

文章编号 1004-924X(2012)05-1009-06

## 基于微液滴介质和差分电容器的 静电式微型振动发电机

温中泉\*, 何 渝, 王晓兰

(重庆大学 新型微纳器件与系统技术国家级重点学科实验室, 重庆 400044;

重庆大学 微系统研究中心, 重庆 400044)

**摘要:**针对现有悬臂梁式微型振动发电机存在低频响应不敏感, 抗冲击能力差等问题, 提出了一种利用微液滴介质拾振实现差分电容器变化及电荷转移的静电式微型振动发电机新结构。根据驻极体模型, 推导出了差分电容器极板的电荷分布公式; 结合微液滴作受迫正弦振动假设, 建立了静电式微型振动发电机的数学模型。采用 COMSOL Multiphysics 软件对微液滴运动及电容器极板电荷分布进行了仿真, 得到了发电机的输出电压幅频特性。制作出了以汞为介质的静电式微型振动发电机样机, 进行了样机的性能测试。实验结果表明: 该静电式微型振动发电机共振频率为 3 Hz, 在加速度为 3 g、振动激励频率为 3 Hz, 负载为 1 M $\Omega$  时, 测得样机输出电压峰-峰值为 1.21 V, 输出功率为 0.73  $\mu$ W, 实现了环境中低频振动能量的获取与转换。

**关键词:**微型振动发电机; 静电式发电机; 微液滴; 驻极体

**中图分类号:** TM387 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1009

## Micro electrostatic seismic power generator based on droplet and differential capacitors

WEN Zhong-quan\*, HE Yu, WANG Xiao-lan

(National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/ Nano Devices and Systems,  
Chongqing university, Chongqing 400044, China;

Microsystem Research Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: wenzq@cqu.edu.cn

**Abstract:** A micro electrostatic seismic power generator based on a droplet was proposed for harvesting the seismic energy in low frequency to improve its low frequency response and impact resistance abilities. The generator structure was based on the charge transfer between the differential capacitors inducted by the movement of the micro droplet in the electric field of an electret. According to the electret model, the charge distribution on the differential capacitors was derived. Combined with the assumption of forced sinusoidal vibration of the micro droplet, a mathematic model of the micro power generator was established. The COMSOL Multiphysics was employed to simulate the micro droplet movement and charge distribution, then the voltage-frequency characteristics were obtained. A prototype of the electret and micro-droplet-based micro seismic power

收稿日期: 2011-12-08; 修订日期: 2012-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60706032)

generator was developed and tested. Its resonant-frequency is 3 Hz, the output power is about  $0.73 \mu\text{W}$  on  $1 \text{ M}\Omega$  resistance when the vibration acceleration is 3 g under a resonant frequency. It can scavenge the energies from low-frequency external vibrations.

**Key words:** micro seismic power generator; electrostatic power generator; droplet; electret

## 1 引言

随着微电子技术、MEMS 技术和通信技术的快速发展,无线传感器网络、大型设备故障诊断系统、生物植入装置或嵌入式监测装置等微小型装备得以迅速发展,其体积越来越小,功耗也越来越低。但这些系统在特殊场合的应用以及需长期独立工作等特点也对其能源提出了小体积、长寿命、高能量密度等要求。然而,目前的化学能电池或燃料电池因为容量有限,需定期更换或充电,无法满足系统对微能源的迫切需求,能源问题已成为上述微小型装备发展的瓶颈之一。振动广泛存在于自然环境之中,因而采用 MEMS 技术获取与转换环境振动能量是解决上述微小型装备能源问题的重要途径,微型振动发电机已成为近年来各国微能源研究的重要方向<sup>[1-6]</sup>。其中,静电式微型振动发电机具有体积小、与 IC 工艺兼容,易于与 MEMS 器件和系统集成等优点,受到了国内外众多科研机构的青睐,并已取得了重要进展<sup>[7-9]</sup>。如 2008 年,日本东京大学机械工程系研制的基于驻极体的振动发电机<sup>[10]</sup>,质量块(硅材料)通过高弹性系数的聚对二甲苯弹簧与硅衬底相连,器件尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}^2$ ,所用驻极体的表面电势为  $-560 \text{ V}$ ,当以谐振频率 37 Hz 振动时,输出功率为  $0.28 \mu\text{W}$ (负载为  $100 \text{ M}$ );2009 年,日本三洋电机有限公司先进设备研究中心制作的基于驻极体的微型静电式振动发电机<sup>[11]</sup>,在加速度为  $0.4 \text{ g}$ ,振动频率为 2 Hz,负载为  $7 \text{ M}\Omega$  时,输出功率为  $40 \mu\text{W}$ 。目前,微型静电式振动发电机的拾振结构均采用悬臂梁,存在低频响应差、抗冲击能力差、易疲劳等问题。本文提出一种新型的静电式微型振动发电机,采用微液滴拾振,利用微液滴介质运动实现差分电容器变化和电荷转移,将环境振动能转换为电能,具有高可靠性、长寿命、小体积等特点,可满足低频振动环境下 MEMS 传感器和执行器对电源的需求。

## 2 结构与工作原理

基于微液滴介质和差分电容器的静电式微型振动发电机主要由一对差分电容器和驻极体构成,如图 1 所示。在驻极体产生的恒定电场极化下,差分电容器产生感应电荷;当微液滴介质在外界振动激励下运动,差分电容器发生变化,感应电荷将在差分电容器之间重新分布,从而在外电路中形成电流,实现将外界环境振动能转换为电能。

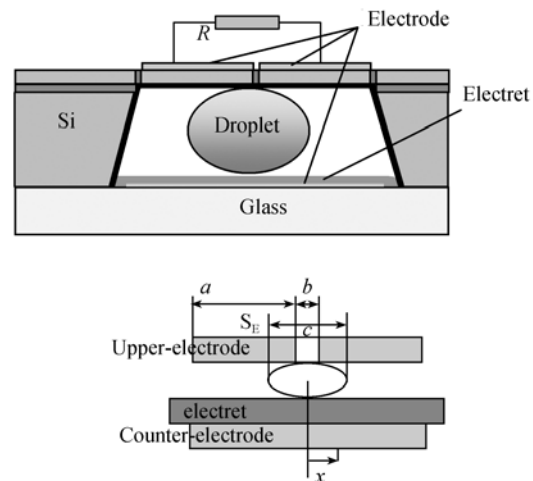


图 1 微型发电机结构示意图

Fig. 1 Schematic of Electrostatic MPG

该静电式微型振动发电机由固定电荷  $Q_i$ 、两个可变电容器  $C_1$ 、 $C_2$  以及与之相连的拾振系统组成,如图 2 所示。其中固定电荷是由驻极体外电场对差分电容器极化产生。

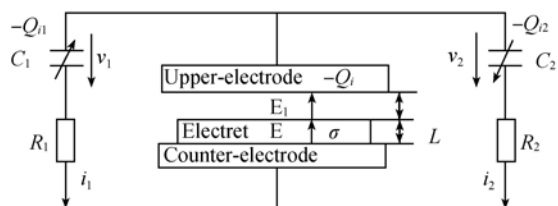


图 2 系统原理示意图

Fig. 2 Principle schematic of the electrostatic MPG

根据高斯定理,在驻极体上表面处的电势方程为:

$$-\epsilon_r \epsilon_0 E + \epsilon_0 E_1 = \sigma, \quad (1)$$

其中  $E, E_1$  分别为驻极体内部以及气隙中的电场强度,  $\sigma$  为驻极体等效表面电荷密度,  $\epsilon_r$  为驻极体材料的相对介电常数。

根据 Kirchhoff 定律,有:

$$\begin{cases} V_1 + i_1 R_1 + lE_1 + LE = 0 \\ V_2 + i_2 R_2 + lE_1 + LE = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

在平衡状态下,有:

$$\begin{cases} V_1 = V_2 = V = \frac{Q_i}{C_1 + C_2}, \\ i_1 = i_2 = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中, 
$$\begin{cases} C_1 = \frac{S_E \beta}{al} \\ C_2 = \frac{S_E \epsilon_r}{L} \end{cases}.$$

由此可以得到输出电流  $i$  和输出功率分别为:

$$i(f, t) = \frac{dQ_{d1}}{dt} = \Delta Q(f, t) = \frac{\epsilon_r al L \sigma S S_E}{2 \left( L + \frac{\epsilon_r al}{\beta'_1(f, t)} \right) [2 \epsilon_r l \beta S_E + 2 L \beta S_E + \epsilon_0 S(\beta L + al \epsilon_r)]}$$

$$P_R = \left( \frac{dQ_{d1}}{dt} \right)^2 R. \quad (6)$$

### 3 模拟仿真

采用 COMSOL Multiphysics V3.4 软件对静电式微型振动发电机进行建模与仿真,系统模型如图 3 所示。其中,  $E_4$  和  $E_5$  为模型的上极板,  $E_2$  为模型的下极板,  $E_1$  为液滴,  $E_3$  为驻极体。结构参数如下:上电极为  $9.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ,下电极为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ;腔体为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,壁厚为  $1 \text{ mm}$ ;驻极体(Teflon 材料)为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ ,介电常数为 2.1,表面等效电荷密度为  $-0.9 \text{ mC/m}^2$ 。液滴材料为汞,液滴的体积为  $800 \mu\text{l}$ ,静态接触角为  $137^\circ$ 。

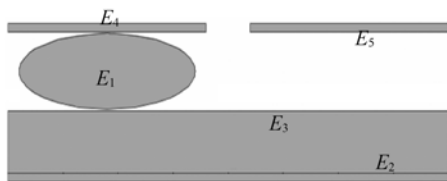


图 3 静电式微型振动发电机模型示意图  
Fig. 3 Model diagram in CoventorWare

则差分电容上的电荷和电势差分别为:

$$Q_{d1} = Q_{d2} = \frac{L S \sigma \beta S_E}{2 \epsilon_r l \beta S_E + 2 L \beta S_E + \epsilon_0 S(\beta L + al \epsilon_r)}, \quad (4)$$

$$V = \frac{Q_i}{2 C_0} = \frac{L S \sigma (\beta L + al \epsilon_r)}{2 \epsilon_r S_E \beta (\epsilon_r l + L) + \epsilon_0 \epsilon_r S(\beta L + al \epsilon_r)}, \quad (5)$$

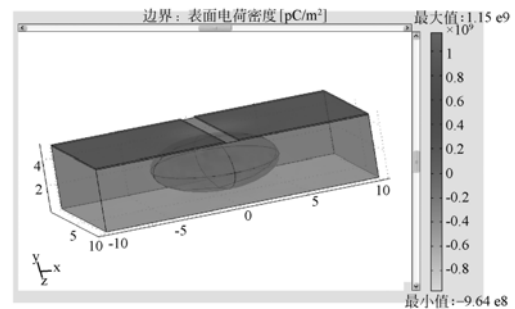
其中,  $\beta = \frac{c-b}{2}(\epsilon_w - \epsilon_0) + a \epsilon_0$ ;  $S_E$  为电极面积;  $\epsilon_w$  为液滴介电常数;  $a, b, c$  分别表示上极板长度,电极间距和微液滴长度。

假设在外部振动激励下,微液滴作正弦振动  $x = m \cos(2\pi f t)$ ,差分电容变为  $C_1'$  和  $C_2'$ :

$$\begin{cases} C_1' = \frac{S_E \epsilon_r \beta_1'}{\beta_1' L + \epsilon_r al} \\ C_2' = \frac{S_E \epsilon_r \beta_2'}{\beta_2' L + \epsilon_r al} \end{cases},$$

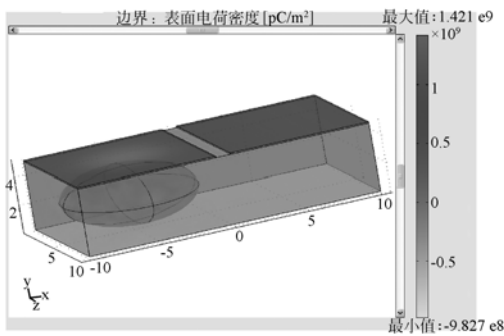
其中,  $\beta_1' = \left( \frac{c-b}{2} - x \right) (\epsilon_w - \epsilon_0) + a \epsilon_0$

在加速度为  $3g$  情况下,对液滴运动和表面电荷分布情况进行仿真,结果如图 4 所示,图 4(a)、图 4(b)分别为液滴在不同位置时的表面电荷分布情况,纵坐标为感应电荷密度。可以看出,感应电荷在上极板表面呈非均匀分布;图 4(a)中两个上极板感应电荷呈对称分布;图 4(b)中液滴区域平均感应电荷密度为  $0.12 \text{ mC/m}^2$ ,非液滴区域平均感应电荷密度为  $1.23 \text{ mC/m}^2$ ;液滴振动幅度为  $-4.2 \sim 4.2 \text{ mm}$ 。将得到的感应电荷密度代入式(5),计算



(a) 微液滴居中

(a) Droplet at the center



(b) 微液滴位于一侧

(b) Droplet beneath one electrode

图 4 液滴在不同位置时的仿真结果

Fig. 4 MPG charge distribution on electrodes

得到单个可变电容器的输出电压幅频特性,如图 5 所示。可见在共振频率 4.1 Hz 下,静电式微型振动发电机输出电压达到最大为 1.77 V。

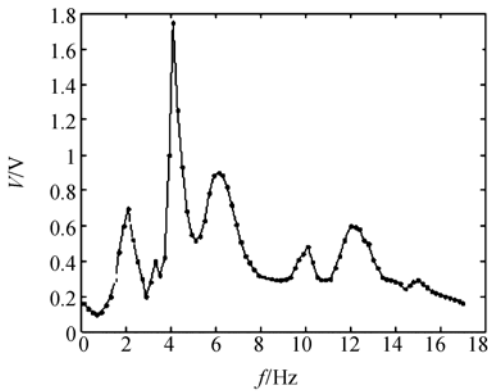


图 5 输出电压—频率特性

Fig. 5 Voltage—frequency characteristics

#### 4 原理样机制作与性能测试

根据上述仿真结果,制作出了基于微液滴介质的静电式微型振动发电机样机,如图 6 所示。

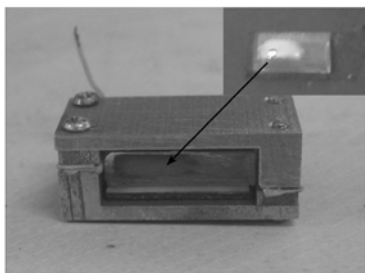


图 6 静电式微型振动发电机样机

Fig. 6 Prototype of electrostatic MPG

采用如图 7 所示的测试平台对静电式微型振动发电机进行了测试。固定振动加速度为 3g,利用低频扫描信号发生器调节激振器振动频率,采用示波器观察不同频率下微型发电机的输出波形(负载电阻  $R=1\text{ M}\Omega$ )。根据输出功率计算公式,计算得到微型发电机的频率响应特性曲线,图 8 为微型振动发电机样机输出电压—频率特性仿真曲线与实测曲线对比图。

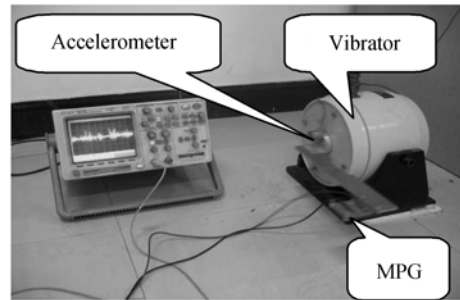


图 7 微型振动发电机测试平台

Fig. 7 Test platform of MPG

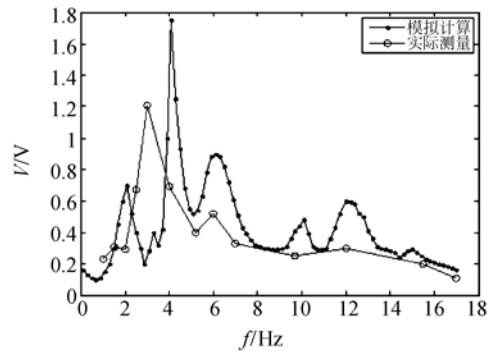
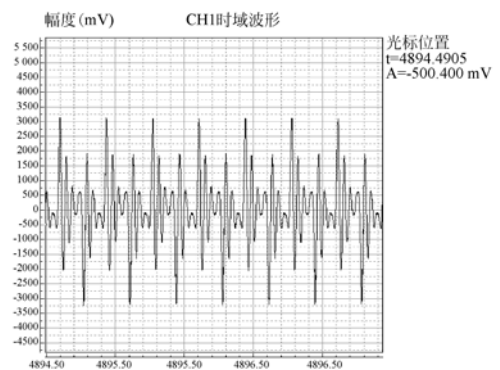


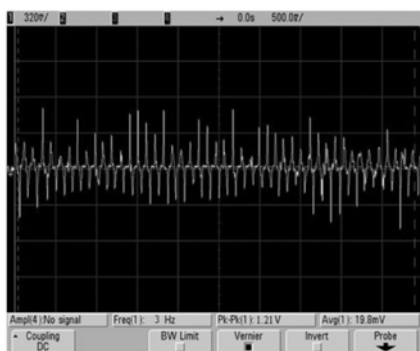
图 8 微型发电机样机输出电压频率特性曲线

Fig. 8 Frequency characteristics of MPG prototype



(a) 激励波形

(a) Excitation waveform



(b) 微型发电机输出波形

(b) MPG output waveform

图9 3 Hz 激励波形与微型发电机输出电压波形

Fig. 9 Excitation waveform(3 Hz) and MPG output waveform

由图8可知,当外部激励微型发电机共振频率为3 Hz,加速度为3g时,微型发电机的输出电压峰-峰值达到最大(1.21 V),图9为激励频率3 Hz时的振动加速度波形与微型发电机输出电压波形,可计算得到静电式微型振动发电机的输出

功率为 $0.73 \mu\text{W}$ 。

由测试结果可以看出,样机的输出结果与模拟仿真结果趋势一致,但由于样机制作中的加工误差和低频扫描信号发生器分辨率较低(1 Hz),使得实测共振频率和输出电压比仿真值偏小。

## 5 结 论

本文根据环境中低频振动能量获取与转换的需求,提出了一种基于微液滴介质和差分电容器的新型静电式微型振动发电机,进行了微型振动发电机理论分析和仿真。制作出了以汞为介质的静电式微型振动发电机样机,并进行了性能测试;当外加激励为共振频率3 Hz,加速度为3g时,微型振动发电机的输出电压峰-峰值为1.21 V,输出功率为 $0.73 \mu\text{W}$ 。该静电式微型振动发电机采用微液滴拾振,具有低频响应特性好、抗冲击能力强等优点,与微小型储能器结合,可实现对低频振动环境中低功耗传感器和执行器等微小型装备供能,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] MARCIN M, YASSER A, SKANDAR B. Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit[C]. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2007, 10-14: 887-890.
- [2] IBRAHIM S, TUNA B, HALUK K. An electro-magnetic micro energy harvester based on an array of parylene cantilevers[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(10): 41.
- [3] STEPHEN P B, TERENCE O. *Electromagnetic Energy Harvesting*[M]. Springer US, 2009: 129-161.
- [4] DIBIN Z, STEPHEN R, MICHAEL J T, et al.. Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010 (158): 284-293.
- [5] MARIOS S, CHARLENE N, RUSSEL T et al.. Screen-printed piezoelectric generator for helicopter health and usage monitoring systems[C]. *Proceedings Power MEMS*, 2008: 201-204.
- [6] 贺学锋,杜志刚,赵兴强,等. 悬臂梁式压电振动能采集器的建模及实验验证[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1771-1778.
- [7] HE X F, DU ZH G, ZHAO X Q, et al.. Modeling and experiment verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8):1771-1778. (in Chinese)
- [8] SHAD R, PAUL K W. Micro-electrostatic vibration-to-electricity convertors[C]. *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 2002: 1-10.
- [9] TAKASHI G, SHUJI T, MASAYOSHI E. High power electrostatic motor and generator using electrets [C]. *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston*, 2003: 492-496.
- [10] TAKUMI T, YJUI S, NOBUHIDE K, et al.. High-performance polymer electret for micro seismic generator[C]. *PowerMEMS2005*, 2005(11): 28-30.
- [11] MASATO E, YUJI S, NOBUHIDE K, et al.. Electret-based energy harvesting device with parylene flexible springs [C]. *The 4th Asia Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano*

*Technologies* (APCOT) 2008; 2B3-1.

- [11] NARUSE Y, MATSUBARA N, MABUCHI K, *et al.*. Electrostatic micro power generation from

low-frequency vibration such as human motion[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(9): 1-5.

#### 作者简介:



温中泉(1975—),男,重庆人,博士,副教授,主要从事微机电系统及微型分析仪器方面的研究。Email: wen\_zq@cqu.edu.cn



王晓兰(1959—),女,重庆人,实验师,主要从事 MEMS 工艺的研究。Email: wxlgd@cqu.edu.cn



何 渝(1984—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事微机电系统及微型分析仪器方面的研究。Email: alick.heyu@139.com

#### ●下期预告

## 谱域光学相干层析成像量化技术 及其在生物组织定量分析中的应用

张芹芹<sup>1</sup>,吴晓静<sup>2</sup>,朱思伟<sup>2</sup>,高 志<sup>3</sup>,袁小聪<sup>1\*</sup>

(1. 南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071;

2. 南开大学人民医院 分子医学与纳米光学实验室,天津 300121;

3. Department of Bioengineering, Clemson University, Clemson, South Carolina 29634, USA)

谱域光学相干层析(OCT)成像系统的量化技术,利用量化 OCT 图像的方法来获得生物组织内部的信息特征,是对组织光学散射特性进行定量分析的新手段。本文给出并讨论了单次散射模型,具有轴向 PSF 的单次散射模型和多次散射模型,利用平均 A-scan 算法和非线性最小二乘法曲线拟合,研究不同浓度 Intralipid™ 溶液的散射特性。研究显示,Intralipid™ 溶液的散射系数与浓度在 1%~10% 之间基本呈线性关系,验证了具有 PSF 的单次散射模型比较适用于本文的谱域光学相干层析成像系统。同时利用该模型对小鼠的新鲜肝脏进行量化研究,得到小鼠新鲜肝脏在波长  $\lambda_0$  为 850 nm 时的散射系数为  $8.9 \text{ mm}^{-1}$ 。本文对谱域光学相干层析成像系统的量化技术研究,为以后在临床医学上各种疾病的研究奠定了基础。