



声学超材料的非互易性研究进展

冯陆洋^{1,2*}, 陈久久^{2*}, 黄宏波²

1. 华北水利水电大学机械学院, 郑州 450045;

2. 湖南大学机械与运载工程学院, 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082

* 联系人, E-mail: lyfeng@hnu.edu.cn; jjchen@hnu.edu.cn

2021-06-01 收稿, 2021-09-27 修回, 2021-09-28 接受, 2021-10-01 网络版发表

国家自然科学基金(12074114)资助

摘要 声学超材料的非互易性在声学整流、声拓扑和隔声降噪等领域具有重大的应用前景, 引起了广泛的关注和研究. 然而, 互易性是线性系统中波动方程的基本性质, 它源于系统的时间反演对称性. 要打破系统的互易性, 实现声波的非互易性是极其困难的. 本文总结了声波非互易性的研究成果, 主要从基于非线性介质、动态分量、磁弹性相互作用等实现声波非互易性的3种方法出发, 给出了相应的原理、发展历程以及存在的问题. 最后, 指明了声波非互易性在未来研究的重要方向, 以期对相关研究提供有效参考.

关键词 超材料, 声波, 非互易性, 非线性, 磁弹性相互作用

随着科技、工业和生活水平的不断提高, 人们对材料性能的要求越来越高. 然而, 传统材料越来越难以满足实际需求, 因而人们不断探索具有特殊功能的人工复合材料, 各种类型的超材料不断被发现. 其中, 声学超材料是一种新型的人工结构材料, 通常由周期分布的元胞构成, 其尺寸介于微观尺度和宏观尺度之间, 具有传统材料所欠缺的超常物理性质, 比如负密度、负弹性模量、负磁导率等, 这极大地拓展了材料的声学功能. 目前, 声学超材料已得到广泛的研究, 大量新颖奇特的声学特性被发现, 如拓扑特性、负折射特性、禁带特性等, 为声波的调控提供了新思路.

声学超材料的非互易性作为一种极其重要的声学响应性质, 在能流控制^[1~5]、成像技术^[6~8]和拓扑绝缘体^[9~14]等领域具有重大的应用潜能, 引起了科研工作者极大的研究热情. 非互易性指波在一个方向上能够不受阻碍地传输, 而在相反方向上的传输基本被禁止的现象. 电子二极管作为电子系统中的非互易器件, 它的发现引起了全球范围内信息产业和半导体行业的巨

大进步, 加快了科技的前进步伐, 极大地提高了人们的生活水平. 受电子二极管巨大作用的激励, 研究者在非线性晶格中实现了对热能具有整流作用的热敏二极管^[15,16]. 类似地, 在光学系统中, 科研人员通过光学介质的非线性^[17,18]和模式转换^[19,20]等方式实现了光学的非互易性. 同样地, 学者也期望在声学系统中实现类似电子二极管、热学二极管或光学二极管等具有非互易性的声学二极管, 用于声波的单向操控. 然而, 在自然界的多种物理系统中, 对波的传输而言, 互易性是本质存在的特性. 这是由于它受时间反演对称性保护, 要打破系统的时间反演对称性, 实现声波的非互易性是极其困难的. 目前, 实现声波非互易性的方法被广泛地研究^[7,21,22]. 总的来说, 实现声波非互易性方法的主要有3种: 基于声学材料的非线性^[2,3,23~26]、引入动态分量^[6,27~31]和磁弹性相互作用^[32~35]等. 然而, 这些方法的研究还不够完善, 而且还存在特定的问题. 比如, 非线性方法引入了声波固有的低转换效率和信号畸变, 引入动态分量方案难以在高速调制的情况下或纳米级的

引用格式: 冯陆洋, 陈久久, 黄宏波. 声学超材料的非互易性研究进展. 科学通报, 2022, 67: 1214–1222

Feng L Y, Chen J J, Huang H B. Progress on nonreciprocity of acoustic metamaterials (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1214–1222, doi: 10.1360/TB-2021-0525

场合下使用, 基于磁弹性相互作用的方法带宽窄、频率高, 这些不足严重限制了非互易性的应用范围。

本文详细梳理了这些方法实现声波非互易性的原理、研究历程以及存在的问题。最后, 指明了声波非互易性在未来的重要研究趋势, 可为相关研究提供有效参考。

1 基于非线性介质的非互易性

非线性介质能将入射的基频声波转换成二次谐波或高次谐波, 即声波经过非线性介质后, 其频率范围向高频移动。另外, 声子晶体具有禁带特性, 禁带能够禁止相应频率范围内的声波在声子晶体内传输。科研人员希望利用非线性介质的倍频作用和声子晶体的禁带来实现声波的非互易传输现象。Liang等人^[23]借助线性声子晶体的带隙特性和非线性介质的倍频特性, 以理论方式证明了声波的非互易性。接着, Liang等人^[2]进一步借助玻璃与水复合而成的声子晶体和由医学超声造影剂微气泡组成的非线性材料, 构成一维声波整流系统, 以实验的方式实现了声波的非互易性, 相应的实验原理图如图1所示。从左端传感器入射的声波, 其频率位于声子晶体的带隙范围内, 能量被完全反射, 右端的传感器没有接收到声波信号; 从右端传感器入射的声波被非线性材料倍频到通带内而通过整个结构, 到达另一端的传感器。

Boechler等人^[3]基于非线性机理, 在静态预压的一维颗粒链上实现了声波的非互易性。在靠近颗粒链的缺陷端施加激励, 在禁带中产生非线性模, 因而对应禁带频率的声波能顺利通过一维颗粒链; 在远离颗粒链的缺陷端施加激励, 无非线性模产生, 声波的传输被禁带禁止, 不能到达颗粒链另一端。然而, 基于非线性非互易性仅能让倍频部分的能量通过, 禁止原始频率

的能量通过, 降低了导通方向的能量传递效率。Liu等人^[26]提出了一种保留声波频率并具有较高前向传输率的非互易系统。理论分析表明, 所提出的非互易系统具有与电子二极管相似的正向、反向和击穿特性。上述的非互易性系统要实现对低频噪声或振动的控制, 在厚度方向上往往需要几十个波长, 这是一个非常大的尺寸, 不利于实际应用。Fang等人^[36]将非线性局域共振单元引入非互易系统中, 实现了在低频、小尺寸下的声波非互易性, 而且系统具有频率保留的双向非互易性。最近, Li等人^[37]研究了初始应力对非线性超材料中面内弹性波和面外弹性波传播特性的影响。基于布洛赫定律和传递/刚度矩阵方法, 计算在初始应力作用下的带结构和传输系数, 证明了弹性波的非互易传输。与之前的研究显著不同, 该方法为研究弹性波在不同入射角度时的非互易传输提供了理论基础。此外, 通过调节初始应力可以实现系统非互易性的调节, 这增加了系统的自由度, 更适用于复杂多变的实际应用场合。考虑声波非互易性的研究主要集中在二维空间中, 对于三维空间中声波非互易性的研究较为缺乏。Li等人^[38]借助布洛赫定律和传递/刚度矩阵方法研究了三维空间中声波非互易传输。基于该研究方法所特有的矢量计算特性, 他们讨论了入射方位角对非线性声子晶体和弹性波超材料中弹性波传播行为的影响, 发现入射方位角可使非互易传输的频率区间向高频区移动, 这为设计具有矢量特性的非互易器件提供了新思路。

但是, 上述这些基于非线性介质的声波非互易结构也具有明显的不足, 比如能量转换效率不高, 使导通方向的传输系数较低, 同时转换过程中存在信号畸变, 可能导致接收端接收到错误的信号。

2 基于动态分量的非互易性

声波在静止空气中传输, 两点之间的正反向传输时间是相同的; 若是在流动的空气中传输, 很容易发现两点之间的正反向传输时间是不同的, 是否还会存在其他的传输现象呢? Fleury等人^[6]详细研究了声波在流动空气中的传输情况, 通过设计一种通入旋转气流的三端口环形共振腔, 基于旋转气流诱导的声学涡磁场矢量势来打破系统的时间反演对称性, 实现了声波非互易传输, 如图2所示。当旋转气流的速度为零时, 系统的时间反演对称性保持, 从2端口到1端口的传输效率 S_{21} 与从3端口到1端口的传输效率 S_{31} 相同, 系统不存在非互易性; 当旋转气流的速度为非零时, 系统的时间反

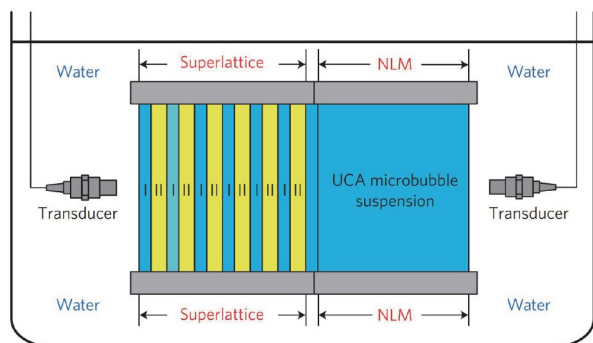


图1 (网络版彩色) 声学二极管实验原理图^[2]

Figure 1 (Color online) Experimental schematic diagram of acoustic diodes^[2]

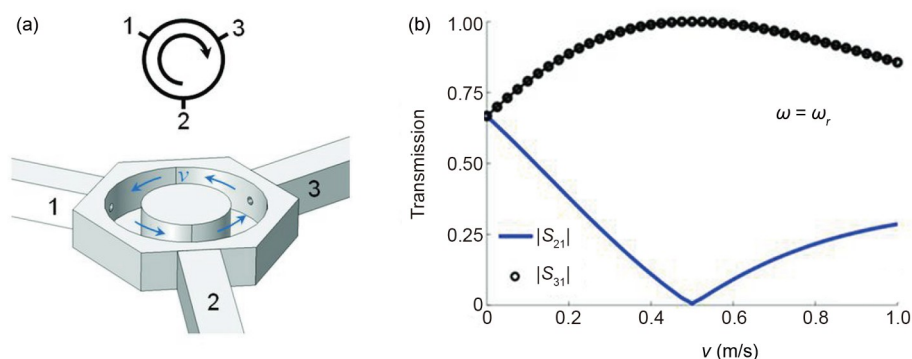


图2 (网络版彩色)旋转流体诱导的非互易原理图^[6]. (a) 三端口环形共振腔. (b) 不同流速下的传输率

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of nonreciprocity induced by rotating fluid^[6]. (a) Three-port circular resonant cavity. (b) Transmission at different flow rates

演对称性被破坏, 传输效率 S_{21} 较低, 而 S_{31} 一直处于较高的传输效率, 因而系统存在非互易性. 然而, 这种方法在实现较强的非互易性时, 需要流体的旋转速度相对较高, 但是这会带来噪声和湍流等问题. Ding等人^[13]设计了基于手性转子的三端口环形共振腔, 保证了腔体内高速稳定的旋转流场的形成, 并且由于该系统具有高品质因子的共振模态, 即使在较低的气流速度和转子转速情况下, 也能形成有效的非互易性.

由于引入流体的方法存在不足, 众多学者尝试引入其他动态变化量来实现声波非互易性. Trainiti和Ruzzene^[28]通过动态调制材料的杨氏模量和密度打破系统的机械互易性, 在一维梁结构上实现了纵波和横波的非互易性, 但是该研究没有涉及频率转换现象在时空调制系统中的作用. 随后, Nassar等人^[39]研究了一维系统中时空调制的刚度和密度对声波非互易性的影响. 接着, Attarzadeh和Nouh^[40]将材料动态调制理论推广到二维结构中, 为操纵沿不同方向传输的非互易声波提供了新方法, 同时也完善了时空调制的理论. Xu等人^[41]对声波导管边界条件进行时空动态调制, 实现了声波的非互易传输. 然而, 这些参数动态调制的非互易性研究主要集中在弹性波系统中, 对空气声波系统中非互易性的研究相对缺乏, 进行相关的研究对丰富声波的动态调制理论和实际应用具有重要意义. 相应地, Fleury等人^[8]通过动态调制空腔的体积, 在三端口结构中实现了一种线性紧凑型空气声波循环器. Li等人^[42]基于时域有限差分方法, 从理论上研究了在时空调制的系统中空气声波的非互易传输; 接着, 他们又在两级耦合的时空调制共振系统中实验证明了空气声波的非互易性^[43]. Zhu等人^[44]提出了一个由表面张力被时空调制的薄膜组成的波导系统, 实现了较强的非互易

性和低的插入损耗; 接着, 他们又提出一种基于时空调制膜系统的可调单向声波放大器, 并推导了传递矩阵法来研究和优化非互易系统^[45]. Cao等人^[46]通过动态调制声学超表面的反射相位, 在三维空间中实现了空气声波的非互易性. Chen等人^[47]通过时空调制耦合到外磁场共振模的声波响应, 在由薄膜换能器和辅助电路构成的一维超材料中实验证明了声波不可逆的模式转变和空气声波的非互易传输.

最近, 基于时空动态调制实现声波非互易性的方法已经扩展到离散调制结构^[48]、具有局域共振特性的结构^[49]和半无限结构^[50,51]中, 这为非互易性声波在多个领域的实现提供了可能. 这些基于时空动态调制的方案, 其动态调制本身增加了系统的设计难度, 而且很难应用到纳米级场合.

3 基于磁弹性相互作用的非互易性

亚系统之间的相互作用作为在线性静态系统中诱导经典波非互易性的一种极好方法, 从光机耦合^[52-54]到光声耦合^[55,56]已经被广泛研究. 特别是法拉第效应, 即光通过在外静磁场作用下的介质后发生偏振旋转的现象, 已被用于光学系统中实现光波的非互易性^[57-62]. 同样地, 人们希望将这一概念扩展到声学系统中. 关于声波, 由于其固有的纵向极化性质, 磁场下的自旋轨道耦合作用不会破坏其互易性. 幸运的是, 通过大量的研究, 学者已经证明了磁性材料中弹性波的法拉第效应^[63-65]. 然而, 弹性波的法拉第效应是非常微弱的, 以至于基于这种现象实现高效弹性波二极管仍然具有极大的挑战. 因此, 发展一种有效的方法, 在外静磁场作用下的线性静态系统中实现非互易弹性波是非常有必要的.

近期, 自旋波的非互易性被大量研究^[66,67]. 自旋波是序磁性体中相互作用的自旋体系由于各种激发作用引起的集体运动. 由于自旋进动总是沿一个方向, 因此在施加磁场的情况下, 自旋波是非互易的. 那么, 能否利用自旋波的非互易性和磁弹性耦合作用实现声波的非互易性? Verba等人^[68]研究了覆盖有薄铁磁-重金属双层的压电基板中声表面波的传输特性, 如图3所示. 非互易自旋波的色散曲线(图3中的红色曲线)关于其纵轴是不对称的, 这是由于铁磁-重金属界面中的Dzyaloshinskii-Moriya interaction(DMI), 而声波的色散曲线(图3中的蓝色曲线)关于其纵轴是对称的. 因此, 两种波色散曲线的交点关于纵轴是不对称的, 即纵轴两侧交点对应的频率值是不同的. 由于磁弹性相互作用, 自旋波和声波之间存在能量的转换, 两种色散曲线的交点将会打开带隙, 即色散曲线反交叉现象. 在这种情况下, 在色散曲线的反交叉点附近, 声波色散关于纵轴不对称, 证明了声波具有非互易性. 通过选择合适的磁化角度和铁磁层厚度, 可以控制正反两个方向上的带隙宽度和它们之间的频率间隔. 数值模拟结果也进一步证明, 在这种系统中沿正反两方向传播的声波之间的隔离可以超过声波传输损耗一个数量级, 而且通过选

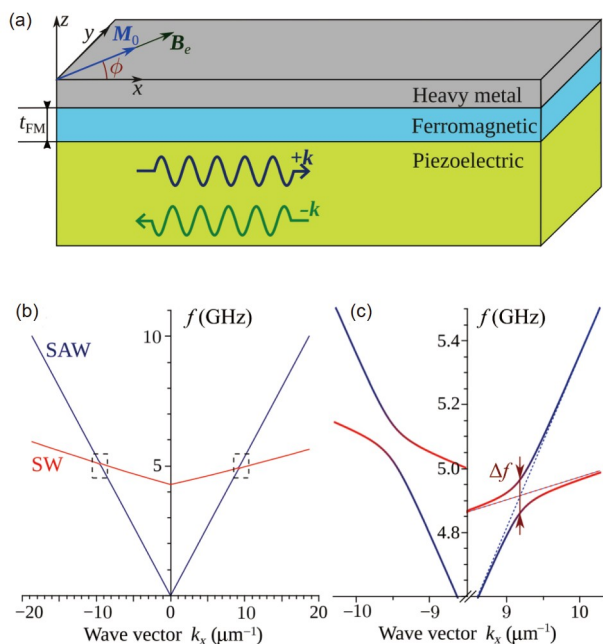


图3 多层结构及其色散曲线^[68]. (a) 多层结构的原理图. (b) 多层结构的色散曲线. (c) 同向交叉点的放大图

Figure 3 Multilayer structure and its dispersion curve^[68]. (a) Schematic of the multilayer structure. (b) Dispersion curve of the multilayer structure. (c) Close-ups of the codirectional anticrossing points

择具有大磁致伸缩和DMI值且低磁损耗的铁磁材料, 可以进一步提高隔离度.

但是, 上述实现声波非互易性的带宽较窄, 不利于实际应用. 为了提高声波非互易性的带宽, Verba等人^[32]进一步提出了一种由电介质基体-铁磁层-非磁性层-铁磁层(LiNbO₃-Co-Ru-Co)构成的多层系统, 其中, 一对薄铁磁层具有Ruderman-Kittel-Kasuya-Yoshida相互作用所引起的相反静态磁化强度. 在 $+k$ 方向上, 系统中自旋波色散曲线与声波色散曲线近似线性且斜率基本一致, 两种波的色散曲线匹配, 保证了自旋波和声波能在较宽的频率范围内耦合. 然而, 在 $-k$ 方向上, 系统的色散曲线不匹配, 不存在磁弹性耦合, 进一步实现了声波在巨大频带宽度范围内的非互易性. 后来, Shah等人^[33]通过选择合适的多层结构材料(LiNbO₃-FeGaB-Al₂O₃-FeGaB), 使系统的隔离度达到48.4 dB, 实现了声波较强的非互易性. 最近, Küß等人^[34]研究了在由Co₄₀-Fe₄₀-B₂₀-Au-Ni₈₁Fe₁₉构成的系统中声波与自旋波的相互作用, 该系统两个铁磁层被非磁性层Au隔开. 由于两个铁磁层之间的层间磁偶极耦合, 形成了对称和反对称自旋波模, 且两种模对沿相反方向传输的自旋波都显示出高度非简并的色散关系. 由于磁弹性相互作用, 在系统中观察到了高度非互易的声波传输. 与前述的界面DMI引起的声波非互易性相比, 磁性双层的磁偶极耦合引起的非互易性是高度可调的, 且磁性双层不限于超薄磁性薄膜.

周期性结构具有禁带特性, 禁带能够有效地抑制相应频段范围内波的传输. 为了进一步增强非互易声波反向传输的抑制效果, 实现更好的声学隔离, 陈久久课题组^[35]构建了由两种线性磁弹性材料交替排列的一维声子晶体板, 并基于平面波展开法建立了严格的理论框架来描述在一维线性磁弹性声子晶体板中自旋波和弹性波的传播, 如图4所示. 不同于多层结构的色散曲线, 当前系统存在由周期性结构的能带折回效应引起的反向交叉点. 由于磁弹性相互作用, 反向交叉点打开, 形成禁带. 同时, 自旋波的非互易性导致 $+k$ 和 $-k$ 方向上的禁带频率范围不同, 保证了在一个方向传播的弹性波被完全禁止, 而在相反方向传播的弹性波却不受影响, 即实现了高效的弹性波隔离. 该研究进一步证明了只有在空间反演对称性和时间反演对称性同时破坏的情况下, 一维磁弹性声子晶体板中的弹性波才存在非互易性.

基于磁弹性相互作用实现的非互易性系统具有结

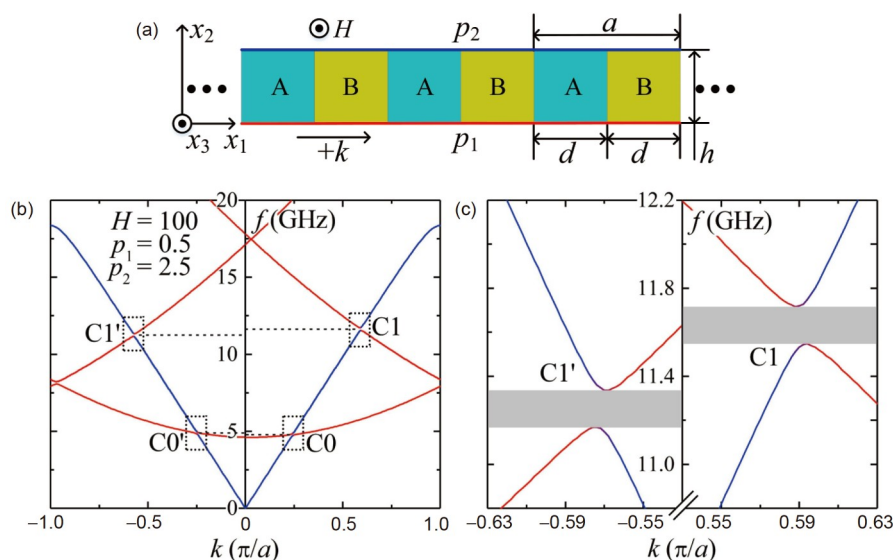


图 4 (网络版彩色) 一维磁性声子晶体板的结构原理图及其色散曲线^[35]. (a) 一维磁性声子晶体板的结构原理图. (b) 一维磁性声子晶体板的色散曲线. (c) 反向交叉点的放大图

Figure 4 (Color online) Schematic of the one-dimensional magnetoelastic phononic crystal slab and its dispersion curve^[35]. (a) Schematic of the one-dimensional magnetoelastic phononic crystal slab. (b) Dispersion curve of the one-dimensional magnetoelastic phononic crystal slab. (c) Close-ups of the contradiirectional anticrossing points

构尺寸微小、便于集成化的优点, 而且便于与电磁控制系统结合, 实现非互易性的自动化控制. 但是, 通过这种方法实现的声波非互易性需要施加外磁场, 增加了实现的难度. 能否在无源零磁场的情况下实现声波的非互易性? 考虑到反铁磁材料不需要施加外部磁场, 自身内部就存在磁场, 这为在无源零磁场作用下实现声波非互易性提供了可能, 也将成为未来研究的重要方向. 另外, 利用磁弹性相互作用实现的声波非互易性存在频率高、带宽窄的问题, 因此, 继续探索在静磁场作用下低频宽带的非互易性, 也是未来需要研究的问题.

声波的非互易性不仅可以在静态磁场下实现, 也能在动态磁场作用下实现^[69], 后者能够降低声波非互易性的频率, 但是相应系统的构建及磁场的动态控制特别困难, 相应的研究也比较少.

4 其他常见的非互易性

近些年, 拓扑系统的鲁棒传输特性引起了学者的研究热情. 二维拓扑声子晶体中的拓扑边缘态具有免疫后向散射的作用, 能够用来实现声波的单向传输. 实现拓扑保护的边缘态主要有3种方式. 第一种是通过引入主动分量打破时间反演对称性来认识量子霍尔效应的类似物, 相应的拓扑边缘态具有单向传输特性^[10,70,71]. 但是, 这种方式的操纵依赖于主动控制或外

部场, 而且在低频宽带下实现声波的非互易性具有挑战性. 第二种是在具有时间反演对称性的系统中, 通过构建一对赝自旋来模拟量子自旋霍尔效应的类似物, 实现自旋拓扑边缘态以及声波的单向传输^[72~76]. 第三种是利用动量空间中分立的能量极值来构造类似于谷霍尔效应的类似物, 形成谷拓扑边缘态, 保证声波准无损的单向传输^[77~80]. 应注意, 谷拓扑边缘态和自旋拓扑边缘态的单向传输现象类似于非互易传输, 但是并没有打破系统的时间反演对称性, 严格意义上不属于非互易性, 为不对称传输^[22].

5 结论

本文从原理、发展历程以及存在的问题等角度出发, 详细梳理了基于非线性、动态分量、磁弹性相互作用等实现非互易性方法的研究进展, 并简单介绍了基于拓扑特性实现非互易性的方法. 基于非线性介质实现非互易性的方案, 能量转换效率不高; 基于旋转流体的方案, 流体速度不能过高而影响声波的隔离效果, 且很难微型化; 基于参数动态调制的方案, 其动态调制系统本身比较复杂; 基于磁弹性相互作用的方案, 非互易性频率太高且带宽较窄. 相应地, 提高基于非线性介质方法的能量转化效率、增强基于旋转流体方案的隔离效果、设计更加合理的动态调制系统和实现磁弹性

系统中宽带低频的非互易性等,可能成为未来研究的重要方向。比如,为了降低磁弹性系统的非互易性频率,动态磁场作用下磁弹性系统中声波的单向传输值得进一步研究;为了实现无外部动力源且转化效率高的非互易系统,零磁场作用下磁弹性系统中声波非互易性也是未来研究的一个重点。另外,每种方案既存在上述的不足,也有自身的优点,比如基于非线性的非互易系统无需外部动力源,基于磁弹性相互作用的非互易系统便于集成化和自动化控制等。研究多种方案之间的组合效应也许能很好地解决单个方案存在的不足,实现更显著的非互易效果。比如,非线性和时空调制的组合效应尚未受到太多关注,我们期望将来非互易性研究拓展到时空调制的非线性介质中;非线性介质与主动磁弹性系统相结合,基于参数的动态调制和磁弹性相互作用的结合可能成为未来研究的重要内容。最后,考虑到理论研究或者实验研究最终要走向工程应用,因而还有许多方面需要深入地研究,比如非互易性器件的小型化和微型化、结合优化理论的优化设计和

引入智能材料或结构的可调非互易性等。

基于复杂本构关系的非线性材料、基于参数动态调制的结构和基于磁弹性相互作用的纳米级层状结构等,很难利用现有的加工制造技术被精确地生产出来。考虑到拓扑系统在频率和波数空间中本质上是窄带的,并且局限于材料的边界,利用拓扑特性免疫制造缺陷具有较大的应用局限性。因而,许多实现声波非互易的方案可能很难在实际工程中应用,迫切地需要提高加工制造技术。可以预见,随着科学技术的发展,相应的加工制造技术也会被不断提高,这不仅能解决非互易系统在加工制造中存在的问题,而且有利于设计更为复杂的非互易性系统,从而加速非互易性的研究和工程应用。

总之,声学超材料的非互易性是一个新兴的、具有极大潜力的科研领域,在能流控制、成像技术和拓扑绝缘体等方面具有重要的应用前景。这将吸引更多的科研工作者投身其中,进一步开展对声波非互易性理论及实验的研究,以期实现具有特殊功能的声学器件在实际工程中的广泛应用。

参考文献

- 1 Chang C W, Okawa D, Majumdar A, et al. Solid-state thermal rectifier. *Science*, 2006, 314: 1121–1124
- 2 Liang B, Guo X S, Tu J, et al. An acoustic rectifier. *Nat Mater*, 2010, 9: 989–992
- 3 Boechler N, Theocaris G, Daraio C. Bifurcation-based acoustic switching and rectification. *Nat Mater*, 2011, 10: 665–668
- 4 Coullais C, Sounas D, Alù A. Static non-reciprocity in mechanical metamaterials. *Nature*, 2017, 542: 461–464
- 5 Shen Y X, Peng Y G, Zhao D G, et al. One-way localized adiabatic passage in an acoustic system. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 094501
- 6 Fleury R, Sounas D L, Sieck C F, et al. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator. *Science*, 2014, 343: 516–519
- 7 Fleury R, Sounas D, Haberman M R, et al. Nonreciprocal acoustics. *Acoust Today*, 2015, 11: 14–21
- 8 Fleury R, Sounas D L, Alù A. Subwavelength ultrasonic circulator based on spatiotemporal modulation. *Phys Rev B*, 2015, 91: 174306
- 9 Wang Z, Chong Y, Joannopoulos J D, et al. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states. *Nature*, 2009, 461: 772–775
- 10 Yang Z, Gao F, Shi X, et al. Topological acoustics. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 114301
- 11 Dong J W, Chen X D, Zhu H, et al. Valley photonic crystals for control of spin and topology. *Nat Mater*, 2017, 16: 298–302
- 12 Zhao J, Huo S, Huang H, et al. Topological interface states of shear horizontal guided wave in one-dimensional phononic quasicrystal slabs. *Phys Status Solidi RRL*, 2018, 12: 1800322
- 13 Ding Y, Peng Y, Zhu Y, et al. Experimental demonstration of acoustic chern insulators. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 014302
- 14 Huo S Y, Chen J J, Feng L Y, et al. Pseudospins and topological edge states for fundamental antisymmetric Lamb modes in snowflakelike phononic crystal slabs. *J Acoust Soc Am*, 2019, 146: 729–735
- 15 Terraneo M, Peyrard M, Casati G. Controlling the energy flow in nonlinear lattices: A model for a thermal rectifier. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 094302
- 16 Li B, Wang L, Casati G. Thermal diode: Rectification of heat flux. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 184301
- 17 Fan L, Wang J, Varghese L T, et al. An all-silicon passive optical diode. *Science*, 2012, 335: 447–450
- 18 Shi Y, Yu Z, Fan S. Limitations of nonlinear optical isolators due to dynamic reciprocity. *Nat Photonics*, 2015, 9: 388–392
- 19 Li E, Eggleton B J, Fang K, et al. Photonic Aharonov-Bohm effect in photon-phonon interactions. *Nat Commun*, 2014, 5: 3225
- 20 Kim J H, Kuzyk M C, Han K, et al. Non-reciprocal Brillouin scattering induced transparency. *Nat Phys*, 2015, 11: 275–280

- 21 Nassar H, Yousefzadeh B, Fleury R, et al. Nonreciprocity in acoustic and elastic materials. *Nat Rev Mater*, 2020, 5: 667–685
- 22 Maznev A A, Every A G, Wright O B. Reciprocity in reflection and transmission: What is a ‘phonon diode’? *Wave Motion*, 2013, 50: 776–784
- 23 Liang B, Yuan B, Cheng J C. Acoustic diode: Rectification of acoustic energy flux in one-dimensional systems. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 104301
- 24 Lepri S, Casati G. Asymmetric wave propagation in nonlinear systems. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 164101
- 25 Popa B I, Cummer S A. Non-reciprocal and highly nonlinear active acoustic metamaterials. *Nat Commun*, 2014, 5: 3398
- 26 Liu C, Du Z, Sun Z, et al. Frequency-preserved acoustic diode model with high forward-power-transmission rate. *Phys Rev Appl*, 2015, 3: 064014
- 27 Zanjani M B, Davoyan A R, Mahmoud A M, et al. One-way phonon isolation in acoustic waveguides. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 081905
- 28 Trainiti G, Ruzzene M. Non-reciprocal elastic wave propagation in spatiotemporal periodic structures. *New J Phys*, 2016, 18: 083047
- 29 Nassar H, Chen H, Norris A N, et al. Non-reciprocal wave propagation in modulated elastic metamaterials. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2017, 473: 20170188
- 30 Wang Y, Yousefzadeh B, Chen H, et al. Observation of nonreciprocal wave propagation in a dynamic phononic lattice. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 194301
- 31 Chen Y, Li X, Nassar H, et al. Nonreciprocal wave propagation in a continuum-based metamaterial with space-time modulated resonators. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 064052
- 32 Verba R, Tiberkevich V, Slavin A. Wide-band nonreciprocity of surface acoustic waves induced by magnetoelastic coupling with a synthetic antiferromagnet. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 054061
- 33 Shah P J, Bas D A, Lisenkov I, et al. Giant nonreciprocity of surface acoustic waves enabled by the magnetoelastic interaction. *Sci Adv*, 2020, 6: eabc5648
- 34 Küß M, Heigl M, Flacke L, et al. Nonreciprocal magnetoacoustic waves in dipolar-coupled ferromagnetic bilayers. *Phys Rev Appl*, 2021, 15: 034060
- 35 Feng L, Chen J, Huang H, et al. High-efficiency elastic wave rectifier in one-dimensional linear magnetoelastic phononic crystal slabs by an external magnetostatic field. *Phys Rev Appl*, 2020, 13: 064042
- 36 Fang X, Wen J, Cheng L, et al. Bidirectional elastic diode with frequency-preserved nonreciprocity. *Phys Rev Appl*, 2021, 15: 054022
- 37 Li Z N, Wang Y Z, Wang Y S. Tunable nonreciprocal transmission in nonlinear elastic wave metamaterial by initial stresses. *Int J Solids Struct*, 2020, 182–183: 218–235
- 38 Li Z N, Wang Y Z, Wang Y S. Three-dimensional nonreciprocal transmission in a layered nonlinear elastic wave metamaterial. *Int J Non-Linear Mech*, 2020, 125: 103531
- 39 Nassar H, Xu X C, Norris A N, et al. Modulated phononic crystals: Non-reciprocal wave propagation and Willis materials. *J Mech Phys Solids*, 2017, 101: 10–29
- 40 Attarzadeh M A, Nough M. Non-reciprocal elastic wave propagation in 2D phononic membranes with spatiotemporally varying material properties. *J Sound Vib*, 2018, 422: 264–277
- 41 Xu X, Wu Q, Chen H, et al. Physical observation of a robust acoustic pumping in waveguides with dynamic boundary. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 253901
- 42 Li J, Shen C, Zhu X, et al. Nonreciprocal sound propagation in space-time modulated media. *Phys Rev B*, 2019, 99: 144311
- 43 Shen C, Zhu X, Li J, et al. Nonreciprocal acoustic transmission in space-time modulated coupled resonators. *Phys Rev B*, 2019, 100: 054302
- 44 Zhu X, Li J, Shen C, et al. Non-reciprocal acoustic transmission via space-time modulated membranes. *Appl Phys Lett*, 2020, 116: 034101
- 45 Zhu X, Li J, Shen C, et al. Tunable unidirectional compact acoustic amplifier via space-time modulated membranes. *Phys Rev B*, 2020, 102: 024309
- 46 Cao W K, Zhang C, Wu L T, et al. Tunable acoustic metasurface for three-dimensional wave manipulations. *Phys Rev Appl*, 2021, 15: 024026
- 47 Chen Z, Peng Y, Li H, et al. Experimental observation of efficient nonreciprocal mode transitions via spatiotemporally-modulated acoustic metamaterials. 2021, arXiv: [2103.10183](https://arxiv.org/abs/2103.10183)
- 48 Riva E, Marconi J, Cazzulani G, et al. Generalized plane wave expansion method for non-reciprocal discretely modulated waveguides. *J Sound Vib*, 2019, 449: 172–181
- 49 Attarzadeh M A, Callanan J, Nough M. Experimental observation of nonreciprocal waves in a resonant metamaterial beam. *Phys Rev Appl*, 2020, 13: 021001
- 50 Palermo A, Celli P, Yousefzadeh B, et al. Surface wave non-reciprocity via time-modulated metamaterials. *J Mech Phys Solids*, 2020, 145: 104181
- 51 Wu Q, Chen H, Nassar H, et al. Non-reciprocal Rayleigh wave propagation in space-time modulated surface. *J Mech Phys Solids*, 2021, 146: 104196
- 52 Ruesink F, Miri M A, Alù A, et al. Nonreciprocity and magnetic-free isolation based on optomechanical interactions. *Nat Commun*, 2016, 7: 13662
- 53 Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, et al. Experimental realization of optomechanically induced non-reciprocity. *Nat Photonics*, 2016, 10: 657–661
- 54 Xu H, Jiang L, Clerk A A, et al. Nonreciprocal control and cooling of phonon modes in an optomechanical system. *Nature*, 2019, 568: 65–69

- 55 Kittlaus E A, Otterstrom N T, Kharel P, et al. Non-reciprocal interband Brillouin modulation. *Nat Photonics*, 2018, 12: 613–619
- 56 Poshakinskiy A V, Poddubny A N. Phonoritonic crystals with a synthetic magnetic field for an acoustic diode. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 156801
- 57 Atatüre M, Dreiser J, Badolato A, et al. Observation of Faraday rotation from a single confined spin. *Nat Phys*, 2007, 3: 101–106
- 58 Haldane F D M, Raghu S. Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 013904
- 59 Crassee I, Levallois J, Walter A L, et al. Giant Faraday rotation in single- and multilayer graphene. *Nat Phys*, 2010, 7: 48–51
- 60 Tse W K, MacDonald A H. Giant magneto-optical Kerr effect and universal Faraday effect in thin-film topological insulators. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 057401
- 61 Shuvaev A M, Astakhov G V, Pimenov A, et al. Giant magneto-optical faraday effect in HgTe thin films in the terahertz spectral range. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 107404
- 62 Bi L, Hu J, Jiang P, et al. On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators. *Nat Photonics*, 2011, 5: 758–762
- 63 Domínguez D, Bulaevskii L, Ivlev B, et al. Interaction of vortex lattice with ultrasound and the acoustic Faraday effect. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 2579–2582
- 64 Lee Y, Haard T M, Halperin W P, et al. Discovery of the acoustic Faraday effect in superfluid $^3\text{He-B}$. *Nature*, 1999, 400: 431–433
- 65 Sytcheva A, Löw U, Yasin S, et al. Acoustic Faraday effect in $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. *Phys Rev B*, 2010, 81: 214415
- 66 Mruczkiewicz M, Krawczyk M, Gubbiotti G, et al. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal. *New J Phys*, 2013, 15: 113023
- 67 Mruczkiewicz M, Graczyk P, Lupo P, et al. Spin-wave nonreciprocity and magnonic band structure in a thin permalloy film induced by dynamical coupling with an array of Ni stripes. *Phys Rev B*, 2017, 96: 104411
- 68 Verba R, Lisenkov I, Krivorotov I, et al. Nonreciprocal surface acoustic waves in multilayers with magnetoelastic and interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interactions. *Phys Rev Appl*, 2018, 9: 064014
- 69 Ansari M H, Attarzadeh M A, Nouh M, et al. Application of magnetoelastic materials in spatiotemporally modulated phononic crystals for nonreciprocal wave propagation. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 015030
- 70 Khanikaev A B, Fleury R, Mousavi S H, et al. Topologically robust sound propagation in an angular-momentum-biased graphene-like resonator lattice. *Nat Commun*, 2015, 6: 8260
- 71 Chen Z G, Wu Y. Tunable topological phononic crystals. *Phys Rev Appl*, 2016, 5: 054021
- 72 Mousavi S H, Khanikaev A B, Wang Z. Topologically protected elastic waves in phononic metamaterials. *Nat Commun*, 2015, 6: 8682
- 73 He C, Ni X, Ge H, et al. Acoustic topological insulator and robust one-way sound transport. *Nat Phys*, 2016, 12: 1124–1129
- 74 Mei J, Chen Z, Wu Y. Pseudo-time-reversal symmetry and topological edge states in two-dimensional acoustic crystals. *Sci Rep*, 2016, 6: 32752
- 75 Zhang Z, Wei Q, Cheng Y, et al. Topological creation of acoustic pseudospin multipoles in a flow-free symmetry-broken metamaterial lattice. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 084303
- 76 Chen J, Huang H, Huo S, et al. Self-ordering induces multiple topological transitions for in-plane bulk waves in solid phononic crystals. *Phys Rev B*, 2018, 98: 014302
- 77 Lu J, Qiu C, Ye L, et al. Observation of topological valley transport of sound in sonic crystals. *Nat Phys*, 2016, 13: 369–374
- 78 Ye L, Qiu C, Lu J, et al. Observation of acoustic valley vortex states and valley-chirality locked beam splitting. *Phys Rev B*, 2017, 95: 174106
- 79 Chen J J, Huo S Y, Geng Z G, et al. Topological valley transport of plate-mode waves in a homogenous thin plate with periodic stubbed surface. *AIP Adv*, 2017, 7: 115215
- 80 Huo S Y, Chen J J, Huang H B, et al. Simultaneous multi-band valley-protected topological edge states of shear vertical wave in two-dimensional phononic crystals with veins. *Sci Rep*, 2017, 7: 10335

Summary for “声学超材料的非互易性研究进展”

Progress on nonreciprocity of acoustic metamaterials

Luyang Feng^{1,2*}, Jiujiu Chen^{2*} & Hongbo Huang²¹ School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;² State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

* Corresponding authors, E-mail: lyfeng@hnu.edu.cn; jjchen@hnu.edu.cn

Reciprocity is a generic feature in various physical systems because it is directly associated to the symmetry of physical laws under time reversal. The breaking of the reciprocity is vitally important in numerous fields, such as the control of energy flux, imaging technologies and topological insulators. For instance, electrical diodes, as a typical nonreciprocal representative in electronic systems, have already contributed to substantial scientific revolutions in many aspects, including integrated circuits, lighting and signal indication. Motivated by the electrical diodes, thermal diodes exhibiting the rectifying effect on thermal energy are achieved in nonlinear lattices. Similarly, the nonreciprocity in photonic systems can be realized by many mechanisms, such as the nonlinearity of optical medium and the mode conversion. Synchronously, the concept of nonreciprocity further extends to phononic systems. The main means to achieve acoustic nonreciprocity are based on the nonlinearity of acoustic material, dynamic element, and magnetoelastic interaction. However, the nonlinear approach introduces the inherently low conversion efficiency, the dynamic scheme has difficulty in application at high-speed modulation or on nanoscale, and the method based on magnetoelastic interaction has small bandwidth and high frequency, which have severe limitations for practical application of the nonreciprocity.

From the perspectives of principles, history, and problems, this paper reviews in detail the progress of the nonreciprocity based on nonlinearity, dynamic components, and magnetoelastic interactions. Some existing problems with these methods were pointed out. For example, the nonreciprocal solution based on nonlinear media has low energy conversion efficiency, it is difficult to miniaturize the nonreciprocal device based on dynamic components because of itself complexity, and the bandwidth of nonreciprocity based on magnetoelastic interaction is narrow. Correspondingly, improvement of the energy conversion efficiency based on the nonlinear medium, more reasonable design of a dynamic modulation system, and widening broadband of nonreciprocity in the magnetoelastic system, can be researched in the future. For example, in order to reduce the nonreciprocal frequency of magnetoelastic system, it is worth studying the unidirectional transmission of sound waves in the magnetoelastic system under a dynamic magnetic field. For the sake of realizing a nonreciprocal system with no external power source and high conversion efficiency, the nonreciprocity of acoustic waves in a magnetoelastic system under a zero magnetic field may become a focus of future research. In addition, since each scheme has its advantages, the combined effects of multiple schemes may overcome the shortcomings of a single scheme and achieve more significant nonreciprocal effects. So far, the combined effects between nonlinearity and dynamic components have not received much attention. We expect that research of nonreciprocity will be extended to both nonlinear and spatiotemporally modulated systems in the future. The combined effects between nonreciprocity and magnetoelastic interaction may become an important content of future research. Finally, considering practical engineering application, there are still many aspects worthy of further study, such as the miniaturization of nonreciprocal devices, optimal design of nonreciprocity based on optimization theory, and adjustable nonreciprocity based on smart materials or structures.

In short, the nonreciprocity of acoustic metamaterials is an important field of scientific research, which has potential applications, such as rectification, vibration and noise reduction, sensing, and bioimaging.

metamaterial, acoustic wave, nonreciprocity, nonlinearity, magnetoelastic interactiondoi: [10.1360/TB-2021-0525](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0525)