

文章编号:1005-0523(2022)03-0118-08



高速列车“帽型”声子晶体内饰板低频声振特性研究

王成强^{1,3}, 张茜², 邹连龙³, 姚金钰³, 杨惠民³

(1. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
3. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘要:针对高速列车内饰板结构低频段振动噪声问题,基于局域共振机理,设计一种帽型声子晶体结构。基于有限元方法,建立帽型声子晶体单元模型,计算得到单胞的能带结构,得到了183.35~245.14 Hz的完全带隙。结合内饰板结构,建立了周期排布的帽型声子晶体内饰板模型,分析了声子晶体内饰板在垂向单位集中力激励下的振动声辐射特性,以及背景声场激励下的隔声特性,并探究了内饰板阻尼的添加对声子晶体内饰板声振特性的影响。研究表明:相比于普通内饰板,声子晶体内饰板的振动声辐射特性在180~210 Hz的带隙范围内有较好的抑制效果,辐射声功率平均降低10 dB左右;在10~500 Hz频段范围内整体表现出了较好的隔声特性,隔声量平均提高3.5 dB;阻尼损耗因子对于改善声子晶体内饰板在一些声振特性的薄弱点有较明显的效果,能够显著地抑制振动声辐射峰值点和改善隔声低谷点。

关键词:高速列车;内饰板;声子晶体;带隙特性;声振特性

中图分类号:U271.91

文献标志码:A

本文引用格式:王成强,张茜,邹连龙,等. 高速列车“帽型”声子晶体内饰板低频声振特性研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(3):118-125.

Low-Frequency Vibration Reduction Characteristics of High-Speed Train Trim Panel with "Cap Type" Phononic Crystal

Wang Chengqiang^{1,3}, Zhang Xi², Zou Lianlong³, Yao Jinyu³, Yang Huimin³

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., LTD., Changchun 130062, China)

Abstract: In order to solve the problem of low frequency vibration and noise of interior panel structure of high-speed train, a "cap type" phononic crystal structure was designed based on local resonance mechanism. Based on the finite element method, the "cap type" phononic crystal unit model was established, and the energy band structure of the unit cell was calculated, and the complete band gap of 183.35~245.14 Hz was obtained. Then, combined with the interior panel, the model of periodically arranged "cap type" phononic crystal trim panel was established. The vibration and sound radiation characteristics of the phononic crystal trim panel under the vertical unit concentrated force excitation and the sound insulation characteristics under the background sound field excitation were analyzed, and the influence of the damping of the trim panel on the sound and vibration characteristics of the phononic crystal trim panel was explored. The results show that: compared with the ordinary trim panel, the vibration acoustic radiation characteristics of the trim panel of phononic crystal have a better suppression effect in the band gap range of 180~210 Hz, and it has a better sound insulation characteristics in the fre-

收稿日期:2022-02-28

quency range of 10~500 Hz; the damping loss factor has a more obvious effect on improving some weak points of the acoustic vibration characteristics of the phononic crystal trim panel, which can significantly suppress the vibration control vibration sound radiation peak point and improve sound insulation trough point.

Key words: high-speed train; trim panel; phononic crystal; band-gap characteristics; acoustic vibration characteristic

Citation format: WANG C Q, ZHANG X, ZOU L L, et al. Low-frequency vibration reduction characteristics of high-speed train trim panel with "cap type" phononic crystal[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 118-125.

高速列车已经成为出行的重要交通工具之一。随着高速列车运行速度的不断提高,除了安全性、稳定性等要求,产生的振动噪声问题也日益凸显。高速列车车内噪声,主要来源于车体结构振动辐射产生的结构噪声和车外噪声传播通过隔声薄弱处传至车内形成的空气噪声,其中列车运行过程中车体板件的振动产生的噪声属于低频噪声,是影响车内低频噪声的主要因素^[1-4]。

宋雷鸣等^[5]仿真分析了高速列车车内低频声学特性,研究表明了列车车体结构的声振特性对其车内噪声影响较大,并且主要集中于中低频段范围。庄婷等^[6]采用有限元法和边界元法对高速列车车内噪声的分布进行仿真分析,发现在 250 Hz 以下的低频范围车体板件的振动是影响噪声的主要因素。对于高速列车车体板件,内饰板作为主要的车体结构,同时也是直接与车内声场接触面积最大的板件之一,它们是内部噪声的重要传输路径和直接产生声辐射的结构之一。车内噪声环境也受到内饰板声振特性的影响。关注车体内饰板的声振特性,抑制车体内饰板低频的振动声辐射和提高其隔声性能,有利于改善车内低频噪声环境。

一般来说,内饰板振动噪声的控制一般采用普通的隔声、隔振材料或结构^[7-11],多以硬质板材为主,板和壳体在工程中具有许多应用,并且是车厢的主要结构。而板件的减振降噪性受到尺寸和体积的限制,即控制低频噪声需要较大尺寸的板件,同样控制低频振动噪声需要提高板件的刚度或者增加板件的厚度。常规板件在高速列车内饰板的低频段噪声控制上,局限性较大。针对高速列车车内低频段噪声问题,需要新型人工声学材料——局域共振型

声子晶体^[12-15],用以提高列车内饰板结构在低频范围的减振降噪性能。

局域共振型声子晶体是具有弹性波带隙特性的新型周期性人工复合材料,其带隙特性使得弹性波能够与声子晶体结构共振态耦合从而阻断弹性波的传导。Liu 等^[16]通过在环氧树脂基体中放入由硅橡胶材料包裹的铅球,发现了该种结构能够由较小尺寸结构产生低频带隙,并且带隙特性不受周期排布的影响,由此提出了局域共振型声子晶体。此后,局域共振型声子晶体在工程应用中的研究引起了各领域学者的广泛关注。张思文等^[17]基于局域共振原理在汽车车体板空腔中设置空腔阻隔材料,通过试验结果验证了带隙范围内的隔声性能得到了有效提高。高亮等^[18]通过设计一种周期空腔的动力舱罩双层板结构,有效地提高了目标频段 518~672 Hz 的传声损失。李寅^[19]针对声学超材料飞机壁板结构,深入探究了声学超材料型壁板结构的带隙特性和减振降噪特性,并在 500 Hz 以下的低频范围实现了高效的减振降噪效果。由此可见,局域共振机理型声子晶体结构,在低频处表现出显著的减振降噪性能,提高了原有结构的隔声和振动衰减性能,为梁工程中板类结构的低频减振降噪提供了新的途径。

综上所述,若要改善内饰板低频范围内的声学性能,从而抑制其低频振动声辐射和提高隔声性能,普通优化方案在低频处效果并不显著。局域共振型声子晶体是针对低频范围减振降噪而提出的新型结构,在梁板类结构低频降噪应用上有一定的研究成果。考虑针对内饰板低频段的声振特性,将内饰板与一种帽型声子晶体相结合,能够改善内饰

板在 300 Hz 以下低频范围内的振动声辐射特性和隔声特性。本文通过仿真计算,结合内饰板结构,分析周期排列的声子晶体内饰件的声振特性,探究内饰板阻尼因子对声子晶体内饰板声振特性的影响,以期为内饰板结构的减振降噪设计提供新的思路。

1 周期性共振单元结构及带隙特性

1.1 周期性单元结构

本文基于现有声子晶体研究成果,设计一种基于局域共振机理的帽型复合元胞结构,如图 1(a)所示。单帽型声子晶体板的核心部分为基体板件、弹性底座以及质量帽环。基体板件为帽型结构提供底部支座,弹性底座与质量帽环之间形成一个“弹簧-质量”系统,弹性底座相当于“弹簧”结构,质量头环则作为质量部件为系统提供有效质量,并将帽型复合结构称为帽型共振子结构。

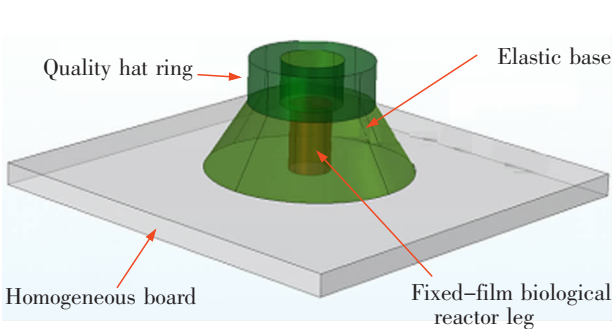
帽型复合结构体的中心轴线与基体板的中心重合,元胞的晶格常数为 a ,均质板厚为 e ,底部是内嵌固定柱(直径为 d_4 ,高度为 h_2)的弹性底座(底面直径为 d_3 ,顶面直径为 d_2 ,高度为 h_2);上部是与弹性连接件连为一体的弹性立柱(直径为 d_1 ,高度为 h_1),及其嵌套在立柱外的质量帽环(内径为 d_1 ,外径为 d_2 ,高度为 h_1)。结构参数如图 1(b)和表 1 所示,材料参数如表 2 所示。

1.2 计算方法

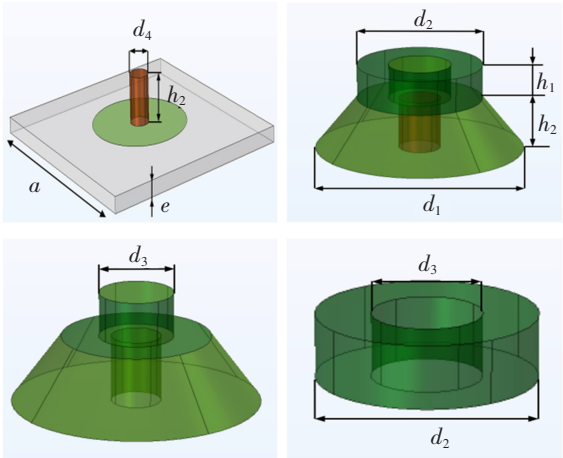
对于帽型声子晶体单元的能带结构,其带隙机理和色散关系是基于弹性波在声子晶体中的传播特性以及单元结构的周期性理论。因此,为了研究帽型声子晶体板结构的带隙特性^[20-22],利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics,计算其能带结构。

由于声子晶体结构的周期性排布,且本文中的二维陀螺型声子晶体单元只在 x 和 y 方向上呈现周期性排布,故需要对单元结构之间在 x 和 y 方向上的边界采用 Bloch 周期性。根据 Bloch 定理,由于声子晶体结构的周期性,通过在周期性边界条件中引入 Bloch 波矢 $\mathbf{k}$,将声子晶体结构中的带隙特性转化至单元结构中进行研究^[23],如式(1)

$$u_j(x+a,y+a)=u_j(x,y)e^{-i(k_xa+k_ya)} \tag{1}$$



(a) Cell structure



(b) Structural parameter

图 1 元胞结构
Fig.1 Cell structure

表 1 结构参数表

Variable	mm							
	a	e	d_1	d_2	d_3	d_4	h_1	h_2
Numeric value	30	2	6	14	20	4	4	6

表 2 材料参数表
Tab.2 Material parameter table

Material	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	ν	E/Pa
Homogeneous board	1 300	0.368	4.350×10^9
Elastic base	1 300	0.470	1.175×10^5
Quality hat ring	17 800	0.270	3.600×10^{11}
Fixed-film biological reactor leg	610	0.450	1.400×10^{10}
Trim panel	1 950	0.100	2.500×10^{10}

式中, $i, j=x, y, z$; k_x 与 k_y 为二维 Bloch 波矢 $\mathbf{k}$ 不可约布里渊区边界上沿 x 和 y 方向的分量。由于波矢 $\mathbf{k}$ 沿着图 2 中不可约布里渊区的阴影区域的边界取值时, 所求得特征值为极值, 故在计算声子晶体时, 令波矢 $\mathbf{k}$ 沿着 $M \rightarrow \Gamma \rightarrow X \rightarrow M$ 方向上依次取值, 便可求得单元结构的能带结构图。

本文采用有限元数值计算方法, 通过在有限元软件 COMSOL Multiphysics 构造帽型声子晶体单元仿真模型, 进行有限元网格划分后, 令波矢 $\mathbf{k}$ 沿着不可约布里渊区边界 $M \rightarrow \Gamma \rightarrow X \rightarrow M$ 方向进行扫描, 求解各个给定波矢 $\mathbf{k}$ 对应的特征频率与单元振动模态, 最终得到帽型局域共振型声子晶体单元的能带结构图, 如图 3 所示。

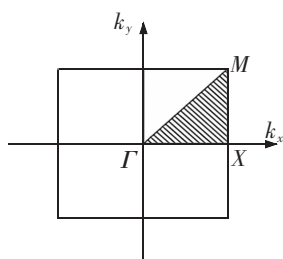


图 2 不可约布里渊区域
Fig.2 Irreducible Brillouin zone

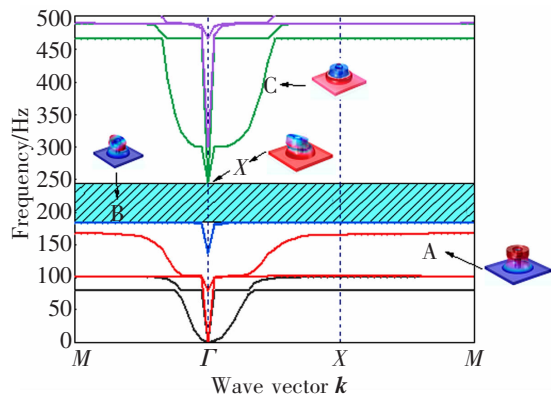


图 3 声子晶体结构能带图
Fig.3 The band diagram of phonon crystal structure

对于局域共振型声子晶体, 带隙的产生机理主要是声子晶体中的弹性波与共振单元局域共振态的相互耦合, 从而抑制弹性波的传播^[24-25]。

结合能带曲线平直段对应的振型可知, 在 300 Hz 以下的低频范围内, 完全带隙为 183.35~245.14 Hz, 带宽为 24 Hz, 如图 3 中的阴影区域所示。该带隙范围内任何弹性波在声子晶体板件内的传播均被抑

制。在工程中的振动, 主要关注能够使得板件在垂直于板面方向振动的弯曲波, 即图 3 中 A 平直段对应的振型被激发能够抑制弯曲波的传播, 直至耦合作用消失。因此, 弯曲波带隙为 168~245.14 Hz, 带宽为 77.14 Hz。

2 声子晶体内饰板声振特性分析

2.1 振动声辐射与隔声计算及模型

为探究帽型声子晶体内饰板结构的声振特性, 将建立振动声辐射模型和隔声模型。由于车体内饰板结构尺寸过大, 本文只为探究声子晶体对于内饰板声振特性的影响。故在模型中, 将其简化为参考内饰板结构, 结构参数为 0.2 m×0.2 m×0.003 m, 材料参数见表 2 所示。利用有限元软件的固体力学模块和压力声学模块, 建立声-固耦合物理场, 在固体力学模块中建立 5×5 周期尺寸的帽型声子晶体板和 0.2 m×0.2 m×0.003 m 尺寸的内饰板, 对声子晶体型内饰板组合结构的边界条件设置为四边固定约束, 在压力声学场中建立声腔, 如图 4 所示。

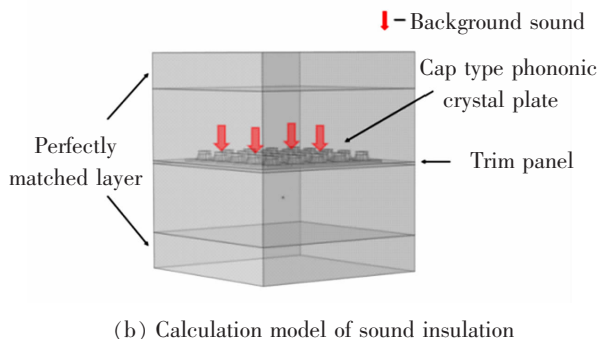
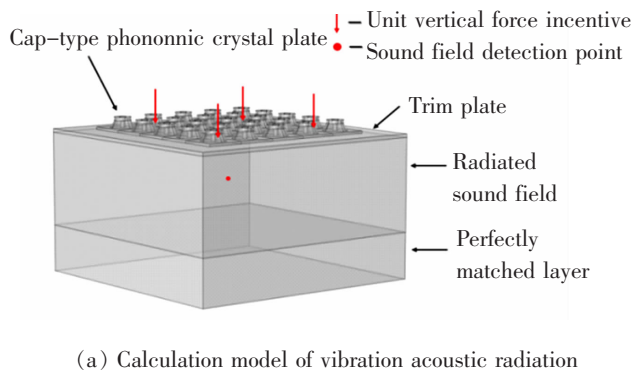


图 4 声振特性计算模型
Fig.4 Calculation model of acoustic vibration characteristics

图 4(a)为振动声辐射计算模型,将声子晶体结构与内饰板结合为一体,并在声子晶体内饰板的下侧建立声腔和完美匹配层,模拟半自由辐射声场。将内饰板四周边界条件设置为四边固定约束。在声子晶体内饰板的上表面施加四个垂直于板面方向(z 方向)向上单位集中力载荷,并且在板件下侧声腔中设置检测点,以检测声腔中声压级的变化。以板件下表面的辐射声和垂向振动速度作为响应参数,辐射声功率计算公式如下

$$P_s = 10 \lg \frac{\int_S \operatorname{Re}(p_{rs} \cdot v_n) dS}{2 \times 10^{-12}} \quad (2)$$

式中: v_n 为垂直于板件声辐射一侧表面的速度; p_{rs} 为振动产生的辐射声压; S 为声固耦合表面。

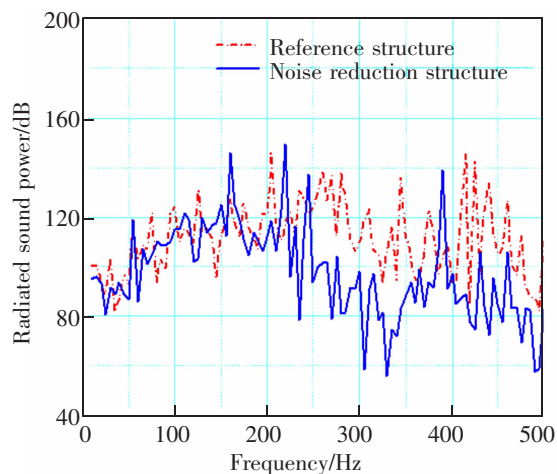
图 4(b)为隔声量计算模型,将内饰板四周边界条件设置为四边固定约束。在声子晶体内饰板的上下两侧建立声腔和完美匹配层,并赋予上侧声腔背景声压级属性,单位为 1 Pa,作为入射声场。隔声量计算公式如下

$$STL = 10 \lg \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (3)$$

式中: W_{out} 为透射声功率; W_{in} 为入射声功率。

2.2 振动声辐射及隔声特性

图 5 给出了 10~500 Hz 频段内,声子晶体内饰板(降噪结构)与同尺寸的普通内饰板(参考结构)在相同垂向集中力激励下的辐射声功率曲线与检测点声压级曲线的对比结果。



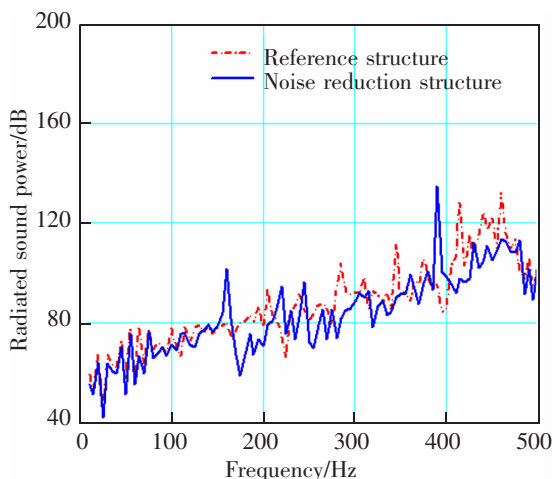
(b) Sound pressure level of detection point

图 5 振动声辐射特性曲线

Fig.5 Vibration acoustic radiation characteristic curve

由图 5(a)可知,声子晶体内饰板的辐射声功率总体来说,均低于普通内饰板的辐射声功率。在 180~210 Hz 的带隙范围频段内,声子晶体内饰板的辐射声功率平均降低 10 dB 左右。结合图 5(b)检测点的声压级曲线,可以看出,在 200 Hz 以下的频率区域,检测点声压级与普通内饰板的差异并不大。而在靠近带隙上限的频率范围(即 200 Hz 以上),检测点声压级的幅值开始大幅度地降低,并在 200~500 Hz 范围内,幅值总体上低于普通内饰板的声压级幅值。在低频范围内,声子晶体内饰板相比于普通内饰板表现出较好的振动声辐射特性。

图 6 为 10~500 Hz 频段内,声子晶体内饰板与同尺寸的普通内饰板在背景声腔激励下的隔声量曲线与对应检测点声压级曲线的对比结果图。



(a) Radiated sound power

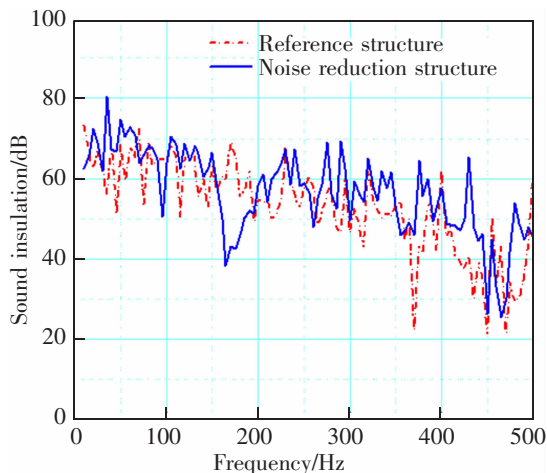


图 6 隔声特性曲线

Fig.6 Sound insulation characteristic curve

由图6可知,声子晶体内饰板的隔声量总体来说,均高于普通内饰板的隔声量。但在150~200 Hz的带隙范围频段内,声子晶体内饰板的隔声量幅值大大低于普通内饰板的隔声量,尤其是在165 Hz处,声子晶体内饰板的隔声量比普通内饰板隔声量低21 dB。结合165 Hz频率处的声压级云图,如图7所示,对比声子晶体内饰板和普通内饰板的声压级云图可知,声子晶体内饰板下侧的声压级比普通内饰板要高。

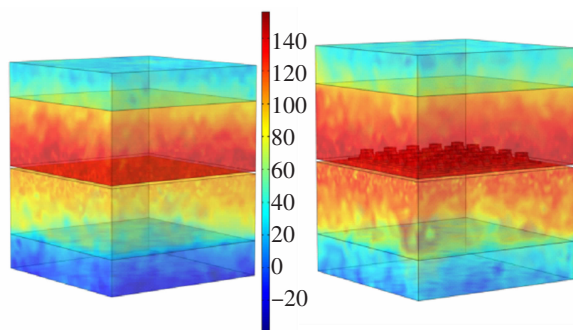


图7 165 Hz处声压级云图对比

Fig.7 Comparison of sound pressure level clouds at 165 Hz

结合图5中声子晶体内饰板的振动声辐射特性可知,在160~165 Hz频率范围,板的辐射声功率出现了突变,且幅值平均高出普通内饰板约10 dB。分析得出由于板件自身振动加剧产生声辐射,导致声子晶体内饰板的下侧声腔的声压级提高,从而导致隔声量幅值降低。

综上所述,相比于普通内饰板,声子晶体内饰板的振动声辐射特性在180~210 Hz的带隙范围内有较好的抑制效果。对于整个10~500 Hz的隔声效果,在带隙范围内,声子晶体隔声量整体高于普通内饰板的隔声量;在带隙范围之外两者隔声特性曲线大体上有较好的吻合,隔声量水平相差不大,出现了交错的变化,虽在一些少部分频率点由于振动加剧导致声辐射出现隔声低谷,但隔声性能普遍优于普通内饰板,隔声量平均提高3.5 dB。同时可以看出,声子晶体结构能带图的完全带隙183.35~245.14 Hz,声子晶体型内饰板结构尺寸越接近无限周期结构,其声辐射降低的频带、隔声提高的频带与带隙对应效果越好。本文结合实际工程,所选内饰板结构导致计算结果与其带隙范围有所偏差。

2.3 阻尼损耗因子对声振特性的影响

阻尼处理在板结构减振降噪设计中有着广泛的应用,其可以使板件振动噪声特性在较宽的频带内得到有效抑制。为了探究内饰板阻尼的添加对声子晶体内饰板声振特性的影响,在声子晶体内饰板的玻璃钢板中添加阻尼损耗因子,探究其在阻尼损耗因子 η 分别为0,0.05,0.1和0.2的振动声辐射特性与隔声特性。

图8给出了不同阻尼损耗因子下声子晶体内饰板振动声辐射特性的对比结果。

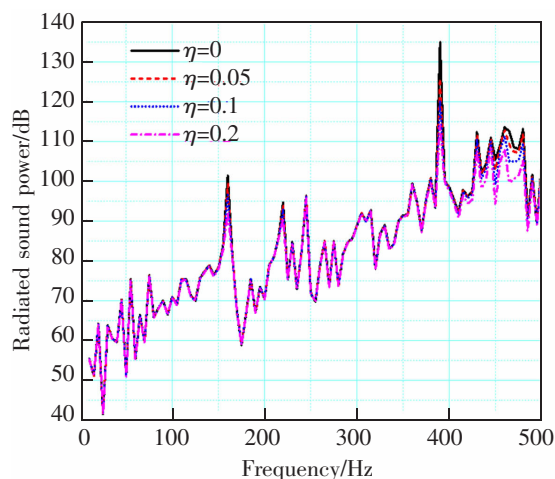


图8 阻尼损耗因子对振动声辐射的影响

Fig.8 Influence of damping loss factor on vibration acoustic radiation

由图8可知,在100 Hz以下的低频段范围内,阻尼损耗因子的变化对辐射声功率并没有明显的影响。随着频率的上升,阻尼损耗因子对辐射声功率的一些峰值点有一定的改善,但阻尼损耗因子的改变并没有对峰值范围以外的辐射声功率产生明显的影响。在400~500 Hz频率范围内,随着阻尼损耗因子的增大,声子晶体内饰板振动声辐射特性曲线有所改善,并且也能对峰值范围以外的振动声辐射特性曲线有所改善。阻尼损耗因子能够改善振动声辐射特性的峰值点,且随着阻尼损耗因子的增加其抑制效果越明显,但对于峰值点之外的振动声辐射特性并无明显改善效果。

图9为不同阻尼损耗因子的声子晶体内饰板隔声特性的对比结果。在10~500 Hz频段范围内,阻尼损耗因子的添加,对于声子晶体板件隔声量的影响较为明显。

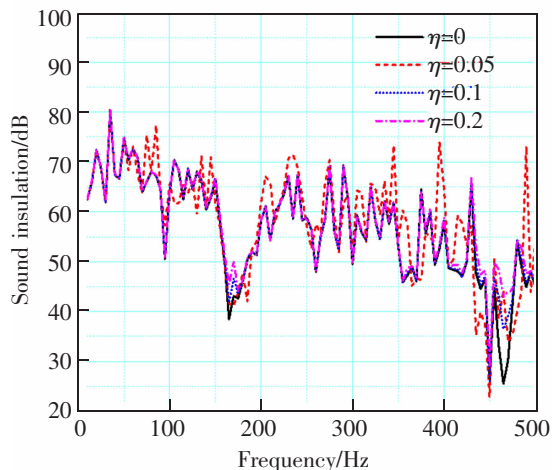


图9 阻尼添加对隔声特性的影响

Fig.9 Influence of damping addition on sound insulation characteristics

由图9可知,阻尼损耗因子的变化对一些隔声低谷有所改善。随着内饰板阻尼的添加,声子晶体内饰板隔声特性曲线中谷值有显著地变化,曲线中的谷值隔声量提高较为明显。对比隔声特性曲线可知,当阻尼因子为0.05时,声子晶体内饰板呈现出相对较好的隔声量曲线。但随着阻尼损耗因子的增大,一些频率范围的隔声量反而有所降低,尤其在一些隔声曲线的局部峰值点,阻尼因子为0.2对应的隔声量相比于阻尼因子为0.05对应的隔声量要低一些。由于影响隔声特性的因素较多,本文只针对内饰板阻尼因子对于声子晶体型内饰板隔声特性影响进行探究。因此,阻尼损耗因子的合理添加能够改善隔声特性曲线中的一些谷值,但阻尼损耗因子过大会导致曲线中其他频率的隔声量反而降低。

综上所述,阻尼损耗因子对于改善声子晶体内饰板的一些薄弱点有较明显的效果,能够显著地抑制振动声辐射峰值点和隔声低谷点。同时,随着阻尼的增大,其耗散能量的能力并不是无限增大,只有选取适当的阻尼大小才能实现更好的减振降噪效果。

3 结论

本文针对高速列车内饰板低频范围振动噪声特性,基于现有声子晶体研究成果,设计一种多元复合的帽型局域共振声子晶体单元,通过有限元建立共振单元模型,计算得到能带结构图。然后建立周期排布的有限帽型声子晶体内饰板结构,通过对

比普通内饰板结构,分析了在垂向单位集中力激励下声子晶体内饰板的振动声辐射特性,以及背景声场激励下声子晶体内饰板的隔声特性,并探究了内饰板阻尼的添加对声子晶体内饰板声振特性的影响。主要得出以下结论。

1) 针对高速列车内饰板结构低频振动噪声,设计了一种帽型局域共振声子晶体结构,能够获得在183.35~245.14 Hz的完全带隙,带宽为24 Hz。

2) 探究分析了声子晶体内饰板的声振特性,相比于普通内饰板,声子晶体内饰板的振动声辐射特性在180~210 Hz的带隙范围内有较好的抑制效果,声子晶体内饰板的辐射声功率平均降低10 dB左右;在10~500 Hz频段范围内整体表现出了较好的隔声特性,隔声量平均提高3.5 dB。

3) 阻尼损耗因子对于改善声子晶体内饰板在一些声振特性的薄弱点有较明显的效果,能够显著地抑制振动声辐射峰值点和改善隔声低谷点。但阻尼损耗因子也不是越大越好,只有选取适当的阻尼大小才能实现更好的减振降噪效果。

参考文献:

- [1] ZHANG J, XIAO X B, SHENG X Z, et al. Sound source localisation for a high-speed train and its transfer path to interior noise[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(4): 178-193.
- [2] 邢淑梅, 刘岩, 张晓排. 高速铁路动车组噪声测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(3): 79-81.
XING S M, LIUY, ZHANG X P. Noise test and analysis of express train set[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(3): 79-81.
- [3] CHU Z G, YANG Y, HE Y S. Deconvolution for three-dimensional acoustic source identification based on spherical harmonics beamforming. Journal of Sound and Vibration, 2015, 344: 484-502.
- [4] ZHANG J, XIAO X, SHENG X, et al. Characteristics of interior noise of a chinese high-speed train under a variety of conditions[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2017, 18(8): 617-630.
- [5] 宋雷鸣, 孙守光, 张新华. 用有限元法分析铁路客车车内的声学特性[J]. 噪声与振动控制, 2005(2): 21-22.
SONG L M, SUN S G, ZHANG X H. Analysis of acoustic property of space inside rail car based FEM[J]. Noise and Vibration Control, 2005(2): 21-22.
- [6] 庄婷, 左言言, 闵祥斗. 高速列车车内低频噪声综合分析[J]. 制造业自动化, 2013, 35(20): 88-91.
ZHUANG T, ZUO Y Y, MIN X D. Integrated analysis of high-speed train cab interior noise in low-frequency range[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(20): 88-91.

- [7] 夏兆旺,王宗耀,温华兵,等. 复合隔声结构声学性能研究综述[J]. 船舶工程,2020,42(7):14-21.
XIA Z W, WANG Z Y, WEN H B, et al. Review on acoustic performance of composite sound insulation structure[J]. Ship Engineering, 2020, 42(7): 14-21.
- [8] WANG D W, MA L. Sound transmission through composite sandwich plate with pyramidal truss cores[J]. Composite Structures, 2017, 164(15): 104-117.
- [9] YANG I H, JEONG J E, JEONG U C. Improvement of noise reduction performance for a high-speed elevator using modified active noise control[J]. Applied Acoustics, 2014, 79(2): 231-244.
- [10] 宋玉宝,温激鸿,郁殿龙,等. 板结构振动与噪声抑制研究综述[J]. 机械工程学,2018,54(15):60-77.
SONG Y B, WEN J H, YU D L, et al. Review of vibration and noise control of the plate structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 60-77.
- [11] LIU J, CHEN T T, ZHANG Y H, et al. On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure[J]. Composite Structures, 2019, 208(15): 385-394.
- [12] 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,2016,52(13):68-78.
WU J H, MA F Y, ZHANG S W, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 68-78.
- [13] 肖勇. 局域共振型结构的带隙调控与减振降噪特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
XIAO Y. Locally resonant structures: Band gap manipulation and properties of vibration and noise reduction[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [14] 喻浩,陈荣. 周期弹簧振子结构的局域共振带隙和布拉格带隙特征研究[J]. 船舶工程,2017,39(5):41-44.
YU H, CHEN R. Study on locally resonance and bragg band gap characteristics of periodic mass spring structure[J]. Ship Engineering, 2017, 39(5): 41-44.
- [15] 钱登辉,史治宇,吴静红. 贴附型局域共振声子晶体双层板的带隙特性[J]. 振动、测试与诊断,2019,39(3):484-494.
QIAN D H, SHI Z Y, WU J H. Bandgap properties in stubbed-on locally resonant phononic crystal double panel structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 484-494.
- [16] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289: 1734-1736.
- [17] 张思文,庞剑,张军,等. 基于局域共振声子晶体结构的汽车空腔阻隔材料[J]. 汽车工程,2015,37(10):1179-1184.
ZHANG S W, PANG J, ZHANG J, et al. Cavity filler with the structure of local resonant phononic crystal for vehicle body[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(10): 1179-1184.
- [18] 高亮,雷博,郑辉. 工程机械动力舱罩的隔声性能分析[J]. 噪声与振动控制,2020,40(6):239-244.
GAO L, LEI B, ZHENG H. Analysis of sound insulation performance of a power system enclosure for construction machinery[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(6): 239-244.
- [19] 李寅. 基于声学超材料的飞机壁板低频减振降噪设计研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
LI Y. Noise reduction design of aircraft panel based on acoustic metamaterials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [20] 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):134302.
ZHANG S W, WU J H. Low-frequency band gaps in phononic crystals with composite locally resonant structures[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134302.
- [21] 郭旭,崔洪宇,洪明. 局域共振声子晶体板的减振降噪研究[J]. 船舶力学,2021,25(4):509-516.
GUO X, CUI H Y, HONG M. Research on vibration and noise reduction of local resonant phononic crystal plate[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(4): 509-516.
- [22] 彭中波,李成,高阳. 二维开孔式局域共振声子晶体低频带隙研究[J]. 机械设计,2020,37(4):73-77.
PENG Z B, LI C, GAO Y. Study on the low-frequency band gap of two-dimensional open-hole locally resonant phononic crystals[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(4): 73-77.
- [23] LI S B, DOU Y H, CHEN T N, et al. Forming low-frequency complete vibration bandgaps in a thin nonmetallic elastic metamaterial plate[J]. Acoustical Physics, 2019, 65(3): 322-333.
- [24] 康太凤,孙小伟,宋婷,等. 二维空心散射体声子晶体板的低频带隙特性及其形成机理[J]. 声学学报,2020,45(4):601-608.
KANG T F, SUN X W, SONG T, et al. Low-frequency band gap characteristics of two-dimensional hollow scatterer phonon crystal plate and its formation mechanism[J]. Acta Acustica, 2020, 45(4): 601-608.
- [25] 张茜,刘卓昊,李承诚,等. 带陀螺型声子晶体的高速列车型材结构低频隔声性能探究[J]. 噪声与振动控制,2022,42(1):220-226.
ZHANG X, LIU Z H, LI C C, et al. Low-frequency vibration insulation characteristics of high-speed train profiles with gyroscopic phononic crystal[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(1): 220-226.



第一作者:王成强(1981—),男,正高级工程师,博士研究生,研究方向为轨道车辆总体设计研究。2004年本科毕业于大连交通大学,2007年硕士毕业于大连交通大学。E-mail: wangchengqiang.ck@ccrrec.cc。

(责任编辑:熊玲玲 刘棉玲)