

声电换能超材料设计与性能

吕海峰¹, 余瀚海², 叶俊杰¹, 马智宇¹, 张景惠¹, 李 静¹

(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 102209)

摘 要: 设计了一种将 Helmholtz 共振效应与压电效应结合的声电换能超材料结构及电路系统, 通过传递矩阵法对超材料的能带结构进行了分析。以压电片作为 Helmholtz 共振器基底通过阵列形成超材料结构。当入射噪声频率与共振频率一致时, 声电转换效率最高。利用 COMSOL 分别对超材料单元及系统进行仿真, 验证了超材料单元对于噪声的抑制作用; 研究了超材料单元串并联方式对声电换能效率的影响规律; 采用整流桥设计了交直流转换电路, 采用超级电容设计了储能电路。测试结果表明: 所设计的声电换能超材料系统的最优直流负载为 250 k Ω 。当声波以共振频率入射驱动时, 系统的声电功率最大为 1 523 μ W, 实现了声电的能量转换、调理与储能。

关 键 词: 噪声; 超材料; 共振; 电能; 能带

中图分类号: V216.5⁺4; TB535⁺.2

文献标志码: A

Design and performance of metamaterials for acoustic-electric energy conversion

LÜ Haifeng¹, YU Hanhai², YE Junjie¹, MA Zhiyu¹, ZHANG Jinghui¹, LI Jing¹

(1. School of Mechanical Engineering,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. The First Operation Branch,

Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation Limited, Beijing 102209, China)

Abstract: A metamaterial structure for acoustic-electric energy conversion and circuit system combining Helmholtz resonance effect and piezoelectric effect was designed, and the energy band structure of the metamaterial was analyzed by the transfer matrix method. The piezoelectric sheet was used as the Helmholtz resonator substrate to form a metamaterial structure through an array. When the incident noise frequency was consistent with the resonance frequency, the acoustic-electric conversion efficiency was the highest. Using COMSOL to simulate the metamaterial unit and the system respectively, the effect of the metamaterial unit on noise suppression was verified. The influence of the series-parallel mode of the metamaterial unit on the efficiency of acoustic-electric conversion was studied. A rectifier bridge was used to design an alternating current/direct current converter, and super capacitor was adopted to design the energy storage circuit. The test results showed that the optimal direct current load of the designed metamaterials system

收稿日期: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(51305409); 山西省重点研发计划项目(201903D221025)

作者简介: 吕海峰(1981—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要研究方向为振动与噪声控制研究。

引用格式: 吕海峰, 余瀚海, 叶俊杰, 等. 声电换能超材料设计与性能[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 87-94. LÜ Haifeng, YU Hanhai, YE Junjie, et al. Design and performance of metamaterials for acoustic-electric energy conversion[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 87-94.

for acoustic-electric energy conversion was 250 k Ω . With the incident driving of the sound wave at the resonance frequency, the maximum acoustic-electric power of the system was 1 523 μ W, which realized the energy conversion, conditioning and energy storage of acoustic-electric.

Key words: noise; metamaterials; resonance; electric energy; energy band

风能、水能,太阳能等环境能量的回收利用技术日趋成熟,极大地缓解了人类对非再生资源的依赖程度。但现有能量收集技术依赖于周围特定的环境,当自然环境发生变化时,单一的能量收集、转换技术无法满足能量的稳定供给。声能是一种取之不尽的能源,时时处处存在于人类所生存的环境中^[1]。在机场、隧道、高速公路等噪声污染比较严重的公共场所,将声能转换为电能,一方面可以控制噪声的辐射,改善声学环境;另一方面可以提供能量的供给^[2],丰富能量获取渠道,是可再生新能源发电技术的一种。

现有的声发电技术主要采用电磁感应效应、压电效应以及静电效应^[3]。电磁感应效应的声发电结构为了获取能量转化效率,需要增加线圈的匝数及永磁体体积^[4];以压电效应为原理的声学发电装置主要有悬臂结构^[5-6]和 Helmholtz 共振腔结构^[7-9]。通过结构设计使系统固有频率与入射噪声频率一致,系统共振时产生的电荷最多,实现声能到电能的转换。随着超低功耗电子系统和无线传感网络的普及,无人值守的能量供给方式成为制约上述新技术发展的瓶颈问题。根据质量密度定律,对于环境噪声中普遍存在的低频噪声的收集与转换,装置体积较大,不适合嵌入式无线传感节点的自供电,因而能够打破质量密度定律限制的超材料在宽带低频的能量俘获领域表现出了巨大的研究潜力^[10]。利用超材料来控制弹性波的传递特性成为凝聚态物理领域的前沿研究课题之一。

声学超材料采用周期排列的特定结构,能够以亚波长的尺寸维度实现低频噪声的控制,极大地丰富了噪声控制手段,成为现代声学研究中一个前沿领域^[11]。在现有的声学超材料结构方面,张晓光等^[12]提出了一种基于 Helmholtz 共振器的双局域共振效应声学超材料,实现了噪声的自适应控制,为声学超材料主动控制及优化提供一种方法。吕海峰等^[13]所设计的局域共振型声学超材料在带隙范围内对低频噪声具有良好的控制效果。在声能收集方面,研究人员采用不同的超材料结构对环境噪声进行了收集。刘子牛等针对环境振动能量收集,采用有限元和 Bloch 定理建立

了压电薄板弹性波传播与振动特性的理论模型,为宽带低频振动能量收集的局域共振型压电薄板结构提供理论指导^[14]。王媛等提出一种在 Helmholtz 共振腔内部植入压电悬臂梁的声电转换结构,用于轨道交通的降噪发电声屏障,结果表明在 100 dB(声压级)的入射噪声激励下,降噪发电声屏障系统的预期瞬时输出电压峰值可达到 25.1 V,在 110 dB(声压级)时可达 35.8 V,验证了降噪发电声屏障系统的可行性^[15]。

通过上述分析可以看出将声学超材料与能量转换技术相结合将给噪声控制领域带来新的契机,通过该技术可以通过在噪声控制的同时将声能转换为电能,经过后续的调理与存储后有可能为无线传感器节点以及低压电器提供能量供给。

1 声电换能超材料工作原理

1.1 超材料单元设计

图 1 为声电换能超材料系统结构组成。波导管侧壁均布多个由 Helmholtz 共振器经过周期阵列组合而成的超材料单元。扬声器产生的声波在管内空间传播,通过颈部压缩共振腔内部的空气运动,驱动共振腔底部的压电片运动从而产生电荷。

超材料单元的主要结构尺寸为:共振腔半径 $r_c=15$ mm,颈部高度 $h=2$ mm,共振腔高度 $L=1$ mm,颈部半径 $r_n=0.5$ mm,晶格长度 $l_a=400$ mm,波导管截面为 50 mm $\times$ 50 mm, Helmholtz 共振腔的共振频率与共振腔腔体体积、颈部截面积

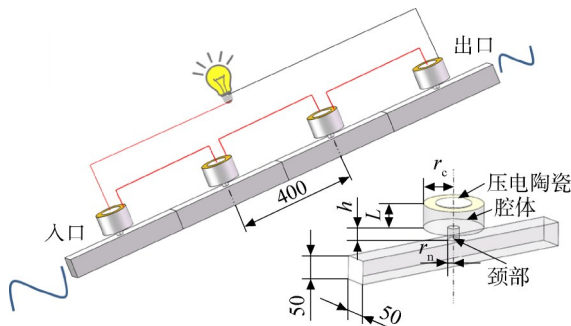


图 1 声电换能超材料系统组成(单位:mm)

Fig.1 Composition of metamaterial system for acoustic-electric energy conversion (unit:mm)

及颈部高度有关,可以用式(1)表示:

$$f = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_p}{(l + \Delta l)V}} \quad (1)$$

式中 f 为共振腔的共振频率, c_0 为声速, V 为共振腔体积, l 是颈部长度, S_p 为颈部截面积, Δl 颈部修正长度^[16]。当声波的波长远大于超材料单元结构尺寸时,共振腔等效成一个集中参数系统。此时 Helmholtz 共振腔颈部的空气类似活塞,具有一定的声质量,空腔内的空气类比为弹簧。当受到与 Helmholtz 共振腔的共振频率相同声波的影响时,阻抗发生突变,大部分声能被反射回声源,还有一部分声能由于共振器的摩擦产生热能消耗,达到了噪声抑制的目的。

多个 Helmholtz 单元以周期长度 $l_a=400$ mm 进行阵列,并将共振腔刚性基板采用压电片代替,形成所设计的声电换能超材料。系统达到共振状态时,压电片的振动速度、幅值达到最大,压电片产生的形变会引起压电片表面产生等量正负电荷,通过设计整流、储能电路可以将声能转换成电能,达到噪声抑制与声能转换、能量收集的目的。

1.2 声电换能超材料能带结构分析

能带分布是声子晶体以及超材料的重要特性之一,利用传递矩阵 (transfer matrix, TM) 法对管路系统进行声传播计算^[17]。

管内声学介质的波动方程为

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

式中 p 为声压, t 为时间,当声波在横截面积为 S_p 的均质管内中传播时,声压 p 的时谐解为

$$p(x, \omega) = (\lambda_{p+} e^{ikx} + \lambda_{p-} e^{-ikx}) e^{i\omega t} \quad (3)$$

式中 ω 为角速度, x 为 x 方向传播途径。

体积速度 Q 为

$$Q = \frac{S_p}{\rho_0 c_0} (\lambda_{p+} e^{ikx} - \lambda_{p-} e^{-ikx}) e^{i\omega t} \quad (4)$$

式中 ρ_0 为介质的静态密度; λ_{p+} 和 λ_{p-} 分别代表入射波的波长和反射波的波长,反射波的产生是由管末端的声学负载引起,而反射波与入射波比值的绝对值则为声压反射系数,即 $\gamma_p = |\lambda_{p-}/\lambda_{p+}|$ 。当声波在有限长的管路中传播时,管路两端的的状态向量有如下传递关系:

$$\begin{bmatrix} p(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kl_a) & jZ_p \sin(kl_a) \\ j/Z_p \sin(kl_a) & \cos(kl_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(x+l_a) \\ Q(x+l_a) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 k 为波数,其值为 ω/c_0 , $Z_p = c_0/S_p$ 。当在波导管中安装一阻抗为 Z_H 的 Helmholtz 共振腔时,共振腔左右两端的状态向量满足

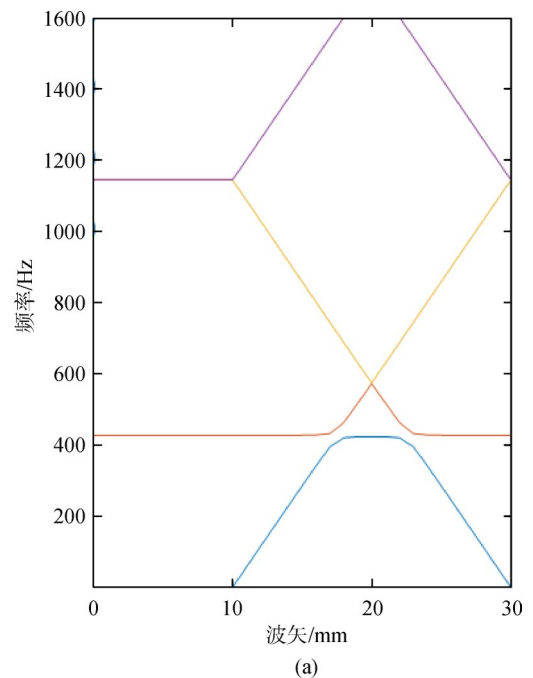
$$\begin{bmatrix} p_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Z_H^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_r \\ Q_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $Z_H = \frac{\rho_0 c_0}{S_p} \cdot \frac{1+l_a}{1-l_a}$, p_r 为反射声波压力, Q_r 为反射声波体积速度^[18]。在图1所示的周期管路中, Helmholtz 共振腔沿波导管轴向以 l_a 等距离分布,形成周期结构,那么,由 Bloch 定理: $p(x) = p(x+l_a)e^{j\mu l_a}$, $Q(x) = Q(x+l_a)e^{j\mu l_a}$ 及式(4)和式(5),可以得到该周期结构中声波波矢 μ (或称为波传播常数)解析表达式如下:

$$\cos(\mu l_a) = \cos(kl_a) + j \frac{Z_p}{2Z_H} \sin(kl_a) \quad (7)$$

求解式(7)中 μ 的值便可得到声波在无限周期管路传播时的色散关系曲线,即声波能带结构图。绘制出能带结构图后,可以根据带隙的分布优化设计结构参数,从而使带隙覆盖所要抑制的噪声频率范围。

根据上述理论计算得到所设计的声电换能超材料能带结构以及传递损失分布如图2。从图2(b)中可以看出,在400~420 Hz的频率范围内,形成一条狭窄的带隙。图2(a)中的带隙分布与图2(b)中的传递损失曲线图对比可以看出,声电换能超材料系统的带隙范围与传递损失的峰值频带范围一致,说明所设计的超材料抑制了400~



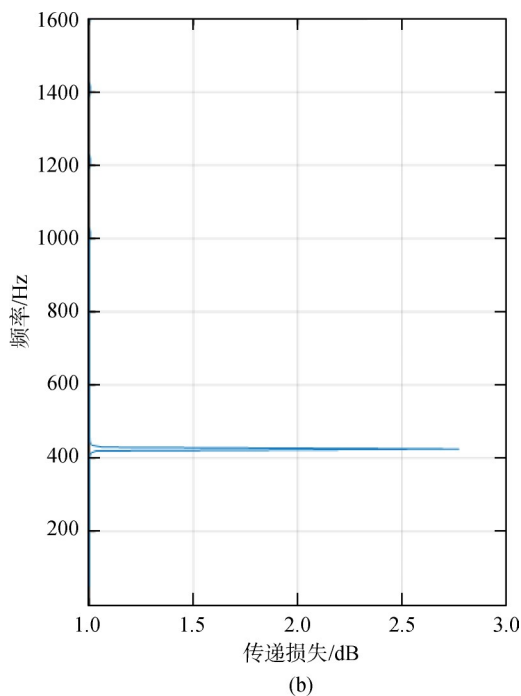


图2 声电换能超材料能带结构与传递损失

Fig.2 Energy band structure and transmission loss of metamaterials for acoustic-electric energy conversion

420 Hz 声波的传递,声波的能量损失在这一频段达到最大,通过压电效应可以将损失的声能转换为电能。

2 声电换能超材料性能仿真与测试

2.1 声学性能仿真

采用 COMSOL Multiphysics 5.3a 软件对系统的声学性能进行仿真分析,得到的声压级分布云图如下。

由图 3 可知当入射噪声频率(f_i)远离共振频率时,在波导管内几乎无衰减地进行传播,声压级分布均匀;当入射噪声频率为 400 Hz 即与结构固有频率一致时,换能单元腔体内部声压级明显高于其他部位,说明声能被局域在单元内部,阻碍了声波的传播,声压级从入口向出口逐渐递减,超

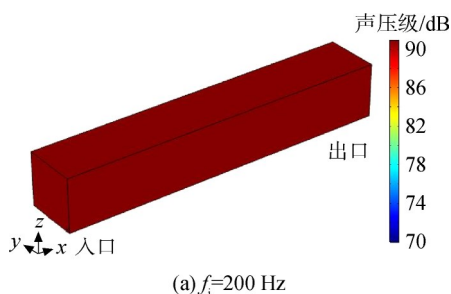
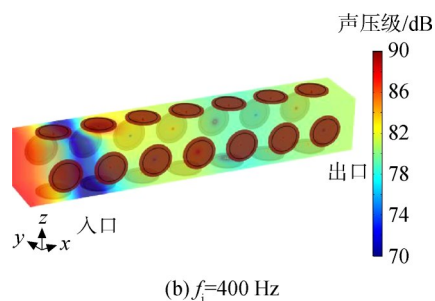
(a) $f_i=200$ Hz(b) $f_i=400$ Hz

图3 声电换能超材料声压级云图

Fig.3 Sound pressure level cloud diagram of metamaterials for acoustic-electric energy conversion

材料单元的存在对固有频率处的噪声起到抑制作用。

2.2 声电转换性能仿真

采用 COMSOL Multiphysics 5.3a 软件对所设计的声学超材料的声-固-电多域耦合效应进行分析。图 4 为超材料声电能量转换关系图。在压电片周围使用边缘固定约束,压电片的密度为 1300 kg/m^3 ,弹性模量为 2.6 GPa,泊松比为 0.47。仿真过程中入射声压设置为 1 Pa,入射噪声频率范围设置为 0~1 000 Hz。设置压电片为固体力学物理场,并设置压电片中的压电材料为静电物理学场,压电材料表面设置成电势平面,与压电材料连接的弹性金属片接地,压电材料电荷守恒,初始电压为零。设置空气腔体部分为声学物理场,分别设置声波进口和出口,利用声固物理场耦合,压电效应求解模型在入射声波作用下产生的电能。

经过声-固-电耦合求解后,声能通过超材料的压电效应转换为电能,电能的峰值出现在 400

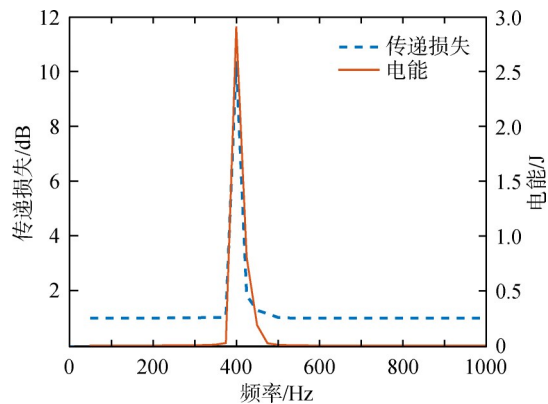


图4 超材料声电能量转换关系

Fig.4 Relationship between the acoustic-electric energy conversion of metamaterials

Hz处,这一频率与文中第1.2节中系统的共振频率相同。因此所设计的超材料换能装置在系统共振时,噪声最大程度地转换为电能,能量转换效率最大。

2.3 机械性能测试

采用激光测振仪对换能超材料单元在不同声波激励作用时的位移进行测试,测试装置如图5。信号发生器产生不同频率的正弦信号经功率放大器后驱动扬声器,所产生的声波在波导管内传播,经过换能超材料结构时,通过颈部作用于压电片上,使压电片产生变形。入射噪声频率不同的压电片变形亦不相同。测试过程中,激光测振仪的采样频率设定为4.8 kHz,每个频率测试5 s,取测量结果的有效值作为位移测量结果。图6中可以看出,当入射噪声频率为365 Hz时,压电片的位移值最大,为240 μm ,说明换能超材料单元共振频率为365 Hz。前述仿真结果共振频率为400 Hz,测试与仿真结果不一致的原因可能有以下三点:①仿真过程中,声速以及流体参数均为标准状态下选取的,而实际可能与理想状态存在差异;②超材料结构加工过程中存在误差导致实际

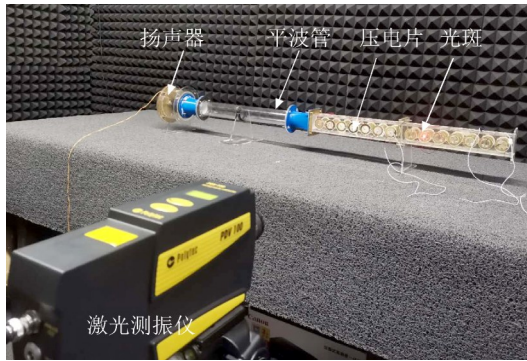


图5 位移测试

Fig.5 Displacement test

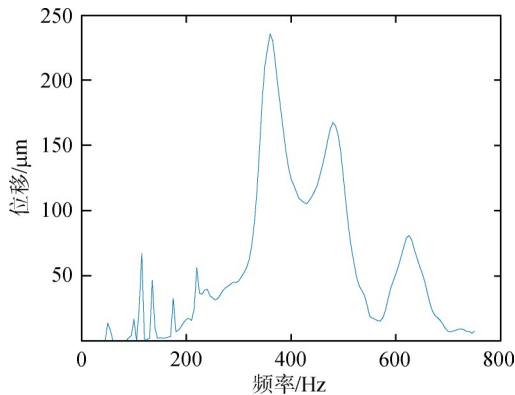


图6 位移测试结果

Fig.6 Result of displacement test

尺寸与设计尺寸不一致;③压电片通过黏结剂与腔体黏接固定,黏结剂导致边界条件与仿真边界存在差异。

3 系统电路设计

3.1 发电功率测试

声发电系统的功率随着负载不同而有所差别。存在着交流(AC)功率最佳负载和直流(DC)功率最佳负载。交流负载功率测试时,输出端接负载电阻(R),改变负载电阻值大小,求出负载电压方均根值(U_{rms})大小,根据式(8)再由负载电压和负载电阻值得出该装置输出的功率^[19-20]。

$$P_{\text{AC}} = U_{\text{rms}}^2 / R \quad (8)$$

式中 P_{AC} 为交流负载功率,直流负载功率(P_{DC})测试时,通过改变负载电阻值的大小测量负载电压(U),根据式(9)计算得到系统输出功率。

$$P_{\text{DC}} = U^2 / R \quad (9)$$

本文研究的声发电超材料系统主要为直流低功耗传感节点提供电能,因此进行直流负载功率测试。试验中,28个超材料单元串联连接,然后将不同阻值的电阻连接到整流桥的输出端,入射噪声频率设置为240~440 Hz,测量系统输出直流电压。根据式(9)得到的功率如图7。

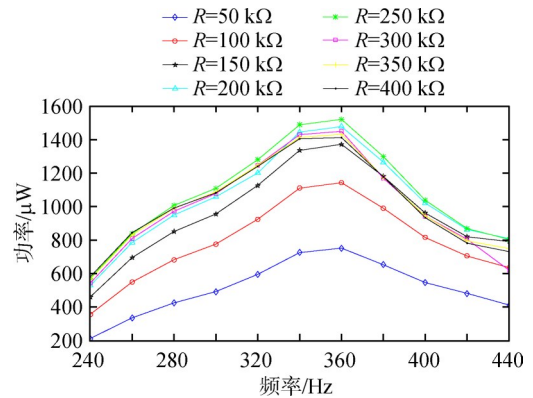


图7 不同负载电阻下系统输出功率

Fig.7 Output power of system with different resistance loads

由图7可知,当负载电阻 R 低于250 k Ω 时,随着负载电阻值的增大,系统输出功率逐渐增大;当负载电阻为250 k Ω 时,系统发电功率最大为1 523 μW ,发生在入射噪声频率为360 Hz处,这之前计算的超材料单元的共振频率365 Hz是基本一致的。此后,继续增加负载电阻,发电功率不再增加,说明250 k Ω 为系统的最佳负载电阻值。发电功率除了与负载电阻有关,还与超材料单

元的连接方式有关。

3.2 压电片的组合方式设计

超材料单元由于压电效应在表面产生交替变化的电荷,电路原理等效为电容。单元个体产生的电荷有限,对于负载电器来说,对电压和电流均有不同的要求。因此,声电换能超材料单元的连接采用先串联再并联的方式,通过串联提高系统产生的电压,通过并联提高电流,从而提高系统的驱动能力。通过试验验证串并联组合方式对系统驱动能力的影响,试验过程中选用 250 k Ω 的电阻作为负载,入射噪声频率设定为声电换能装置共振频率 360 Hz,试验组合及结果如表 1。

表 1 单元串并联组合方式及发电功率

Table 1 Unit series-parallel combination mode and power generation

连接方式 ($R=250\text{ k}\Omega$)	负载 电压/V	电流 强度/ μA	功率
4个单元串联, 并联7组	4.99	19	95
7个单元串联, 并联4组	9.86	39	385
14个单元串联, 并联2组	16.89	66	1 115
28个单元 全部串联	19.55	77.90	1 523

由表 1 可以看出,试验采取了 4 种串并联组合方式,随着超材料单元数量的增加,负载两端的电压成非线性增长,个体之间的材料以及装配方式的差异可能导致压电效应不一致,因而不是理想的叠加过程。并联过程中,也并非并联组数越多,产生的电流越大,当并联至 7 组时,产生的功率降至最低,当负载为 250 k Ω 时,28 个超材料单元串联产生的功率最大。考虑到电路连接的可靠性,选取 14 个单元串联,并联 2 组的方式开展后续的试验研究。

3.3 信号转换、储能电路设计

压电片在噪声驱动作用下发生往复运动,产生正负交替变换的交流电,经过转换成为直流电后方可为电池充电储能。选取 GBJ2510 整流桥设计交直流转换电路,整流桥正向导通电压为 1.1 V。采用超级电容作为储能元件,声电换能超材料及电路系统如图 8。

对整流桥输入的交流信号和输出的直流信号

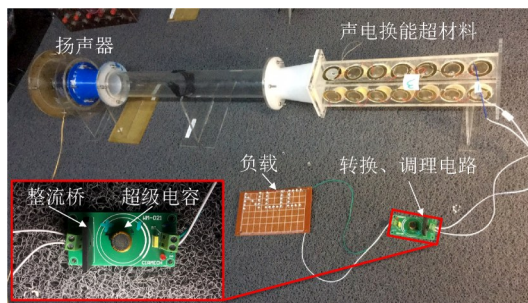


图 8 系统电路

Fig.8 System circuit

进行分析,压电片产生的交变电压经过整流电路后,近似转换为直流。转换前声电换能模块产生的交变电压幅值为 1.8 V,转换后直流电压为 1.8 V,如图 9。

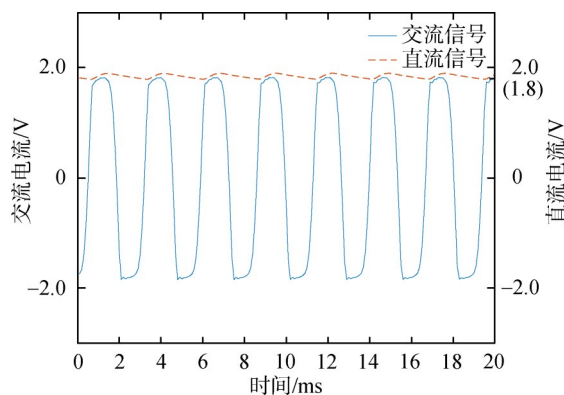


图 9 系统电路测试结果

Fig.9 System circuit test results

4 声电换能试验研究

4.1 超级充放电过程

将系统输出经整流后接入超级电容,记录超级电容的充、放电过程,如图 10。充电 50 min 后,充电电压达到 1.4 V,约 60 min 后达到最大值 1.7 V,此后充电电压基本维持不变。从放电曲线中可以看到电压从 1.7 V 降到 1.4 V,大约需要 66 min,所设计的储能电路实现了电能储存的功能。

超级电容的充放电过程表明,声电换能超材料可以实现声能到电能的转换与储存。

4.2 驱动负载测试

图 11 为不同频率的噪声经过声电换能超材料后的负载驱动能力对比。入射噪声频率远离共振频率时,发光二极管的亮度微弱,说明此时产生的电流小,发光二极管亮度微弱且光晕区域微小。

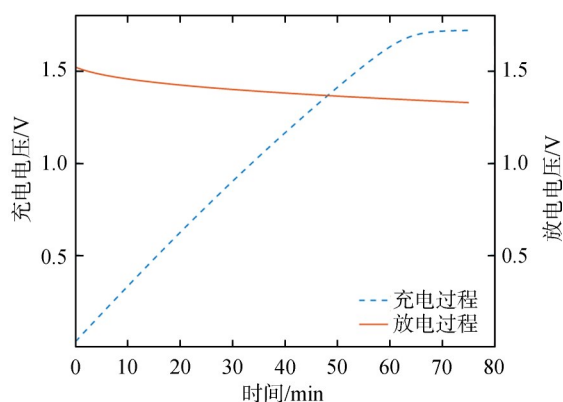


图10 系统充放电时间测试

Fig.10 System charge and discharge time test

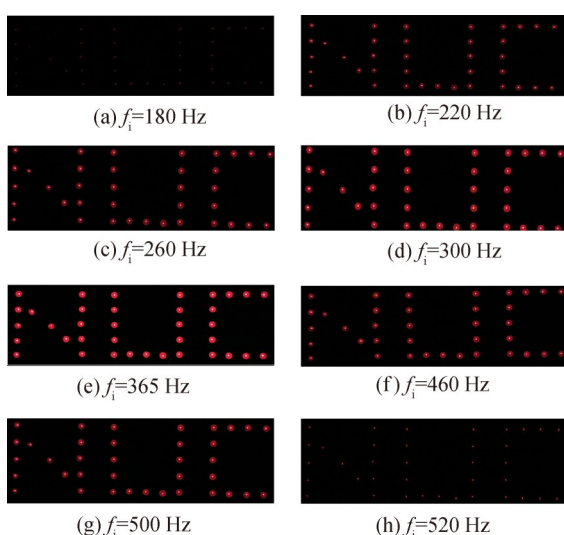


图11 声电换能超材料负载驱动能力

Fig.11 Load driving capacity of metamaterial for acoustic-electric energy conversation

随着入射噪声频率趋近共振频率,发光二极管的光晕逐渐扩大,亮度逐渐增加。当入射噪声频率与共振频率一致,达到365 Hz时,光晕面积最大,呈现高亮状态。此时,声电换能超材料产生的电流最大。

5 结 论

为了从环境中汲取能量为无线传感网络及低压电器提供能源,本文提出了一种用于低频噪声能量收集、转换与存储的声电转换超材料系统,得到的主要结论如下:

1) 设计了一种具有声电转换功能的声学超材料结构,将Helmholtz共振效应与材料的压电效应相结合,当入射噪声频率与系统共振频率一致时能够将声能转换成电能。

2) 研究了串并联方式对声电转换效率的影

响规律,综合考虑发电功率、电路连接可靠性,采用14个压电片串联,并联2组的方式,产生的声电功率为1 115 μW 。

3) 设计了声电换能超材料系统的电路,采用整流桥进行交直流转换,采用超级电容作为储能元件,完成了交变电流的转换与储存。

试验结果表明所设计的声电换能超材料系统,能够完成声电能量的转换与储存,可以同时驱动34支发光二极管持续工作,从而为低压电器提供能量供给。

参考文献:

- [1] MA K J, TAN T, LIU F R, et al. Acoustic energy harvesting enhanced by locally resonant metamaterials[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7):075025.1-075025.12.
- [2] WU L Y, CHEN L W, LIU C M. Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(1):013506.1-013506.3.
- [3] CHOI J, JUNG I, KANG C Y. A brief review of sound energy harvesting[J]. Nano Energy, 2019, 56(3):169-183.
- [4] IZHAR, KHAN F U. Electromagnetic-based acoustic energy harvester[R]. Lahore, Pakistan: International Multitopic Conference, 2013.
- [5] EGHBAI P, YOUNESIAN D, FARHANGDOUST S. Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators[J]. Applied Energy, 2020, 270: 1-10.
- [6] LI B, YOU J H, KIM Y J. Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(5): 055013.1-055013.9.
- [7] PILLAI M A, EZHILARASI D. Improved acoustic energy harvester using tapered neck helmholtz resonator and piezoelectric cantilever undergoing concurrent bending and twisting[J]. Procedia Engineering, 2016, 144:674-681.
- [8] YUAN M, CAO Z, LUO J, et al. Low frequency acoustic energy harvester based on a planar Helmholtz resonator[J]. AIP Advances, 2018, 8(8):08501-085012.
- [9] YANG A, LI P, WEN Y, et al. Note: high-efficiency broadband acoustic energy harvesting using Helmholtz resonator and dual piezoelectric cantilever beams[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(6):015035.1-015035.4.
- [10] 刘子牛. 局域共振型压电超材料薄板振动能量俘获特性理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
LIU Ziniu. Theoretical and experimental research on the vibration energy capture characteristics of the local resonance type piezoelectric metamaterial thin plate[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 刘晓峻. 声学超材料的机遇和挑战[J]. 科学通报, 2020, 65(15):1395.
LIU Xiaojun. Opportunities and challenges of acoustic meta-

- materials[J]. Science Bulletin, 2020, 65 (15): 1395. (in Chinese)
- [12] 张晓光, 吕海峰, 吕传茂, 等. 双局域共振效应声学超材料消声性能[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 52-59.
ZHANG Xiaoguang, LÜ Haifeng, LÜ Chuanmao, et al. Sound absorbing performance of acoustic metamaterials with double local resonance effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 52-59. (in Chinese)
- [13] 吕海峰, 王普浩, 叶俊杰, 等. 局域共振型声学超材料及其噪声控制[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7): 1369-1375.
LÜ Haifeng, WANG Puhao, YE Junjie, et al. Local resonance type acoustic metamaterial and its noise control[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35 (7): 1369 - 1375. (in Chinese)
- [14] 刘子牛, 陈仲生, 张帆. 局域共振型压电薄板建模及振动特性仿真分析[R]. 北京: 中国力学大会: 2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会, 2017.
- [15] WANG Yuan, ZHU Xin, ZHANG Tingsheng, 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: 52-61.
- [16] 陈鹏, 吕海峰, 安君, 等. 异形腔体压电衬声学性能[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2999-3006.
CHEN Peng, LÜ Haifeng, AN Jun, et al. Acoustic performance of piezoelectric acoustic lining with special-shaped cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33 (12): 2999-3006. (in Chinese)
- [17] 李雁飞, 沈惠杰, 章林柯, 等. 超材料型周期管路声传播特性及低频宽带控制[J]. 声学学报, 2017, 42(3): 334-340.
LI Yanfei, SHEN Huijie, ZHANG Linke, et al. Sound propagation characteristics and low-frequency broadband control of metamaterial-type periodic pipelines[J]. Acta Acoustica Sinica, 2017, 42(3): 334-340. (in Chinese)
- [18] 曹晓丰, 郁殿龙, 刘江伟, 等. 周期性附加单腔赫姆霍兹共鸣器一维管路声带隙耦合分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35 (19): 20-25.
CAO Xiaofeng, YU Dianlong, LIU Jiangwei, et al. Analysis of vocal band gap coupling in one-dimensional pipeline with periodic additional single-cavity Helmholtz resonator[J]. Vibration and Shock, 2016, 35(19): 20-25. (in Chinese)
- [19] 顾聪, 陈远晟, 王浩, 等. 直管谐振式低频压电声能量回收系统[J]. 电子学报, 2020, 48(10): 2071-2076.
GU Cong, CHEN Yuansheng, WANG Hao, et al. Straight tube resonance low-frequency piezoelectric acoustic energy recovery system[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48 (10): 2071-2076. (in Chinese)
- [20] YUAN M, CAO Z, LUO J, et al. An efficient low-frequency acoustic energy harvester[J]. Sensors and Actuators A, 2017, 264(1): 84-89.

(编辑: 陈 越)