

目 录

摘 要.....	IV
ABSTRACT.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 压电能量国内外研究现状.....	3
1.3 声学黑洞国内外研究现状.....	5
1.3.1 声学黑洞结构理论研究.....	5
1.3.2 非完美声学黑洞的能量回收研究.....	7
1.4 存在问题.....	9
1.5 本文研究意义及主要工作安排.....	9
第 2 章 声学黑洞能量聚集特性以及结构优化.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 声学黑洞聚能特性.....	11
2.2.1 一维声学黑洞几何声学理论.....	11
2.2.2 二维声学黑洞几何声学理论.....	13
2.3 声学黑洞结构建模与计算.....	15
2.3.1 仿真建模.....	15
2.3.2 载荷激励.....	17
2.3.3 网格控制.....	18
2.4 声学黑洞传播特性.....	19
2.4.1 时域分析.....	19
2.4.2 频域分析.....	21
2.5 声学黑洞聚能效果优化.....	23
2.5.1 多声学黑洞间隔距离对能量聚集的影响.....	23
2.5.2 多声学黑洞排列对能量聚集的影响.....	25
2.5.3 激励形式对聚能效果的影响.....	27

2.6 本章小结.....	29
第3章 基于声学黑洞效应的能量回收装置	31
3.1 引言.....	31
3.2 压电振动能量回收基本原理	31
3.2.1 压电效应.....	32
3.2.2 机电耦合	33
3.2.3 压电材料.....	34
3.2.4 压电方程.....	35
3.3 声学黑洞的能量回收的建模与设置	36
3.3.1 声学黑洞能量回收装置原理.....	36
3.3.2 模型设计及网格划分.....	39
3.3.3 声学黑洞能量回收频域研究.....	39
3.4 声学黑洞能量回收的结构优化	41
3.4.1 声学黑洞排列情况对能量回收的影响	41
3.4.2 压电片规格对能量回收的影响	42
3.5 本章小结.....	44
第4章 基于声学黑洞声子晶体能量回收特性的研究	46
4.1 引言.....	46
4.2 声子晶体理论.....	46
4.2.1 倒格矢空间.....	46
4.2.2 布里渊区.....	47
4.2.3 声子晶体能带结构.....	48
4.3 有限元计算声学黑洞声子晶体	49
4.3.1 声学黑洞晶胞的几何模型.....	49
4.3.2 声学黑洞晶胞能带结构分析.....	50
4.4 声学黑洞晶胞结构对能带结构的研究	52
4.4.1 声学黑洞中心圆台半径对能带结构的影响	52

4.4.2 声学黑洞截断厚度对能带结构的影响	53
4.4.3 声学黑洞幂指数对能带结构的影响	55
4.5 本章小结.....	56
第 5 章 全文总结与展望	57
5.1 研究工作总结.....	57
5.2 今后工作展望.....	58
参考文献.....	58
致谢.....	67
攻读硕士学位期间主要研究成果	68
贵州师范大学学位论文原创性声明	69
贵州师范大学学位论文使用授权书	69

摘 要

声学黑洞 (Acoustic Black Hole, ABH) 是一种捕获弯曲波 (声波) 的人工结构装置。通过对楔体结构的厚度参数进行裁剪, 使弯曲波的速度在楔体结构的尖端处减小至零, 弯曲波不再发生反射, 从而实现对声能量的聚集和回收。声学黑洞结构具有宽频、易于制作、且适用于不同大小器件的优点, 在聚能、减震、降噪等方面有着很好的应用前景, 已成为声学、力学等领域的研究热点之一。目前, 在聚能方面, 声学黑洞的数量及排列对不同频带的聚能特性, 及其能量回收等方面的研究相对较少。本文首先以嵌入二维声学黑洞的铝薄板结构作为研究对象, 利用有限元数值计算方法, 研究声学黑洞的数量、排列对该结构聚能效果的影响。其次, 建立声学黑洞结构和压电片耦合的能量回收装置, 研究不同声学黑洞和压电片的参数对能量回收传输特性的影响; 最后, 构造声子晶体的声学黑洞结构, 研究该结构的色散关系和能量回收传输特性。

(1) 二维非完美声学黑洞结构的聚能特性。运用几何声学理论和有限元的计算方法, 从时域、频域两方面对比分析嵌入声学黑洞的铝薄板与厚度均匀铝薄板的聚能效果。结果表明, 在特定频率和激励源作用下, 嵌入声学黑洞的铝薄板聚能能力大约是厚度均匀铝薄板的 30 倍。

(2) 设计了四种能量回收装置。通过改变声学黑洞的数量与压

电片的规格设计出四种能量回收装置，并用电功率等指标对四种装置分析评价。结果表明周期性声学黑洞和周期性压电片组成的系统能有效实现对宽频能量的回收。

（3）构造了声子晶体的声学黑洞能量回收装置结构。运用能带理论分析声学黑洞晶胞的能带结构及其能量传输特性。结果表明声学黑洞中心圆台半径、截断厚度以及幂指数参数对声学黑洞晶胞色散关系均有影响。其中，中心圆台半径对色散关系的影响最大。

关键词：声学黑洞；能量回收装置；电功率；能带结构

ABSTRACT

Acoustic Black Hole (ABH) is an artificial structural device for capturing bending waves (sound waves). By tailoring the thickness parameter of the wedge structure, the velocity of the bending wave is reduced to zero at the tip of the wedge structure, and the bending wave is no longer reflected, thus realizing the collection and recovery of acoustic energy. Acoustic black hole structure has the advantages of wide frequency, easy to produce, and applicable to different size devices, in the energy gathering, shock absorption, noise reduction and other aspects has a very good application prospects, has become one of the research hotspots in the field of acoustics, mechanics and other fields. At present, in terms of energy gathering, the number and arrangement of acoustic black holes on different frequency bands of energy gathering characteristics, and its energy recovery and other aspects of the study is relatively small. In this paper, firstly, we take the aluminum thin plate structure embedded with two-dimensional acoustic black holes as the research object, and use the finite element numerical calculation method to study the influence of the number and arrangement of acoustic black holes on the energy gathering effect of the structure. Secondly, an energy recovery device coupled with an acoustic black hole structure and a piezoelectric sheet is established to study the effects of different parameters of acoustic black holes and piezoelectric sheets on the energy recovery and transmission characteristics; finally, an acoustic black hole structure of a phononic crystal is constructed to study the dispersion relation and energy recovery and transmission characteristics of the structure.

(1) Energy-collecting properties of two-dimensional non-perfect

acoustic black hole structures. Using geometrical acoustic theory and finite element calculation method, we compare and analyze the energy gathering effect of the aluminum sheet embedded in the acoustic black hole with that of the aluminum sheet with uniform thickness in both time and frequency domains. The results show that the energy gathering capacity of the aluminum sheet embedded in acoustic black holes is about 30 times higher than that of the aluminum sheet with uniform thickness under specific frequencies and excitation sources.

(2) Four types of energy recovery devices were designed. Four types of energy recovery devices were designed by changing the number of acoustic black holes and the specifications of piezoelectric sheets, and the four devices were analyzed and evaluated by electric power and other indicators. The results show that the system composed of periodic acoustic black holes and periodic piezoelectric sheets can effectively realize the recovery of broadband energy.

(3) The structure of the acoustic black hole energy recovery device with phononic crystals was constructed. Energy band theory is applied to analyze the energy band structure of acoustic black hole cells and their energy transfer characteristics. The results show that the radius of the center circular table of acoustic black holes, the truncation thickness, and the power index parameter have an effect on the dispersion relation of acoustic black hole cells. Among them, the center circular table radius has the greatest influence on the dispersion relation.

Key Words: Acoustic black hole, Energy recovery device, Electrical power, Energy band structure

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,由于全球日益严重的气候变化以及传统能源消耗引起环境等相关问题,引发了越来越多的科学家和工程师加快了对能源开发和利用的研究。除了努力在原有能量的基础上降低消耗比重外,还致力于探索可替代能源、可再生能源和环保能源等^[1-2]。其中能量回收作为一种很有前途的缓解现状的方法,近年来受到了世界各国研究学者的广泛关注。简言之,能量回收是指收集和储存太阳能、热能、生物质能和其他形式的可再生能源和清洁能源。就目前已经开展的能量回收研究中表明,任何一种能源都存在一定程度的局限性,例如太阳能虽然具有分布区域较广且运营成本低等优点,但易受天气等条件的影响,且在有限空间内能量密度较低;热梯度可以有较为长寿周期,但并不适用于一些微小能源器件等^[3-5]。如表 1.1 所示,可以得出机械振动的能量回收效率明显优于其他能源的,振动系统的设计需要考虑的是足够的振动能源等因素。正常情况下,在自然界中的机械振动能源是无时无刻不存在的、免费的,并且具有降低噪声和能量回收的双重好处,因此机械振动是目前获取能量回收最有效的方法之一^[6-7]。

表 1.1 不同能源的电功率密度

能源类型	电功率密度
太阳能(室内)	10 ~ 20 uW / cm ³
热梯度(10°)	15 μW / cm ³
振动能(压电效应)	250 μW / cm ³

设计良好的振动能源回收装置可以有效地解决随着科学技术和现代信息技术不断发展而提出的精细度、机械性等问题。比如应用无线传感器技术在桥梁、房屋等大型建筑物中实现可靠性高,维修成本低,实时采集到测物体状态使得被

通知的紧急问题可以及时作出关于避免灾难发生的信息检测追踪能力；同样，该技术还可以应用在一些电子设备领域中延长使用寿命^[8-9]。

实现能量回收技术的方法主要包括电磁式^[10-12]、静电式^[13]、压电式^[14-16]。其中，电磁式的能量回收技术是指在法拉第电磁感应的作用下，附着在物体上的磁铁在物体移动时线圈中产生电压，再通过电路转为电能的方法。尽管它具有较低的成本、较高的输出功率，但是受到尺寸的约束并不利于设计在一些微型的结构中，由此在实际工程中具有很大的局限。针对静电式的能量回收技术，则是在质量中嵌入永久电荷的驻极体排列，当电容器移动时在极板上产生电压。该技术除了与电磁式同样具有低成本和较高的输出功率等优点之外，同时优化了电磁式的缺陷可以用于一些微型机械结构设计中，但是需要独立的电源支持才可以实现对电容的电荷进行约束，在操作过程中增加了额外的步骤，也具有一定的局限。然而针对压电式能量回收技术，其中压电材料主要由晶体、陶瓷或者柔性压电箔等材料所制成，可以作为传感器、输入器和输出器等器件应用在领域中。并且通过电压方式所实现的能量密度可以达到 $37.04 \mu\text{W}/\text{mm}^3$ 远高于 $4.375 \mu\text{W}/\text{mm}^3$ 的电磁式和 $0.584 \mu\text{W}/\text{mm}^3$ 的静电式^[17]。除此之外，还具有较高的机电耦合并且不需要其他的外部电源，在具备较高的回收功率和能量密度的同时，能有无发热、成本低、结构简单易于改变成所需要的形状等优势，这些使得它在能量回收领域引起了大量的研究者关注，并在未来应用中具有很广阔的发展前景。

随着科学技术和现代信息技术发展的不断加快，在工程中对机械器件性价比和与时俱进的要求愈加严格^[18]。如对航天飞机和高速列车等交通工具速度，以及无线传感器等技术的信息检测追踪能力、资产利用等要求日益提高。针对这些需求提出的声音和振动能源利用是如今学者重点研究的方向，声波和振动可以看作是流体和固体介质中的一系列机械波，是一种机械能。为了有效、且高效地利用声音和振动能量，一个直观的概念被提出——设计声学 and 机械组成的装置，主要是将声音和振动波定位并集中在某一区域内，用于后续的能量转换和生产。最近流行的声学黑洞（ABH）就是一种创新性的机械波捕获装置，是可以实现将机械能量集中并收集起来进行转换的理想解决方案之一。

1.2 压电能量国内外研究现状

早在 20 世纪 70 年代的时候,就有学者在环境振动中通过实践与理论的方法开始对能量回收潜能进行了研究和分析,证明了振动能源具有回收能力,并且在未来可以将其转换到实际的各项应用中。1880 年法国的居里兄弟从单晶石英中发现了压电效应,即在压力下石英和其他的材料会产生电荷和电压^[19]。而压电材料是在外界激励作用下,材料内部会出现极化现象导致压电体上下两个表面之间出现电位差,从而导致压电,所以压电材料是具有压电效应的材料。后来因为 Jaffe 发现了一种在锆钛酸铅固熔体中更具有压电性能和稳定性的压电陶瓷材料,使得压电材料在应用方面突破了关于电力耦合在现实中难以实施的问题,也在该方向取得了重大的进展^[20]。

Bai 等人设计了压电悬臂梁结构式的发电机,这种装置是目前在能量回收技术中应用范围最广,结构相对更简单的方法^[21-22]。压电悬臂梁的大体结构是一端被嵌入到固定的支架上,与固定的物体形成连接,而另一端则是以自由的状态悬空,如图 1.1 所示。当压电悬臂梁结构的自由端因为受到激励发生振动时,悬臂梁会随着振动的大小发生相应的变形,随之粘贴的压电片也会随着发生形变并产生表面电荷和电势差^[23]。其中压电片分为压电单晶片和双晶片,两者主要的区别是单晶片是直接贴附悬臂梁表面一侧,而双晶片则是贴附在受力方向的上下然后表明通过串联或并联进行连接,对应贴附在压电悬臂梁结构中的示意图,如图 1.1 所示。阚君武也对单晶片和双晶片压电俘能系统进行研究,通过数值仿真分析发现双晶片梁的发电量大于单晶片梁的^[24]。

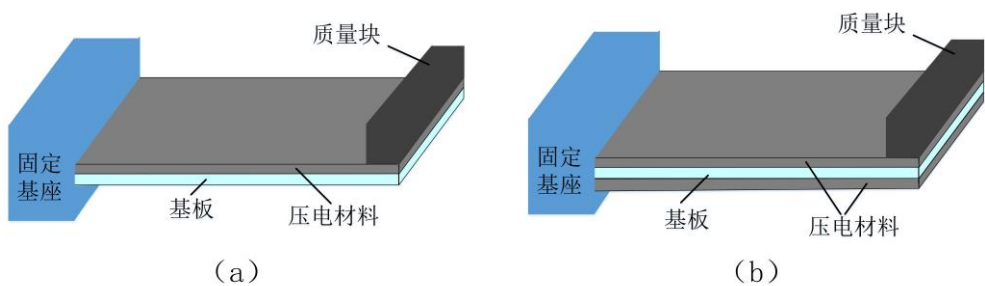


图 1.1 经典压电悬臂梁能量回收结构示意图 (a) 单晶片能量回收结构
(b) 双晶片压电能量回收结构

针对压电悬臂梁已有的研究，主要分为两个方向。一个是研究压电悬臂梁的参数对回收功率的影响，分别提出从悬臂梁的长度、宽度、厚度、压电片与固定端之间的距离以及在基板上添加不同质量的质量块等多角度对其进行能量回收进行研究，研究表明质量块对振动能量回收的影响是最大的^[25-27]。另一个则是通过研究悬臂梁的振动频率对能量回收效率的影响，利用的是叠层板可以在较低的功率下具有较高的磁能，从而计算出输出功率和振动频率的关系^[28]。但是这种压电悬臂梁结构装置存在一个局限，就是该装置只能在受到共振频率时才可以有较好的工作效率，如果振动的激励频率偏离了悬臂梁的共振频率，即会导致机械振子的振幅大幅度下降，从而导致回收功率的效率也随之下降。想要打破压电悬臂梁结构的这个局限，需要使结构具有较宽的工作频带。于是，有研究学者开始从机械的结构设计角度进行研究，提出了阵列式、共振式、非线性式的能量回收结构等。

Xue 等人提出由多个压电元件组成的阵列式压电能量回收结构，如图 1.2 所示，这样的结构是由多个具有不同的共振频率的相同梁并联组成的，主要是通过改变压电双晶片的厚度，使各悬臂梁的谐振频率不相同从而达到带宽的效果^[29]。后来，美国 Li 等人设计了压电俘能器阵列，由六个不同谐振频率的压电悬臂梁串联构成，不同的谐振频率是因为悬臂梁基板上的不同质量块所导致的，当结构受到外界的压力或者振动时，每个压电片就会产生微小的电流，然后再将这些电流整合起来就可以实现对能量的转换和储存，此实验中表明最后的带宽约是单个梁的六倍，实现了宽频带作用^[30-31]。

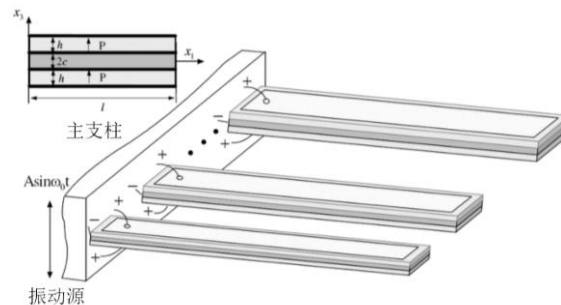


图 1.2 阵列式压电双晶片储能系统示意图

除了宽频带的性能之外，在提高回收效率方面还可以通过引入磁耦合理来提

高压电悬臂梁对振动能源的获取,这可以使输出电压在原本的基础上提高约 50%。如王金山等人建立了振动能量回收装置,通过分析结构中参数耦合的关系,从而提升了回收效率^[32]。

结合目前国内外的研究可以看出,针对压电回收技术是一种可以对环境影响较小并且符合现今社会可持续发展理论的能量回收方式,是可以实现对可再生能源的回收和利用、可拓宽系统频带实现高效电能的转换,所以对提高能量回收效率的研究是必然的,并在目前的成果中已具备较为广泛的应用前景。但是它并非完美,同样存在一些局限,如:压电材料的转换效率较低(一般在 10%到 20%)、能量分散不集中、系统损耗严重易受到外界和环境的干扰、回收效率也易受到时间等条件的变化而变化,以及目前的验证结果仅停留在实验室未被投入实际应用等问题。尽管有这些能量回收局限的存在,但是随着科学技术的不断进步以及各领域学者的不断探索,压电回收技术在未来是有望克服重重困难,并能进一步扩大应用的领域范围。

1.3 声学黑洞国内外研究现状

1.3.1 声学黑洞结构理论研究

最早在 1915 年爱因斯坦提出广义相对论的时候,天体黑洞就已经被许多科学家注意到了,直到几十年后“黑洞”正式被美国物理学家惠勒所提出,它是一个在宇宙空间中密度极大、体积极小的天体,周围具有极强的引力场,使得附近所有物体进入该范围都无法逃逸^[33]。后来有 Pekeris 等学者通过在声学领域中与宇宙天体黑洞类比发现,在声学领域中存在这种类似现象,具体表现为当声波进入特定的非均匀分层介质中后,声波传播的波速会随着介质厚度的减小而降低直至接近零,从而使得声波不再继续传播和反射^[34-35]。但是值得注意的是,天体物理中的黑洞是因为物质之间的引力坍塌所导致的,而类比在声学中的黑洞则是因为声波特有的传播特性所形成的。

1988 年 Mironov 发现在楔体结构中,弯曲波在传播过程中波速也出现了随着结构厚度变薄逐渐衰减的现象^[36]。在理想情况下,弯曲波在以幂函数形式变化

($h(x) = ax^m$, $m \geq 2$) 的楔体薄板中传播, 由于薄板厚度减小为零, 弯曲波的波速在到达结构边缘处时也会逐渐减小为零, 振幅在不断叠加过程中达到无穷大, 使得入射波的能量在结构边缘处实现聚集并且形成零反射($h(x)$ 是楔体中 x 点的局部厚度, a 是几何因子, m 是正有理数)^[37]。满足这个关系式的结构被称之为声学黑洞结构, 通过该结构实现能量聚集的现象称为声学黑洞效应。后来 Krylov 首次将声学黑洞结构应用到一维的梁结构中, 通过改变楔体的几何参数来实现对弯曲波调控^[38]。这让其开始在波动控制、振动冲击、降噪、能量回收等方面具有很大的研究意义, 迅速引起了各学术界的广泛关注^[39-44]。有研究者提出填充一些弹性材料或改变构成结构的材料属性从而探究声学黑洞效应的影响, 发现复合性材料或者是一些密度和刚度较小的材料可以更好地实现抑制振动的效果^[45-47]。当然这种效应也可以用构成声学黑洞的材料作为晶胞采用声学超材料方式来进行解释, 因为该材料具有一些特殊的声学性质, 所以可以将声波的传播路径引导沿着特性的方向进行传播, 使其声波会被所设计的结构完全吸收进而实现能量转换。经过不断的探索, 对声学黑洞的研究已经不再局限于一维的应用之中, 所以提出将一维的声学黑洞在结构扩展到二维结构中, 使其对弯曲波聚集效果会更佳, 方法是在薄板中嵌入一个轴对称, 随着幂律函数变化厚度的圆锥形凹坑。

由于实际工业加工过程中的技术限制和结构尖端所带来的安全隐患等问题, 导致声学黑洞结构是无法实现在尖端处厚度为零的理想状态。因此在进行实际结构剪裁时, 总是会在结构尖端形成一个具有一定厚度的截断, 将这种存在截断厚度的声学黑洞称为非完美的声学黑洞^[48-49]。Bowyer 研究的就是在薄板中嵌入一个具有一定厚度圆台的声学黑洞结构。因为截断厚度的存在, 为入射波传播提供了反射的情况, 使得波在传播至声学黑洞尖端时无法实现零反射。即使是很小的截断厚度也会使入射波的反射系数增加 50%–70%, 这将会在很大程度上削弱声学黑洞的聚能效果^[41,50-51]。许多学者对非完美声学黑洞在聚能效果上所带来的缺陷进行了各种猜想补救。O'Boy、Denis 和 Bowyer 等学者提出在声学黑洞中心截断的区域进行阻尼材料的粘贴, 研究证明, 这样的方法使通过对反射波进行能量耗散从而降低由于截断厚度所引起的反射系数, 为解决缺陷提供了新思路^[52-54]。

针对声学黑洞能量聚能特性, 梁浩鸣提出针对声学黑洞几何结构的优化, 利用极差分析法研究幂指数、截断厚度, 以及声学黑洞内外半径对声学黑洞聚能效

应的影响,得出了截断厚度对聚能效果的影响是最大的,还证明了当多个声学黑洞嵌入薄板内时,会减少板的刚度或增加声学黑洞共振频率机会,使得随着声学黑洞数量的增加能量聚集的面积也得随之增加^[55]。邓杰等通过从频域角度对一维声学黑洞均匀厚度部分和声学黑洞部分的能量密度分布情况进行了研究,证明了声学黑洞的能量密度聚能效果远远大于均质部分^[56]。除了能量聚集的效应之外,Zhu 设计了完全嵌入薄板的声学黑洞宽带声透镜,利用几何声学和有限元法进行了数值模拟,在短波长范围内实现准聚焦、准直和负折射特性,证明了声学黑洞结构对弯曲波操控的能力^[57]。以及通过主动振动控制的处理来实现声学黑洞梁在低频范围内的振动性能^[58],这些研究都证明了声学黑洞结构具有优越的能量聚能效果以及声波传播特性,体现了声学黑洞具有广泛的应用市场前景。

1.3.2 非完美声学黑洞的能量回收研究

声学黑洞是一种只需要通过简单裁剪就可以改变几何结构厚度,从而实现将弯曲波能量聚集到特定区域的结构。在高能量聚集的区域进行阻尼材料的粘贴,可以减小波的反射系数。同理,如果能量聚集的特定区域的阻尼材料换成压电材料,就可以将无处不在的振动能源转换为电能实现能量回收。基于此原理,声学黑洞效应中的能量回收特性引起了国内外研究学者的广泛关注及研究。

Deng 通过压电层拉格朗日方程,推导振动与压电的耦合方程,再利用半解析方法研究了声学黑洞和压电层参数对能量回收效果的影响^[59]。Zhao 等对声学黑洞中贴附压电材料进行研究,从稳态和瞬态角度分析发现相对于传统结构的能量回收,该结构具有更高的能量回收效率^[60-61]。后来,汪恒也在非完美声学黑洞中心平台处贴附阵列式压电材料,通过引入整流来消除各压电材料的相位差再进行串/并联的实验研究和特性分析,得出阵列式压电片的能量转换效率高于单压电片,并且整流后的输出电压能力也得到了很大的提升^[62]。

除了以上一些从压电片或结构参数的角度对声学黑洞效应进行研究以外,后有 Kushwaha 等学者提出将声子晶体引入到声学黑洞能量回收装置的研究中^[63-64]。声子晶体的概念是由光子晶体类比得到的,可以使弯曲波在周期性的复合材料或者结构中传播时出现与光子晶体相似的禁带^[65-67],从而来确定结构稳定性和声波

的传输损耗。刚开始有人提出在梁上建立了五个等间距的声学黑洞进行能量回收的数值模拟研究，结果表明周期性声学黑洞具有宽频能量回收的效果^[60]。后来，Zhao 经过进一步的研究提出了在铝板中嵌入三个二维声学黑洞模型，并在中心区域分别粘贴了圆形的压电材料进行实验探究，如图 1.3 所示，实验结果与数值模拟结果相一致。因为周期性声学黑洞具有轻质性并且可以增加能量聚集的面积，使得能量回收的效率得到提高。

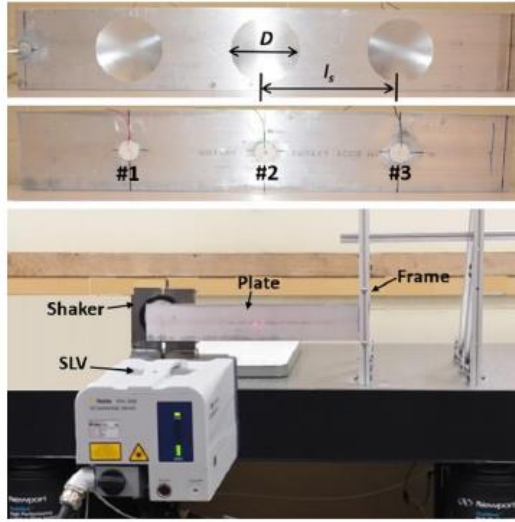


图 1.3 三个声学黑洞与压电材料构成的回收系统装置示意图^[68]

从此以声学黑洞为晶胞的声子晶体结构成为提高能量回收效率重要的研究切入点。有学者发现在这种结构模型中，可以推理出声学黑洞的能带结构，再结合模态分析就可以确定通带的频率范围，这样可以使得周期性声学黑洞可以通过通带来实现能量的宽频回收^[63,69-70]。Deng 等为了改善声学黑洞在低频范围内的性能，提出了超常材料板，可以拓宽频带范围，如图 1.4 所示。

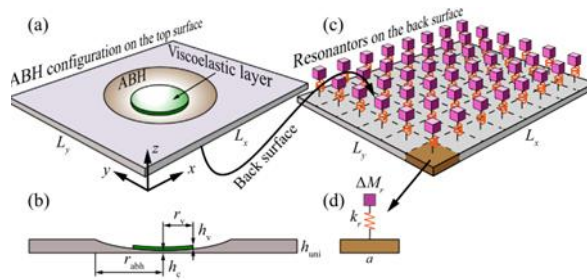


图 1.4 带有局部谐振器的声学黑洞组成的超常材料板示意图^[71]

1.4 存在问题

虽然目前针对声学黑洞结构的研究已经取得了很大的研究成果,证明了声学黑洞结构是具有能量聚集效果,并且在能量回收应用方面相比其他传统结构是有明显的优越性和潜在的市场前景。但是仍然存在以下一些问题:

(1) 弯曲波在进入声学黑洞区域以后波速减小,波长压缩,反射减少从而实现能量聚集效应。若在板中嵌入多个相同规格、水平排布并且互相处于相离状态的二维声学黑洞,在受到激励时,靠近的激励源的声学黑洞的能量聚集效果更佳,然后聚集效果依次减弱。但是如果相同规格的声学黑洞之间间距处于相切、相交时,整个系统的共振频率会发生改变,或者因嵌入多个规格不同的声学黑洞结构所导致的起始频率不同等情况均会影响能量的聚集效果。因此,需要进一步研究声学黑洞结构的各种变化对能量回收效果的影响。

(2) 在声学黑洞结构的截断中心区域粘贴单压电材料,由于在该区域中的弯曲波会存在相位差,导致压电片表面的会产生正负电荷相互抵消的现象,从而很大程度上削弱了能量回收的效率,因此只适用于一些功率较低的无线传感器。所以直接采用整块的单压电片进行能量回收是不明智的方法。并且由声学黑洞结构构成的能量回收装置中压电片的转换与电路所连接电路的负载电阻有着密切联系,则电路的选择也需要进一步的研究。

(3) 针对以声学黑洞为声子晶体做能量回收的研究中,均是通过周期化的程度探究能量回收的宽频特性,但很少有通过改变声学黑洞晶胞的结构参数,从能带结构中来分析对能量回收效果影响较大的因素。因此,还需要从能带结构角度分析声学黑洞结构参数对能量回收的影响。

1.5 本文研究意义及主要工作安排

因为与依赖结构固有频率的传统振动能量回收技术相比,声学黑洞能量回收效应的有效频率范围不再局限于固有频率的附近,也不需要额外的频率调节器并且还具有轻质性等特性,所以成为声学黑洞结构实现较宽频能量回收装置的原因。声学黑洞作为一种通过改变结构局部厚度形成的新型陷波器,可以从波调控方式

调节弯曲波的传播和能量的分布,再通过在声学黑洞能量聚集区域粘贴压电元件实现高效率的能量回收。并且它还是一种局域共振的声子晶体,在薄板上的阵列排布相对灵活,可以通过人为设计改变声学黑洞的晶胞探究结构参数能带结构的变化。综上所述,本文研究基于声学黑洞的聚能特性及能量回收,主要研究内容安排如下:

(1) 课题的研究背景。对能量回收和声学黑洞目前国内外研究现状及进展进行介绍,分析目前的研究中能量回收和声学黑洞聚能特性所存在可优化的地方,并介绍声子晶体的基本理论,从而引出本篇论文主要的研究内容。

(2) 声学黑洞效应的研究。从几何声学的角度对声学黑洞进行分析,并利用 COMSOL 软件建立声学黑洞模型,从时域和频域两个方面对比分析声学黑洞结构较均匀厚度铝薄板具有明显的聚能优势。

(3) 关于声学黑洞聚能特性效果的优化。考虑薄板为作为结构的基地,嵌入两个相同规格的二维声学黑洞,分别设计它们之间的距离为相离、相切和相交的情况。同时考虑两个声学黑洞模型的规格不同的情况,分别按照距离激励源不同的顺序嵌入板内。此外,在保持声学黑洞规格不变的情况下,改变激励源的形式。通过有限元法对以上三种不同的情况下的聚能效果进行对比分析。

(4) 建立声学黑洞能量回收装置仿真模型,验证并优化能量回收效果。介绍压电振动回收原理,考虑声学黑洞不同的排列形式以及在声学黑洞中心区域贴附单个或多个压电片阵列的装置,构建成机电耦合结构。并确定不同情况下电路中的最优负载电阻。在频域研究下计,得出声学黑洞能量回收装置中能量分布的云图,并通过对输出电功率比较,得到能量回收效率最优的模型。

(5) 建立以声学黑洞能量回收装置为晶胞的声子晶体模型,并以声学黑洞的结构参数为变量,通过对中心圆台半径、截断厚度、幂指数的改变进行计算,得到对应模型的能带结构,再对比分析得到对能量回收效果影响最大的因素。

第 2 章 声学黑洞能量聚集特性以及结构优化

2.1 引言

与厚度均匀的薄板相比,声学黑洞结构在能量聚集方面的性能具有明显的优势。但是使用传统的解析方法来分析其过程是不够清晰和准确的,所以选用有限元法数值模拟仿真计算可以清晰地对声学黑洞结构的传播特性、能量分布情况等更好地进行分析。本章是在上一章已经理解声学黑洞原理的基础上,使用 COMSOL Multiphysics 6.0 有限元仿真软件作为研究载体入手,考虑在时域和频域下,证明声学黑洞的聚能特性。并分别从弹性应变能密度的分布情况及位移大小的角度研究了不同声学黑洞模型的聚能效果。

2.2 声学黑洞聚能特性

作为一种声学元件,声学黑洞结构不需要多种材料加工构成,且仅需通过对厚度的简单裁剪改变结构阻抗,从而使弯曲波传播进去声学黑洞时,结构中的特殊区域就会引起声音的共振,使其波能量不断地积累和集中。利用声学黑洞的特性来精确设计和控制其结构及材料,可以实现高效的能量聚集效果,这些都是使声学黑洞结构在各领域引起广泛关注的原因。本章将从几何声学出发,详细探讨声学黑洞能量聚集的产生机理,并通过有限元法研究关于声学黑洞聚能效果的优化方案。

2.2.1 一维声学黑洞几何声学理论

声学黑洞是一种能够实现波能量聚集现象的结构,其基本原理在于弯曲波在以幂律函数变化的结构内传播时,随着结构阻抗的变化,群速度和相速度均会减小,且幅值增大,最终在该结构区域实现了零反射。经典的一维声学黑洞结构是楔体结构厚度按幂律函数变化而形成的,如图 2.1 所示。结构变化满足 $h(x) = ax^m$, $m \geq 2$ 的规律,其中 m 是一个大于 2 的正整数, a 为常数, x 是楔体

边缘到声学黑洞尖端的距离。因为在研究中结构为非完美状态，因此还存在一个截断厚度 h_0 。

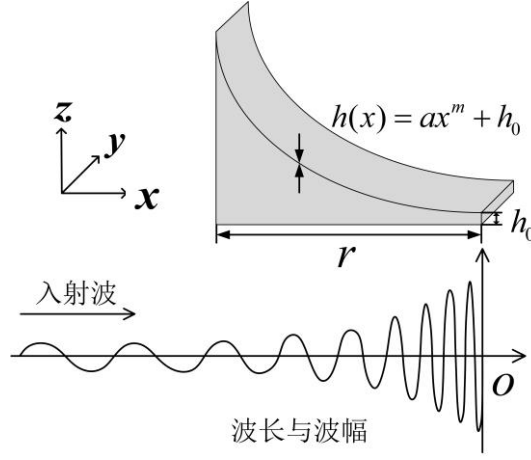


图 2.1 以幂律函数变换的一维声学黑洞结构以及
入射波传入结构后的波长与波幅的变化

而真空中，沿 x 方向局部厚度为 $h(x)$ 的各向同性薄板的弯曲振动方程为^[72]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] + 2(1-\sigma) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \\ + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D(x) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] - \omega^2 \rho h(x) w = 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$D(x) = \frac{Eh^3(x)}{12(1-\mu^2)} = \frac{pc_p^2}{12} h^3(x) \quad (2.2)$$

$$c_p = 2c_t \left(1 - \frac{c_t^2}{c_l^2} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

其中 w 是薄板中的法向位移， $D(x)$ 是局部弯曲阻抗， ω 是波的角频率， σ 、 E 、 ρ 分别为薄板的泊松比、杨氏模量材料密度， c_p 是薄板中纵向波的速度， c_t 和 c_l 分别是薄板中的横波和纵波速度。

$$w(x) = A(x) \exp[i\phi] \quad (2.4)$$

式中 $A(x) = G / x(k(x))^{1/2}$ 是准平面波在 x 处的幅值 (G 为任意常数)， i 是虚部单位。其中任意点到结构边缘 ($x=0$) 的累积相位表示为：

$$\phi = \int_0^x k(x) dx \quad (2.5)$$

$k(x) = 12^{1/4} k_p^{1/2} h(x)^{-1/2}$ 是弯曲波的局部波数， $k_p = \omega / c_p$ 是准纵波波数。综合上式可以看出，随着波板结构的厚度的逐渐减小为零，弯曲波的累计相位 ϕ 趋近于无限，这意味着弯曲波是不可能到达结构的边缘处的。但是，基于现实工业剪裁技术的限制，声学黑洞结构的尖端厚度是不可能减小为零的，存在的截断厚度是声学黑洞效应的重要因素之一，即使是很小的厚度也会使结构中的反射系数很大程度地增加。因此针对公式（2-5）中的下限积分就由 0 变成 x_0 ，根据弯曲波局部波数的方程可以推算得到弯曲波的波数方程：

$$\text{Im } k = \frac{1}{4Q} \text{Re } k = \frac{1}{4Q} \sqrt[4]{12} \sqrt{\frac{k_l}{\varepsilon x^N}} \quad (2.6)$$

Q 是材料的质量系数，当假设截断厚度的范围 $x_0 \rightarrow x_1$ ， N 为 2 时可以得到截断区域的累计波数为：

$$\int_{x_0}^{x_1} \text{Im } k dx = \frac{1}{4Q} \sqrt[4]{12} \sqrt{\frac{k_l}{\varepsilon}} \left| \ln\left(\frac{x_0}{x_1}\right) \right| \quad (2.7)$$

此时具有截断厚度的非完美声学黑洞结构的反射系数为[73]：

$$R_0 = \exp\left(-2 \int_{x_0}^{x_1} \text{Im } k(x) dx\right) \quad (2.8)$$

通过计算上式可以发现只要 x_0 存在，都将会为声学黑洞效应带来很大的反射系数（约在 50% 至 70%）。因此在声学黑洞的尖端位置粘贴压电材料可以将在此聚集的能量收回起来再次利用，实现能量的高效回收，为新能源的开发也提出了新的思路。

2.2.2 二维声学黑洞几何声学理论

可以利用几何声学理论准确地对弯曲波在变截面厚度结构中传播的现象进行描述。将厚度 $h(x)$ 随幂律函数变化的轴对称圆形嵌入到薄板中构成二维的声学黑洞结构，如图 2.2 所示，同样由于实际加工问题此处分析的为非完美的声学黑洞。其结构厚度变化对应的方程为：

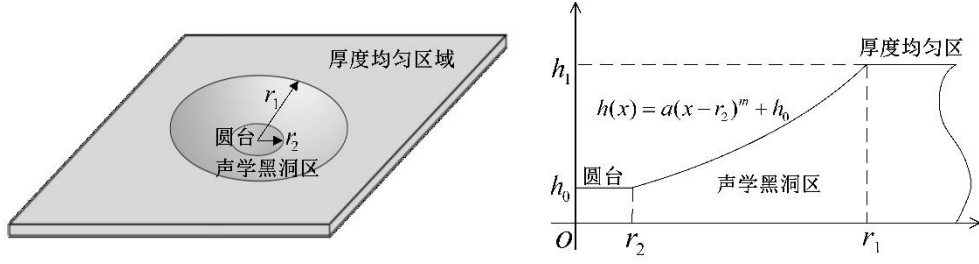


图 2.2 非完美情况下二维声学黑洞嵌入薄板的示意图

$$h(x) = \begin{cases} h_0, & (x < r_2) \\ a(x-r_2)^m + h_1, & (r_2 \leq x \leq r_1) \\ h_1, & (x > r_1) \end{cases} \quad (2.9)$$

二维声学黑洞的运动方程与一维的相似，其在厚度变化为 $h(x, y)$ 的薄板中传播的运动方程为：

$$\begin{aligned} & \left[D(x, y) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] + 2(1-\sigma) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D(x, y) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] + \\ & \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D(x, y) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] - \omega^2 \rho h(x, y) w = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

将板中法向位移 w 代入上式中，忽略 $A(x)$ 和 $\phi(x, y)$ 二阶以上的项中设置实部为零，可以推导出几何声学弯曲波的程函方程：

$$|\nabla \phi(x, y)|^4 = k^4(x, y) / k_p^4 = n^4(x, y) \quad (2.11)$$

其中， $\nabla = (\partial / \partial x)i + (\partial / \partial y)j$ 是梯度算子， $n(x, y)$ 是对应厚度均匀 h_1 相关的折射率^[74]：

$$n(x, y) = (h_1 / h(x, y))^{1/2} \quad (2.12)$$

由上式可以看出弯曲波的折射率与其频率无关，仅与 h_1 和 $h(x, y)$ 有关。如图 2.3 所示， β 是坐标轴 r 和 k 之间的夹角，其中 k 是弯曲入射波矢量，红色实线代表弯曲波在二维理想情况下声学黑洞中的传播轨迹。根据研究表明，当在以 $m \geq 2$ 变化的幂律对称凹坑结构中传播时射线的轨迹不再是一条直线，弯曲波在进入声学黑洞区域后将向黑洞的中心进行偏转，从而实现弯曲波聚集的现象。而图中黑色实线则表示的是弯曲波进入非完美声学黑洞区域的轨迹， $r(s)$ 是预计的射线轨迹到定点的矢量， dr 是射线轨迹的差分段，从图中可以看出由于截断厚度的存在从而会影响传播的路径，因此弯曲波在进入声学黑洞结构中传播时，不会在结构

中心处实现聚集，而是在中心处附近实现聚集效应。所以进行能量转换研究时，引入的压电材料粘贴位置不再局限于声学黑洞中心点处，这样可以使得减少反射系数，从而更大化提升转换效率。

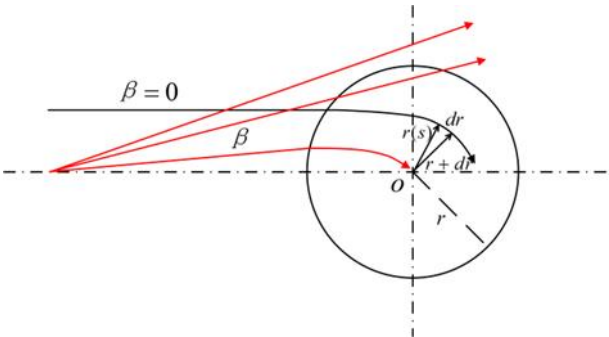


图 2.3 弯曲波分别进入理想和完美声学黑洞区域的传播轨迹示意图

2.3 声学黑洞结构建模与计算

2.3.1 仿真建模

本研究主要是对二维的声学黑洞结构中弯曲波的传播特性和能量分布进行研究。将以幂律函数变化的一维声学黑洞结构沿尖端处绕中心旋转一周即可得到二维声学黑洞结构。其中选用铝质材料是因为相对其他材料重量较轻，具有硬度较高、耐腐蚀性、经济性以及可回收性等优势，所以在 COMSOL 建模中是以铝材料为基底的嵌有二维声学黑洞结构的仿真模型。由于现实加工的限制使本文中研究的声学黑洞均存在截断厚度，结构具体的几何尺寸和材料的参数见表 2.1。

研究分别在时域和频域下进行，为了减小在研究过程中反射波对声学黑洞聚能效果的影响，所以频域研究中可以在声学黑洞结构的薄板四周设置一种与相邻包层材料波阻抗相匹配的特殊的介质层——完美匹配层（Perfect matching layer, PML），如 2.1（a）中紫色部分所示。完美匹配层是由计算域外部少量的单元层模拟所构成的，在频域研究中可以表示为一种边界条件区域无穷的情况，主要体现在使弯曲波入射后经过声学黑洞结构再经过完美匹配层逐渐衰减不会再反射回去，模拟结构在无限大的边界条件下进行研究。但在时域研究下完美匹配层起不到作用，所以此处考虑在时域研究中不考虑设置完美匹配层，而是利用固体力学模块中所提供的一种特殊边界条件（低反对称边界）来实现避免波的反射对研

究结构造成的误差，在声学黑洞薄板的右侧设置低反射边界即可，如 2.4（b）所示。与完美匹配层不同的是，该边界不需要在计算域之外的域进行网格划分

表 2.1 声学黑洞几何尺寸和材料的参数表

参数符号	数值（单位）	参数含义
E_b	70 (Gpa)	杨氏模量
ρ_b	2700 (kg / m ³)	密度
σ	0.33	泊松比
h_1	0.004 (m)	均匀部分厚度
h_0	1.4×10 ⁻⁴ (m)	中心截断厚度
L_1	0.8 (m)	铝板长
L_2	0.2 (m)	铝板宽
r_1	0.08 (m)	声学黑洞半径
r_2	0.015 (m)	声学黑洞截断半径
a	0.9136	常数量

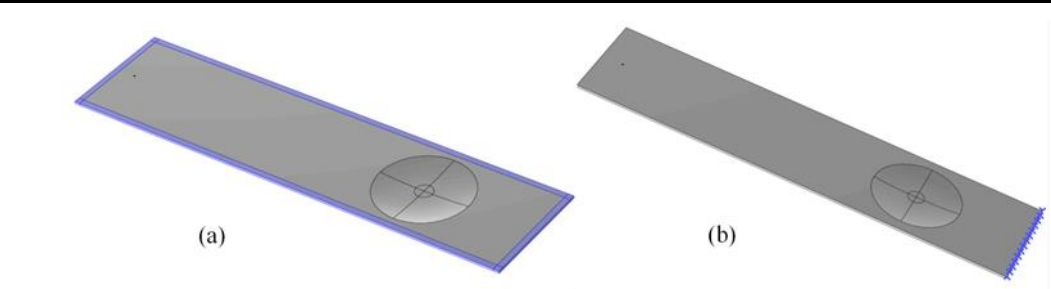


图 2.4 声学黑洞结构模型（a）带有完美匹配层的声学黑洞结构模型
（b）设置低反射边界的声学黑洞结构模型

研究分别在时域和频域下进行，为了减小在研究过程中反射波对声学黑洞聚能效果的影响，所以频域研究中可以在声学黑洞结构的薄板四周设置一种与相邻包层材料波阻抗相匹配的特殊的介质层——完美匹配层（Perfect matching layer，PML），如 2.4（a）中紫色部分所示。完美匹配层是由计算域外部少量的单元层

模拟所构成的，在频域研究中可以表示为一种边界条件区域无穷的情况，主要体现在使弯曲波入射后经过声学黑洞结构再经过完美匹配层逐渐衰减不会再反射回去，模拟结构在无限大的边界条件下进行研究。但在时域研究下完美匹配层起不到作用，所以此处考虑在时域研究中不考虑设置完美匹配层，而是利用固体力学模块中所提供的一种特殊边界条件（低反对称边界）来实现避免波的反射对研究结构造成的误差，在声学黑洞薄板的右侧设置低反射边界即可，如 2.4（b）所示。与完美匹配层不同的是，该边界不需要在计算域之外的域进行网格划分。

起始频率是指弯曲波可以进行传播的最低频率，决定着结构的稳定性、强度等，并且还在声学材料中影响着对声音的传播和吸收，所以它对任意结构都具有极其重要的影响。其中声学黑洞结构的几何参数变化会导致声学黑洞的起始频率不同，当弯曲波射入结构中，只有达到起始频率以上时声学黑洞结构才开始有聚能效果，其控制方程如下：

$$f_{cut-on} = \frac{h_1}{2\pi L_{AHB}^2} \left[\frac{E_b(40-24\mu)}{12\rho_b(12-\mu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

2.3.2 载荷激励

研究是从时域和频域两个角度进行的，因此激励载荷决定着结构中各模态系数的叠加。针对时域研究，应尽可能使声学黑洞结构有较多模态以便于振动分析，所以选用高频的汉宁（Hanning）窗函数作为激励源，其激励信号的表达式为：

$$f(t) = \exp(-((t-2 \times T_0)/T_0)^2) \sin(2 \times \pi \times f_0 \times t) \quad (2.14)$$

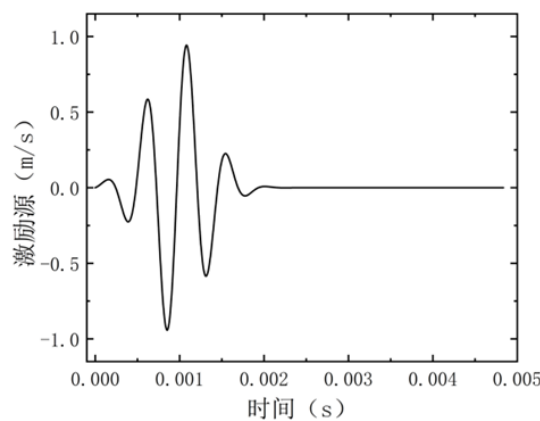


图 2.5 时域研究中所施加的汉宁加窗函数波形图

图 2.5 所示为时域研究中激励力的时间—振幅曲线示意图，激励的中心频率为 2068Hz 根据上图可以看出，在 0~2ms 时施加的激励力加载完成。在频域研究中，施加的激励力则是趋于稳定的，选用 $F = 1\text{N}$ 的力进行施加，以便于更好地在稳态响应下分析声学黑洞的聚能效应。

2.3.3 网格控制

有限元法是一种近似求解的方式，在数值计算过程中，可以将建构的物理模型进行有效计算。整个计算过程首先需要建立几何结构，添加所需物理场，设置网格参数，进行网格划分中包括优化网格，最后模拟计算。因为网格划分的精细度会受到几何结构的复杂度、计算所需时间、成本以及结果等一些因素的限制，所以在进行网格划分时应充分考虑具体情况精确性和计算效率。并且网格划分在有限元计算中还起到承上启下的作用，可分为自动网格划分和手动网格划分。针对声学黑洞结构在选用 COMSOL Multiphysics 软件进行网格划分时，需考虑声学黑洞中的弯曲波波长为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi h}{f}} \left[\frac{E_b}{12\rho(1-\mu^2)} \right]^{\frac{1}{4}} = \frac{c_t}{f} \quad (2.15)$$

当弯曲波传播过程中部分波长会出现因为声学黑洞的结构特性出现被压缩的情况，所以对结构的网格划分需要更精细。在频率范围内，网格划分的尺寸需要确保每一个波长包含至少 10 个单元，从而提高仿真结构的准确性。

$$L \leq \frac{c_t}{10f} \quad (2.16)$$

其中 λ 是通过结构厚度和最高频率得到的波长， L 是划分网格的大小， c_t 是弯曲波的传播速度， f 是特征频率。因为软件是自动对一些部位进行优化，所以在定制单元格大小时确定最大单元大小即可，或者是在预定义中选择极细化。如图 2.6 是铝薄板中嵌有二维声学黑洞结构的网格划分图，图 (a) 中先对除完美匹配层外的地方划分自由四面体网格，网格包含了 141967 个域单元，再在此基础上对完美匹配层进行扫掠，整个结构的完整网格包含着 148655 个域单元。图 (b) 则是直接对整个结构进行自由四面体网格划分，整个结构包含网格 97036 个域单

元。

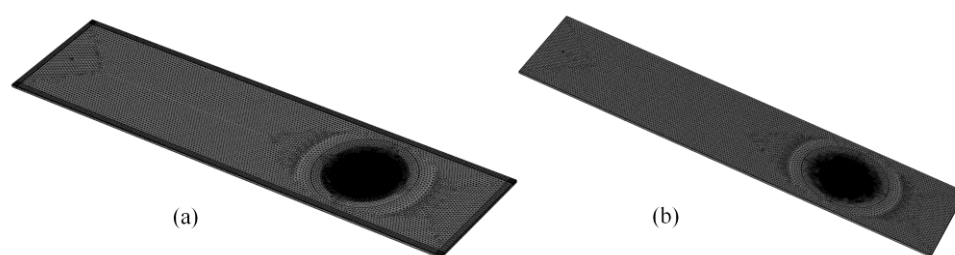


图 2.6 嵌入铝薄板的声学黑洞结构网格划分

(a) 设置有完美匹配层的装置 (b) 设置低反射边界的装置

2.4 声学黑洞传播特性

当弯曲波传播进入声学黑洞区域时会在该区域发生极强的吸收现象, 由于实际工艺的加工问题导致在中心点位置存在截断厚度, 使得声波在经过声学黑洞不可能实现声波能量完全消失的情况。本小节将以上小节中所建立非完美声学黑洞结构作为载体, 分别从时域和频域响应角度研究弯曲波在声学黑洞中的传播特性以及能量分布情况。

2.4.1 时域分析

在声学黑洞结构的时域研究中, 对于距离左边缘中心处 0.02m 的位置施加垂直于 z 方向的激励 (激励信号上节中的 $f(t)$), 厚度均匀铝薄板在同样位置施加相同的激励, 如图 2.7 所示, 分别是弯曲波在 $9.671\text{E}-4\text{s}$, 0.00725s , 0.0138s 时的传播过程的弹性应变能密度图。由时域激励信号的曲线图可以看出在 0.002s 以后停止激励, 而激励点信号递到声学黑洞结构位置处需要一定时间, 所以在图 2.7 (a) 中声学黑洞结构并没有表现出聚能效果; 图 2.7 (b) 是在激励信号停止后波还在继续往前传播的示意图, 则对应的声学黑洞位置处仍出现了聚能效果; 但是因为弯曲波传播过程中有一定的损耗, 所以大多数的波会传送到薄板的另一端后被结构边缘反射回去, 即可以看到图 2.7 (c) 的现象。由于结构剪裁使得弯曲波传播和移动到声学黑洞区域进行了聚集, 从图中可以看出绝大部分波的能量聚集在此附近。

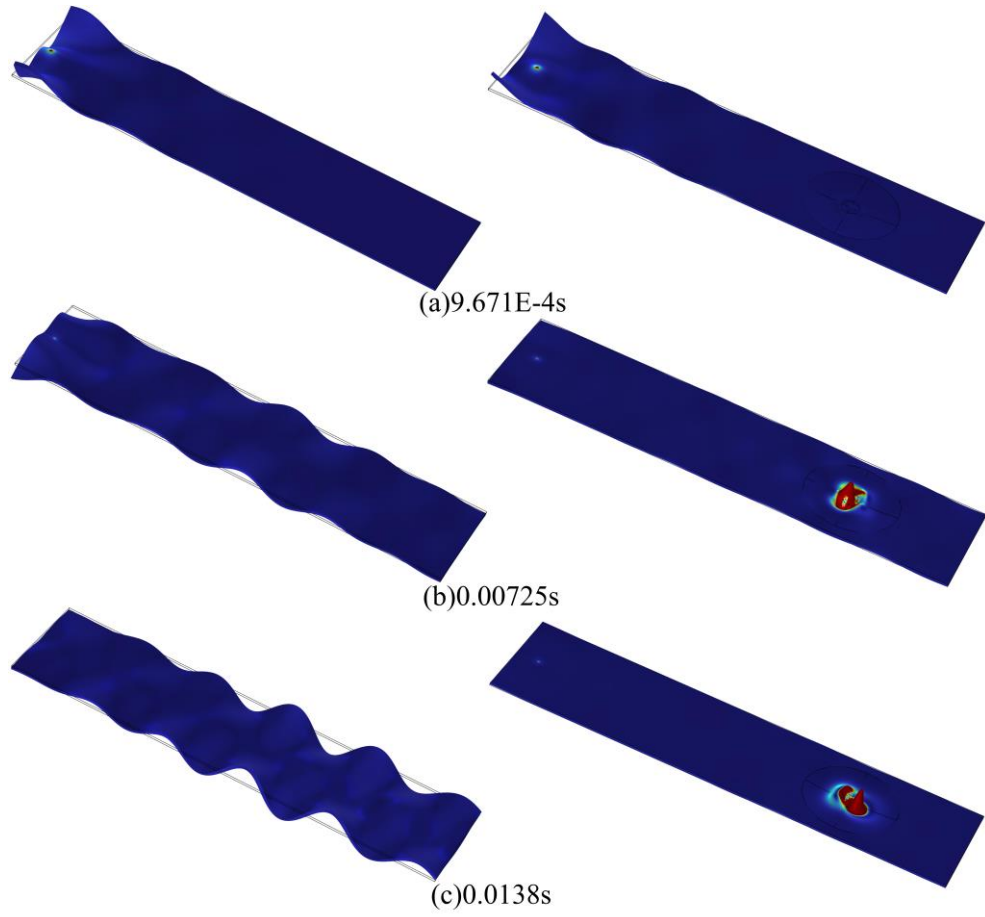


图 2.7 时域研究中厚度均匀铝薄板与声学黑洞装置不同时间的弹性应变能密度示意图

弯曲波在传播过程中会有一定的损耗或者在声学黑洞中心区域附近波的反复叠加会出现相抵消的现象，均会导致数据模拟的能量聚集出现偏差。为了量化证明声学黑洞结构较均匀铝薄板具有明显的聚能效果优势，所以选择特定时间对两种结构中心水平线上沿 x 轴上进行位移大小的计算，得到如图 (b) 所示，分别在 $9.671\text{E} - 4\text{s}$ ， 0.00725s ， 0.0138s 时刻厚度均匀铝薄板与声学黑洞结构随着 x 方向的距离对应的位移曲线图，可以看出刚受到外界激励时，两者模型的位移大小相差不大；但随着激励时间变长声学黑洞与厚度均匀薄板在间距 x 相同的位置处的位移大小相差逐渐变大。这是由于声学黑洞结构独有的结构特征使得声波可以在从进去该区域开始就可以实现聚集效果，所以随时间的变化声学黑洞的位移大小相比厚度均匀铝薄板明显更高，甚至在 0.0138s 时声学黑洞结构的位移的最大

位移达到了18.5m，约是同一时刻厚度均匀铝薄板的30倍。由此也量化证明了声学黑洞结构是具有高能量聚集效果的。

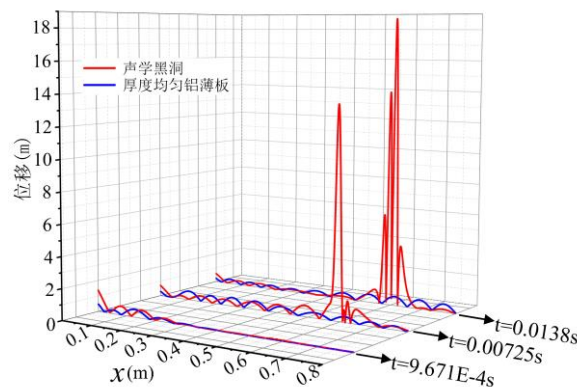


图 2.8 研究中位移大小的研究位置以及在不同时间下
厚度均匀铝薄板与声学黑洞结构位移曲线示意图

2.4.2 频域分析

频域中，分析声学黑洞结构和厚度均匀铝薄板中弯曲波的传播过程有助于结构宽频能量聚集的理解。针对声学黑洞和厚度均匀铝薄板在与时域激励点相同的位置施加沿 z 方向 1N 的激励。对建立的结构在频域范围 220 ~ 3000Hz 内进行扫频分析，图 2.9 (a) - (c) 分别是对应 1000Hz，2000Hz 以及 3000Hz 下的二维声学黑洞结构与厚度均匀铝薄板的弹性应变能密度云图。

上述选取的 3 组弹性应变能密度云图在相同的激励力下，由于尖端厚度的中心区域对波的反射叠加，使在相同的位置处声学黑洞区域的应变能密度明显大于厚度均匀铝薄板。在传播过程中，弯曲波在声学黑洞结构中的波长、波速会逐渐减小，振幅增大，这可以使弯曲波在靠近声学黑洞中心处时所对应波峰或者波谷的应变能也更大，这正如图中所看到的，在声学黑洞的中心区域附近实现了大量的能量聚集。反之在均匀厚度铝薄板中与声学黑洞相同的区域，由于没有对厚度进行幂律函数变化的剪裁，使弯曲波的传播路径只能保持原有的方式形式进行传播，直至传播到结构边缘被完美匹配层吸收。

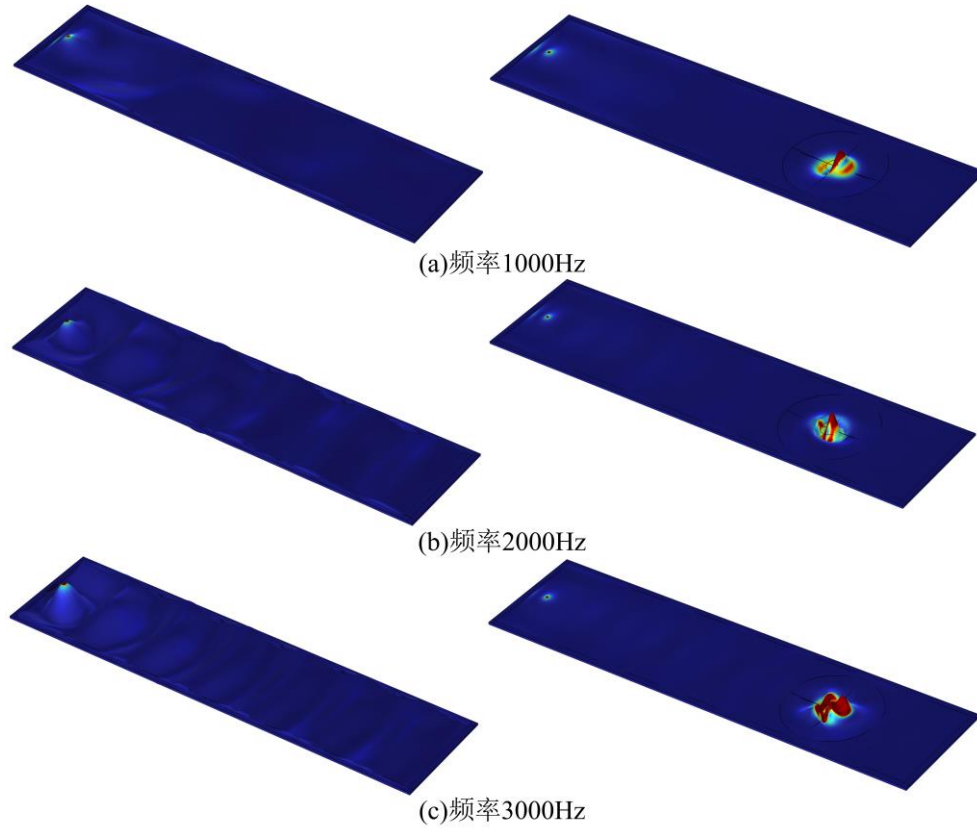


图 2.9 频域研究中厚度均匀铝薄板与声学黑洞装置不同频率下的弹性应变能密度示意图

为了量化比较声学黑洞与厚度均匀铝薄板在频域下的聚能效果，选用中间频率1520Hz 下种结构的位移大小作为评价指标。图 2.10（a）是在驱动频率两个模型的位移大小俯视图，同样得出的结论在薄板种嵌入声学黑洞的波具有较强聚焦和约束效应，而厚度均匀铝薄板则是普通的波传播的行为。而图 2.10（b）即是由（a）中两薄板结构沿红色中心水平虚线所绘制成的位移大小曲线图，从中可以看出声学黑洞结构的最大位移约为 $3.68 \times 10^{-6} \text{m}$ ，是厚度均匀薄板的 20 多倍，除了声学黑洞结构位置处其余部分的位移大小与均质厚度铝薄板的大小波动幅度大致相同。由此证明声学黑洞结构的聚能作

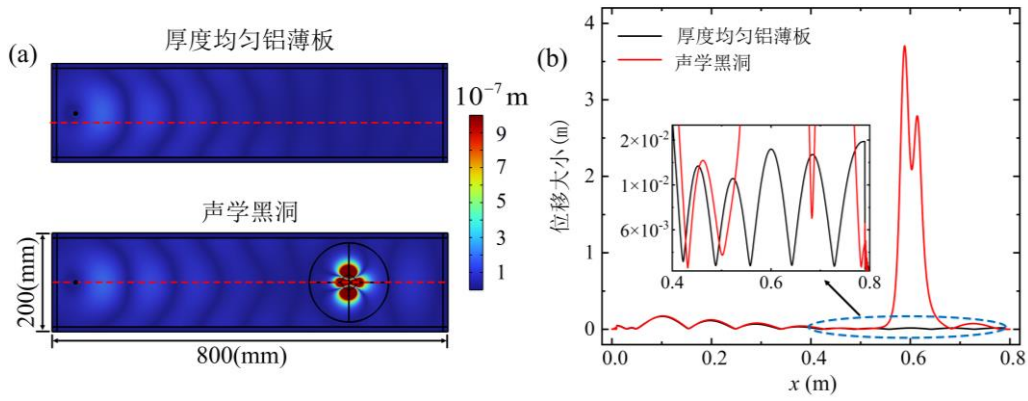


图 2.10 在频率为 1520Hz 时，(a) 声学黑洞与均匀铝薄板的位移大小平面图
(b) 是沿 (a) 中红色中心水平虚线的位移曲线示意

2.5 声学黑洞聚能效果优化

对声学黑洞的研究，当声学黑洞数量达到两个以上时，研究重点转向排列形式，因为不同的排列模式对声学黑洞的聚能特性和应用均会产生影响。此外，在结构种施加不同的激励形式也是研究重点之一。根据不同场合的需要，选择不同形式的排列方式或激励形式，以实现更佳的聚能效果。

2.5.1 多声学黑洞间隔距离对能量聚集的影响

前文分别从几何声学 and 有限元法两个角度论述了声学黑洞结构的聚能特性，为了进一步探究由多个声学黑洞所构成的模型在弯曲波种的约束和能量聚集潜能，本小节以两个相同规格的声学黑洞嵌入薄板作为研究对象进行数值模拟研究。由于在薄板中嵌入多个的声学黑洞相比嵌入单个声学黑洞可以减轻薄板的质量和刚度，进而影响声学黑洞结构的聚能效果。在此设计了由三种不同间距 ($d_1 > d$, $d_2 > d$, $d_3 > d$) 的阵列排布方式组成的模型 ($d = 2 \times r_2$)，如图 2.11 所示。

在频域研究下，在声学黑洞薄板的左侧施加垂直于薄板 1N 的激励力，以频率范围从 0 至 3000Hz，步长为 20Hz 分别对其进行研究比较分析。如图 2.12 (a)-(d)所示，是通过仿真计算获得的三种不同间距结构所对应 740Hz, 1480Hz, 2200Hz, 3000Hz 频率下的位移大小分布变形图。由图中可以看出当弯曲波进入

薄板后，以一定的波速继续往声学黑洞区域传播，因受声学黑洞剪裁特性的影响，使得弯曲波在进入该区域后波速减小同时振幅增大，首先在第一个声学黑洞区域内实现了能量聚集。随后，未被聚集的波将继续传递至下一个声学黑洞区域，于是，剩余的波将在第二个声学黑洞区域内实现聚集效果。最终未被两个声学黑洞所吸收的波将会传播至薄板的右边界，并被完美匹配层所吸收。

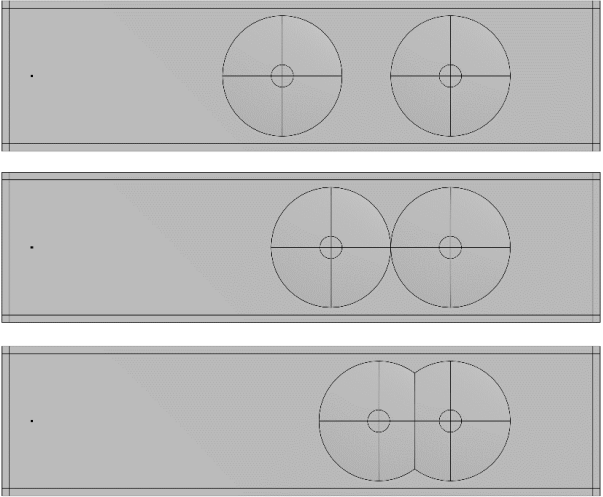


图 2.11 两个不同的间隔距（ $d_1 > d$ ， $d_2 = d$ ， $d_3 < d$ ）声学黑洞结构示意图

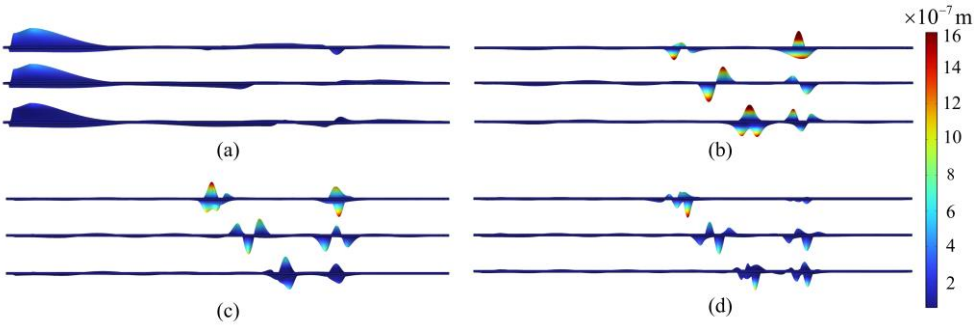


图 2.12 模型中两个声学黑洞不同间距分别在（a）740Hz
（b）1480Hz（c）2200Hz（d）3000Hz 横切面位移大小示意图

选取以上三种不同间距的结构在驱动频率（1520Hz）时的位移大小平面图，如图 2.13 所示，可以看出声学黑洞结构对弯曲波的约束行为随着两个声学黑洞的间隔距离的变化而变化。当两个声学黑洞处于相离时（ $d_1 > d$ ），第二个声学黑洞区域所捕获的波和能量更多；当两个声学黑洞处于相交时（ $d_2 = d$ ），第一个声

学黑洞区域获得更多的能量；当声学黑洞处于相切时 ($d_3 < d$)，前后两个声学黑洞的能量聚集效果相似。而图 2.13 (b) 则是在 1520Hz 频率下沿图 (a) 红色中心水平虚线的位移量示意图。考虑到声学黑洞结构的空间效率和能量约束的均匀性，可以使不同间距的结果在特定的频率段具有不同的能量聚集优势，这可能与两个声学黑洞之间的耦合效应和模态行为有关。

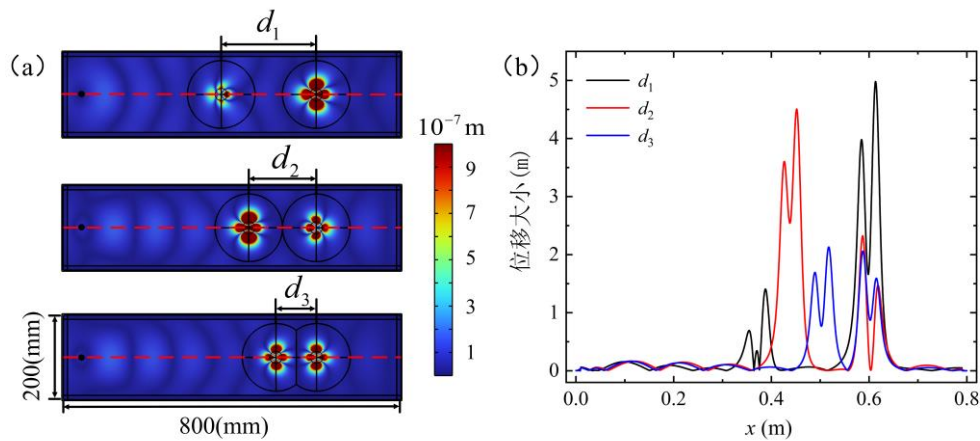


图 2.13 (a) 1520Hz 时两个声学黑洞之间不同间距的位移图, (b) 在 1520Hz 时沿图 (a) 中红线中心水平虚线的位移曲线图

从图 2.12 和图 2.13 可以看出在能量聚集和波动控制方面，两个声学黑洞阵列排布薄板的振动聚能效果是优于单个声学黑洞薄板的。导致的原因可能是，两个阵列排布的声学黑洞可以实现对振动波捕获的累积效应，通常在较低的频率段限制了更多的共振，在高频段实现了更多波的捕获。其中，两个声学黑洞之间的距离为各种不同的机械能量约束特性提供了一定的自由度，从而达到对能量收集优化的效果。

2.5.2 多声学黑洞排列对能量聚集的影响

经过理论和仿真计算数据对比研究发现，在薄板中嵌入两个声学黑洞的结构比仅嵌入一个声学黑洞的结构在能量聚集效果上表现更为明显，而与均匀厚度铝薄板结构相比，无论是多个还是单个声学黑洞的能量聚集效果也都有显著的差异。另外，根据起始频率公式可知，不同规格的声学黑洞结构会对波的聚集效果产生影响，因此考虑当存在两个不同规格的声学黑洞嵌入薄板中时，是否会达到拓宽

频率以实现更大的能吸收能量的效果。此处设计将两个不同规格并处于相离状态的声学黑洞水平嵌入板中，分别考虑距离激励点是先大后小，先小后大两种排布情况，并对其结构模型的能量聚能效果进行研究分析。

建模中平板材料选用铝材，相应材料参数见表 2.1，铝薄板的大小设计为 $0.8\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.004\text{m}$ ，铝薄板的四周边界设为完美匹配层以降低弯曲波反射对研究结果产生影响。两个声学黑洞半径分别为 $r_1 = 0.08\text{m}$ ， $r_1' = 0.07\text{m}$ ，截断厚度均是 h_0 ，截断厚度的中心圆台半径均为 r_2 ，在厚度变化的区域均以幂指数为 2 进行变化的，涉及参数满足前文关于声学黑洞结构的函数表达式。在结构中距离左边缘为 0.04m 处的表面施加一个垂直于板激励力为 1N 的力，网格划分为超级细，完美匹配层选择单元数为 8 的扫描，在 $0 \sim 3000\text{Hz}$ 频率范围内，以步长 10Hz 进行研究分析。

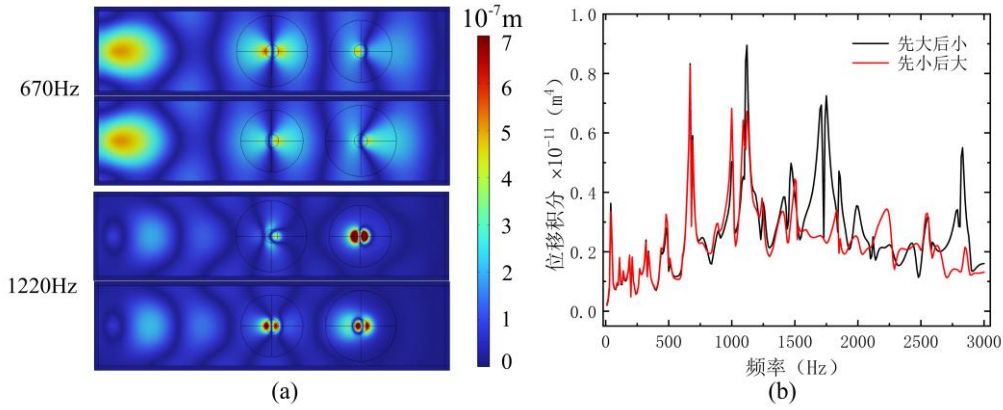


图 2.14 (a) 一大一小两个声学黑洞在 730Hz、1500Hz 的位移大小云图; (b) 由一大一小两个声学黑洞组成的结构的积分位移曲线图

如图 2.14 所示，分别是两种不同结构中对声学黑洞区域进行的位移大小云图与积分位移曲线图，从图中可以看出在 730Hz 以下的频率范围内两种结构模型的曲线图的起伏几乎重合，在 730Hz 到 1500Hz 频率范围内两种模型结构的积分位移的曲线开始出现差别但是曲线的起伏方向大致相同。并且两结构分别在 670Hz、1220Hz 左右出现了积分位移的峰值 $0.83 \times 10^{-11}\text{m}^4$ 、 $0.90 \times 10^{-11}\text{m}^4$ 。在 1500Hz 以上的频率范围内，可以明显观察出在面对相同的激励力时，两种不同情况的模型之间存在区别。随着频率的不断增加，由先大后小排列的两个声学黑洞构成的结构与由另外一个由先小后大两声学黑洞排列构成的结构的位移积分

曲线差距也不断地扩大。

当弯曲波在传播时，波的能量会分别被较大和较小的两个声学黑洞所吸收，并且这两个声学黑洞之间结构会发现耦合部分会出现抵消现象。因此，图 2.14 中所观察到的现象出现的原因可能是，当弯曲波从同一位置开始向声学黑洞区域传播时，大部分能量将被靠近激励源的第一个声学黑洞所吸收，没有被吸收的才能继续往后经过耦合抵消，并传至第二个声学黑洞，而由于较大的声学黑洞的起始频率以及结构参数的原因，导致较大的声学黑洞可以在同一位置可以吸收更多的波。因此，当声学黑洞排列为先大后小时，能量被吸收的情况相比先小后大的较多。

2.5.3 激励形式对聚能效果的影响

本文已从时域和频域两个角度证明了嵌入薄板中声学黑洞的结构对能量聚能是有影响的，并研究了板中存在两个以上的声学黑洞时，保持其他的条件均不发生改变的前提下，观察声学黑洞结构排布对能量聚集的影响。以上研究均是在对声学黑洞结构进行研究。本文旨在设计一个适用实际生活中的声学黑洞结构模型，目的是对可再生能源进行转换使其能源可以循环利用，并减少污染能源的存在。但事实中，声学黑洞结构的激励源存在于各种角度或是任一形式，外部的激励源并非总是被限制在结构的中心线上。因此，在保持结构参数和排列形式不变的前提下，提出在相同规格的声学黑洞中采用不同形式的激励源，探究激励源的改变是否会对声学黑洞能量聚集效果产生影响。

在频域研究中，以铝板薄板中嵌入一个声学黑洞为例，在结构的四周边缘处设置完美匹配层，使达到边缘的波不再反射从而模拟无限大的结构，结构参数详见如表 2.1。如图 2.15 (a) 是针对三个模型施加相同垂直于板面的激励力为 1N 的激励，均是在距离左边界 0.04m (第一种位于板的中心水平线上的激励点、第二种位于板的左上角上的激励点、第三种垂直于中心水平线上的线激励) 的情况，从激励频率范围 0~3000Hz，步长 10Hz 进行研究。图中 (b) - (c) 分别是相同模型在 1200Hz 和 2200Hz 时，不同形式激励的弹性应变密度示意图。从图中可以观察到，无论激励形式如何，都能实现声学黑洞能量聚集的效果。需要特别注意的是，通过图中红线虚线所标出的大致区域，可以看出波在结构中的传播过程。

当点激励处于中心水平线上时，波相对于声学黑洞区域的传播会更加明显，使得声学黑洞受到波的影响范围更加广。相比之下，位于左上角的激励导致声学黑洞下方向的区域波的传播纹路会明显较弱，从而聚能情况略显不足。此外，设置垂直于中心水平线的激励线所施加力的效果略弱于第一种激励情况，但是又强于第三种激励情况的。

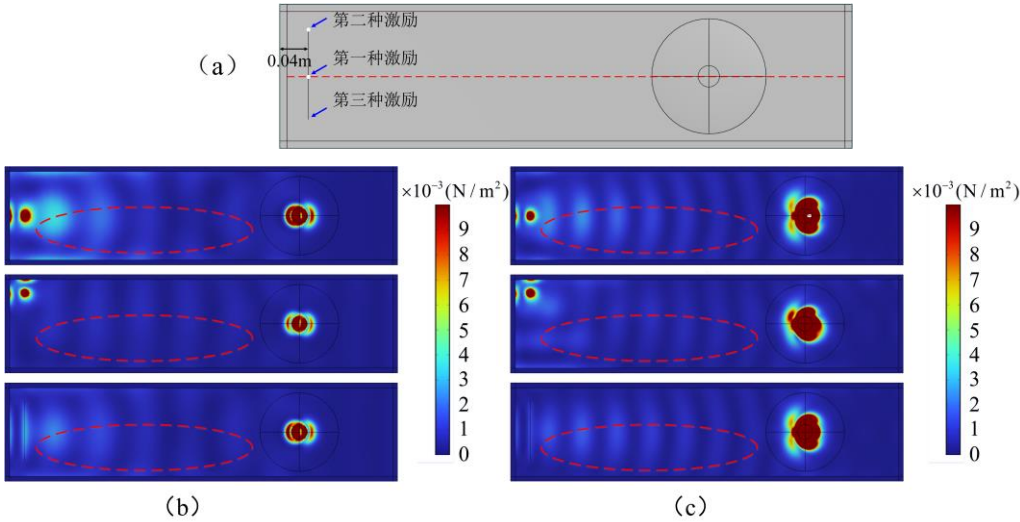


图 2.15 (a) 声学黑洞结构受到三种不同形式的激励方式； (b) 和 (c) 分别在 1200Hz、2200Hz 受到三种激励方式的弹性应变密度云图

针对不同形式的激励力，观察结果显示第一种激励方式对声学黑洞在聚集效果方面更为优越，到那时目前仍缺乏确切的数据用于优劣的比较。因此，本研究通过对声学黑洞结构区域的进行位移积分并进行分析，如图 2.16 所示，该图展示了施加三种激励方式后积分位移的变化曲线，以探究随频率变化的规律。在频域范围内，三中激励形式对薄板的聚集情况十分相似。然而，第一种激励形式位于板中心水平面的激励点的最大位移达到了 $32.1 \times 10^{-13} \text{m}^4$ ，第二种激励形式位于板中左上角激励点的最大位移达到 $27.4 \times 10^{-13} \text{m}^4$ ，第三种激励形式垂于中心水平面的激励点的最大位移达到 $30.4 \times 10^{-13} \text{m}^4$ 。在整个研究频率范围内，第一种位于中心水平线上的激励点所引发的位移是三种情况中最大的。相反，第二种位于板中左上角的激励点所引发的位移是三者情况中最小的。这一结果与之前图 2.15 弹性应变能云图对波传播路径进行分析得出的结论相一致。造成第三种垂直于中心水平面的激励线在积分位移上处于三种情况中间水平的原因可能是在该激励线

上的力相同，形成的波水平向声学黑洞区域传播，当到达声学黑洞附近区域时，由于结构按幂函数的剪裁的原因，使得原位置上的波与附近波发生叠加，出现相消或者是相加的情况。

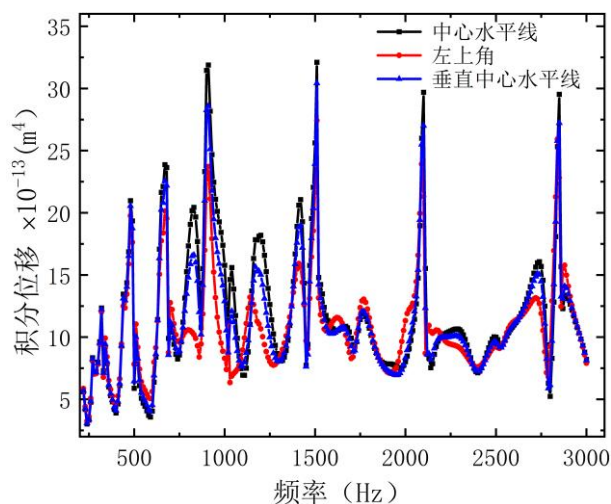


图 2.16 同一声学黑洞结构受到三种不同激励形式的积分位移曲线图

研究证明，激励源的形式会对声学黑洞的聚能特性和应用产生影响，选择合适的激励源可以使聚能效果更好。在此频域研究中对声学黑洞施加不同形式的激励均可以使其实现能量的聚集，但是效果会出现略微的差别，当激励点是在板的中心水平线上时聚能效果最佳。

2.6 本章小结

本章先是对二维声学黑洞结构进行建模，使用几何声学理论和有限元方式论证声学黑洞的聚能特性。在时域研究中，构建的模型主要是在右侧设置低反射边界条件，反之在频域研究中，则是在结构的四周边界设置完美匹配层。基于对弯曲波传播特性的理解，有效地将声学黑洞结构进行网格划分。随后，采用相同规格的声学黑洞和均匀厚度铝薄板进行比较分析，通过弹性应变能密度云图以及特定时间或频率下的位移大小曲线图，证明声学黑洞效应。由于现实应用范围，所以需考虑如何提升声学黑洞聚能效果。针对此问题，本文提出利用两个相同规格声学黑洞构成的阵列结构，进行间距的优化设计或不同规格两个结构先后排列情况的研究，或者是从改变激励源形式角度出发。

结果表明，不同间距的结构在特定的频率段都会具有聚能优势，两个声学黑洞薄板比单个的声学黑洞薄板具有更好的能量聚集。并且在规格不同的声学黑洞排列时，距离激励源先大后小的排列方式也是具有更明显的聚能效果；当然激励源的研究中表明了位于结构的中心处的激励点时由于其他两种形式的。因此，可以根据实际需要选取更合适的装置。

第3章 基于声学黑洞效应的能量回收装置

3.1 引言

声学黑洞效应是由结构厚度按照指定幂律函数连续变化,导致结构阻抗发生变化的结果。这种变化使得弯曲波在声学黑洞结构中传播时,波的群速度和相速度发生改变,从而实现了波在声学黑洞截断区域的聚集,达到对能量的吸收效果。然而,在实际工程中,声学黑洞结构的厚度不可能减小至零,从而存在的截断厚度,会导致波的反射系数增加。为了实现能量回收,可以在声学黑洞截断区域粘贴压电材料,将聚集的能量转换为电能。此步骤实现了对能量的转换。这与粘贴的阻尼材料实现降噪的思路相反,能量回收主要是尽可能地减少能量的损耗从而提高能量转换效率。

本章首先概述了压电能量回收系统的基本原理,包括压电效应和压电方程;接着从几何声学角度深入分析声学黑洞效应的产生机制。以单个二维声学黑洞为例,运用有限元法分析其应变力与模态振型,证明了声学黑洞具有能量聚集的特性。此外,作为一种新型能源利用技术,通过改变结构或压电材料来提高声学黑洞的吸收效率和能量转换能力,以实现降低成本、提高使用时间,并拓展其广泛应用前景和相对于其他技术的优势。

3.2 压电振动能量回收基本原理

上一章已经根据能量回收需求的不同情况,分别针对电磁式、静电式、压电式三种能量采集方式进行了分析。针对本文研究不提供额外的电源、能适用于微型机械结构中且具有较高的转换效率等要求,所以选择压电式能量回收。对结构而言,传统的单悬臂梁结构是最常见的压电俘能装置,是由悬臂梁的根部粘贴压电薄膜和质量块组成,其结构简单,在受到外部激励后,振动的应变变大,有较高能量转换效率。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/208121012131007032>