

含谐振子的负泊松比超结构隔振性能研究

黄文轩, 肖正航, 王 跃

北京空间机电研究所, 北京

收稿日期: 2024年1月31日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月21日

摘 要

空间机械制冷机在轨工作的微振动是影响空间光学遥感器在轨性能的重要因素。本文针对空间制冷机微振动隔离需求, 基于二维正弦曲线负泊松比超结构, 添加谐振子提高低频隔振性能。首先针对二维正弦曲线负泊松比超材料进行参数分析, 确定二维正弦曲线负泊松比胞元的壁厚; 然后, 通过添加谐振子的方式降低隔振频率, 确定谐振子以及弹簧板的尺寸; 最后, 进行结构的隔振性能分析。结果表明, 添加谐振子能够有效提高关注频率处的隔振效率, 使得结构在所需的三个频点处的隔振效率优于80%。

关键词

低频, 隔振, 负泊松比, 谐振子, 频响分析

Research on Vibration Isolation Performance of Negative Poisson Ratio Metastructure with Harmonic Oscillator

Wenxuan Huang, Zhenghang Xiao, Yue Wang

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing

Received: Jan. 31st, 2024; accepted: Mar. 14th, 2024; published: Mar. 21st, 2024

Abstract

The micro-vibration of space mechanical cooler in orbit is an important factor affecting the performance of space optical remote sensor in orbit. In this paper, based on the two-dimensional sinusoidal negative Poisson ratio metastructure, harmonic oscillator is added to improve the low frequency vibration isolation performance of space mechanical cooler. Firstly, the parameters of metamaterial with negative sinusoidal Poisson ratio were analyzed, and the thickness of cell with

negative sinusoidal Poisson ratio was determined. Then, the vibration isolation frequency is reduced by adding harmonic oscillator, the dimensions of harmonic oscillator and spring plate are determined. Finally, the vibration isolation performance of the structure is analyzed. The results show that adding harmonic oscillator can effectively improve the vibration isolation efficiency at the frequency of concern, and the vibration isolation efficiency of the structure at the required three frequency points is better than 80%.

Keywords

Low Frequency, Vibration Isolation, Negative Poisson Ratio, Harmonic Oscillator, Frequency Response Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着空间光学遥感器的发展, 需要采用机械制冷机对核心部件进行控温成为常用手段。机械制冷机的在轨工作是在轨微振动的主要来源, 且制冷机的振动主要集中在 50 Hz、60 Hz 等低频频段[1] [2]。同时微振动会引起相机光学元件产生刚体位移和面形变化, 从而影响相机的在轨光学成像品质[3]。常见的减隔振手段主要有隔振、吸振、阻尼减振等。考虑到发射时的力学环境约束, 常规减振结构只能对中高频率振动产生减振效果, 无法满足低频减振的效果。

针对以上问题, 国内外科学家探索利用负泊松比超材料和局域共振超材料来解决对低频隔振、高支撑刚度的需求问题。具有负泊松比效应的超材料通常表现出轻质、高阻尼、吸声、隔热等物理特性[4]。其功能基元的拓扑型式包括蜂窝结构、点阵结构、旋转刚体结构、手性结构、穿孔板以及节点-纤维结构等[5]。由内六角蜂窝胞元构成的负泊松比超材料在船舶中的减振方面已经得到了很广泛的研究与应用。杨德庆[6]通过将负泊松比超材料应用到浮筏的设计, 得到具有轻量化、高隔振效果、高降噪性能的浮筏, 与传统的常规平板式浮筏相比, 轻量化超材料浮筏在发动机的工作频率为 15 Hz 能够实现 4 dB 的振级落差增益, 同时减重达 37.65%。然而其质量过重, 仍然无法满足空间制冷机隔振结构对轻量化的需求。吕亦乐[7]针对变形镜的减振需求, 用 ABS 为材料的二维与三维正弦曲线超材料实现了 1000 Hz 以下的减振, 不过其支撑刚度无法满足空间制冷机的要求。Zhengyou Liu [8]等人在 2000 年首次提出局域共振超材料的概念。而针对弹性波的衰减效果, 尽管研究人员目前探知了增大振子质量[9]和增大振子数目[10]这两种方法来增大对弹性波的衰减效果。戴隆翔[11]、江山[12]、廉紫阳[13]等人, 利用压电材料产生局域共振带隙, 抑制了超精密运动平台的微振动。赵亚平[14]针对光学载荷的微振动抑制要求, 运用电磁式动力吸振器实现最大抑制达 37.3%。

本文针对空间制冷机微振动抑制所需的低频、高刚度的要求, 基于正弦曲线负泊松比超材料, 通过增加谐振子的方式, 设计了含谐振子的负泊松比超结构, 给出了使其满足低频隔振需求。

2. 制冷机隔振需求

2.1. 制冷机隔振需求分析

空间用制冷机主要指常用的脉冲管和斯特林制冷机, 其微振动主要来源于其内水平对置压缩机的微

振动,虽然冷指部分也会有微振动,但轻量级较小,对空间相机的影响可以忽略。由于压缩机活塞在制造和安装等过程的不对称,导致其不可避免的存在振动输出[15]。且其输出的振动力是以驱动频率为基频的一系列谐波,主要表现在基频及其二倍频、三倍频上,如图1所示。同时该谐波主要出现在水平方向,即制冷机主要表现为水平方向的微振动。

微振动不会对包括制冷机在内的航天器内结构及元器件造成结构破坏,但对于高精度航天器而言,微振动将造成姿态稳定度或指向精度的下降,需要加以抑制[16]。其对空间相机的主要影响是指其会造成成像质量的下降。通常情况下,当相对像移量达到0.5像元时,像质将明显退化达到不可接受的程度。

驱动频率为44 Hz的脉冲管制冷机,要求在44 Hz、88 Hz、132 Hz这三个频点微振动量级小于0.8 N。

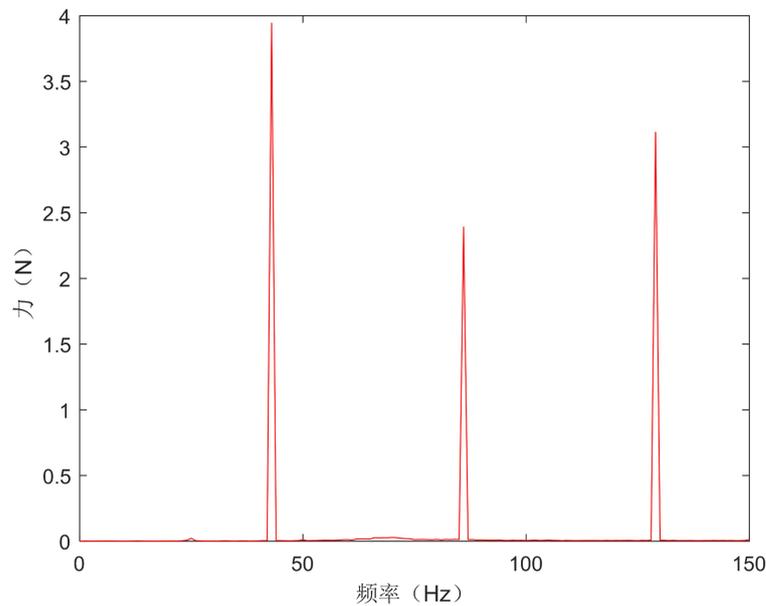


Figure 1. Microvibration frequency domain curve of 250 w pulse tube refrigerator
图1. 250 w 脉冲管制冷机微振动频域曲线

2.2. 制冷机隔振结构性能评价方法

目前常用的隔振效果评估指标有力传递率、插入损失、振级落差、功率流等。一般以力传递率作为隔振效果的理论预测依据。但是对于实际效果的测定,由于力传递率是不易测量的,因而通常采用插入损失或振级落差来评定各种实际系统的隔振效果。

本文采用插入损失 IL 的方式来进行结构减振性能的评价。插入损失定义为被隔振设备振动响应的有效值与对应基础响应的有效值之比的常用对数的20倍。本文利用结构最下方所有结点的支反力来计算隔振结构的插入损失。其表达式为:

$$IL_{ij} = 20 \log \left| \frac{F_i}{F_j} \right| (dB) \quad (1)$$

式中: IL_{ij} 为结构的插入损失; F_i 、 F_j 分别为被隔振结构无隔振时传递到基础的支反力和被隔振结构有隔振时传递到基础的支反力。 IL_{ij} 值越大,代表隔振结构的隔振效果越好;当 IL_{ij} 值出现负数时,代表结构对振动不仅没有抑制作用反而因为共振等现象造成振动的放大。在本文中,当微振动量级小于0.8 N,隔振效率优于80%时,需满足 $IL_{ij} \geq 14$ 。

3. 二维负泊松比结构设计及隔振性能分析

本文中所采用二维正弦曲线超材料胞元如图 2(a)所示。二维结构由 8 个二维正弦曲线胞元构成, 如图 2(b)所示。

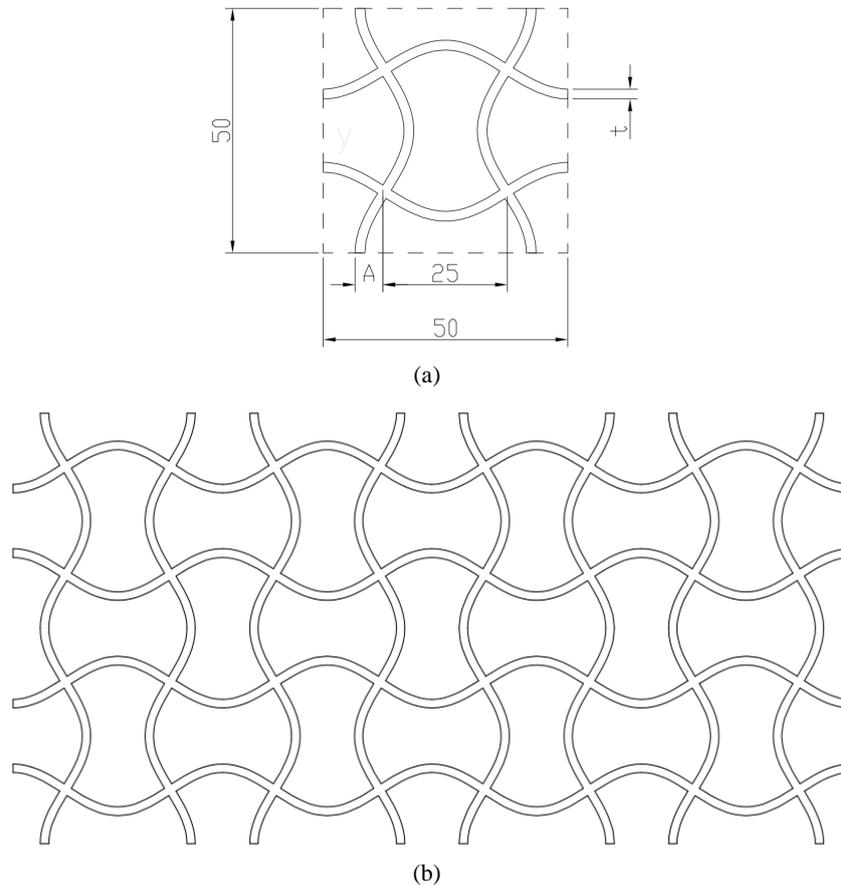


Figure 2. Metamaterial cell and structure diagram [8]

图 2. 超材料胞元和结构图[8]

正弦曲线的周期为 50 mm, 胞元幅值 A 为 5 mm。

所使用的正弦曲线的基本方程为:

$$y = 5 \sin 7.2x \quad (2)$$

该结构的整体尺寸为 $200 \times 50 \times 100$ mm。图 1 中的 t 为胞元的壁厚。

为了验证将负泊松比超材料结构应用于制冷机的减振结构的效果, 通过有限元方法, 分析结构的固有模态和频率响应。减振结构和制冷机的模型如图 3 所示。

结构采用铝合金材质, 其弹性模量 $E = 70$ GPa, 泊松比 $\gamma = 0.33$, 密度 $\rho = 2700$ kg/m³。为模拟外形尺寸, 采用 600 mm \times 600 mm \times 10 mm 的板作为工装, 并附加 20 kg 的质量来模拟制冷机的实际重量以及支撑工装的尺寸以及重量。结构的下方将 6 个自由度全部约束。

由于胞元的周期、幅值 A 和胞元的壁厚 t 均会对结构的隔振效果产生影响, 可通过参数分析方法精确设计出满足减振效果要求的结构。为简化参数分析问题的求解, 本文在胞元的周期、幅值 A 不变的情况下, 仅针对壁厚 t 这一参数进行频响分析。 t 的取值范围: 0.36 mm $\leq t \leq 0.40$ mm。

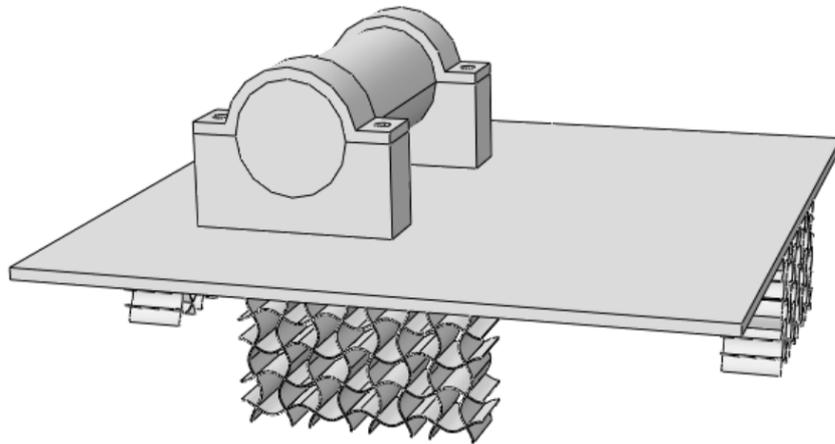


Figure 3. Vibration isolation structure model
图 3. 隔振结构模型

对板结构上的中心点施加一个简谐激励并与板的四个角进行运动耦合；并将底部所有点耦合于底部的中心，将底部固定，并采集底部的支反力作为结构隔振性能的评价点。同时，频响分析时采用模态叠加法，并赋予结构阻尼 5%。为便于比较分析频点处的隔振效果，在频点采用 10 N 的水平激励，其余频率段无激励的分析方法，以此来获得更清晰的用于分析隔振效果的曲线，其结果如图 4 所示。

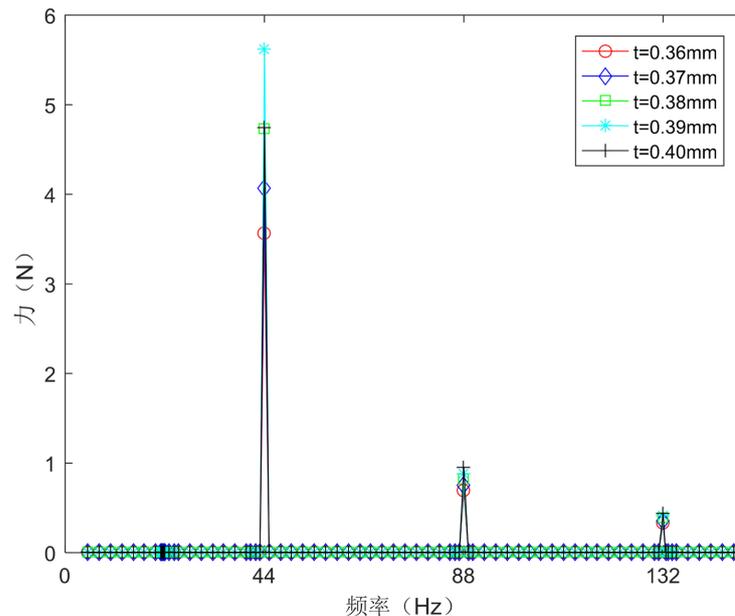


Figure 4. The results of parameter analysis of two-dimensional structure
图 4. 二维结构的参数分析结果

从图 4 所示的分析结果中可以清晰的看出，当只在所需的隔振频点给予激励时，结构能够对激励起到一定的减振效果。由于机械系统的隔振频率需大于 $\frac{\sqrt{2}}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，因此刚度越低，系统的隔振刚度越好。同时为了保证结构的支承刚度，在选取的 t 值范围内，当 t 的值为 0.36 mm 时隔振效果最优。同时由于壁厚 t 的值会对结构的共振频率有很大的影响，如图 5 所示。

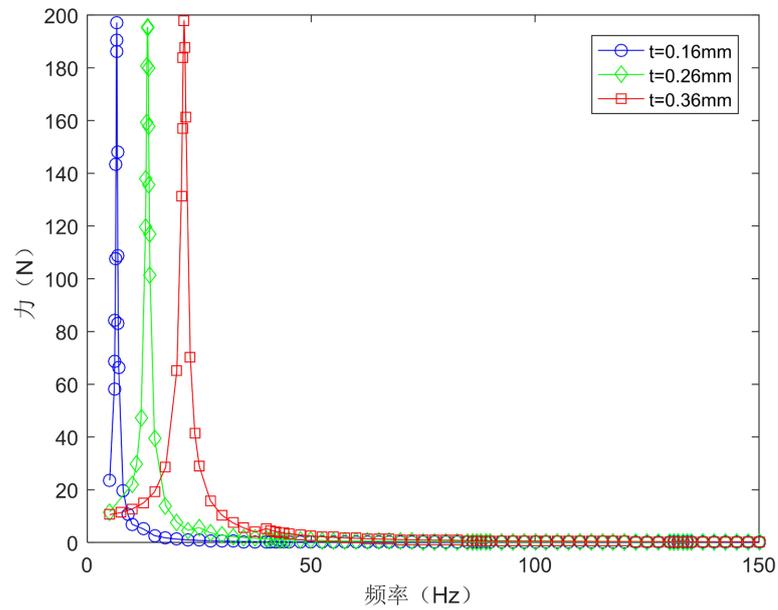


Figure 5. The resonant frequency of the structure
图 5. 结构的共振频率

从图 5 的结果可知，当 t 变小时，结构的共振峰将向低频移动，会减弱结构在主动段的承载能力，为此无法通过减小壁厚的方式，增强结构在 44 Hz 这一频点隔振效果。

当 $t = 0.36$ mm 时，在 44 Hz 附近的隔振点的减振性能， $IL = 8.95$ ，在 88 Hz 这一频点的 $IL = 23.12$ ，在 132 Hz 这一频点的 $IL = 29.43$ 。

通过以上的分析可以得出，当 $t = 0.36$ mm 时，结构在 88 Hz 以及 132 Hz 能够实现 80% 以上的隔振性能。因此后续的设计将集中在提升 44 Hz 隔振点的隔振性能。

4. 含谐振子的二维负泊松比隔振结构设计

4.1. 谐振子胞元设计与带隙理论

添加有谐振子的胞元由基体、弹性体以及散射体构成。散射体与弹性体构成类似动力吸振器，基于局域共振机理，弹性波频率接近散射体的共振频率时，弹性波的能量会被散射体吸收，从而产生隔振带隙[17]。

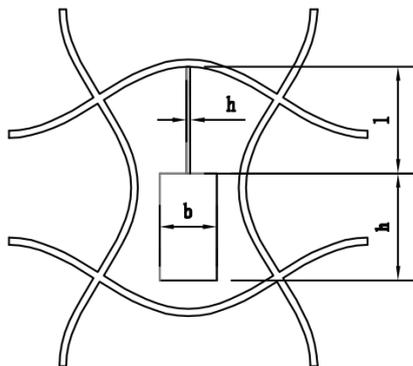


Figure 6. Harmonic oscillator cell structure
图 6. 谐振子胞元结构

本文以二维正弦曲线负泊松比胞元为基体，在单胞内添加相同材质的散射体和弹性体。谐振子结构的单胞结构如图 6 所示，散射体长度 l_s ，散射体宽度为 b_s ，厚度为 h_s ，弹性体采用铝板制成并根据梁的挠度得到等效刚度，铝板的长度为 l_t ，散射体宽度为 b_t ，高度为 h_t 。

根据梁的挠度公式：

$$W = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (3)$$

式中： F 为梁自由端所受的力， l 为梁的长度， E 为梁的弹性模量， I 为梁的截面矩。

根据矩形截面的截面矩计算公式：

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4)$$

式中： b 为梁的宽度， h 为梁的高度。

得到等效成弹簧的刚度 k 的计算公式为：

$$k = \frac{Ebh^3}{4l^3} \quad (5)$$

根据机械系统中共振频率的计算公式：

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

式中： f 是共振频率， k 是系统的弹性系数， m 是系统的质量。

得到隔振频率：

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{4ml^3}} \quad (7)$$

并且因为等效质量密度为负值的频率区间也被认为是晶格超结构的带隙范围[18]，所以当 ω 处于 ω 和 $\omega \sqrt{\frac{m+M_0}{M_0}}$ 之间时，结构能够产生隔振带隙，或隔振带隙落在此 ω 所对应的频率。即隔振带隙在 $\frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k}{m}}$ 和 $\frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k(m+M_0)}{mM_0}}$ 之间，其中 m 为散射体质量， M 为基础胞元质量。

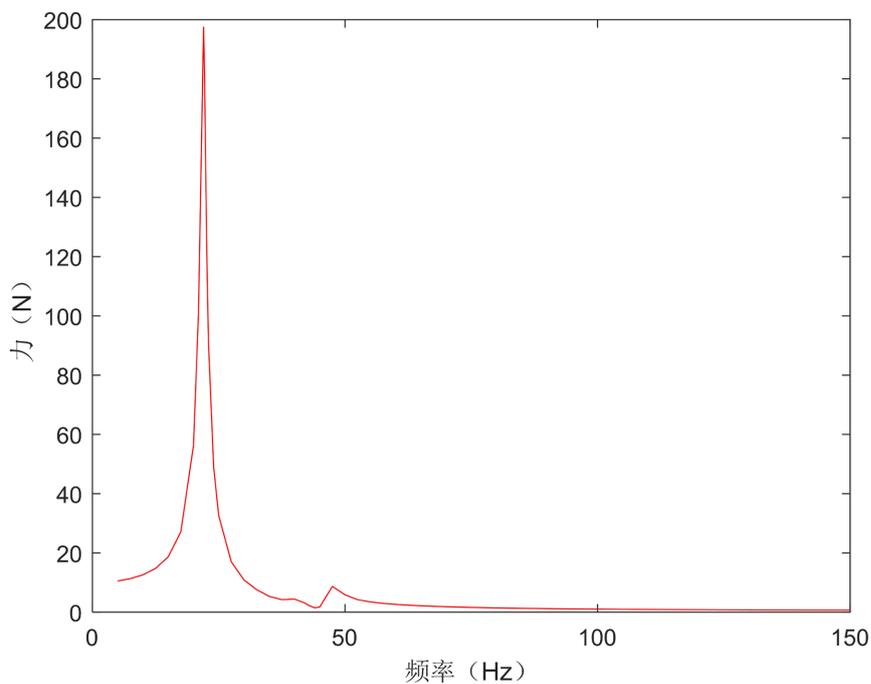
4.2. 隔振结构隔振效果分析

由于含谐振子的隔振结构减振性能受到多个因素的影响，同时由于基础负泊松比胞元的刚度会对谐振子的弹性体刚度产生影响，因此，在考虑胞元内所能嵌入的散射体体积的前提下以及满足隔振效率的条件下，利用仿真软件 Nastran 进行基于模态分析和频响分析的参数分析，得到符合要求的尺寸与结构。同时，由于分析的时候同样不需要计算六个方向上的应力，所以有限元分析时隔振的负泊松比结构依旧使用壳单元的同时，弹性体与散射体也采用壳单元结构。

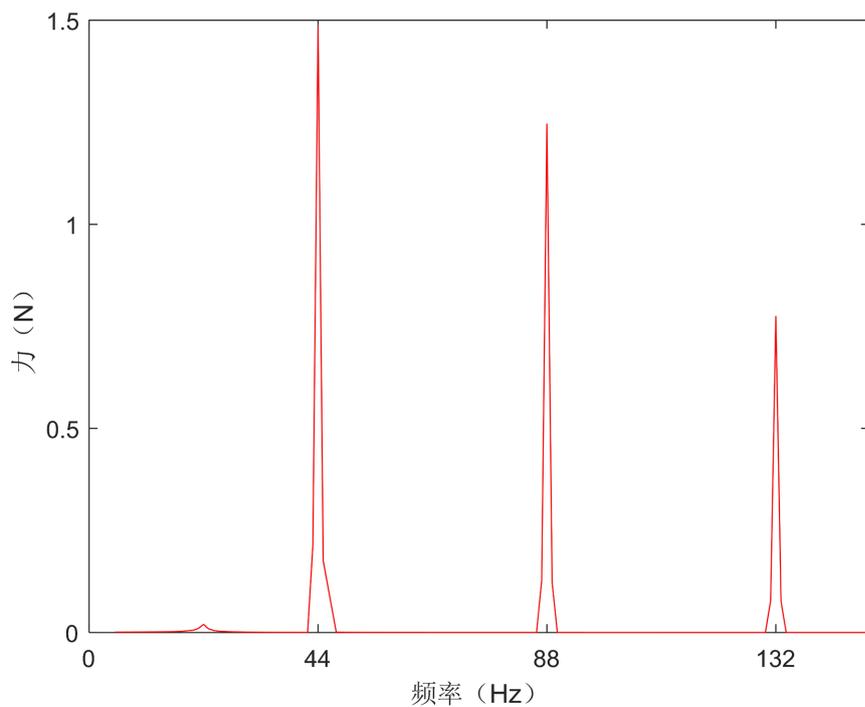
由谐振子胞元隔振机理可知，含有谐振子的减振超结构的带隙频率与谐振子的固有振动特性相关。同时由于谐振子的质量较低，其隔振频带依旧较窄，应尽可能使得其固有振动频率接近需要隔振的频点。最终结合仿真结果，确定 $h_t = 10.1 \text{ mm}$ ， $b_s = 0.41 \text{ mm}$ 。

为了对含谐振子的负泊松比超材料结构进行隔振效果验证，对整体结构进行频响分析。得到的频响分析结果如图 7(a)和图 7(b)所示。力的施加方式以及评价点的选择与基础结构的频响分析相同。隔振效

果验证包括两部分：一是 10 N 的激励，其结果如图 7(a)所示；二是在频点采用 10 N 的水平激励，频点附近 1 Hz 范围内的采用 1 N 的激励，其余频率段采用 10^{-3} N 大小的激励，以此来获得更清晰的用于分析隔振效果的曲线，其结果如图 7(b)所示。除此之外，为了体现谐振子的减振效果，将二维结构的结果与图 7(b)所得到图像进行对比分析得到图 7(c)。



(a)



(b)

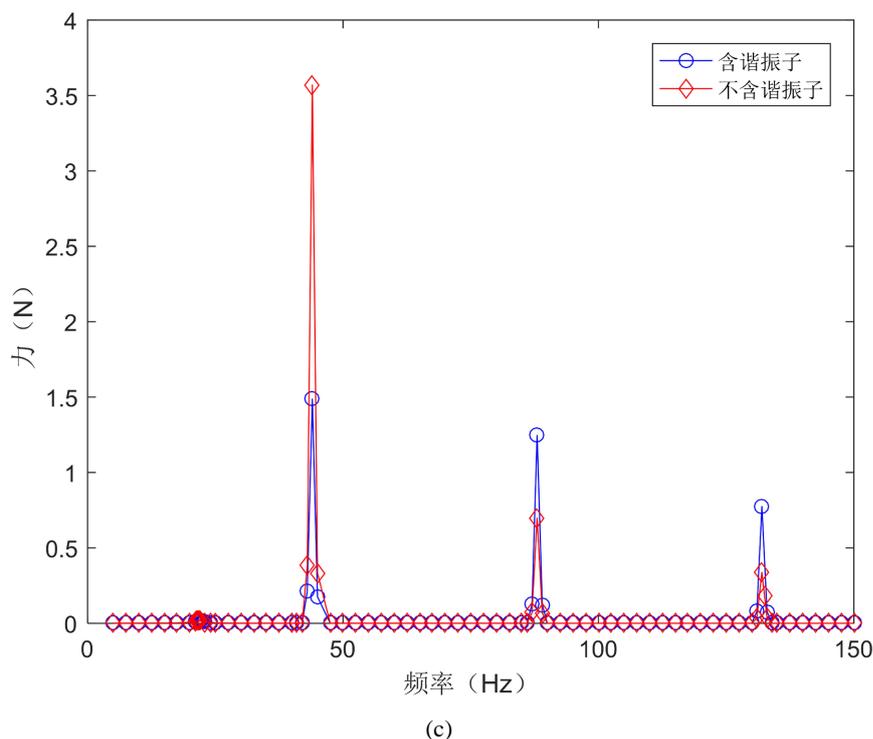


Figure 7. The results of the frequency response of the resonant structure and the comparison with the two-dimensional structure

图 7. 含谐振子结构的频率响应结果以及与二维结构的比较结果

从图 7(a)所示的分析结果中可以清晰的看出除了基础负泊松比结构所导致的共振峰外,还会在 44 Hz 之后出现新的共振峰,该共振峰是由于引入谐振子后形成的,该共振峰的形成表明谐振子的引入不仅会减小 44 Hz 这一频点的振动,同时会影响 88 Hz 以及 132 Hz 这两个频点的隔振。

从图 7(b)以及图 7(c)所示的分析结果中可以清晰的看出,当只在所需的隔振频点及一定带宽内给予激励时,结构能够对激励,尤其是相比于基础负泊松比结构在 44 Hz 这一频点上的激励起到更好的减振效果。为了量化增加谐振子的二维负泊松比隔振结构的减振效果,利用插入损失来评价结构的减振性能。

在 44 Hz 附近的隔振点的减振性能, $IL = 16.55$, 在 88 Hz 这一频点的 $IL = 18.09$, 在 132 Hz 这一频点的 $IL = 22.22$ 。

通过以上的分析可以得出谐振子的引入能够很好的提升在 44 Hz 的隔振效果,使得结构在 44 Hz、88 Hz 以及 132 Hz 均能够实现 80% 以上的隔振性能,满足隔振需求。

5. 结论

本文针对二维正弦曲线负泊松比超结构添加谐振子的微振动抑制效果进行了研究,通过合理设计谐振子弥补了二维正弦曲线负泊松比结构在某一个或某几个频点隔振能力的不足,使得含有谐振子的二维正弦曲线负泊松比隔振结构能够同时满足基频、二倍频及三倍频的隔振效果优于 80%。得到以下的结论:

- 1) 添加谐振子能够提高所需要的频点的隔振效率,即制冷机基频的振动能够得到更有效的隔离,其减振机理属于局域共振减振;
- 2) 在一定范围内,谐振子质量越大,在对应频点的隔振效果越好;
- 3) 谐振子所引入的共振峰会使得二倍频及三倍频的隔振效果减弱,不过通过合理设计可以使其依旧能够满足隔振效果优于 80% 要求。

参考文献

- [1] 王嘉登, 许银生, 刘雪瑞, 等. 星载制冷机隔振装置的设计与实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 194-198+219.
- [2] 张银, 罗高乔, 王波, 等. 空间站斯特林制冷机用磁阻尼吸振器开发[J]. 低温工程, 2022(6): 1-12.
- [3] 王跃, 王博, 刘世平, 等. 空间红外遥感相机制冷机微振动对 MTF 影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(3): 61-68.
- [4] 于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 1-14.
- [5] 张栗铭, 杨德庆. 力学与声学超材料在船舶工程中的应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 1-19+47.
- [6] 杨德庆, 夏利福. 负泊松比超材料浮筏设计与减振机理研究[J]. 中国造船, 2018, 59(3): 144-154.
- [7] 吕亦乐. 负泊松比超材料的减振性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [8] Liu, Z., Zhang, X. and Mao, Y. (2000) Locally Resonant Sonic Materials. *Science*, **289**, 1734-1736. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1734>
- [9] Cai, C., Zhou, J., Wu, L., *et al.* (2020) Design and Numerical Validation of Quasi-Zero-Stiffness Metamaterials for Very Low-Frequency Band Gaps. *Composite Structures*, **236**, Article Number 111862. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111862>
- [10] Wang, K., Zhou, J.X., Xu, D.L., *et al.* (2019) Tunable Low-Frequency Torsional Wave Band Gaps in a Meta-Shaft. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **52**, Article ID: 055104. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaf039>
- [11] 戴隆翔. 低频可调带隙周期性结构研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [12] 江山. 低频宽带隙声子晶体研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 廉紫阳. 用于抑制超精密运动平台微振动的压电声子晶体研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 赵亚平. 用于空间光学载荷微振动抑制的电磁式动力吸振器研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [15] 白绍竣, 张东风, 田大成, 等. 线性对置式压缩机非线性振动特性理论研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(1): 12-16+22.
- [16] 王凯, 周加喜, 蔡昌琦, 徐道临, 文桂林. 低频弹性波超材料的若干进展[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2678-2694.
- [17] 靳洋. 基于声子晶体的轻质蜂窝结构弹性波带隙及减振降噪研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [18] 洪颖. 局域共振嵌入式 3D 打印减振晶格超结构设计及其带隙特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2022.