

驻极体静电能量采集器的结构优化

贺鹏飞¹, 杨晓雅¹, 马星晨², 张晓青², 戴 瑛¹

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 设计了基于高弹驻极体膜的可变电容器静电能量采集器, 通过有限元仿真模型研究了器件结构参数对输出功率的影响。制备并表征了优化结构的器件, 实验和数值计算结果吻合。通过调节驻极体膜的预拉伸状态和振子的质量能够改变结构刚度和谐振频率, 进而影响能量采集器的输出功率。结果表明: 由大小和面电荷密度分别为 $30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 和 $0.6\text{ mC}\cdot\text{m}^{-2}$ 的高弹氟化乙丙烯(FEP)驻极体膜、深度为 4.0 mm 的 V 型感应电极, 以及质量为 0.06 g 振子构成的能量采集器, 在 $1g$ (g 为重力加速度) 正弦加速度激励和 20 Hz 谐振频率下的输出功率高达 $870\text{ }\mu\text{W}$ 。

关键词: 静电能量采集器; 高弹驻极体膜; 结构优化

中图分类号: O59; O327

文献标志码: A

Structure Optimization of Electret-based Electrostatic Energy Harvester

HE Pengfei¹, YANG Xiaoya¹, MA Xingchen², ZHANG Xiaoqing², DAI Ying¹

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A variable capacitor based electrostatic energy harvester including a high elastic electret film was designed. The effects of structure parameters on the output power of the capacitor were studied by finite element method (FEM) and the structure of the capacitor was optimized. The experimental data are in agreement with the FEM calculations. The resonance frequency and output power can be adjusted by pre-stretching electret film and varying seismic mass. For an energy harvester, consisting of a fluorinated polyethylene propylene (FEP) electret film with an active area of 3 cm^2 and a surface charge density of $0.6\text{ mC}\cdot\text{m}^{-2}$, a V-shaped counter electrode with a depth of 4.0 mm , and a seismic mass of 0.06 g , an output power of $870\text{ }\mu\text{W}$ was achieved at its

resonance frequency of 20 Hz and sinusoidal acceleration excitation of $1g$.

Key words: electrostatic energy harvester; high elastic electret film; structure optimization

21 世纪以来, 微能量采集器的研究成为了新能源技术领域的热点之一。通过俘获传感器周围环境中的各种能量, 包括光能、热梯度能和机械能, 并将各种能量转变为电能, 能量采集器能够实现无线传感网络节点自供电^[1-3]。振动能量采集器通常俘获环境中广泛存在的低频振动能, 能量转换方式主要有压电式、静电式、电磁式以及摩擦电式^[4-8]。

静电式振动能量采集器是基于静电感应原理, 利用外界机械振动使带电可变电容器的电容值发生变化, 从而实现机械能向电能的转变, 如图 1a 所示。驻极体是能够长久保持极化状态的电介质材料, 将空间电荷驻极体膜内置于可变电容器中, 能为可变电容器提供偏置电压源^[9-10], 同时简化器件结构并减小体积和质量^[11-13]。基于驻极体的平行板可变电容振动能量采集器的工作原理如图 1b 所示。图 1 中, I 和 R_1 分别表示电流和电阻。

设计了一种由高弹驻极体膜、V 型感应电极和振子组成的振动能量采集器, 其中高弹驻极体膜采用具有波纹微结构的氟化乙丙烯(FEP)驻极体膜。通过建立有限元仿真与数值计算后处理结合的仿真模型, 研究了部件初始状态与可变结构参数对结构刚度的影响, 进而对能量采集器的谐振频率以及输出功率进行预测。最后, 通过实验验证了仿真模型与结果的正确性以及结构优化后装置的能量采集效率。

收稿日期: 2020-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61761136004)

第一作者: 贺鹏飞(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复合材料力学、计算力学。

E-mail: ph232@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

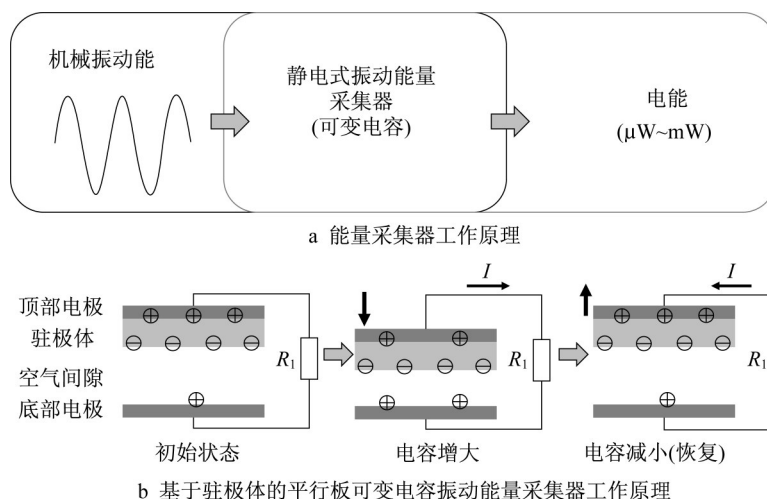


图1 静电式振动能量采集器工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrostatic vibration energy harvester

1 驻极体能量采集器结构与工作原理

图2为基于高弹单极性FEP驻极体膜的静电式振动能量采集器的模型示意图。其中,FEP驻极体膜有效长度 L 为30 mm,宽度 W 为10 mm(y 轴方向)。模板热压工艺赋予FEP膜波纹微结构,并使其具有高弹性。通过真空蒸镀法在薄膜上表面镀厚约100 nm的铝膜作为装置的顶部电极,采用电晕充电法在薄膜下表面沉积密度为 $0.6 \text{ mC} \cdot \text{m}^{-2}$ 的负极性电荷,制成高弹单极性FEP驻极体膜^[14-16]。高弹FEP驻极体膜的两端被固定在一个V形金属构件两端,V形构件在起到支撑作用的同时也作为能量采集装置的底部感应电极。V形电极深度 H 初始值为5.0 mm。将一个宽度为10 mm的金属块粘于高弹FEP驻极体膜的中央作为振子,利用电磁振动台对整个能量采集装置施加竖直方向的正弦加速度激励。在振动过程中,具有波纹微结构的高弹FEP驻极体膜发生变形,与V形感应电极之间的距离(即空气间隙厚度)发生变化,引起感应电荷在两电极板上分布的变化。电荷转移形成的电流通过与两电极串联的负载电阻,最终实现机械振动能到电能的转换。

2 结构输出功率

空气间隙厚度是影响装置可变电容,进而影响输出电流与功率的重要参数。空气间隙厚度与FEP驻极体膜的变形相关。采用Abaqus有限元软件中的动力学分析模块,计算FEP驻极体膜振动过程的

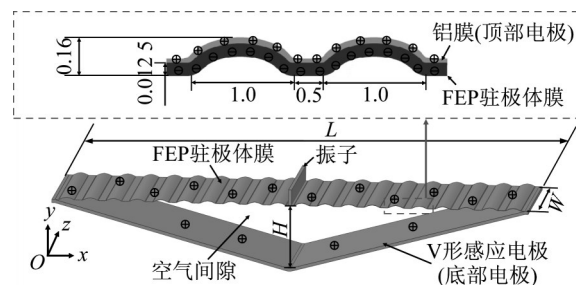


图2 基于高弹驻极体膜的静电式能量采集器模型示意图 (单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of high elastic electret based electrostatic energy harvester (unit: mm)

变形,根据驻极体膜与V形电极间的距离,获得空气间隙厚度。考虑结构宽度方向上约束、受力和变形的一致性,模型可简化为平面问题。计算中采用了CPE4R单元,在膜厚方向划分五层,单元长宽比为1:1,节点总数为89 488。由于驻极体膜振动时的变形较大,在进行动力分析时开启大变形分析选项。

若忽略边缘效应,任意时刻驻极体能量采集器的总电容

$$C(t) = 2 \int_0^{L/2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r W \sqrt{1+k^2}}{\epsilon_r d_A(x,t) + d} dx \quad (1)$$

式中: L 、 W 分别为FEP驻极体膜的长度和宽度; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为驻极体层的相对介电常数; d 为驻极体厚度; k 为V形底部电极拟合函数的斜率; $d_A(x,t)$ 为空气间隙厚度。

任意时刻底部电极的感应电荷量^[17]

$$Q_B(t) = 2 \int_0^{L/2} -\frac{\sigma_e W d \sqrt{1+k^2}}{\epsilon_r d_A(x,t) + d} dx \quad (2)$$

式中: σ_e 为驻极体膜的面电荷密度。将底部电极的感应电荷量对时间求导,获得输出交变电流

$$I(t) = \frac{dQ_B(t)}{dt} \quad (3)$$

装置的匹配负载电阻^[18]

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (4)$$

式中: ω_0 为谐振频率; C 为装置初始电容。匹配负载电阻下的有效输出功率

$$P_{out} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I^2(t) R_{opt} dt}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为振动开始和结束时间。最后,驻极体能量采集器的归一化输出功率^[19]

$$P_n = P_{out} \left(\frac{g}{a} \right)^2 \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度; a 为加速度激励的幅值。

3 结果与分析

3.1 载荷频率对输出功率的影响

图3a、3b、3c分别为驻极体能量采集器在10~100 Hz正弦加速度载荷下空气间隙厚度、装置总电容及输出电流的仿真结果,三者均在谐振频率(36 Hz)处出现最大值、最小值。空气间隙厚度变化为3.3 mm;装置总电容最高达7.1 pF;输出电流幅值与感应电荷量的变化速度正相关,在谐振频率处电流峰值为0.19 μ A。当激励频率接近振动能量采集器的谐振频率时,能量转换效率较高。此条件下,能量采集器的最大输出功率为34 μ W,如图3d所示。图3中,V形感应电极的深度 $H=5.0$ mm,高弹FEP驻极体膜两端的轴向预拉伸长度 $l=0.30$ mm,振子质量 $m_s=0.02$ g。下标ini、min、max分别指初始值、最小值和最大值。

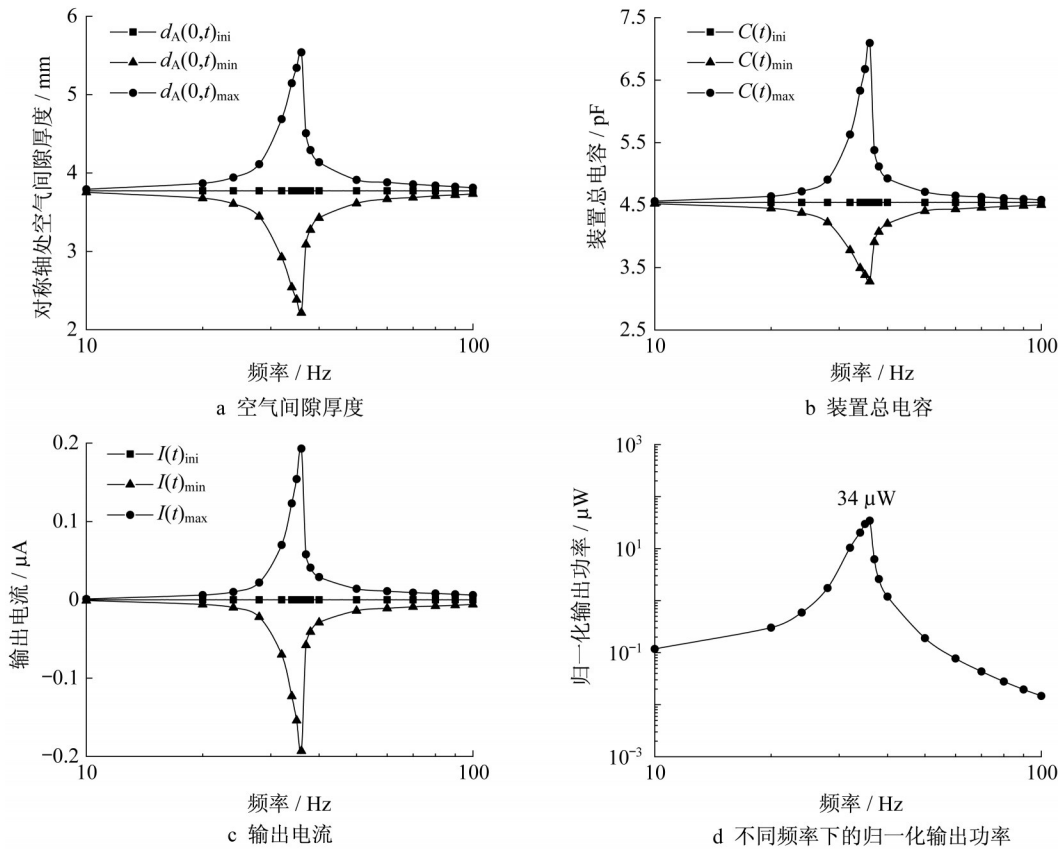


图3 不同频率载荷下物理量仿真结果

Fig.3 Simulation results of physical parameters at different frequency loads

3.2 结构刚度对谐振频率的影响

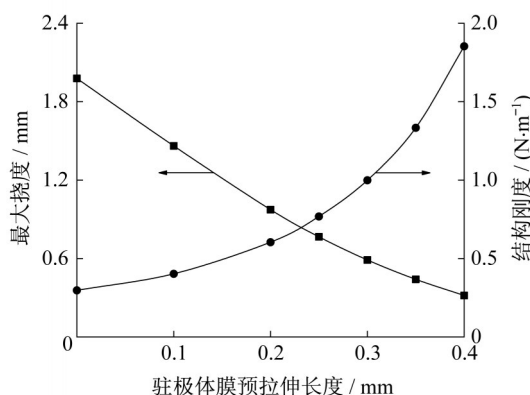
结构刚度是影响高弹驻极体振动能量采集器谐振频率的关键因素。将具有波纹微结构的FEP驻极体膜固定在V形底部电极上时,高弹FEP驻极体膜

预拉伸长度 l 对刚度影响显著。如图4a所示,保持振子质量为0.06 g,逐渐增加驻极体膜两端预拉伸长度至0.40 mm,由有限元数值仿真可得最大挠度由1.98 mm减小至0.32 mm,相应的结构刚度由

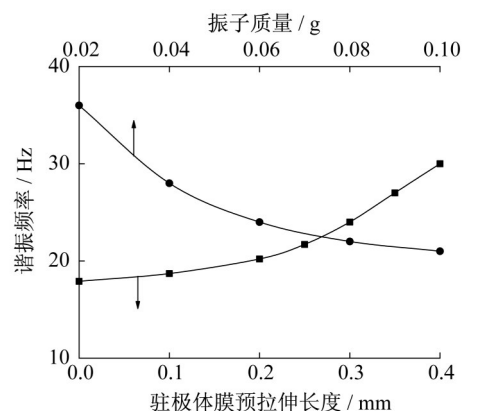
$0.30 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 加速增长至 $1.85 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$,因此装置谐振频率明显升高。增大振子质量则会降低装置的谐振频率,如图4b所示。图4b中,下轴对应振子质量 0.06 g ,上轴对应预拉伸长度 0.30 mm 。

3.3 驻极体膜预拉伸状态对输出功率的影响

通过仿真进一步研究了不同驻极体膜预拉伸状态下装置物理参数、工作带宽以及能量采集效率的变化。



a 驻极体膜预拉伸长度对挠度与刚度的影响



b 驻极体膜预拉伸长度与振子质量对谐振频率的影响

图4 结构刚度对谐振频率影响仿真结果

Fig.4 Simulation results of the effect of structural stiffness on resonance frequency

仿真结果显示,驻极体膜预拉伸 0.20 mm 的能量采集器在 20 Hz 谐振频率下归一化输出功率达 $333 \mu\text{W}$,如图5c所示。随着预拉伸长度增加,输出功率曲线向右偏移,归一化输出功率峰值逐渐减小。当驻极体膜两端预拉伸增至 0.40 mm 时,谐振频率达到 30 Hz ,但输出功率减至 $40 \mu\text{W}$,如图5d所示。因此,通过改变驻极体膜的预拉伸长度可实现装置谐振频率与输出功率的有效调节,使能量采集器更好地适应环境振动源的频率特性,以获得更高能量采集效率。

3.4 振子质量对输出功率的影响

保持高弹FEP驻极体膜预拉伸长度为 0.30 mm 、V形电极深度为 5.0 mm ,将振子质量由 0.02 g 增至 0.10 g ,仿真结果如图6所示。振子质量的增加导致驻极体膜初始变形增大,因此空气间隙初始厚度减小、装置初始电容增大。施加对应谐振频率的加速度载荷后,空气间隙厚度在振动中的最小值由 2.2 mm 减至 1.5 mm ,对应的装置总电容最大值由 7.1 pF 迅速增至 9.9 pF ,如图6a、6b所示。

振子质量为 0.02 g 时,能量采集器在 36 Hz 处输出功率为 $34 \mu\text{W}$;振子质量为 0.10 g 时,能量采集器在 21 Hz 的谐振频率下输出功率达 $261 \mu\text{W}$ 。谐振频率近似与 $m_s^{-1/2}$ 成比例,最大输出功率与 $m_s^{3/2}$ 成比

如图5a、5b所示,空气间隙初始厚度随高弹FEP驻极体膜预拉伸长度的增加逐渐增大,相应的装置初始电容呈下降趋势。对不同驻极体膜拉伸状态的能量采集器分别施加对应谐振频率的正弦加速度激励后,对称轴处空气间隙厚度在振动过程中的最小值由 1.3 mm 增至 2.4 mm ,对应的电容最大值由 10.8 pF 迅速减至 6.7 pF 。图5中, $H=5.0 \text{ mm}$, $m_s=0.06 \text{ g}$ 。

例,如图6c、6d所示。增大振子质量对提高振动能量采集器的输出功率有显著效果,但考虑轻量化需求,应综合考虑振动载荷、装置结构与尺寸、驻极体膜预拉伸状态等条件后选取合适的振子。

3.5 V形电极深度对输出功率的影响及尺寸优化

V形电极深度是影响空气间隙厚度,进而影响驻极体能量采集效率的重要参数。在驻极体膜预拉伸状态与振子质量不变的情况下,减小V形电极深度将使装置的输出功率呈指数型增长,并且谐振频率不发生偏移,如图7a所示。通过仿真模型获得对应不同驻极体膜预拉伸长度的最佳V形电极深度,采用最佳V形电极深度的优化装置,工作效率比原始装置(V形电极深度为 5.0 mm)有2倍提升,如图7b所示。驻极体膜预拉伸长度为 0.20 mm 时最佳V形电极深度为 4.0 mm ,制得相应模型器件并进行振动能量采集实验^[18-19]。实验中通过扫频分析驻极体能量采集器在 $10\sim 100 \text{ Hz}$ 正弦加速度激励下的输出功率,结果如图7c所示。结构优化后在谐振频率为 19.5 Hz 时装置输出功率高达 $870 \mu\text{W}$ 。仿真与实验结果对比如图7d所示,两者具有较高的一致性。图7中 $m_s=0.06 \text{ g}$,图7a中 $l=0.30 \text{ mm}$,图7c、7d中 $H=4.0 \text{ mm}$ 。图7d中实心方形与实心圆形散点分别为优化后能量采集器的最大输出功率和谐振频率的实验结果平均值,空心散点为5组实验结果。

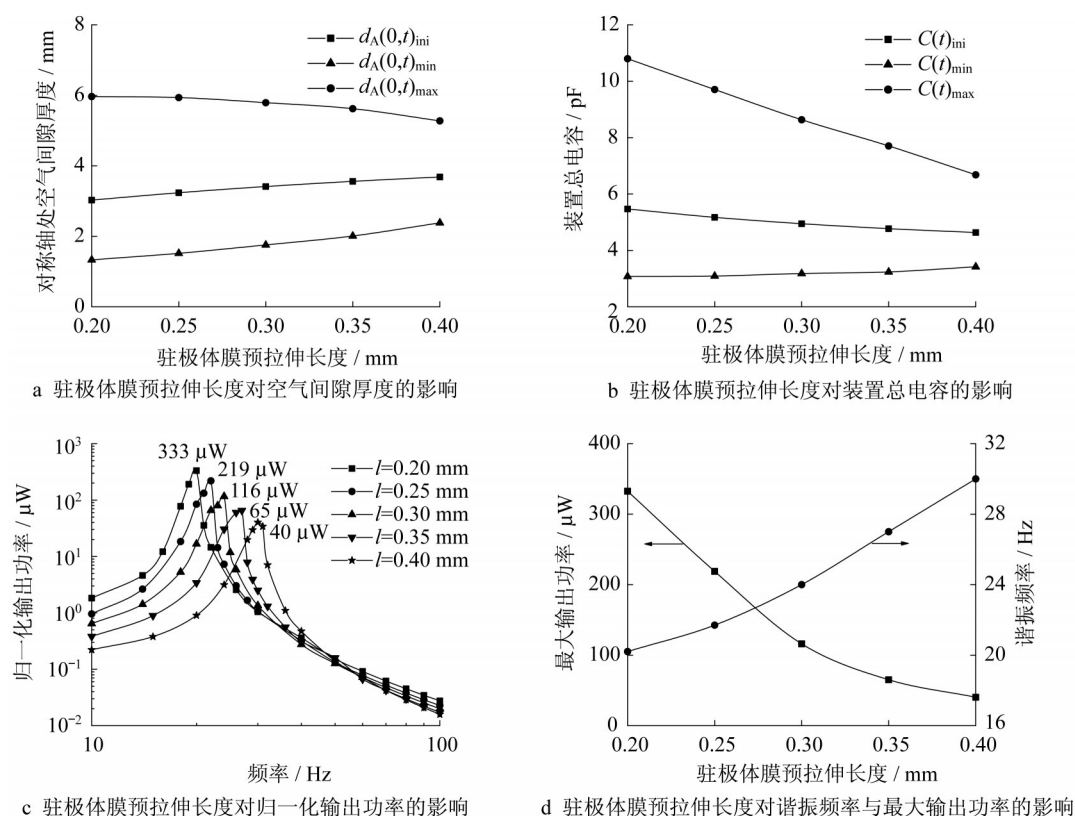


图5 驻极体膜预拉伸状态对输出功率影响的仿真结果

Fig.5 Simulation results of the effect of pre-stretching length of electret film on output power

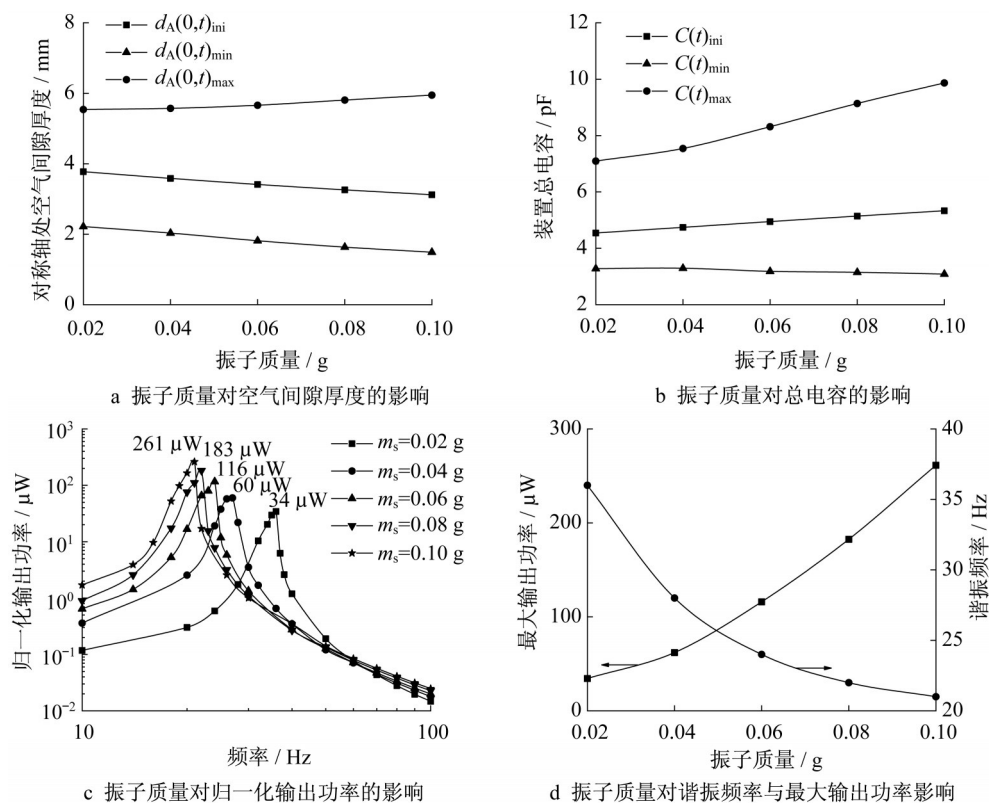


图6 振子质量对输出功率影响的仿真结果

Fig.6 Simulation results of the effect of seismic mass on output power

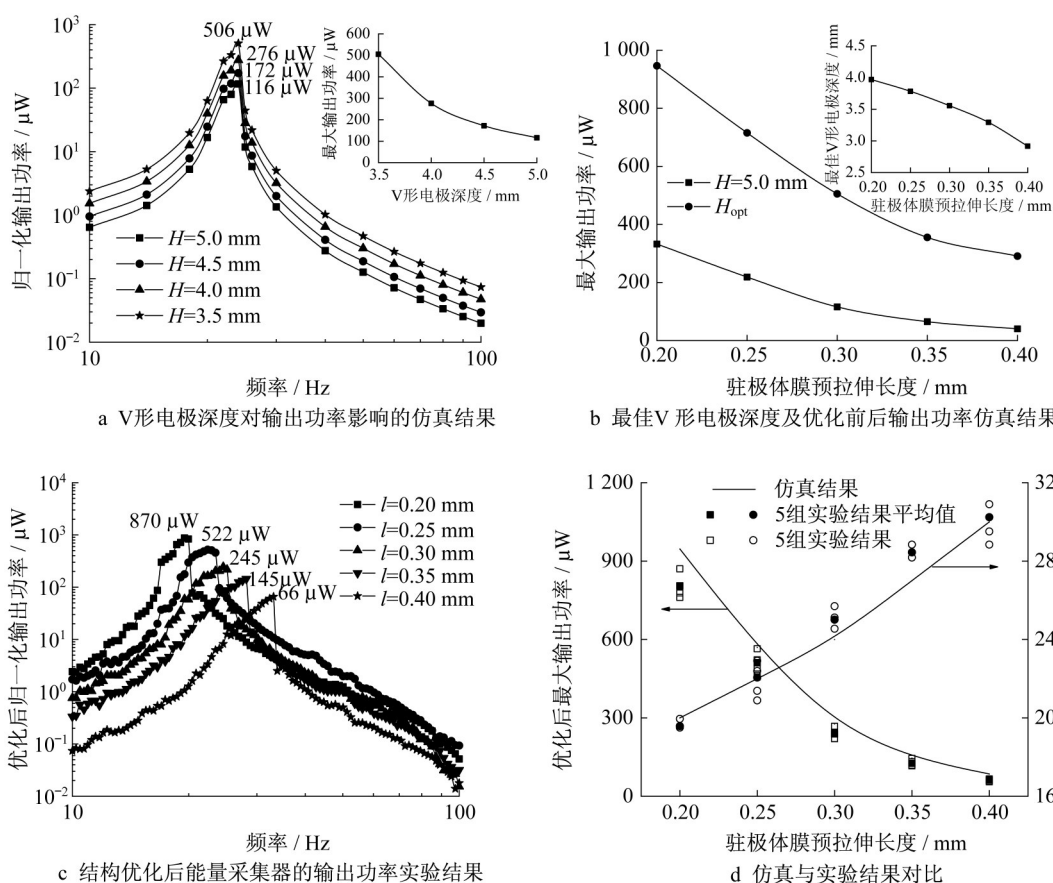


图7 V形电极深度对输出功率的影响及结构优化结果

Fig.7 Effect of V-shaped electrode depth on output power and structural optimization results

4 结论

(1)驻极体膜两端预拉伸长度为0.20 mm、振子质量为0.06 g、V形电极深度为4.0 mm时,有效面积为3 cm²的驻极体能量采集器在20 Hz、1g的正弦加速度激励下输出功率高达870 μ W。

(2)增加高弹驻极体膜的预拉伸长度将使结构刚度增大、谐振频率升高,最大输出功率明显降低。

(3)驻极体能量采集器的谐振频率和输出功率与振子质量的比例关系分别接近于 $-1/2$ 次方和 $3/2$ 次方。

作者贡献声明

贺鹏飞:提出研究方向与构想,给予建设性建议。

杨晓雅:完成仿真、实验、数据分析并撰写文章。

马星晨:协助完成实验和仿真,给予建议与帮助。

张晓青:构思并设计实验,分析数据并修改文章。

戴 瑛:给出研究思路、仿真建议以及论文修改建议。

参考文献:

[1] GHODSI M, ZIAIEFAR H, MOHAMMADZAHERI M, *et al*

al. Dynamic analysis and performance optimization of permendur cantilevered energy harvester [J]. Smart Structures & Systems, 2019, 23(5):421.

[2] ZHANG X, PONDROM P, SESSLER G M, *et al*. Ferroelectric nanogenerator with large transverse piezoelectric activity[J]. Nano Energy, 2018, 50:52.

[3] WANG Z, CHEN J, LIN L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors [J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(8): 2250.

[4] GU Y, LIU W, ZHAO C, *et al*. A goblet-like non-linear electromagnetic generator for planar multi-directional vibration energy harvesting[J]. Applied Energy, 2020, 266:114846.

[5] MACIEJ A N, MISA N V. Optimization of electromagnetic and vibration energy harvesters utilizing flexible piezoelectric cantilever beams[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(4):2998.

[6] SHAN X, LI H, YANG Y, *et al*. Enhancing the performance of an underwater piezoelectric energy harvester based on flow-induced vibration[J]. Energy, 2019, 172:134.

[7] ALI F, RAZA W, LI X, *et al*. Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications[J]. Nano Energy, 2019, 57:879.

[8] MAHARJAN P, BHATTA T, RASEL M S, *et al*. High-

(下转第1384页)