

基于声学黑洞的压电俘能结构系统仿真与优化

汪 恒, 郑伟光, 何仕明, 陈姗姗

(桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:薄板结构中的声学黑洞(ABH)可降低弯曲波的相速度,同时增大振幅,在声学黑洞区域产生高能量密度和能量聚集效应,与压电俘能结构相结合,可提升能量转化效率。该文首先建立了基于声学黑洞的压电俘能结构的有限元模型,对比分析了均匀板及声学黑洞结构的动能密度及电压输出特性;基于有限元法推导了压电振子等效电路模型,并通过 Multisim 软件建立压电俘能全系统等效电路耦合模型,确定了负载电路最优电阻,提高系统俘能效率。

关键词:声学黑洞;弯曲波;能量聚集;等效电路;压电俘能

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.05.026

System Simulation and Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting Structure Based on Acoustic Black Hole

WANG Heng, ZHENG Weiguang, HE Shiming, CHEN Shanshan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin university of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The acoustic black hole (ABH) in the thin plate structure can reduce the phase velocity of the curved wave, increase the amplitude, and generate high energy density in the acoustic black hole region and energy aggregation effect. Combining ABH with piezoelectric energy harvesting structure, the energy conversion efficiency can be improved. In this paper, the finite element model of piezoelectric energy harvesting structure based on acoustic black hole is established firstly. The kinetic energy density and voltage output characteristics of uniform plate and acoustic black hole structure are compared and analyzed. Based on the finite element method, the equivalent circuit model of piezoelectric vibrator is derived, and the equivalent circuit coupling model of piezoelectric energy harvesting system is established by multisim software. The optimal resistance of the load circuit is determined and the energy harvesting efficiency of the system is improved.

Key words: acoustic black hole(ABH); flexural wave; energy accumulation; equivalent circuit; piezoelectric energy harvesting

0 引言

随着各种无线设备自供能的需求,从环境中采集振动能量成为国内外学者研究的热门方向^[1]。由于振动产生的能量分散,大小不一,如何有效集中采集环境中的振动能成为研究的关键。1988年, Mironov^[2]提出的一种用来实现对弯曲波振动控制的“声学黑洞(ABH)”效应,通过结构阻抗的变化,使得结构中波的相速度发生变化,在结构特定区域实现波的能量聚集^[3]。声学黑洞将物

理学中的黑洞概念引入到声振领域,并在振动与噪声控制及能量收集领域得到广泛的关注^[4-7]。在压电材料与声学黑洞结合方面, Remillieux 等^[8]将压电分流阻尼技术引入声学黑洞结构,通过采用负电容电路,实现了全频段振动控制; Zhao 等^[9]采用有限元法对压电俘能结构进行了频域稳态分析及时域瞬态分析,结果表明,与均质板结构相比,压电俘能结构具有声学黑洞结构的压电换能器在宽频范围内有更高能量转化效率。

收稿日期:2019-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405093);广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA281276, 2018GXNSFBA281012);校级创新基金资助项目(2019YCX008)

作者简介:汪恒(1993-),男,安徽安庆人,硕士生,主要从事振动噪声控制性能的研究。通信作者:郑伟光(1984-),男,副教授,硕士生导师。E-mail: weiguang.zheng@foxmail.com。

目前,很少有学者对具有声学黑洞结构的压电俘能系统建立系统电路仿真及负载电阻优化进行研究。本文首先采用有限元法建立具有声学黑洞的薄板结构压电耦合模型,对比分析了均匀板及声学黑洞结构的动能密度及电压瞬态输出特性,推导了压电振子等效电路模型,最后在 Multisim 软件中建立压电俘能全系统等效电路耦合模型,确定外负载最优电阻值,提高系统转换效率。

1 声学黑洞结构

在一维结构变化的均匀介质中,弯曲波动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[D(x)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right]+\rho h(x)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0 \tag{1}$$

式中: w 为结构横向位移; $D=Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ 为弯曲刚度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比; ρ 为密度; h 为结构厚度; t 为时间变量。

对任意一点, x 波传播的振幅可表达为复数形式,即

$$U(x)=A(x)e^{i\Phi(x)} \tag{2}$$

其中:

$$\Phi=\int_0^x k(x)dx \tag{3}$$

$$k(x)=12^{1/4}k_p^{1/2}(h(x))^{-1/2} \tag{4}$$

式中: Φ 为累积相位; $k_p=\omega/c_p$ 为均匀板的波数。

对于一个厚度呈现指数形式变化的结构为

$$h(x)=\epsilon x^m \tag{5}$$

其弯曲方程为

$$\nabla^2(D\nabla^2 w)-(1-\nu)\left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-2\frac{\partial^2 D}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)=\rho h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{6}$$

假设不考虑结构的转动惯量与剪切效应,波数 k 为

$$k=\left(\frac{\rho h\omega^2}{D}\right)^{1/4} \tag{7}$$

式中 ω 为角频率。根据 $c=\omega/k$ 可得弯曲波的相速度为

$$c=\sqrt{\omega h}\left[\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}\right]^{1/4} \tag{8}$$

将薄板按照一定指数进行裁剪,使其厚度变化满足 $h(r)=\epsilon r^2(m\geq 2)$, 即可形成声学黑洞。在二维声学黑洞中随着厚度的减小,弯曲波的相速度

也逐渐减小产生能量聚集效应。当指数 $m\geq 2,\Phi$ 区域将无限大,波无法到达边界也无法反射回来,因此弯曲波在边缘产生聚集。

2 声学黑洞型压电俘能器结构

实际薄结构中的厚度不会减小至 0,黑洞结构中心存在截断。本研究在声学黑洞薄板中心留有一厚度 L 、半径 r_0 的圆形平台,黑洞结构的幂指数变化为 $h(r)=5\times 10^{-4}\times r^2,(r_0\leq r\leq 100)$, 结构其他均匀处厚度不变。在板结构的左边界进行约束,距离固定端边界 L_1 处的均匀板面上施加点载荷 $F=A\sin(2\pi ft)$, 以距离固定边界 L_2 处的薄板黑洞结构中心下表层粘贴半径 r_0 、厚 l_3 的陶瓷压电片 PZT-5H。

3 有限元分析

3.1 参数设置

本研究的薄板材料选用铝板,压电片材料选用 PZT-5H,结构尺寸及材料参数如表 1 所示。假设基体部分与压电层为理想粘结,进行良好的结构应变传递。

表 1 结构尺寸及材料参数

参 数	数 值
铝板密度/(kg·m ⁻³)	2 690
铝板弹性模量/GPa	70
铝板泊松比	0.345
铝板长度/mm	360
铝板厚度/mm	260
铝板宽度/mm	5
PZT-5H 密度/(kg·m ⁻³)	7 500
PZT-5H 弹性模量/GPa	66
PZT-5H 泊松比	0.3
r_0 /mm	90
r_1 /mm	30
l_0 /mm	0.05
l_1 /mm	75
l_2 /mm	225
l_3 /mm	0.2

3.2 仿真分析

通过有限元软件在 0~1 ms 时间段进行仿真,每隔 0.05 ms 选取薄板在应力云图(见图 1、2)及动能密度图(见图 3)的周期性变化。

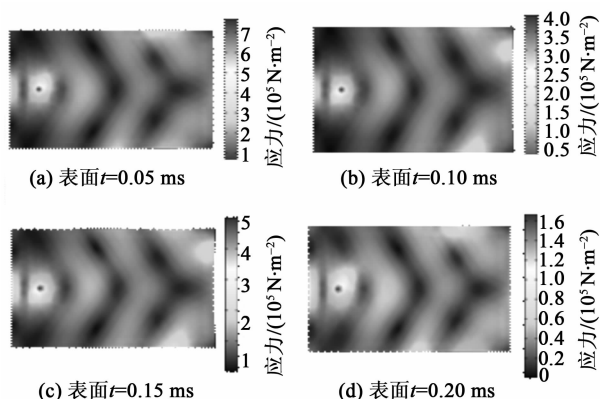


图1 均匀薄板的应力云图

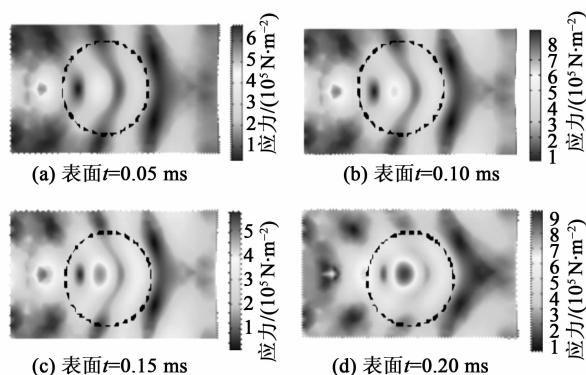


图2 黑洞结构薄板应力云图

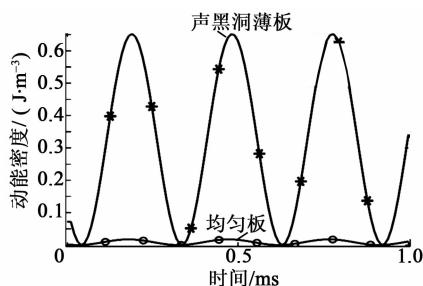


图3 薄板动能密度对比图

在建好的模型中分别在两块薄板上选取固定位置,其三维坐标为(75,130,5),施加幅值为3 N的正弦激励。由图1~3可看出,声学黑洞结构薄板在黑洞中心部分有较大的能量聚集效应。选取薄板中心的固定位置(225,130,0)进行动能密度比较,均匀板上动能密度峰值为 0.0174 J/m^3 ,而声学黑洞结构板的能量密度峰值为 0.652 J/m^3 ,从图3可发现,在 $0 \sim 1 \text{ ms}$ 时均匀板和黑洞结构的薄板动能密度呈现周期性变化,具有声学黑洞的动能密度明显高于均匀板的能量密度。可见,在点载荷的激励下弯曲波进入黑洞结构区域后波长压缩,波动幅度增大,振动能量在结构中心进行累积,形成声学黑洞结构薄板所示的能量集中,图1~3给出了具体验证。

3.3 压电俘能器输出电压分析

在两块不同结构的薄板表面特定位置粘贴陶瓷压电片,在不考虑电阻值、压电片形状大小等其他变量的影响下,进行有限元软件的多物理场耦合仿真,两块薄板的输出电压图如图4所示。

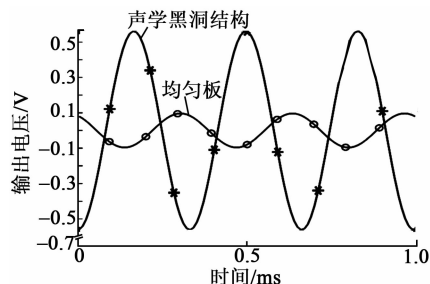


图4 时域下不同模型的输出电压

在相同位置给2块薄板施加同样的激励,在 $0 \sim 1 \text{ ms}$ 内对其输出电压进行分析发现,2块薄板结构输出的电压同样呈周期性变化,选取2块板的输出电压峰值点,均匀板输出的最大电压为 0.096 V ,声学黑洞结构薄板输出电压峰值达到 0.562 V 。通过对比,声学黑洞结构薄板的压电振子输出电压较均匀板提高了近6倍。

4 压电俘能器全系统耦合

本文通过对压电振子的结构进行设计,提高了压电振子的电压输出效果,进而提高系统的俘能效率。但实际应用中,压电俘能器是由压电振子结构和能量俘获接口电路共同发挥作用。由于压电片存在逆压电效应,外部电路会对结构的振动响应和动力学特性产生影响,同时,压电振子输出的交流电压对电路中转化的直流电压产生影响。因此,本研究为了提高压电俘能器的全系统效率,将压电振动能量俘获系统看成一个整体进行优化设计,建立压电振子等效电路模型和压电俘能全系统等效电路耦合模型^[10]。

4.1 压电振子等效电路模型

耦合建模中常用的理念方法是通过机械量与电路参数的转化来表征压电振动产生的能量。如图5所示,分别将均匀板和具有声学黑洞结构的新型压电振子模型机械参数进行等效电路模型转化。

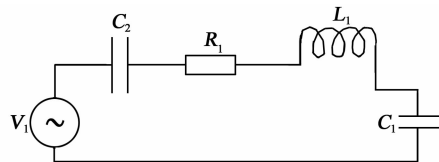


图5 压电振子等效电路图

求解等效电路模型中的参数 V_1 、 R_1 、 C_1 、 L_1 、 C_2 是本研究的关键。目前有理论推导、实验检测和有限元仿真 3 种方式。理论推导方法要求几何形状规整,实验测量方法复杂,过程要求高,且有些参数不能直接测量得出。鉴于前面两种方式的局限性,本研究采用有限元仿真法能有效适用于几何形状不规则的压电振子模型,且能快速准确计算出等效电路参数。

利用现有的压电振子模型,通过 Comsol 软件对其进行短路共振频率 $f(C_1)$ 、开路共振频率 $f(C_2)$ 、电荷 Q_0 、短路电压 $V(C_1)$ 、开路电压 $V(C_2)$ 仿真计算。

1) 压电振子短路条件下的共振频率。在仿真软件中将压电振子的输出端电路短路。在 Comsol 中进行特征值分析,可得出短路共振频率 $f(C_1)$,且

$$f(C_1) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (9)$$

2) 压电振子开路条件下的共振频率。在仿真软件中将压电振子的输出端不接任何负载构成开路。在 Comsol 中进行特征值分析,可得出开路共振频率 $f(C_2)$,且

$$f(C_2) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_1 C_1 C_2}} \quad (10)$$

3) 在上述模型中,将压电振子在输出端不接任何负载构成开路,在压电振子 2 个电极上施加直流电压 V_0 ,计算产生的 Q_0 ,即

$$Q_0 = (C_1 + C_2) V_0 \quad (11)$$

4) 在上述模型中,压电振子自由端分别施加两种简谐载荷,即 $F_1 = f_1 \cos \omega_1 t$, $F_2 = f_2 \cos \omega_2 t$,得出压电振子相应的开路电压幅值 $\hat{V}_{C_1}$ 、 $\hat{V}_{C_2}$,即

$$\frac{1}{\hat{V}_{C_1}} = \frac{|R_1 + j[\omega_1 L_1 - 1/(\omega_1 C_1) - 1/(\omega_1 C_2)]|}{|j/(\omega_1 C_2)|} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\hat{V}_{C_2}} = \frac{|R_1 + j[\omega_2 L_1 - 1/(\omega_2 C_1) - 1/(\omega_2 C_2)]|}{|j/(\omega_2 C_2)|} \quad (13)$$

由式(9)~(11)可计算 C_1 、 L_1 、 C_2 。由式(12)、(13)可得:

$$V_1 = \frac{|R_1 + j[\omega_1 L_1 - 1/(\omega_1 C_1) - 1/(\omega_1 C_2)]|}{|j/(\omega_1 C_2)|} \hat{V}_{C_1} \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{|R_1 + j[\omega_2 L_1 - 1/(\omega_2 C_1) - 1/(\omega_2 C_2)]|}{|j/(\omega_2 C_2)|} \hat{V}_{C_2} \quad (15)$$

由(14)、(15)可计算出 V_1 、 R_1 。

a. 均匀薄板。通过进行 Comsol 仿真计算得出均匀板上的压电振子短路共振频率为 1 921.9 Hz、开路共振频率为 1 924 Hz,在压电振子电极施加 5 V 直流电压,计算产生电荷量 $Q_0 = 1.1 \times 10^{-5}$ C。在压电振子自由端施加载荷 $F_1 = 10 \cos(1\,928.6 \times 2 \times \pi \times t)$, $F_2 = 10 \cos(1\,930 \times 2 \times \pi \times t)$,得到相应的 $\hat{V}_{C_1} = 0.2$ V, $\hat{V}_{C_2} = 0.198$ V。

b. 声学黑洞结构薄板。通过进行 Comsol 仿真计算得出均匀板上的压电振子短路共振频率为 1 810 Hz、开路共振频率为 1 811.4 Hz,在压电振子电极施加 5 V 直流电压,计算产生电荷量 $Q_0 = 1.1 \times 10^{-5}$ C。在压电振子自由端施加载荷 $F_1 = 10 \cos(1\,810 \times 2 \times \pi \times t)$, $F_2 = 10 \cos(1\,811.4 \times 2 \times \pi \times t)$,得到相应的 $\hat{V}_{C_1} = 0.582$ V, $\hat{V}_{C_2} = 0.57$ V。

最后根据式(9)~(15)得出压电振子等效电路模型,如表 2、3 所示。

表 2 均匀板压电振子等效电路参数估计值

C_1/nF	R_1/Ω	L_1/H	$C_2/\mu\text{F}$	V_1/V
4.82	508.79	1.42	2.21	2.76

表 3 黑洞结构薄板压电振子等效电路参数估计值

C_1/nF	R_1/Ω	L_1/H	$C_2/\mu\text{F}$	V_1/V
3.4	402.50	2.27	2.21	5.96

4.2 基于 Multisim 的全耦合等效电路

压电振子在振动产生电能的过程中,外部电路负载的大小会影响压电振子和电路的耦合,进而影响压电俘能器整体的效果。本研究通过在 Multisim 建立外接全桥整流电路的振动俘能等效电路模型,重点分析压电俘能系统外负载电阻对能量转换率的影响,取 $0 \leq R_2 \leq 10\,000 \Omega$,确定负载的最优取值范围。图 6 为压电振子俘能系统等效电路图。

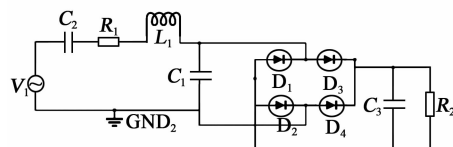


图 6 压电振子俘能系统等效电路图

在外接全桥整流电路,通过仿真可得上述两种压电俘能装置的俘获功率与负载电阻值的关系,如

图 7 所示。

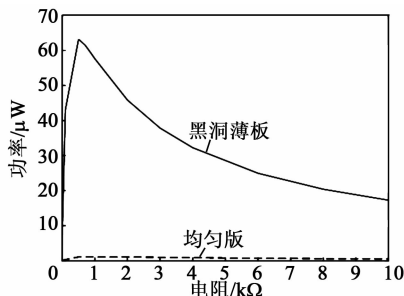


图 7 系统俘能功率与外负载的关系

由图 7 可看出,在进行均匀板等效电路仿真时,当外部电阻 $R_2 \approx 1\ 500\ \Omega$,系统的最优俘能效率可达 $1.093\ \mu\text{W}$;在进行声学黑洞结构薄板等效电路仿真时,当外部电阻 $R_2 \approx 510\ \Omega$,系统的最优俘能效率可达 $63.098\ \mu\text{W}$,声学黑洞结构薄板的压电俘能装置系统的转换效率较均匀板压电俘能装置有显著提高。

5 结束语

本文将声学黑洞结构引入到压电俘能器中,通过理论及仿真分析了弯曲波在黑洞结构中聚能效果。在时域上对比分别研究了两类俘能装置的表面应力云图、动能密度图及输出电压图。结果表明,具有声学黑洞结构的新型压电俘能器能够有效提高薄板的振动能量收集和压电能量的转换。同时,利用新型压电俘能器建立全系统等效耦合电路模型,进行电路仿真分析,确定外负载电阻的最优取值范围,提高系统能量的转换效率。本研究的声学黑洞结构俘能装置结构简单,造价低,聚能效果好。结合目前微电子器件和传感器的自供能需求,声学黑洞结构俘能器在实际工程应用中具有极大的实用价值。

参考文献:

[1] LU Chao, VIJAY R, KAUSHIK R. Efficient design of

microscale energy harvesting systems[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2011, 1(3): 254-266.

[2] MIRONOV M A. Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval[J]. Sov Phys Acoust, 1988(34): 318-319.

[3] 黄薇, 季宏丽, 裘进浩, 等. 二维声学黑洞对弯曲波的能量聚集效应[J]. 振动与冲击, 2017, 36(9): 51-57.

[4] CONLON S C, FAHNLIN J B, FABIO S. Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(1): 447-447.

[5] 贾秀娟, 杜宇, 于野, 等. 声黑洞理论应用于板类结构的轻量化减振分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(3): 434-440.

[6] VICTOR V. Krylov recent developments in the theory and applications of 'Acoustic Black Holes' [J]. IEEE Trans Ultra-son Ferroelectr Freq Control, 2014, 61(8): 30-36.

[7] CHONG B M P, TAN L B, LIM K M, ET AL. A review on acoustic black-holes (ABH) and the experimental and numerical study of ABH-featured 3D printed beams[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2017(9): 1750078.

[8] REMILLIEUX M C, ANDERSON B E, LE BAS P Y, et al. Improving the air coupling of bulk piezoelectric transducers with wedges of powerlaw profiles: A numerical study[J]. Ultrasonics, 2014, 54(5): 1409-1416.

[9] ZHAO L, CONLON S C, SEMPERLOTTI F. Broad-band energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 065021.

[10] 陈仲生. 压电式振动能量俘获理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 177-184.