科学通报 2022 年 第 67 卷 第 12 期: 1203 ~ 1213
超材料中的弹性波及其调控专辑 进 展
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

声学黑洞研究进展与应用

高南沙[1*], 张智成[1], 王谦[2], 郭鑫羽[1], 陈克安[1], 侯宏[1]

1. 西北工业大学航海学院, 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室, 西安 710072;
2. 中国船舶集团有限公司第705研究所, 西安 710077
* 联系人, E-mail: gaonansha@nwpu.edu.cn

2021-05-10 收稿, 2021-06-30 修回, 2021-07-02 接受, 2021-07-05 网络版发表
国家自然科学基金(11704314)、航空科学基金(20181553015)和中国博士后科学基金(2018M631194, 2020T130533)资助

摘要 声学黑洞结构作为一种新型的弯曲波调控技术, 可以有效地降低结构中弯曲波的传播速度, 减小边界末端的反射, 形成具有高能量密度的区域, 因此在减振、降噪、波动调控以及能量回收等方面具有广阔的应用前景. 不同于以往复杂的减振降噪复合结构, 声学黑洞因其结构与材料单一, 在实际应用方面具有一定的优势. 时至今日, 针对声学黑洞结构已经进行了大量的基础理论研究和实验探索, 并取得了一定的阶段性研究成果. 本文首先介绍了声学黑洞的起源和基本原理. 然后, 全面介绍了理论计算和实验研究方法, 详细地综述了声学黑洞结构的4个主要功能性分类, 即减振、降噪、波动调控和能量回收, 并总结了现在研究存在的问题. 最后, 对声学黑洞的发展前景进行展望, 并指出了未来研究的重点和方向.

关键词 声学黑洞, 减振降噪, 波动调控, 能量回收

声学黑洞是天体物理学中黑洞概念的声学类比. 1946年, Pekeris[1]发现, 声学中的波动也有与黑洞类似的效应, 即声波在特定的非均匀分层流体中传播时, 声速随介质深度的增加而减小到零, 不会发生声波的反射, 其表现为声波不能逃离开放区域的边界. 1988年, Mironov[2]发现, 弯曲波在楔形结构中传播时也有类似现象, 即理论上认为在特定的条件下, 弯曲波在指数型表面剪裁的薄板上将不会发生反射, 形成零反射条件. 1989年, Krylov[3]首次研究了具有楔形几何特征的一维梁结构, 即通过改变楔形结构的几何外形参数来操纵弯曲波的传播. 至此, 声学黑洞的概念正式提出. 本文将声学黑洞定义为: 通过几何参数或者材料特性的变化而形成一种对弯曲波有汇聚效果的结构, 在绝对理想情况下, 弯曲波波速在声学黑洞区域内逐渐减小至零.

1 声学黑洞原理

基于Mironov[2]在1988年的发现, 如果一个薄板的厚度变化非常光滑, 在其中传播的弯曲波将不会发生反射. 在波动能量守恒的前提下, 波数k和振幅A都随薄板的厚度而变化:

$$k=\left(\frac{3\rho\omega^2}{E_{\mathrm{pl}}h^2(x)}\right)^{\frac{1}{4}}, \tag{1}$$

$$A=A_0\left(h_0/h(x)\right)^{\frac{1}{4}}, \tag{2}$$

其中, x是沿着板的坐标, ρ是板的材料密度, E_{pl}是板的杨氏模量, ω是角频率, $h(x)$是薄板厚度变化在x方向上的函数. 此时, 假设薄板厚度光滑的条件为弯曲波波数在一个波长范围内的变化足够小, 即

$$\frac{1}{k^2}\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}x}\ll 1. \tag{3}$$

引用格式: 高南沙, 张智成, 王谦, 等. 声学黑洞研究进展与应用. 科学通报, 2022, 67: 1203–1213
Gao N S, Zhang Z C, Wang Q, et al. Progress and applications of acoustic black holes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1203–1213, doi: 10.1360/TB-2021-0439

© 2021《中国科学》杂志社

联立上述公式, 得出

$$\frac{1}{2}\left(\frac{E_{\mathrm{pl}}}{3\rho\omega^2}\right)^{\frac{1}{4}}\frac{1}{h^{\frac{1}{2}}}\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}x}\ll 1. \tag{4}$$

当薄板的厚度变化按照幂指数变化时, 即满足$h(x)=\varepsilon x^n$关系, 上式可以满足

$$nx^{n-1}\ll 2\left(3\rho\omega^2/E_{\mathrm{pl}}\right)^{\frac{1}{4}}\frac{1}{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}x^{\frac{n}{2}}. \tag{5}$$

上式成立的条件是$n\geqslant 2$. 可以进一步得出, 此时弯曲波波数趋近于无穷大, 群速度c_{g}和相速度c_{p}趋近于0, 即

$$c_{\mathrm{p}}=\frac{\omega}{k}=\varepsilon^{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_{\mathrm{pl}}\omega^2}{3\rho}\right)^{\frac{1}{4}}x, \tag{6}$$

$$c_{\mathrm{g}}=\frac{\partial\omega}{\partial k}=2\varepsilon^{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_{\mathrm{pl}}\omega^2}{3\rho}\right)^{\frac{1}{4}}x. \tag{7}$$

此时, 角频率ω的波从x_0传播到x_1位置的时间积分为

$$T=\int_{x_0}^{x_1}\frac{\mathrm{d}x}{c_{\mathrm{g}}}=\frac{1}{2\varepsilon^{\frac{1}{2}}}\left(\frac{3\rho}{E_{\mathrm{pl}}\omega^2}\right)^{\frac{1}{4}}\left|\ln\frac{x_1}{x_0}\right|. \tag{8}$$

从上式可以看出, 当x_1趋近于0时, 传播时间T将为无限大, 意味着在声学黑洞路径上的传播波在有限的时间内无法到达声学黑洞中心, 因此反射波为零. 综上所述, 声学黑洞最明显的几何结构特征是呈幂率变化截面[4], 其中幂指数至少为2, 形函数$h(x)=\varepsilon x^n(n\geqslant 2)$. 一般意义上, 一维声学黑洞结构为梁结构, 即存在一个截断厚度为h_{r}的一维声学黑洞结构, 将其沿z轴旋转即可形成二维声学黑洞结构. 此外, 还有一种声学黑洞管道结构, 即管道的有效导纳结构沿轴向逐渐增大, 从而使声波波速在管道内的有限长度内, 逐渐减小为零的一种声波阻滞结构[5]. 这3种构造示意图如图1(a)~(c)所示. 经研究发现[6], 声学黑洞结构还有一个重要特征: 在截止频率$f_{\text{cut-off}}$以下, 不会实现任何波的吸收, 它定义为输入波的波长远大于声学黑洞的特征长度(通常是楔形长度或轴对称锥度直径). 在声学黑洞结构设计中, 截止频率[6]的计算尤为关键, 其解析表达式为

$$f_{\text{cut-off}}=\frac{h_0}{2\pi L_{\mathrm{ABH}}^2}\left(\frac{E_0(40-24v)}{12\rho(1-v^2)}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{9}$$

其中, h_0是声学黑洞区域外部的均匀厚度, L_{ABH}是声学黑洞长度, E_0是杨氏模量, ρ是密度, v是泊松比. 值得注意的是, 式(9)意味着在给定均匀厚度和特定材料的结构中, 截止频率仅取决于全理想声学黑洞长度L_{ABH}. 声学黑洞这一概念自Krylov[3]正式提出以来, 历经数十年的发展, 逐渐在弯曲波的减振、降噪、能量回收以及



图 1 (网络版彩色)声学黑洞基本分类以及相关应用. (a)~(c) 3种典型声学黑洞示意图; (d) 声学黑洞的拓展应用举例

Figure 1 (Color online) Basic classification of acoustic black holes and corresponding applications. (a)–(c) The schematic diagrams of three typical acoustic black holes; (d) extended applications of acoustic black holes

波动调控等领域激起了学术界极大的兴趣, 如图1(d)所示. 从应用角度出发, 声学黑洞的几何结构相对简单, 容易与机械构件以及系统进行融合, 因此近年来不断涌现出许多基于声学黑洞特征结构的应用. 其中, 搭建声学黑洞的基础理论和实现其效果的评估手段至关重要.

2 声学黑洞研究方法

在声学黑洞的理论研究中, 特别是面对几何形状简单的声学黑洞对象时, 以往的研究通常采用半解析法[7]求解声学黑洞结构的动力响应. 以一维声学黑洞梁为例, 半解析法的关键在于寻找一组合适的基本形状函数来拟合锥形梁的挠度. 考虑到声学黑洞结构端部的波数及波长的快速变化, 一般使用小波函数[7], 主要原因在于小波函数非常适用于拟合幂律剖面的非均匀梁. 通过在小波函数的基础上展开梁的横向位移场, 将运动方程转化为一组线性方程组, 求解该方程组可以模拟结构的自由和受迫响应. 这种半解析模型在具有矩形横截面的经典欧拉-伯努利声学黑洞梁[8]、具有圆形横截面的经典欧拉-伯努利声学黑洞梁[9]及具有铝芯和钢上/下层的夹层梁[10]的情况下得到了很好的验证. 之后的研究表明, 由于瑞利-里兹法中使用高斯基函数[11]比小波分解更加适合描述声学黑洞区域的位移场, 因此高斯展开法也可用于求解声学黑洞梁[11]、板[12]以及壳[13]的动力响应. 此外, 几何声学[14]被用于无限声学黑洞板, 传递矩阵法被用于声学黑洞梁[15]和管道声学黑洞终端[16]. 在面对具有复杂形状的声学黑洞对象时, 由于有限元法[17~20]具有强大的后处理功能, 在计算声学黑洞梁、板的动力响应、声辐射以及波动调控方面具备较大优势. 同时有研究进一步指出, 单位分解有限元法[21]在计算宽带声学黑洞效应时, 精度远比传统有限元法高, 且自由度大幅度降低; 谱元法[22]和有限差分法[23]在计算声学黑洞梁的动力响应方面也有较高精度. 此外, 还可以使用分数阶空间导数[24]来重建描述声学黑洞区域内波场的波动方程. 该方法对于模拟大型复杂声学黑洞结构尤其重要, 可大量节省计算资源. 波数域方法[25]可以用于分析具有声学黑洞特征的空腔内的声振耦合行为和内部降噪机理. 该方法基于空间平均声能与结构位移谱和声振型之间的关系, 通过傅立叶变换, 将空间域的表达式变换为波数域. 波数分量既能反映波的传播方向, 又能反映波场在声学黑洞结构中的压缩特性, 也可以描述弯曲波波速振幅和能量耗散特征. 在计算形状复杂的异形声学黑洞结构时, 可以通过波数域展开法[26]求解截止频率. 波数域展开法是一种解决稳态动态问题的确定性预测技术, 即使用波函数的加权来逼近动态场变量. 该方法对于复杂的几何图形显示出了较高的计算效率.

在实验研究方面, 早期研究主要通过振动响应实验来探究声学黑洞效应[27]. 实验结果表明, 声学黑洞结构能够具备振动抑制能力. 在实验方法中, 近几年有研究指出, 可以通过时域数据观察声学黑洞结构中波的传播与聚集过程. 例如, Huang等人[28]基于激光诱导可视化技术并结合各种信号处理方法, 可以直接观察和研究带有截断的一维声学黑洞结构中波的传播过程, 并从实测的原始波场中观察到由声学黑洞效应引起的波速降低现象. 之后, Huang等人[29]又采用激光超声扫描技术测得了不同时刻二维声学黑洞结构上的波场. 实验结果清晰地展示了声学黑洞效应的过程, 包括波长的压缩、波阵面的弯曲变形和波动能量的聚集等现象. Yan等人[30]在实验中利用激光产生兰姆波, 从而研究在含二维声学黑洞薄板中的传播过程. Zhu和Semperlotti[31]利用将微纤维复合材料贴片阵列表面粘贴在薄板上的方法产生超声激励, 描述了二维声学黑洞薄板可以实现对弯曲波的各种操纵效果(包括聚焦、准直、双折射). Zhao等人[32]采用圆压电换能器或压电材料作为激励点源(图2), 施加在二维声学黑洞薄板上, 在时域上可观察到弯曲波的斗篷和波导.

综上所述, 针对声学黑洞的理论方法、数值模拟以及实验方法, 研究人员进行了大量的探索, 形成了一系列高效、准确的方法. 面向复杂几何形状的声学黑洞结构, 或针对声学黑洞与其他功能材料的复合结构, 还未形成一种通用的快速、高效计算方法. 其核心是寻找更为合适的数值计算方法, 而关于理论和实验方法的研究不仅仅是对理论基础的研究, 还可以为工程实践中的优化问题奠定基础.

3 声学黑洞应用分类

近年来, 基于声学黑洞的应用不断丰富. 本节将从对弯曲波的控制角度出发, 按照声学黑洞的功能性划分为减振、波动调控、降噪、能量回收4个部分.

3.1 减振

声学黑洞最主要的特点是对弯曲波的减振. 已有很多研究人员利用一维经典声学黑洞结构进行振动控

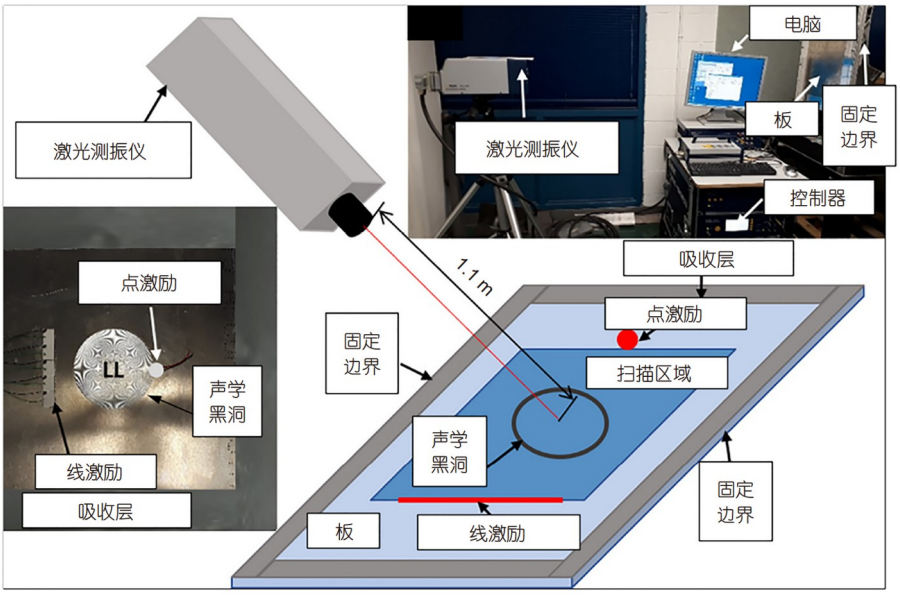


图 2 (网络版彩色)激光超声扫描技术测试声学黑洞板波场, 其中采用压电材料产生对薄板的激励. 改自文献[32]

Figure 2 (Color online) The wave field of an acoustic black hole plate is measured by the laser ultrasonic scanning technology, where the piezoelectric material is used to excite the thin plate. Modified from Ref. [32]

制, 并取得了一定的进展[33]. 近年来, 越来越多的研究人员提出新型一维声学黑洞结构. Lee和Jeon[34]于2017年首次提出螺旋一维声学黑洞概念, 如图3(a)所示. 数值研究表明, 结构阻尼性能随阿基米德螺线弧长的增加而增加, 但在中高频范围内, 结构阻尼与螺线的曲率无关; 同时, 在声学黑洞处添加阻尼材料, 也可以在不显著增加重量的情况下, 显著提高阻尼性能. Lee和Jeon[26]又继续研究了不同几何参数和频率下的圆弧型和阿基米德螺旋型声学黑洞的反射系数. 通过计算它们的截止频率, 发现不同于经典一维声学黑洞的截止频率几乎与曲率成正比线性增加的情况, 在阿基米德螺旋型一维声学黑洞中, 截止频率随间隙距离的增大而减小. Park等人[35]实现了不同构型的螺旋一维声学黑洞(图3(b)), 深入分析了不同类型的阿基米德螺线对声学黑洞反射系数的影响. Tang和Cheng[36]在2017年首次提出一维双叶型声学黑洞梁结构, 如图3(c)所示. 实验结果表明, 在仅有3个周期的声学黑洞单元的情况下, 依然可以在包括低频在内的超宽频率范围内实现较大的振动能量衰减. Tang和Cheng[37]继而又提出了一种内嵌双叶型声学黑洞的周期板, 用于实现在二维结构中低频弯曲波的定向衰减. 2019年以来, Gao等人[17~20]相继提出了空间V字型弯折的双叶型声学黑洞梁结构(图3(d))、一种嵌套阻尼单元的一维双叶型声学黑洞梁, 以及大小单元周期阵列的一维双叶型声学黑洞梁, 并深入分析了结构的低频禁带和振动衰减特性. 相比传统的一维声学黑洞梁和板, 双叶型声学黑洞结构提高了结构的整体性, 在振动控制和高性能滤波器设计中具备广阔的应用前景. Deng等人[13]研究了圆柱壳体内壁嵌入一维声学黑洞凹痕的振动特性, 由于在圆柱壳体上嵌入声学黑洞而削弱了其结构刚度, 因此在纵向插入加劲肋. 分析结果表明, 加劲肋的加入在某些频段上甚至可以提高声学黑洞的减振性能. 这也将声学黑洞在梁和板上的研究扩展到圆柱壳体, 在压力容器、潜艇或者飞机舱段的减振方面有潜在的应用前景. Cheer等人[38]在基于梁的声学黑洞中, 用主动振动控制系统取代互补的被动阻尼材料. 实验结果表明, 声学黑洞系统的宽带性能与基于等厚波束的主动振动控制系统相当, 但该系统的控制成本低, 具有显著的实用价值.

由于二维声学黑洞内嵌于薄板中, 板的相等厚度区域可以把声学黑洞区域包围起来, 因此凹痕的存在不会严重削弱结构的强度, 同时不会把锋利的尖端裸露在结构的外边缘, 提高了结构的安全性能. 不同形状的声学黑洞薄板结构, 如圆形、椭圆形、矩形以及多边形, 都存在波动能量的聚集现象. 已有研究指出, 含有二维声学黑洞的椭圆形薄板[39]对弯曲波的聚集效果最佳. 近年来, 对二维声学黑洞在振动控制方面的研究主要集中在探讨声学黑洞局域化模式对板中弯曲波的

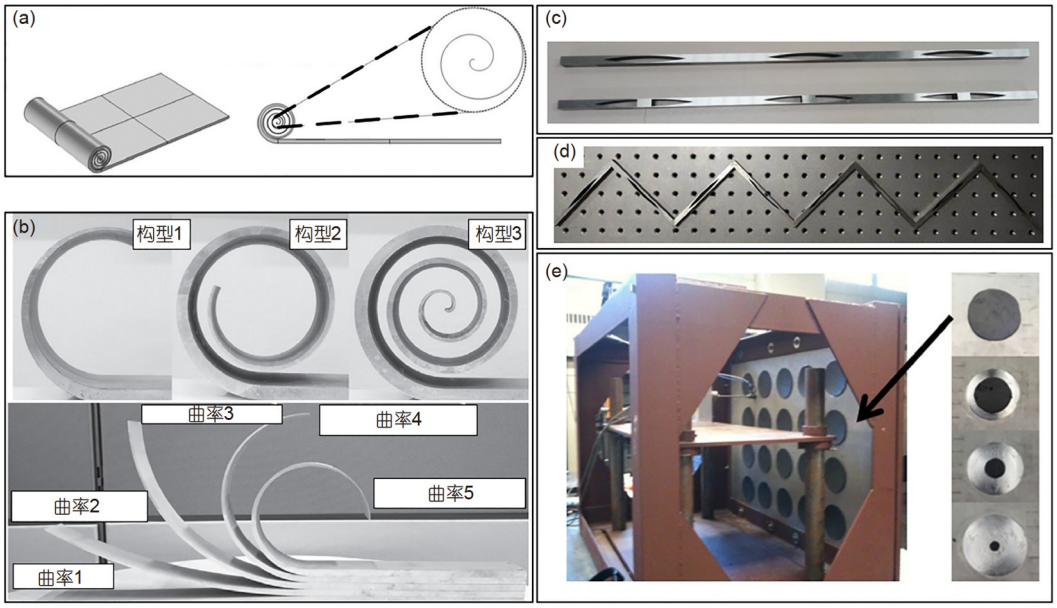


图 3 (网络版彩色)声学黑洞减振结构. (a) 螺旋一维声学黑洞, 改自文献[34]. (b) 不同构型和不同曲率的螺旋一维声学黑洞, 改自文献[35]. (c) 双叶型声学黑洞梁, 改自文献[36]. (d) 空间V字弯折的双叶型声学黑洞梁, 改自文献[18]. (e) 二维内嵌声学黑洞结构的阻尼板, 改自文献[43]

Figure 3 (Color online) Acoustic black hole structures for vibration reduction. (a) One-dimensional helical acoustic black holes. Modified from Ref. [34]. (b) One-dimensional helical acoustic black holes with different configurations and curvatures. Modified from Ref. [35]. (c) A bi-leaf acoustic black hole beam. Modified from Ref. [36]. (d) Double-leaf type acoustic black hole beam with V-shaped in space. Modified from Ref. [18]. (e) A two-dimensional damping plate embedded with an acoustic black hole structure. Modified from Ref. [43]

影响. 其中, Krylov[40]详细讨论了幂律楔形体中局部弯曲波的波动行为, 并指出对于幂律指数等于或大于2的楔形剖面, 除非存在楔形截断, 否则所有局部化模式的速度都取零值, 表明理想楔形体中弯曲波零速度效应与弯曲波零反射现象密切相关. Krylov[40]进一步讨论了这种局域波在二维声学黑洞内孔边缘缺陷情况下对弯曲波散射过程的可能影响, 包括对二维声学黑洞作为减振器效率的影响. Lagny等人[41]研究了声学黑洞中心的非线性行为, 通过评估其反射系数来确定陷波器的效率. Zhao[42]提出声学黑洞与夹层板相结合的复合结构. 研究表明, 该结构在低频段具有高效的减振性能. Conlon和Feurtado[43]通过实验研究了有限长平板中的位相积累问题, 包括嵌入声学黑洞结构(图3(e))和不嵌入声学黑洞结构的情况, 将有限和无限均匀板的测量结果与理论结果进行了比较. 相位积累结果表明, 嵌入声学黑洞处理可以显著提高平板的阻尼, 使其相位积累与无限平板的相位积累一致.

声学黑洞用于弯曲波减振经历了数十年, 以上研究反映出声学黑洞结构的有效性. 目前, 大多数研究依然集中在针对经典几何结构的应用场景中, 对复杂结构的减振需求, 并考虑不同的边界条件, 声学黑洞的相关研究较少. 因此, 如何通过声学黑洞的巧妙设计来解决工程实践中的减振需求, 是今后声学黑洞发展的重要一步, 同时也可以填平理论与实践的鸿沟.

3.2 波动调控

声学黑洞的波动调控主要在二维薄板上展开, 因此二维圆形声学黑洞中的弯曲波聚焦和透镜效应是基于径向弯曲波波速下降的物理原理. 数值研究[44]表明, 通过使用线源在嵌入二维圆形声学黑洞的平板中激发兰姆波, 实验证明了透镜效应和聚焦效应[45]. 根据Yan等人[30]和Lomonosov等人[46]对一维声学黑洞的早期研究, 利用几何声学理论, 揭示了二维圆形声学黑洞对高频区弯曲波传播的影响. 在几何声学假设下, 聚焦效应的分析可以基于二维非均匀薄板运动方程进行[28]. 近年来, 利用该原理完成了二维薄板上不同二维声学黑洞波动能量的调控工作. Deng等人[47]提出了一种椭圆声学黑洞作为聚焦平板弯曲波的可调谐透镜. 研究发现, 椭圆声学黑洞的中心厚度、椭圆声学黑洞阶数和偏心距能够影响弯曲波汇聚(图4(a)), 同时研究指出, 将多个椭圆声学黑洞排列成一排有助于弯曲波集中在远离透镜的区域. Huang等人[28]利用弯曲射线方程的数

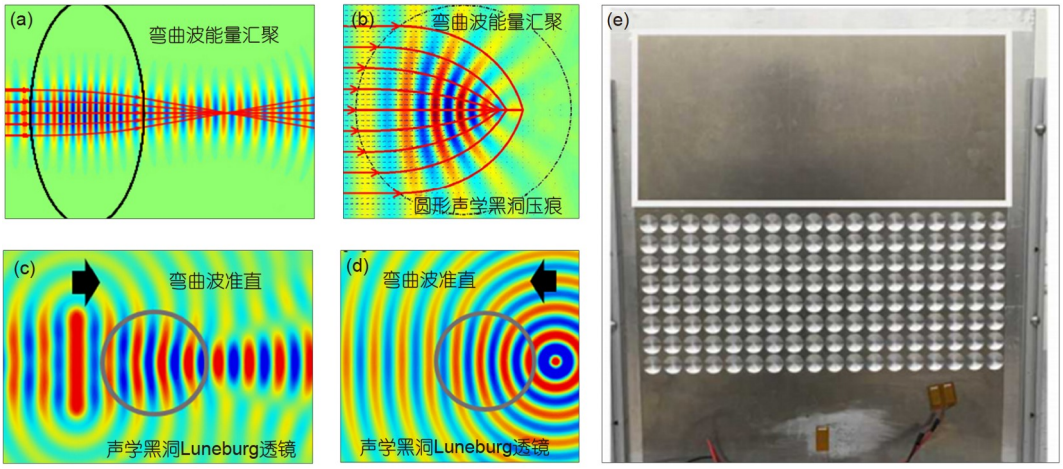


图 4 (网络版彩色)声学黑洞波动调控结构. (a) 椭圆声学黑洞透镜, 改自文献[47]. (b) 圆形声学黑洞压痕对弯曲波能量汇聚, 改自文献[28]. (c), (d) 基于声学黑洞的Luneburg透镜, 改自文献[32]. (e) 基于声学黑洞的宽频带声透镜, 改自文献[31]

Figure 4 (Color online) Acoustic black hole structures for fluctuation control. (a) Elliptical acoustic black hole lens. Modified from Ref. [47]. (b) Circular acoustic black hole indentation on energy convergence of flexural waves. Modified from Ref. [28]. (c), (d) Luneburg lens based on acoustic black holes. Modified from Ref. [32]. (e) Broadband acoustic lens based on acoustic black holes. Modified from Ref. [31]

值积分格式来预测广义声学黑洞压痕中弯曲波的射线轨迹, 以实现弯曲波的传播和聚焦特性(图4(b)). 他们所提出的分析方法也可以推广到分析其他声学黑洞结构, 甚至折射率连续变化的非均匀结构中的弯曲波特性. Zhao等人[32]利用声学黑洞结构提出了一种能够实现全方位、宽频带弯曲波聚焦和准直的改进Luneburg透镜(图4(c), (d))的设计方案. 这种简单的透镜设计能够实现连续的折射率梯度, 从而允许操纵弯曲波传播, 并克服现有波操纵装置的限制. Zhu和Semperlotti[31]以声学黑洞形式设计完全嵌入薄壁结构波导中的宽频带声透镜(图4(e)), 用理论、数值和实验方法研究了针对弯曲波的操纵效果(从聚焦、准直到双折射)的能力. 最近, 声学黑洞晶格结构也被设计用于实现具有拓扑保护的波传播. Ganti等人[48]报道了一种周期性声学黑洞晶格来支持拓扑边态. 通过引入与角度相关的声学黑洞锥型尺度, 可以打破空间逆对称性, 且可以获得并组装两种拓扑上不同的晶格构型, 从而形成具有非常规动力学特性的畴壁, 用于支持准单向弹性导模的形成和传播. 这种准单向弹性导模在拓扑上受到保护, 以防止由于晶格中的杂质或缺陷而引起的后向散射.

波动调控主要研究集中在声子晶体、声学超材料以及超表面, 声学黑洞的引入无疑更加丰富了波动调控的手段. 从学科角度看, 基于声学黑洞的波动调控是近年来新兴的研究热点, 未来的发展可能在于波动调控结构一体化设计.

3.3 降噪

Du等人[49]、Ji等人[50]、Feurtado和Conlon[51]分别使用声波导管和声学混响室测试了二维声学黑洞薄板的隔声性能. 实验结果表明, 阻尼层对隔声的影响主要集中在薄板的一阶共振频率和阻尼控制区内, 尽管模态阻尼损失因子在整个频率范围内有所增加, 但是在某些频率点处, 阻尼层厚度越大, 隔声性能越差. Ma和Cheng[52]研究揭示了声学黑洞表面的黏滞性涂层在提高声辐射效率方面的不利影响. 研究表明, 阻尼层引起的相互矛盾的作用, 要求对其配置进行平衡和细致的设计, 以获得最佳的声学效益, 即降低辐射声功率. Tang和Cheng[53]研究了周期均布双叶型声学黑洞板在特征频率以下的低频声辐射. 结果表明, 在声学黑洞诱导的局部共振带隙内, 所设计的板在没有附加阻尼处理的情况下仍然具有较低的声辐射. Li和Ding[54]发现, 降低声辐射可以通过加强弯曲波和声学黑洞结构的相互作用获得. Hollkamp和Semperlotti[24]研究了一维管道声学黑洞模型, 使用传递矩阵方法给出了管道内末端反射系数的理论解, 用于评估管道内声学黑洞波导对声波的吸收性能. Wang等人[55]将声学黑洞引入到圆盘结构中, 对结构边界反射声的发射波进行衰减, 得到高信噪比的声发射直达波, 证明了声学黑洞可以减少声发射边界处的反射波. 在声学黑洞的应用拓展方面, Bowyer和Krylov[56]将二维声学黑洞首次内嵌到汽车的引擎外壳上, 采用实验方法证明了声学黑洞可以明显

降低引擎辐射噪声. 为了抑制汽车底部的噪声, Prill等人[57]将声学黑洞应用到汽车内饰地板上, 证明了其对车内低频噪声有显著的抑制效果.

相对于传统降噪材料或者结构, 声学黑洞因具有刚性基体而具备防火、防潮的物理性能, 在宽频噪声控制中具有良好的发展前景. 目前的研究大多集中在通过控制弯曲波的减弱来影响振动辐射噪声, 并且大多数研究停留在声波导管和声学混响室测试方面, 在实际具体应用场景中的使用效果有待进一步研究. 此外, 低频降噪受制于声学质量作用定律, 一直以来是难以克服的棘手问题. 在声学黑洞结构中, 特征频率的设计对低频降噪至关重要, 提出具备低频特征频率的声学黑洞结构无疑是一种解决方法. 此外, 与经典降噪结构复合后的协同作用能否对低频声波进行抑制, 也值得不断地深入研究.

3.4 能量回收

弯曲波能聚焦效应在建立新型振动能量采集器结构方面具有很好的应用前景. 能量回收元件, 比如压电元件的引入, 将在系统能量方程中带来压电元件的机电转换能以及压电元件引起的动能和势能的变化. 能量回收元件的尺寸和布置位置在一定程度上会影响声学黑洞效应, 声学黑洞结构也反过来影响能量回收效率, 两者相互耦合、相互影响. Deng等人[58]构造了声学黑洞梁加压电层的拉格朗日方程, 导出了弯曲振动和电压的耦合方程, 用半解析方法研究了几种声学黑洞和压电层参数对能量收集效率的影响. Zhao等人[59]建立了表面安装压电换能器的声学黑洞锥形结构的全耦合机电模型, 数值模拟了系统对稳态和瞬态激励的响应. 结果表明, 与传统结构相比, 在稳态和瞬态激励条件下, 动态定制结构设计能显著提高能量回收率. Ji等人[60]提出并研究了一种具有声学黑洞特性的能量收集结构, 该结构既保证了结构强度, 又提高了能量收集性能. 结果表明, 与均匀梁相比, 声学黑洞结构可用于宽带振动能量采集, 并可将采集功率提高一个数量级以上.

声学黑洞在振动能量回收应用中起步较晚, 研究相对较少, 但是近几年开始崭露头角. 目前对声学黑洞结构能量回收的研究中, 回收元件以及回收电路对



图 5 (网络版彩色)声学黑洞降噪结构及实验平台. (a) 声学阻抗管测试声学黑洞小样品隔声量, 改自文献[49]. (b) 混响室测试声学黑洞板大样品隔声量, 改自文献[51]

Figure 5 (Color online) Acoustic black hole structures for noise reduction and test platforms. (a) Measurement of sound insulation of small samples of the acoustic black hole by acoustic impedance tubes. Modified from Ref. [49]. (b) Measurement of sound insulation of large samples of the acoustic black hole panel in the reverberation chamber. Modified from Ref. [51]

声学黑洞效应的形成及影响机制仍不明晰. 在将声学黑洞结构运用于能量回收的实践时, 首要任务仍然是要更加明确能量转化机理, 其次是如何通过声学黑洞结构设计提高能量体转化率. 此外, 对宽频范围内的能量收集一直以来都是研究重点. 简而言之, 通过声学黑洞结构与能量回收系统的协同一体化设计, 实现高效宽频的振动能量回收是近几年有较大潜力的发展方向.

4 结语与展望

综上所述, 振动噪声问题由来已久, 始终是困扰人类社会发展的难点之一, 因此减振降噪的革新探究从未停止. 近年来, 通过引入声学黑洞来操纵弯曲波已经成为振动噪声的热点研究领域之一. 本文全面综述了声学黑洞的原理、分析方法以及功能性分类, 表明声学黑洞结构具备减振降噪效果明显、结构灵活等特点, 并在波动调控和振动能量回收领域有极大的潜力. 作为一种新兴研究方向, 声学黑洞的基础理论和实际应用拓展仍需要深入且广泛的研究. 重点研究方向包括: (1) 声学黑洞声振耦合机理以及与功能材料的匹配问题需要进一步明晰; (2) 声学黑洞中的非线性波动行为需要进一步完善; (3) 针对不同应用场景, 研究具有声学黑洞复合结构的承载一体化设计方法和理论; (4) 非理想型声学黑洞结构的理论建模以及应用拓展. 随着声学黑洞的研究不断深入, 对减振降噪的基础理论以及复合结构设计也是一种补充和拓宽. 从应用实践需求角度出发, 声学黑洞结构的研究有望应用于工业设备设计、建筑声学以及功能复合材料设计中.

参考文献

1 Pekeris C L. Theory of propagation of sound in a half-space of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone. J Acoust Soc Am, 1946, 18: 295–315

2 Mironov M A. Propagation of flexural waves in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval. Sov Phys Acoust, 1988, 34: 318–319

3 Krylov V V. Conditions for validity of the geometrical-acoustics approximation in application to waves in an acute-angle solid wedge. Sov Phys Acoust, 1989, 35: 176–180

4 Pelat A, Gautier F, Conlon S C, et al. The acoustic black hole: A review of theory and applications. J Sound Vibr, 2020, 476: 115316

5 Mironov M A, Pislyakov V V. One-dimensional acoustic waves in retarding structures with propagation velocity tending to zero. Acoust Phys, 2002, 48: 347–352

6 Aklouche O, Pelat A, Maugeais S, et al. Scattering of flexural waves by a pit of quadratic profile inserted in an infinite thin plate. J Sound Vibr, 2016, 375: 38–52

7 Ji H L, Huang W, Qiu J H, et al. Mechanics problems in application of acoustic black hole structures (in Chinese). Adv Mech, 2017, 47: 201710 [季宏丽, 黄薇, 裘进浩, 等. 声学黑洞结构应用中的力学问题. 力学进展, 2017, 47: 201710]

8 Tang L, Cheng L, Ji H, et al. Characterization of acoustic black hole effect using a one-dimensional fully-coupled and wavelet-decomposed semi-analytical model. J Sound Vibr, 2016, 374: 172–184

9 Zeng P, Zheng L, Deng J, et al. Flexural wave concentration in tapered cylindrical beams and wedge-like rectangular beams with power-law thickness. J Sound Vibr, 2019, 452: 82–96

10 Du X F, Huang D C, Zhang J R. Dynamic property investigation of sandwich acoustic black hole beam with clamped-free boundary condition. Shock Vib, 2019, 2019: 6708138

11 Deng J, Zheng L, Zeng P, et al. Passive constrained viscoelastic layers to improve the efficiency of truncated acoustic black holes in beams. Mech Syst Signal Process, 2019, 118: 461–476

12 Deng J, Guasch O, Zheng L. Ring-shaped acoustic black holes for broadband vibration isolation in plates. J Sound Vibr, 2019, 458: 109–122

13 Deng J, Guasch O, Maxit L, et al. Vibration of cylindrical shells with embedded annular acoustic black holes using the Rayleigh-Ritz method with Gaussian basis functions. Mech Syst Signal Process, 2021, 150: 107225

14 Huang W, Ji H, Qiu J, et al. Analysis of ray trajectories of flexural waves propagating over generalized acoustic black hole indentations. J Sound Vibr, 2018, 417: 216–226

15 Denis V, Gautier F, Pelat A, et al. Measurement and modelling of the reflection coefficient of an acoustic black hole termination. J Sound Vibr, 2015, 349: 67–79

16 Guasch O, Sánchez-Martín P, Ghilardi D. Application of the transfer matrix approximation for wave propagation in a metafluid representing an acoustic black hole duct termination. Appl Math Model, 2020, 77: 1881–1893

17 Gao N, Wang B, Lu K, et al. Complex band structure and evanescent Bloch wave propagation of periodic nested acoustic black hole phononic structure. Appl Acoust, 2021, 177: 107906

18 Gao N, Wei Z, Hou H, et al. Design and experimental investigation of V-folded beams with acoustic black hole indentations. J Acoust Soc Am, 2019, 145: EL79–EL83

19 Gao N, Wei Z, Zhang R, et al. Low-frequency elastic wave attenuation in a composite acoustic black hole beam. Appl Acoust, 2019, 154: 68–76

20 Gao N S, Guo X Y, Cheng B Z, et al. Elastic wave modulation in hollow metamaterial beam with acoustic black hole. IEEE Access, 2019, 7: 124141–124146

21 Zhou T, Chazot J D, Perrey-Debain E, et al. Partition of unity finite element method for the modelling of acoustic black hole wedges. J Sound Vibr, 2020, 475: 115266

22 He M X, Ding Q. Data-driven optimization of the periodic beam with multiple acoustic black holes. J Sound Vibr, 2021, 493: 115816

23 Denis V, Pelat A, Gautier F, et al. Modal overlap factor of a beam with an acoustic black hole termination. J Sound Vibr, 2014, 333: 2475–2488

24 Hollkamp J P, Semperlotti F. Application of fractional order operators to the simulation of ducts with acoustic black hole terminations. J Sound Vibr, 2020, 465: 115035

25 Wang X, Ji H, Qiu J, et al. Wavenumber domain analyses of vibro-acoustic decoupling and noise attenuation in a plate-cavity system enclosed by an acoustic black hole plate. J Acoust Soc Am, 2019, 146: 72–84

26 Lee J Y, Jeon W. Wave-based analysis of the cut-on frequency of curved acoustic black holes. J Sound Vibr, 2021, 492: 115731

27 Kralovic V, Krylov V V. Damping of flexural vibrations in tapered rods of power-law profile: Experimental studies. In: Proceedings of the Institute of Acoustics, 2007, 29: 66–73

28 Huang W, Ji H L, Qiu J H, et al. Analysis of ray trajectories of flexural waves propagating over generalized acoustic black hole indentations. J Sound Vibr, 2018, 417: 216–226

29 Huang W, Ji H, Qiu J, et al. Wave energy focalization in a plate with imperfect two-dimensional acoustic black hole indentation. J Vib Acoust, 2016, 138: 061004

30 Yan S, Lomonosov A M, Shen Z. Numerical and experimental study of lamb wave propagation in a two-dimensional acoustic black hole. J Appl Phys, 2016, 119: 214902

31 Zhu H, Semperlotti F. Two-dimensional structure-embedded acoustic lenses based on periodic acoustic black holes. J Appl Phys, 2017, 122: 065104

32 Zhao L, Lai C, Yu M. Modified structural luneburg lens for broadband focusing and collimation. Mech Syst Signal Process, 2020, 144: 106868

33 Hook K, Cheer J, Daley S. A parametric study of an acoustic black hole on a beam. J Acoust Soc Am, 2019, 145: 3488–3498

34 Lee J Y, Jeon W. Vibration damping using a spiral acoustic black hole. J Acoust Soc Am, 2017, 141: 1437–1445

35 Park S, Kim M, Jeon W. Experimental validation of vibration damping using an Archimedean spiral acoustic black hole. J Sound Vibr, 2019, 459: 114838

36 Tang L, Cheng L. Ultrawide band gaps in beams with double-leaf acoustic black hole indentations. J Acoust Soc Am, 2017, 142: 2802–2807

37 Tang L, Cheng L. Periodic plates with tunneled acoustic-black-holes for directional band gap generation. Mech Syst Signal Process, 2019, 133: 106257

38 Cheer J, Hook K, Daley S. Active feedforward control of flexural waves in an acoustic black hole terminated beam. Smart Mater Struct, 2021, 30: 035003

39 Li X. Study on mechanics properties of one-dimensional acoustic black hole structure (in Chinese). Doctor Dissertation. Tianjin: Tianjin University, 2018 [李熙. 一维声学黑洞结构力学性能研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2018]

40 Krylov V V. Overview of localised flexural waves in wedges of power-law profile and comments on their relationship with the acoustic black hole effect. J Sound Vibr, 2020, 468: 115100

41 Lagny L, Secail-Geraud M, Le Meur J, et al. Visualization of travelling waves propagating in a plate equipped with 2D ABH using wide-field holographic vibrometry. J Sound Vibr, 2019, 461: 114925

42 Zhao L. Low-frequency vibration reduction using a sandwich plate with periodically embedded acoustic black holes. J Sound Vibr, 2019, 441: 165–171

43 Conlon S C, Feurtado P A. Progressive phase trends in plates with embedded acoustic black holes. J Acoust Soc Am, 2018, 143: 921–930

44 Climente A, Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Gradient index lenses for flexural waves based on thickness variations. Appl Phys Lett, 2014, 105: 064101

45 Yan S L, Lomonosov A M, Shen Z H. Evaluation of an acoustic black hole's structural characteristics using laser-generated lamb waves. Laser Phys Lett, 2016, 13: 025003

46 Lomonosov A M, Yan S L, Han B, et al. Orbital-type trapping of elastic lamb waves. Ultrasonics, 2016, 64: 58–61

47 Deng J, Zheng L, Guasch O. Elliptical acoustic black holes for flexural wave lensing in plates. Appl Acoust, 2021, 174: 107744

48 Ganti S S, Liu T W, Semperlotti F. Topological edge states in phononic plates with embedded acoustic black holes. J Sound Vibr, 2020, 466: 115060
49 Du X, Huang D, Fu Q, et al. Effects of acoustic black hole parameters and damping layer on sound insulation performance of ABH circular plate. Appl Sci, 2019, 9: 5366
50 Ji H, Wang X, Qiu J, et al. Noise reduction inside a cavity coupled to a flexible plate with embedded 2-D acoustic black holes. J Sound Vibr, 2019, 455: 324–338
51 Feurtado P A, Conlon S C. Transmission loss of plates with embedded acoustic black holes. J Acoust Soc Am, 2017, 142: 1390–1398
52 Ma L, Cheng L. Topological optimization of damping layout for minimized sound radiation of an acoustic black hole plate. J Sound Vibr, 2019, 458: 349–364
53 Tang L, Cheng L. Impaired sound radiation in plates with periodic tunneled acoustic black holes. Mech Syst Signal Process, 2020, 135: 106410
54 Li X, Ding Q. Sound radiation of a beam with a wedge-shaped edge embedding acoustic black hole feature. J Sound Vibr, 2019, 439: 287–299
55 Wang X, Liu X, Tai J, et al. A novel method of reducing the acoustic emission wave reflected by boundary based on acoustic black hole. Ultrasonics, 2019, 94: 292–304
56 Bowyer E P, Krylov V V. A review of experimental investigations into the acoustic black hole effect and its applications for reduction of flexural vibrations and structure-borne sound. In: 2015 INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. San Francisco: Institute of Noise Control Engineering, 2015. 2594–2605
57 Prill O, Roos C, Busch R. Finite element simulations of acoustic black holes as lightweight damping treatments for automotive body panels with application to full vehicle interior wind noise predictions. In: 2016 INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Hamburg: Institute of Noise Control Engineering, 2016. 5210–5221
58 Deng J, Guasch O, Zheng L, et al. Semi-analytical model of an acoustic black hole piezoelectric bimorph cantilever for energy harvesting. J Sound Vibr, 2021, 494: 115790
59 Zhao L, Conlon S C, Semperlotti F. Broadband energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring. Smart Mater Struct, 2014, 23: 065021
60 Ji H, Liang Y, Qiu J, et al. Enhancement of vibration based energy harvesting using compound acoustic black holes. Mech Syst Signal Process, 2019, 132: 441–456

Summary for “声学黑洞研究进展与应用”

Progress and applications of acoustic black holes

Nansha Gao[1*], Zhicheng Zhang[1], Qian Wang[2], Xinyu Guo[1], Kean Chen[1] & Hong Hou[1]

[1] *Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing, Ministry of Industry and Information Technology, School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*
[2] *The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710077, China*
* Corresponding author, E-mail: gaonansha@nwpu.edu.cn

The problem of vibration and noise has always been one of the difficulties in the development of society. Therefore, the innovation of vibration and noise reduction methods has never stopped. In recent years, the introduction of acoustic black holes to manipulate flexural waves has become a hot topic in the field of vibration and noise. In this review, the acoustic black hole is defined as a kind of structure which can converge the flexural wave by changing the geometric parameters or material properties. In the absolute ideal case, the flexural wave velocity gradually decreases to zero in the acoustic black hole region. Acoustic black hole structures, as a new kind of flexural wave manipulation technique, can effectively reduce the propagation speed of flexural waves in the structure, thus reducing the reflection at the end of the boundary and forming a region with high energy density. Therefore, it has a broad application prospect in vibration reduction, noise reduction, fluctuation control and energy recovery. Different from the composite structure of vibration reduction and noise reduction in the past, the acoustic black hole has some certain advantages in practical application because of its simple structure, material and preparation process. Up to now, a great deal of theoretical modeling and experimental research has been carried out on the structural form of acoustic black holes, and some certain research results have been obtained. This review first introduces the origin, basic definition and principle of acoustic black holes, then introduces the theoretical calculation and experimental research methods, including frequency domain methods (semi-analytical method, Gauss expansion method, geometric acoustics method, transfer matrix method, finite element method, unit decomposition finite element method, spectral element method, and finite difference method) and wave-number domain method. Additionally, the laser ultrasonic scanning technology is emphasized in the experimental research. Next, the four main functions of acoustic black holes are classified and described, which are vibration reduction, noise reduction, fluctuation control and energy recovery, and the research status and existing problems of each application direction are summarized. The application of acoustic black holes in vibration reduction and noise reduction is becoming more and more comprehensive, and its applications in wave regulation and energy recovery are emerging in recent years. As a new research direction, the basic theory and practical application of acoustic black holes still need to be widely studied further. The breakthrough points include: (1) The acoustic vibration coupling mechanism of acoustic black holes and the matching with functional materials need to be further clarified; (2) the nonlinear wave behavior in acoustic black holes needs to be further improved; (3) according to different engineering scenarios, the bearing integrated design method of acoustic black hole composite structures is developed; (4) theoretical modeling and application development of imperfect acoustic black hole structures. The development of acoustic black holes is also a supplement and broadening to the related research of vibration and noise reduction. From the perspective of social development needs, the related research of acoustic black holes has potential applications in the independent research and development of functional structures and materials.

acoustic black hole, vibration and noise reduction, fluctuation control, energy recovery

doi: 10.1360/TB-2021-0439