

Electromechanical active metamaterials and their applications in controlling elastic wave propagation

易凯军^{1,*},陈洋洋^{2,*},朱睿¹ and Huang Guoliang²

Citation: <u>科学通报;</u> doi: 10.1360/TB-2021-0573

View online: https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-0573

Published by the <u>《中国科学》杂志社</u>

Articles you may be interested in

<u>Hierarchical large-scale elastic metamaterials for passive seismic wave mitigation</u> European Physical Journal-Applied Metamaterials **8**, 14 (2021);

A method of controlling wave propagation in initially spatially periodic media EPL **78**, 44001 (2007);

Effect of roughness on the elastic surface wave propagation European Physical Journal AP(Applied Physics) **24**, 3 (2003);

Elastic wave propagation and scattering in prestressed porous rocks SCIENCE CHINA Earth Sciences **63**, 1309 (2020);

Wave propagation in a magneto-electro-elastic plate Science in China Series G-Physics, Mechanics & Astronomy **51**, 651 (2008); 超构材料中的弹性波及其调控专题 评述



力电耦合主动超材料及其弹性波调控

易凯军^{1*},陈洋洋^{2*},朱睿¹, Guoliang Huang²

1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri, Columbia MO 65211, USA

* 联系人, E-mail: kaijun.yi@bit.edu.cn; yc896@mail.missouri.edu

2021-06-16 收稿, 2021-09-07 修回, 2021-09-14 接受, 2021-09-15 网络版发表 国家自然科学基金(11872112, 11991031, 11991030)资助

摘要 超材料是实现新奇弹性波调控功能的关键所在.其中,被动超材料最先被研究者关注,目前已实现了波动阻隔、负折射、波聚焦、绕射隐身等反常波动效果,因此被动超材料在低频减振降噪、结构健康监测和波动能量收集等方面有着广泛的应用前景.然而,被动超材料在制备完成后,其等效属性和波控功能很难再根据实际需求进行调节,限制了其在真实工作环境中的应用.近年来出现的力电耦合超材料能够实现波动性质的主动调节,突破了被动超材料的限制,因此受到越来越多的关注.力电耦合超材料在微结构材料组分和拓扑构型之外引入多物理场耦合效应来改变等效属性,并能通过外部电场控制实现特定的非常规属性或者材料属性的主动甚至自适应调节.本文首先介绍力电耦合超材料的基本概念.然后,根据外部电场作用方式的不同将力电耦合超材料分为两类;并从等效属性的电场调控机理、耦合电场/微结构设计和波控功能等方面,对力电耦合超材料的研究现状和发展趋势进行了详尽的介绍和讨论.最后,针对波动控制的功能拓展、宽低频实现机理、动态均匀化以及高效数值预报等方面,对未来力电耦合超材料的研究方向与应用领域进行展望.

关键词 力电耦合超材料,主动超材料,压电材料,弹性波操控,减振降噪

机械结构在扰动作用下会产生弹性波.一方面,弹 性波在结构中传播,将能量从激励源向结构各部分输 运,引起结构振动、向外辐射噪声.另一方面,弹性波 在结构不连续位置会发生反射、透射等现象,这些现 象可以用来检测或者监测结构是否完整、是否存在损 伤.鉴于上述因素,阻隔、消耗或者操纵弹性波在工程 结构中传播,能够达到减振降噪、能量收集或者结构 健康监测等目的.然而,实现特殊的波动传输调控对材 料属性提出了苛刻的要求,如负属性、空间梯度调 制、时间调制,甚至时-空调制等,传统材料很难满足 上述要求.

21世纪初提出的声波/弹性波超材料(acoustic/elastic metamaterials)为新奇波动调控提供了可能. 超材料 一般指一类具有亚波长人工微结构的材料,通过精心 设计,其宏观等效属性表现出传统材料很难具有的性 质,如负密度、负体积模量和负杨氏模量等.具有单一 负属性的超材料能够实现禁带效果,阻隔波动传播,同 时具有两种负属性的超材料可以实现负折射等非常规 波传播现象.负密度超材料的研究起源于2000年Liu等 人^[1]的发现,他们将硅橡胶包裹的铅球周期地埋入环 氧树脂基体中,发现了硅橡胶与包裹的铅球构成的局 域振子共振现象,并在波长为单胞特征尺寸300倍以上 的低频获得了禁带,实现了对声波的完全阻隔.后续研 究表明,负密度是由于局域谐振微结构发生偶极共振, 导致位移与载荷反相而产生的^[2].在Liu等人^[1]之后, Fang等人^[3]提出了一类具有负模量的超材料,在这类

引用格式:易凯军,陈洋洋,朱睿,等.力电耦合主动超材料及其弹性波调控.科学通报,2021,66 Yi K J, Chen Y Y, Zhu R, et al. Electromechanical active metamaterials and their applications in controlling elastic wave propagation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66, doi: 10.1360/TB-2021-0573

超材料中观察到了群速度和相速度方向相反的现象。 并将这种现象的出现与负体积模量联系在一起. Huang 和Sun^[4]通过谐振子设计实现了负的杨氏模量,从而实 现了禁带效果. 他们进一步结合实现负质量的谐振子 和实现负杨氏模量的谐振子。实现了同时具有负质量 和负杨氏模量的超材料^[5]. Liu等人^[6]利用手性单元同 时实现了横向和旋转共振、进而通过单一材料组分获 得了同时具有负质量和负体积模量的超材料。Zhu等 人^[7]基于这类超材料在亚波长频率范围实现了弹性波 负折射现象,并通过实验观测到了负折射现象,在负属 性超材料之外,许多新概念的超材料也被提出. Milton 和Cherkaev^[8]提出了一种弹性矩阵只有一个特征值不 为零的材料,该材料被称为五模材料,在水声隐身、水 声聚焦和隔声等方面有广泛的应用前景. Zhang等人^[9] 在微结构中引入隐藏旋转谐振单元、通过单元的谐振 旋转放大效应来平衡微结构的不对称剪应力,以被动 方式打破了弹性矩阵的小对称性、该旋转谐振单元可用 来设计弹性波完美匹配层、隐身斗篷等。根据前人的工 作可以发现、超材料为波动阻隔、负反射、绕射隐身 等新奇波控效果提供了方法. 然而, 当前被广泛研究的 被动型超材料加工完后很难再更改、无法根据实际中 复杂多变的工况和环境作出适应性的调节,应用受限.

近年来,等效属性和波控功能可根据需求主动调 节的超材料受到越来越多的关注.超材料的等效属性 主要由微结构的组分和拓扑构型决定,通过特殊手段 重构微结构的拓扑构型或者材料组分,能够实现对等 效材料参数的主动调节^[10-16].另外,在微结构中引入智 能材料,可以通过电、磁、热等外场来主动调控超材 料的等效属性,为材料设计提供了新的维度.用于超材 料设计的智能材料包括压电材料、形状记忆合金、形 状记忆聚合物等.其中,压电材料具有压电效应,能够 将弹性应变能转换成电能或者将电能转换成弹性应变 能.与其他智能材料相比,压电材料具有众多显著的优 点,比如机电耦合系数高、作用频带宽、不会引入过 多附加质量、响应快等^[17].因此,近年来基于压电材料 的力电耦合主动超材料受到了广泛关注.由于篇幅有 限,本文主要关注力电耦合主动超材料.

力电耦合超材料的研究可追溯到21世纪初. 2001 年, Thorp等人^[18]提出将压电单元周期布置在直杆表 面, 并在压电单元电极之间连接包含电感和电阻的电 路. 他们发现, 由于电路的谐振效应, 能够在杆中产生 禁带效果, 并且禁带的位置可通过改变电路参数调节, 不需要改变结构的机械部分. 在这之后, 科研工作者设 计并研究了分流压电阵列梁、板等结构^[19-21]. 需要指 出的是, 在这一阶段, 力电耦合超材料的概念还未被提 出, 含周期分流压电阵列的结构被当作周期结构或者 一类特殊声子晶体研究. 研究者重点关注其中的禁带 效应, 探索其在振动和噪声抑制、振动能量传递隔 离、隔声等方面的应用. 2011年, Airoldi和Ruzzene^[22] 推导了谐振分流压电阵列梁的等效轴向刚度和抗弯刚 度, 发现它们在电路的谐振频率附近表现出与被动超 材料等效密度在振子谐振频率附近类似的共振特征, 并且导致了禁带的产生. 因此, 我们可以把这种分流压 电阵列周期梁看作一类新型超材料, 在本文称其为力 电耦合超材料.

尽管力电耦合超材料概念提出的时间不长,但目前已经取得了大量的研究成果.本文将主要从等效属性的电场调控机理、耦合电场/微结构设计和波控功能等方面,对两类典型力电耦合超材料的研究现状、发展趋势进行概述,并尝试提出今后研究方向和待解决问题的建议.

1 力电耦合超材料研究内涵

典型的力电耦合超材料单胞(单胞指超材料最小可 重复单元)包含三部分,即基底结构、压电单元和控制 电路.基底结构一般由被动材料加工制造,如由金属、 陶瓷、塑料或者复合材料制成的梁、板、壳结构等. 压电单元指由压电材料制备的具有特定形状的结构, 如方形、矩形和圆形压电片等、压电单元表面敷设电 极. 控制电路与压电单元电极相连, 包含模拟电子器 件、数字电子器件、处理器等. 被动型弹性波超材料 的非常规属性主要源于其人工微结构的材料组分和拓 扑构型,其中拓扑构型占主导因素,力电耦合超材料在 材料组分和拓扑构型之外引入多场耦合效应来调控等 效属性. 一方面, 能够通过设计外部电场与单胞相互作 用实现特定的非常规属性;另一方面,改变外部电场可 以对材料属性进行主动调节. 基于分流电路的力电耦 合超材料最先被提出,典型分流电路包括谐振电路、 负电容电路和网络电路等. 近年来, 更先进的基于控制 理论的力电耦合超材料被提出,其等效属性和反常波 控功能主要通过设计传感-作动控制回路来实现,能够 在线实时调节,甚至自适应调节.下面将主要从机理、 设计和功能3个方面分别介绍上述两类力电耦合超材 料的发展现状和趋势,具体内容框图如图1所示.



图 1 (网络版彩色)本文内容框图 Figure 1 (Color online) Schematic view of the contents in this review

2 基于分流电路的力电耦合超材料

2.1 谐振分流力电耦合超材料

谐振分流力电耦合超材料通过电路的谐振效应在 结构中产生低频禁带. 这类超材料中, 压电单元外接电 路包含电感元件L, 其与压电单元本征电容 C_p^s 形成谐振 电路, 谐振频率可近似表示为 $\omega_{LC}=1/\sqrt{LC_p^s}$. 关于谐振 分流力电耦合超材料的研究主要包括3个方面: (1) 禁 带的产生机理, 即谐振电路如何与单胞作用产生禁带; (2) 低频禁带范围的拓宽, 即如何通过电路或者微结构 设计拓宽低频禁带的范围; (3) 在振动、波动控制方面 的应用探索.

Airoldi和Ruzzene^[22]在基底梁结构表面周期布置 压电片并外接电感电阻电路,设计了如图2(a)所示的力 电耦合超材料梁.为了探究其中禁带形成的机理,他们 建立了超材料梁等效轴向刚度和弯曲刚度与分流振荡 电路参数之间的解析关系式,结果表明,在禁带内电路 对材料的轴向和弯曲刚度有显著的影响,如图2(b),(c) 所示.Sugino等人^[23]假设压电材料完全覆盖有限长梁 表面,通过分析梁的振动特性获得了弯曲波禁带范围 的解析表达式,结果表明,禁带与压电材料的机电耦合 系数以及振荡电路的振荡频率有关.Yi和Collet^[24]推导 了谐振分流力电耦合超材料梁结构弯曲刚度的解析表 达式,通过与弯曲波的色散关系对比,证明了禁带由负 的弯曲刚度引起,并在此基础上获得了压电片覆盖率 为任意值时弯曲波禁带的解析表达式.结果表明,禁带 的宽度和位置与电路谐振频率、压电单元覆盖率、机 电耦合系数、压电片厚度与基底梁厚度之比有关.

与被动局域谐振超材料类似,谐振分流力电耦合 超材料的禁带亦是通过谐振效应产生、同样存在禁带 范围窄的问题。为了拓宽低频禁带范围。Wang等 人^[25,26]将电感元件与比例放大电路连接,得到增强型 谐振分流电路. 理论和实验研究表明, 禁带的范围得到 了一定程度的拓宽、并且禁带内波动衰减效果也得到 提高.利用增强谐振电路,理论上能够获得宽带的低频 禁带,然而实际中要想得到一个较宽禁带,电路电压需 要显著放大,实际使用困难. Airoldi和Ruzzene^[27]将压 电单元与具有多个谐振频率的洗通电路连接,利用洗 通电路在不同频率点附近的谐振效果在超材料中产生 多个低频禁带,从而达到拓宽总禁带宽度的目的,多频 谐振电路可以得到多个独立的禁带。在隔离离散线谱 振动方面具有优势, 然而随着禁带数目增加, 对应的多 频谐振电路的复杂度指数级增加. 除了改进谐振电路 之外, Cardella等人^[28]不再将力电耦合超材料梁所有单 胞中的电路参数设置为同一值、而是在空间上梯度渐 变, 使不同单胞中的电路具有梯度变化的谐振频率, 从 而获得宽带的禁带效果.

谐振分流力电耦合超材料通过电路谐振产生低频 禁带,不需要引入过多额外质量,在梁、板、壳等工程 结构低频减振降噪中有广泛的应用前景^[29~32]. Chen等 人[33]在板结构表面周期布置压电单元,并在其电极之 间连接电感电阻电路得到力电耦合超材料板, 通过分 析有限大力电耦合超材料板在外部简谐激励作用下的 振动特性,证明了在电路谐振产生的低频禁带范围内, 振动得到了有效抑制. Zhang等人^[34]研究了谐振分流力 电耦合超材料板的隔声性能,结果表明,将电路谐振频 率调谐到隔声的质量控制区,能够显著提高板的隔声 性能. Sugino和Erturk^[35]提出,在谐振分流电路中引入 能量收集机制、在利用力电耦合超材料减振的同时实 现振动能量收集. 在减振降噪之外, Casadei等人^[36]利 用谐振分流力电耦合超材料控制弹性波在波导上的传 输或者阻隔,设计了弹性波逻辑门,并通过实验证明有 效. Xu和Tang^[37]利用谐振分流电路调节超材料等效属 性的空间分布规律,设计了智能结构三棱镜,其能够调 控弹性波的传播路径.



图 2 (网络版彩色)谐振分流力电耦合超材料^[22]. (a) 谐振分流力电耦合超材料梁及其单胞; (b) 超材料梁轴向刚度随频率的变化规律; (c) 超材 料梁弯曲刚度随频率的变化规律

Figure 2 (Color online) Electromechanical metamaterial with resonant shunts^[22]. (a) Electromechanical metamaterial beam with resonant shunts and its unit cell; (b) variation of the axial stiffness of the metamaterial beam with frequency; (c) variation of the bending stiffness of the metamaterial beam with frequency.

2.2 负电容分流力电耦合超材料

负电容电路是一种人工合成电路,其等效阻抗与 负电容的阻抗相同.负电容被广泛用于提高压电单元 的机电耦合系数,进而改善压电分流减振技术的效 果^[38,39].后期研究发现,负电容能够调节压电材料的等 效杨氏模量和泊松比.理论上,调节负电容值可以显著 地降低或者增加压电材料的杨氏模量.这一特性被广 泛用于调控力电耦合超材料的宏观等效属性和波动特 性^[40].

负电容分流压电单元可直接布置在梁、板、壳等 结构表面构建力电耦合超材料.负电容调控超材料局 部材料属性,从而改变其中的波动传输特性.Collet等 人^[41]在梁结构部分区域周期布置负电容分流压电单元 构建力电耦合超材料梁,通过优化负电容值来调控超 材料梁中弯曲波的透射率,能够实现透射率从0到1的 调节,并且宽频有效.进一步,Collet等人^[42]在板结构中 构建了类似的超材料板.仿真和实验表明,超材料板能 够阻止能量从板左边部分传递到右边部分,从而有效 地抑制板右半部分的振动.Fan等人^[43]利用负电容电路 来调控梁结构中禁带宽度,优化负电容值能够显著拓宽禁带的范围.Yi等人^[44]利用负电容调控板的等效弯曲刚度,通过设计不同位置负电容值使板等效弯曲刚度在空间上满足特定的分布规律,实现了板中弯曲波的聚焦,并且仅仅通过改变负电容值就能够主动调控弯曲波聚焦的位置(图3(a),(b)),可用于波动能量收集等应用^[45,46].Chen等人^[47]在梁结构上周期布置负电容分流压电阵列,并且将不同单胞中的负电容值设置为空间梯度变化形式来渐进地降低梁等效弯曲刚度,弯曲波信号入射进入超材料梁部分时,幅值将会显著增大,具有更高的信噪比.类似地,Ning等人^[48]利用负电容调控板结构局部等效弯曲刚度设计了弯曲波吸波黑洞.在空间调制之外,Marconi等人^[49]利用负电容分流压电阵列在时间和空间上同时调制力电耦合超材料梁的等效属性,实现了非互易的波动传输效果.

负电容分流压电单元也可以与被动超材料微结构 复合来调控超材料等效属性和波传播特性.在这类超 材料中,负电容用于调节被动局域谐振子的刚度或者 微结构的空间对称性.Chen等人^[50]在被动局域谐振超 材料谐振子中引入负电容分流压电单元,并建立了质 量弹簧模型来研究负电容对禁带的调控规律.结果表 明,通过负电容改变谐振子的刚度可以有效地控制超 材料禁带的上下界和宽度.Zhu等人^[51]通过实验证明了 负电容调控局域谐振禁带范围的有效性(图4(a),(b)). 近期,Zhou等人^[52]用类似的方法在含局域谐振子的超 材料梁中获得低频宽带的禁带.Chen等人^[53]将负电容 分流压电阵列与被动谐振子在一个单胞中复合,利用 负电容获得可调等效弯曲刚度,同时利用局域谐振子 得到负的等效质量,获得了一种"双负"材料.此外,Celli和Gonella^[54]利用负电容控制六边形单胞的空间对称 性,实现了波动传播指向性的主动调节.Ouisse等人^[55] 在Kirigami拉胀材料微结构中加入负电容分流压电单 元调控微结构的等效属性,获得了禁带位置可重构的 超材料.最近,Darabi等人^[56]利用负电容电路调控等效 弯曲刚度打破超材料单胞的空间对称性,实现了受拓 扑保护的非平凡带隙,设计了拓扑特性可快速重构的 机械拓扑绝缘体,实验证明有效.Zhou等人^[57]利用电 容分流电路设计了由均匀压电杆构成的力电耦合超材 料,并实现了对拓扑保护界面态的主动调控.Ning等 人^[58]设计了由有机硅和负电容分流压电陶瓷片构成的 主动控制弯曲波隐身斗篷,并通过实验验证该斗篷可 以实现900~1200 Hz宽频带的隐身效果.

负电容电路与电感电路复合可以增强谐振分流力 电耦合超材料的波控效果. Chen等人^[59]利用压电堆和 质量块设计谐振子获得局域谐振超材料,在压电堆电 极间连接负电容和负电感来调节压电堆刚度,获得了 极低频且极宽频的禁带范围. Hu等人^[60]以及Xiao等 人^[61]在力电耦合超材料梁和板结构中引入负电容电感



图 3 直接在结构表面粘贴压电单元设计的负电容分流力电耦合超材料^[44]. (a) 基于负电容分流压电阵列的智能结构透镜; (b) 弯曲波聚焦效果 **Figure 3** Electromechanical metamaterials with negative capacitances by directly bonding piezoelectric patches on the surfaces of host structures^[44]. (a) Smart structural lens based on piezoelectric patch arrays shunted with negative capacitances; (b) the focusing effects of flexural waves



图 4 具有微结构的负电容分流力电耦合超材料^[51]. (a) 含微结构负电容力电耦合超材料; (b) 等效密度和禁带位置的可调控特性 Figure 4 Electromechanical metamaterials with microstructures and negative capacitance shunts^[51]. (a) A electromechanical metamaterial with microstructures and negative capacitance shunts; (b) the tuning properties of the effective mass density as well as the bandgap locations

并联电路来拓宽禁带.最近,Yi和Collet^[24]通过理论分 析揭示了负电容与电感串联和并联时拓宽禁带范围的 机理,并且全面地分析了负电容对低频禁带的调控规 律.结果表明,通过合理设计负电容值,能够获得低频 宽带的禁带,数值仿真结果证明了低频宽带禁带内有 很好的振动传递阻隔效果.

2.3 电路网络分流力电耦合超材料

将周期分布的压电单元用电路网络分流电路相互 连接,弹性波能量不仅可以在结构中传输,还能被压电 单元转换成电能后在电路网络中传输.在波动传输过 程中,电路中的波与结构中的波通过压电单元的力电 耦合效应相互作用,产生新奇的波动现象.

dell'Isola和Vidoli^[62]最先提出将组成桁架结构的 压电作动器用包含分布电感的电路传输线连接,基于 长波假设建立了系统的连续介质模型. 研究表明, 通过 改变电路传输线中的电感, 能够调节传输线和桁架结 构中的波传播速度,并且存在一个临界电感值,使得电 路中的波速与结构中的波速最接近、两种波耦合效果 最强. 在临界状态, 一半的波动能量将在电路中传输, 若在电路中引入电阻元件将获得很好的减振效果.进 一步, dell'Isola等人^[63~65]在梁和板表面周期分布的压 电单元之间设计了电路网络,基于长波假设下的连续 介质模型研究了力电耦合系统中的波传播特性和振动 抑制效果. 研究表明. 不同电路网络的拓扑构型对减振 效果有很大的影响、当电路网络中波传播的控制方程 与结构中波传播控制方程一致时、能够获得宽频、多 模态的振动抑制效果. 受此启发, Lossouarn等人^[66,67]通 过实验证明,利用电路网络比拟被控梁或者板结构的 波动/振动特性, 能够获得很好的多模态振动控制效果. 在振动抑制之外,Yi等人^[68]研究了含电路网络的力电 耦合超材料板的隔声效果. 结果表明, 通过设计电路网 络中的电感和电阻,能够消除板隔声低谷,显著提高临 界频率附近的隔声效果.

在波传输控制方面, Bergamini等人^[69]将周期分布 在梁结构表面的压电单元用电感和电阻互相连接得到 电路网络(图5(a)),通过数值方法得到其中的弯曲波频 散曲线(图5(b)),发现当电路中波速与梁中波速接近时, 波将快速衰减. 与谐振分流力电耦合超材料的弯曲波 频散曲线对比发现,基于电路网络得到的波衰减效果 与谐振电路产生禁带的机理不同. Li等人^[70]在板结构 表面敷设周期压电单元,并将压电单元用电感电阻网 络相互连接(图5(c)),通过波有限元方法得到频散曲线. 分析发现,频散曲线出现的互锁现象(locking phenomenon)将导致耦合禁带的产生(图5(d)).除了线性电路, Bao等人^[71]在电路网络中引入同步开关非线性电路,获 得了更低频且更宽频的禁带,具有更好的波动衰减效 果.最近,Zheng等人^[72]利用单向传输的被动电路网络 与梁结构耦合,在梁中实现了非互易的弯曲波传输 效果.

3 基于传感-作动控制策略的力电耦合超材料

典型的传感-作动控制策略通过传感器、控制器、 作动器完成. 传感器测量特定的信号作为控制器的输 入,控制器根据输入信号以及写入其中的控制律产生 输出信号,直接或者间接作用在作动器上完成特定的 控制目的. 这种主动控制技术已被广泛探索用于振动 噪声控制^[73].近年来,越来越多的研究者尝试将主动控 制技术用于调控力电耦合超材料等效属性和波传播特 性,如图6所示. 基于主动控制技术的力电耦合超材料 具有很强的可设计性,其材料属性或者波控功能可在 线实时调控,甚至自适应调节.

基于传感-作动的方法能够实现对超材料等效属性 的编程调控. Wang等人^[74]提出在梁上下表面相对布置 压电片, 其中一片作为传感器, 另一片作为作动器, 传 感器和作动器之间连接包含微处理器的控制电路. 通 过设计微处理器中的控制律在电路中产生多频谐振, 从而使超材料梁在多个频率范围内具有谐振特征的等 效属性,实现多模态振动抑制效果.更先进的反馈控制 回路利用压电单元的自传感模式来实现,即通过测量 压电单元电极电压,并反馈相应的电流给同一压电单 元的方式,可以在压电单元电极之间建立任意需要的 电路阻抗,实现对超材料等效属性的控制,基于压电单 元自传感模式的反馈控制回路称为可编程数字电 路^[75]. 其等效电路阻抗等于数字电路中控制律的倒数. Yi等人^[76]利用可编程数字电路设计了如图7(a)所示的 力电耦合超材料梁,通过在数字电路中施加一阶控制 传函模拟局域谐振电路的行为, 在超材料梁中获得了 低频禁带. 通过在线调控控制传函中的参数, 可以实时 改变禁带的位置,消除不同指定模态的共振(图7(b)).另 外,通过彩虹效果设计,针对100~1100 Hz内9阶共振, 同时实现了15 dB以上的减振效果. 这种可编程超材料 的概念可自然推广到板、壳等结构、可作为未来先进 自适应智能结构的重要组件.



图 5 (网络版彩色)基于电路网络的力电耦合超材料结构. (a), (b) 基于电路网络的力电耦合超材料梁及其频散关系^[69]; (c), (d) 基于电路网络的 力电耦合超材料板及其频散关系^[70]

Figure 5 (Color online) Electromechanical metamaterials with interconnected shunts. (a), (b) An electromechanical metamaterial beam with interconnected shunts and the dispersion curves of waves in it⁽⁶⁹⁾; (c), (d) an electromechanical metamaterial plate with interconnected shunts and the dispersion curves of waves in it⁽⁷⁰⁾



图 6 (网络版彩色)基于传感-作动控制策略的力电耦合超材料设计原理图

Figure 6 (Color online) The mechanism of designing electromechanical metamaterials based on sensing-actuating control strategies

基于传感-作动策略能够实现自适应的谐振单 元^[77]. 在这种设计中, 数字电路被设计用来自适应调控 谐振单元的等效刚度, 进而实现宽频的弯曲波阻隔效 果(图8(a), (b)). 为了实现对等效刚度的自适应控制, 数 字电路中的控制律通过半解析的方法得到, 是一个关 于频率的二次函数. 传感-作动控制回路通过数字电路 和模拟电路组合实现(图8(c)), 并且能够保证所设计的 机电耦合系统在一个宽频范围内都有很好的稳定性. 所设计的自适应谐振超材料的宽频弯曲波衰减效果得 到了实验和数值验证,并且两种方法得到的结果有 很好的吻合度.结果表明,引入自适应刚度控制后,谐 振超材料的低频禁带宽度差不多是原来禁带宽度的3 倍(图8(d)),在低频宽带振动控制方面有广泛的应用 前景.

基于传感-作动策略设计的超材料能够打破动量或 者弹性势能保守特性,使系统与外界环境交互时,系统 机械能可以减少或者增加.打破保守特性需要在系统 中引入不对称性或者手性,打破Maxwell-Betti互易性



图 7 可编程力电耦合超材料结构用于振动抑制^[76]. (a) 数字可编程超材料梁; (b) 可编程调控禁带效果 Figure 7 Programmable electromechanical metamaterials and their applications in vibration reduction^[76]. (a) A digital programmable metamaterial beam; (b) the controllable bandgap effects

定律的约束^[78].具体可以通过传感-作动的主动控制策 略实现,在一些声学和机械系统中得到了验证^[79~82],通 常,主动控制策略需包含非对称的控制回路,比如传感 信号与作动信号具有不同的形式.因此,非对称主动控 制回路作用在不同方向的入射波上时将产生非互易现 象. 基于此, Chen等人^[83]提出了一种奇微极超材料 (图9(a)),其线动量和角动量守恒.利用梁结构表面的 压电单元和前馈控制回路在弯曲与剪切变形之间建立 非对称耦合关系,打破力电耦合之间的对称性,在微极 弹性矩阵中产生非对称的非对角线元素.因此,这种主 动材料的微极弹性矩阵是非对称的,或者说具有奇微 极特征,打破了Maxwell-Betti互易性定律(包括静态的 时候),能够产生非互易的波传播效果(图9(b), (c)).奇 微极超材料中另一个更突出的现象是非厄米皮肤效应 (non-Hermitian skin effect). 在周期边界条件下, 这种材 料的频散曲线向复平面投影时会出现卷绕现象. 当材 料不再是无限而是具有边界时、频散关系在复平面内

的形式将发生显著变化,并且存在大量振动局限在材料边界的特殊边界态.

基于传感-作动策略能够设计主动超表层(metalayer). Chen等人^[84]设计了如图10(a)所示的可编程超表 层,每个单胞包含两个压电传感器和一个压电作动器. 实验表明,通过编程控制超表层能够实现同时波定向 和波聚焦(图10(b))、单向非互易波阻隔和放大、空洞 隐身等现象.可编程超表面每个单胞都被单独地局部 控制,在一个宽频范围(5~50 kHz)内有效.此外,Chen 等人^[85]还设计了如图10(c)所示的超表层,每个单胞包 含一个压电传感器和两个压电作动器.设计此超表层 的目的是同时独立地控制反射波和透射波的幅值和相 位.这种超表层还能用于构建具有解耦的、非对称以 及可编程调控Willis耦合系数的Willis介质,其表现出 非对称的极化和非互易特征.数值仿真和实验研究表 明,这种超表层宽频有效.通过精细的编程控制透射系 数和反射系数的相位特征,能够在定向反射波的同时



图 8 自适应超材料结构及其弹性波阻隔效果^[77]. (a), (b) 具有自适应刚度谐振单元的超材料梁及其单胞; (c) 验证自适应超材料梁低频宽带弹性波阻隔效果的实验设置; (d) 弹性波阻隔的实验结果

Figure 8 Adaptive metamaterial structures and their elastic wave isolation effects^[77]. (a), (b) An adaptive metamaterial beam composed of resonant unit cells with adaptive stiffness, and a unit cell of it; (c) set-up of the experiment to verify the broadband low-frequency wave isolation effects of the adaptive metamaterial beam; (d) experimental results about the elastic wave isolation effects



图 9 奇微极超材料及其波控效果^[83]. (a) 奇微极超材料梁; (b), (c) 非互易波传输效果 Figure 9 Odd-polarity metamaterials and their wave control effects^[83]. (a), (b) Odd-polarity metamaterial beam; (b), (c) non-reciprocal wave propagation effects

聚焦透射波,如图10(d)所示.除了操控波动路径,超表 层还可以用来控制结构振动.Li等人^[86]在梁结构端部 上下布置压电单元,其中一片作为传感器,另一片作为 作动器.基于传感器和作动器的频响特性,设计了传感 器和作动器之间的控制律,能够在5~50 kHz范围内实 现完美吸波.这种吸波超边界被用于梁结构振动控制, 结果表明,5~30 kHz范围内的共振得到了有效的抑制.

此外, Sugino等人^[87]利用数字电路设计并实验研 究了可编程超材料梁, 证明梁的禁带位置可在线实时 改变. Zhang等人^[88]通过设计合适的控制律模拟非线性 电容行为, 与模拟电感器件组合得到具有倒转非线性 行为的超材料梁. 研究发现, 外部激振力幅值越低, 由 倒转非线性电路在梁中产生的禁带越宽. Li等人^[89]利 用上下相对布置的压电片分别做传感器和作动器, 通 过合理设计控制律实现了主动可调的禁带. Sirota等 人^[90]利用反馈控制调控超材料宏观等效参数, 获得了 负刚度、负密度等特性以及对应的非常规波控能力. Yi等人^[91]利用反馈控制电路对力电耦合超材料梁的等 效抗弯刚度在空间以及时间上同时进行调制,获得了 单向振动隔离效果.

4 讨论

与被动超材料相比,力电耦合超材料具有一定的 优势和不足.力电耦合超材料在微结构拓扑构型和材 料组分之外,额外引入了外部耦合电场这一新的自由 度,使其非常规属性与波控功能的设计受材料、空 间、质量等外部因素的限制小.此外,通过调节和改变 外部耦合电场,力电耦合超材料的等效属性及功能很 容易被重构,为自适应、多功能材料和结构的设计提 供了可能.需要指出的是,与被动超材料的简单和高可 靠性相比,由于引入了外部控制电路,力电耦合超材料 相对更加复杂,实际应用中需充分考虑机电结构稳定



图 10 力电耦合超表层及其波控效果. (a), (b) 可编程超表层及其波动路径操控实验结果^[84]; (c), (d) Willis超表层及其波动路径调控效果^[85] Figure 10 Electromechanical meta-layers and their wave control effects. (a), (b) Programmable meta-layer and the experimental results about its effects on manipulating wave propagation trays^[84]; (c), (d) Willis meta-layer and its effects on manipulating wave propagation trays^[85]

性、电路功率和最大输出电压等.此外,当前在力电耦 合超材料中广泛使用力电耦合能力较大的压电陶瓷材 料,但是压电陶瓷易碎,使力电耦合超材料的可靠性受 到一定限制.随着微机械电子技术的发展和压电材料 性能的提高,力电耦合超材料有望克服以上不足.

当前,力电耦合超材料在实际工程中的应用处在 探索阶段.通过外部耦合电场,甚至辅以微结构设计, 力电耦合超材料实现了负属性、非互易性、Willis耦 合、拓扑态、奇微极等非常规性质,具有波动阻隔、 波聚焦、单向波传输、绕射隐身等功能.利用波动阻 隔的功能,力电耦合超材料被广泛探索,用于梁、板等 工程结构的减振、降噪和隔声^[29-37,92-94].波聚焦功能 在波动能量收集和结构健康监测等方面有一定的应用 前景^[45,46].单向波传输、绕射隐身等非常规波控功能 在振动隔离、敏感结构保护、波动器件设计等应用领 域值得探索.此外,力电耦合主动超材料的设计方法与 思路(比如单胞控制单元、力电耦合控制策略等)可用 于其他机电控制工程或者机器人等.

本文聚焦于力电耦合超材料,但值得指出的是,在 力电耦合基础上可以进一步融合多场耦合特点,实现 多功能的波动调控. Wang等人^[95]研究了同时考虑力电 磁耦合的压电/压磁声子晶体与弹性波超材料,建立了 压电/压磁声子晶体模型,揭示了力电磁耦合作用下弹 性波禁带特性的调控机制. Bao等人^[96]设计了具有隐身 特性的压电/压磁隐身结构,压磁效应使其隐身功能大 幅度改进的同时,明显改善了结构的动应力集中效果, 提升了结构动态强度.

5 总结与展望

本文根据外部电场作用的实现方式,将力电耦合 超材料归纳为分流电路型和传感-作动型两大类,从等 效属性和波控功能的电场调控机理、耦合电场/微结构 设计以及波动调控效果等方面,分别总结和讨论了两类 超材料的发展历程和趋势,为力电耦合超材料的研究 提供了参考.根据力电耦合超材料的研究现状和趋势, 本文最后提出以下发展方向或者需要解决问题的建议.

(1)低频宽带禁带的实现.低频振动噪声控制是航空航天以及水下装备面临的难题,谐振分流力电耦合超材料在不引入过多附加质量的前提下能够有效抑制低频振动噪声,然而,如何拓宽低频禁带获得宽低频振动噪声控制效果仍然面临挑战.

(2)等效属性的动态均匀化理论和方法.动态均匀 化在超材料等效属性表征和实现特定波控功能的微结 构设计等方面有很大的帮助.然而,目前关于力电耦合 超材料动态均匀化理论和方法的研究还很少.

(3) 波动特性的高效数值预报方法. 力电耦合超材 料包含压电材料、控制电路以及基底结构等. 其中, 基 底结构可能包含复合材料、黏弹材料, 或者具有蜂 窝、夹层等复杂构型, 控制电路的动态响应可能与频 率相关. 这些特征导致某些复杂力电耦合超材料全频 段的波动特性很难用理论方法来预报, 需要发展高效 的数值预报方法.

(4) 奇弹性力电耦合超材料. 奇弹性超材料指一类 等效弹性矩阵对称性破缺的材料, 能够产生诸如过阻 尼波传播、皮肤效应等反常的非厄米波动现象^[78]. 实 现奇弹性需要通过引入非对称或者手性打破Maxwell-Betti互易性对材料变形的约束. Chen等人^[83]利用非对 称控制回路在一维力电耦合超材料梁中实现了类似的 奇微极弹性, 然而更具一般性的二维和三维奇弹性材 料尚待发展.

(5) 多功能、自适应力电耦合超材料. 未来装备向 着智能化发展, 要求材料和结构具有多功能、自适应 等特点. 力电耦合超材料等效属性和力学性能可以通 过外部电场调控, 具备实现多功能和自适应能力的潜 力, 如同时实现减振、降噪和结构健康监测等, 并且减 振降噪效果可以根据工况和环境自适应调节.

参考文献-

1 Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. Science, 2000, 289: 1734–1736

2 Zhou X, Hu G. Analytic model of elastic metamaterials with local resonances. Phys Rev B, 2009, 79: 195109

3 Fang N, Xi D, Xu J, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. Nat Mater, 2006, 5: 452-456

⁴ Huang H H, Sun C T. Theoretical investigation of the behavior of an acoustic metamaterial with extreme Young's modulus. J Mech Phys Solids, 2011, 59: 2070–2081

⁵ Huang H H, Sun C T. Anomalous wave propagation in a one-dimensional acoustic metamaterial having simultaneously negative mass density and Young's modulus. J Acoust Soc Am, 2012, 132: 2887–2895

⁶ Liu X N, Hu G K, Huang G L, et al. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus. Appl Phys Lett, 2011,

98: 251907

- 7 Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. Negative refraction of elastic waves at the deep-subwavelength scale in a single-phase metamaterial. Nat Commun, 2014, 5: 5510
- 8 Milton G W, Cherkaev A V. Which elasticity tensors are realizable? J Eng Mater Technol, 1995, 117: 483-493
- 9 Zhang H K, Chen Y, Liu X N, et al. An asymmetric elastic metamaterial model for elastic wave cloaking. J Mech Phys Solids, 2020, 135: 103796
- 10 Rossiter J, Takashima K, Scarpa F, et al. Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness. Smart Mater Struct, 2014, 23: 045007
- 11 Wang Z, Zhang Q, Zhang K, et al. Tunable digital metamaterial for broadband vibration isolation at low frequency. Adv Mater, 2016, 28: 9857– 9861
- 12 Wang Y F, Wang Y Z, Wu B, et al. Tunable and active phononic crystals and metamaterials. Appl Mech Rev, 2020, 72: 040801
- 13 Wang T T, Wang Y F, Wang Y S, et al. Tunable fluid-filled phononic metastrip. Appl Phys Lett, 2017, 111: 041906
- 14 Bertoldi K, Boyce M C. Wave propagation and instabilities in monolithic and periodically structured elastomeric materials undergoing large deformations. Phys Rev B, 2008, 78: 184107
- 15 Wang P, Casadei F, Shan S, et al. Harnessing buckling to design tunable locally resonant acoustic metamaterials. Phys Rev Lett, 2014, 113: 014301
- 16 Thota M, Li S, Wang K W. Lattice reconfiguration and phononic band-gap adaptation via origami folding. Phys Rev B, 2017, 95: 064307
- 17 Preumont A. Mechatronics. New York: Springer, 2006
- 18 Thorp O, Ruzzene M, Baz A. Attenuation and localization of wave propagation in rods with periodic shunted piezoelectric patches. Smart Mater Struct, 2001, 10: 979–989
- 19 Rao M, Narayanan S. Active control of wave propagation in multi-span beams using distributed piezoelectric actuators and sensors. Smart Mater Struct, 2007, 16: 2577–2594
- 20 Casadei F, Ruzzene M, Dozio L, et al. Broadband vibration control through periodic arrays of resonant shunts: Experimental investigation on plates. Smart Mater Struct, 2009, 19: 015002
- 21 Casadei F, Dozio L, Ruzzene M, et al. Periodic shunted arrays for the control of noise radiation in an enclosure. J Sound Vib, 2010, 329: 3632– 3646
- 22 Airoldi L, Ruzzene M. Design of tunable acoustic metamaterials through periodic arrays of resonant shunted piezos. New J Phys, 2011, 13: 113010
- 23 Sugino C, Leadenham S, Ruzzene M, et al. An investigation of electroelastic bandgap formation in locally resonant piezoelectric metastructures. Smart Mater Struct, 2017, 26: 055029
- 24 Yi K, Collet M. Broadening low-frequency bandgaps in locally resonant piezoelectric metamaterials by negative capacitance. J Sound Vib, 2021, 493: 115837
- 25 Wang G, Wang J, Chen S, et al. Vibration attenuations induced by periodic arrays of piezoelectric patches connected by enhanced resonant shunting circuits. Smart Mater Struct, 2011, 20: 125019
- 26 Wang G, Chen S. Large low-frequency vibration attenuation induced by arrays of piezoelectric patches shunted with amplifier-resonator feedback circuits. Smart Mater Struct, 2015, 25: 015004
- 27 Airoldi L, Ruzzene M. Wave propagation control in beams through periodic multi-branch shunts. J Intell Mater Syst Struct, 2011, 22: 1567–1579
- 28 Cardella D, Celli P, Gonella S. Manipulating waves by distilling frequencies: A tunable shunt-enabled rainbow trap. Smart Mater Struct, 2016, 25: 085017
- 29 Collet M, Ouisse M, Tateo F. Adaptive metacomposites for vibroacoustic control applications. IEEE Sens J, 2014, 14: 2145–2152
- 30 Zhou W, Wu Y, Zuo L. Vibration and wave propagation attenuation for metamaterials by periodic piezoelectric arrays with high-order resonant circuit shunts. Smart Mater Struct, 2015, 24: 065021
- 31 Fan Y, Collet M, Ichchou M, et al. Energy flow prediction in built-up structures through a hybrid finite element/wave and finite element approach. Mech Syst Signal Proc, 2016, 66-67: 137–158
- 32 Chen S, Wang G, Song Y. Low-frequency vibration isolation in sandwich plates by piezoelectric shunting arrays. Smart Mater Struct, 2016, 25: 125024
- 33 Chen S, Wang G, Wen J, et al. Wave propagation and attenuation in plates with periodic arrays of shunted piezo-patches. J Sound Vib, 2013, 332: 1520–1532
- 34 Zhang H, Wen J, Xiao Y, et al. Sound transmission loss of metamaterial thin plates with periodic subwavelength arrays of shunted piezoelectric patches. J Sound Vib, 2015, 343: 104–120
- 35 Sugino C, Erturk A. Analysis of multifunctional piezoelectric metastructures for low-frequency bandgap formation and energy harvesting. J Phys D-Appl Phys, 2018, 51: 215103
- 36 Casadei F, Delpero T, Bergamini A, et al. Piezoelectric resonator arrays for tunable acoustic waveguides and metamaterials. J Appl Phys, 2012, 112: 064902

- 37 Xu J, Tang J. Tunable prism based on piezoelectric metamaterial for acoustic beam steering. Appl Phys Lett, 2017, 110: 181902
- 38 de Marneffe B, Preumont A. Vibration damping with negative capacitance shunts: Theory and experiment. Smart Mater Struct, 2008, 17: 035015
- 39 Berardengo M, Manzoni S, Thomas O, et al. Piezoelectric resonant shunt enhancement by negative capacitances: Optimisation, performance and resonance cancellation. J Intell Mater Syst Struct, 2018, 29: 2581–2606
- 40 Tateo F, Collet M, Ouisse M, et al. Design variables for optimizing adaptive metacomposite made of shunted piezoelectric patches distribution. J Vib Control, 2016, 22: 1838–1854
- 41 Collet M, Cunefare K A, Ichchou M N. Wave motion optimization in periodically distributed shunted piezocomposite beam structures. J Intell Mater Syst Struct, 2009, 20: 787–808
- 42 Collet M, Ouisse M, Ichchou M N. Structural energy flow optimization through adaptive shunted piezoelectric metacomposites. J Intell Mater Syst Struct, 2012, 23: 1661–1677
- 43 Fan Y, Collet M, Ichchou M, et al. A wave-based design of semi-active piezoelectric composites for broadband vibration control. Smart Mater Struct, 2016, 25: 055032
- 44 Yi K, Collet M, Ichchou M, et al. Flexural waves focusing through shunted piezoelectric patches. Smart Mater Struct, 2016, 25: 075007
- 45 Yi K, Monteil M, Collet M, et al. Smart metacomposite-based systems for transient elastic wave energy harvesting. Smart Mater Struct, 2017, 26: 035040
- 46 Yi K, Collet M, Chesne S, et al. Enhancement of elastic wave energy harvesting using adaptive piezo-lens. Mech Syst Signal Proc, 2017, 93: 255– 266
- 47 Chen Y Y, Zhu R, Barnhart M V, et al. Enhanced flexural wave sensing by adaptive gradient-index metamaterials. Sci Rep, 2016, 6: 35048
- 48 Ning L, Wang Y Z, Wang Y S. Active control of a black hole or concentrator for flexural waves in an elastic metamaterial plate. Mech Mater, 2020, 142: 103300
- 49 Marconi J, Riva E, Di Ronco M, et al. Experimental observation of nonreciprocal band gaps in a space-time-modulated beam using a shunted piezoelectric array. Phys Rev Appl, 2020, 13: 031001
- 50 Chen Y Y, Huang G L, Sun C T. Band gap control in an active elastic metamaterial with negative capacitance piezoelectric shunting. J Vib Acoust Trans ASME, 2014, 136: 061008
- 51 Zhu R, Chen Y Y, Barnhart M V, et al. Experimental study of an adaptive elastic metamaterial controlled by electric circuits. Appl Phys Lett, 2016, 108: 011905
- 52 Zhou W, Muhammad W, Chen W, et al. Actively controllable flexural wave band gaps in beam-type acoustic metamaterials with shunted piezoelectric patches. Eur J Mech A-Solids, 2019, 77: 103807
- 53 Chen Y, Hu G, Huang G. A hybrid elastic metamaterial with negative mass density and tunable bending stiffness. J Mech Phys Solids, 2017, 105: 179–198
- 54 Celli P, Gonella S. Tunable directivity in metamaterials with reconfigurable cell symmetry. Appl Phys Lett, 2015, 106: 091905
- 55 Ouisse M, Collet M, Scarpa F. A piezo-shunted kirigami auxetic lattice for adaptive elastic wave filtering. Smart Mater Struct, 2016, 25: 115016
- 56 Darabi A, Collet M, Leamy M J. Experimental realization of a reconfigurable electroacoustic topological insulator. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 16138–16142
- 57 Zhou W, Wu B, Chen Z, et al. Actively controllable topological phase transition in homogeneous piezoelectric rod system. J Mech Phys Solids, 2020, 137: 103824
- 58 Ning L, Wang Y Z, Wang Y S. Active control cloak of the elastic wave metamaterial. Int J Solids Struct, 2020, 202: 126–135
- 59 Chen Y Y, Hu G K, Huang G L. An adaptive metamaterial beam with hybrid shunting circuits for extremely broadband control of flexural waves. Smart Mater Struct, 2016, 25: 105036
- 60 Hu G, Austin A C M, Sorokin V, et al. Metamaterial beam with graded local resonators for broadband vibration suppression. Mech Syst Signal Proc, 2021, 146: 106982
- 61 Xiao X, He Z C, Li E, et al. A lightweight adaptive hybrid laminate metamaterial with higher design freedom for wave attenuation. Compos Struct, 2020, 243: 112230
- 62 dell'Isola F, Vidoli S. Continuum modelling of piezoelectromechanical truss beams: An application to vibration damping. Arch Appl Mech, 1998, 68: 1–19
- 63 Vidoli S, dell'Isola F. Modal coupling in one-dimensional electromechanical structured continua. Acta Mech, 2000, 141: 37-50
- 64 Vidoli S, dell'Isola F. Vibration control in plates by uniformly distributed PZT actuators interconnected via electric networks. Eur J Mech A-Solids, 2001, 20: 435–456
- 65 Alessandroni S, Andreaus U, dell'Isola F, et al. Piezo-electromechanical (PEM) Kirchhoff-Love plates. Eur J Mech A-Solids, 2004, 23: 689–702
- 66 Lossouarn B, Deü J F, Aucejo M. Multimodal vibration damping of a beam with a periodic array of piezoelectric patches connected to a passive electrical network. Smart Mater Struct, 2015, 24: 115037

- 67 Lossouarn B, Deü J F, Aucejo M, et al. Multimodal vibration damping of a plate by piezoelectric coupling to its analogous electrical network. Smart Mater Struct, 2016, 25: 115042
- 68 Yi K J, Lin L, Ichchou M, et al. Sound insulation performance of plates with interconnected distributed piezoelectric patches. Chin J Aeronaut, 2017, 30: 99–108
- 69 Bergamini A E, Zündel M, Flores Parra E A, et al. Hybrid dispersive media with controllable wave propagation: A new take on smart materials. J Appl Phys, 2015, 118: 154310
- 70 Li L, Jiang Z, Fan Y, et al. Creating the coupled band gaps in piezoelectric composite plates by interconnected electric impedance. Materials, 2018, 11: 1656
- 71 Bao B, Guyomar D, Lallart M. Vibration reduction for smart periodic structures via periodic piezoelectric arrays with nonlinear interleavedswitched electronic networks. Mech Syst Signal Proc, 2017, 82: 230–259
- 72 Zheng Y, Zhang J, Qu Y, et al. Adaptive nonreciprocal wave attenuation in linear piezoelectric metastructures shunted with one-way electrical transmission lines. J Sound Vib, 2021, 503: 116113
- 73 Fuller C C, Elliott S, Nelson P A. Active Control of Vibration. Pittsburgh: Academic Press, 1996
- 74 Wang G, Cheng J, Chen J, et al. Multi-resonant piezoelectric shunting induced by digital controllers for subwavelength elastic wave attenuation in smart metamaterial. Smart Mater Struct, 2017, 26: 025031
- 75 Matten G, Collet M, Cogan S, et al. Synthetic impedance for adaptive piezoelectric metacomposite. Procedia Technol, 2014, 15: 84-89
- 76 Yi K, Matten G, Ouisse M, et al. Programmable metamaterials with digital synthetic impedance circuits for vibration control. Smart Mater Struct, 2020, 29: 035005
- 77 Li X, Chen Y, Hu G, et al. A self-adaptive metamaterial beam with digitally controlled resonators for subwavelength broadband flexural wave attenuation. Smart Mater Struct, 2018, 27: 045015
- 78 Scheibner C, Souslov A, Banerjee D, et al. Odd elasticity. Nat Phys, 2020, 16: 475-480
- 79 Brandenbourger M, Locsin X, Lerner E, et al. Non-reciprocal robotic metamaterials. Nat Commun, 2019, 10: 4608
- 80 Rosa M I N, Ruzzene M. Dynamics and topology of non-Hermitian elastic lattices with non-local feedback control interactions. New J Phys, 2020, 22: 053004
- 81 Sasmal A, Geib N, Popa B I, et al. Broadband nonreciprocal linear acoustics through a non-local active metamaterial. New J Phys, 2020, 22: 063010
- 82 Geib N, Sasmal A, Wang Z, et al. Tunable nonlocal purely active nonreciprocal acoustic media. Phys Rev B, 2021, 103: 165427
- 83 Chen Y, Li X, Scheibner C, et al. Realization of active metamaterials with odd micropolar elasticity. Nat Commun, 2021, 12: 5935
- 84 Chen Y, Li X, Nassar H, et al. A programmable metasurface for real time control of broadband elastic rays. Smart Mater Struct, 2018, 27: 115011
- 85 Chen Y, Li X, Hu G, et al. An active mechanical Willis meta-layer with asymmetric polarizabilities. Nat Commun, 2020, 11: 3681
- 86 Li X, Chen Y, Zhu R, et al. An active meta-layer for optimal flexural wave absorption and cloaking. Mech Syst Signal Proc, 2021, 149: 107324
- 87 Sugino C, Ruzzene M, Erturk A. Digitally programmable resonant elastic metamaterials. Phys Rev Appl, 2020, 13: 061001
- 88 Zhang X, Yu H, He Z, et al. A metamaterial beam with inverse nonlinearity for broadband micro-vibration attenuation. Mech Syst Signal Proc, 2021, 159: 107826
- 89 Li F, Zhang C, Liu C. Active tuning of vibration and wave propagation in elastic beams with periodically placed piezoelectric actuator/sensor pairs. J Sound Vib, 2017, 393: 14–29
- 90 Sirota L, Semperlotti F, Annaswamy A M. Tunable and reconfigurable mechanical transmission-line metamaterials via direct active feedback control. Mech Syst Signal Proc, 2019, 123: 117–130
- 91 Yi K, Ouisse M, Sadoulet-Reboul E, et al. Active metamaterials with broadband controllable stiffness for tunable band gaps and non-reciprocal wave propagation. Smart Mater Struct, 2019, 28: 065025
- 92 He Z H, Wang Y Z, Wang Y S. Sound transmission tuned by active feedback control attached to elastic wave metamaterials immersed in water. J Appl Mech, 2021, 88: 071007
- 93 He Z H, Wang Y Z, Wang Y S. Sound transmission comparisons of active elastic wave metamaterial immersed in external mean flow. Acta Mech Solid Sin, 2021, 34: 307–325
- 94 He Z H, Wang Y Z, Wang Y S. Active feedback control of sound radiation in elastic wave metamaterials immersed in water with fluid-solid coupling. Acta Mech Sin, 2021, 37: 803–825
- 95 Wang Y Z, Li F M, Huang W H, et al. Wave band gaps in two-dimensional piezoelectric/piezomagnetic phononic crystals. Int J Solids Struct, 2008, 45: 4203–4210
- 96 Bao H Y, Wang Y Z, Wang Y S. Elastic wave cloak and invisibility of piezoelectric/piezomagnetic mechanical metamaterials. J Acoust Soc Am, 2020, 148: 3722–3736

Summary for "力电耦合主动超材料及其弹性波调控"

Electromechanical active metamaterials and their applications in controlling elastic wave propagation

Kaijun Yi^{1*}, Yangyang Chen^{2*}, Rui Zhu¹ & Guoliang Huang²

¹ School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri, Columbia MO 65211, USA

* Corresponding authors, E-mail: kaijun.yi@bit.edu.cn; yc896@mail.missouri.edu

Elastic metamaterials can be used to manipulate wave propagation in many unprecedented ways. Passive metamaterials are first being widely studied and have been used to prohibit wave propagation, realize negative refraction, focus waves or achieve cloaking effects. Such abilities make them very useful in applications like low-frequency vibration and noise reduction, structural health monitoring and wave energy harvesting. However, passive metamaterials are difficult to be modified after being fabricated, which restricts their practical applications in various engineering situations. Electromechanical metamaterials have the abilities to overcome such limitation. Unlike passive metamaterials, the unconventional properties of which mainly come from the components and micro-structures, the properties of electromechanical metamaterials can also be modified via external electric fields. On one hand, one can obtain extraordinary wave propagation effects in electromechanical metamaterials with properly designed coupling effects between the metamaterial and electric field. On the other hand, the properties of such metamaterials can be tuned by modifying the external electric field.

In this review, the basic conceptions of electromechanical metamaterials are introduced first. According to the features of the applied external electric fields, electromechanical metamaterials are then divided into two different types. Research history and trend of them are introduced, respectively. This review mainly clarifies three basic issues concerning each type of electromechanical metamaterials: What is the mechanism behind the unprecedented properties realized with electric field? How to design the unit cell for the applied electric field on the metamaterial? What kind of wave controls can be achieved?

The first type of electromechanical metamaterials is realized by periodically bonding piezoelectric patches on the surfaces of structures, like beams and plates. The patches are shunted with external circuits. When inductors are used in the shunts, there will be low-frequency bandgaps in the metamaterials, which are results of the resonances of the shunts. The patches can also be shunted with negative capacitances to design metamaterials with tunable properties. Also, the shunts can be interconnected to form electrical networks. In such metamaterials, energy can be transported in the mechanical structures in the form of elastic waves; it can also be spread in the form of electromagnetic waves, which propagate in the electric network. Waves in the mechanical part and electrical part interact with each other, leading to peculiar wave propagation phenomena, such as coupled bandgap, nonreciprocal wave propagation. The second type of electromechanical metamaterials is designed using active control strategies. In a basic active control loop, there are sensor, actuator and controller. The sensor measures a particular signal, which is used as the input of the controller. The controller generates output signals according to the input signal and the implemented control law, and such output is applied on the actuator to control the properties of the metamaterial. By precisely designing the measured and controlled physical quantities, as well as the control law, one can design programmable metamaterials, whose propagation. Even the momentum or potential energy conservations of materials can be violated with active designs to obtain odd micropolar elasticity.

Finally, it is suggested that, the future studies on electromechanical metamaterials should be focused on multi-functional and adaptive materials, exploring more unconventional wave propagation effects, which are difficult to be realized using passive metamaterials. Also, to overcome the drawbacks of current electromechanically metamaterials, efforts should be devoted to design metamaterials with broadband and low-frequency wave control properties. Dynamic homogenization methods and efficient numerical tools to predict wave propagation properties should also be developed to facilitate the development of electromechanical metamaterials.

electromechanical metamaterials, active metamaterials, piezoelectric materials, elastic wave propagation control, vibration and noise reduction

doi: 10.1360/TB-2021-0573