DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.05.001

声学黑洞吸声结构研究进展及应用前景

张建润,朱逸雯,傅琪迪,陈赟伟
(东南大学 机械工程学院,江苏 南京 211189)

摘　要:声学黑洞(ABH)作为一种弯曲波调控结构,因其对弯曲波传播速度的调控及能量的聚集而引起广泛关注,并衍生出新型结构,具有独特声波操控能力。因此该结构在对弯曲波与声波的控制方面具有广泛的应用前景。然而,复杂的吸声机制、随着实际应用浮现出的高精度制造要求、愈发丰富的结构变形,使得其研究与工程应用面临诸多挑战。系统综述了声学黑洞的吸声机制研究进展,梳理了不同类型的声学黑洞的波传播状态及能量集中与耗散情况。在此基础上,进一步综述了声学黑洞的发展中,相应耦合形式所使用的理论模型及其性能研究所使用的分析方法。同时,还综述了声学黑洞的主要研究方向并进行了功能性分类,包括减振、声波控制、降噪及能量回收四个方面。介绍了声学黑洞近年来在工程中的应用案例与新型研究,并对其未来的发展趋势进行了展望,指出亟需在方法的创新与技术上寻求突破,以支撑高端设备与高标准环境的生产与应用需求。

关键词:声学黑洞;振动降噪;波动控制;能量回收;轻量化结构
中图分类号:TB5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2026)05-0001-16

Mechanism Exploration and Application Prospects of Acoustic Black Holes: A Novel Sound Absorption Structure

Zhang Jianrun, Zhu Yiwen, Fu Qidi, Chen Yunwei
(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: As a flexural wave manipulation structure, the Acoustic Black Hole (ABH) has attracted extensive attention due to its ability to regulate the propagation velocity of flexural waves and concentrate energy. And some novel structures with unique acoustic wave manipulation capabilities appear, making the ABH highly promising for applications in flexural and acoustic wave control. However, its research and engineering applications face numerous challenges, including complex sound absorption mechanisms, stringent manufacturing precision requirements arising from practical applications, and increasingly diverse structural deformations. This paper systematically reviews the research progress in the sound absorption mechanisms of ABHs, summarizing the wave propagation states, energy concentration, and dissipation characteristics of various ABH configurations. Building upon this, we further review the theoretical models used for different coupling forms and the analytical methods employed for performance evaluation in the development of ABHs. Additionally, this paper categorizes the primary research directions of ABHs into four functional domains: vibration reduction, acoustic wave control, noise mitigation, and energy harvesting. Finally, we present recent engineering applications and emerging research, and provide an outlook on future development trends. We emphasize the urgent need for breakthroughs in methodological innovation and technological advancements to meet the production and application demands of high-end equipment and high-standard environments.

Keywords: acoustic black hole; vibration and noise reduction; wave control; energy harvesting; lightweight structure

0　引言

随着精密制造等工业领域对振动噪声控制要求不断提高以及人们生活质量的提高,传统的被动减振降噪技术,如大面积敷设阻尼材料、多孔吸声棉或共振腔结构,已难以同时满足现代高端装备对轻量化、紧凑化和宽带高效性等需求。在此背景下,声学黑洞(acoustic black hole, ABH)作为

基金项目:国家自然科学基金项目(52275092)

第一作者简介:张建润(1962—),男,江苏镇江人,教授,博导,博士,中国机械动力学学会常务理事,江苏省振动工程学会常务理事,江苏省数控机床中心副主任。近年来先后承担参与了欧共体项目、大量国家、部省和地方的自然科学基金、重大专项项目、863 计划项目等。长期从事机械动力学,噪声与振动控制,结构动态设计与优化等研究,发表 SCI、EI 收录论文 80 余篇,撰写教材 3 部,获得省部级奖 10 余项,拥有 10 多项发明专利,zhangjr@seu.edu.cn。

一种基于波动调控的新技术,为这一困境提供了突破性的解决思路。

声学黑洞从概念的提出,至其后续发展与研究,已从最初的楔形梁结构衍生出二维乃至管道结构,历经几十年的发展,ABH 已形成内涵丰富的研究体系。早期工作集中于 WKB 近似下的零反射条件、截断效应与阻尼补偿机制,并由传递矩阵法及有限元数值建模等构筑了较为完备的分析工具集。近十年,研究重心逐步转向构型创新、多物理场耦合,且管道结构也在近年受到更多关注,相关理论分析模型不断得到完善,结构性能也不断得到优化。与此同时,ABH 的应用视野已从最初的结构减振延伸至空间降噪、通风隔声乃至能量回收等跨学科领域,初步验证了其作为轻薄、宽带多功能声学平台的工程潜力。

本文系统综述了声学黑洞技术近几十年来关于吸声机制、理论模型与典型应用的研究进程,围绕 VBH 与 SBH 两类结构展开,并对未来发展趋势进行了思考与展望,以期为相关领域的研究和工程应用提供参考。

1　声学黑洞吸声机制及发展

目前声学黑洞的原理与技术已日益明了和成熟,随着声学黑洞技术的拓展与结构丰富化,其理论领域还有待更深入的补充与理解。本章节将对该类结构的具体分类及不同类型的吸声机制和研究进展进行归纳与总结。

1.1　声学黑洞概念及其研究进展

ABH 结构是一种新型的弯曲波调控技术,其利用结构厚度的梯度性规律变化,实现对波速、能量的控制与汇聚。其概念类比于天文物理领域中的黑洞,即某些物质在传播过程中被完全吸收,不会发生反射。根据波的形式,声学黑洞可以分为振动黑洞(vibrational black hole,VBH),如图 1(a)所示,包括一维声学黑洞和二维声学黑洞,和声波黑洞(sonic black hole,SBH),如图 1(b)所示。对于声学黑洞的研究最早始于 1988 年,Mironov 研究并发现,厚度变化的楔形结构可使弯曲波速度减慢从而在理想情况下实现零反射,后有关声学黑洞的基本原理皆根植于此。在接下来的十年里,Krylov[1]对一维楔形结构中几何声学传播条件及理论进行了研究,并将该延迟结构的概念从一维扩展至二维并证明了其适用性,在此基础上正式将该结构命名为“声学黑洞”。



(a)振动黑洞　　(b)声波黑洞

图 1　声学黑洞的形式

“声学黑洞效应”具体解释为,当楔形结构厚度按幂律变化减小时,弯曲波的传播速度逐渐减慢,如图 2(a)所示。

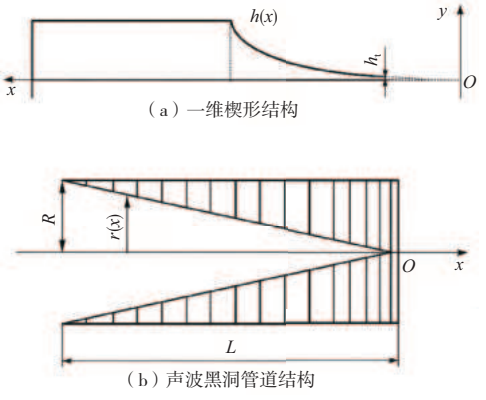
$$h(x)=\varepsilon x^{m} \tag{1}$$

式中:$h(x)$为位置于 x 处楔形结构的厚度;ε 为常数;m 为大于 2 的有理数。理想情况下,随着厚度减小到零,波的相位和群速度变为零,从而有效实现波的零反射[2]。这类结构应用于弯曲波的捕获,被称为“振动黑洞”(VBH)。

此外,另一种结构应用于管道吸收入射波,即管道内有效导纳结构沿轴向连续变化,通常通过插入多个厚度遵循幂律变化的刚性环实现,该想法由 Mironov 等[3]首次提出并发现存在声学黑洞效应,被称为“声波黑洞”(SBH),如图 2(b)所示。

$$r(x)=\frac{(R-h_{\mathrm{t}})}{L^{n}}(|x|)^{m}+h_{\mathrm{t}} \tag{2}$$

式中:$r(x)$为环的内半径;R 为管道半径;L 为管道长度;n 为环数;ε 为常数;m 为大于等于 1 的有理数;h_{t}为截断厚度,理想状态下$h_{\mathrm{t}}=0$。



(a)一维楔形结构

(b)声波黑洞管道结构

图 2　声学黑洞的结构示意图

1.2　VBH 阻尼损耗机制及研究进展

继 Mironov 等对楔形结构厚度变化与弯曲波传播特性关系的初步研究后,关于 VBH 的研究日益丰富。在基于理想情况的假设下,以一维振动黑洞为例,当楔形结构边缘厚度衰减至 0,则入射波的波长会被逐渐压缩至 0,而幅值无限增大,如

图 3 所示。如果厚度分布遵循幂律变化且厚度在边缘严格为零,则波到达边缘需无限的传播时间,从而被捕获,即不会发生反射。

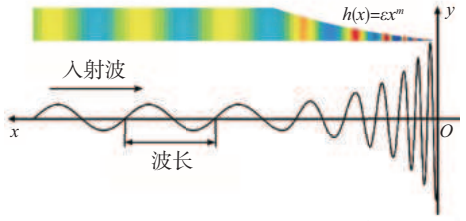
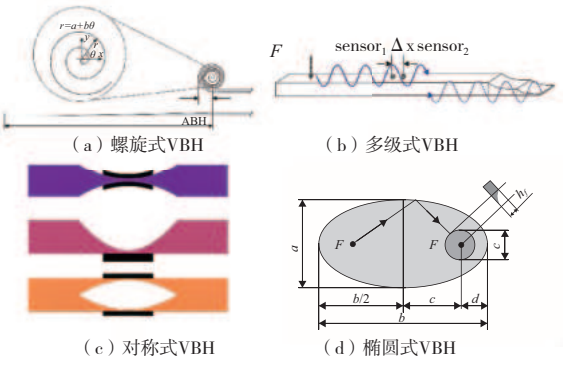


图 3　楔形结构厚度变化与弯曲波传播特性关系

声学黑洞效应的实现由两个条件触发,假设结构中的波均为简谐形式的,则波的群速度和相速度会衰减至 0,致使入射波永远无法到达底部而被困在结构末端,这种现象称为慢波效应。同时,减速过程中能量在尖端区域堆积,形成显著的动能集中,此为前提条件。而后续的阻尼耗散才能真正实现声学黑洞效应,Krylov 等[4]早期便发现在一维梁末端贴敷阻尼可以有效吸收入射的弯曲波,同时还能改善末端截断所带来的不利影响,此方法同样适用于二维板中间区域。为了进一步阐明 ABH 结构的能量耗散特性,有学者对此进行了更深入的研究,将均匀板与一维及二维 VBH 对比,并改变阻尼覆盖区域以探求最佳减振效果。然而,在实际的应用与加工制造中,板或梁的厚度无法真正意义上降至 0 而会出现一个末端截断,这将大大破坏振动黑洞原有的设计,使得结构在低频的吸收效果不理想。

此后的大量研究针对声学黑洞的实际效果,尤其是末端截断问题。Krylov 等[5]于 2007 年提出利用吸收层消除楔形结构终端的波反射,并通过实验验证了该想法的可行性,但该方式效果并不显著。在此基础上,VBH 的长度与空间限制依旧是值得分析与改良的重要方面,有学者进一步研究曲线型 VBH 以改变其形式,并结合规律性增加的阻尼材料以实现理想的 VBH 的功效。对于阻尼材料的设置,Du 等[6]通过建立动力学模型分析 ABH 效应并研究了阻尼层位置对能量集中与衰减的影响。此外针对末端截断问题,目前还提出多种新型阻尼处理方式以增强振动能量采集和振动阻尼能力,如螺旋形 VBH、多级式 VBH、对称式 VBH、椭圆式 VBH 等多种优化形式的振动黑洞设计,如图 4 所示。此外,针对特定的结构尺寸和激振位置,对阻尼参数和布置方式的优化策略也可有效地实现振动衰减。此后,随着其应用潜力被挖掘,相关创新型设计也不断涌现,包括超材料理念、低频吸声结构等,将在下文得到详细分析与补充。



(a) 螺旋式VBH　(b) 多级式VBH

(c) 对称式VBH　(d) 椭圆式VBH

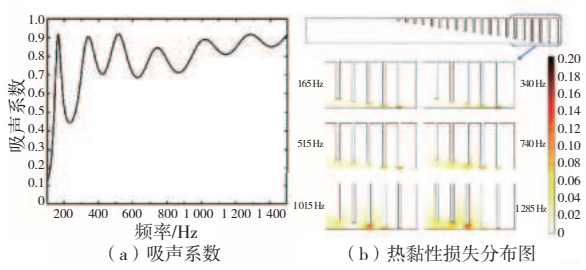
图 4　振动黑洞优化形式

1.3　SBH 的吸声机制及研究进展

振动黑洞(VBH)吸收调控弯曲波,声波黑洞(SBH)则针对声波,其通过内径衰减的环使得收缩波导管中出现连续变化的阻抗特征,从而实现对声波的吸收。Mironov 于 2002 年首次提出声波黑洞的概念后,SBH 并未受到重视,直到 2017 年该概念被重新提及,对其吸声机制的研究才逐渐展开。可以看到,阻尼耗散对于 VBH 吸声性能的实现具有极为重要的作用,因此明确阻尼效应对声学黑洞吸声机制具有很强的现实意义。然而,由于声波黑洞(SBH)研究起步较晚,其内部的阻尼效应与声能耗散机制还不明朗,近年来对其探究也正在逐步深入。

学者们通常采用复声速的方法简化处理 SBH 内部的热黏性阻尼,即采用 $c=c_0(1+j\eta)$ 来等效声速 c_0,式中 η 为阻尼损耗因子且通常取 0.05,在相关研究中该方法被广泛使用,但依旧存在不精确性。Červenka 等[7]又在此基础上通过有限元法着重分析了系统阻尼与环的关系,研究发现随着相邻环距离的减少,SBH 中的阻尼效应增强,且恒定的损耗因子并不能很好地反映 SBH 中的真实阻尼。因此,关于阻尼的变化与影响仍需进一步探讨,Deng 等[8]通过有限元仿真证明了 SBH 中的热黏性损失主要发生于环腔边缘以及环腔中,如图 5 所示。Mi 等[9]为提高阻尼研究的准确性,采用 JCAL 模型处理环腔中的热黏损失,但其本质仍然是一种集中参数模型,虽然能在一定程度提高精度,但仍不能清晰展示 SBH 内部阻尼的耗散机制。Mousavi 等[10]模拟了波导结构中声波衰

减的不同阻尼机制,结果表明黏热损耗不能成为该装置中的主要吸收机制,尤其是在高频段,并提出了新的可能。Červenka 等[11]开发了一个利用线性化纳维-斯托克斯方程的数学模型,正确捕捉了沿流体-固体界面的声学边界层中的热黏度损失,尤其是在环间空腔中。研究表明:SBH 中的声能吸收与环间空腔中的共振有关,而非只是波速降低引起的。



(a) 吸声系数　　(b) 热黏性损失分布图

图 5　有限元法分析 SBH 耗散机制

上述研究反映 SBH 的吸声机制比振动黑洞更为复杂,仅靠慢声效应无法解释声波在管道中的传播方式和特征,因此更有学者提出新的猜想与验证。Zhang 等[12]发现 SBH 低频和宽带吸收性能源于多个关键因素的协同效应。其中黏性热耗散主要发生在环内缘附近,这是空腔共振产生的高压梯度的结果,而不同腔体表现出多个共振峰的宽带特征,从而促进了多重吸收峰和拓宽的声吸收。Hruška 等[13]通过复频率平面对矩形 SBH 的吸收效率进行了分析,并总结发现由于缺乏耗散导致低频下法布里-佩罗共振与黏热损耗的耦合难以实现。Su 等[14]通过求解可压缩流体的纳维-斯托克斯方程,并通过分析声波激发下的声流特性进一步讨论了 SBH 的声学流效应和声波捕获机制。Chen 等[15]考虑到目前 SBH 的改进和应用主要集中在有限环情形,而先前关于连续情形的研究无法准确求解该类 SBH 内部的声学性能,为此进行了 SBH 波动方程的推导与求解并基于解析解,研究了波的集中和耗散特性,以阐明其潜在的吸收机制。这些机制探索为 SBH 的应用与优化提供了新的研究方向,推动了 SBH 理论建模的发展。

对于声波黑洞吸声机制的关注与研究逐步得到加强,鉴于 SBH 结构复杂且形式多样,其内部声波传播特性与衰减机制无法通过常规的理论建模方式得到阐明。在实际应用中,由于加工制造插入环数有限,而此类 SBH 结构的能量耗散机制需要新的理论分析模型,新的研究已将重点放在离散型 SBH 理论求解中。

2　声学黑洞的理论模型

2.1　VBH 理论模型及相关建模方法

VBH 的理论模型根植于变厚度 Euler-Bernoulli 梁的弯曲波控制方程。其建模方法借助于准经典近似(wentzel-kramers-brillouin, WKB),在厚度缓慢变化的假设下导出局部波数 $k(x)\propto h(x)^{-\frac{1}{2}}$ 与累积相位,从而证明了当厚度按幂律 $h(x)=\varepsilon x^m(m\geqslant 2)$ 衰减时,波传播时间趋向无穷,理论上可实现零反射。为克服 WKB 法在尖端截断处失效的局限性,研究者发展了一系列动态解析方法,这些方法可以分为解析法、半解析法、有限元法(FEM)和传递矩阵法(TMM)。

1)解析法

Lee 等[16]最早提出了振动 ABH 的解析方法,将该结构的欧拉-伯努利方程重新表述为 m 大于 2 的广义超几何微分方程并通过广义超几何函数的方式表示其精确解。

当梁的截面为矩形且厚度以幂律函数形式 $h(x)=\varepsilon x^m(m>0,x>0)$ 逐渐变细时,如图 6 所示,方程可表示为

$$x^{2m}\frac{\mathrm{d}^4w}{\mathrm{d}x^4}+6m\,x^{2m-1}\frac{\mathrm{d}^3w}{\mathrm{d}x^3}+3m(3m-1)x^{2m-2}\frac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}x^2}-\xi w(x)=0 \tag{3}$$

式中:x 为光束中性轴上的距离;$w(x)$ 为横向位移的控制方程;$\xi=12\rho\omega^2/E\varepsilon^2$ 为根据频率、材料性质和梁形的常数;E 为杨氏模量;ρ 为质量密度;ω 为角频率。

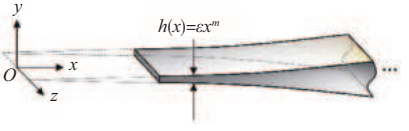


图 6　一种厚度按幂函数形式渐变的欧拉-伯努利梁的示意图

$m=2$ 时,方程被重写为

$$x^4w''''(x)+12\,x^3w'''(x)+30\,x^2w''(x)-\xi w(x)=0 \tag{4}$$

并通过将 m 分为 4 种类型,推导出 4 个线性无关的欧拉-伯努利方程解

$$W(x)=C_1x^{\lambda_1}+C_2x^{\lambda_2}+C_3x^{\lambda_3}+C_4x^{\lambda_4} \tag{5}$$

式中:$\lambda_i(i=1,2,3,4)$ 为频率常数;$C_i(i=1,2,3,4)$ 为由连续性和边界条件决定的常数,此前相关研究的文献中也给出了相同解的形式。此外,文

献[16]在此解的基础上推导并验证了 m 大于 2 时控制方程的精确解。

2）半解析法

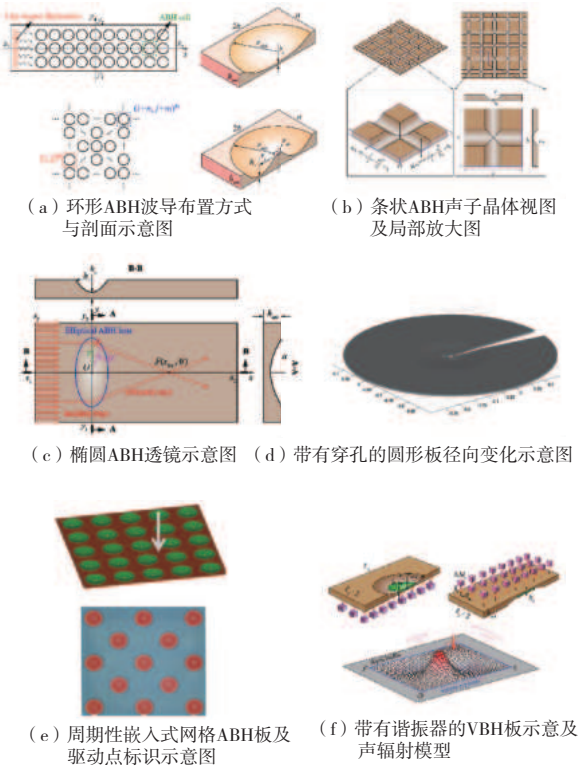
为更好地实现声学黑洞效应以达到减振的效果,必须考虑附加阻尼层或其他能量消耗与控制元件的耦合作用。因此在先前研究方法的基础上需要对理论模型进行改进与优化,如通过黏弹性层振动模型(ross-unar-kerwin, RUK)考虑薄阻尼层的影响,假设该模型阻尼层厚度远小于楔形层厚度,虽然该方法能进一步精确计算结果,但该假设并不适用于实际问题。因此,考虑到阻尼的位置与形状等其他因素,有学者提出半解析法,该方法适用范围更广,近年来针对相关动力学方程的求解得到了广泛研究。

其中,复杂模型的性能计算中,小波分解函数被逐步引入并进行了表述。该模型将阻尼层视为系统的整体部分,从而保持其与主体结构的完全耦合,通过墨西哥帽小波(MHW)函数近似弯曲位移。基于拉格朗日方程,并在系统中嵌入其他能量耗散元件,最终得到控制方程。该方法可充分考虑到楔形结构尖端的变形并准确描述基于该结构的动态响应。

此类方法在 ABH 的求解中应用广泛且颇受关注,近年来在各项研究中逐渐得到完善与改进。针对工程应用中常见的非均匀截面结构,存在非均匀截面带来的收敛性差、准确性差等问题,新的建模方法随之涌现,如 Morlet 小波和高斯函数。此后高斯函数(GEM)在多项研究中被引入作为替代方案并应用半解析方法分析了单个 ABH 在变化多个参数时的性能及多个 ABH 的各种配置。而对于二维存在的尺寸有限及波长分布不均等问题,Ma 等[17]提出了二维多贝希小波(DW)缩放函数并改善了 O´Boy 和 Krylov 对复杂板结构固有频率的研究方法。大量研究持续检验了上述动态方程,并对其他 VBH 复合结构进行了高斯求解,包括复杂形状如环形、条状、椭圆、带有穿孔的圆形板、嵌入式网格板以及带有谐振器的 VBH 板[18],如图 7 所示。这些研究极大丰富了振动声学黑洞结构的理论建模和动态分析方法,为 ABH 减振特性的探索提供了日益丰富且精准的理论方案。

3）有限元法

有限元法(FEM)在复杂结构及多物理场耦合设计中具有很强的通用性,其无需对解析解进行假设,在 ABH 梁的应用中,可以通过直接将厚度变化的结构离散化,构建单元离散模型求解时域动态方程。谱元法(SEM)也被用于构建一维和二维结构模型,该方法是基于有限元概念发展而来,是解决梁结构动态响应的关键方法。对于可变截面梁,传统 SEM 通过傅里叶变换将运动方程转换为频域并对结构进行离散化处理,该方法的计算成本与有限元素法相当。后被传统的有限元法(FEM)代替,并涌现出一种新的现代方法称为波动有限元法(WFEM),用于计算周期声学和结构系统的动态行为,适用于建模复杂的超材料系统。在此背景下,Tang 等[19]通过有限元分析研究了具有四个隧道双叶 ABH 单元的有限元板的声辐射,数值仿真与试验表明该结构能够减少板在特征频率以下的低频范围内的声辐射,并拓展为周期性缠绕的 ABH 胞元结构,将 ABH 效应与亚波长带隙相结合减弱板的辐射声,如图 8 所示。

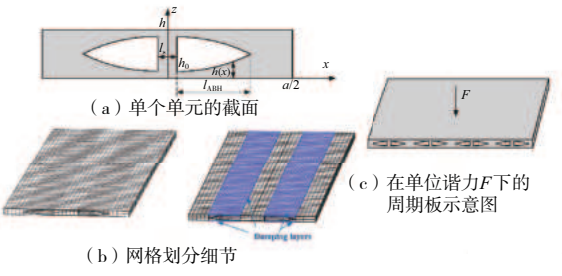


(a) 环形ABH波导布置方式与剖面示意图　(b) 条状ABH声子晶体视图及局部放大图

(c) 椭圆ABH透镜示意图　(d) 带有穿孔的圆形板径向变化示意图

(e) 周期性嵌入式网格ABH板及驱动点标识示意图　(f) 带有谐振器的VBH板示意及声辐射模型

图 7　VBH 复合结构高斯求解



(a) 单个单元的截面

(b) 网格划分细节

(c) 在单位谐力F下的周期板示意图

图 8　VBH 有限元方法

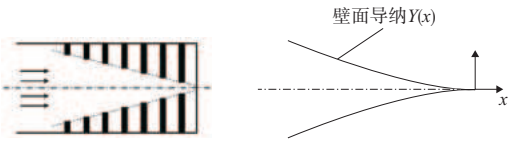
4）传递矩阵法

采用传递矩阵法(TMM)在声学黑洞的初步应用在于计算嵌入 ABH 的梁的声辐射解析解,后经改进用于更广泛的复杂形式求解。如 Ji 等[20]建立了嵌有二维声学黑洞-声腔耦合的声辐射有限元模型,提出阻尼增强和板腔耦合强度降低是降低腔内噪声的两种机制。Du 等[21]采用声学自动匹配层(AML)方法建立了嵌有二维声学黑洞圆板传声损失分析的有限元模型,并研究了声学黑洞几何参数对传声损失的影响机制。此外,还有多项关于声学黑洞在结构减振中应用探讨的研究展开,包括对阻尼、质量特性及周期性结构的处理,在此类工作中使用有限元模型与其他模型的综合评估也是常见的求解方式。

关于声学黑洞对弯曲波传播特性的影响及对结构辐射声抑制机制的研究过程中,常用的分析方法包括但不限于上述四种方法,如采用波数域法分析声腔声振耦合特性,通过数值仿真和实验探究结构参数对壳体振动噪声降低的影响,研究者更常通过多种方法的结合建立复杂模型以提高准确性。

2.2　SBH 理论模型及相关建模方法

为更深入地理解 SBH 的声波操纵行为和吸声机制以指导并实现其在实际应用中的价值,学者们对其理论建模做出了大量研究。前文提到,声学黑洞(SBH)是在一个波导管中插入内径沿幂律衰减的刚性环实现的,如图 9 (a)所示。当环数趋于无穷时,相邻环隔成的腔室所产生的声学导纳可以认为是一个沿轴向位置连续变化的函数。此时声学黑洞可以被认为是一个管壁非刚性的收缩管,如图 9(b)所示,其中 $Y(x)$ 即为沿轴向变化的壁面导纳函数。这是声学黑洞首次被提出时的概念。然而,无穷数量的环在现实条件下是不存在的,因此这类声学黑洞的研究可以被认为是理想情况下的理论研究。相较而言,多数针对 SBH 的研究则通常是在管中插入固定数量的环,并探索其在实际情况下的吸声性能。因此可以发现,从概念上作区别, SBH 可以分为两种不同的形式,即具有无限环数的连续型 SBH 与有限环数的离散型 SBH。这成为了目前 SBH 研究领域中的两大分支,并且两者的理论建模方法也有所不同。对于连续型 SBH 可以通过构建波动方程来描述其内部声场。在概念提出之时,Mironov 率先给出了衰减幂律为 1 次的情况下连续型 SBH 的控制波动方程的理论解,并首次分析了入射波的群速度和相速度沿轴向位置的变化。两种形式的 SBH 对应不同的建模方法,连续型通过波动方程及其解析解对其声场变化进行分析与描述,离散型则常用传递矩阵法(transfer matrix method, TMM),此外,有限元法 FEM 多被用于检验理论建模的准确性。



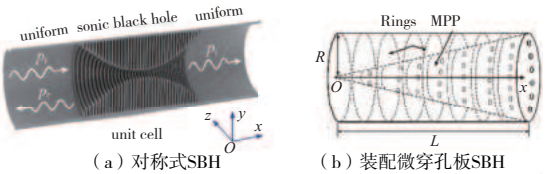
(a)有限环数　　(b)无限环数

图 9　声学黑洞波导管中内径沿幂律衰减的刚性环

1）传递矩阵法

2017 年,SBH 结构再次被重新提及,Guasch 等[22]推导分析了二次连续型 SBH 的波动方程解析解,并将 SBH 的概念延伸至离散形式。当环数从无限降至有限时,壁面导纳将不再连续而使得波动方程不再具有适用性。因此,该项工作最重要的贡献便是提出了离散型 SBH 的理论建模方法,即传递矩阵法。同时,该团队随后的一项工作中,通过将离散型 SBH 与密度沿轴向变化的超流体模型进行类比等效,验证了传递矩阵法的有效性,并证明了在有限环数下 SBH 也具有与连续型类似的吸声特性曲线。这两项工作的重要意义在于将 SBH 从一个单纯的学术概念引入实际。并且由于直观性和传递矩阵法的高效性,针对 SBH 的研究也自此侧重于离散型。学者们随后将传递矩阵法应用于离散型 SBH 的参数化分析以及优化设计中,并且计算推导了不同形式的 SBH 透射系数。此外,传递矩阵法也因其良好的适用性被广泛应用于探索 SBH 衍生结构的吸声特性曲线中,如图 10(a)和图 10(b)所示的对称式与装配微穿孔板 SBH,只需将传递矩阵中相应元素替换为对应声学元件的阻抗即可获得吸声曲线。可以看到,由于其高效便捷和广泛使用,传递矩阵法已逐渐成为探索离散型 SBH 吸声性能的主要建模方法。但在近期的多项研究中提到,从实验和有限元的结果对比中可以发现,传递矩阵法的精度问题仍然值得商榷。从探索 SBH 的吸声性能角度考虑,传递矩阵的建模方法可以便捷地获取宏观的吸声参数,如反射、吸声和透射系数等用于评价 SBH 的整体性能指标。因此,TMM 的提出对于

离散型 SBH 的发展具有重要意义。



（a）对称式SBH　　（b）装配微穿孔板SBH

图 10　SBH 衍生结构

2）解析法

尽管 TMM 的发展对于吸声性能的计算分析十分有利,但由于 SBH 结构本身属性和精度问题,传递矩阵无法精准描述 SBH 的声压分布,而探究内部声波行为对了解 SBH 的吸声机制和声波操纵特性至关重要。因此学者们针对连续型 SBH 进行了理论建模方法的探索,以通过求解其控制方程的解析解探讨 SBH 底层吸声逻辑。由于连续型 SBH 缺乏直观性,针对其理论建模的研究屈指可数。在 Mironov 和 Guasch 分别给出 1 次和 2 次情况下连续 SBH 控制方程后,Bednarik 将 SBH 的管道形式拓展至图 11(a)所示的矩形,并利用合流 Heun 函数,推导了这一类特殊的连续型 SBH 在衰减幂律为 2 次情况下控制方程的解析解,并随后研究了这种 SBH 的吸声原理。

但正如被动式减振型 ABH 在优化设计中所展现的性能 1 样,SBH 的衰减幂律不应只局限于 1 次或者 2 次,而是可以设计成具有类似 VBH 的高幂定律。然而由于变系数控制方程难以求解的问题,高幂次下的连续型 SBH 缺乏解析建模方法,导致这种情况下声学特性的变化也没能得到有效的探索。同时,近似解也是研究连续型 SBH 的重要途径。Hollkamp 等[23]建立分数阶数学模型将连续型 SBH 等效处理并推导了反射系数的近似解表达式。Červenka 等将控制方程转化为 Riccati 一阶非线性方程,该方法能够快速求解 SBH 的整体反射系数但忽略了其内部声场的信息。在最新的研究中,Deng 等通过高斯展开法拟合获得连续型 SBH 的近似解,这种近似方法也被应用于研究如图 11(b)所示的 SBH 周期结构的带隙特性。Chen 等用贝塞尔方程描述 SBH,并用汉克尔函数表示其结果,预测 SBH 末端附近的局部波数并分析其声学性能,该函数的解对不同幂律具有通用性。可以发现,关于连续型 SBH 内部压场的控制方程及其解析解的研究对其吸声机制及吸声性能有重要作用,该类理论,包括针对高幂次下连续型 SBH 的理论建模方法,有待进一步探索。



（a）矩形管道SBH　　（b）周期性SBH

图 11　SBH 解析法应用

在上述理论建模研究中,学者们对传递矩阵法进行了优化与针对性改进,并拓展了解析方法对不同构型与幂律的适用性。此外,有限元法被广泛用作检验理论模型准确性的基准手段,通过数值求解全波方程并对比反射与吸声曲线,验证传递矩阵法和各类解析解的适用边界与精度,同时也可弥补解析模型难以处理的复杂几何与损耗机制的不足。这些研究推动了 SBH 的性能优化与应用,具有一定的现实意义。

3　声学黑洞研究的主要方向

声学黑洞的几何结构相对简单,容易与机械构件及系统进行融合,因此近年来逐渐涌现出极具应用目的的研究,以与机械结构相结合实现其现实应用价值。尤其在减振、降噪、能量回收以及波动控制等领域引起了学术界的极大兴趣,如图 12 所示,已成为目前声学黑洞研究的主要方向。



图 12　声学黑洞研究的主要方向

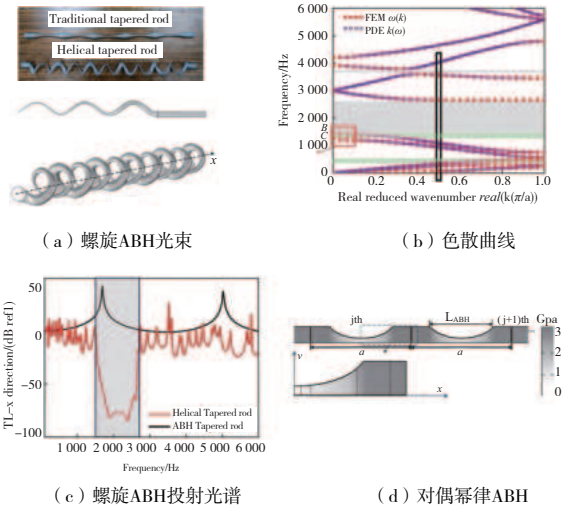
3.1　减振

振动抑制是 ABH 研究的重要方面,主要是对 VBH 的结构优化。基于 ABH 的传统结构存在两个常见的缺陷。一方面,在加工制造方面,结构厚度越薄,则结构强度越低。另一方面,当入射弹性波的波长超过 ABH 长度时,即在低频范围内,ABH 效应失效。为解决上述问题,学者们展开了大量研究,ABH 的结构设计及优化在近年来也得到了快速发展。

一些新颖的结构设计专注于解决极薄 ABH 厚度带来的制造难题。例如 Bao 等提出螺旋

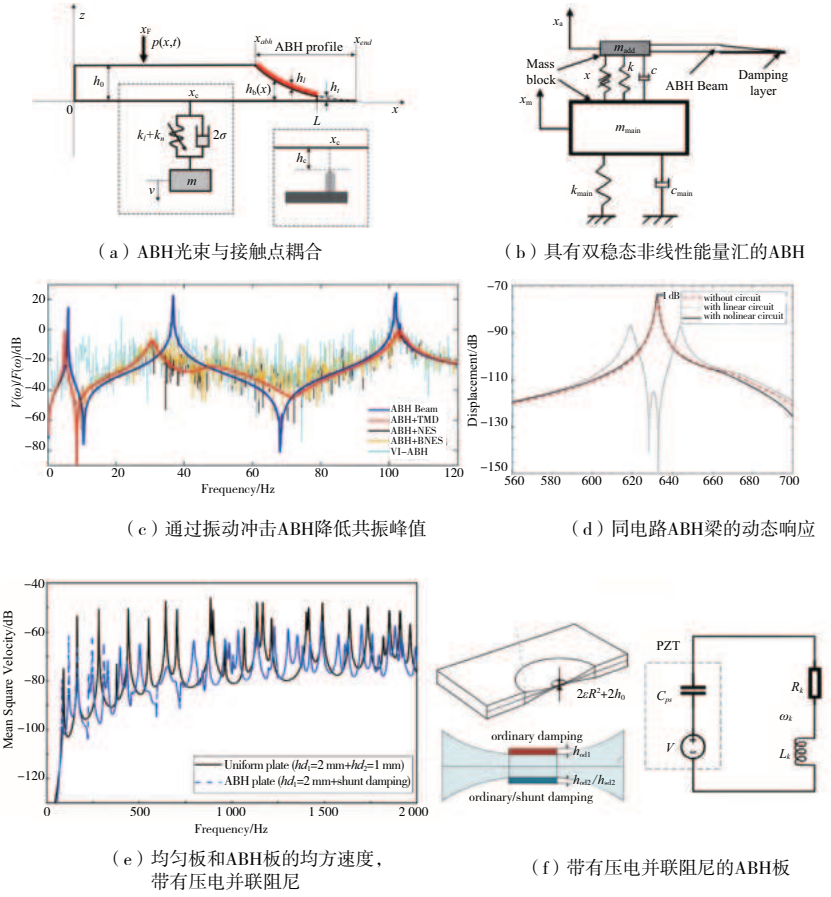
ABH 周期结构,如图 13(a)所示。与传统的锥形 ABH 棒相比,螺旋结构压缩了 ABH 区域的长度,并将弯曲波模转化为多种复杂模态,在低频段实现了卓越的振动抑制效果。对能带结构和振动传输的分析表明,该超结构具有多个单向带隙和宽全带隙,这些都是局部共振和布拉格散射的综合效应的结果,如图 13(b)和图 13(c)所示。Zheng 等[24]提出通过用孔隙度替代厚度幂律变异,构建一维和二维多孔 ABH 结构,如图 13(d)所示,实现了波聚焦和零反射。

通过安装共振器或阻尼器等额外元件也是有效提升结构减振性的方法之一。Li 等[25]将双稳态非线性能量汇(BNES)附着在 ABH 束的边缘,如图 14(a)、图 14(b)所示。结果表明该系统实现了目标能量传递,并展现出宽带减振性能,如图 14(c)所示。Zhang 等[26]在 ABH 束中加入压电并联阻尼,在第一个共振峰实现显著衰减,为 ABH 束的低频振动控制提供了一种新方法。研究表明,由于系统的非线性,振动能量可以从低频范围转移到高频范围,然后通过薄阻尼层高效耗散,如图 14(d)所示。Wan 等[27]利用压电分流阻尼降低 ABH 板的共振峰,如图 14(e)、图 14(f)所示。



(a)螺旋ABH光束　(b)色散曲线　(c)螺旋ABH投射光谱　(d)对偶幂律ABH

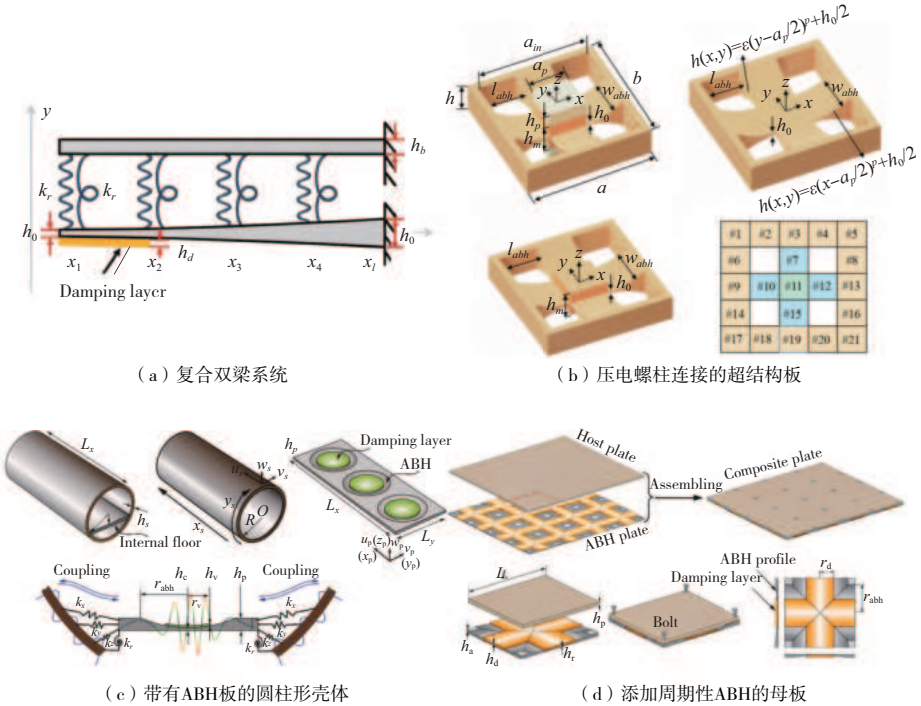
图 13　声学黑洞减振结构



(a)ABH光束与接触点耦合　(b)具有双稳态非线性能量汇的ABH　(c)通过振动冲击ABH降低共振峰值　(d)同电路ABH梁的动态响应　(e)均匀板和ABH板的均方速度,带有压电并联阻尼　(f)带有压电并联阻尼的ABH板

图 14　通过额外阻尼提高减振性能的研究

此外,构建复合结构也是实现 VBH 能量耗散与宽带振动抑制的重要优化方式。复合设计有利于实现结构强度与振动控制性能之间的平衡。其中包括结构本身的复合连接,例如,在双梁系统中,主梁提供承重支撑,而连接梁则用于减少振动或收割能量。Sheng 等[28]提出通过平移弹簧和旋转弹簧连接 ABH 梁来实现 ABH 双梁结构,如图 15(a)所示。研究表明,该方式相比传统均匀双梁系统具有更高的阻尼比,从而实现高效的能量耗散。Gao 等[29]提出了一种新型穿孔超结构板。单元格包含一个框架和 4 束 ABH 梁,通过压电螺柱相互连接,如图 15(b)所示。结果表明在低频段形成更宽的完整带隙和更强的准直效应。将 ABH 板与其他结构元件整合也具有同样的功效,例如 Deng 等[30]研究了带有三次 ABH 凹槽的内部底板的圆柱形壳体结构,以减少来自圆柱形壳体的振动和声波辐射,如图 15(c)所示。此外,通过将周期性添加 ABH 板附着到均匀板上,如图 15(d)所示,复合结构显示当局部模态激活时模态损失因子增加,因为局部振动能量被 ABH 板上的阻尼层有效耗散。复合 ABH 板丰富了 ABH 构型设计,并提供了增强的多向波控能力,在工程领域应用中具有良好的可控性。



(a) 复合双梁系统　(b) 压电螺柱连接的超结构板

(c) 带有ABH板的圆柱形壳体　(d) 添加周期性ABH的母板

图 15　声学黑洞复合结构形式

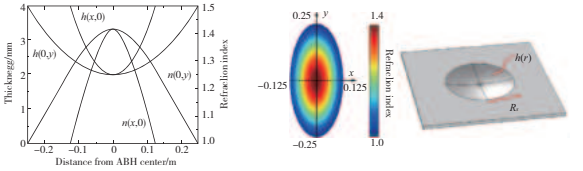
3.2　波动控制

声学黑洞对弹性波的操控多集中于二维薄板结构,其圆形构型实现弯曲波聚焦与透镜效应的物理本质在于径向波速的连续降低。相关数值模拟通过在嵌有二维圆形黑洞的平板上施加线源激发兰姆波,揭示了上述聚焦现象,该透镜及聚焦效应随后也在实验中得到验证。

声学黑洞的波动控制通过声子晶体(PC)实现,这些晶体由 ABH 在板上的周期分布组成。已有研究表明,声学黑洞 PC 能够表现出超材料典型的特殊性质,如频带间隙、波准直和负折射等。负折射是 ABH 聚光器聚焦效应的核心,由于折射率不仅取决于材料性质,还取决于结构厚度,因此 ABH 可以实现折射率的平滑变化。然而,等频轮廓分析表明,聚焦只能在某些较窄的频段发生,这些频段接近或在超声波范围内。为了在较低频率的板中实现波聚焦,针对各项弯曲波聚集的相关理论及方法的研究就此展开。

Yan 等[31]最早对一维声学黑洞进行研究,并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。Georgiev 等[32]建立了波束行为分析方法,制作了椭圆二维声学黑洞板并进行实验,探究了椭圆焦点与波产生位置及聚集区域的关系。后续工作中,Deng 等[33]设计了一种椭圆声学黑洞,将其用作平板弯曲波的可调谐聚焦透镜。研究结果表明,椭圆黑洞的中心厚度、

幂律阶次以及偏心距等参数均对弯曲波的汇聚行为产生显著影响。进一步研究还发现,将多个椭圆声学黑洞沿一维排列,可将弯曲波能量有效引导并集中至远离透镜区域,如图 16(a)所示。Climente 等[34]为克服 ABH 板厚度限制,提出了一种基于不同于 ABH 厚度轮廓的结构吕讷堡透镜,如图 16(b)所示,并通过数值模拟证明了其弯曲波聚焦特性。Zhao 等[35]为扩展吕讷堡透镜对弯曲波的聚集范围,提出一种通用公式,并利用解析、数值等方法探究了结构的弯曲波聚焦和准直特性。Zhu 等[36]通过改变加工锥度实现不均匀的 ABH 薄板制造以调整宿主结构的动态特性,并发现此方法几乎可以将任何薄波导转变为具有严格控制波传播特性的超材料。此后,更有人对锥形单元的设计与声学透镜的类型进行了探索,通过将透镜嵌入结构波导,实现非凡的声聚集效果。



(a) EABH厚度和折射率沿主轴和次轴的变化及透镜的尺寸与折射率分布　(b) 一种圆形弯曲透镜的示意图,该透镜半径为R_s,具有随径向变化的厚度$h(r)$,以达到所需的折射率$n(r)$

图 16　声学黑洞波束行为分析

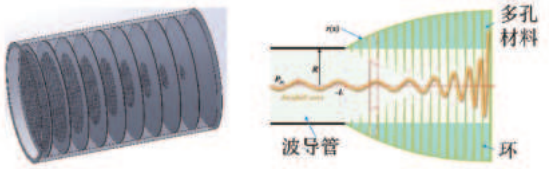
声学黑洞对弯曲波的调控展现了多种非常规的色散和波传播特性,声学黑洞与其他机制的融合实现了对波传播路径、频带选择乃至传输方向的多维度调控,催生出可调透镜、非互易传输、涡旋波生成等新功能。声学黑洞推动了波动调控理念向物理实现的进程,更促进了波动调控由窄带共振依赖型向宽带慢波操控型的范式转变。

3.3　降噪

声学黑洞在降噪方面的研究主要针对声波黑洞 SBH,并沿吸声与隔声两条路径展开。自离散型 SBH 的建模方法建立以来,其吸声特性率先获得了系统探索,此后学者更发现 SBH 在隔声方面同样展现出应用潜力,前者的研究为后者提供了一定的优化思路,二者皆取得了一定的进展。

1) 吸声

自 Guasch 推出传递矩阵法之后,离散型 SBH 受到了高度关注,其吸声性能也获得了丰富的研究。其中,离散型 SBH 的慢波效应已在多项仿真和实验的研究中被证实,这表明环数有限的情况下 SBH 依然能将声波有效地聚集起来。但从前期的研究结果来看,离散型 SBH 并不能很好地吸收中低频声波。事实上,这是由于 SBH 中空气阻尼不足所造成的。且已有研究表明,SBH 的阻尼大小与相邻环的间距密切相关,且间距越小则系统的阻尼越高。Zhang 等[37]也指出了空气阻尼过弱从而导致了 SBH 吸声不足,因此在其工作中将一块高阻性的锥形微穿孔板作为 SBH 环的内衬,从而实现了中高频的宽带吸声。Yu 等[38]也通过复频率平面分析方法证明了提升阻尼能有效改善 SBH 中频失效的问题。自此,将阻性材料融入 SBH 的方法被广泛提及。例如 Chen 等[39]将串联式微穿孔板与 SBH 相结合,使吸声的截止频率大幅降低,有效地拓宽了吸声频带,如图 17 所示。此后,功能梯度材料的思想也被引入至声学黑洞的结构设计中,即将串联微穿孔板的参数进行梯度变化,从而实现中高频段的高吸收[40]。Yang 等[41]研究了一款截面扩张的 SBH 结构,并将多孔材料填充入扩张腔中也实现了宽带吸收,如图 17(b)所示。近期,更有多项研究通过增设微穿孔板与多孔材料,二者协同作用以进一步拓宽 SBH 的吸声带宽[42]。上述研究均证明了在 SBH 中增加高阻性的声学元件能够有效提高系统阻尼,从而实现宽带吸声。

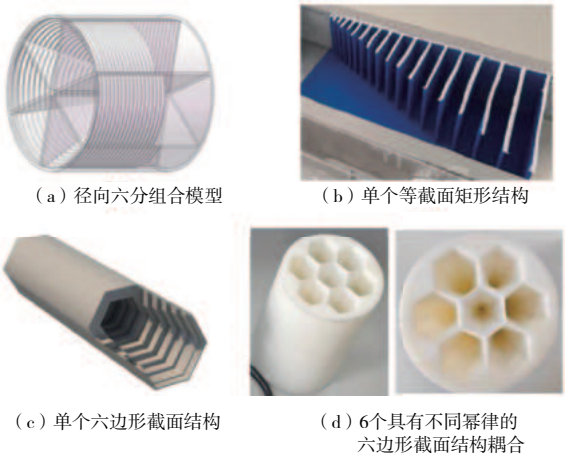


(a) 串联式微穿孔板与SBH结合　(b) 遵循梯度变化的串联式微穿孔板

图 17　离散型 SBH 宽带吸声研究

此外,为了进一步提高 SBH 的宽带吸声性能,并联设计的思想也被融入到其中。这种设计思想广泛应用于声学超材料的研究中,其通过并联具有不同吸声带的结构以实现宽带吸收。Peng 等[43]将 SBH 沿周向分为 1/6 模型,如图 18(a)所示,并通过参数组合使得每个子结构的吸声频谱相互叠加,最终实现了 502 Hz 以上的高吸收。Yu 等[44]研究了一款截断式 SBH 的吸声频谱,并通过将 4 个等截面的 SBH,如图 18(b)所示,并联实现了 250 ~ 1 600 Hz 内平均吸声系数达 0.72。此外,Li 等[45]将 SBH 的截面形式拓宽到六边形,同时将 6 个具有不同幂律的结构耦合,并通过阻抗管测试证实了其宽带吸声性能,如图 18(c)和图 18(d)所示。可以看到这种截面形式更有利于

结构的平面展开和并联。



（a）径向六分组合模型　（b）单个等截面矩形结构

（c）单个六边形截面结构　（d）6个具有不同幂律的六边形截面结构耦合

图 18　并联 SBH 宽带吸声研究

上述研究充分证明了 SBH 具有宽带能力,但实际上在有限长度下其低频吸声上仍表现出不足,需要增加结构长度并插入足够多的环,但这又会给制造和应用带来困难。从这一角度来说,上述分析的 SBH 更像是一种性能良好的中高频宽带吸声器。为了提高低频性能,Bezancon 等[46]尝试将 SBH 前端的环均设置为等内径的配置,从而利用周期环腔的思想控制低频声波。但这种设计却破坏了 SBH 原有的中高频吸声性能。为了改善这种现象,后有学者们通过在环腔中设置众多肋板,如图 19所示,利用折叠思想以达到延长声波在环腔中的传递路径,从而在低频处创造了一个吸收峰。此外,还有学者将声学黑洞与迷宫、亥姆霍兹共振器及其他超材料进行耦合以增加额外低频吸收峰,这类设计的核心思想在于将低频吸收机制融入 SBH 结构中,为后续研究提供了深入探索的方向。

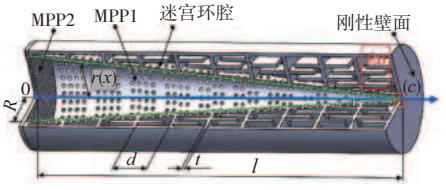
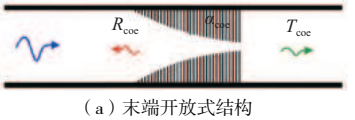


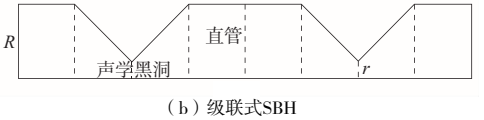
图 19　环腔中设置众多肋板的 SBH 结构

2）隔声

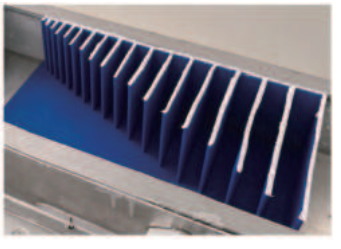
与吸声类似,隔声在降噪工程中的应用也非常广泛。在 Mi 等首次研究了如图 20(a)中末端开放式结构的声透射性能后,SBH 的概念也被引入到隔声领域。通过在声学黑洞末端开口以应对需要通风的环境,尽管如图 20(a)所示的末端开口较小,但这种设计概念仍为拓展 SBH 的应用提供了新可能。并且,随后 Li 等[47]通过有限元法与实验证实了在末端开放的情况下 SBH 具有慢波效应。这一发现也推动了 SBH 隔声性能方面的研究。与吸声方面所展现的性能类似,SBH 在隔声上也存在中低频隔声失效的缺陷。相关研究中,以周期排列的 SBH 结构首先引起重视。Mi 等将对称式 SBH 沿轴向周期排列,利用周期结构特有的 Bragg 效应在低频处创造一个阻波带隙,从而实现了宽带隔声。利用这一思想,方媛媛等[48]开发了一款如图 20(b)所示的级联式 SBH,研究并展示了这种周期结构的高隔声特性。此外,迷宫结构也被应用到该类研究中,这类方法与前文中描述的 SBH 低频吸声改进方法类似,均是利用额外的低频机制以提高 SBH 吸隔声性能。Cao 等[49]在环腔中设置扰流柱增加了声学介质在其中的流动复杂性。Bikmukhametov 等[50]研究了一款矩形截面的 SBH 隔声性能并通过风机测试,如图 20(c)所示,并测试发现该型 SBH 在流速降低 25%的情况下实现了 1 000~2 850 Hz 范围内的宽带隔声。Liang 等[51]将末端的开口面积扩大至 SBH 总面积的7.84%,并最终通过优化 SBH 内表面最终获得了 550 Hz 以上的宽带隔声。



（a）末端开放式结构



（b）级联式SBH

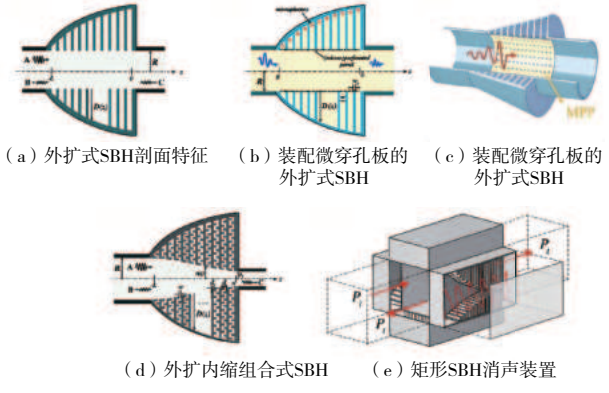


（c）矩形截面的SBH

图 20　隔声功能声学黑洞的形式研究

可以发现,上述结构均保持了 SBH 原有的设计特点,即剖面沿幂律进行衰减。尽管这类结构在隔声方面表现出良好的宽带性能,但其大幅削弱了结构的通风性能。为了应对通风要求更高的场景,如消声器等,Bravo 等[52]将原有的环内径衰

减,转换为环的外径向外扩张,形成了如图 21(a)所示的外扩式 SBH 结构。研究证明了当末端最大环的外径与内径之比趋于无穷时,声波在进入外扩式 SBH 后也会产生无法逃逸的现象。此后,Maury 等[53]在外扩式 SBH 和中部管道之间增设了一块微穿孔板以改善系统的阻尼,实现了其高频范围的宽带隔声。这类结构的慢波效应也在后续的研究中被量化,如图 21(b)和图 21(c)所示,然而其仅可实现高频下的有效隔声。为了改善中低频性能的不足,Bravo 等[54]将外扩式与内缩式剖面相结合,并将外侧环腔中增设肋板以延长其深度,如图 21(d)所示。此外,Lee 等[55]将 4 个矩形 SBH 安装在一个方形管道的侧边,并开设通孔联通 SBH 与管道中部,结构如图 21(e)所示,然而同时不利于 SBH 中高频性能的体现。彩虹陷阱效应为这一问题提供了创新解决方案,Chen 等[56]通过将彩虹捕捉结构与多孔材料耦合,实现了 257 Hz 以上超过 10 dB 声音传输损耗。风扇噪声的宽带降噪在工程应用中是持续的挑战,这类研究工作为风管和风扇噪声控制应用提供了极具前景的解决方法,为声学黑洞在通风工况下的可行性降噪研究提供了坚实的实验支撑。



(a)外扩式SBH剖面特征　(b)装配微穿孔板的外扩式SBH　(c)装配微穿孔板的外扩式SBH

(d)外扩内缩组合式SBH　(e)矩形SBH消声装置

图 21　通风功能声学黑洞的形式研究

3.4　能量回收

鉴于 ABH 具有强烈能量集中的潜力,且大部分研究旨在利用其特性耗散能量以减少反射,然而有学者提出对这些能量进行收集而非压制。Zhao 等[57]最初提出能量回收的想法,并基于 ABH 概念展开了关于动态定制结构能量收集性能的实验研究。结果证实:动态调节会与激发输入的性质无关地大幅增加所收集能量。此后又提出利用嵌入声学黑洞(ABH)来调整宿主结构的动力学,通过在束流上嵌入 5 个 ABH 凹槽及对应 5 个单晶压电层以实现能量收集。此后相关研究围绕压电片展开,包括其划分形式及分布位置等。Ji 等[58]将压电片划分为微阵列形式以避免在单个压电贴片覆盖的区域内产生振动的最大值和最小值。Piñeirua 等[59]聚焦于压电电极沿板表面排列对系统能量收集效率的影响,并推导出了一个具有离散压电片段数量的轴向流动板的弱非线性模型,并通过实验进行了验证。Deng 等[60]提出了 GEM 理论,以解决通过 ABH 压电双态悬臂实现能量收集的耦合机电问题,后对该模型进行扩展并提出半解析 GEM 模型表征了 ABH 双晶悬臂中能量收集的特性。

作为一个新兴且极具潜力的交叉研究方向,声学黑洞在能量回收领域的原理主要是通过压电或电磁换能元件将其转化为电能,当前面临着回收元件对声学黑洞效应自身的反作用机制尚未明确的问题。目前相关研究集中于探索理论分析方法以探究换能过程引起的机电耦合与附加阻尼对声学黑洞的聚波效应的影响。同时,如何从结构设计与能量回收系统匹配的角度出发,协同优化几何参数、换能器布局与电路拓扑,以提升宽带范围内的能量转化效率等,也是展开更深入研究及推进该技术进步的关键方向。

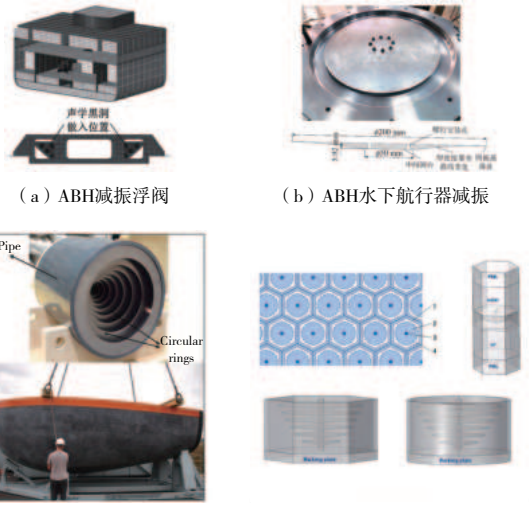
4　声学黑洞的应用前景

基于上述 ABH 结构特性及现有研究,如结构振动抑制、波动控制、噪声控制或能量收集等,可以看到声学黑洞在这些方面展现出了极大潜力与价值,且关于其应用探究与革新的研究近年来持续增加,相关拓展有望投入到工业领域的实践与设计中。但同时也因 SBH 的研究起步较晚,目前声学黑洞的工程应用主要集中在被动式的减振 ABH 上。大量的研究均已证明:ABH 在航空航天、船舶工程、旋转机械以及交通运载等领域具备优异的减振能力。此外,ABH 放大弯曲波振幅以及能量聚集的特性也被学者用于研发新型医疗器件与生物传感器。尽管如此,除了其优异的性能以外,与传统的振动和降噪技术相比,ABH 还具有结构简单易实现的优点,且符合轻量化设计标准,因此在未来的不断探索与研究下,将具有广泛的应用前景与拓展方向。

4.1　交通运输与家用电器

在船舶工程领域,赵楠等[61]将提出了分布式 ABH 减振浮阀结构,如图 22(a)所示,能够有效降低低频振动以及舱室内的噪声。马锐磊等[62]设

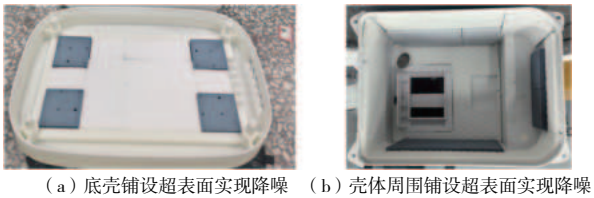
计了一种图 22(b)所示的 ABH 附属结构并应用于水下航行器声纳的减振中。同时,在一些研究中 ABH 也被用于降低汽车发动机舱盖、涡轮叶片以及管道系统的振动与噪声水平。SBH 在水下应用也有相关探索,Wei 等[63]将 SBH 用于改善船舶声纳平台的声场分布,在被动与主动探测模式下分别实现了 27 dB 与 35 dB 的隔声量,显著降低了声纳平台的背景噪声,如图 22(c)所示。Zhang 等[64]设计了一款水下 SBH 超薄涂层,并在 4.5 MPa 的静压下仍能在 500 Hz 处实现近完美吸声,如图 22(d)所示。



(a) ABH减振浮阀　(b) ABH水下航行器减振　(c) 船首声纳平台ABH隔振　(d) 水下六边形排列超薄涂层

图 22　船舶工程领域声学黑洞的应用研究

此外,相较于航空航天与水上交通等对结构承载有严格要求的场景,声学黑洞的特性也极适配小型系统的吸隔声,如家用电器降噪系统更关注紧凑性、成本可控性与中低频降噪的实际效能,这恰为声学黑洞的工程落地提供了差异化的切入点。目前,已有相关研究在该领域有效落实,Fu 等对制氧机关键点位测得噪声的特征频率和特性进行了分析,在此基础上确定噪声源并设计了声学黑洞降噪结构,通过在壳体添加所设计的声学超材料及铺设吸音材料实现了对目标频段噪声的有效抑制,如图 23(a)和图 23(b)所示。



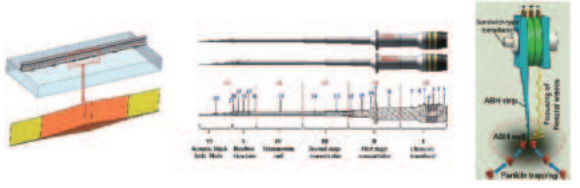
(a) 底壳铺设超表面实现降噪　(b) 壳体周围铺设超表面实现降噪

图 23　家电领域声学黑洞的应用研究

4.2　能量与生物医学

ABH 聚集弯曲波能量的特性也被用于能量回收器件的开发中。例如,Xiao 等[65]以及杨等在轨道底部设置 ABH 吸振器,并在结构末端贴敷压电片,如图 24(a)所示,该型结构具有较高的能量收集效率。

弯曲波在 ABH 区域振幅会被放大的特性也被用于超声器件的开发。Chen 等[66]利用 ABH 放大振幅的特性开发了一款超声手术刀,如图 24(b)所示。相较于传统超声刀,尖端位移提高了 425%,并且通过离体组织实验证明了其优异的切割效率。Liu 等[67]分别基于 ABH 梁和板开发了超声镊,如图 24(c)所示,实现了毫米级颗粒的稳定捕获。另外,ABH 结构在微流控平台中实现了液滴内颗粒的高通量操控,有望应用于开发新型生物传感器。



(a) 轨道振动能量收集装置　(b) ABH超声手术刀　(c) ABH超声镊

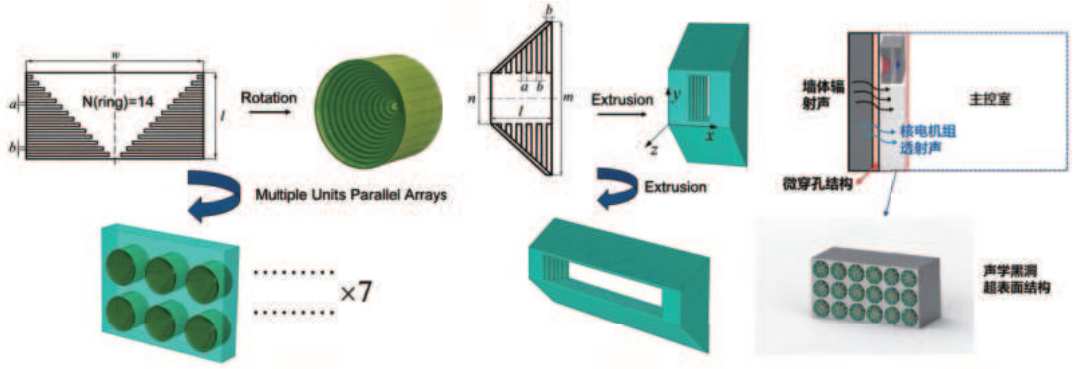
图 24　能量回收领域声学黑洞的应用研究

此外,SBH 同样具有放大声波的效果。但与振动黑洞不同的是,SBH 是通过侧支的环腔将入射声波放大的。利用这一特点,Zhou 等[68]在环腔侧壁设置传声器以测量所捕获的微弱声波,并在随后的研究中通过迷宫环腔进一步增强其声压放大的功能。该项研究也借鉴了此前的梯度超材料的设计,并有望应用于旋转机械故障诊断的声学信号的提取。此外,SBH 在声能回收领域也有初步的探索。例如借助 SBH 能够聚集声能的特点,在 SBH 尾部开口位置贴合压电装置,从而实现噪声能量的回收。

4.3　室内与建筑声学

随着对舒适性与环境的追求越来越高,现代建筑暖通系统已不仅仅满足通风要求,也需满足降噪条件。Li 等[69]将 SBH 集成于双层通风窗中,测试发现在 2 500~4 000 Hz 频段内降噪量提升 5~8 dB,如图 25(a)和图 25(b)所示。传统阻性消声器依赖厚层吸声棉,低频效果差且占用空间大;抗性消声器则受窄带共振限制。在室内降噪中,Fu 等将针对核电主控室噪声特性及分布特

征,基于声学黑洞的空间噪声治理技术进行了降噪处理,达成了4.8~7 dB(A)的综合降噪效果,实现了声学黑洞降噪技术的首次工程应用,如图25(c)所示。此外,SBH在近期的一项研究中用于吸收飞机起落架产生的宽带噪声。Hou等[70]将SBH嵌入起落架的轮毂空腔中,研究发现安装SBH后噪声降低约3.8 dB。



(a)多单元组合形成SBH吸收面板　(b)用于隔音的三维矩形单元　(c)用于核电站主控室降噪的声学黑洞超表面

图25　室内与建筑领域声学黑洞的应用研究

5　结语

本文围绕声学黑洞的吸声机制、理论模型、研究进展及应用前景进行了系统综述。从总体脉络来看,声学黑洞技术已从早期的概念探索逐步发展为涵盖VBH与SBH两大分支、贯通理论与应用的多层次研究体系,形成了较为清晰的学科演进路径。

具体而言,在吸声机制方面,VBH遵循"慢波—汇聚—耗散"的三阶段逻辑;SBH的吸声机制则更为复杂,其性能源于慢波效应与环间空腔共振吸收的协同作用,且更深入的机制研究仍在进行。理论建模方面,VBH已发展出从WKB几何声学近似到广义超几何函数精确解、高斯展开半解析法及有限元法的多层次求解工具;SBH则以传递矩阵法(TMM)为主流方法,而合流Heun函数、贝塞尔函数等特殊函数近年来逐渐成为连续型SBH的理论分析方法。在研究与优化方向上,微穿孔板、多孔材料及亥姆霍兹共振器等与ABH的耦合可有效改善中低频宽带吸声性能,是ABH结构优化的一大重点,相关应用也已从减振吸声拓展至波动调控、能量回收等前沿领域。

尽管声学黑洞在理论建模、结构优化和应用探索方面取得了长足进步,但要实现其在航空航天、船舶工程及轨道交通等高端装备中的工程化应用,仍有多项关键瓶颈亟待突破。在理论层面,力-声-热多物理场耦合、非线性阻尼机制及高速气流环境下的性能退化规律尚缺乏系统认识,亟需发展高精度多场耦合模型与实验验证方法。在性能层面,如何在保持结构紧凑性的前提下进一步提升低频宽带吸声能力,仍是核心难点,拓扑优化、机器学习辅助逆向设计及非线性超材料调控有望提供新的突破路径。同时,将ABH与智能材料融合以构建可调谐自适应系统,以及建立涵盖设计、制造、测试与评价的全链条技术标准体系,将是推动ABH技术走向工程化和产业化的关键方向。

综上所述,声学黑洞技术正处于从基础研究向工程应用过渡的关键阶段,未来研究应在理论方法的基础上,寻求方法的创新与技术的突破,走向生产制造与集成化应用,为高端设备与工业环境提供可靠性、落地性兼备的技术方案。

参考文献:

[1] Krylov V V. Propagation of plate bending waves in the vicinity of one-and two-dimensional acoustic 'black holes' [C]. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering,2007.

[2] Sheng H, He M X, Ding Q. Vibration control and multifunctional design based the acoustic black hole structure:a state-of-the-art review[J]. International Journal of Dynamics and Control,2025,13(1):25.

[3] Mironov M A,Pislyakov V V. One-dimensional acoustic waves in retarding structures with propagation velocity tending to zero[J]. Acoustical Physics,2002,48(3):347-352.

[4] Krylov V V,Tilman F J B S. Acoustic 'black holes' for flexural waves as effective vibration dampers[J]. Journal

of Sound and Vibration,2004,274(3/4/5):605-619.

[5] Krylov V V,Winward R E T B. Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,300(1/2):43-49.

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

[7] Červenka M, Bednařík M. Optimal shaping of acoustic black holes for sound absorption in air[J]. Acta Acustica,2024,8:21.

[8] Deng J,Guasch O,Ghilardi D. Solution and analysis of a continuum model of sonic black hole for duct terminations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024,129:191-206.

[9] Mi Y Z, Cheng L, Zhai W, et al. Broadband low-frequency sound attenuation in duct with embedded periodic sonic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration,2022,536:117138.

[10] Mousavi A,Berggren M,Wadbro E. How the waveguide acoustic black hole works:A study of possible damping mechanisms[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2022,151(6):4279-4290.

[11] Červenka M,Bednařík M. On the role of resonance and thermoviscous losses in an implementation of "acoustic black hole" for sound absorption in air[J]. Wave Motion,2022,114:103039.

[12] Zhang X Q,He N W,Cheng L,et al. Sound absorption in sonic black holes: wave retarding effect with broadband cavity resonance[J]. Applied Acoustics, 2024,221:110007.

[13] Hruška V,Groby J P,Bednařík M. Complex frequency analysis and source of losses in rectangular sonic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 571:118107.

[14] Su L,Chen J W,He X Y,et al. The acoustic streaming effects of sonic black hole[J]. Modern Physics Letters B,2022,36(20):2250079.

[15] Chen Y W, Yu K F, Fu Q D, et al. Modeling and analytical solution of an ideal continuum sonic black hole[J]. Applied Mathematical Modelling, 2025, 141:115903.

[16] Lee J Y, Jeon W. Exact solution of Euler-Bernoulli equation for acoustic black holes via generalized hypergeometric differential equation[J]. Journal of Sound and Vibration,2019,452:191-204.

[17] Ma L, Zhang S, Cheng L. A 2D Daubechies wavelet model on the vibration of rectangular plates containing strip indentations with a parabolic thickness profile[J]. Journal of Sound and Vibration,2018,429:130-146.

[18] Deng J,Guasch O,Maxit L,et al. Sound radiation and non-negative intensity of a metaplate consisting of an acoustic black hole plus local resonators[J]. Composite Structures,2023,304:116423.

[19] Tang L L,Cheng L. Impaired sound radiation in plates with periodic tunneled Acoustic Black Holes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135:106410.

[20] Ji H L,Wang X D,Qiu J H,et al. Noise reduction inside a cavity coupled to a flexible plate with embedded 2-D acoustic black holes[J]. Journal of Sound and Vibration,2019,455:324-338.

[21] Du X F,Huang D C,Fu Q D,et al. Effects of acoustic black hole parameters and damping layer on sound insulation performance of ABH circular plate[J]. Applied Sciences,2019,9(24):5366.

[22] Guasch O, Arnela M, Sánchez-Martín P. Transfer matrices to characterize linear and quadratic acoustic black holes in duct terminations[J]. Journal of Sound and Vibration,2017,395:65-79.

[23] Hollkamp J P,Semperlotti F. Application of fractional order operators to the simulation of ducts with acoustic black hole terminations[J]. Journal of Sound and Vibration,2020,465:115035.

[24] Zheng W G, He S M, Tang R J, et al. Damping enhancement using axially functionally graded porous structure based on acoustic black hole effect[J]. Materials,2019,12(15):2480.

[25] Li H Q,Touzé C,Pelat A,et al. Combining nonlinear vibration absorbers and the Acoustic Black Hole for passive broadband flexural vibration mitigation[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,2021, 129:103558.

[26] Zhang L L,Kerschen G,Cheng L. Nonlinear features and energy transfer in an Acoustic Black Hole beam through intentional electromechanical coupling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 177:109244.

[27] Wan Z W,Zhu X,Li T Y,et al. A method for improving wave suppression ability of acoustic black hole plate in low-frequency range[J]. Thin-Walled Structures, 2023,182:110327.

[28] Sheng H,He M X,Ding Q. The exact spectral element modeling and vibration analysis of the acoustic black hole double-beam system[J]. Journal of Vibration and Control,2024,30(11/12):2386-2401.

[29] Gao W L, Hu J X, Qin Z Y, et al. Flexural wave manipulation in perforated metamaterial plates with acoustic black holes interconnected by piezoelectric

studs[J]. Composite Structures,2023,321:117224.

[30] Deng J, Gao N S, Tang L L, et al. Vibroacoustic mitigation for a cylindrical shell coupling with an acoustic black hole plate using Gaussian expansion component mode synthesis[J]. Composite Structures, 2022,298:116002.

[31] Yan S L, Lomonosov A M, Shen Z H. Numerical and experimental study of Lamb wave propagation in a two-dimensional acoustic black hole[J]. Journal of Applied Physics,2016,119(21):214902.

[32] Georgiev V B, Cuenca J, Gautier F, et al. Damping of structural vibrations in beams and elliptical plates using the acoustic black hole effect[J]. Journal of Sound and Vibration,2011,330(11):2497-2508.

[33] Deng J, Zheng L, Guasch O. Elliptical acoustic black holes for flexural wave lensing in plates[J]. Applied Acoustics,2021,174:107744.

[34] Climente A, Torrent D, Sánchez-Dehesa J. Gradient index lenses for flexural waves based on thickness variations [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(6):064101.

[35] Zhao L X, Lai C Q, Yu M. Modified structural Luneburg lens for broadband focusing and collimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144:106868.

[36] Zhu H F, Semperlotti F. Phononic thin plates with embedded acoustic black holes[J]. Physical Review B, 2015,91(10):104304.

[37] Zhang X Q, Cheng L. Broadband and low frequency sound absorption by Sonic black holes with Micro-perforated boundaries [J]. Journal of Sound and Vibration,2021,512:116401.

[38] Yu X, Mi Y Z, Zhai W, et al. Principles of progressive slow-sound and critical coupling condition in broadband sonic black hole absorber[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2023, 154(5): 2988-3003.

[39] Chen Y W, Yu K F, Fu Q D, et al. A broadband and low-frequency sound absorber of sonic black holes with multi-layered micro-perforated panels [J]. Applied Acoustics,2024,217:109817.

[40] Petrover K, Baz A. Acoustic black hole with functionally graded perforated rings [J]. Journal of Applied Physics,2024,135(23):234501.

[41] Yang M Z, Chen C Z, Wei L R, et al. Design and optimization of an enhanced sonic black hole structure for low-frequency broadband sound absorption [J]. Annalen der Physik,2025,537(8):e2500152.

[42] Zhang K D, Yang J S, Chen S J, et al. A synergistic composite sonic black hole metastructure for sub-wavelength broadband sound absorption [J]. Wave Motion,2026,143:103718.

[43] Peng L H, Mao Q B, Wang H, et al. Enhanced sound absorption with the combined sonic black holes [J]. Applied Acoustics,2024,219:109932.

[44] Yu Y H, Huang W C, Xie L X, et al. Broadband sound absorption and slow wave in truncated sonic black hole [J]. Applied Acoustics,2025,235:110677.

[45] Li S L, Zhao J Y, Liu Z H, et al. Coupling effects and optimized design of hexagonal sonic black holes with multiple exponents distribution [J]. Journal of Sound and Vibration,2026,624:119522.

[46] Bezançon G, Lopez M, Doutres O, et al. Low-frequency absorption band in a thin acoustic metamaterial using acoustic black hole termination[J]. Applied Acoustics, 2025,233:110595.

[47] Li S H, Xia J J, Yu X, et al. A sonic black hole structure with perforated boundary for slow wave generation[J]. Journal of Sound and Vibration,2023, 559:117781.

[48] 方媛媛,张文哲,周启涵。级联式黑洞管道结构的声学特性分析 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2025(06):48-54.

[49] Cao M, Chu J M, Liang X, et al. Study on sound insulation performance of sonic black hole with micro-perforated plates[J]. Modern Physics Letters B,2023, 37(28):2350124.

[50] Bikmukhametov F, Glazko L, Muravev I, et al. Ventilated noise-insulating metamaterials inspired by sonic black holes[J]. Applied Acoustics,2025,238:110813.

[51] Liang X, Tang Z Y, Song T J, et al. A low-frequency ultra-broadband ventilated acoustic isolator based on resonant black-hole metamaterials [J]. Physica Scripta,2025,100(8):085963.

[52] Bravo T, Maury C. Broadband sound attenuation and absorption by duct silencers based on the acoustic black hole effect:Simulations and experiments[J]. Journal of Sound and Vibration,2023,561:117825.

[53] Maury C, Bravo T, Amielh M, et al. Acoustic pressure amplification through in-duct sonic black holes [J]. Applied Sciences,2024,14(11):4699.

[54] Bravo T, Maury C. Converging rainbow trapping silencers for broadband sound dissipation in a low-speed ducted flow [J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 589:118524.

(下转第 70 页)

的星载相控阵天线轻量化设计与验证[J]. 电子机械工程,2025,41(02):12-16+40.
[10] 陈晓峰. 雷达卫星重载高精天线机械系统设计技术研究[D]. 上海交通大学,2011.
[11] 张浩阳. 卫星环境试验中主动段组合振动试验系统研究[D]. 南京航空航天大学,2023.
[12] RADSZ. Finite element, modal testing and modal analysis of a radial flow impeller[J]. Iranian Journal of Science $ Technology, Transaction B, Engineering, 2005,29(B2):157-169.
[13] 戴宇航,蒋松,陈金宝等. 大型星载天线桁架式可折展机构的模态分析[J]. 上海航天,2019,36(01):97-101. DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.015
[14] 李健,胡明,孟少华等. 扇形太阳电池阵折展机构模态及谐响应分析[J]. 航天器环境工程,2020,37(05):435-439.
[15] 郭宇,刘邱祖,王旭东. 矿用降尘超声雾化喷嘴模态与谐响应分析[J]. 煤矿安全,2019,50(03):96-98+102.
[16] 宗晓明,张亚楠,杨尚矗等. 导电滑环的随机振动仿真分析研究[J]. 智能制造,2023(06):87-93.
[17] 吴杰,高国强,魏文赋,等. 弓网系统滑动电接触特性[J]. 电压技术,2015,41(11):3635-3641.
[18] 张顺,张金萍,张忠孝. 基于 ANSYS 的功率模块随机振动及热振耦合影响分析[J]. 机械工程师,2023(11):40-42+46.
[19] 关迪,范学领,肖滨等. 某型机载模块的随机振动疲劳分析[J]. 机械强度,2019,41(01):66-71.DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2019.01.012.

收稿日期:2024-04-16

(上接第 16 页)

[55] Lee S S,Jang J Y,Song K. Enhanced acoustic attenuation in a coiled meta-silencer: Broadband low-frequency noise control through rainbow trapping[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2025,222:111744.
[56] Chen Y W,Xu X M,Yu K F,et al. A ventilated silencer based on rainbow trapping structure for broadband noise attenuation[J]. Applied Acoustics,2026,246:111240.
[57] Zhao L X,Conlon S C,Semperlotti F. An experimental study of vibration based energy harvesting in dynamically tailored structures with embedded acoustic black holes[J]. Smart Materials and Structures,2015,24(6):065039.
[58] Ji H L,Liang Y K,Qiu J H,et al. Enhancement of vibration based energy harvesting using compound acoustic black holes[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,132:441-456.
[59] Piñeirua M,Doaré O,Michelin S. Influence and optimization of the electrodes position in a piezoelectric energy harvesting flag[J]. Journal of Sound and Vibration,2015,346:200-215.
[60] Deng J,Guasch O,Zheng L,et al. Semi-analytical model of an acoustic black hole piezoelectric bimorph cantilever for energy harvesting[J]. Journal of Sound and Vibration,2021,494:115790.
[61] 赵楠,王禹,陈林,等. 分布式声学黑洞浮筏系统隔振性能研究[J]. 振动与冲击,2022,41(13):75-80.
[62] 马锐磊,白建斌,刘一鸣,等. 基于声学黑洞的水下航行器承压板减振设计及性能研究[J]. 水下无人系统学报,2023,31(6):934-941.
[63] Wei J J,Zuo Y Y,Wang X Z,et al. Research on the acoustic field characteristics in the sonar platform area based on novel acoustic black hole barrier panels[J]. Ocean Engineering,2026,353:124708.
[64] Zhang Y N,Tong M L,Rui X T,et al. Ultrathin and pressure-resistant meta-coating with embedded tree-shaped acoustic black hole for broadband low-frequency underwater sound absorption[J]. Applied Acoustics,2024,225:110171.
[65] Xiao Y,Zhu H P,Ye K,et al. A piezoelectric acoustic black hole absorber for rail vibration reduction and energy harvesting: Semi-analytical model[J]. Engineering Structures,2025,322:119028.
[66] Chen C,Tang Y F,Ren W B,et al. Acoustic black hole ultrasonic scalpel[J]. Ultrasonics,2024,143:107417.
[67] Liu P Z,Huang H Y,Wang X,et al. Acoustic black hole profiles for high-performance ultrasonic tweezers[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2023,188:109991.
[68] Zhou Z B,Hu N Q,Yang Y,et al. Sonic black hole based metamaterial structure for contactless rotating machinery state sensing enhancement[J]. Measurement,2026,259:119613.
[69] Li Y Z,Li L F,Xiao L,et al. Enhancing ventilation window acoustics with sonic black hole integration: a performance evaluation[J]. Applied Acoustics,2025,229:110388.
[70] Hou Q Z,Guo H,Liu P Q,et al. Landing gear wheel hub-cavity noise passive control using novel sonic black hole[J]. AIAA Journal,2026,64(7):3884-3899.

收稿日期:2026-08-31