

基于蹦床声子晶体的彩虹捕获效应

刘 威¹, 何泽银^{1,2}, 陶平安², 孙世政¹, 胡立志²

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆建设汽车系统股份有限公司, 重庆 400052)

摘 要: 基于蹦床效应提出新型蹦床声子晶体模型。借助有限元法, 计算蹦床声子晶体能带结构、本征模态, 并与传统声子晶体对比, 选择调整蹦床声子晶体柱体高度进行彩虹捕获效应研究。按照不同柱体高度蹦床声子晶体, 将 16 个蹦床声子晶体单胞分别以单一编号、有序及随机完全无序排列形式组合, 计算对应传输损失曲线, 分析不同排列组合形式对彩虹捕获效应的影响。并进一步设计了 3 种轻度无序排列形式蹦床声子晶体阵列, 以分析无序度对彩虹捕获效应的影响。结果表明: 新型蹦床声子晶体带隙宽度是传统声子晶体的 2.1 倍, 采用蹦床声子晶体有序排列形式表现出明显的彩虹捕获现象, 而完全无序排列形式则表现出强烈的“逆彩虹捕获”现象; 采用 3 种轻度无序排列形式蹦床声子晶体阵列对激励信号的衰减能力与有序排列基本相同, 表明所设计的新型蹦床声子晶体对阵列的轻度无序排列具有鲁棒性。本工作为今后定向设计衰减频域及最大衰减幅度的彩虹捕获声子晶体阵列提供了参考。

关键词: 蹦床效应; 声子晶体; 彩虹捕获效应; 阵列形式; 传输损失

中图分类号: O735; TB535 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)09-2463-07

网络出版时间: 2022-08-12



Rainbow Trapping Effect Based on Trampoline Phononic Crystals

LIU Wei¹, HE Zeyin^{1,2}, TAO Ping'an², SUN Shizheng¹, HU Lizhi²

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Construction Automotive Systems Co., Ltd., Chongqing 400052, China)

Abstract: A trampoline phononic crystal model was proposed based on the trampoline effect. The band structure and eigenmodes of trampoline phononic crystals were calculated by the finite element method. Compared with the conventional phononic crystals, the height of trampoline phononic crystal cylinder was selected to investigate the rainbow trapping effect. For the trampoline phononic crystals with different column heights, 16 trampoline phononic crystal cells were classified in the form of single number as well as ordered and random completely disordered arrays, respectively. The corresponding transmission loss curve was determined, and the influence of array combination form on the rainbow trapping effect was analyzed. Furthermore, three slightly disordered trampoline phononic crystal arrays were designed to analyze the influence of disorder on the rainbow trapping effect. The results show that the band gap width of the new trampoline phononic crystal is 2.1 times greater than that of the conventional phononic crystals. The ordered arrangement of trampoline phononic crystals has an obvious rainbow trapping, while the completely disordered arrangement has a strong ‘inverse rainbow trapping’. The attenuation ability of the three slightly disordered trampoline phononic crystal arrays to the excitation signal is basically the same as that of the orderly arrangement, indicating that the designed trampoline phononic crystal is robust to the slightly disordered arrangement of the array. This paper provides a reference for the directional design of rainbow trapping phononic crystal arrays with attenuation frequency domain and maximum attenuation amplitude.

Keywords: trampoline effect; phononic crystal; rainbow trapping effect; array form; transmission loss

近年来, 声子晶体及声学超材料凭借其优越的声波操控特性及先进的力学性能得到了国内外学者

的广泛研究, 其已在振动噪声控制^[1-3]、传感器^[4-5]、拓扑波导^[6-7]等方向涌现大量突破性成果。作为人工

收稿日期: 2022-03-28。 修订日期: 2022-04-29。

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0799); 重庆市九龙坡科技计划(2020-02-001-Z)。

第一作者: 刘 威(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 何泽银(1985—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-03-28. Revised date: 2022-04-29.

First author: LIU Wei (1997—), male, Master candidate.

E-mail: liuwei199709@163.com

Correspondent author: HE Zeyin (1985—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zeyin_he@126.com

功能声学结构, 声子晶体与声学超材料对声波衰减频域的拓宽是当前该领域的研究热点问题之一。现有研究表明, 调整结构各部分体积大小^[8–10]、改变结构各部分组合形式^[11–13], 利用蹦床效应^[14]及彩虹捕获效应^[15]等均是实现该目的的有效途径。蹦床效应及彩虹捕获效应具有无需对原有结构做出大调整, 对带隙扩大效果显著等优点。

蹦床效应最早由 Osama 等^[14]于 2013 年提出, 其将均匀的圆柱体布置在含有均匀空心圆孔的基板上组成了一种新型声学超材料, 通过数值仿真得到了比常规无空心圆孔基板结构大 4 倍的亚波长带隙。之后, 其又通过实验证明了该仿真结果的准确性^[16]。最近, Muhammad 等^[17]又在此基础上发展了多共振结构蹦床声学超材料, 同时引入了材料损耗因子, 利用复合柱体的强烈振动与基板耦合, 进一步扩大了局域共振带隙。

彩虹捕获效应最早由 Tsakmakidis 等^[15]发现于光学材料中, 其通过共振光子结构将不同频率的电磁波局域在不同空间区域。Zhu 等^[18]利用彩虹捕获效应设计了一种含非周期凹槽的声学超材料, 并通过试验发现其可以捕获宽带声波, 同时能在空间上分离不同的频率成分。随后, Krodel 等^[19]将彩虹捕获效应应用于地震元超材料中, 其通过将具有不同本征频率的谐振器组成阵列, 在次声频段下获得了更宽的衰减带。最近, Banerjee 等^[20]研究了具有频率渐变线性内谐振器的一维有限链, 证明了利用彩虹捕获效应适当调谐频率梯度排列的谐振单元可以在理论上将一维超材料的衰减带的上部扩展到无穷大。陆文佳等^[21]提出了一种减小尺寸的彩虹捕获效应结构, 在空气凹槽阵列中引入可调节缝宽的周期性缝板单元, 实现了结构的宽频可调性。Celli 等^[22]提出了基于彩虹捕获效应的无序排列带隙增宽理论, 其利用乐高积木的组装简便性, 将不同刚度的积木单元通过有序或无序排列, 发现无序排列单元

组能产生更宽的衰减频带。Neil 等^[23]在一种飞蛾翅膀鳞片上也发现了类似的效应, 这种飞蛾在长期的生存斗争中为避免蝙蝠捕食, 在其翅膀表层进化出不同刚度的细微鳞片, 获得了宽带超声隐身能力。Chaplain 等^[24]通过设计能量收集器区分了彩虹反射与彩虹捕获效应的差异, 为描述强迫线阵列系统的行为及预测它们的能量俘获、转换和聚焦能力提供了参考。Meng^[25]将彩虹捕获效应应用于轻量化声学结构, 设计了一种三维轻质空心球泡沫声学超材料, 通过添加梯度黏结剂获得了原有结构 2 倍宽度的带隙。Wu 等^[26]基于彩虹捕获效应提出了一种由径向梯度槽阵列组成的声屏障, 实现了对入射声波的多频段阻隔, 推进了彩虹捕获效应在隔音基础设施领域的实际应用。此外, 已有多项研究通过不同优化方法提升了彩虹捕获效应的应用潜力^[27–28]。以上结果表明: 蹦床效应与彩虹捕获效应对声波衰减频域的拓宽具有优越性能, 现有文献对基于蹦床效应与彩虹捕获效应的耦合研究还鲜有报道。

为探究单相材料蹦床声子晶体及其有序与无序阵列形式下的彩虹捕获效应, 本工作首先构建新型蹦床声子晶体模型, 采用有限元法计算其能带结构。进一步, 调整该结构柱体高度, 得到带隙范围不同的 4 种声子晶体单元, 将 4 种单元分别取 4 个单胞通过有序、轻度无序、随机完全无序的形式进行阵列组合, 计算各组合激励下传输损失曲线并与单一编号声子晶体阵列计算结果对比, 分析各组合对相同激励信号衰减能力差异的原因。

1 新型声子晶体结构与理论

声子晶体的蹦床效应与声学超材料类似, 即在声子晶体基板上引入均匀空心圆孔使声子晶体振动时结构与其中弹性波耦合变得更加强烈, 该效应对轻质声子晶体的宽频振动噪声控制具有重要意义。为探究蹦床效应对声子晶体带隙产生的影响, 提出如图 1

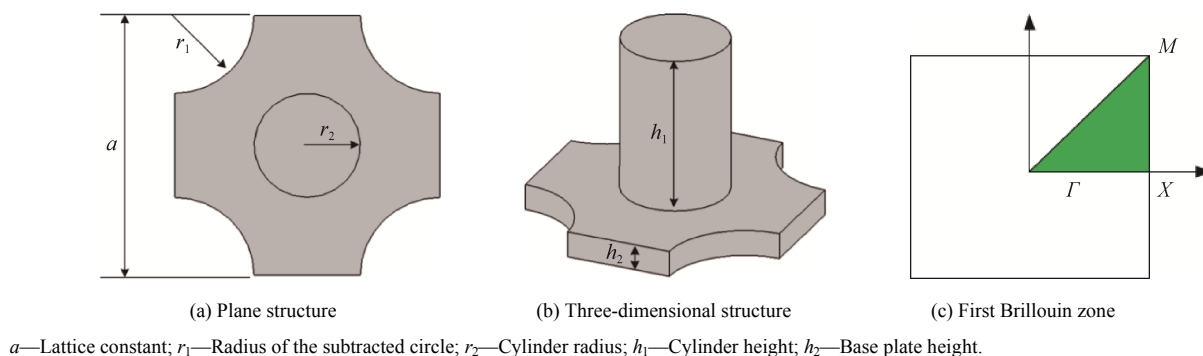


图 1 新型蹦床声子晶体单胞结构及第一 Brillouin 区

Fig. 1 New trampoline phononic crystal single cell structure and the first Brillouin zone

所示新型声子晶体单胞模型。其中,圆柱体被放置在一块 4 个角被分别减去四分之一圆的基板上,图 1a 为单胞平面结构图,图 1b 为单胞三维结构图,图 1c 为第一 Brillouin 区图。图 1 中,结构材料采用硅橡胶(密度 $\rho=1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 弹性模量 $E=1.175\times 10^{-4}\text{ GPa}$; Poisson 比 $\nu=0.47$)。

声波在三维空间中固体介质传播的控制方程可表示为

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

式中: c_{ijkl} 为弹性常数; ρ 为质量密度; u_i 为位移矢量; t 为时间; $x_j (j=1,2,3)$ 分别表示沿 x, y, z 方向的坐标分量。新型声子晶体在 x 和 y 方向上是无限周期结构,根据 Bloch 定理,位移向量场定义为

$$u(\mathbf{r}) = u_k(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}=(x,y,z)$ 为空间位置矢量; $u_k(\mathbf{r})$ 为与弹性系统有相同周期性的矢量函数; $\mathbf{k}=(k_x, k_y)$ 为第一 Brillouin 区中波矢量。

将 Bloch's 定理沿周期性方向应用到上述声子晶体单胞模型边界上,边界位移满足式(3)

$$U(\mathbf{r}+\mathbf{a}) = U(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{a})} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{a}$ 为声子晶体格矢基矢量。

声子晶体单胞的本征方程可表示为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U} = 0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{U}$ 为节点位移。

借助有限元法,采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 特征频率求解器计算该声子晶体能带结构。根据式(3)边界条件,将波矢 $\mathbf{k}$ 沿不可约 Brillouin 区($\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$)方向扫描,求解本征方程(4)得到该声子晶体单胞结构的固有频率,进而得到该声子晶体能带结构。

2 蹦床声子晶体能带结构计算及调控

2.1 带隙计算与对比

为计算蹦床声子晶体能带结构,采用如表 1 所示的声子晶体单胞几何参数取值。

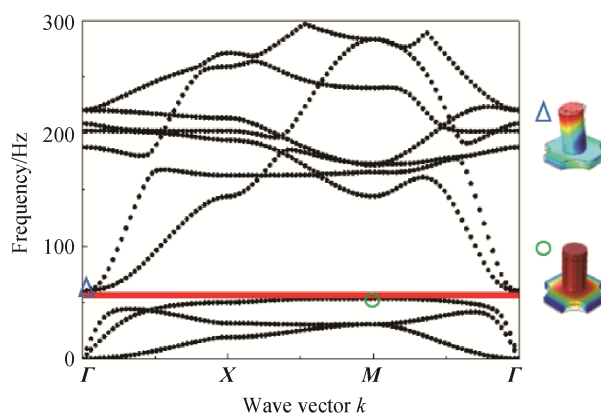
表 1 声子晶体单胞几何参数与取值

Table 1 Geometric parameters and values of cell

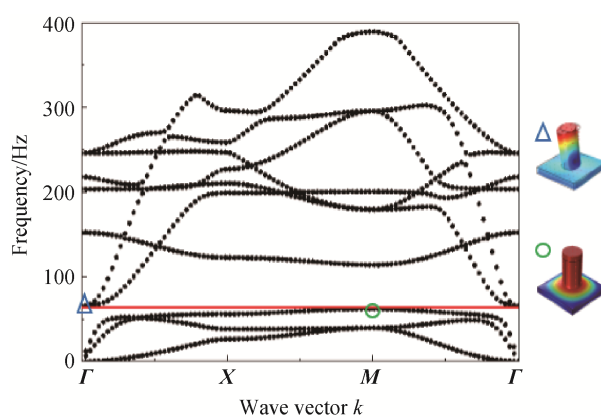
Parameter	a	h_1	h_2	r_1	r_2
Value/mm	10	6	1	3	2

图2为蹦床声子晶体与传统声子晶体能带结构图及带隙起始与截止频率处本征模态,该传统声子晶体除基板4个角未被减去四分之一圆外,其余各部

分尺寸与蹦床声子晶体完全相同。



(a) Trampoline phononic crystal



(b) Traditional phononic crystal

图 2 蹦床声子晶体及传统声子晶体能带结构图及对应带隙起始频率处本征模态

Fig. 2 Band structure diagram of trampolene phononic crystal and traditional phononic crystal and eigenmodes at corresponding band gap starting frequency

由计算结果分析可知,蹦床声子晶体带隙出现在 53.5~60.0 Hz,带宽为 6.5 Hz,传统声子晶体带隙出现在 62.2~65.3 Hz,带宽为 3.1 Hz,带隙起始频率处本征模态均为柱体的垂向振动,截止频率处本征模态均为柱体的摆动。蹦床声子晶体带隙宽度约为传统声子晶体的 2.1 倍,原因是被减去一部分的基板在柱体振动时充当了跳板,使柱体振动与基板振动的耦合变得更加强烈。

2.2 带隙调控与分析

新型蹦床声子晶体可等效为 1 个弹簧质量系统模型,其能带频率计算公式可由式(5)表示

$$f = (\sqrt{K/M}) / 2\pi \quad (5)$$

式中: K 为等效弹簧刚度; M 为柱体或基板振动部分决定的等效质量。

为实现新型蹦床声子晶体带隙的调控,对比调

整柱体高度及被减圆半径的方式对调控蹦床声子晶体带隙的效果。蹦床声子晶体带隙起始与截止频率

随柱体高度变化规律如图3所示。带隙起始与截止频率随被减圆半径变化规律如图4所示。

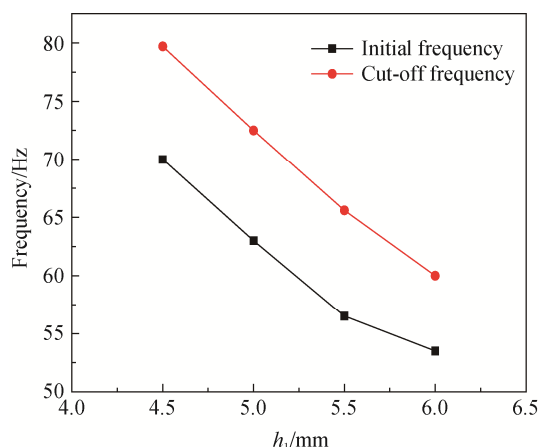


图3 柱体高度对带隙起始与截止频率的影响

Fig. 3 Effect of cylinder height on band gap initial and cut-off frequency

分析可知,通过调整柱体高度 h_1 调控蹦床声子晶体带隙位置的方式在几乎不影响带隙宽度的前提下近似线性改变带隙出现的频率范围,这对研究声子晶体的彩虹捕获效应具有重要意义,其带隙调控效果优于调整被减圆半径 r_1 。因此,将上述4种柱体高度蹦床声子晶体分别编号如表2所示,便于后续研究其彩虹捕获效应时声子晶体阵列的表示。

表2 声子晶体柱体高度及其编号

Table 2 Height and number of phononic crystal cylinder

Column height/mm	6.0	5.5	5.0	4.5
Number	1	2	3	4

3 蹦床声子晶体彩虹捕获效应分析

3.1 阵列模型及方法

为研究新型蹦床声子晶体的彩虹捕获效应,采用16个声子晶体单胞按照 x 方向阵列的形式进行声

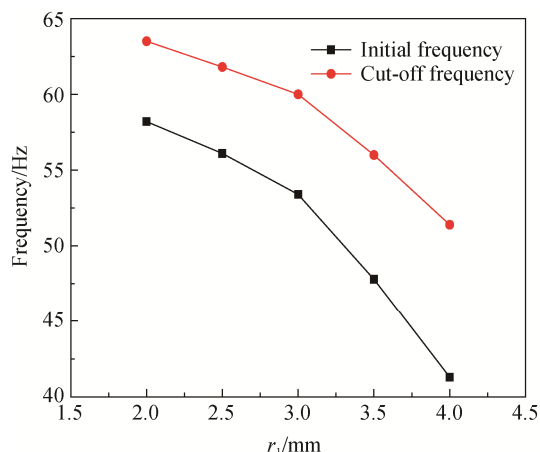


图4 被减圆半径对带隙起始与截止频率的影响

Fig. 4 Effect of the radius of the subtracted circle on the band gap initial and cut-off frequencies

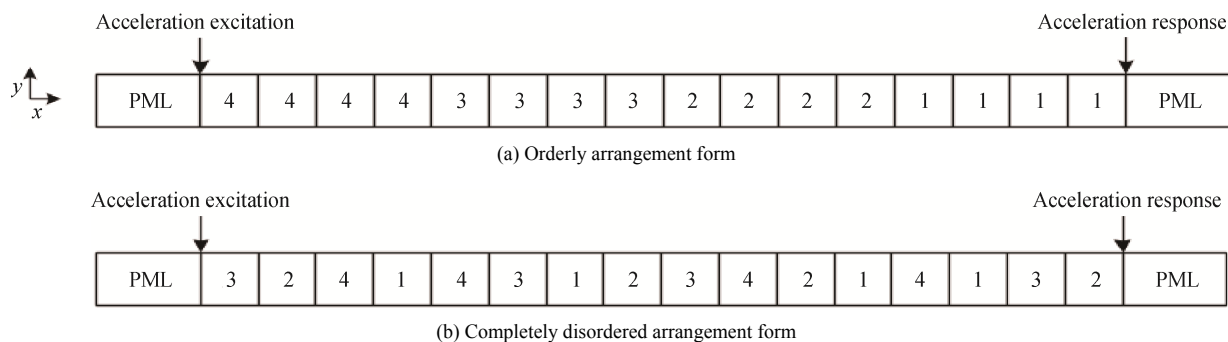
子晶体组合的传输损失计算,传输损失定义为

$$T_l = 20 \lg(P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \quad (6)$$

式中: T_l 为传输损失量; P_{out} 为输出端加速度响应; P_{in} 为输入端加速度激励。

计算了16个声子晶体单胞分别全为编号1~4声子晶体时的传输损失曲线,同时计算了如图5所示4种编号声子晶体各取4个单胞进行有序及随机完全无序排列时的传输损失曲线,模型2端通过添加PML完美匹配层防止能量反射。

对比6种声子晶体排列形式下传输损失曲线计算结果如图6所示。由图6可知,当16个声子晶体单胞全为编号1~4声子晶体时,计算得到的传输损失曲线(有标记号实线)衰减频域与编号1~4声子晶体单胞计算得到的带隙范围基本保持一致,最大衰减幅度保持在90~110 dB。将编号1~4声子晶体各取4个单胞按照图5a有序排列形式计算得到的传输损失曲线



PML—Perfect match layer.

图5 有序及完全无序排列形式声子晶体传输损失计算模型简图

Fig. 5 Schematic diagram of calculation model of transmission loss of phononic crystals with ordered and completely disordered arrangement

(粗虚线)则表现出明显的彩虹捕获现象, 衰减频域相比4种单一编号声子晶体组成阵列计算结果大幅提升。原因是不同频率的激励信号在阵列中传播时将会被不同编号段的声子晶体序列所捕获而局限在声子晶体内部无法继续传播。由于同一编号声子晶体数量减少, 导致其最大衰减幅度明显下降, 最高仅为72 dB, 这种衰减频域的拓宽与最大衰减幅度的降低与现有文献对彩虹捕获现象规律的总结保持一致。

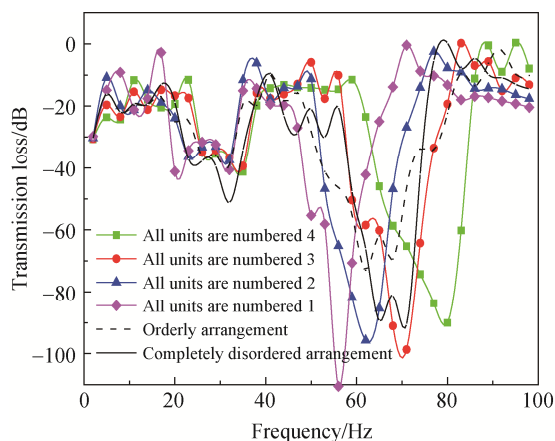


图6 6种声子晶体排列形式下传输损失曲线

Fig. 6 Transmission loss curves of six phononic crystal arrangements

而将编号1~4声子晶体各取4个单胞按照图5b完全无序排列形式计算得到的传输损失曲线(粗实线)则表现出强烈的“逆彩虹捕获”现象, 其衰减频域相比有序排列明显变窄, 几乎与4种单一编号声子晶体组成阵列衰减频域相等。但其最大衰减幅度则略有提升, 达到了90 dB。尽管如此, 其相比有序排列丧失了宽频衰减的优势, 最大衰减幅度的增加也未能超过

单一编号声子晶体所得衰减幅度最大值。由此可见, 随机完全无序排列形式下声子晶体蹦床效应与彩虹捕获效应的耦合并未使声子晶体阵列的衰减频域进一步扩宽, 而只在一定程度上增加了最大衰减幅度。这种“逆彩虹捕获”现象是现有文献鲜有报道的。

同时, 另外计算了如图7所示随机产生的10组完全无序声子晶体阵列的标准差传输损失曲线。由图7可知, 相比有序排列形式, 10组完全无序阵列的标准差传输损失曲线仍表现出明显的“逆彩虹捕获”现象, 说明了该现象存在的普遍性。

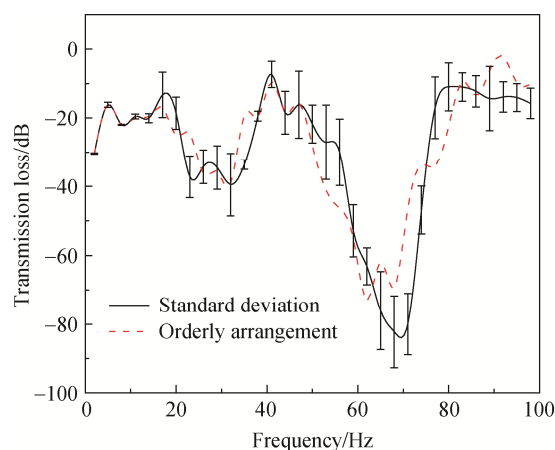


图7 有序及10组完全无序阵列的标准差传输损失曲线

Fig. 7 Standard deviation transmission loss curves of ordered and 10 groups of completely disordered arrays

3.2 无序度对彩虹捕获效应的影响

由图8可见, 为探究相同数量与编号下声子晶体排列的无序程度对衰减频域及最大衰减幅度的影响, 设计了图8a~图8c所示3种在有序排列基础上仅调整小部分声子晶体单胞位置的轻度无序阵列。

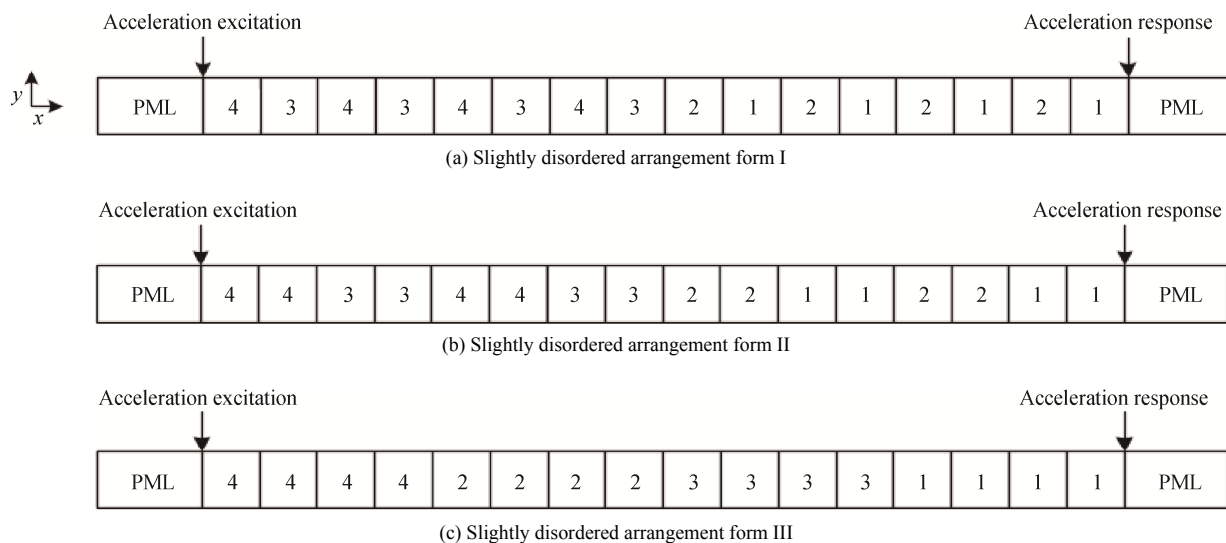


图8 3种轻度无序排列形式声子晶体传输损失计算模型简图

Fig. 8 Schematic diagram of calculation model of transmission loss of phononic crystals with three mild disordered arrangements

本工作计算了如图9所示3种轻度无序排列形式声子晶体传输损失曲线(有标记号实线), 并与有序及完全无序排列计算结果对比。由图9可知, 当16个声子晶体采用3种轻度无序排列形式时, 计算得到的衰减频域及最大衰减幅度相比有序排列基本保持不变。由此可见, 设计的新型蹦床声子晶体在阵列下的激励衰减能力对声子晶体的轻度无序排列不敏感并具有鲁棒性, 这是由于新型蹦床声子晶体采用单相材料, 其基板柔顺性相比柱体结构差别不大。对于完全无序排列形式, 可采用的调整蹦床声子晶体柱体高度即单胞质量的方式, 使原本有序阵列在更宽频域内引入的惯性力减小, 导致逆彩虹捕获现象的出现。如何设计指定衰减频域及最大衰减幅度的彩虹捕获声子晶体阵列, 将是未来该方向研究的重点与难点。

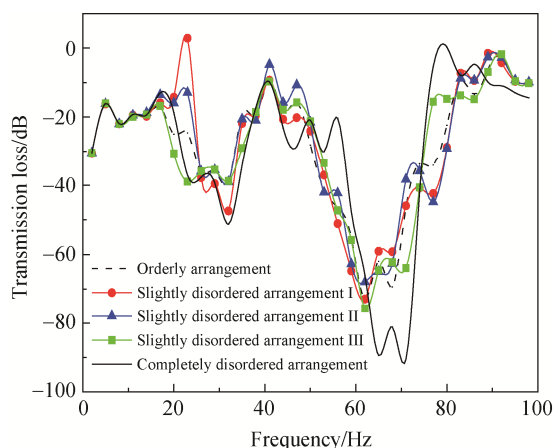


图9 有序及多种无序声子晶体排列形式下传输损失曲线
Fig. 9 Transmission loss curves of ordered and disordered phononic crystals

4 结论

为研究单相材料蹦床声子晶体及其有序与无序阵列形式下的彩虹捕获效应, 设计了新型蹦床声子晶体单胞, 计算了其能带结构, 并与传统声子晶体对比, 进而选择通过调整柱体结构高度的方式组成不同编号的声子晶体单元, 通过多种阵列组合形式计算了对应的传输损失曲线, 取得如下结论:

1) 计算了新型蹦床声子晶体与传统声子晶体的能带结构。结果表明, 蹦床声子晶体相比传统声子晶体带隙扩大了 2.1 倍, 选择调整柱体高度比调整被减圆半径的方式更适合蹦床声子晶体彩虹捕获效应的研究。

2) 采用蹦床声子晶体有序排列形式衰减频域相比4种单一编号蹦床声子晶体组成阵列计算结果

大幅提升, 但其最大衰减幅度显著下降, 表现出明显的彩虹捕获现象; 而随机完全无序排列形式衰减频域相比有序排列明显变窄, 其最大衰减幅度则略有提升, 表现出强烈的“逆彩虹捕获”现象, 这是现有文献鲜有报道的。

3) 采用3种轻度无序排列形式蹦床声子晶体阵列计算得到的衰减频域及最大衰减幅度相比有序排列基本保持不变, 说明所设计的新型蹦床声子晶体在阵列下的激励衰减能力对声子晶体的轻度无序排列不敏感并具有鲁棒性。

蹦床声子晶体相比传统声子晶体具有的轻质与宽频带隙特性在实际工程中具有广阔应用前景, 其利用彩虹捕获效应通过阵列形式布置于振动噪声控制对象表面(如齿轮箱体、汽车面板、高铁顶棚等)可改善目标物体NVH性能, 为今后定向设计衰减频域及最大衰减幅度的彩虹捕获声子晶体阵列提供了参考。

参考文献:

- [1] PARK S, JEON W. Ultra-wide low-frequency band gap in a tapered phononic beam[J]. J Sound Vib, 2021, 499: 115977.
- [2] WANG Q, LI J, ZHANG Y, et al. Bandgap properties in metamaterial sandwich plate with periodically embedded plate-type resonators[J]. Mech Syst Signal Pr, 2021, 151: 107375.
- [3] YANG C, ZHONG T, LI J, et al. Extended tube acoustic metamaterial: Its modeling and application to a kitchen hood[J]. Appl Acoust, 2022, 185: 108398.
- [4] IMANIAN H, NOORI M, ABBASIYAN A. Highly efficient gas sensor based on quasi-periodic phononic crystals[J]. Sens Actuat B-Chem, 2021, 345: 130418.
- [5] KHALIGH A, BAHRAMI A, GHAVIFEKR H B. Phononic crystal locally-resonant cavity for detecting vinegar acidity[J]. J Mol Liq, 2021, 343: 116972.
- [6] 张杰, 夏百战. 基于晶格缺陷的谷极化三维弹性声子晶体的拓扑界面传播特性[J]. 科学通报, 2022, 67(12): 1337–1346.
ZHANG Jie, XIA Baizhan. Chin Sci Bull (in Chinese), 2022, 67(12): 1337–1346.
- [7] 贾鼎, 葛勇, 孙宏祥, 等. 基于手性声子晶体的谷拓扑声输运[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 1172–1177.
JIA Ding, GE Yong, SUN Hongxiang, et al. Acta Acust (in Chinese), 2021, 46(6): 1172–1177.
- [8] GUO J C, LI J R, ZHANG L, et al. Wide range of wave attenuation in beam-supported stepped hybrid phononic crystals[J]. Wave Motion, 2022, 108: 102827.
- [9] PANABI E, HOSSEINKHANI A, KHANSANAMI M F, et al. Novel cross shape phononic crystals with broadband vibration wave attenuation characteristic: Design, modeling and testing[J]. Thin Wall Struct, 2021, 163: 107665.
- [10] YANG Q, SONG T, WEN X D, et al. Simulations on the wide bandgap characteristics of a two-dimensional tapered scatterer phononic crystal slab at low frequency[J]. Phys Lett A, 2020, 384(35): 126885.
- [11] ZHANG K, LUO J, HONG F, et al. Seismic metamaterials with

- cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps[J]. Eng Struct, 2021, 232: 111870.
- [12] 刘威, 何泽银, 范爱军, 等. 双侧空心不对称散射体声子晶体带隙机理[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(3): 775–781.
LIU Wei, HE Zeyin, FAN Aijun, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(3): 775–781.
- [13] ZHAO C, ZHENG J, SANG T, et al. Computational analysis of phononic crystal vibration isolators *via* FEM coupled with the acoustic black hole effect to attenuate railway-induced vibration[J]. Constr Build Mater, 2021, 283: 122802.
- [14] BILAL O R, HUSSEIN M I. Trampoline metamaterial: Local resonance enhancement by springboards[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(11): 111901.
- [15] TSAKMAKIDIS K L, BOARDMAN A D, HESS O. ‘Trapped rainbow’ storage of light in metamaterials[J]. Nature, 2007, 450(7168): 397–401.
- [16] BILAL O R, FOEHR A, DARAIO C. Observation of trampoline phenomena in 3D-printed metamaterial plates[J]. Extreme Mech Lett, 2017, 15: 103–107.
- [17] MUHAMMAD M, LIM C W. Dissipative multiresonant pillared and trampoline metamaterials with amplified local resonance bandgaps and broadband vibration attenuation[J]. J Vib Acoust, 2020, 142(6): VIB–19–1206.
- [18] ZHU J, CHEN Y, ZHU X, et al. Acoustic rainbow trapping[J]. Sci Rep-UK, 2013, 3(1): 1–6.
- [19] KRODEL S, THOME N, DARAIO C. Wide band-gap seismic metastructures[J]. Extreme Mech Lett, 2015, (4): 111–117.
- [20] BANERJEE A, DAS R, CALIUS E P. Frequency graded 1D metamaterials: A study on the attenuation bands[J]. J Appl Phys, 2017, 122(7): 075101.
- [21] 陆文佳, 毕亚峰, 贾晗, 等. 一种减小尺寸的声彩虹捕获效应结构[J]. 应用声学, 2018, 37(2): 214–219.
LU Wenjia, BI Yafeng, JIA Han, et al. J Appl Acoust (in Chinese), 2018, 37(2): 214–219.
- [22] CELLI P, YOUSEFZADEH B, DARAIO C, et al. Bandgap widening by disorder in rainbow metamaterials[J]. Appl Phys Lett, 2019, 114(9): 091903.
- [23] NEIL T R, SHEN Z, ROBERT D, et al. Moth wings are acoustic metamaterials[J]. P Nat Acad Sci USA, 2020, 117(49): 31134–31141.
- [24] CHAPLAIN G J, PAJER D, DE PONTI J M, et al. Delineating rainbow reflection and trapping with applications for energy harvesting[J]. New J Phys, 2020, 22(6): 063024.
- [25] MENG H, ELMADIH W, JIANG H, et al. Broadband vibration attenuation achieved by additively manufactured 3D rainbow hollow sphere foams[J]. Appl Phys Lett, 2021, 119(18): 181901.
- [26] WU H W, YIN Y Q, SHENG Z Q, et al. Multiband omnidirectional ventilated acoustic barriers based on localized acoustic rainbow trapping[J]. Phys Rev Appl, 2021, 15(5): 054033.
- [27] MENG H, CHRONOPOULOS D, FABRO A T, et al. Optimal design of rainbow elastic metamaterials[J]. Int J Mech Sci, 2020, 165: 105185.
- [28] ALSHAQAQ M, SUGINO C, ERTURK A. Programmable rainbow trapping and band-gap enhancement *via* spatial group-velocity tailoring in elastic metamaterials[J]. Phys Rev Appl, 2022, 17(2): L021003.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



刘威 重庆交通大学机电与车辆工程学院硕士研究生, 研究方向为车辆 NVH 控制及人工声学结构。所在课题组研究方向包括机械系统动力学及振动噪声预估与控制。



何泽银 重庆交通大学机电与车辆工程学院副院长, 工学博士/博士后, 教授, 硕士生导师。主要研究领域及学术专长: 振动噪声预估与调控、高性能传动与智能驱动。学术兼职: 国家自然科学基金评审专家、教育部学位与研究生教育发展中心专家、企业省部级重点实验室学术委员会委员、中国力学学会流体控制工程专业委员会青年专家、重庆市工程图学会理事、美国噪声控制工程学会会员、《Mechanism and Machine Theory》与《Mechanical Systems and Signal Processing》等期刊通讯评审。主持国家自然科学基金项目、国际合作项目、军队合作项目、重庆市科技局项目等 20 余项; 发表含中科院 SCI 一区 TOP 期刊论文在内的高水平论文 20 余篇; 授权发明专利 6 项(其中 2 项专利成果已授权日本 M 公司使用); 获“基于变压力角滚刀的齿轮副齿根应力计算软件”、“涡旋压缩机关键参数设计软件”等软件著作权 4 项。“高性能特种车桥关键技术及产业化”、“低排放低噪声汽车空调压缩机研制及产业化”分别获重庆市科技进步奖一等奖(3/11)、三等奖(6/7)。