

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.021

基于声子晶体的周期性基础机器振动波 衰减性能分析

赵春风, 李昊哲, 元世新, 周致远, 储孝辰, 卢宗泽

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章利用 COMSOL 多物理场程序计算不同参数周期性基础的衰减域特性, 探讨周期性基础对机器振动波的衰减和阻隔作用。利用商业有限元 ABAQUS 软件建立周期性基础机器振动有限元模型, 对不同厚度、材料的周期性基础模型进行频域分析, 得到周期性基础的频散关系; 通过时程分析研究周期性基础机器的动力响应和振动衰减效果。结果表明: 当输入波的频率处于周期性基础频率带隙内时, 可以有效地减小上部机器的动力响应; 当输入波的主频处于周期性基础频率带隙外时, 无法减小上部机器的动力响应; 不同厚度和材料的周期性基础的带隙以及对于上部机器振动的减振效果不同。研究结果为周期性基础在工业厂房机器减振中的应用提供了新的思路和方法。

关键词: 振动衰减; 声子晶体理论; 周期性基础; 频率带隙; 时程分析

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)06-0856-09

Analysis of attenuation performance of machine vibration wave with periodic foundation based on phononic crystal theory

ZHAO Chunfeng, LI Haozhe, YUAN Shixin, ZHOU Zhiyuan, CHU Xiaochen, LU Zongze
(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The attenuation domain characteristics of the periodic foundation with different parameters are analyzed by using COMSOL Multiphysics, and the attenuation and blocking effects of periodic foundation on machine vibration wave are discussed. Using commercial finite element software ABAQUS, the finite element model of periodic foundation machine vibration was established. The frequency domain analysis of periodic foundation model with different thickness and materials was carried out, and the frequency dispersion relationship of periodic foundation was obtained. The dynamic response and vibration attenuation effect of periodic foundation machine were studied by time history analysis. The results show that the dynamic response of the upper machine can be reduced effectively when the frequency of the input wave is within the band gap of the periodic foundation frequency. When the main frequency of the input wave is outside the band gap of the periodic foundation frequency, the dynamic response of the upper machine cannot be reduced. The band gap of the periodic foundation of different thicknesses and materials and the damping effect on the vibration of the upper machine are different. This study provides a new idea and method for the application of periodic foundation in machine vibration reduction of industrial buildings.

Key words: vibration attenuation; phononic crystal theory; periodic foundation; frequency band gap; time history analysis

收稿日期: 2023-01-04; **修回日期:** 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278302); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020EEEVL0404)

作者简介: 赵春风(1983—), 男, 内蒙古察右中旗人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师。

0 引 言

随着我国经济的快速发展,大型机械设备得到广泛应用,工业厂房中大型机械设备的运行过程中会产生竖向的振动,严重时可能会引起机器与楼板的共振,特别是重要的设施对机器振动更加敏感。设备运行引起的振动若不加控制,一方面可能会使楼板产生共振,降低工作人员的舒适感,影响生产;另一方面甚至使楼板产生裂缝,导致结构破坏,造成安全隐患^[1-3]。因此,采取有效的减振措施减小机器振动对工程结构的影响,保证舒适度具有非常重要的意义。减小机器振动传播过程中的能量是一种解决重型机器振动一系列问题的有效方法。

目前,机器振动减弱常用的减振装置为调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)^[4],且已经广泛应用于各类结构的楼板振动控制中,TMD是由质量块、阻尼单元、弹簧系统和支座系统等部分组成的单自由度系统。通过 TMD 和机器的相互作用,可以将振动能量由机器传至 TMD,从而减小主体结构振动幅度。要发挥更好的振动控制效果就必须增大质量块的质量,然而质量块的质量过大会对主结构产生不利影响。

通过在机器设备支座底部设置隔振器、隔振垫或者其他隔振元件,减小机器振动响应的方法存在橡胶材质不耐高温、易受油质和其他化学物质腐蚀等缺点。因此亟需开发一种新型隔振技术,提出新型机器隔振装置。

近年来,固体物理学中对基于声子晶体理论的周期性结构的研究发现,通过设计的周期性材料对波具有选择性透过作用,这是周期性结构不同于其他结构的一个特性^[5]。受此启发,声子晶体的概念被引入土木工程领域,文献^[6]提出周期性隔振基础的概念,利用其带隙特性阻隔水平和垂直方向上的地震波和振动波。

文献^[7-8]通过试验和数值模拟的方法研究周期性基础的衰减域特性,研究表明周期性基础对符合带隙特性的弹性波具有很好的振动衰减特性。上述研究为周期性基础从数值模拟走向实践提供了参考。本文利用碳钢、橡胶、黄铜、PVC0.007构成周期性基础,同时使用有限元软件建立周期性基础和上部机器的整体模型,通过频散分析方法研究材料和厚度等参数对周期性基础带隙的影响,最后通过时程分析探究周期性基础对机器振动的衰减效应。

1 周期性基础带隙频散关系

1.1 周期性基础及带隙

周期性基础是指由 2 种或 2 种以上材料组成、在空间上呈周期性排列的结构。周期性基础具有特殊频散曲线,其中频散曲线之间的频率范围称为带隙。当振动波频率在带隙范围内时,振动将被阻隔或反射;处于带隙频率外的振动波可以在周期性基础中传播,此即周期性基础带隙特性^[9-10]。

1.2 周期性基础频散关系

一维周期性基础及典型单元如图 1 所示。假设该结构在 $x-y$ 平面内可以无限延伸,沿 z 轴方向选取 2 种材料进行周期性排列,并且 2 种材料界面完全绑定。取 $x-z$ 平面内 z 方向的简谐波 S_x 进行研究,分析其频散特性^[11]。

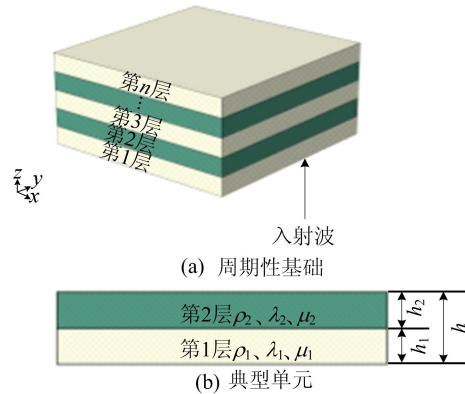


图 1 一维周期性基础及典型单元

设 u 为质点在第 n 层沿 x 方向的振动位移与局部坐标, C_n 为波速, t 为时间。剪切波 S_x 的控制方程为:

$$\frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = C_n^2 \frac{\partial^2 u_n}{\partial z_n^2} \quad (1)$$

其中: u_n, z_n 分别为第 n 层单元的竖向位移和位置。

可以利用传递矩阵法得到理想层状周期性结构的频散关系。首先求解成层状周期性基础的 2 种材料在各自坐标系下的波动方程,从而得出其位移函数;然后考虑单元边界条件并带入位移函数,得到理想周期性基础的频散方程^[12],即

$$\cos(kh) = \cos\left(\frac{\omega h_1}{C_1}\right)\cos\left(\frac{\omega h_2}{C_2}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_1 C_2}{\mu_2 C_1} + \frac{\mu_2 C_1}{\mu_1 C_2}\right) \sin\left(\frac{\omega h_1}{C_1}\right)\sin\left(\frac{\omega h_2}{C_2}\right) \quad (2)$$

其中: C_n 为材料的剪切波波速; k 为波数; h_n 为第 n 层单元厚度。

采用工程中常用的碳钢与橡胶材料构造层状周期性基础。钢材的密度、杨氏模量和泊松比分别为 $7\ 850\ \text{kg/m}^3$ 、 $115\ \text{GPa}$ 、 0.230 ；橡胶的以上 3 个参数分别为 $1\ 300\ \text{kg/m}^3$ 、 $147\ \text{kPa}$ 、 0.463 。经过前期预分析,碳钢层与橡胶层厚度均选取 $10\ \text{mm}$ 。

通过求解式(2)中的波数 k ,即可得到周期性基础的频散关系,如图 2 所示。图 2 中: f 为频率; k 为波数。

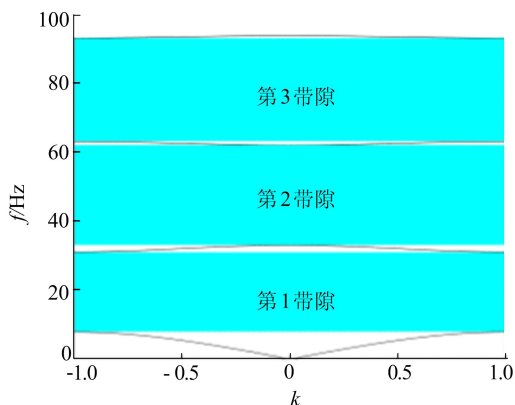


图 2 一维周期性基础频散关系

由图 2 可知,周期性基础的前 3 个带隙分别为 $7.83\sim 31.08\ \text{Hz}$ 、 $33.04\sim 62.16\ \text{Hz}$ 、 $63.19\sim 93.25\ \text{Hz}$ 。根据文献[13]可知,机器的主要振动频率在 $50\ \text{Hz}$ 以内,部分频率处于 $50\sim 100\ \text{Hz}$ 范围。上述构造的周期性基础频率带隙恰好覆盖机器振动的主要频率,因此,该周期性基础有望减小机器的振动,实现机器振动波的隔振或减振。

2 周期性基础的频散特性

周期性基础是由橡胶和钢板叠加,通过橡胶硫化而成的一种基础。本文所述标准周期性基础

由橡胶和碳钢板周期性排列叠加而成,如图 3 所示。A 层材料为碳钢,厚度为 $10\ \text{mm}$,平面尺寸为 $1\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}$;B 层材料为橡胶,几何参数与 A 层相同。

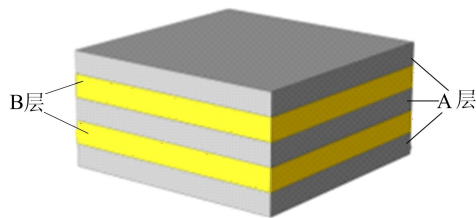


图 3 标准周期性基础模型

2.1 不同厚度周期性基础的频率带隙

周期性基础的带隙受材料厚度和物理参数的影响,因此,为了探讨不同厚度、材料的周期性基础对于机器振动的减振性能的影响规律,本节主要针对几何参数对周期性基础频散关系的影响进行分析。

2.1.1 周期性基础厚度选取

为了明确不同层厚对周期性基础减振性能的影响,保持周期性基础的总厚度($50\ \text{mm}$)不变,分别改变 A、B 层材料的厚度并对其频散关系进行分析。设计如下 3 种不同厚度的周期性基础:周期性基础 1(标准周期性基础)由 $10\ \text{mm}$ 厚碳钢层和 $10\ \text{mm}$ 厚橡胶层组成;周期性基础 2 由 $8\ \text{mm}$ 厚碳钢层和 $13\ \text{mm}$ 厚橡胶层组成;周期性基础 3 由 $12\ \text{mm}$ 厚碳钢层和 $7\ \text{mm}$ 厚橡胶层组成。

利用传递矩阵法建立上述 3 种周期性基础的频散方程,计算得到 3 种周期性基础的频散关系,如图 4 所示。

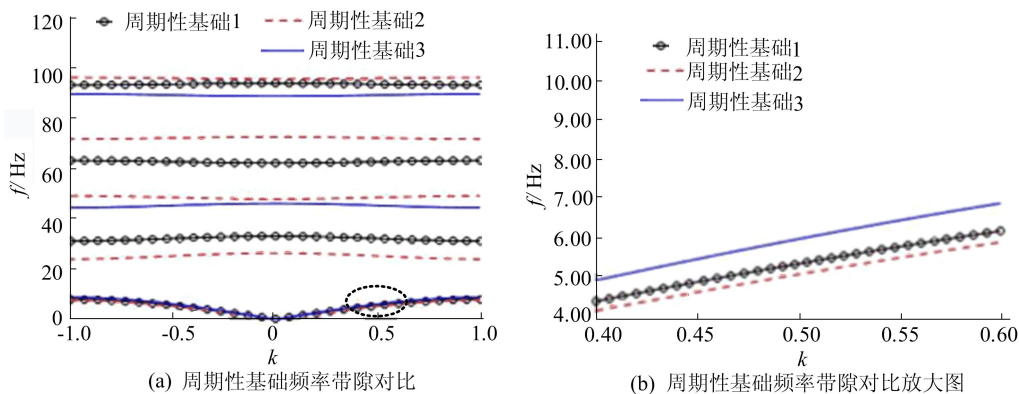


图 4 不同厚度周期性基础频率带隙对比

由图 4 可知,周期性基础 1 的前 3 阶频率带隙分别为 $7.83\sim 31.08\ \text{Hz}$ 、 $33.04\sim 62.16\ \text{Hz}$ 、

$63.19\sim 93.25\ \text{Hz}$;周期性基础 2 的 4 个频率带隙分别为 $7.56\sim 23.91\ \text{Hz}$ 、 $26.26\sim 47.82\ \text{Hz}$ 、

49.09~71.73 Hz、72.59~95.64 Hz;周期性基础 3 的 2 个频率带隙分别为 8.65~44.40 Hz、46.08~88.81 Hz。

由图 4 还可知,3 种不同层厚的周期性基础的频率带隙范围改变并不大,且 3 种周期性基础的频率带隙范围包含上述机器振动频率,可以利用此种周期性基础来阻隔机器振动,以减小结构受机器振动的影响。

2.1.2 材料对周期性基础带隙的影响

为了明确不同材料对周期性基础减振性能的影响,保持周期性基础的总厚度(50 mm)不变,分别改变 A、B 层材料并对其频散关系进行分析。不同材料组合见表 1 所列,材料的物理参数见表 2 所列。

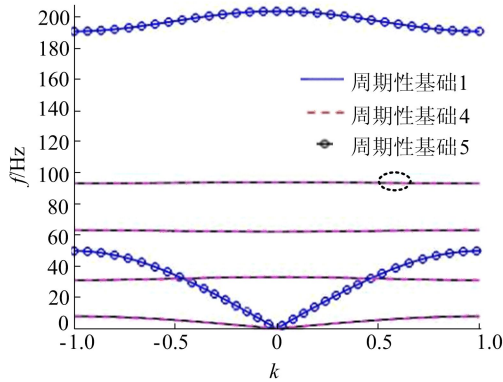
表 1 不同周期性基础的材料

层别	各对照组材料		
	周期性基础 1	周期性基础 4	周期性基础 5
A 层	碳钢	碳钢	黄铜
B 层	橡胶	PVC0.007	橡胶

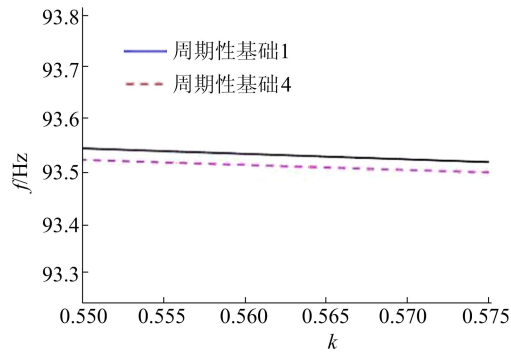
表 2 材料物理参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
碳钢	115 000	0.230	7 850
橡胶	0.147	0.463	1 300
PVC0.007	6.000	0.470	1 400
黄铜	89 000	0.350	8 500

利用传递矩阵法建立上述 3 种周期性和基础的频散方程,计算得到 3 种周期性基础的频散关系。周期性基础的频散曲线如图 5 所示。



(b) 3 种厚度周期性基础频率带隙对比



(b) 3 种周期性基础频率带隙对比放大图

图 5 不同材料周期性基础频率带隙对比

由图 5a 可知:周期性基础 1 的前 3 阶频率带隙分别为 7.83~31.08 Hz、33.04~62.16 Hz、63.19~93.25 Hz;周期性基础 4 的频率带隙为 50.14~190.89 Hz;周期性基础 5 的 3 个频率带隙分别为 7.54~31.08 Hz、32.90~61.12 Hz、63.11~92.87 Hz。由图 5b 可知,当改变周期性基础柔性层的材料时,频率带隙影响较大,此时周期性基础的第 1 带隙起始频率(50.14 Hz)超过上述大部分机器振动的频率范围,即周期性基础 4 无法阻隔大部分机器的振动。而改变周期性基础刚性层的材料时,周期性基础的频率带隙范围变化不大,且周期性基础的频率带隙范围包含上述机器振动频率,可以利用此种周期性基础来阻隔机器振动,以减小结构受机器振动的影响。

3 机器振动衰减有限元分析

3.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件分别建立含有周期

性基础和不含周期性基础的机器振动模型,通过动力特性验证周期性基础的隔振效果。

周期性基础的平面尺寸(长×宽)为 1 000 mm×1 000 mm,每层厚度为 10 mm,厚度、材料等属性见第 2 节所述。

周期性基础每层之间接触面设置绑定约束以模拟工程中的胶结。周期性基础下方布置一块长、宽、厚分别为 2 000、2 000、20 mm 的均质拉伸体作为楼板,材料为混凝土。

因为机器种类繁多,形状各异,并且其形状和质量对其产生的波引起周期性基础的动力响应没有太大的影响,所以本文采用尺寸(长×宽×厚)为 500 mm×500 mm×500 mm 的均质拉伸体作为机器,材料设定为钢材,其放置在周期性基础模型上方,并且机器与周期性基础接触面之间不设置约束作用,模拟重型机器直接放置在周期性基础上。周期性基础机器有限元模型如图 6 所示。

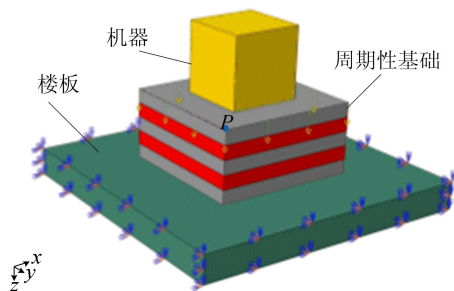


图 6 有限元模型

3.2 边界条件

本文只考虑机器在 z 方向振动对楼板的影响。楼板四周约束 x 、 y 2 个水平方向的自由度, z 方向自由, 楼板底部中心点设置测点以获取楼板的响应数据。为模拟实际工程中机器在 z 方向的振动, 频域分析时在周期性基础顶面施加沿 z 轴方向幅值为 1、增量步为 0.1 的递增式位移边界条件; 同理, 在时域分析时, 施加沿 z 轴方向、幅值为 $1g$ 的加速度, 频率为固定值。

4 机器振动频域分析

首先对含有周期性基础的机器振动有限元模型和不含有周期性基础的机器振动有限元模型进行频域分析。定义频率响应函数为:

$$f_{\text{RFR}} = 20 \lg \left(\frac{u_i}{u_0} \right) \quad (3)$$

其中: f 为频率响应函数; u_i 、 u_0 分别为模型顶部 P 点的位移幅值和输入谐波的幅值。在有限元模型频域分析时, 边界条件以及振动波的输入方法见上节。 f_{RFR} 为负值表示响应减小, 为正值表示响应放大。

4.1 厚度对模型频域的影响

通过改变周期性基础单层不同材料层的厚度, 分析该参数对周期性基础对机器振动频域的影响规律, 其位移响应如图 7 所示, 图 7 中 U 表示位移。

由图 7 可知: 机器放置在楼板上时, f_{RFR} 值等于 0, 表明机器的振动完全传递给楼板; 在 77.31、88.62 Hz 2 个频率附近其 f_{RFR} 值大于 0, 这表明楼板测得的位移响应大于输入的谐波位移幅值; 即在这 2 个频率范围内, 放置机器的楼板动力响应增大。

相反地, 周期性基础 1 由于输入波的频率大部分处于周期性基础的频率带隙(7.83~31.08 Hz、33.04~62.16 Hz、63.19~93.25 Hz)内部, 所得到的 f_{RFR} 值基本小于 0; 但在 0~4.10 Hz、

10.81~13.74 Hz、20.12~22.00 Hz 频段 f_{RFR} 值大于 0。上述结果表明周期性基础能有效阻隔频率带隙内的简谐波, 减小楼板的振动响应。当振动频率处于带隙外时, 衰减效果有限, 甚至会加强振动。

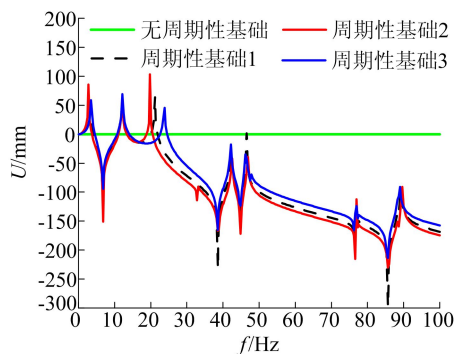


图 7 周期性基础机器振动频域分析结果

同理, 周期性基础 2 在其带隙范围内, f_{RFR} 基本小于 0, 但在 0~3.63 Hz、11.22~13.43 Hz、18.81~20.55 Hz 频段 f_{RFR} 值大于 0; 周期性基础 3 带隙范围内, f_{RFR} 值基本小于 0。但在 0~4.51 Hz、10.61~14.12 Hz、22.52~24.58 Hz 频段 f_{RFR} 值大于 0。

由图 7 还可知, 3 组周期性基础模型在相近的带隙范围内对机器振动的衰减效果不同, 如在 28.5~38.6 Hz 范围内, 隔振效果表现为周期性基础 2 优于周期性基础 1 优于周期性基础 3。

综上所述, 当外部机器振动频率处于周期性基础的带隙内时, 可以有效地衰减振动幅值; 当振动频率处于带隙外时, 衰减效果有限, 甚至会放大振动。改变周期性基础的材料厚度, 对带隙影响不大, 但是可以改变简谐波在周期性基础内部的衰减程度。

4.2 材料对模型频域影响

通过改变周期性基础不同层的材料属性, 分析该参数对周期性基础机器振动频域的影响规律。不同材料下频域对比结果如图 8 所示。

无周期性基础与周期性基础 1 的分析与 4.1 节相同。

由图 8 可知: 周期性基础 4 在其带隙内 f_{RFR} 小于 0, 但在 0~12.82 Hz、20.83~49.55 Hz、77.61~80.33 Hz、93.00~95.71 Hz、141.12~147.14 Hz 频段, f_{RFR} 大于 0; 周期性基础 5 在其带隙内, f_{RFR} 基本小于 0, 但在 0~4.14 Hz、10.86~13.43 Hz、19.53~21.41 Hz 频段内,

f_{RFR} 大于 0。

由图 8 还可知:因为周期性基础 4 的带隙处于高频段,所以在 0~50 Hz 频率范围内其对波的阻隔效果有限,反而有可能增大振动响应;周期性基础 4 对处于其带隙范围内的波具有一定的阻隔效果;周期性基础 4 与周期性基础 1 对于振动波的阻隔频域基本一致,但总体上来看,其对于带隙内振动衰减的幅度要略微大于周期性基础 1。

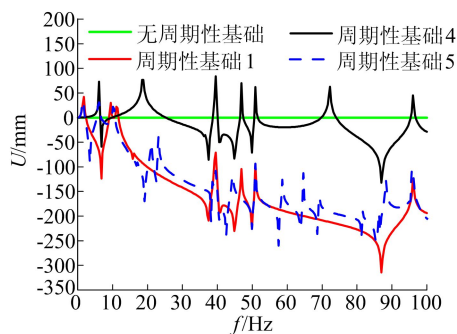


图 8 不同材料下频域对比

因此,改变周期性基础的材料对带隙产生一

定影响,不同材料组成的周期性基础对不同频率的振动波具有一定的阻隔作用。周期性基础对处于带隙内的振动波具有衰减作用,而对带隙外的振动不起作用,甚至会放大振动。

5 机器振动动力分析

本节对周期性基础 2~周期性基础 5 进行动力时程分析,验证周期性基础的衰减作用,分析不同材料属性和材料厚度的周期性基础对机器振动的减振效果。为了验证周期性基础对振动波的阻隔作用,减小阻尼对计算结果的影响,因此在动力分析中未施加阻尼。

5.1 波的选择

为分析周期性基础对在特定频率振动波的衰减作用以及衰减程度的影响规律,结合上述周期性基础的带隙以及频域对比结果。选择 4 种人工简谐波进行时程分析,波的频率分别为 10、30、60、170 Hz,简谐波持时均为 50 s,并且其加速度幅值均调整为 1g。4 种波的加速度时程曲线如图 9 所示。

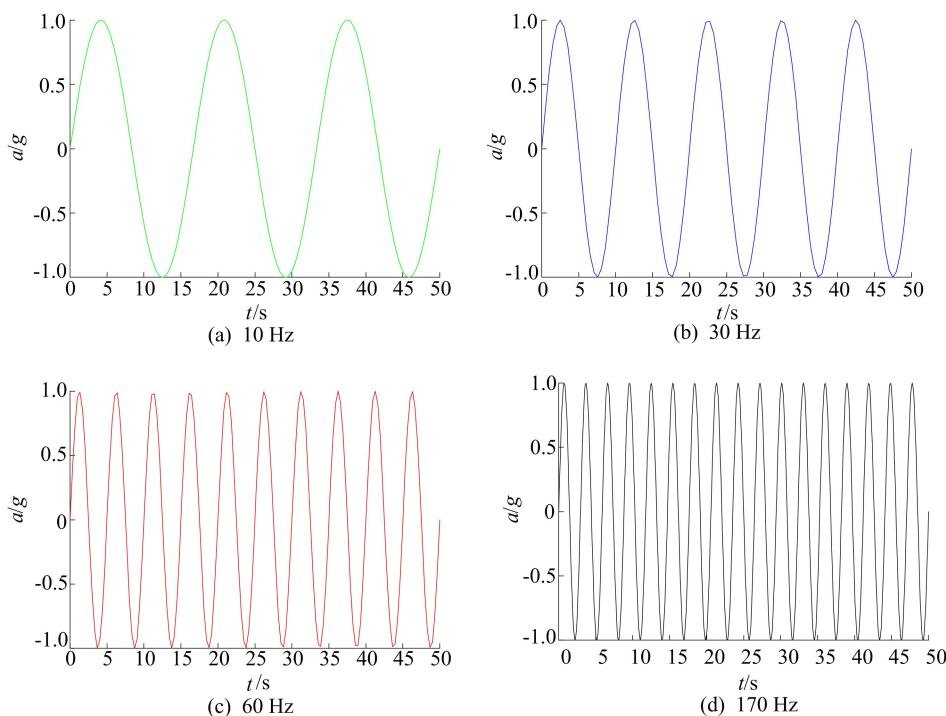


图 9 简谐波的加速度时程曲线

5.2 厚度对周期性基础动力响应的影响

由第 2 节可知,周期性基础 1~周期性基础 3 在 10、30 Hz 频段时位移明显不同,每个模型对于振动有衰减也有放大。

本节分别选取 10、30 Hz 频率的简谐波对不

同材料厚度的周期性基础进行时程分析,对比其减振效果。

5.2.1 柔性层厚度

选取周期性基础 1、周期性基础 2 进行加速度时程分析,研究在周期性基础总厚度不变时,增

加柔性层厚度对某特定频段(10、30 Hz)振动波的影响规律。加速度时程幅值为 $1g$, 持时 50 s 。周期性基础上放置的机器仍采用尺寸(长 \times 宽 \times 厚) $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的均质拉伸体, 下同。不同柔性层厚度的周期性基础加速度响应

曲线如图 10 所示。

由图 10a 可知, 在 10 Hz 振动波作用下, 无周期性基础的楼板振动加速度响应基本不变, 验证了上文所述无周期性基础时, 楼板与机器振动频率大体相等这一结论。

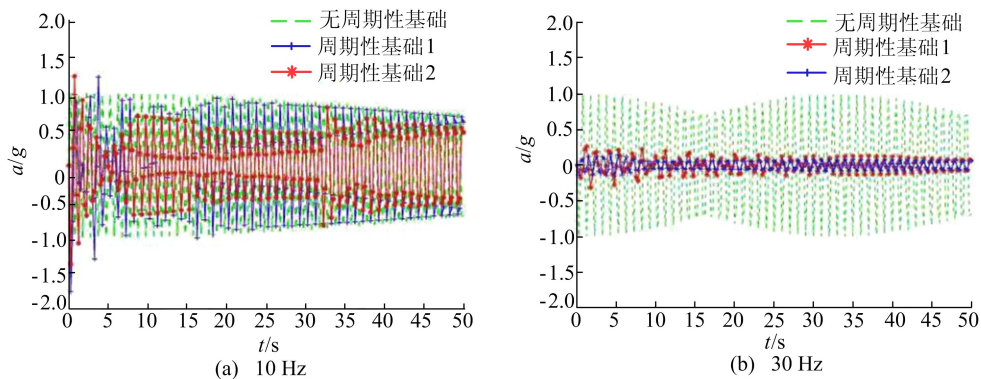


图 10 不同柔性层厚度的周期性基础加速度响应曲线

相反地, 在 10 Hz 的振动波作用下, 周期性基础 1、周期性基础 2 对于振动加速度均有衰减作用。周期性基础 1 楼板加速度约为 $0.85g$, 表明其对于楼板加速度的衰减大约是无周期性基础楼板的 85% ; 周期性基础 2 楼板加速度约为 $0.70g$, 表明其对于楼板加速度的衰减大约是无周期性基础楼板的 70% 。表明周期性基础 2 即增加基础柔性层厚度对于 10 Hz 频率段的波减振效果更好。

由图 10b 可知, 在 30 Hz 的振动波作用下, 无周期性基础的楼板振动加速度依旧变化不大。周期性基础 1、周期性基础 2 对波加速度的衰减效果更加明显。在此频率段下周期性基础 1 楼板加速度约为 $0.18g$, 表明该周期性基础楼板的加速

度大约是无周期性基础楼板加速度的 18% ; 周期性基础 2 楼板加速度约为 $0.15g$, 其对楼板加速度的衰减大约是无周期性基础楼板的 15% 。结果表明, 增加基础柔性层厚度时, 周期性基础 2 对 30 Hz 频率段的波阻隔性更好。

综上所述, 增加周期性基础的柔性层厚度, 对处于带隙频率段的简谐波具有更好的阻隔作用。

5.2.2 刚性层厚度

为研究在周期性基础总厚度不变时, 增加刚性层厚度对某特定频段(30 、 60 Hz) 振动幅度的影响, 选取周期性基础 1、周期性基础 3 进行加速度时程分析。

不同刚性层厚度的周期性基础加速度响应曲线如图 11 所示。

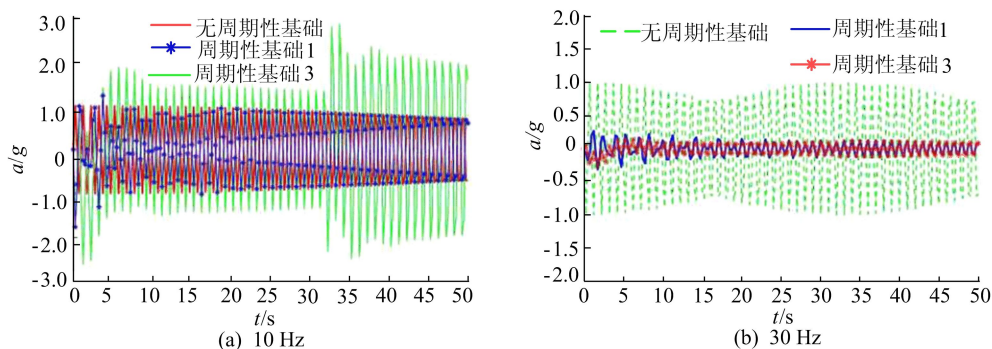


图 11 不同刚性层厚度的周期性基础加速度响应曲线

由图 11a 可知, 在 10 Hz 的振动波作用下, 无周期性基础的楼板振动加速度基本不变, 周期性基础 1 的加速度有一定的衰减, 加速度大约是无

周期性基础楼板的 85% ; 周期性基础 3 对楼板的加速度有放大作用, 加速度大约是无周期性基础楼板的 170% 。

由图 11b 可知,在 30 Hz 的振动波作用下,无周期性基础的楼板振动加速度依旧变化不大。周期性基础 1、周期性基础 3 对振动加速度的衰减效果更加明显。在此频率段下周期性基础 1 楼板的加速度大约是无周期性基础楼板加速度的 18%;而周期性基础 3 楼板的加速度大约是无周期性基础楼板的 17%。

结果表明:增加基础刚性层厚度时,周期性基础 3 对 30 Hz 频率段的波减振效果稍优于周期性基础 1。

综上所述,增加周期性基础的刚性层厚度,当外部机器振动频率处于周期性基础的带隙内时可以有效衰减波的传播,但是当波的频率处于带隙

外时则隔振效果有限,甚至可能放大振动。

5.3 材料对周期性基础动力响应的影响

由第 2 节可知:周期性基础 1、周期性基础 4 在 30、170 Hz 频段时位移明显不同;周期性基础 1、周期性基础 5 在 10、60 Hz 频段时位移明显不同。本节分别对不同材料进行时程分析以对比其减振效果。

5.3.1 柔性层材料

周期性基础厚度不变时,研究改变柔性层材料对某特定频段(30、170 Hz)振动响应的影响。选取周期性基础 1、周期性基础 4 进行加速度时程分析,不同柔性层材料的周期性基础加速度响应曲线如图 12 所示。

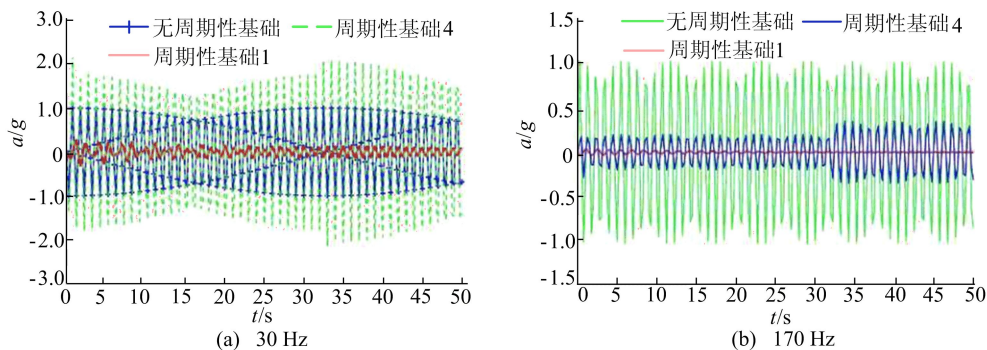


图 12 不同柔性层材料的周期性基础加速度响应曲线

由图 12a 可知,在 30 Hz 的振动波作用下,无周期性基础的楼板振动加速度在 50 s 内基本不变;周期性基础 1 的振动加速度有明显的衰减,其加速度大约是无周期性基础楼板加速度的 18%;而周期性基础 4 对楼板加速度有放大的作用,其加速度是无周期性基础楼板的 180%。

由图 12b 可知,在 170 Hz 的振动波作用下,无周期性基础的楼板振动加速度依旧变化不大。周期性基础 1、周期性基础 4 对振动加速度的衰减效果更加明显。在此频率段下周期性基础 1 楼板的加速度约是无周期性基础楼板加速度的 18%;而周期性基础 4 楼板的加速度约是无周期性基础楼板加速度的 3%。

结果表明:改变基础柔性层材料时,周期性基础 4 对 170 Hz 频率段的简谐波具有很好的阻隔作用。

综上所述,改变周期性基础的柔性层材料,当外部机器振动频率处于周期性基础的带隙内时可以有效衰减波的能量,甚至可以隔绝波的传播,但是当波的激励频率处于周期性基础带隙外时,其隔震效果有限,甚至会放大振动。

5.3.2 刚性层材料

周期性基础厚度不变时,研究改变刚性层材料对某特定频段(10、60 Hz)周期性基础振动加速度的影响。选取周期性基础 1、周期性基础 5 进行加速度时程分析。不同刚性层材料的周期性基础加速度响应曲线如图 13 所示。

由图 13a 可知,在 10 Hz 的振动波作用下,周期性基础 1 的振动加速度有一定衰减,衰减后的加速度约是无周期性基础楼板加速度的 85%;而周期性基础 5 对于楼板加速度有放大的作用,放大后的加速度约是无周期性基础楼板加速度的 120%。

由图 13b 可知,在 60 Hz 的振动波作用下,无周期性基础的楼板振动加速度依旧变化不大,周期性基础 1、周期性基础 5 对振动加速度的衰减效果更加明显。在此频率段下周期性基础 1 楼板的加速度约是无周期性基础楼板加速度的 18%;而周期性基础 5 楼板的加速度约是无周期性基础楼板的 19%。结果表明:改变基础刚性层材料时,周期性基础 1 对带隙内 60 Hz 频率段波的阻隔性优于周期性基础 5。

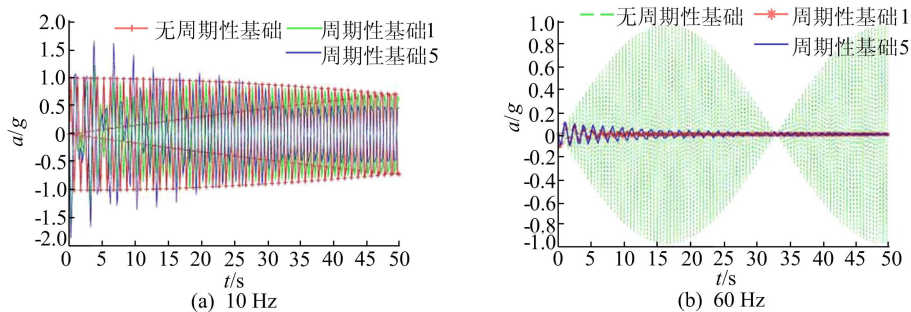


图 13 不同刚性层材料的周期性基础加速度响应曲线

6 结 论

本文借鉴固体物理学中声子晶体的概念,建立不同几何参数、物理参数的周期性基础模型,利用 ABAQUS 有限元软件对其进行频域和时域分析,研究一维周期性基础对机器振动的衰减作用。得出主要结论如下。

1) 在振动的机器与楼板之间加设周期性基础后,若机器振动主要频率处于该结构的带隙范围内,则可以有效地衰减楼板的动力响应;若处在带隙外,则衰减效果十分有限,甚至会加剧楼板的振动。

2) 改变周期性基础的材料柔性层或刚性层厚度对周期性基础的带隙影响不大,但是对周期性基础的振动响应有一定的影响。

3) 改变周期性基础的柔性层材料可能会增加周期性基础的带隙个数,且对某特定频率下的减振效果产生影响。改变周期性基础的刚性层材料对周期性基础的加速度衰减有限,在某特定频率下甚至会使振动作用放大。

本文通过有限元分析周期性基础对机器振动的衰减效应,后续将继续通过试验进行分析和验证。

[参 考 文 献]

[1] 徐曼,曾滨,许庆. 钢渣处理车间落锤致振动影响及减振效果分析[J]. 工业建筑,2021,51(10):141-146.
[2] 姚宗健,刘润广,杨沁恬,等. 周期性冲击荷载下井字梁楼盖

减振方案研究[J]. 建筑科学,2021,37(11):159-164.

- [3] 张宜聪,张纪刚,程赉,等. 某大型工业厂房振动检测与减振分析[J]. 噪声与振动控制,2022,42(5):227-233.
[4] 徐艳,王艳巧. 提高运动舒适度的体育场馆减振设计和措施[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(11):1531-1536.
[5] ZHAO C F, ZENG C, HUANG H W, et al. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation [J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111364.
[6] 孙飞飞,刘越,戴晓欣,等. 考虑阻尼影响的新型周期性基础性能研究[J]. 土木工程学报,2021,54(7):1-11,42.
[7] ZHAO C F, ZENG C, WITARTO W, et al. Isolation performance of a small modular reactor using 1D periodic foundation[J]. Engineering Structures,2021,244:112825.
[8] 葛倩倩,于桂兰. 部分埋入式周期波屏障对 Love 波的阻隔性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2021,41(6):186-194.
[9] 冯青松,张瀚文,戴承欣,等. 基于周期性结构带隙机理的高速铁路轨道减振降噪研究综述[J]. 中国铁路,2022(8):94-102.
[10] 赵红莲,李璐,张逸潇,等. 声子振动对碲硫化钼/碲硒化钨异质双层电子结构影响的理论研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(9):1291-1296.
[11] 赵春风,曾超,WITARTO W,等. 一维周期性基础的衰减域特性与隔震性能研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(增刊2):77-85.
[12] 赵春风,曾超,MO Y L. 周期性基础地震波衰减性能及其试验验证[J]. 振动工程学报,2022,35(6):1471-1480.
[13] 冯竹君,王秀丽,王康妮. 基于动力设备振动舒适度问题的楼板加固分析[J]. 工程抗震与加固改造,2022,44(4):138-145.

(责任编辑 张 镅)