

◇ 研究报告 ◇

亥姆霍兹效应和文丘里效应复合型换能器设计*

叶俊杰¹ 吕海峰^{1†} 马智宇¹ 张文辉¹ 余瀚海²

(1 中北大学机械工程学院 太原 030051)

(2 北京市地铁运营有限公司运营一分公司 北京 100044)

摘要: 为合理地从环境中获取能量为无线传感网络和微电子低功耗设备提供能量, 该文提出了一种亥姆霍兹效应和文丘里效应复合型的换能器结构, 收集环境中的能量转换为电能。该装置主要由文丘里管和亥姆霍兹共振器组成。声-结构-电多域耦合仿真, 结果表明: 换能器传递损失峰值以及电能最大值均发生在 245 Hz 处, 系统共振时, 能量转换效率最高。设计了整流桥调理电路与超级电容储能电路, 开展了换能器的驱动能力测试, 结果表明: 换能器所产生的最高电压出现在结构的固有频率 245 Hz 处, 计算得到功率为 128.79 μW , 实验与理论计算偏差为 3.36%; 换能器单元在空气压缩机气压为 2 kPa 的气流作用下可产生 0.1148 V 电压。

关键词: 文丘里管; 亥姆霍兹共振器; 换能器; 气流发电

中图法分类号: TB535+.3; TM619

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2021)05-0794-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2021.05.019

Helmholtz effect and Venturi effect compound transducer design

YE Junjie¹ LYU Haifeng¹ MA Zhiyu¹ ZHANG Wenhui¹ YU Hanhai²

(1 School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 Beijing Subway Operation Co., Ltd., Operation No.1 Branch, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to reasonably obtain energy from the environment to provide energy for wireless sensor networks and microelectronic low-power devices, this paper proposes a Helmholtz effect and Venturi effect composite transducer structure, which collects the energy in the environment and converts it into electrical energy. The device is mainly composed of a Venturi tube and a Helmholtz resonator. Acoustic-structure-electric multi-domain coupling simulation results show that the peak value of transducer transmission loss and the maximum value of electric energy both occur at 245 Hz, and the energy conversion efficiency is the highest when the system is in resonance. The rectifier bridge conditioning circuit and the super capacitor energy storage circuit are designed, and the drive capability test of the transducer is carried out. The results show that the highest voltage generated by the transducer appears at the natural frequency of the structure at 245 Hz, and the calculated power is 128.79 μW . The deviation between the experimental and theoretical calculations is 3.36%; the transducer unit can generate a voltage of 0.1148 V under the action of the air compressor with a pressure of 2 kPa.

Keywords: Venturi tube; Helmholtz resonator; Transducer; Airflow power generation

2021-03-26 收稿; 2021-05-31 定稿

*国家自然科学基金(51305409), 山西省应用基础研究项目(201701D221124), 山西省重点研发计划项目(201903D221025)

作者简介: 叶俊杰(1996-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向: 噪声与振动控制。

†通信作者 E-mail: lvhaifeng@nuc.edu.cn

0 引言

现有的无线传感网络以及微型电子设备以电池供电为主, 电池寿命短, 在某些场合下不易更换, 产生的污染较为严重, 因此能量的供给限制了相关技术的进一步发展, 从环境中汲取能量的新型能获得方式具有重要意义。人类已对能源的收集技术进行了广泛的研究^[1]。声能作为环境中一种普遍存在的能源, 虽很少被利用^[2], 但也逐渐引起了学者的广泛关注。魏娴等^[3]提出了一种可集成的电磁式声能发电装置。Wang等^[4]提出了一种使用亥姆霍兹谐振器和聚偏氟乙烯(PVDF)膜的新型可再生声能收集隔声板, 它主要由亥姆霍兹谐振器和压电悬臂梁构成, 其压电悬臂梁固定方式采用胶粘。Liu等^[5]提出了一种由周期排列的亥姆霍兹谐振器组成的宽带声能收集结构, 压电片布置在相邻两个亥姆霍兹腔体之间。Hee-Min^[6]设计了一种专用于高速列车车厢内噪声收集的声能收集系统, 在100 dB声压级的噪声下, 可以产生0.7 V的电压, 该装置体积较大, 压电片的固定方式为胶粘。Yuan等^[7]提出了一种多功能声学元结构来实现低频声音隔离和声能收集, 该结构的主要材料采用金属, 具有更强的耐久性, 但其成本较高, 质量较大。Rezaei等^[8]研究了一种将非线性恢复力添加到压电悬臂梁上用来调整其固有频率的声能收集装置。Eghbali等^[9]提出了一种由声矩形管作为支撑的网格状谐振器, 与普通谐振器相比声能收集效率提高了10.5倍。Ma等^[10]提出了一种二维局部共振超材料声能收集器, 最大电压可达291 mV。

上述声能发电技术只利用单一的物理效应实现声能到电能的转换, 而未考虑将多种物理效应结合, 收集声能的同时利用环境中其他可利用的能量, 弥补声能发电电能不足的弊端; 现有的基于压电效应的声电转换装置中, 压电片的固定一般采用黏结剂, 人为粘接导致的压电片边界条件的差异, 会导致单元个体间固有频率的不同, 影响整个系统的换能效率。本文提出一种将亥姆霍兹共振效应和文丘里效应结合的复合型换能器, 在改进压电片固定方式的基础上, 能够分别获取环境中的噪声和气流中蕴含的能量并转换为电能, 从而改进现有环境能量的获取方式。

1 复合型换能器方案设计

复合型换能器结构图如图1, 其整体长600 mm, 宽600 mm, 厚度40 mm。当噪声作用于该复合型换能器时, 由文丘里管进行收集(能量收集模块), 之后由亥姆霍兹谐振器进行声压放大以及降噪(声压放大模块), 同时亥姆霍兹顶部压电片产生振动将机械能转换为电能(能量转换模块); 当汽车或高铁运行过程中产生的气流作用于换能器时, 气流在文丘里效应的作用下使换能器内部产生压力变化, 进而带动压电片振动, 由以上两种能量激励压电片产生的交流电经整流桥转换为直流电后储存在超级电容中(能量储存模块)。

换能器由多层结构组成, 每层共有13个文丘里管和亥姆霍兹谐振器组合的单元, 每层之间设有轴向的线槽, 同层之间设有横向线槽, 顶层和底层设有外部接线槽。

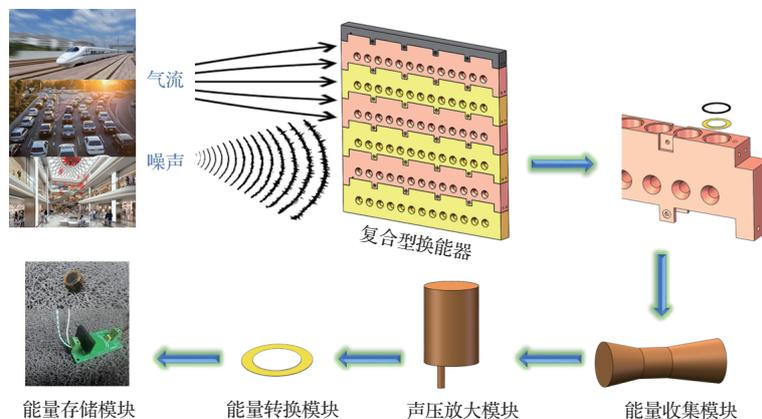


图1 复合型换能器结构

Fig. 1 Compound transducer structure

1.1 能量收集模块设计

能量收集模块为文丘里管,如图2(a)所示,文丘里管是一种先收缩而后逐渐扩大的管道,由收缩段、喉道以及扩散段组成,收缩角一般为 $21^\circ \pm 2^\circ$,扩散角一般为 $8^\circ \sim 15^\circ$ 。设计本装置文丘里管收缩段长12 mm,喉部截面直径10 mm、长5 mm,扩散段长18 mm,收缩角为 22.6° ,扩散角为 14.5° 。

将空气视为不可压缩流体,根据伯努利方程在同一流管中有

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2, \quad (1)$$

式(1)中, P 为压力, ρ 为流体密度, v 为流体流速,脚标1代表截面积较大的收缩段截面,脚标2代表截面积较小的喉部截面。根据文丘里效应:受限流动在通过缩小的过流断面时,流体出现流速增大现象。所以 $v_1 < v_2$,当两处截面在同一高度 h 时,要使伯努利方程等式成立则有 $P_1 > P_2$,所以会在文丘里管喉部产生一个最低负压区。

如图2(a),将亥姆霍兹共振器的颈部与文丘里管中的最低负压区连接,当有气流经过时,由于文丘里效应的作用可使亥姆霍兹共振器腔体中的压力产生变化,从而使压电片产生形变,达到利用气流发电的目的,同时文丘里管也可收集声能。

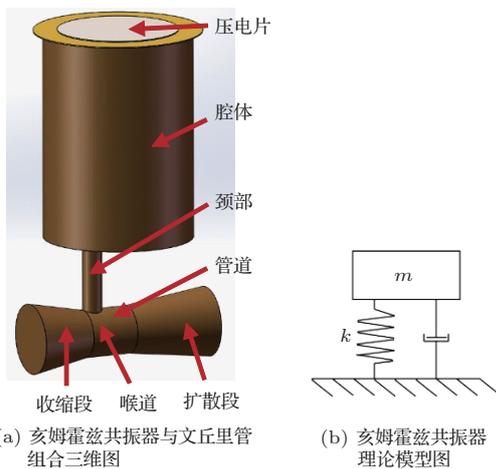


图2 亥姆霍兹共振器三维模型与理论模型对比
Fig. 2 Comparison of Helmholtz resonator three-dimensional model and theoretical model

1.2 声压放大模块设计

利用亥姆霍兹共振器对收集到的声能进行声压放大。当沿着亥姆霍兹共振器管道轴线方向传播的声波波长远大于其几何尺寸时,此时便可认

为共振器内的动能集中于颈部空气的运动,而共振器内管道的势能则集中于腔体内空气的弹性势能^[11]。颈部的空气作用相当于机械运动系统中的振子^[12]。由此可见,亥姆霍兹共振器可以等效为一个如图2(b)的一维振动系统。

亥姆霍兹共振器的共振频率与其各部分尺寸相关,如式(2)所示:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{(l + 0.8d)v}}, \quad (2)$$

式(2)中, d 为颈部横截面直径,设为4 mm; s 为颈部截面积; l 为颈部高度,设为15 mm; v 为腔体体积,在此腔体高度设为45 mm,截面直径设为31 mm;计算得共振频率 f 为246.7 Hz。在日常生活中产生的噪声频率范围内^[13]。

1.3 能量转换模块设计

换能器利用压电效应完成能量的转换,压电效应本质上是由于压电材料晶格内原子间的特殊排列方式使得电能与机械能的转换得以实现^[14-15]。当某些压电材料受到某一方向的机械力作用时,使其内部原本重叠的正负电荷中心发生相对位移,产生极化现象,此时会在压电材料的表面产生等量的正负相反的电荷^[16],当机械力的方向发生改变时,极化方向发生改变,电荷极性也随之改变^[17],这为正压电效应。将压电片设置在亥姆霍兹共振器的顶部,声压被亥姆霍兹共振器放大后,压电片在顶部产生振动,根据正压电效应此时压电片产生电压。

采用黏结剂固定压电片,会影响整个系统的换能效率。在此对压电片固定方式进行改进。每个单元的亥姆霍兹共振器顶部设有直径35 mm、深度1.2 mm的凹台用来放置压电片,压电片上放置有橡胶垫圈,每层之间通过嵌套结构使用螺钉连接,同时橡胶垫圈与压电片外圈被压紧,达到固定压电片的作用。此种固定方式更加可靠,且排除了使用黏结剂时人为因素对边界条件的影响。

1.4 储能模块设计

储能模块由整流桥、电容、电阻、超级电容组成。由正压电效应可知,在压电片振动时会产生交流电,而超级电容只能由直流电为其充电,所以设计了如图3的储能电路。输入口1、2两端接本换能装置,由图中D1 GBJ251型整流桥完成交直流转换,之后将电能输送到超级电容 C_1 进行储能,由输出口1、2两

端给外部电路供电,其中电容 C_2 可起到滤波以及保护电路的作用。

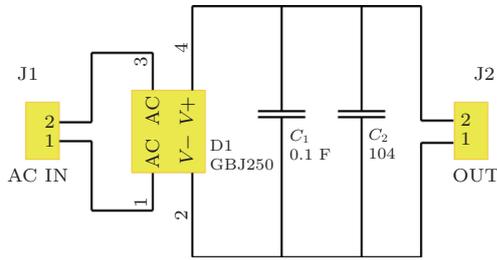


图3 储能电路图

Fig. 3 Energy storage circuit diagram

2 仿真分析

2.1 文丘里管流固耦合仿真分析

对文丘里管进行流体域建模,选用湍流 $k-\epsilon$ 物理场模型,设置入口边界条件气流速度,进行稳态研究。图4为文丘里管压力仿真云图,最低负压区出现在靠近汇聚口的喉部位置,亥姆霍兹共振器的颈部与此位置连接。

对换能器单元进行内部空气域建模,并将文丘里管换为直径与文丘里管入口直径相等的直管做对比仿真,由图5(a)可看出二者的亥姆霍兹腔体内

声压的放大效果一样,文丘里管对声波并无影响。对换能器进行内部空气域以及压电片的建模,添加湍流 $k-\epsilon$ 以及固体力学两个物理场,并进行流固耦合,设置入口气体流速为 20 m/s,对其进行稳态研究计算,计算结果如图5(b)所示,图上颜色的变化表示压电片 y 方向形变量的大小,可看出将文丘里管换为直管后,压电片受气流影响产生的形变由 $3.58 \mu\text{m}$ 减少为 $1.7766 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 。说明将直管换为文丘里管后,对声波的利用效果并无变化,但对气流的能量进行了利用,改进了现有的单一环境能量获取方式。

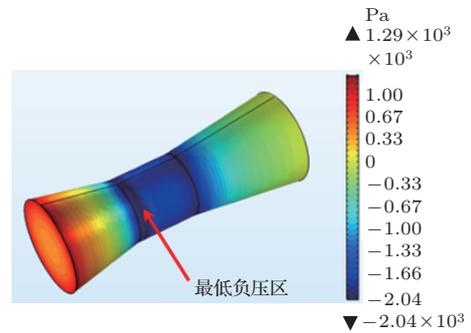
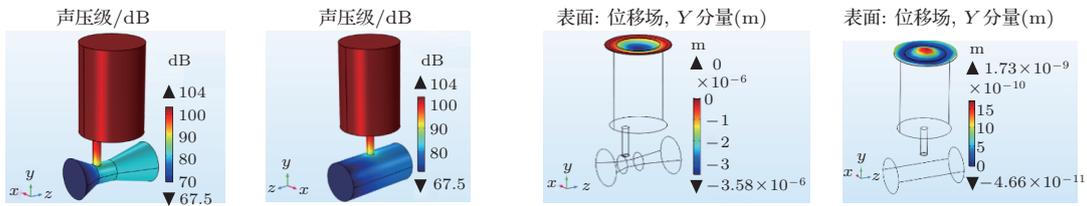


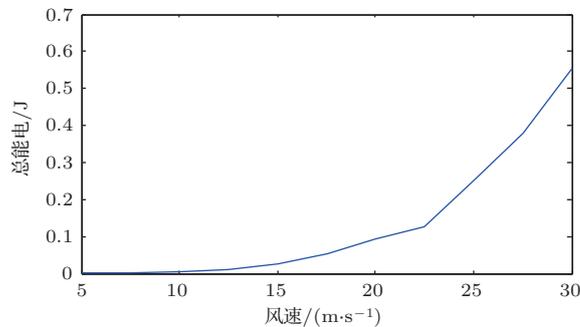
图4 文丘里管气流压力仿真云图

Fig. 4 Simulation cloud diagram of Venturi tube airflow pressure



(a) 声波激励仿真对比

(b) 气流激励形变仿真对比



(c) 换能器单元气流激励产生电能仿真图

图5 声学、流体对比仿真及气流产生电能仿真图

Fig. 5 Sound pressure level and piezoelectric sheet deformation comparison and air flow generated electricity diagram

对换能器单元添加压电片建模,并在流固耦合的基础上添加静电学与压电效应,设置入口风速以2.5 m/s为步长在5~30 m/s内变化,做11次仿真,每个风速都对应一个总电能值,如图5(c)所示。由仿真可知,在常见风速10~20 m/s之间,换能器单元由文丘里效应可产生0.0044~0.094 J的电能,且风速越大产生的电能越多。

2.2 亥姆霍兹共振器声学仿真分析

如图2(a)对亥姆霍兹共振器与文丘里管组合单元的空气域以及共振器顶部压电片进行建模,添加压力声学物理场,设置初始压力值1 Pa,设置作用声波为平面辐射波,入射声压设为1 Pa,以5 Hz为步长在25~500 Hz频段上仿真。输入绘图公式 $10 \times \lg\left(\frac{w_{in}}{w_{out}}\right)$ 画出如图6所示传递损失仿真一维图,传递损失峰值为23 dB,出现在245 Hz处,与理论计算所得共振频率246.7 Hz基本一致。

2.3 声-结构-电多域耦合仿真研究

对换能器进行内部空气域以及压电片的建模,将出口、入口处的空气域设为矩形,在压电片的铜片边缘添加固定约束,添加固体力学与压力声学、固体力学与静电学的多物理场耦合,以5 Hz为步长在25~500 Hz频段上进行频域研究。

传递损失为消声元件入口处的入射声功率级与出口处的透射声功率级之差,其值的大小可以用来衡量元件消声性能,在共振频率处,元件的传递损失最大。由图6中总电能频域曲线图可知,在其共振频率245 Hz处总电能达到最大,与换能器单元传递损失峰值频率一致,在共振频率附近产生的电能最多。

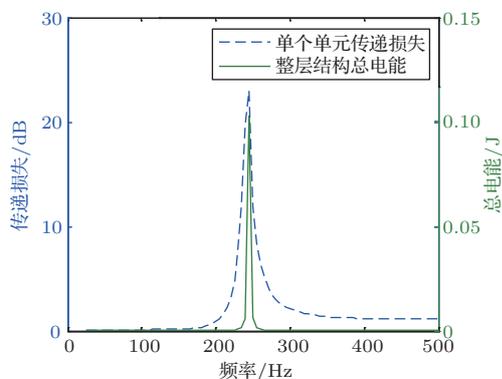


图6 传递损失与总电能仿真

Fig. 6 Transmission loss and total power simulation

3 实验研究

3.1 声电转换实验

为验证共振频率,进行声能发电实验,搭建如图7所示实验台,实验设备选用:YE5871A型功率放大器、cDAQ-9171型数据采集卡、DQ30TZF-03型扬声器。将音量设为90 dB,扬声器发出宽带噪声信号,计算机控制声波信号频率以5 Hz为步长在100~1000 Hz之间进行扫频,激励换能器上的压电片进行振动,分别在压电片以黏结剂方式固定和压电片以垫圈方式固定两种情况下进行实验,处理实验数据并绘制图8所示一维图,在频率为255 Hz时电压达到最高,与理论计算共振频率相比,实验误差为3.2%,同时可看出利用橡胶垫圈固定压电片在改善边界条件后在共振频率附近声能的转化效率有所提高,在共振频率处黏结剂固定压电片方式产生的电压为1.074 V、橡胶圈固定压电片方式产生的电压为1.169 V,对比可得电压提升了8.8%。

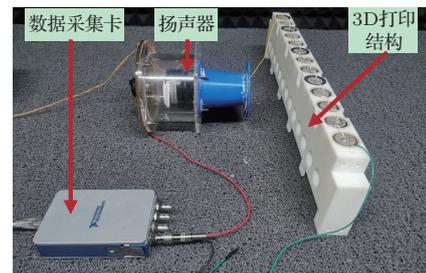


图7 声电转换实验台

Fig. 7 Voltage frequency domain acquisition experiment platform

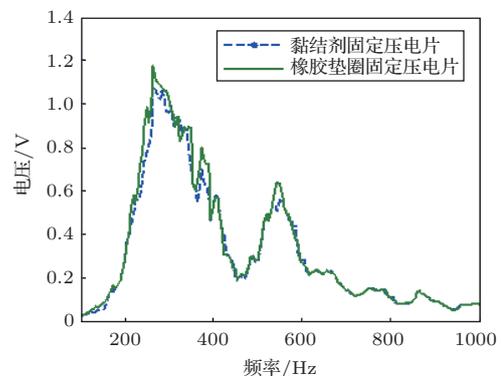


图8 两种不同的压电片固定方式在不同频率噪声下产生的电压

Fig. 8 The voltage generated by two different piezoelectric film fixing methods under different frequency noises

3.2 负载驱动实验

为验证换能器在噪声所收集转换的电能对负载的驱动能力,制作光敏电阻测量单元,测量发光二极管的亮度大小,为测量精确,选用电阻较小的5506型光敏电阻,整流后的直流电直接为二极管供电。

经测量在设置扬声器发出声压级为110 dB、频率为205~325 Hz时发光二极管被点亮。图9为声压级110 dB、频率255 Hz噪声作用下点亮发光二极管效果图,发光二极管两端电压为2.43 V,电路电流为5.3 μ A,计算得功率为128.79 μ W。

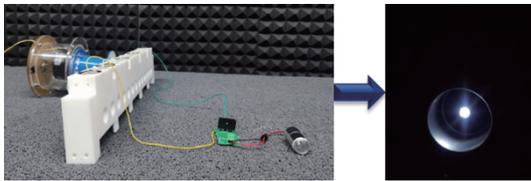


图9 点亮发光二极管

Fig. 9 Light up the LED

3.3 气电转换实验

在空气压缩机气压为2 kPa的情况下向换能器进行间断性气流供给,单片机向继电器发出信号,继电器控制电磁阀的开闭,由电磁阀控制供给气流的通断,设置单片机程序通断间隔为1 s,利用数据采集卡收集压电片产生的电压信号以及继电器控制信号,并同时利用激光测振仪测量压电片振动位移,利用其配套的数据采集卡采集压电片振动位移数据,采集10 s数据,结果如图10,由于实验中继电器为低电平导通高电平截止,所以当继电器断电时,电磁阀开启,气流通过,在文丘里效应作用下,压电片振动并产生电压,提取偶数秒时间的电压值,利用rms程序计算有效值得0.1148 V;当继电器通电时,电磁阀关闭,无文丘里效应产生,压电片不振动,两端电压为0。通过对比可得换能器单元在气流的作用下可产生0.1148 V的电压。

在进行气流激励的同时添加声波激励,在空气压缩机气压仍为2 kPa的情况下,调整声波频率为255 Hz,音量大小设置为90 dB,利用万用表测得换能器单元压电片两端电压为0.176 V,将换能器单元的文丘里管换为直管后利用同样的声波以及气流进行激励,测得电压为0.141 V。对比可知利用文

丘里管作为声波导管使换能器单元的电压提升了24.8%。

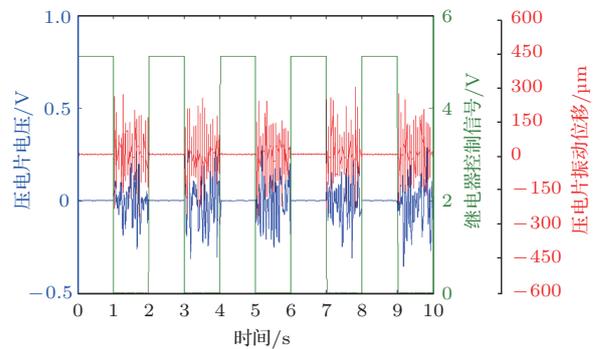


图10 压电片电压、继电器控制信号及压电片振动位移变化对比

Fig. 10 Comparison of piezoelectric sheet voltage, relay control signal and piezoelectric sheet vibration displacement change

4 结论

(1) 本文提出了一种将亥姆霍兹共振器与文丘里管相结合的复合型能量收集装置,本装置以声能发电为主、以气流发电为辅,声能发电实验以及对文丘里管与亥姆霍兹共振器组合单元进行声学仿真验证其共振频率为246.7 Hz,实验误差为3.2%,并由实验得出橡胶圈固定压电片的方式可使共振率处的电压提升8.8%。

(2) 对文丘里管与亥姆霍兹共振器组合单元进行流固耦合仿真分析,结果表明,在文丘里效应作用下换能器单元可以产生0.0044~0.0268 J的电能;气流发电实验表明在空气压缩机气压为2 kPa的气流作用下可产生0.1148 V电压,进一步验证气流发电的可行性,并通过普通声波导管与文丘里管作为声波到过的对比实验得出:文丘里管作为声波导管使换能器单元的电压提升了24.8%。

(3) 对本装置进行声-结构-电多域耦合仿真以及负载驱动实验,验证噪声发电性能,得出本装置在110 dB、255 Hz噪声的激励下可产生的电能功率为128.79 μ W,实验共振频率与理论计算频率偏差为3.36%。

参 考 文 献

- [1] Shehata N, Hassanin A H, Elnabawy E, et al. Acoustic energy harvesting and sensing via electrospun PVDF

- nanofiber membrane[J]. *Sensors*, 2020, 20(11): 3111.
- [2] 王云利, 董卫, 吴宵军. 声能发电系统的理论与实验研究[J]. *中国科技信息*, 2009(8): 27-29.
- [3] 魏娴. 一种耦合谐振式声能发电装置的理论与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [4] Wang Y, Zhu X, Zhang T, 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 Provides*, 2018, 230: 52-61.
- [5] Liu G S, Peng Y Y, Liu M H, et al. Broadband acoustic energy harvesting metasurface with coupled Helmholtz resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(15): 153503.
- [6] Hee-Min N. Acoustic energy harvesting using piezoelectric generator for railway environmental noise[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(7): 1-9.
- [7] Yuan M, Cao Z, Luo J, et al. Acoustic metastructure for effective low-frequency acoustic energy harvesting[J]. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 2018, 37(4): 1015-1029.
- [8] Rezaei M, Talebitooti R, Friswell M I. Efficient acoustic energy harvesting by deploying magnetic restoring force[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(10): 105037.
- [9] Eghbali P, Younesian D, Farhangdoust S. Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators[J]. *Applied Energy Provides*, 2020, 270: 115217.
- [10] Ma K, Tan T, Liu F, et al. Acoustic energy harvesting enhanced by locally resonant metamaterials[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 075025.
- [11] 陈鹏. 异形腔体压电声衬声学性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [12] 赵晨伊. 封闭空间—亥姆霍兹共振器耦合系统声学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [13] 杨东. 通过颈部材料优化亥姆霍兹共振器的理论和实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [14] 吕蕊. 压电智能悬臂板梁振动的主动控制与压电片的优化布置[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 王晓辉. 基于压电元件的声能量收集装置设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [16] 李志斌. 噪声发电关键技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [17] 金海泉. 基于分块压电悬臂梁的压电地板单元研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.