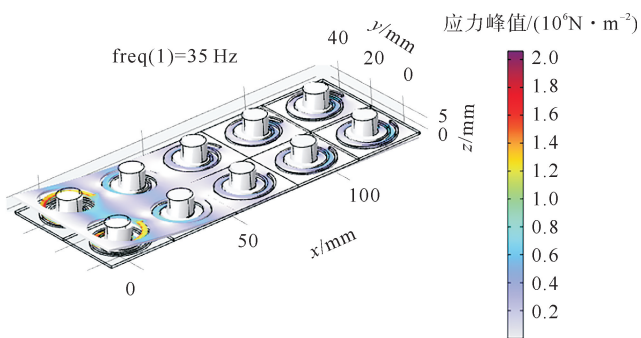


图8 共振单元组位移量传递响应

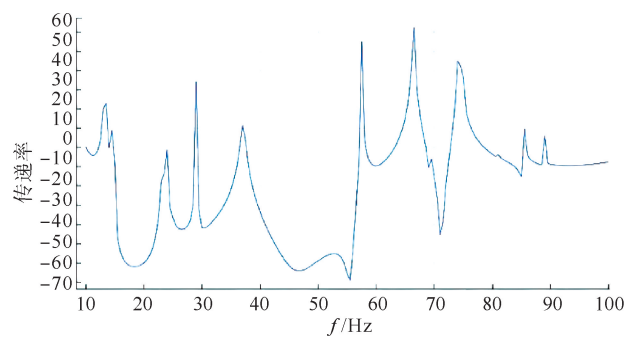


图9 共振单元组的传递率

由图9可以看出,在25~38 Hz的低频范围内传递率衰减明显,与图4、图5单胞结构几何参数设计与分析所得到的35 Hz左右的带隙频段范围相符合,可证明该共振单元组符合设计要求。

4 应用仿真效果对比

在 Comsol 中建立汽车顶棚简化模型,如图10所示,对汽车顶棚进行有限元分析,得到汽车顶棚贡献量节点。在汽车顶棚简化模型中沿 y 轴方向施加边界载荷和100 N的激励,添加频域研究,得到其35 Hz时的振动效果如图11所示,在35 Hz时汽车顶棚振动峰值为 $3.45 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

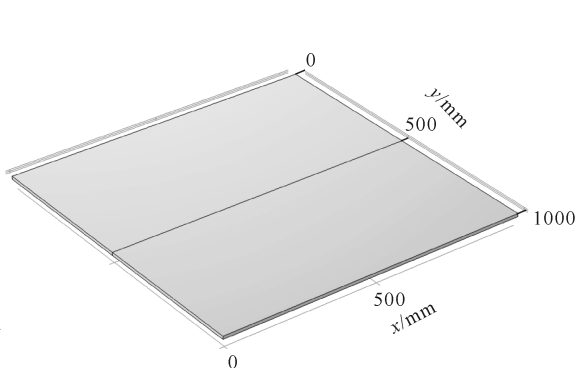


图10 汽车顶棚简化模型

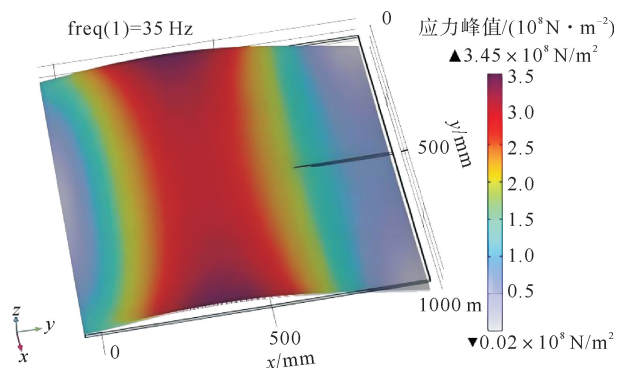


图11 未贴附超材料汽车顶棚35 Hz振动峰值

在汽车顶棚靠近车身后挡风玻璃的结构处贴附共振单元组,如图12所示。沿 y 轴方向施加边界荷载100 N的激励,并添加频域研究,得到的贴附共振单元组汽车顶棚简化模型的振动效果如图13所示。

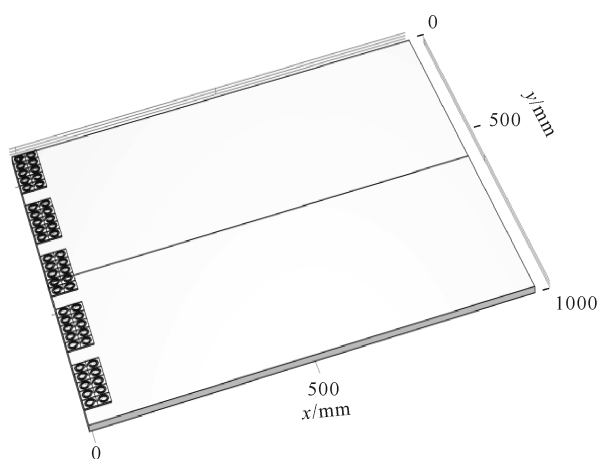


图 12 汽车顶棚声学超材料贴附示意

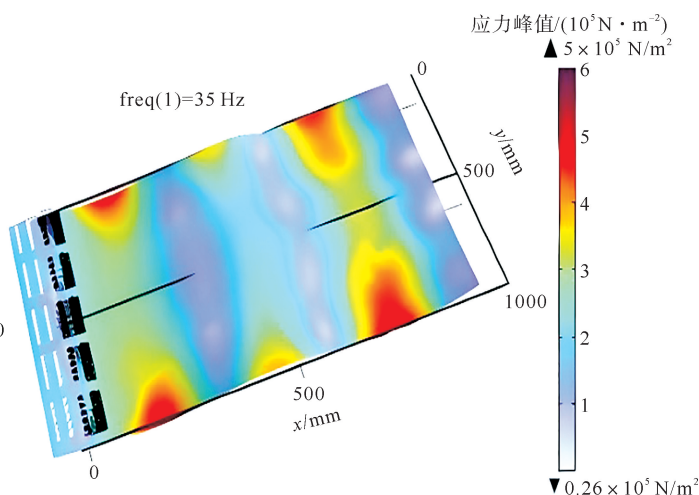


图 13 贴附共振单元组后汽车顶棚 35 Hz 振动峰值

由图 13 可以看出,顶棚简化模型添加共振单元组后在 35 Hz 时顶棚振动峰值为 $5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,而未添加共振单元时为 $3.45 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (图 11),在安装共振单元组后,汽车顶棚简化模型峰值明显减小,可见本文所设计的局域共振型阻尼结构具有良好的减振效果。

5 结束语

本文设计的螺旋声学超材料在汽车顶棚减振方面具有显著的效果。通过对单胞结构的合理设计与参数优化,带隙频段图的带隙频段和一阶振型的固有频率达到了预期目标。共振单元组的传递率曲线也验证了其正确性。在汽车顶棚的应用仿真中,贴附局域共振型阻尼声学超材料后,有效地实现了减振,为改善汽车车内噪声环境提供了新的解决方案。未来,可进一步深入研究声学超材料在汽车领域的应用,以提升汽车的 NVH 性能,为驾乘人员提供更加舒适的出行体验。

参考文献(References):

- [1] MORATA T C, THEMANN C L, RANDOLPH R F, et al. Working in noise with a hearing loss: Perceptions from workers, supervisors, and hearing conservation program managers[J]. *Ear and Hearing*, 2005, 26(6): 529-545.
- [2] 陈玉. 新型声学超材料的隔声特性及其在汽车上的应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2024.
CHEN Yu. Research on the sound insulation characteristics of new acoustic metamaterials and their applications in automobiles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2024.
- [3] 尉浪浪. 基于声学超材料的声场局域聚焦技术研究[D]. 太原:中北大学, 2024.
WEI Langlang. Research on local focusing technology of acoustic field based on acoustic metamaterials[D]. Taiyuan: North China University, 2024.
- [4] 王自力. 汽车减振器活塞杆的气体氮化复合处理工艺及性能研究[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
WANG Zili. Gas oxynitriding composite treatment process and performance study of automotive damper piston rod[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [5] 夏光辉, 张宇峰, 刘明瑞, 等. 声学超材料压电俘能研究进展综述[J/OL]. *固体力学学报*, 2026: 1-29[2026-01-08]. <https://doi.org/10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2025.039>.
XIA Guanghui, ZHANG Yufeng, LIU Mingrui, et al. A review on research progress of piezoelectric energy harvesting with acoustic metamaterials[J/OL]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2026: 1-29[2026-01-08]. <https://doi.org/10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2025.039>.
- [6] 吕梦圆. 薄膜声学超材料低频宽带隔声结构设计及其性能研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022.
LV Mengyuan. The structural design and sound insulation properties of membrane-type acoustic metamaterials for broadband low-frequency[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [7] 马智宇. 柔性声学超材料低频消声技术研究[D]. 太原:中北大学, 2024.
MA Zhiyu. Research on low frequency noise reduction technology of flexible acoustic metamaterials[D]. Taiyuan: North China Uni-

- versity,2024.
- [8] MARASINGHA-ARACHCHIGES U,RUBIO-ARIAS J Á,ALCARAZ P E,et al. Factors that affect heart rate variability following acute resistance exercise:A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Sport and Health Science*,2022,11(3):376-392.
- [9] SIAVOSHANI S,TUDOR J. ABA-new generation of vehicle dashmats[C]// SAE Technical Paper. Traverse City,2005:01-2277. DOI:10.4271/2005-01-2277.
- [10] 麻乘榕,邵晨,万庆冕,等. 用于汽车低频振动控制的局域共振声子晶体[J]. *应用声学*,2018,37(1):152-158.
MA Chengrong,SHAO Chen,WAN Qingmian,et al. A locally-resonant phononic crystal for low-frequency vibration control of vehicles[J]. *Journal of Applied Acoustics*,2018,37(1):152-158.
- [11] 张吉楠. 基于声子晶体的车辆隔声性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
ZHANG Jinan. Research on sound insulation performance of vehicles based on phononic crystals[D]. Changsha:Hunan University, 2017.
- [12] 张金瑞,肖新标,齐玉文,等. 多层式局域共振声学超材料低频带隙与隔声特性研究[J]. *机械*,2025,52(10):52-59.
ZHANG Jinrui,XIAO Xinbiao,QI Yuwen,et al. Research on low-frequency bandgap and sound insulation characteristics of multi-layered locally resonant acoustic metamaterials[J]. *Machinery*,2025,52(10):52-59.
- [13] 胡碗钵,李义丰,蓝君. 双层薄膜声学超材料的低频吸声特性研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*,2025,61(5):772-780.
HU Wanru,LI Yifeng,LAN Jun. The study of low-frequency sound absorption properties in a double-layer acoustic metamaterial[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*,2025,61(5):772-780.
- [14] 唐吉有. 面向车内低频噪声控制的局域共振声学超结构应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
TANG Jiyu. Local resonance for vehicle low frequency noise control application of acoustic superstructure[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2021.
- [15] 王亚琴,徐晓美,林萍. 薄膜型声学超材料的结构设计及隔声特性[J]. *应用声学*,2022,41(6):875-883.
WANG Yaqin,XU Xiaomei,LIN Ping. Structural design and sound insulation characteristics of the membrane-type acoustic metamaterial[J]. *Journal of Applied Acoustics*,2022,41(6):875-883.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 50 页)

- [16] 刘澍,王军武. 基于膝点驱动进化算法的工程施工多目标优化[J]. *科学技术与工程*,2022,22(29):13021-13027.
LIU Shu,WANG Junwu. Multi-objective optimization of engineering construction based on knee-driven evolutionary algorithm[J]. *Science,Technology and Engineering*,2022,22(29):13021-13027.
- [17] 钟登华,李正,吴斌平,等. 基于 Pareto 解的面板堆石坝施工工期-质量-成本均衡优化研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*,2016,49(10):1001-1007.
ZHONG Denghua,LI Zheng,WU Binping,et al. Research on the optimization of construction duration-quality-cost equilibrium of panel rockfill dam based on Pareto solution[J]. *Journal of Tianjin University(Natural Science and Engineering Technology Edition)*, 2016,49(10):1001-1007.
- [18] 张燕,刘信祯,秦佳良,等. 铁路施工多目标均衡优化模型与改进 NSGA-III 算法[J]. *交通运输工程学报*,2024,24(4):171-183.
ZHANG Yan,LIU Jizhen,QIN Jialiang,et al. Multi-objective equilibrium optimization model and improved NSGA-III algorithm for railway construction[J]. *Journal of Transportation Engineering*,2024,24(4):171-183.

(责任编辑 赵金环;英文校审 杨国涛)