

# 直管谐振式低频压电声能量回收系统

顾 聪, 陈远晟, 王 浩, 陈 威

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 为了高效回收环境中的声能, 基于阵列式压电换能器、直管谐振腔以及能量回收电路提出了一种声能量回收系统. 当声波进入直管谐振腔, 管中产生谐振驻波作用于压电换能器, 将声能转换为电能. 本文设计了能量回收电路并且进行理论、仿真分析实验研究了压电换能器数量、声波频率、声压级对输出电压的影响, 分析了负载电阻对输出电压及功率的影响. 实验结果表明, 该装置可回收不同频率的声能量, 在声波频率为 96 Hz 时发电效果最优. 当入射声压级为 110 dB 时, 不使用能量回收电路, 输出交流电压有效值最高达 12.9 V, 输出交流功率最高达到 799  $\mu$ W; 使用设计的能量回收电路, 最高输出直流电压为 64.2 V, 最高输出直流功率为 473  $\mu$ W. 该声能量回收系统不仅可以作为声能量采集器, 还能对无线传感节点等独立工作的微型电子系统供电.

**关键词:** 声能量; 阵列式压电换能器; 直管谐振腔; 能量回收电路

**中图分类号:** TM282、TN40 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)10-2071-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.10.026

## Low Frequency Piezoelectric Acoustic Energy Harvest System with Straight Tube Resonance

GU Cong, CHEN Yuan-sheng, WANG Hao, CHEN Wei

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** In order to harvest the acoustic energy in the environment efficiently, an acoustic energy harvesting system is proposed with piezoelectric transducer array, straight tube resonator and energy harvesting circuit. When the acoustic wave transmits into the straight tube resonator, the resonance standing wave is generated in the tube, and excites the piezoelectric transducers; then the acoustic energy is converted into electrical energy. An energy harvesting circuit is designed and analyzed theoretically with simulation. The relationship between the number of piezoelectric chips, the frequency of acoustic waves, the acoustic pressure level and the output voltage is studied with experiments. The output voltage and power are analyzed with the change of load resistance. Experimental results show that the proposed system can harvest the acoustic energy in different frequencies, and the harvested power achieve the maximum at the sound frequency of 96 Hz. Without using the energy harvesting circuit, the maximum output AC voltage effective value is 12.9 V and the maximum output AC power is 799  $\mu$ W at the incident acoustic pressure level of 110 dB. When the proposed energy harvesting circuit is applied, the maximum output DC voltage is 64.2 V and the maximum output DC power is 473  $\mu$ W. The acoustic energy harvesting system can not only harvest acoustic energy, but also can power the micro electronic systems such as wireless sensor nodes.

**Key words:** acoustic energy; piezoelectric transducer array; straight tube resonator; energy harvesting circuit

## 1 引言

随着微型电子系统的快速发展, 目前国际微电子器件研究领域的热点问题就是如何实现能源自供给, 为解决这一热点问题, 广大学者、研究人员提出了声能量回收技术. 声能作为一种清洁的可再生能源, 存在

于各种各样的环境中, 该系统对声能进行回收, 转化为电能, 能对无线传感节点等微小型独立工作的电子系统在工作时进行独立供电, 具有较大的应用前景.

王晓辉<sup>[1]</sup>等提出了一种基于 Helmholtz 共鸣器和圆形压电振子的声能回收装置, 当入射声压级为 94 dB 时可得到的最大输出功率为 12  $\mu$ W. 杨峰<sup>[2]</sup>等研究了一种

基于 Helmholtz 共鸣器,悬臂梁和声波导管的声能回收装置,当声压在 94dB 时,实测最大输出功率为 240 $\mu$ W. Kim<sup>[3]</sup>等人使用了 Helmholtz 共振器和电磁发生器来获取声能,在声压为 140dB 时测量出永磁线圈发电机的输出电压为 4mV. Izhar<sup>[4]</sup>等人使用 Helmholtz 共振器、压电复合板和悬臂梁,可以在不同的共振频率获取声能,当声压为 130dB,声波频率为 1501Hz 时,所产生的最大功率为 214.23 $\mu$ W. Liu<sup>[5]</sup>等人使用 EMHR 进行声能回收,在声压为 160dB 时获得的最大输出功率为 30mW,但是在现实生活中 160dB 的声压比较少见.

本文采用一种基于阵列式压电换能器以及直管谐振腔的声能回收系统,从低频声波中回收声能. 此能量转换结构国内暂无报道,虽然在海外研究中这种能量

转换结构已经相对成熟,但是对此结构的能量回收研究暂无报道. 本文针对低频声能回收,在使用此结构的基础之上,分析了电学性能,设计并分析了能量回收电路,对声能进行高效地回收,研究了使用能量回收电路前后,负载阻值对输出的交流、直流功率的影响,并找到了最优负载.

## 2 声能回收系统原理

本实验使用音箱作为声源,将压电振子竖直固定在直管谐振腔的底部,每隔 5cm 可以固定一个压电振子作为压电换能器,将声能转化为电能,原理图如图 1(a)所示:



图1 声能回收系统原理图

本实验采用 PZT 压电双晶片作为压电振子,规格为 70mm $\times$ 33mm $\times$ 0.6mm,压电振子以串联形式连接,以获得较多电能. 当管内产生谐振驻波时,压电振子受到压力作用,表面产生形变,如图 1(b)所示, $P_1$  和  $P_2$  分别压电振子两侧受到的声压. 由于直管谐振腔足够厚,所以当声波射入管内时,管几乎没有振动,这样可以最大限度地将声能转化为压电振子的机械能,使压电振子产生周期性位移,基于压电双晶片的正压电效应,将机械能转化为交流电能,随后通过能量回收电路可输出直流电能,整体结构框图如图 2 所示:

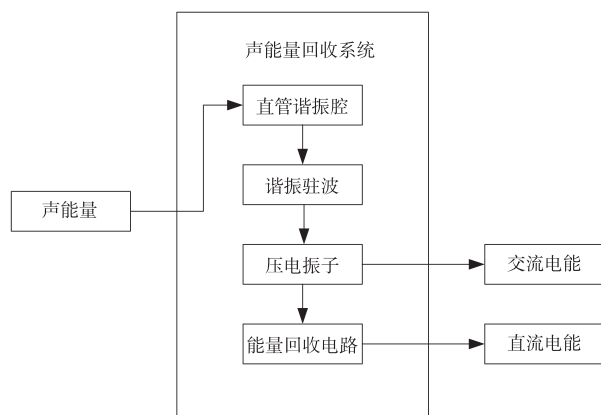


图2 声能回收系统结构框图

当压电振子在谐振驻波作用下产生形变时,其输出电压、功率可通过如下计算表示<sup>[6]</sup>:

$$V_{\text{mag}} = \frac{\omega_n RC_p d_{31} t_p / \varepsilon}{\sqrt{R^2 C_p^2 \omega_n^2 (4\zeta^2 + k^2) + 4\zeta^2 + 4\zeta k^2 \omega_n RC_p}} \times \left( \frac{t_c l^2 b}{6I} \right) \Delta p \quad (1)$$

其中, $R$  为负载电阻, $C_p$  为压电电容, $d_{31}$  为压电常数, $t_p$  为压电材料厚度, $\varepsilon$  为介电常数, $\zeta$  为阻尼比, $k$  为压电耦合常数, $\Delta p$  为压电振子两侧声压差,接下来可得输出功率:

$$P = \frac{V_{\text{mag}}^2}{R} = \frac{(\omega_n d_{31} t_p / \varepsilon)^2 RC_p^2}{\omega_n^2 R^2 C_p^2 (4\zeta^2 + k^4) + 4\zeta^2 + 4k^2 \zeta \omega_n RC_p} \times \left( \frac{t_c l^2 b}{6I} \Delta p \right)^2 \quad (2)$$

当  $\frac{\partial P}{\partial R} = 0$  时,有最优负载使得输出功率最大:

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{\omega_n C_p} \frac{2\zeta}{\sqrt{4\zeta^2 + k^4}} \quad (3)$$

## 3 实验研究与分析

### 3.1 实验方案

本次实验所采用的直管谐振腔,管的左侧开口右侧封闭,上表面可拆卸,方便将压电振子固定在底部以及改变压电振子的数量,管的底部有 8 个基底,用来固定压电振子,基底规格为 3cm $\times$ 1cm $\times$ 3mm,由有机玻璃制成. 管的规格为 6cm $\times$ 8cm $\times$ 45cm,厚度为 8mm,由有机玻璃制成. 压电双晶片两面以并联形式连接,中间的铜片作为负极. 压电振子之间以串联形式连接,以获得较高的电压. 压电振子安装完成之后,将可拆卸式上表

面固定,使用多层胶带将装置密封,尽量减少声能量损失. 音箱作为声源输出不同强度、频率的声波,声源距离直管口部 10cm,示波器用于检测输出电压,分贝仪用于检测声压级,实物图如图 3(a)、(b)所示:

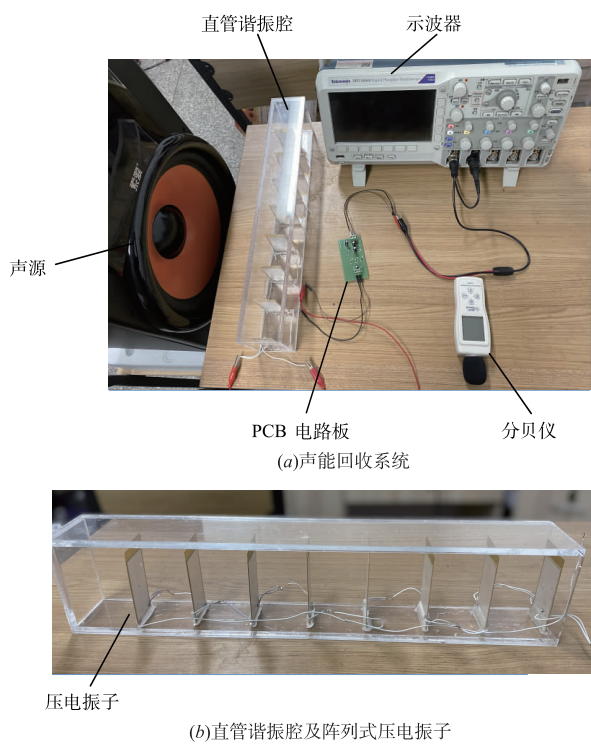


图3

### 3.2 频率、声压级的影响

将第一个压电振子竖直固定在装置内距离开口 3cm 处,调节声压级为 90dB,改变压电振子数量,其开路电压与频率之间的关系如图 4(a) 所示. 实验表明,压电振子数量一定,频率为 96Hz 时,开路电压达到峰值,由此可知该声能回收系统的最佳谐振频率为 96Hz. 当压电振子数量增加时,开路电压也相应地增加. 保持声源位置恒定不变,使得压电振子在稳定驻波中产生振动,音箱通过调节器分别输出声压级为 90dB、95dB、100dB、105dB、110dB 的声波,改变压电振子数量,其开路电压和声压级关系如图 4(b) 所示. 当压电振子数量一定时,该声能回收系统输出电压随着声压级的增大而增大. 当第一个压电振子固定在距离开口 3cm 处,声波频率为 96Hz,声压级为 110dB 时,可输出最高交流电压有效值为 3.57V. 当压电振子数量增加至 8 时,可输出最高交流电压有效值为 12.9V. 由于过多的压电振子会阻碍驻波在腔内的运动,使得后面的压电振子所受压力减小,所以随着压电振子数量的增加,输出电压增幅较小.

### 3.3 交流功率最佳负载

调节声压级为 110dB,将 8 个压电振子固定在基底上,输出端接负载电阻,改变负载阻值大小,求出负载

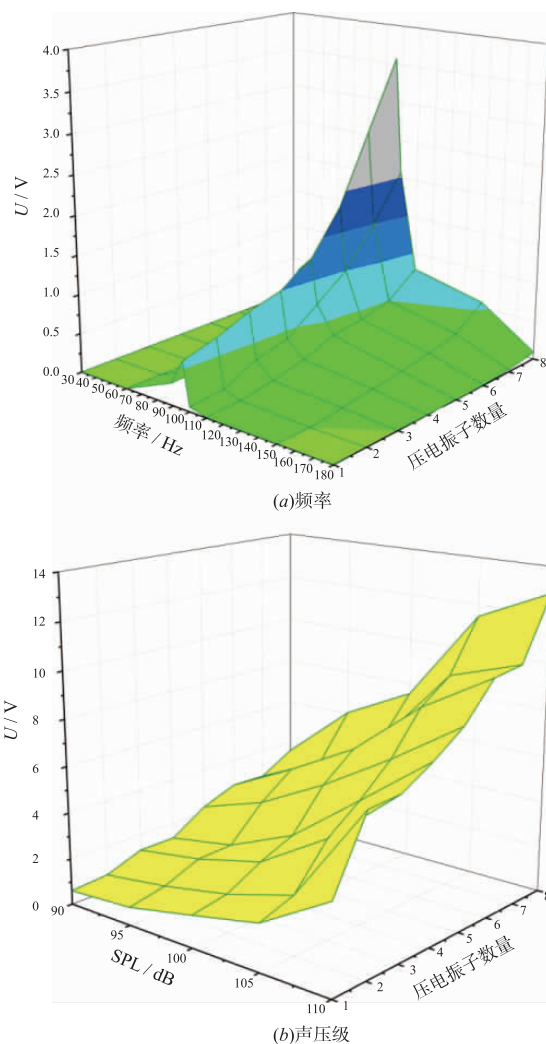


图4 开路电压影响因素

电压在 40s 内的均方根值大小,再由负载电压和负载阻值求得该装置输出的功率,其开路电压和输出功率随负载变化曲线如图 5(a)、(b) 所示. 从图中可以看出,负载电压随负载阻值增加而升高,直至达到开路电压. 而输出功率随着负载阻值增加,存在一个最优负载值,使得输出功率最大,该装置在负载阻值为 70kΩ 时,最高可输出交流功率 799μW.

### 3.4 能量回收电路

为了将输出电压升高以满足更多电子器件的需求,本次实验能量回收电路采用了一种四倍压整流电路,该电路不需要外部供能,在整流的同时能够进行升压. 如图 6(a) 所示,左侧为输入端,右侧为四倍压整流电路,二极管压降为 0.2V,电容值为 22μF,  $U_{in}$  为输入电压有效值,  $U_{max} = \sqrt{2}U_{in}$ .

第一个半周时,  $U_{in}$  上正下负,电流依次流过  $C_1$ 、 $D_1$ ,此时  $C_1$  开始充电,当  $U_{C_1} = U_{max}$  时充电结束. 由于  $D_1$  两端电压相等,所以  $C_2$  不充电.

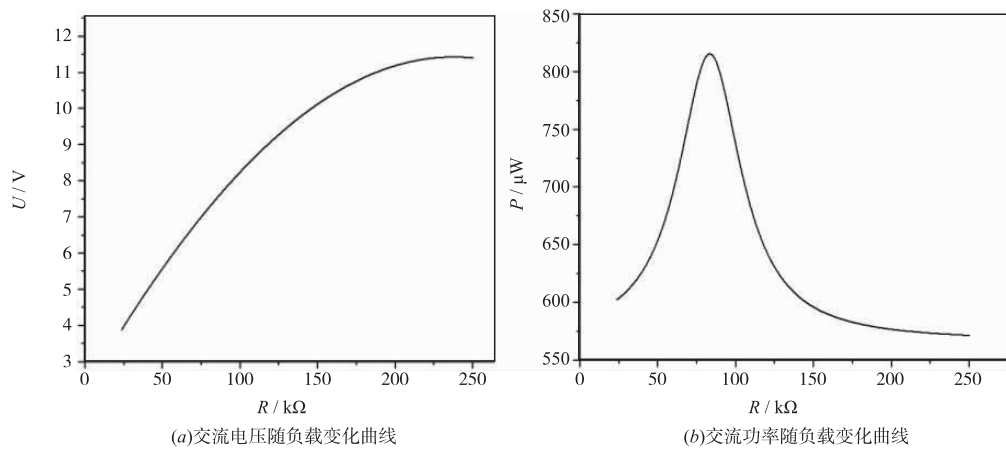


图5

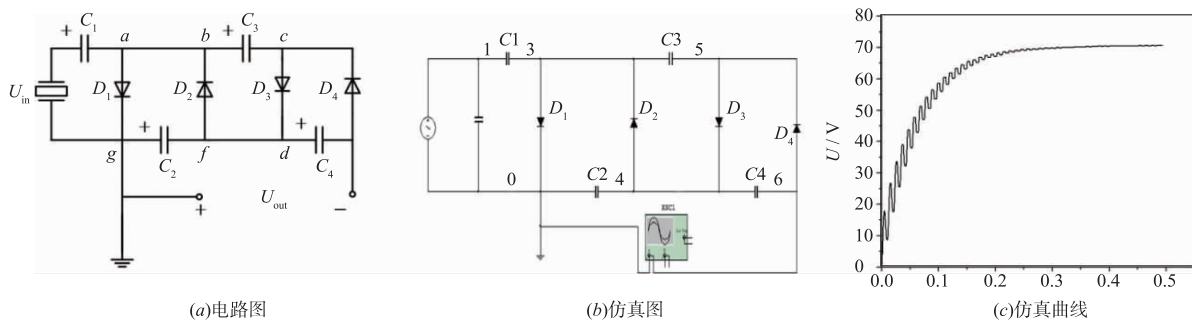


图6 四倍压整流电路

第二个半周时,  $U_{in}$  上负下正, 由于  $D_2$  反向, 所以节点  $a \sim g$  不导通, 电流依次流过  $C_2$ 、 $D_2$ 、 $C_1$ , 此时  $C_2$  开始充电. 由于  $C_1$  两端电压与输入端电压方向相同, 由戴维南定理可知,  $C_1$  相当于一个恒压源. 由基尔霍夫定理可知:

$$U_{\max} + U_{C_1} - U_{C_2} = 0 \quad (4)$$

同理, 第三个半周时,  $U_{in}$  上正下负,  $C_3$  开始充电, 可得:

$$-U_{\max} + U_{C_1} + U_{C_2} - U_{C_3} = 0 \quad (5)$$

第四个半周时,  $U_{in}$  上负下正,  $C_4$  开始充电, 有:

$$U_{\max} + U_{C_1} + U_{C_2} - U_{C_3} - U_{C_4} = 0 \quad (6)$$

联立式(4)、(5)、(6)可得:

$$U_{C_2} = U_{C_3} = U_{C_4} = 2U_{\max} \quad (7)$$

$C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  极性皆为左正右负, 通过分析可知, 一个周期之后, 充电结束, 得到输出电压  $U_{out} = 4U_{\max}$ .

在 Multisim 中搭建四倍压整流电路仿真平台如图 6(b) 所示. 电源  $V_1$  和电容  $C$  并联, 可等效为压电元件<sup>[7]</sup>, 输入电压为  $U_{in}$ , 调节电源电压有效值为 12.9V, 电压频率为 96Hz, 电容值为 22 $\mu$ F, 二极管压降为 0.2V. 四倍压整流电路输出电压的理论值为  $U_{out} = 12.9 \times \sqrt{2} \times 4 = 72.96V$ , 其仿真曲线如图 6(c) 所示.

由仿真曲线可以看出, 4 个半周后充电基本结束,

输出直流电压约为 70.5V, 接近于理论输出值 72.96V.

### 3.5 直流功率最佳负载

将该声能回收系统与能量回收电路连接, 能量回收电路输出直流电压,  $U_{out}$  为负载电阻两端电压. 保持压电振子数量为 8, 声压级为 110dB 时, 负载两端电压、功率随负载阻值的变化如图 7 所示. 从图中可以看出, 当交流电压经能量回收电路输出为直流电压后, 最优负载为 1.5M $\Omega$ , 实测最高输出直流电压 64.2V, 与理论值相接近, 最高输出直流功率 473 $\mu$ W.

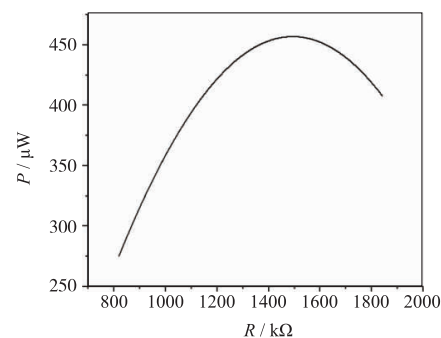


图7 直流功率随负载变化曲线

## 4 结论

本文设计了一种基于阵列式压电换能器、直管谐

振腔以及能量回收电路的低频声能回收系统,对该装置的声电转换部分进行了理论分析,对能量回收电路部分进行了理论、仿真分析,研究了声压级、频率及阵列式压电振子数量对于开路电压的影响,研究了该装置的输出交流功率的特性以及该装置使用能量回收电路后输出直流功率的特性。研究表明,当声压级为 110dB,声波频率为 96Hz,阵列式压电振子数量为 8 时,该装置输出电压随负载阻值增加而增加,最高可输出直流电压 12.9V,并且存在一最优负载阻值使得输出功率取到最大值,该阻值实测为 200k $\Omega$ ,最高输出交流功率 799 $\mu$ W;使用能量回收电路后,其他条件不变,最高可输出直流电压 64.2V,其输出功率随着负载阻值增加,存在一最优负载阻值使得输出功率最大,该阻值实测为 1.5M $\Omega$ ,此时最高可输出直流功率 473 $\mu$ W。该系统可对无线传感节点等微型电子系统进行独立供能,具有较大的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 王晓辉,王强,袁明. 基于赫姆霍兹共鸣器的声能回收器研究[J]. 压电与声光,2018,40(3):412-416.  
Wang Xiaohui, Wang Qiang, Yuan Ming. Research on acoustic energy recovery device based on Helmholtz resonator [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2018, 40(3):412-416. (in Chinese)
- [2] 杨峰,李平,李玉梅,等. 采用 Helmholtz 共鸣器与悬臂梁压电换能器的声能采集研究[J]. 声学学报,2014,39(2):226-234.  
Yang Feng, Li Ping, Li Yumei, et al. Study on acoustic energy acquisition by Helmholtz resonator and cantilever piezoelectric transducer [J]. Acta Acustica, 2014, 39(2):226-234. (in Chinese)
- [3] 陈锐,姚曼文,郑艳. 基于压电效应的声能量收集[J]. 功能材料,2014,45(13):13076-13078.  
Chen Rui, Yao Manwen, Zheng Yan. Acoustic energy collection based on piezoelectric effect [J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(13):13076-13078. (in Chinese)
- [4] Izhar, Farid Ullah Khan. Three degree of freedom acoustic energy harvester using improved Helmholtz resonator [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2018, 19(1):143-154.
- [5] Liu F, Phipps A, Horowitz S B, et al. Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(4):1983-1990.
- [6] Bin Li, Jeong Ho You, Yong-Joe Kim. Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator [J]. Smart Materials & Structures, 2013, 22(5):055013.
- [7] 陈翔,王丛岭,杨平,等. 倍压整流电路参数分析与设计 [J]. 科学技术与工程,2012,12(29):254-257.  
Chen Xiang, Wang Congling, Yang Ping, et al. Parameter analysis and design of double voltage rectifier circuit [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(29):254-257. (in Chinese)
- [8] 孙加存,陈荷娟,等. 风动压电发电机的结构设计及实验研究 [J]. 压电与声光,2012,34(6):860-863.  
Sun Jiacun, Chen hejuan, et al. Structural design and experimental research of wind driven piezoelectric generator [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2012, 34(6):860-863. (in Chinese)
- [9] 马大猷. 亥姆霍兹共鸣器 [J]. 声学技术,2002,21(2):2-3.  
Ma Dayou. Helmholtz resonator [J]. Technical Acoustics, 2002, 21(2):2-3. (in Chinese)
- [10] Shaoyi Zhou, Shaoyi Zhou, et al. Influence of internal electrical losses on optimization of electromagnetic energy harvesting [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(8):085015-085028.
- [11] C Cai, CM Mak. Acoustic performance of different Helmholtz resonator array configurations [J]. Applied Acoustics, 2018, 130:204-209.
- [12] FU Khan. Three degree of freedom acoustic energy harvester using improved Helmholtz resonator [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(1):143-154.
- [13] R Liu, et al. Shape memory polymers for body motion energy harvesting and self-powered mechanosensing [J]. Advanced Materials, 2018, 30(8):1705195.
- [14] S Zhao, H Fu, K Ma, et al. A novel sensor for vibration frequency measurement with piezoelectric kinetic energy harvesting [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(22):9286-9296.
- [15] Cao, Ziping, Pang, Zongqiang, et al. Helix structure for low frequency acoustic energy harvesting [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(5):055002-1-055002-8.
- [16] Hanchuan T, Zhesi C, Ni T, et al. Acoustic metasurfaces: hollow-out patterning ultrathin acoustic metasurfaces for multifunctionalities using soft fiber/rigid bead networks [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(36):1870251.
- [17] Yuan W, Xin Z, Tingsheng Z, et al. A renewable low-frequency acoustic energy harvesting noise barrier for high-speed railways using a Helmholtz resonator and a PVDF film [J]. Applied Energy, 2018, 230(15):52-61.
- [18] Izhar, Khan F U. Electromagnetic based acoustic energy harvester for low power wireless autonomous sensor applications [J]. Sensor Review, 2018, 38(3):298-310.

- [19] Yingwei Tian, Guimiao Li, Zhiran Yi, et al. A low-frequency MEMS piezoelectric energy harvester with a rectangular hole based on bulk PZT film [J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2018, 117: 21–27.
- [20] Dongxing Cao, Yanhui Gao, Wenhua Hu. Modeling and power performance improvement of a piezoelectric energy harvester for low-frequency vibration environments [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2019, 35(4): 894–911.

#### 作者简介



顾 聪 男, 1995 年 11 月出生, 江苏南通人, 现为南京理工大学能源与动力工程学院硕士生, 研究方向为压电能量回收.  
E-mail: 1163068594@qq.com



陈远晨 男, 1982 年 12 月出生, 江苏南通人, 现为南京理工大学硕士生导师, 研究领域为振动能量回收、智能监测与控制等.  
E-mail: chenys@njust.edu.cn