

二维周期阻尼薄板结构的隔声特性

肖友刚, 陈 江

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:薄板结构中,传统大块敷设阻尼虽然能提高隔声量,但不利于轻量化设计,因此提出二维周期阻尼敷设方式,借助有限元法及 VA one 声学仿真软件,分析二维周期块状阻尼分布、形状等参数对薄板隔声特性的影响。结果表明,随着阻尼数目的增加,在 16~125 Hz 和 250~1 000 Hz 频段内,6 块阻尼敷设方式隔声量最小;全频段范围内, x 、 y 方向晶格常数均为 100 mm 时,隔声量最小。因此,在特定频段内,合理调整周期阻尼结构的晶格常数及阻尼数目能使隔声量达到最大;二维周期阻尼形状对隔声量有较大的影响,对于圆、正三角形及矩形三种特定的阻尼形状而言,圆形阻尼形状隔声效果最优。

关键词:二维周期结构;阻尼;隔声量;声学;有限元

中图分类号:TU112.4+1;TB53;TN949 **文献标识码:**A

Sound Transmission Loss of Thin Plate with Two-dimensional Periodically Bulk-damping

XIAO Yougang, CHEN Jiang

(College of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The conventional big block damping can increase the sound transmission loss of thin plate, but goes against the light weight design. Thus a two-dimensional periodically bulk-damping design is proposed in this paper. The influence of the bulk-damping parameters including distribution and shape on sound transmission loss are researched by FEM and VA one software. The results showed that the sound transmission loss was minimum with 6 damping blocks laid, at the frequency range of 16 to 125 Hz and 250 to 1 000 Hz with the increase of the number of damping blocks; while in the whole frequency band, the sound transmission loss reached the minimum when the lattice constant reached to 100 mm both in the x and y direction. So changing the lattice constant of the periodical damping structure and the damping number properly can maximize sound transmission loss in specific frequency bands. Different shapes of bulk-damping greatly influence the sound transmission loss. As for the damping shape of circle, equilateral triangle and rectangle, the circular bulk-damping possesses the best sound transmission loss.

Key words: two-dimensional periodic structure; damping; sound transmission loss; acoustics; FEM

0 引言

随着铁路交通运输业的不断发展,振动和噪声已成为影响车内旅客和车外环境的重要因素之一。阻尼的开发及应用是防止噪声声源发出噪声和阻止噪声传播的有效措施之一。

近年来,研究者发现在某些频段内,弹性波在声子晶体这类具有周期结构的材料中传播时,存在通带和禁带特性^[1-2]。围绕周期性结构的这一特性,在

薄板振动控制及声学方面已产生不少研究成果。文献[3-5]提出了一、二维周期性阻尼结构在薄板声辐射及低频带隙中的应用。文献[6-7]从一维周期阻尼质量块角度,研究了不同形状阻尼质量及阻尼质量块安装位置对抑制结构振动的影响。P. Aumjaud 等^[8]对蜂窝三明治板结构中各类敷设弹性阻尼方式的模态损耗系数及振幅响应作了深入的探讨。M. -A. Boucher 等^[9]在蜂窝三明治板的胞元结构中插入阻尼,证明了部分敷设阻尼方式优于全部敷设

收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975289,51275531);中国博士后科学基金特别资助项目(201104514);湖南科技计划基金资助项目(2013GK3004)

作者简介:肖友刚(1970-),男,湖南武冈人,教授,博士生导师,主要从事振动及噪声控制、设备状态监测及故障诊断方面的研究。通信作者:陈江(1990-),男,湖南湘潭人,硕士生,主要从事载运工具运用工程及智能控制的研究。E-mail:1025406496@qq.com。

阻尼。X. Q. Zhou 等^[10]分析了层芯为周期阻尼结构的三明治板在不同频段下的阻尼损耗因子。

目前对周期阻尼结构隔声特性的研究较少,大多集中在结构振动带隙及阻尼薄板结构形式优化方面,针对二、三维周期阻尼结构隔声特性研究尚显不足。本文在特定薄板上敷设二维周期阻尼结构,探讨结构参数对此类结构隔声特性的影响,得出其影响规律。

1 理论模型

1.1 结构振动有限元模型

在构造周期阻尼结构薄板有限元模型时,假设阻尼块和薄板具有相同的弯曲变形,且都遵循薄板变形理论。在基板上附加沿 x 、 y 方向的周期阻尼结构,周期阻尼结构与基板表面贴合,无相对移动或滑动。相邻周期结构在 x 、 y 方向的间距分别为 L_x 、 L_y ,其结构模型示意图如图 1 所示。基板表面附加的周期阻尼结构可以是任意形状,图中为本文分析的几种胞元周期阻尼结构形状。

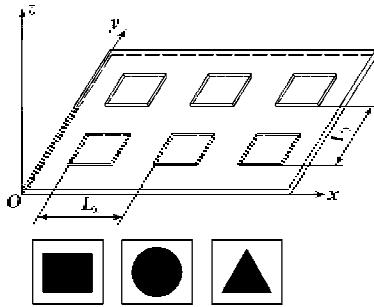


图 1 二维周期阻尼薄板结构示意图

二维周期阻尼薄板结构在简谐力的作用下,其振动方程为

$$(\mathbf{K} + j\omega\mathbf{C} + \omega^2\mathbf{M})\mathbf{u}(\omega) = \mathbf{f}(\omega) - \mathbf{F}_{mn}(\omega) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{M}$ 分别为结构的阻尼、刚度和质量矩阵; ω 为圆频率, $\mathbf{u}(\omega)$ 为结构振动位移; $\mathbf{f}(\omega)$ 为外部激励载荷; $\mathbf{F}_{mn}(\omega)$ 为阻尼阵列第 m 行, n 列周期阻尼块与基板的相互作用力。对式(1)进行求解,首先必须得到 $\mathbf{F}_{mn}(\omega)$ 的解析式,但由于周期阻尼形状的多样性, $\mathbf{F}_{mn}(\omega)$ 的解析式难以统一,因此,采用有限元思想将周期阻尼结构进行离散。每个周期阻尼结构关于离散节点的振动方程为

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} + \omega^2 \begin{bmatrix} M_{aa} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C_{aa} & 0 \\ 0 & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_s^{m,n} \\ \mathbf{q}_{in}^{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_s^{m,n} \\ \mathbf{p}_{in}^{m,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标 a 、 b 为对应整体矩阵的行与列, K_{aa} 、 K_{ab} 分别为刚度矩阵 a 行 a 列与 a 行 b 列的元素,同理, $\mathbf{M}$ 与 $\mathbf{C}$ 也采用同样的表示方法。 $\mathbf{q}_s^{m,n}$ 、 $\mathbf{p}_s^{m,n}$ 分别为周期阻尼与基板接触面上位移向量和载荷向量; $\mathbf{q}_{in}^{m,n}$ 、 $\mathbf{p}_{in}^{m,n}$ 分别为周期阻尼内部节点的位移向量和载荷向量。在总体刚度矩阵中,周期阻尼内部节点作用力相互抵消,因此 $\mathbf{p}_{in}^{m,n} = 0$ 。对式(2)进行变换得到

$$\mathbf{q}_{in}^{m,n} = -(\mathbf{K}_{bb} + \omega^2\mathbf{M}_{bb} + j\omega\mathbf{C})^{-1} \mathbf{K}_{ba} \mathbf{q}_s^{m,n} \quad (3)$$

有限元单元采用正六面体网格,每个节点位移由 u 、 v 、 w 方向的位移组成,结合式(2)、(3)可得接触面节点载荷与位移向量的关系式

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uv} & K_{uw} \\ K_{vu} & K_{vv} & K_{vw} \\ K_{wu} & K_{wv} & K_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{m,n} \\ \mathbf{v}^{m,n} \\ \mathbf{w}^{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u^{m,n} \\ \mathbf{f}_v^{m,n} \\ \mathbf{f}_w^{m,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}^{m,n}$ 、 $\mathbf{v}^{m,n}$ 、 $\mathbf{w}^{m,n}$ 和 $\mathbf{f}_u^{m,n}$ 、 $\mathbf{f}_v^{m,n}$ 、 $\mathbf{f}_w^{m,n}$ 分别为接触面节点 x 、 y 、 z 方向位移向量和载荷向量。由于薄板和周期阻尼块在接触面节点无相对滑动或移动,因此接触面节点位移向量和载荷向量中的元素为

$$\begin{cases} u^{m,n}(s) = u(mL_x + x_s, nL_y + y_s, h) \\ v^{m,n}(s) = v(mL_x + x_s, nL_y + y_s, h) \\ w^{m,n}(s) = w(mL_x + x_s, nL_y + y_s) \\ f_w^{m,n}(s) = f(mL_x + x_s, nL_y + y_s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_w^{m,n}(s)$ 为周期阻尼结构对基板的法向节点力; x_s 、 y_s 为接触面第 s 个节点的坐标值, $s = 1, 2, 3, \dots, T$, 其中 T 为每个周期阻尼块总离散节点数; h 为薄板厚度。结合式(4)、(5),接触面节点位移和节点力之间的关系为

$$f_s^{m,n} = \sum_{r=1}^T (k_{s,r}^{uu} u_r^{m,n} + k_{s,r}^{uv} v_r^{m,n} + k_{s,r}^{uw} w_r^{m,n}) \quad (6)$$

为了表达简洁,将 $f_w^{m,n}(s)$ 、 $u^{m,n}(s)$ 表示为 $f_s^{m,n}$ 、 $u_s^{m,n}$; v 、 w 方向也采用同样的表达方式。 $k_{s,r}^{uu}$ 为式(4)中矩阵 $\mathbf{K}_{uu}$ 第 s 行 r 列的元素值。综合式(2)~(6)可得

$$\mathbf{F}_{mn}(\omega) = \sum_{s=1}^T f_s^{m,n} \delta(x - mL_x - x_s) \delta(y - mL_y - y_s) \quad (7)$$

式中 δ 为狄拉克 δ 函数。

1.2 声学理论模型

将式(7)代入式(1)可得薄板振动位移为

$$\mathbf{u}(\omega) = [\mathbf{f}(\omega) - \mathbf{F}_{mn}(\omega)] / (\mathbf{K} + j\omega\mathbf{C} + \omega^2\mathbf{M}) \quad (8)$$

对 $\mathbf{u}(\omega)$ 求一阶导即可得到薄板表面的法向振

动速度分布 $u'(\omega)$ 。已知薄板 A 表面任意一点 r_A 的法向振动速度,通过瑞利积分得到空间声场的辐射声压为

$$p(r) = \int_A \frac{j\omega\rho u'(\omega)e^{-i\omega R}}{2\pi R} dS \quad (9)$$

式中: R 为声场任意一点到薄板上一点 r_A 的垂直距离; dS 为面积分; ρ 为介质密度。将式(8)求导代入式(9)即可得到空间任意一点声压关于频率、刚度、质量和阻尼的关系。

声波在传播过程中遇到矩形薄板时,由于薄板阻抗特性的变化,会使传播的声能量一部分被反射,一部分被薄板吸收,剩下的部分则透过薄板传播到另一空间。透射的声能量总小于入射时总的声能量,这种由于障碍物引起的传播声能量的损失称为隔声现象。隔声量的大小为

$$TL = 10 \lg \frac{p_i^2}{p_t^2} \quad (10)$$

式中 p_i 、 p_t 分别为入射声压和透射声压。将式(9)代入式(10),结合前面有限元所求振动位移即可求得薄板隔声量。

2 仿真模型建立及计算

本文主要利用有限元法探讨敷设二维周期阻尼结构对薄板隔声特性的影响。其中阻尼系数设为 30%,计算频段为 16~1 000 Hz,薄板四边均固定,在板上施加半无限大声场激励,声压为 1 Pa,如图 2 所示。

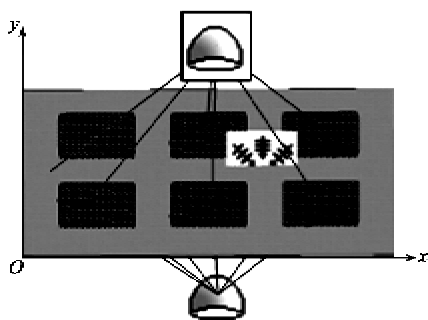


图2 二维周期阻尼薄板声学模型

图2中基板长为1 000 mm,宽为600 mm,厚为2 mm,材料为铝。其中矩形深色部分为阻尼橡胶材料,厚为1 mm,具体参数如表1所示。

表1 材料参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比	阻尼系数
铝板	2 700	7.1×10^{10}	0.33	0.01
橡胶	1 100	2.3×10^9	0.49	0.14

3 计算结果分析

3.1 晶格常数隔声特性影响

二维周期阻尼结构的晶格常数分为 x 、 y 方向,无论采用何种阻尼分布方式,阻尼与阻尼间的间距均保持均匀分布。为分析不同晶格常数对薄板隔声特性的影响,现保持一个方向的晶格常数为 100 mm,另一个方向晶格常数均匀增加,结果如图 3 所示。

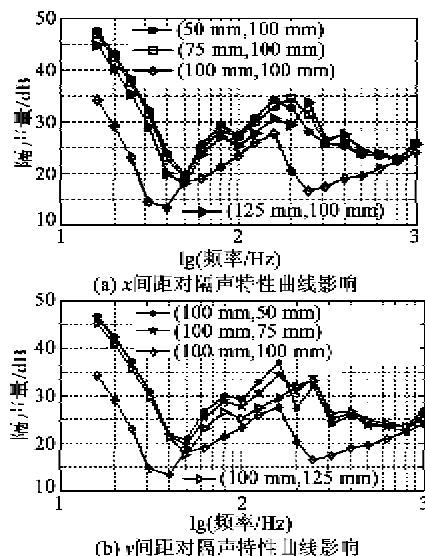


图3 x 、 y 间距对隔声特性曲线影响

在 x 方向,随着晶格常数的增大,隔声量先减小后增大; y 方向也符合同样的趋势。另外,在 x 方向总体尺寸大于 y 方向总体尺寸的前提下,在 100~200 Hz 之间,改变 y 方向的晶格常数对隔声量的效果更明显。在整个频率段内, x 、 y 方向的间隔都为 100 mm 时隔声量最小,且隔声量“低谷”频率相对于其他三类情况向左移动 10 Hz。

改变 x 、 y 方向的间距,即改变胞元中基板的尺寸,在周期阻尼块面积不变的情况下,晶格常数增大会导致胞元阻尼填充率下降。随着胞元阻尼填充率增大,带隙宽度呈先增大后减小的趋势,从而导致隔声量随着晶格常数变化呈现相同的趋势。

3.2 周期阻尼数量对隔声特性的影响

图4为不同阻尼数目下隔声特性曲线。由图可知,16~150 Hz 频段内,3 块阻尼敷设隔声效果最好;150~630 Hz 频段内,12 块阻尼敷设隔声效果最好。保持敷设面积不变情况下,增加敷设阻尼数目,隔声量在一定频段内下降,这是因为在 x 方向结构周期数过多导致 x 方间距过小,二维周期块状

阻尼转变为一维条状阻尼结构,没有体现二维周期阻尼结构的特性,因此隔声量下降。

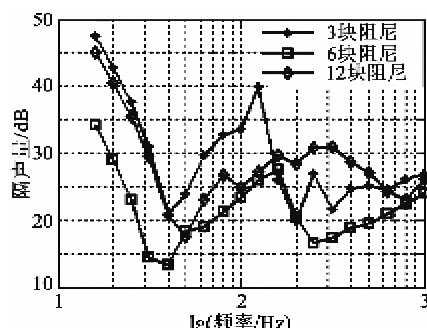


图4 不同阻尼数目下隔声特性曲线

3.3 周期阻尼形状对隔声特性的影响

对于正三角形、圆形及矩形3种不同形状的阻尼,在16~63 Hz及160~1 000 Hz频率段内,圆形的隔声效果优于正三角形,正三角形的隔声效果又优于矩形,如图5所示。圆形阻尼的“低谷”频率相较于矩形向右移动了23 Hz,拓宽了降噪的频率范围,且“低谷”区最低隔声量提高了1.25 dB。在频率为250 Hz时,圆形阻尼与矩形阻尼最大隔声量相差10.94 dB。

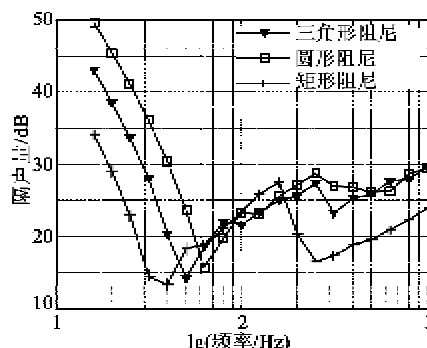


图5 不同阻尼形状下隔声特性曲线

不同形状阻尼结构对隔声量影响不同,主要是因为阻尼结构形状对基板振动波的传播抑制效果不同,从而导致二维周期阻尼薄板结构的振动和辐射声压不同。从声子晶体的角度考虑,当基板密度大于阻尼密度时,第一带隙宽度会随阻尼块取向角的增大而减小,取向角又与周期阻尼块对称性相关。对于以上3种形状而言,矩形阻尼块取向角最大,圆形阻尼最小,因此,圆形周期阻尼薄板结构形成的带隙宽度大,隔声效果好。

4 结论

本文先对薄板敷设二维周期阻尼结构进行理论分析,然后建立有限元模型,分析各结构参数对该结

构的隔声量影响,得到如下结论:

1) 晶格参数增大,隔声量先减小后增大。合理布局周期阻尼块在两个方向的位置,可以在需要的频段内最大限度提高结构的隔声量。对于 x 方向总体尺寸小于 y 方向总体尺寸的薄板,改变 y 方向的晶格常数对隔声量的效果更明显。

2) 阻尼敷设面积一定的前提下,阻尼数量不是越多越好,阻尼数量增加时,同样也符合隔声量先减小后增大的规律,这主要是阻尼均匀分布导致间隙过小,从而无法体现二维阻尼优势造成的。因此合理优化周期阻尼数量,防止阻尼间距过小,能提高薄板结构的隔声量。

3) 在圆形、正三角形和矩形三类周期阻尼形状中,圆形阻尼的隔声效果最好,不仅拓宽了降噪的频率范围,还在一定频率范围内增加了隔声量。

参考文献:

- [1] 朱兴一,钟盛,叶安珂,等.声子晶体禁带特性及局域共振现象的试验研究[J].人工晶体学报,2014,43(11):2852-2859.
ZHU Xinyi, ZHONG Sheng, YE Anke, et al. Experimental study on band gap properties and local resonance phenomenon of phononic crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(11): 2852-2859.
- [2] 何宇濠,靳晓雄.二维复合结构声子晶体的振动特性与实验研究[J].噪声与振动控制,2013,33(6):66-71.
HE Yuyang, JIN Xiaoxiong. Theoretical and experimental study on vibration characteristics of phononic crystals with two-dimensional composite structure[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(6): 66-71.
- [3] 陈源,陈浩杰,田丰,等.条形阻尼敷设方式对薄板声辐射特性影响的讨论[J].声学技术,2013,32(5):411-415.
CHEN Yuan, CHEN Haojie, TIAN Feng, et al. Discussion on effect of damping strips' laying mode on acoustic radiation performance of plate structure[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(5): 411-415.
- [4] 陈源,田丰,周敬东,等.敷设二维周期块状阻尼结构的薄板声辐射数值计算[J].噪声与振动控制,2014,34(1):92-94.
CHEN Yuan, TIAN Feng, ZHOU Jingdong, et al. Numerical calculation for sound radiation of thin plate with two-dimensional periodically distributed bulk-damping[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(1): 92-94.

(下转第93页)