

压电超材料单元设计及在弹性梁 减振中的应用^{*}

吴亦源¹ 秦卫阳² 徐佳文³ 吴沁娱¹ 王平^{4†}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095) (2. 西北工业大学, 西安 710072)

(3. 东南大学, 南京 211189) (4. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

摘要 超材料是将不同性质的材料按照某种规律组合在一起形成的一种周期材料。由于其对弹性波的传递会产生带隙效应, 因此在噪声控制、减振隔振等领域得到重视。本文设计了一种压电超材料, 通过压电材料元胞的周期性排列, 产生频率带隙, 以获得减振效果。结构尺寸及厚度小, 可以粘贴在主结构上。首先分析了设计的压电超材料色散特性; 其次, 利用压电超材料对悬臂梁结构进行了减振研究, 分析了若干个元胞组成的压电超材料对梁振动能量的调控, 并结合压电片上的电压曲线; 最后, 研究了分流电路中的电阻值和电感值对压电超材料梁减振特性的影响。提出此类压电超材料的进一步改进方向。

关键词 压电超材料, 减振, 带隙特性

中图分类号: TB535+.1

文献标志码:A

引言

振动对于机械的性能与安全影响很大。以旋转机械为例, 由于存在临界转速, 很小的不平衡就会产生很大的振动, 其振动控制十分必要。20世纪90年代初, 一些学者发现并证明了晶体中弹性波带隙的存在^[1,2], 提出了声子晶体概念^[3], 并通过实验验证了弹性波带隙的存在^[4]。超材料的性质主要由其结构决定, 具有某些超常规的特性, 例如: 负等效质量或密度^[5]、负折射率^[6,7]、完美吸收等^[8,9]。

Liu等^[10]在2000年提出了局域共振型声子晶体, 将被硅橡胶包裹住的铅球放入环氧树脂中, 实现了负的等效密度, 最终形成带隙。Yang等人^[11]提出了薄膜型超材料, 将嵌有质量块的薄膜固定在硬质框架上, 实现了200~300 Hz内的负等效质量。Mei等人^[12]提出了一种由弹性薄膜和附在其上的对称刚性薄板组成的超材料, 实现了多个频段对弹性波的吸收。除此以外, 还有许多学者设计了诸如复合平板型超材料^[13]、悬臂梁型超材料^[14]、薄

膜圆柱型超材料^[15]等多种超材料模式, 以满足不同环境和不同行业的需要。

虽然薄膜-质量块型超材料有着实现方便的特点, 但对于复杂、间隙很小的结构, 此类超材料的使用受到限制, 而且薄膜存在老化问题, 会影响超材料的可靠性, 针对这种情况, 出现了基于压电原理和压电分流阻尼的压电超材料, 利用电感-压电换能器耦合所产生的LC局部共振现象来实现频率带隙。Chen等^[16]通过在梁上附加压电片, 通过调节内部参数, 实现了超材料带隙的可调性, 并得出了初步结论; 张浩等^[17]通过引入负电容电路、多模态电路以及多种元胞的设计, 提出了一种可以展宽超材料带隙的方法; 陈圣兵等^[18,19]分析了杆局域共振带隙的形成机理, 并对分流电路中元件参数变化对带隙的影响进行了研究, 为超材料带隙的主动调控提供了一种新方法。李夏临等^[20]提出了一种二维平面陀螺超材料结构, 建立了其动力学方程, 分析了其带隙特性和色散关系, 证明了二维平面陀螺超材料结构对于扭转振动有很好的抑制作用。

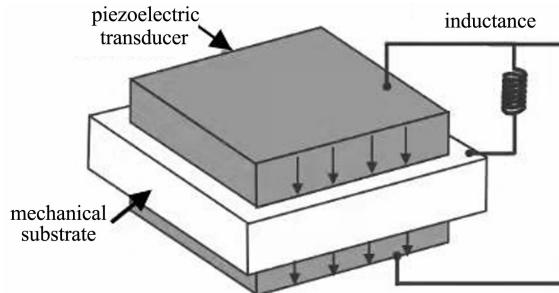
2021-10-15 收到第1稿, 2021-11-29 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(11672237)和中国航发振动技术重点实验室开放项目(KY-52-2018-0020)

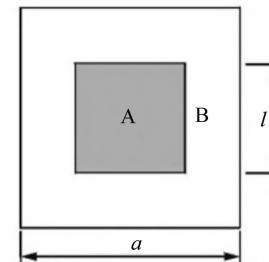
† 通信作者 E-mail: wp608@sina.com

用。王伟能等^[21]发现,对于三角陀螺超材料结构,通过陀螺转速的调节,可以控制结构的带隙。研究结果表明,波在带隙频段内受到很好的抑制。刘杰等^[22]提出了D型和I-WP型三重周期极小曲面夹芯结构,并研究了其隔声效果。由理论分析与实验结果,发现I-WP型极小曲面夹芯结构在4400~5000 Hz频段,隔声量可达60 dB。

本文提出了一种压电超材料单元结构,由基体与上下两层压电材料组成,并与外接电感相连接,构成了厚度很小的超材料减振胞元。对于此模型,基于二维理论模型和三维有限元模型进行了仿真,证明其可以产生低频带隙。针对压电超材料梁进行



(a) 压电超材料元胞示意图
(a) Schematic diagram of piezoelectric metamaterial cell



(b) 压电超材料元胞俯视图
(b) Top view of piezoelectric metamaterial cell

图1 压电超材料元胞示意图与俯视图
Fig. 1 Schematic and top views of piezoelectric metamaterial cell

1.2 可调电感分流电路模型

考虑到传统的绕线电感数值不可调,且绕线电感的电感值普遍较小(小型绕线电感普遍为 μH 量级),由于PZT的电容值只有 $n\text{F}$ 量级,如产生300 Hz频率段的带隙,需连接数亨的感性分流电路,而此量级的电感电路一般具有极大的体积、电阻和磁迟滞。故此,难以利用绕线电感与PZT构造低频局部共振,即难以产生低频禁带。此处利用运算放大器搭建了模拟电感电路,如图2所示。特别值得注意的是,通过调节电路中的可调电阻 R_1 和 R_2 ,可以改变模拟电感电路的等效电感的数值,而不必改变系统整体的机械和电路结构。

1.3 压电超材料带隙特性分析

为了分析压电超材料梁的减振特性,对超材料进行有限元建模,对于超材料周期性特性,通过将弹性波方程重组为稳态简谐场的本征值问题。求解本征值,可以清楚地看到超材料的带隙现象^[20~22]。以如图1(b)的压电超材料元胞进行相关理论的介绍。

了模拟,分析了内部元件电阻和谐振频率的改变对压电超材料梁减振能力的影响,获得了更好的减振特性。

1 物理模型与建模

1.1 压电超材料元胞及梁模型

压电超材料由压电材料元胞周期排列组成。压电超材料基本单元元胞由基体及附在其上下表面的两片压电片组成,并与电感相连,如图1(a)所示。图1(b)为压电超材料元胞的俯视图,其中,A为压电片,B为基体,压电片边长为 l ,基体薄板边长为 a ,厚度为 h 。

根据弹性力学,元胞的弯曲波控制方程可以表示为

$$D \nabla^4 w + \rho_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中, w 为弯曲波位移, D 为薄板弯曲刚度, ρ_s 为基体的密度,且

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 \quad (2)$$

对于角频率为 ω 的简谐波 $w = W(x, y)e^{i\omega t}$, $i = \sqrt{-1}$ 。方程(1)可以简化为

$$D \nabla^4 W(x, y) - \omega^2 \rho_s W(x, y) = 0 \quad (3)$$

元胞的边界条件可以由Bloch定理给出

$$W(x + ma, y + na) = W(x, y) e^{-i(m \cos \theta + n \sin \theta)ka} \quad (4)$$

式中, k 为波矢 \mathbf{k} 的大小, θ 为波矢 \mathbf{k} 的方向, $m, n = 0, 1$ 。

引入参数变换式:

$$W(x, y) = \Phi(x, y) \cdot e^{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)}$$

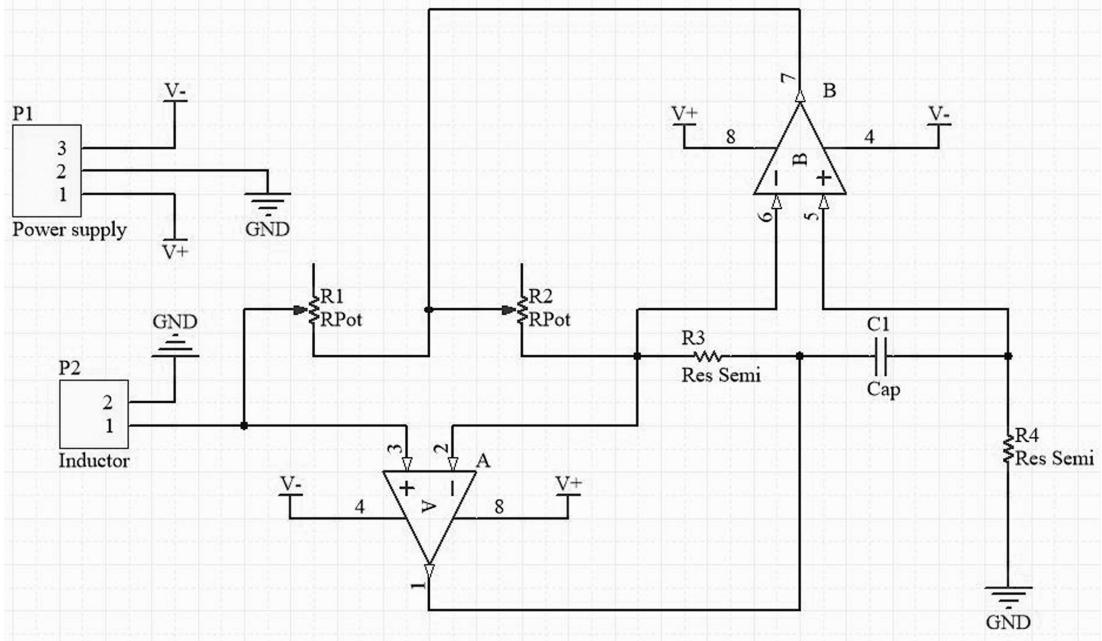


图2 压电超材料分流电路示意图
Fig. 2 Schematic diagram of piezoelectric metamaterial shunt circuit

将参数变化式带入 Bloch 边界条件(4)可得

$$\Phi(x + ma, y + na) = \Phi(x, y) \quad (5)$$

可见通过变换,可以将 Bloch 边界条件转化为连续型边界条件.

利用有限元法对偏微分方程进行求解后,可以得到其动力学方程为

$$(\mathbf{K}_0 + \lambda \mathbf{K}_1 + \lambda^2 \mathbf{K}_2 + \lambda^3 \mathbf{K}_3 + \lambda^4 \mathbf{K}_4 - w^2 \mathbf{M}) \mathbf{d} = \mathbf{F} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{K}_j (j = 0, 1, 2, 3, 4)$ 为刚度矩阵, \mathbf{M} 为质量矩阵, \mathbf{d} 为节点位移向量, \mathbf{F} 为节点力向量.

把节点位移向量 \mathbf{d} 按照节点位置进行分块(其中 \mathbf{F} 与 \mathbf{d} 对应),划分为如图 3 所示的子向量,则元胞边界条件可表示为

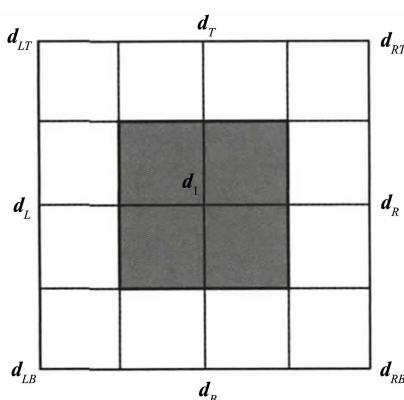


图3 节点分组
Fig. 3 Node grouping

$$\begin{cases} \mathbf{d}_T = \mathbf{d}_B \\ \mathbf{d}_R = \mathbf{d}_L \\ \mathbf{d}_{LT} = \mathbf{d}_{LB} = \mathbf{d}_{RB} = \mathbf{d}_{RT} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_B = 0 \\ \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_L = 0 \\ \mathbf{F}_{LT} + \mathbf{F}_{LB} + \mathbf{F}_{RB} + \mathbf{F}_{RT} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(7) 和式(8) 整理为矩阵形式,则有

$$\begin{cases} \mathbf{d} = \mathbf{T}\mathbf{x} \\ \mathbf{T}^T \mathbf{F} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{x} = [\mathbf{d}_I \ \mathbf{d}_B \ \mathbf{d}_L \ \mathbf{d}_{LB}]^T$, 且

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & I & I & I \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(9) 带入式(6), 可得多项式特征值方程

$$(\mathbf{D}_0 + \lambda \mathbf{D}_1 + \lambda^2 \mathbf{D}_2 + \lambda^3 \mathbf{D}_3 + \lambda^4 \mathbf{D}_4) \mathbf{x} = 0 \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_0 &= \mathbf{T}^T (\mathbf{K}_0 - w^2 \mathbf{M}) \mathbf{T} \\ \mathbf{D}_j &= \mathbf{T}^T \mathbf{K}_j \mathbf{T} (j = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (12)$$

把方程(11) 整理为标准的特征值方程可得

$$[\mathbf{Q}(\theta, w) - \lambda \mathbf{I}] \mathbf{y} = 0 \quad (13)$$

式中, $\mathbf{y} = [\mathbf{x} \ \lambda \mathbf{x} \ \lambda^2 \mathbf{x} \ \lambda^3 \mathbf{x}]^T$ 且

$$\mathbf{Q}(q, w) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ \mathbf{D}_4^{-1}\mathbf{D}_0 & -\mathbf{D}_4^{-1}\mathbf{D}_1 & -\mathbf{D}_4^{-1}\mathbf{D}_2 & -\mathbf{D}_4^{-1}\mathbf{D}_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

从式(13)可以看出,只要给定波矢方向 θ 和频率 ω ,就可以求出特征值 λ . 本文中正方形基体为铝,边长为 40 mm,厚度为 3.13 mm,弹性模量为 69 GPa,泊松比为 0.33,质量密度为 2730 kg/m³;压电材料为压电模块中的 PZT-5H 压电材料,为正方形,边长为 20 mm,厚度为 0.5 mm,可计算出元胞的色散曲线. 实际中,采用多场耦合有限元进行了仿真分析,结果如图 4 所示.

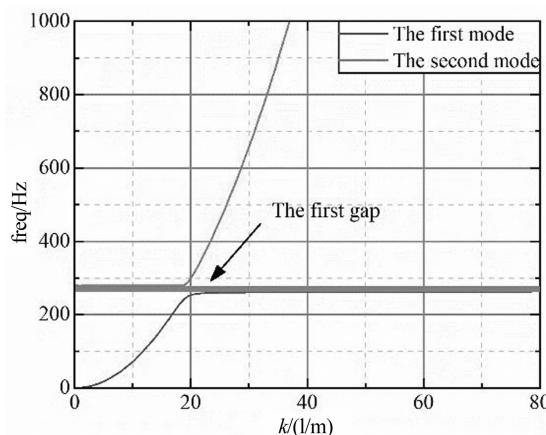


图 4 压电超材料带隙分析

Fig. 4 Bandgap analysis of piezoelectric metamaterial

可以看出压电超材料带隙大约在 262 ~ 280 Hz,理论计算与仿真结果是一致的.

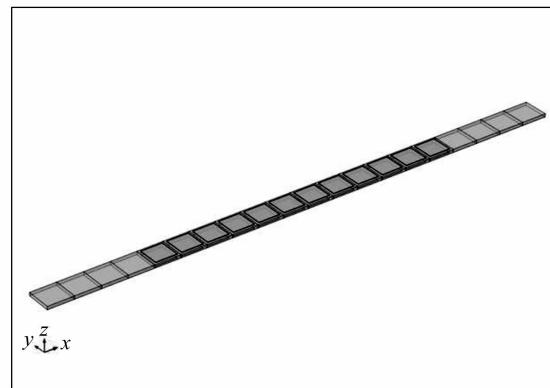
2 计算结果与讨论

2.1 电阻对压电材料减振特性的影响

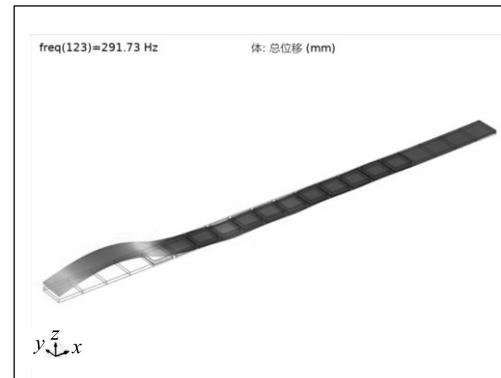
为了分析有压电超材料的减振特性,在一根悬臂梁上,安装了 12 个压电超材料元胞,形成压电超材料结构. 此弹性梁在固支端受到基础激励,结构模型如图 5(a)所示. 胞单元几何参数为: 正方形基体为铝,边长为 25.38 mm,厚度为 3.13 mm,弹性模量为 69 GPa,泊松比为 0.33,质量密度为 2730 kg/m³; 压电材料为压电模块中的 PZT-5H 压电材料,为正方形,边长为 21 mm,厚度为 0.55 mm; 梁的尺寸为: 507.6 mm × 25.38 mm × 3.13 mm.

对压电超材料来说,接入的电感与压电片 PZT 的电容会组成 LC 电路,当弹性波传入时,会发生

局域共振,达到减振效果. 因为压电超材料在结构和电路组成(包括电路元器件和连接导线)方面不可避免地存在电阻. 此处,在其分流电路中引入不同的电阻,并让其组成有限单元的压电超材料梁,通过拾取自由端位移,分析传输曲线在有一定电阻情况下的变化情况,如图 5 所示.



(a) 压电超材料梁模型
(a) Cantilever with piezoelectric metamaterials



(b) 压电超材料梁减振效果
(b) Vibration attenuation by piezoelectric metamaterials

图 5 压电超材料梁及减振效果
Fig. 5 Piezoelectric metamaterial beam and attenuation effect

图 5(b)为在 $L = 16$ H, $R = 20$ Ω, $f = 291.73$ Hz 条件下梁在基础激励下(左端)的强迫响应,可以看出,梁左端的基础激励无法传递到右端,显示了压电超材料很好的减振效果.

图 6 所示是分流电路串联电阻时梁末端位移变化,图中蓝色线表示在未接入电感与电阻时,有限长度压电超材料梁的频响特性;其他曲线分别代表接入 16 H 电感后,外接不同电阻条件下,压电超材料梁的频响特性. 此处分流电路中串联的电感值保持 16 H 不变,且梁的结构保持不变. 可以看出,对于传统压电梁来说,其在 300 Hz 以下不能产生吸振的效果;对于在 16 H 下外接了电阻的压电梁来说,在 300 Hz 附近产生了带隙;由图 6 和图 7 可

以看出,电阻的改变对带隙宽度并没有影响;此外,由图6可知,压电超材料梁分流电路串联电阻较小时,位移变化较大,压电超材料梁对波传播的衰减性能较好;而分流电路中串联电阻较大时,弹性梁末端线平均位移变化较小,即波衰减性能较弱。故此,减小系统的阻尼及分流电路的电阻,可以增强压电超材料的波衰减性能。

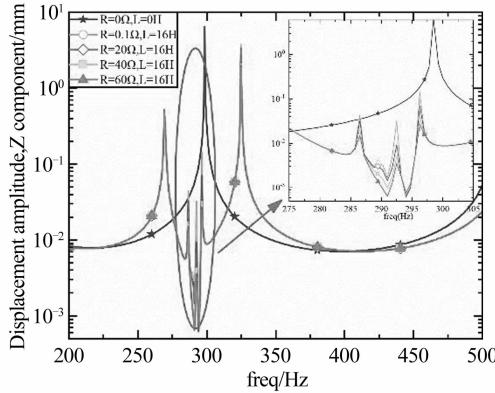


图6 压电超材料梁在不同外接电阻下的频率-响应曲线
Fig. 6 Frequency-response curves for different external resistances

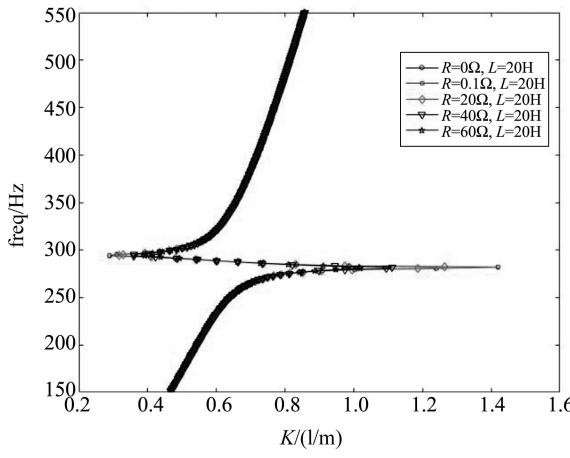


图7 压电超材料梁在不同外接电阻下的频率-波数曲线
Fig. 7 Frequency-wave number curves for different external resistances

为了分析超材料梁在振动过程中压电片电压的变化,在首个压电片上表面取中点,通过分析其电场模随振动的变化。

图8所示是压电超材料梁在不同外接电阻下的电场模随频率变化的情况,图中蓝色线表示在不外加任何电阻与电感情况下,传统有限长度压电超材料梁的电场模随频率的变化情况;其余曲线表示在不同电阻,相同电感(16 H)的情况下,压电超材料梁的电场模随频率的变化情况。可以看出,压电超材料梁在没有电感与电阻耦合作用的情况下,无

法产生低频带隙;若存在电感与电阻耦合现象,其带隙与频响曲线的位置和范围是一致。由图8可知,压电超材料梁分流电路串联电阻较小时,电场模变化较大,压电超材料梁对波传播的衰减性能较好;而分流电路中串联电阻较大时,波衰减性能较弱。因此,有限长度的压电超材料梁对于振动有很大的衰减和吸收作用;若想获得更为理想的振动衰减性能,需减小系统的阻尼及分流电路的电阻,以增强压电超材料的波衰减性能。

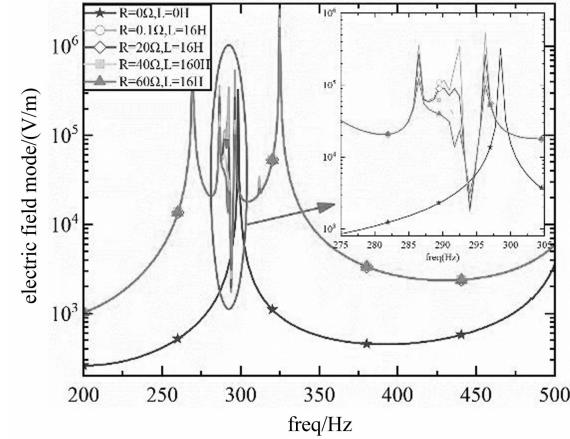


图8 压电超材料梁在不同外接电阻下的频率-电场模曲线
Fig. 8 Frequency-electric field mode curves for different external resistances

2.2 电感变化对压电材料减振特性的影响

根据压电超材料的减振机制可知,改变电感会改变LC电路的参数,进而影响压电梁的减振特性。而对于有限长度的超材料梁来说,它既是一个整体,也是有限个元胞的集合,所以在外加电感时,可以先把梁视为一个整体,统一加上相同的电感,以整体的形式改变谐振频率,探究电感对压电梁整体减振特性的影响;进一步地,在每个元胞上,加上不同的电感,使每个元胞上的谐振频率出现变化,探究梁上元胞电感不同时,有限长度压电梁的减振性能。

模型为2.1节所建立的压电梁,利用有限元软件分析压电梁在结构不变,外接电感变化的情况下减振特性的变化,结果如图9所示。

图9显示了压电梁外接电感变化时弹性梁末端线平均位移和首个压电片电压的变化,图中紫色线表示在未接入电感时,压电梁的频率-响应和频率-电场模特性;其他曲线分别代表接入10 H、15 H、20 H、25 H电感,外接0.1 Ω电阻条件下,压电超材料梁的频率-响应和频率-电场模特性。可以看

出,对于传统压电梁,其在300 Hz以下不能产生吸振的效果;而对于外接了电感的压电梁,其在370 Hz、300 Hz、260 Hz、230 Hz附近压电梁末端位移大幅降低,同时压电片上电压大幅提升,即产生了带隙,阻隔了振动波的传递,带隙情况如表1所示。

由图9及表1可得,压电梁整体接入电感后,其具有阻隔低频振动的作用,随着电感的增大,压电梁可对更低频的振动产生阻隔作用,同时,带隙宽度有轻微下降。因此,增大压电梁的外接电感可

以对更低频率的振动产生阻隔作用,且对带隙宽度影响不大。因此,增加压电胞元外接电感,可以增强压电梁的减振性能。

进一步地,对有限长度压电梁上的每个元胞加上不同的电感,可以使其出现谐振频率偏差,每个元胞分别相对上一个元胞电感以固定比率增加,本文所采取的增加比率为0%、1%、2%、3%,对应的谐振频率相差为0%、1%、2%、3%,分析压电梁的减振能力变化,结果如图10所示。

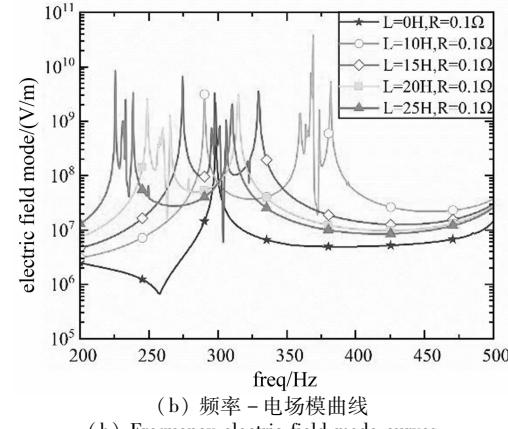
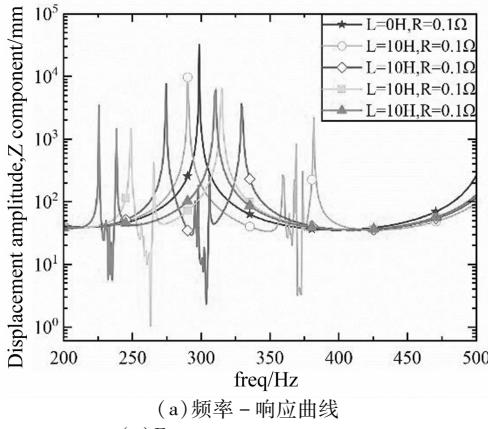


图9 压电超材料梁(整体)在不同外接电感下的频率-响应曲线和频率-电场模曲线

Fig.9 Frequency-response curves and frequency-electric field mode curves of piezoelectric metamaterial beams for different external inductors

表1 压电梁(整体)不同电感条件下带隙始末位置及宽度统计表

Table 1 Statistical table of bandgap of piezoelectric beam for different values of inductance

bandgap	Cellular inductance/H			
	10	15	20	25
bandgap/Hz	367.24 ~ 371.09 (3.85)	299.5 ~ 302.99 (3.49)	259.69 ~ 262.4 (2.71)	232.27 ~ 234.7 (2.43)

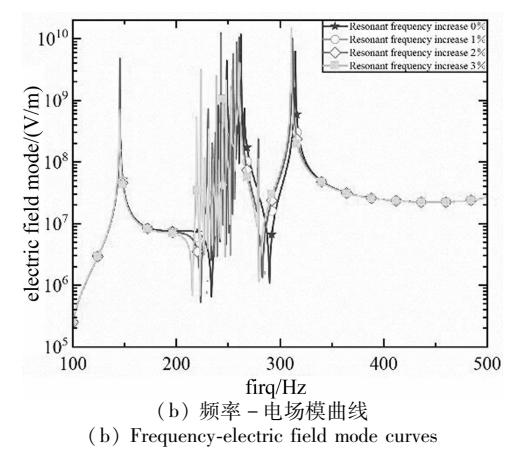
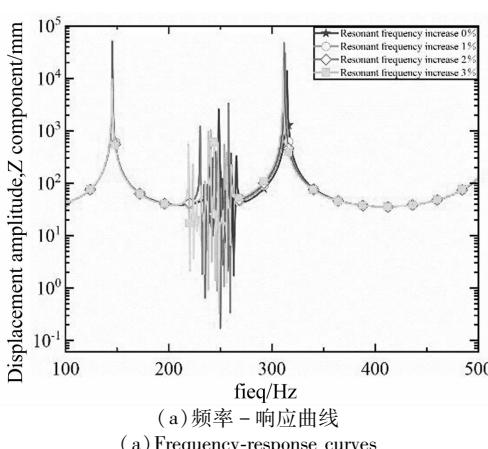


图10 压电超材料梁在元胞不同谐振频率下的频率-响应曲线和频率-电场模曲线

Fig.10 Frequency-response curves for different steps

表2 压电梁(元胞)不同谐振频率下带隙始末位置及宽度统计表
Table 2 Statistical table of bandgap for different resonant frequency steps

bandgap	Resonant frequency increase step/%			
	0	1	2	3
bandgap/Hz	259.69 ~ 262.4 (2.71)	246.55 ~ 260.16 (13.61)	232.53 ~ 259.76 (27.23)	220.12 ~ 259.76 (39.64)

图10为元胞谐振频率按比率变化时压电梁的频率-响应和频率-电场模特性,表2则展示了谐振频率增加比率和压电梁减振特性的关系。由图10可知,压电梁上的元胞谐振频率存在差别后,压电梁具有阻隔低频振动的作用;对比与每个元胞电感固定的情况,元胞谐振频率按固定比例增加可使压电梁末端振幅减小的频带变宽,即带隙变宽,表2则显示了元胞谐振频率不同时,带隙的始末位置和宽度,随着元胞外接电感增加比例的上升,压电梁的带隙变宽,起始频率下降。因此,按固定比例依次增加元胞谐振频率,可以增强压电梁的波衰减性能,比例越大,波衰减性能越好。

3 结论

本文设计了一种压电超材料元胞,研究了在不同内部元件电阻下,压电超材料梁的减振特性,通过理论与仿真分析,证明了此压电超材料可以产生低频带隙,并可以通过调节电感与电阻改变带隙位置;压电超材料对于悬臂梁基础激励有很好的减振作用;提高振动的减振效果,可以减小分流电路的电阻、增大梁整体的外接电感或按固定比例增加每个元胞的谐振频率,增强压电超材料的波衰减性能。

致谢:感谢中国航发振动技术重点实验室对外开放项目(KY-52-2018-0020)的资助。

参 考 文 献

- Vance J M. Rotordynamics of turbomachinery. USA: John Wiley & Sons, 1988: 241 ~ 248
- Signalas M M, Economou E N. Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 158(2): 377 ~ 382
- Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 20 ~ 22
- Martínez-Sala R, Sancho J, Sánchez J V, et al. Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 1995, 378 (6554): 241
- Chen M, Xu W, Liu Y, et al. Band gap and double-negative properties of a star-structured sonic metamaterial. *Applied Acoustics*, 2018, 139: 235 ~ 242
- Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical review letters*, 1996, 76(25): 4773
- Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075 ~ 2084
- 祝叶华. 未来世界由超材料建构. 科技导报, 2016, 34(18): 14 ~ 26 (Zhu Y H. Metamaterials to build the future. *Science and Technology Review*, 2016, 34 (18): 14 ~ 26 (in Chinese))
- Zhang X, Liu Z. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nature Materials*, 2008, 7(6): 435 ~ 441
- Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289(5485): 1734 ~ 1736
- Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301
- Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound. *Nature communications*, 2012, 3: 756
- Nouh M, Aldraihem O, Baz A. Wave propagation in metamaterial plates with periodic local resonances. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 341: 53 ~ 73
- 吴健, 白晓春, 肖勇, 等. 一种多频局域共振型声子晶体板的低频带隙与减振特性. *物理学报*, 2016, 65 (6): 064602 (Wu J, Bai X C, Xiao Y, et al. Low frequency band gaps and vibration reduction properties of a multi-frequency locally resonant phononic plate. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 064602 (in Chinese))
- 郜英杰, 范华林, 张蓓, 等. 超材料消波混凝土板在二维平面波作用下的削波效应研究. *振动与冲击*, 2018, 37(20): 39 ~ 44 (Gao Y J, Fan H L, Zang B, et al. Wave attenuation of super-material wave absorbing concrete panel subjected to two-dimensional plane wave. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(20): 39 ~ 44 (in Chinese))
- Chen S, Wen J, Yu D, et al. Band gap control of phononic beam with negative capacitance piezoelectric shunt.

Chinese Physics B, 2011, 20(1):405~409

- 17 张浩. 压电分流型声学超材料的隔声特性研究. 湖南: 国防科学技术大学, 2016 (Zhang H. Research on the sound insulation properties of acoustic metamaterials with piezoelectric shunts. Hunan: National University of Defense Technolog (in Chinese))
- 18 陈圣兵, 韩小云, 王刚, 等. 具有压电分流电路的声子晶体杆振动带隙研究. 振动与冲击, 2011, 30(4): 64~67 (Chen S B, Han X Y, Wang G , et al. Research on vibration bandgaps of phononic rod with piezoelectric Shunting Circuits. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(4): 64~67 (in Chinese))
- 19 陈圣兵, 张浩, 宋玉宝. 声子晶体板复能带计算方法. 振动工程学报, 2019, 32(3): 415~420 (Chen S B, Zhang H, Song Y B. Calculation method of complex band structure of phononic plates. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(3): 415~420 (in Chinese))
- 20 李夏临, 杨晓东, 张伟. 二维陀螺声子晶体结构力学研究. 动力学与控制学报, 2020, 18(4): 79~85 (Li X L, Yang X D, Zhang W. Analysis of dynamics characteristics of 2-D gyroscope phononic crystal. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(4): 79~85 (in Chinese))
- 21 王伟能, 杨晓东, 张伟. 二维三角陀螺声子晶体的波调控研究. 动力学与控制学报, 2021, 19(1): 75~79 (Wang W N, Yang X D, Zhang W. Study on wave manipulation in 2-D triangular gyroscope phononic crystals. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(1): 75~79 (in Chinese))
- 22 刘杰, 林春贵, 文桂林. 三重周期极小曲面夹芯结构的隔声性能研究. 动力学与控制学报, 2021, 19(4): 64~72 (Liu J, Lin C G, Wen G L. Study on sound insulation performance of sandwich structures with triply periodic minimal surface cores. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(4): 64~72 (in Chinese))

PIEZOELECTRIC METAMATERIAL DESIGN AND ITS APPLICATION IN ALLEVIATING VIBRATION OF ELASTIC BEAM^{*}

Wu Yiyuan¹ Qin Weiyang² Xu Jiawen³ Wu Qinyu¹ Wang Ping⁴

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Southeast University, Nanjing 211189, China)

(4. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract Metamaterial is a type of composite material structure, in which a cell is repeated periodically with different materials integrated. Owing to the phenomenon that metamaterial structures can form a bandgap in spectrum and make the elastic wave propagation confined in it, they has attracted attentions in the fields of noise and vibration control. In this paper, we proposed a piezoelectric metamaterial, in which a piezoelectric material and a oscillate circuit form the cell. From the theoretical analysis, it is proved that the frequency band gap is generated. Furthermore, this kind of piezoelectric metamaterial is put on a cantilever beam to show the effect of vibration attenuation. The simulation investigation is carried out, including the studies on the vibration energy absorption, the influence of resistance and the vibration attenuation characteristic (combined with the voltage curve on PZT). The results focus on the significance of transmission and voltage, and show that the piezoelectric metamaterial is effective in vibration attenuation.

Key words Piezoelectric metamaterial, vibration attenuation, bandgap

Received 15 October 2021, revised 29 November 2021.

* The project supported by National Science Foundation of China (11672237) and AECC Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology (KY-52-2018-0020)

† Corresponding author E-mail: wp608@sina.com