

## 二阶多腔式亥姆霍兹声能俘获结构研究<sup>\*</sup>

马智宇, 徐 洋, 吴建忠, 王跃坤, 侯新义

(东华大学机械工程学院 上海, 201620)

**摘要** 针对声能收集器存在发电功率低的问题,提出了一种利用二阶多腔式亥姆霍兹共振器的声能俘获结构。首先,由第 1 阶亥姆霍兹共振腔体内壁上串联多个亥姆霍兹共振腔,并在各腔底固定压电陶瓷组成,拓宽了共振频带,提升了吸声效果;其次,多个亥姆霍兹共振腔共振吸收外界声能,压电陶瓷将声能转化为电能;最后,在 85 dB 声压级的激励条件下进行发电功率测试实验,并将结果与单阶多腔式声能俘获结构进行了对比。有限元分析及实验结果表明:设计的声能俘获结构在 416 Hz 和 443 Hz 分别达到亥姆霍兹共振峰值,吸声效果良好;该声能俘获结构输出功率高于单阶多腔式声能俘获结构,在 440 Hz 时峰值输出功率可达 0.585 mW;当负载电阻为 125 k $\Omega$  时,最佳输出功率可达 0.604 mW。

**关键词** 噪声吸收;亥姆霍兹共振效应;压电效应;声能俘获;声固耦合

**中图分类号** TM619;TB535

### 0 引言

噪声在环境能源中最常见,给人们的生活质量及身体健康带来恶劣影响。目前,能量转换技术日趋多元化,研究人员积极探索声能收集技术,期望通过吸收噪声实现微机电系统和无线传感器的能量自供给<sup>[1]</sup>,促进低碳城市建设。

近年来,声能收集技术取得了显著进展。其中,采用压电材料俘获噪声能量的方式,不但与微机电系统工艺的兼容性良好,而且声能收集效率突出<sup>[2]</sup>。Liu 等<sup>[3]</sup>以机电亥姆霍兹谐振(electromechanical Helmholtz resonator, 简称 EMHR)为主体结构研发了声能发电机,通过 EMHR 收集声能,压电材料将声能转化为电能,在 160 dB 的声压级下,实现 30 mW 的输出功率,简化了声能收集过程。汪恒等<sup>[4]</sup>利用声学黑洞的声聚集特性,增加薄板结构的声能收集效率。声能收集方式的多样化使声能收集技术趋于成熟,但声能收集器的输出电能仍有待提高。

为了提高声能收集器的输出电量,Yuan 等<sup>[5]</sup>提出一种结构特殊的声能收集器,通过调整质量控制声能收集器的共振频率变化,利用机电转化效应在共振频率下显著提升的特性,提高了声能的收集效率。Bin 等<sup>[6]</sup>采用直管型声能收集器,通过声波频率引起直管中多条压电悬臂梁谐振发电,可以有效收

集声能,提高能量转化效率,但实现谐振发电仍需 110 dB 的声压级。

研究发现,通过谐振收集噪声能量相较于通过声能引起的应变收集效率更高,因此声能收集技术的发展逐渐聚焦于谐振式收集。顾聪等<sup>[7]</sup>提出了一种直管谐振式压电声能收集器,利用声波引发直管谐振腔的谐振效应,在 110 dB 声压级下输出功率可达 473  $\mu$ W。叶俊杰等<sup>[8]</sup>提出了亥姆霍兹效应与文丘里效应复合的声能收集器,同步收集噪声与气流能量,当结构到达谐振后输出功率可达 128.79  $\mu$ W。虽然相关研究改善了声能收集器的性能,但仍存在发电功率较小、能量收集效率不高<sup>[9]</sup>以及高声压级需求等问题,严重影响了声能收集技术的应用。

为解决以上声能收集器存在的问题,本研究提出一种二阶多腔式亥姆霍兹声能俘获结构。该结构利用第 1 阶亥姆霍兹共振器谐振吸收环境噪声,同时串联多个第 2 阶亥姆霍兹共振器谐振吸收声能,并在腔体底部固定压电陶瓷片实现能量转化,通过多个腔体二次谐振的方式从低频噪声中回收声能,为无线传感器节点、低压电器等低功耗元件供能。

### 1 声能俘获结构设计

亥姆霍兹共振器是声学领域中经典的共振式吸声结构,是声能俘获结构设计的关键部分。平面入

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金天文联合基金资助项目(U1831123)

收稿日期:2024-04-03;修回日期:2024-07-02

射声波进入亥姆霍兹共振器结构中能表现出优良的吸声性能<sup>[10]</sup>。

本研究设计了二阶多腔式亥姆霍兹声能俘获结构,其剖面图如图1所示。声能俘获结构的主体结构是一个大体积的亥姆霍兹共振器,其腔体设计为一个矩形腔体,上面采用12个圆台型聚声结构增大与噪声的接触面积。在聚声结构上搭建第2阶小体积的亥姆霍兹共振器以增大能量的吸收量,提升共振腔的吸声效果,扩大噪声吸收范围<sup>[11]</sup>。二阶亥姆霍兹共振结构具有双峰特性,拥有2个亥姆霍兹共振频率<sup>[12]</sup>。当第1阶与第2阶的亥姆霍兹共振器共振频率相近时,两者的共振效应相互影响,可进一步提升声能俘获结构的声聚集效果。

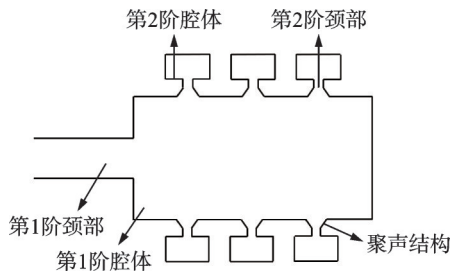


图1 声能俘获结构剖面图

Fig.1 Sectional view of sound energy capture structure

### 1.1 声管截止频率

亥姆霍兹共振器在平面波条件下才能发挥作用,即当声管截止频率高于入射声频率时,入射声波为平面声波,该声管称为平波管。在设计声能俘获结构中,第1阶颈部作为圆柱形声管,直接接触环境噪声;第1阶腔体作为矩形声管,供第2阶亥姆霍兹共振器与管内噪声接触。由于圆柱形声管直接暴露于环境中,能将低于其截止频率的声波过滤为平面波,因此设计时需要保证其截止频率大于环境声源频率。

圆柱形声管的截止频率为

$$f_c = 1.84 \frac{c_0}{2\pi a} \quad (1)$$

其中: $a$ 为声管半径; $c_0$ 为空气声速。

将 $a=25\text{ mm}$ 、 $c_0=343\text{ m/s}$ 代入式(1),计算得 $f_c=4\ 018\text{ Hz}$ 。当声源频率低于声管截止频率 $4\ 018\text{ Hz}$ 时,所设计的声管仅能传播平面波。因此,将 $4\ 018\text{ Hz}$ 作为声能俘获结构的截止频率。机场、工厂等环境的常见声源频率小于 $4\ 018\text{ Hz}$ ,设计结构满足应用需求。

### 1.2 声能俘获结构的共振频率

亥姆霍兹共振器的声学振荡规律与弹簧-振子系统相同,二阶亥姆霍兹共振器等效为二阶弹簧振子力学模型。第1阶亥姆霍兹共振器的颈部等效为质量块 $m_1$ ,腔体等效为弹簧刚度 $k_1$ ;第2阶亥姆霍兹共振器的颈部等效为质量块 $m_2$ ,腔体等效为弹簧刚度 $k_2$ 。

根据弹簧-振子力学模型,二阶亥姆霍兹共振器的2个固有角频率 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ <sup>[13]</sup>分别为

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - 4 \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}} \quad (2)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - 4 \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}} \quad (3)$$

其中: $k$ 为亥姆霍兹共振器的等效刚度; $m$ 为等效质量。

$$k = \frac{\rho_0 c_0^2 \pi^2 r^4}{V} \quad (4)$$

$$m = \rho_0 \pi r^2 t' \quad (5)$$

其中: $\rho_0$ 为空气密度; $V$ 为空腔体积; $r$ 为颈部截面半径。

颈部的有效长度 $t'$ <sup>[14]</sup>为

$$t' = t + \Delta t \quad (6)$$

其中: $t$ 为颈部长度; $\Delta t$ 为声学末端修正系数。

第1阶亥姆霍兹共振器腔体引入聚声结构,增大了共振腔体的体积。将其结构尺寸代入式(4)~(6),得到等效刚度 $k_1$ 与等效质量 $m_1$ 分别为

$$k_1 = \frac{\rho_0 c_0^2 \pi^2 r_1^4}{V_1 + 12V_0} \quad (7)$$

$$m_1 = \rho_0 \pi r_1^2 (t_1 + \Delta t) \quad (8)$$

其中: $V_1$ 为第1阶腔体体积; $r_1$ 为第1阶颈部截面半径; $t_1$ 为第1阶颈部长度。

聚声结构的体积 $V_0$ 为

$$V_0 = \frac{1}{3} \pi h (r_2^2 + r_2 R_0 + R_0^2) \quad (9)$$

其中: $h$ 为聚声结构的厚度; $r_2$ 为第2阶颈部截面半径; $R_0$ 为聚声结构的下底半径。

第2阶亥姆霍兹共振器颈部与聚声结构相接,等效于在第2阶颈颈部上增加了一段锥型颈部,增大

了颈部的截面半径与颈部长度。其等效刚度  $k_2$  与等效质量  $m_2$  分别为

$$k_2 = \frac{\rho_0 c_0^2 \pi^2 r_{2a}^4}{V_2} \quad (10)$$

$$m_2 = \rho_0 \pi r_{2a}^2 (t_2 + h + \Delta t) \quad (11)$$

其中:  $V_2$  为第 2 阶腔体体积;  $r_{2a}$  为第 2 阶颈部等效截面半径;  $t_2$  为第 2 阶颈部长度。

将锥形颈部与第 2 阶颈部用集总声阻抗的办法等效为一个颈部半径为  $r_{2a}$ 、长度与锥形结构和颈部长度总长度相同的等效颈部<sup>[15]</sup>, 亥姆霍兹共振器的声阻抗由颈部声质量  $M$  和腔体声容  $C$  决定。颈部声质量  $M^{[10]}$  为

$$M = t \rho_0 / \pi r^2 \quad (12)$$

通过声质量  $M$  建立等效颈部与锥形结构以及第 2 阶颈部间的关系, 等效颈部声质量关系示意图如图 2 所示。

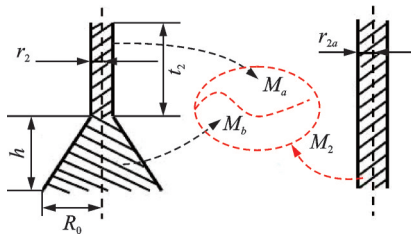


图 2 等效颈部声质量关系示意图

Fig.2 Equivalent neck sound quality relationship diagram

等效颈部声质量存在如下关系

$$M_2 = M_a + M_b \quad (13)$$

其中:  $M_a$  为第 2 阶颈部的声质量;  $M_b$  为锥型颈部的声质量。

锥形结构离散分割示意图如图 3 所示。采用分割法将锥型颈部离散分割成  $N$  段, 每段锥型颈部可等效为不同截面半径的圆柱型颈部, 则锥型颈部的声质量为

$$M_b = \sum_{n=1}^N M_{bn} \quad (14)$$

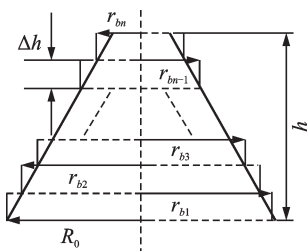


图 3 锥形结构离散分割示意图

Fig.3 Pyramidal structure discrete segmentation diagram

第  $n$  段的截面半径  $r_{bn}$  为

$$r_{bn} = R_0 - \frac{R_0 - r_2}{N} (n - 1) \quad (15)$$

每一段圆柱型颈部的厚度  $\Delta h$  为

$$\Delta h = h/N \quad (16)$$

将式(12)、(14)、(15)、(16)代入式(13), 可求得第 2 阶颈部等效截面半径  $r_{2a}$ , 从而得到等效刚度  $k_2$  与等效质量  $m_2$ 。将式(7)、(8)、(10)、(11)代入式(2)和式(3), 根据固有角频率与频率间的关系, 计算出声能俘获结构第 1 阶、第 2 阶亥姆霍兹共振频率分别为

$$f_1 = \omega_1 / 2\pi \quad (17)$$

$$f_2 = \omega_2 / 2\pi \quad (18)$$

将目标共振频率设定在 400~500 Hz 低频噪声段内, 同时保证第 1 阶与第 2 阶的亥姆霍兹共振频率相近。所设计的声能俘获结构参数见表 1。

表 1 声能俘获结构参数

Tab.1 Sound energy capture structure parameters

| 参数                          | 数值  |
|-----------------------------|-----|
| 第 1 阶腔体长度 $L_1/\text{mm}$   | 50  |
| 第 1 阶腔体宽度 $W_1/\text{mm}$   | 50  |
| 第 1 阶腔体高度 $H_1/\text{mm}$   | 120 |
| 第 1 阶颈部截面半径 $r_1/\text{mm}$ | 25  |
| 第 1 阶颈部长度 $t_1/\text{mm}$   | 62  |
| 聚声结构厚度 $h/\text{mm}$        | 4   |
| 聚声结构下底半径 $R_0/\text{mm}$    | 15  |
| 第 2 阶颈部截面半径 $r_2/\text{mm}$ | 1.5 |
| 第 2 阶颈部长度 $t_2/\text{mm}$   | 8   |
| 第 2 阶腔体半径 $R_2/\text{mm}$   | 15  |
| 第 2 阶腔体高度 $H_2/\text{mm}$   | 15  |

此外, 空气声速  $c_0$  取 343 m/s, 空气密度  $\rho_0$  取  $1 \text{ kg/m}^3$ , 声学末端修正系数  $\Delta t$  取  $1.7r$ , 锥型颈部离散分割段数  $N$  取 10。将参数分别代入式(17)和式(18), 计算得到  $f_1 = 421 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 440 \text{ Hz}$ 。第 1 阶共振频率与第 2 阶共振频率相近, 两者亥姆霍兹共振效应相互影响, 拓宽了共振频带, 提升了声能俘获结构的吸声效果。

声能俘获结构模型如图 4 所示。噪声经圆柱形平波管分别聚集在第 1 阶与第 2 阶亥姆霍兹共振腔内。为俘获声能, 在各个亥姆霍兹腔体的顶端, 采用硅胶边缘固定的方式分别装载 PZT-5H 圆形压电陶瓷与矩形压电陶瓷, 使共振器形成顶端密闭的腔体, 利用腔内聚集的声能使压电陶瓷受力振动, 实现声能俘获。所采用的压电陶瓷参数见表 2。

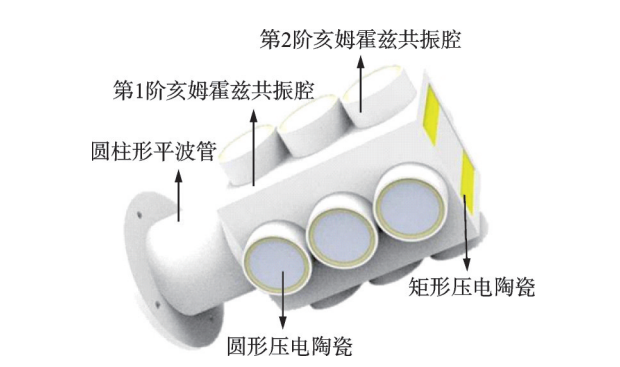


图 4 声能俘获结构模型

Fig.4 Structural model of sound energy capture

| 表 2 压电陶瓷参数                                  |       |
|---------------------------------------------|-------|
| Tab.2 Parameters of piezoelectric ceramics  |       |
| 参数                                          | 数值    |
| 压电系数 $d_{33}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$ | 640   |
| 压电系数 $d_{31}/(\text{pC}\cdot\text{N}^{-1})$ | -283  |
| 机电耦合系数 $K_{31}$                             | 0.39  |
| 相对介电常数 $\epsilon$                           | 3 400 |
| 圆形压电陶瓷材料厚度 $d_1/\text{mm}$                  | 0.2   |
| 圆形压电陶瓷材料半径 $R_2/\text{mm}$                  | 15    |
| 圆形压电陶瓷铜片厚度 $d_2/\text{mm}$                  | 0.2   |
| 圆形压电陶瓷铜片半径 $R_3/\text{mm}$                  | 17.5  |
| 矩形压电陶瓷材料厚度 $d_3/\text{mm}$                  | 0.2   |
| 矩形压电陶瓷材料边长 $w_1/\text{mm}$                  | 30    |
| 矩形压电陶瓷铜片长度 $l_1/\text{mm}$                  | 60    |
| 矩形压电陶瓷铜片宽度 $w_2/\text{mm}$                  | 30    |
| 矩形压电陶瓷铜片厚度 $d_4/\text{mm}$                  | 0.25  |

## 2 声能俘获结构性能分析

本研究采用有限元仿真软件 COMSOL Muilti-physics 5.3a 对声能俘获结构的声学性能进行分析,验证二阶多腔式亥姆霍兹共振器的吸声提升效果。

第 1 阶亥姆霍兹共振器属于穿孔板式吸声结构,外界空气域与颈部互相接触,亥姆霍兹共振器通过颈部直接吸收外界空气域中的噪声。为了计算第 1 阶亥姆霍兹共振器的吸声效果,在颈部设置一长方体域,材料为空气。长方体域两边的平面声波由空气域入射至第 1 阶亥姆霍兹共振器腔内。第 1 阶亥姆霍兹共振器 416 Hz 声压云图如图 5 所示。

当入射声波为 416 Hz 时,第 1 阶亥姆霍兹共振器产生了明显的亥姆霍兹共振现象,从右侧声波入口至左侧出口,声压级明显降低,空气域中的声波被吸收至亥姆霍兹共振器腔体中。

第 2 阶亥姆霍兹共振器属于旁支管式结构,其颈部与第 1 阶亥姆霍兹共振器的矩形腔体相连,通

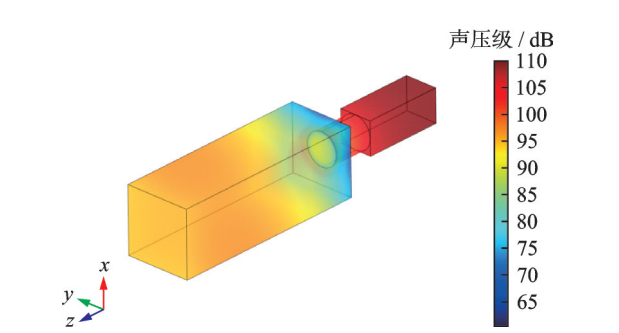


图 5 第 1 阶亥姆霍兹共振器 416 Hz 声压云图

Fig.5 416 Hz sound pressure nephogram of the first-order Helmholtz resonator

过颈部与聚声结构吸收矩形腔体内的噪声。将圆柱形声管左侧设置为平面声波入口,矩形腔体右侧设置为声波出口,计算出其共振下的声能俘获结构声压云图如图 6 所示。

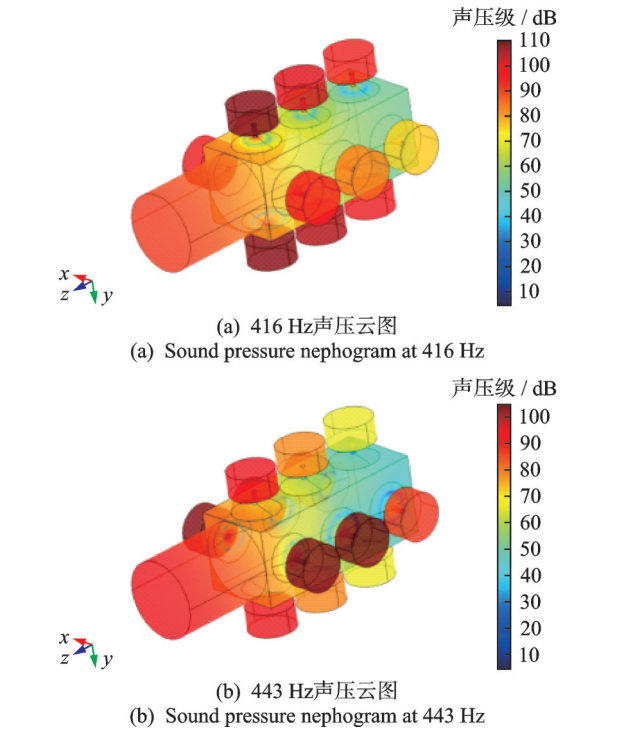


图 6 声能俘获结构声压云图

Fig.6 Acoustic energy capture structure sound pressure nephogram

声能俘获结构在 416 和 443 Hz 时产生了明显的亥姆霍兹共振现象,第 1 阶共振频率为 416 Hz,第 2 阶共振频率为 443 Hz,矩形腔体内聚集的声能被吸收至各个第 2 阶亥姆霍兹共振器中,腔体内的声压级降低,便于吸收更多的声能。由于仿真结果考虑了空气域部分的影响,因此与理论计算结果存在细微偏差,最大误差为 1.2%。为进一步验证声能俘获结构产生的二阶亥姆霍兹共振效应的吸声提升效

果,采用传递损失对第1阶亥姆霍兹共振器与声能俘获结构进行对比。

传递损失是结构输入端的声功率级与输出端的声功率级之差,其能够客观表示结构自身的消声性能与共振频率的关系,是一个能准确评价结构声学性能的声学参数。

定义矩形声管入射声波入口为输入声功率级  $W_{in}$ , 声波出口为输出声功率级  $W_{out}$ , 则传递损失给图公式<sup>[14]</sup>为

$$TL = 10 \lg \frac{w_{in}}{w_{out}} \quad (19)$$

声功率  $W$  计算公式为

$$W = S \frac{p_k^2}{\rho_0 c_0} \quad (20)$$

其中:  $S$  为截面积;  $p_k$  为有效声压。

$$p_k = p_A / \sqrt{2} \quad (21)$$

其中:  $p_A$  为声压幅值。

第1阶亥姆霍兹共振器与声能俘获结构传递损失如图7所示。声能俘获结构产生了两次亥姆霍兹共振效应,在416和443 Hz分别达到共振峰值,产生了明显的窄带特性。将其与第1阶亥姆霍兹共振器产生的传递损失比较发现,声能俘获结构的第1阶共振频率与第2阶共振频率相互作用,使传递损失显著提高,同时拓宽了共振频带,提升了吸声效果。

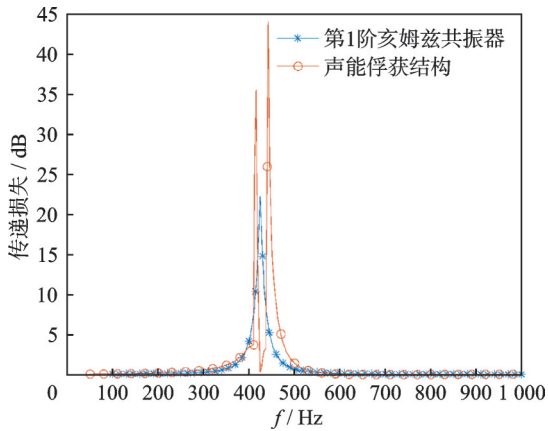


图7 第1阶亥姆霍兹共振器与声能俘获结构传递损失  
Fig.7 Transmission loss of first-order Helmholtz resonator and acoustic energy harvesting structure

### 3 声能俘获结构性能测试

#### 3.1 声能俘获结构输出功率

为验证声能俘获结构的声能俘获能力,建立了图8所示的声能俘获结构实验装置。

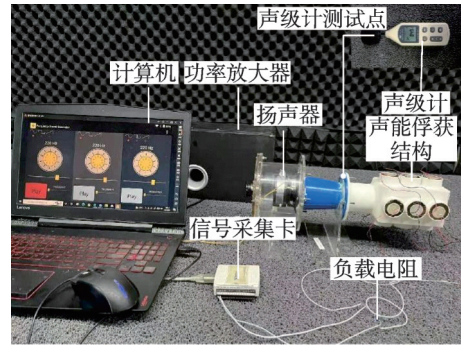


图8 声能俘获结构实验装置

Fig.8 Experimental setup of sound energy harvesting structure

计算机产生的不同频率的正弦波信号经功率放大器放大后,驱动扬声器产生一定频率的噪声<sup>[16]</sup>。首先,将声能俘获结构安装在扬声器之后,俘获来自扬声器的噪声;其次,信号采集卡 NI USB-6009 与负载电阻两端相连,采集负载电阻上的电信号;然后,通过声级计 GM1357 将实验噪声控制在 85 dB,调节入射声波从 5 Hz 上升至 800 Hz,负载电阻为 100 kΩ,以 5 Hz 为步长进行测试;最后,对比二阶多腔式声能俘获结构与拆除第1阶腔体后的单阶多腔式声能俘获结构在不同频率下收集电功率的大小。

二阶多腔式与单阶多腔式结构发电功率对比如图9所示。二阶多腔式声能俘获结构在430和440 Hz处产生了峰值功率,其中440 Hz处产生的电功率最高,达到0.585 mW,其次是430 Hz处产生的电功率达到0.582 mW。噪声在430和440 Hz分别达到了第1阶与第2阶亥姆霍兹共振器的共振峰值,亥姆霍兹共振效应明显,发电功率最高。由于实际实验结果受结构材料、加工误差、实验温度以及声波反射等环境因素影响,与仿真结果相比共振频率存在细微误差,但最大误差仅为3.4%。单阶多腔式声能俘获结构仅在440 Hz处产生了共振峰值,功率达到0.501 mW。二阶多腔式声能俘获结构在不同

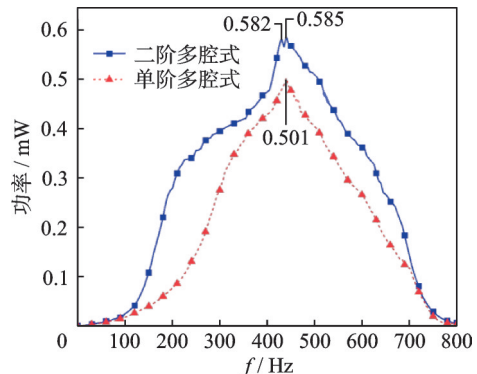


图9 二阶多腔式与单阶多腔式结构发电功率对比

Fig.9 Comparison of power generation between second-order multi-cavity and single-order multi-cavity structures

频率下的发电功率均高于单阶多腔式声能俘获结构,同时二阶多腔式声能俘获结构存在2个共振峰,拓宽了共振频带,在400~500 Hz频带内均有较好的声能俘获效果。

### 3.2 最佳负载优化

压电陶瓷产生压电效应后等效于发电元件,是一种非线性元件,其特性与放电电容类似。压电陶瓷本身由压电效应产生的电能与能够采集到的输出电能存在较大差别。随着自身阻抗的变化,其本身电容值受压电效应与负载阻抗等影响,放电过程会产生较大泄漏。因此,根据不同的声能收集器结构选择最合适的负载电阻能够获得最佳输出功率。

通过实验对比了200~550 Hz频率段内、不同负载电阻下的二阶多腔式声能收集器的输出功率,选择最优负载阻值。实验采用声压级为85 dB的声源,测量二阶多腔式声能收集器负载在0~200 k $\Omega$ 范围内输出功率的大小。

输出功率随负载变化曲线如图10所示。由图可见,无论负载电阻为多少,输出功率均在430 Hz与440 Hz达到共振峰值。取430 Hz和440 Hz频率下数据绘制功率随负载变化曲线,如图11所示。由图可见,440 Hz输出功率大于430 Hz输出功率,随着负载电阻的增大,输出功率先降低再升高。440 Hz频率下电压和电流随负载变化曲线如图12所示。由图可见,在负载电阻较低时,输出电流高而输出电压低,因此输出功率较高。

综合图10~12结果可知:随着负载电阻升高,输出电流迅速降低,输出电压开始升高;至125 k $\Omega$ 时,输出电流缓速降低,同时输出电压迅速增长,输出功率达到最大峰值;当负载电阻继续增大时,输出电流加速降低而输出电压缓速增长,导致输出功率逐步变小。因此,二阶多腔式声能收集器的最佳负载电阻为125 k $\Omega$ ,此时收集器最佳输出功率可达0.604 mW。

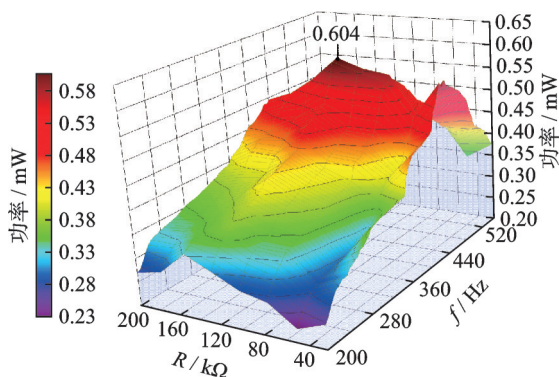


图10 输出功率随负载变化曲线图

Fig.10 Change curve of output power variation with load

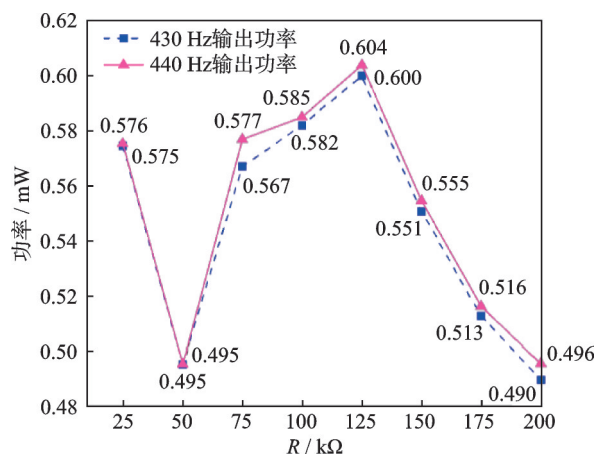


图11 430 Hz和440 Hz频率下功率随负载变化曲线

Fig.11 Power change curve with load at 430 Hz and 440 Hz

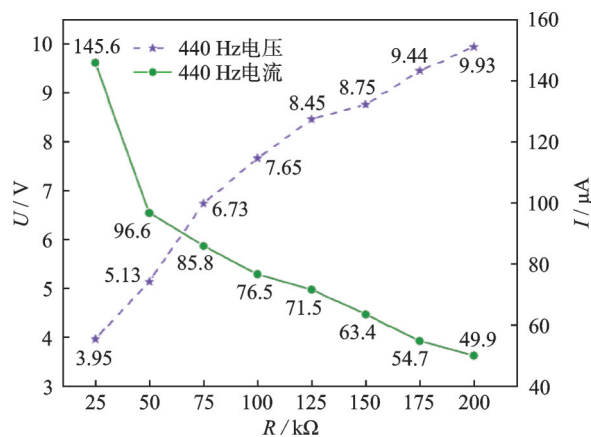


图12 440 Hz频率下电压和电流随负载变化曲线

Fig.12 Voltage and current change curve with load at 440 Hz

## 4 结论

1) 设计了一种二阶多腔式声能俘获结构,该结构利用二阶多腔式亥姆霍兹共振器吸收外界噪声,利用压电陶瓷将吸收的噪声转化为电能,实现了噪声能源的开发与利用。

2) 通过COMSOL软件对声能俘获结构进行性能分析,结果表明,设计的结构具有明显的亥姆霍兹共振效应,同时二阶多腔式结构设计拓宽了共振频带,提升了吸声效果。

3) 在85 dB的噪声源下研究了二阶多腔式声能俘获结构与单阶多腔式声能俘获结构的输出功率特性,实验结果表明,二阶多腔式声能俘获结构发电功率高于单阶多腔式声能俘获结构,在440 Hz时峰值输出功率可达0.585 mW。此外,通过优化二阶多腔式声能俘获结构的负载电阻可知,当负载电阻为125 k $\Omega$ 时,二阶多腔式声能收集器最佳输出功率可达0.604 mW。

## 参 考 文 献

- [1] 魏娴,董卫,吴宵军,等.声能发电技术发展概况[J].大众科技,2009(12):101-103.  
WEI Xian, DONG Wei, WU Xiaojun, et al. Overview of acoustic power generation technology development [J]. Popular Science & Technology, 2009, 11(12): 101-103. (in Chinese)
- [2] 杨磊,薛至诚,何星月,等.声能量收集器的研究综述[J].微电子学,2020,50(1):112-117,125.  
YANG Lei, XUE Zhicheng, HE Xingyue, et al. Research on the study of the sound energy collector[J]. Microelectronics, 2020, 50(1): 112-117, 125. (in Chinese)
- [3] LIU F, PHIPPS A, HOROWITZ S, et al. Acoustic energy harvesting using an electromechanical helmholtz resonator[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(4): 1983-1990.
- [4] 汪恒,郑伟光,何仕明,等.基于声学黑洞的压电俘能结构系统仿真与优化[J].压电与声光,2019,41(5):728-732.  
WANG Heng, ZHENG Weiguang, HE Shiming, et al. System simulation and optimization of piezoelectric energy harvesting structure based on acoustic black hole [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(5): 728-732. (in Chinese)
- [5] YUAN M, CAO Z P, LUO J, et al. An efficient low-frequency acoustic energy harvester[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 264: 84-89.
- [6] BIN L, JEONG H Y, 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.
- [7] 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. Low frequency piezoelectric acoustic energy harvest system with straight tube resonance[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(10): 2071-2076. (in Chinese)
- [8] 叶俊杰,吕海峰,马智宇,等.亥姆霍兹效应和文丘里效应复合型换能器设计[J].应用声学,2021,40(5):794-800.  
YE Junjie, LÜ Haifeng, MA Zhiyu, et al. Helmholtz effect and venturi effect compound transducer design [J]. Applied Acoustics, 2021, 40(5): 794-800. (in Chinese)
- [9] EGHBALI P, YOUNESIAN D, FARHANGDOUST S. Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators[J]. Applied Energy, 2020, 270: 115217.
- [10] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].3版.南京:南京大学出版社,2012:156-170.
- [11] 高书娜,赵金斗.多共振消声器串联系统声学特性分析及应用[J].振动与冲击,2016,35(2):189-194.  
GAO Shuna, ZHAO Jindou. Acoustic performance analysis of the series-wound system of multi-resonant silencer and its application [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 189-194. (in Chinese)
- [12] HEE-MIN N. Acoustic energy harvesting using piezoelectric generator for railway environmental noise [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(7): 168781401878505.
- [13] 刘海涛,郑四发,连小珉,等.锥形颈部赫姆霍兹共振器声学性能预测[J].声学学报,2014,39(3):353-359.  
LIU Haitao, ZHENG Sifa, LIAN Xiaomin, et al. The acoustic performance prediction of the Helmholtz resonator with a conical neck [J]. Acta Acustica, 2014, 39(3): 353-359. (in Chinese)
- [14] 马智宇,吕海峰,叶俊杰,等.亥姆霍兹共振式声电换能系统研究[J].振动与冲击,2022,41(10):231-237.  
MA Zhiyu, LÜ Haifeng, YE Junjie, et al. Acousto-electric transducer structures based on the Helmholtz resonance effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(10): 231-237. (in Chinese)
- [15] 韩聪,姜广义,刘瞳,等.声发射信号在带筋结构中的传播特性[J].振动、测试与诊断,2024,44(1):153-158.  
HAN Cong, JIANG Guangyi, LIU Tong, et al. The propagation characteristics of acoustic emission signals in reinforced structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 153-158. (in Chinese)
- [16] 韩聪,姜广义,刘瞳,等.声发射信号在带筋结构中的传播特性[J].振动、测试与诊断,2024,44(1):153-158.  
HAN Cong, JIANG Guangyi, LIU Tong, et al. The propagation characteristics of acoustic emission signals in reinforced structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 153-158. (in Chinese)



**第一作者简介:**马智宇,男,1998年6月生,博士生。主要研究方向为振动与噪声控制。

E-mail:328668912@qq.com

**通信作者简介:**徐洋,女,1977年8月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为大型复杂机械耦合系统建模及振动控制。

E-mail:xuyang@dhu.edu.cn