

液滴型振动式能量收集器的实验研究

丁靖¹ 范士罔² 陶文铨¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049; 2. 台湾大学机械工程学系, 台北 10617)

摘要 能量收集是一种将环境中微小的能量转换成电能的技术, 具有清洁环保的优点。本文主要研究了液滴型振动式能量收集器的输出特性和相关影响因素。本文首先制作了基于单颗液滴的振动式能量收集器, 然后对其输出电压和输出功率进行了测量。实验结果表明, 由于液体与固体的有效接触面积更大, 液滴型振动式能量收集器的输出性能比无液滴的振动式能量收集器的性能更优。为了提高输出功率, 本文进而制作了基于并联液滴的振动式能量收集器。实验发现, 增加并联液滴的数量可以显著提升能量收集器的输出功率。随后, 本文还对能量收集器的输出功率、液滴数量和负载电阻的相互影响进行了实验研究。最后, 本文对实验测量数据进行了误差分析, 证明了测量结果的可靠性。

关键词 能量收集; 液滴; 输出功率

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2019)06-1205-06

Experimental Study of Droplet-Based Vibrational Energy Harvesters

DING Jing¹ FAN Shih-Kang² TAO Wen-Quan¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Taiwan University, Taipei 10617, China)

Abstract Energy harvesting is the conversion of ambient energy existing in the environment into electrical energy, which is regarded as a clean and environmental friendly technology. The output characteristics and the affecting factors of the droplet-based vibrational energy harvester were investigated in this research. A vibrational energy harvester based on a single droplet was fabricated and measured for its output voltage and output power. The experimental results showed that the output performance of the droplet-based vibrational energy harvester is better than that of the vibrational energy harvester without a droplet, because the effective contact area between liquid and solid is larger than that between solid and solid. In order to improve the output power, a vibrational energy harvester based on droplet array was fabricated. It was experimentally confirmed that the output power of the energy harvester can be significantly improved by increasing the number of droplets. Besides, the effects of droplet number and load resistance on the output power of the energy harvester were experimentally studied. Finally, error analysis was conducted on the measurement data to verify the reliability of experimental results.

Key words energy harvesting; droplet; output power

0 引 言

能量收集是将环境中所存在的各式各样的能量转换成电能的一种技术^[1]。在我们周围的环境中, 有太阳能、热能、振动能、风能、电磁能等各种能量, 这些能量都可以通过能量收集技术转换成电能, 为生产活动和生活提供电力。本文所研究的能量收集技术主要指将环境中微小的能量转换成电能, 用以小型、低功耗的电子设备供电的技术。该技术具备清洁、环保、无噪音等优点, 是实现无线传感器等电子设备自供能的关键技术, 具有良好的应用前景。

能量收集的能量来源主要有振动能、太阳能、热能和射频能^[2]。其中, 振动能可以通过压电效应、电磁感应、静电感应以及摩擦生电等方式转换成电能。压电式能量收集器具有输出电压高的优点, 但是压电材料一般较为昂贵。电磁式能量收集器输出电流较高、稳定性较好, 但是输出电压较低^[3]。静电式能量收集器输出电压较高、易于小型化, 但是对微米尺度的间隙控制要求较高^[4]。摩擦式能量收集器具有输出电压高、结构简单、成本低廉等优点, 近年来

收稿日期: 2019-02-15; 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 海外及港澳学者合作研究基金 (No.51728602); 国家自然科学基金创新群体 (No.51721004)

作者简介: 丁靖 (1990-), 男, 博士研究生, 主要从事微流控研究, dingjing.09@stu.xjtu.edu.cn. 通信作者: 陶文铨, 教授, E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn.

得到越来越多研究者的关注与重视。

摩擦式能量收集器可以分为两类，一类是固体与固体发生摩擦产生电能，另一类是固体与液体发生摩擦产生电能^[5]。对于固体与固体摩擦的能量收集器，其不可避免地存在磨损的问题。另外，由于固体表面一般都具有微纳米尺度的粗糙度，导致固体与固体之间的有效接触面积减小，限制了能量收集器输出功率。对于固体与液体摩擦的能量收集器，则不存在磨损的问题，器件的耐久性得以提升，而且由于液体可以更好与固体表面进行接触，有望进一步提高能量收集器的输出功率。

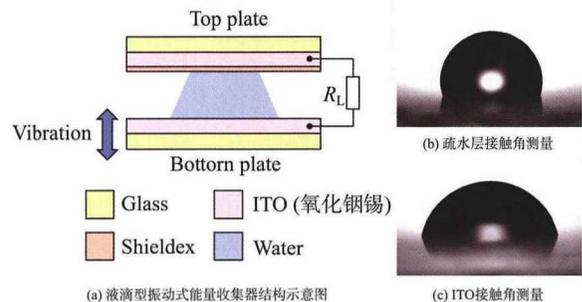
目前已有研究者对固体与液体摩擦的能量收集器进行了研究。Moon 等^[6]提出了一种通过上下平板挤压液滴产生电能的能量收集器，用以将振动能转换成电能。Kwon 等^[7]利用镀有介电层和疏水层的叉指型电极收集液滴滑落的动能。Yildirim 等^[8]通过在微通道上顶面和下底面布置电极，收集两相流流动的动能。Tang 等^[9]将表面镀有介电层的电极部分浸没在液态金属里，利用振动过程中液态金属与介电层的摩擦收集电能。

本文主要研究了液滴型振动式能量收集器的输出特性及相关影响因素。本文制作了基于单颗液滴的振动式能量收集器，测量了该能量收集器的输出特性，并与无液滴的振动式能量收集器进行了比较。由于单颗液滴的能量收集器输出功率较小，无法满足实用要求。为了提高输出功率，本文制作了一种基于液滴阵列的振动式能量收集器，并研究了输出功率、负载电阻以及液滴数量的相互影响规律。

1 能量收集器

1.1 装置结构

本文的液滴型振动式能量收集器的结构如图 1(a) 所示，其中下板是一块 ITO 玻璃，上板是一块表面镀了疏水层的 ITO 玻璃，上板与下板之间夹着一颗去离子水液滴。疏水层的材料是 Shieldex，由 Integrated Surface Technologies 公司提供，其主要成分是 C、H、F、Cl。疏水层与水的接触角为 109° ，如图 1(b) 所示，而 ITO 表面是亲水的，与水的接触角为 78° ，如图 1(c) 所示。



(a) 液滴型振动式能量收集器结构示意图

(c) ITO 接触角测量

图 1 液滴型振动式能量收集器的示意图

Fig. 1 Schematic of the droplet-based vibrational energy harvester

1.2 工作原理

液滴型振动式能量收集器的工作原理如图 2 所示。当上板固定，下板上下振动时，液滴会被下板挤压或者释放。假设初始时刻，下板处于最低的位置，此时液滴与上板不接触，如图 2 中的 I 所示。随后下板开始向上运动，当液滴刚接触到上板时，液滴

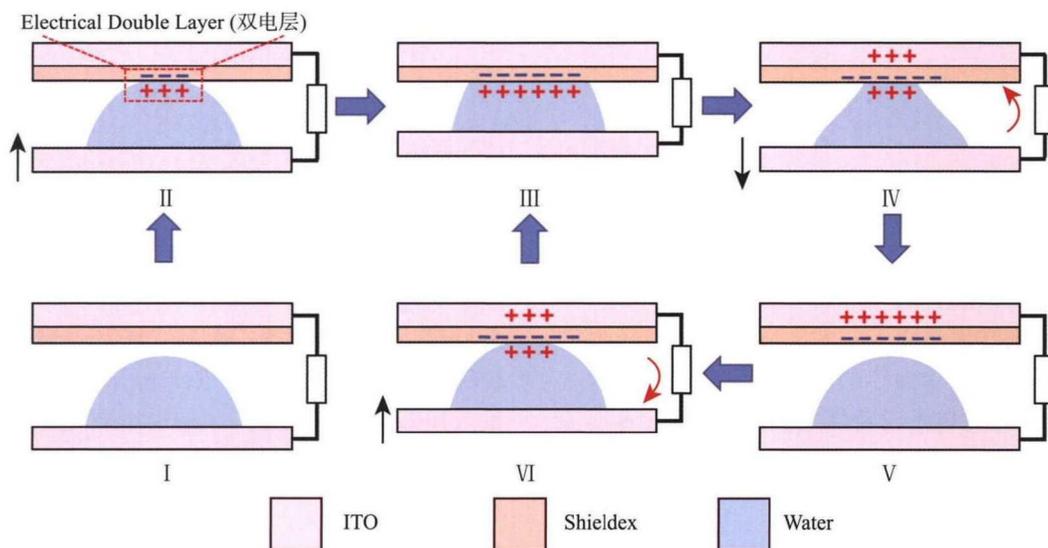


图 2 液滴型振动式能量收集器的工作原理

Fig. 2 Schematic diagram of droplet-based vibrational energy harvester

与上板疏水层的接触界面上会形成双电层 (Electrical Double Layer), 其中液滴侧带的是正电荷, 固体侧带的是负电荷, 如图 2 中的 II 所示。随着下板继续向上运动, 液滴与上板疏水层的接触界面逐渐增大, 双电层的面积也随之增大。当下板向上运动到最高点, 双电层的面积达到最大值, 如图 2 中的 III 所示。然后下板开始向下运动, 液滴与上板疏水层的接触面积逐渐减小, 固体表面所带的负电荷会保留在原来的位置, 不会随着固液接触面积的减小而发生转移。液滴侧所带的正电荷则会随着固液接触面积的减小而减少。为了使上板疏水层保持电中性, 疏水层表面所带的负电荷会吸引上板 ITO 中的正电荷聚集到疏水层附近, 同时排斥上板 ITO 中的电子。这些被排斥的电子从上板的 ITO 通过负载运动到下板的 ITO, 形成由下板通往上板的电流, 如图 2 中的 IV 所示。当下板运动到最低点, 液滴与上板疏水层分离, 此时疏水层表面带负电荷, 上板 ITO 带正电荷, 如图 2 中的 V 所示。然后上板又开始向上运动, 当液滴与上板疏水层接触后, 固液接触面再次形成双电层, 此时固体侧所带的负电荷会排斥液滴中的电子, 使液滴中的电子通过下板 ITO 和负载运动到上板 ITO, 形成从上板通往下板的电流, 如图 2 中的 VI 所示。运动到上板 ITO 的电子还会中和上板 ITO 原来所带的正电荷, 使上板疏水层始终保持电中性。接下来该振动式能量收集器在振动过程中会重复图 2 中 III-VI 的过程, 当下板向上运动的时候, 输出从上板通往下板的电流, 当下板向下运动的时候, 输出从下板通往上板的电流, 即该振动式能量收集器在振动过程中对外输出与振动频率一致的交流电。

2 元件制作与实验系统

2.1 液滴型振动式能量收集器的制作

首先用玻璃切割器切出两片 ITO 玻璃, 然后依次使用丙酮和异丙醇清洗 ITO 玻璃, 并放入超声波清洗机中振荡。接着使用去离子水清洗 ITO 玻璃, 清除表面灰尘与残余油脂。然后用气枪将 ITO 玻璃吹干, 并放到电热板上加热, 去除残余水汽。接下来, 留下一片 ITO 玻璃作为下板, 将另一片 ITO 玻璃放到化学气相沉积系统 (BL200, Integrated Surface Technologies) 中沉积疏水层。最后, 使用移液器在下板上滴去离子水液滴, 再盖上上板, 即可得到液滴型振动式能量收集器。

2.2 性能测试系统

液滴型振动式能量收集器制作完成后, 便可将

其安装到性能测试系统上进行输出性能的测量。性能测试系统如图 3 所示。能量收集器的下板固定在电磁激振器 (ET-126-4, Labworks) 上, 能量收集器的上板固定在手动升降台的悬臂梁上, 通过调节升降台的高度可以调节上下板的间距。本文使用函数信号发生器 (33210A, Agilent) 产生特定频率的波形, 然后通过功率放大器驱动电磁激振器, 带动能量收集器的下板上下振动。能量收集器在振动过程中输出的电信号可通过数字电表 (6517B, Keithley) 进行测量。

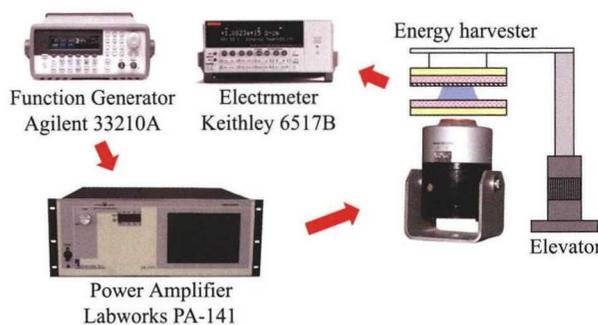


图 3 性能测试系统

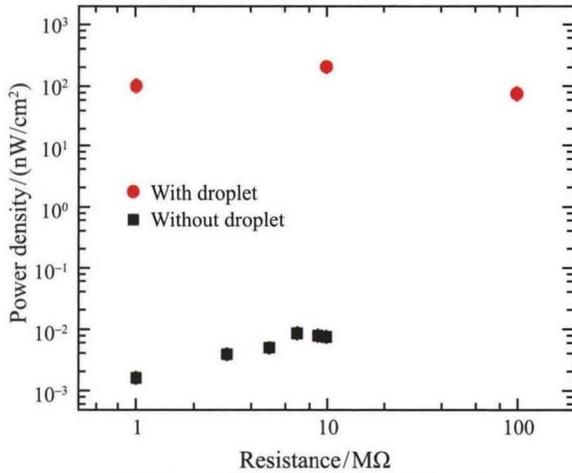
Fig. 3 Performance test system

3 结果与讨论

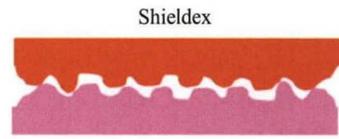
3.1 基于单颗液滴的振动式能量收集器

图 4(a) 展示的是基于单颗液滴的振动式能量收集器与无液滴的振动式能量收集器的功率密度的对比, 其中功率密度定义为输出功率与接触面积之比。对于液滴型振动式能量收集器, 接触面积为液滴与下板的接触面积。实验中所使用的液滴体积为 $5 \mu\text{L}$, 液滴与下板的接触面积为 7.45 mm^2 。对于无液滴的振动式能量收集器, 接触面积即为上板和下板的接触面积。实验中上下板的接触面积为 $28 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ 。对于两种振动式能量收集器, 振动频率均为 1 Hz 。从图 4(a) 中可以看出, 无液滴的振动式能量收集器产生的输出功率比液滴型振动式能量收集器的输出功率小很多。这是因为, 实际的固体表面是凹凸不平的, 并非绝对平整的。当上板与下板接触时, 实际发生接触的只有很小一部分区域, 还有很大一部分区域是没有发生接触的, 如图 4(b) 所示, 因此无液滴的振动式能量收集器产生的输出功率很小。对于液滴型振动式能量收集器, 由于液滴可以完全浸润固体表面, 如图 4(c) 所示, 因此液体与固体的有效接触面积比固体与固体的有效接触面积大, 导致液滴型振动式能量收集器的功率密度比较高。

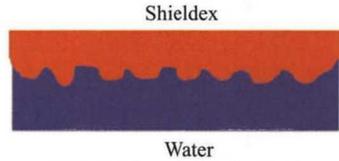
图 5 展示的是基于单颗液滴的振动式能量收集



(a) 有液滴的振动式能量转换装置与无液滴的振动式能量转换装置的功率密度



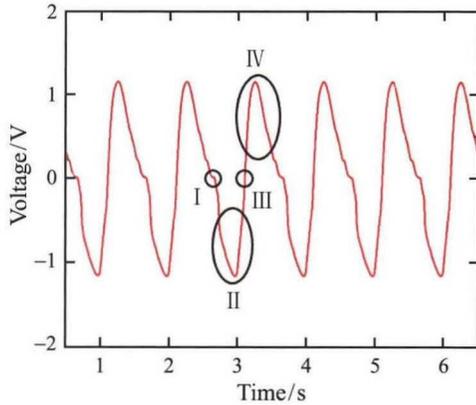
(b) 疏水层与ITO接触的示意图



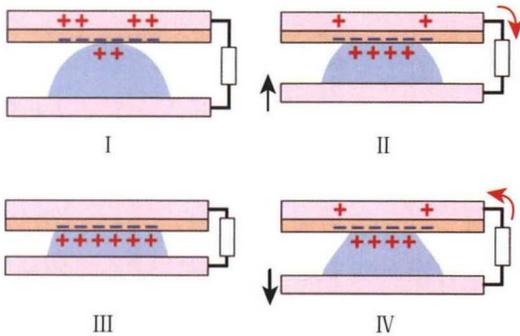
(c) 疏水层与水接触的示意图

图 4 有液滴与无液滴的振动式能量收集器的功率密度

Fig. 4 Power densities of the vibrational energy harvesters with droplet and without droplet



(a) 输出电压随时间的变化曲线



(b) 振动过程中电荷的分布情况

图 5 液滴型振动式能量收集器的工作原理

Fig. 5 Working mechanism of the droplet-based vibrational energy harvester

器的输出电压随时间的变化曲线。实验中所使用的液滴体积为 40 μL, 下板与上板的初始间距为 2.5 mm, 并按照正弦规律以 1 Hz 频率和 0.6 mm 振幅上下振动, 负载电阻为 10 MΩ。图 5 电压变化曲线

上的 I 和 III 分别对应于下板处于最低点和最高点的位置。当下板位于最低点或者最高点, 下板的运动速度为零, 固液接触面积的变化也为零, 此时没有产生电荷转移, 因此输出电压为零。电压变化曲线上的 II 和 IV 分别对应于下板向上运动和向下运动过程中的某个位置。在该位置处, 下板的运动速度最大, 固液接触面积的变化速率也最大, 此时转移的电荷量最多, 因此输出电压达到最大值。

3.2 基于并联液滴的振动式能量收集器

基于单颗液滴的振动式能量收集器的输出功率较小, 较难用于驱动电子设备。为了提高装置的输出功率, 本文尝试将多颗液滴并联, 得到如图 6 所示的并联液滴型振动式能量收集器。并联液滴型振动式能量收集器的结构与单颗液滴的振动式能量收集器的结构类似, 上板都是镀了疏水层的 ITO 玻璃, 主要区别在于下板的结构。下板的制作工艺流程如图 7 所示。首先, 在 ITO 玻璃上旋涂光刻胶, 通过曝光、显影等工艺对光刻胶进行图案化, 然后将 ITO 玻璃放入化学气相沉积系统沉积疏水层 (Shieldex), 然后将 ITO 玻璃放入去胶液中, 将光刻胶表面的疏水层剥离, 使一部分 ITO 暴露出来。最后将一定体积的液滴滴到暴露出来的 ITO 上, 并盖上上板, 即可得到并联液滴型振动式能量收集器。

图 8 展示的是不同液滴数量的振动能量收集器的输出功率随负载电阻的变化关系。实验中每颗液滴的体积均为 5 μL, 上板与下板的初始间距为 1.05 mm, 下板的振动频率为 30 Hz, 振幅为 0.4 mm, 负载电阻的变化范围为 1 kΩ~100 MΩ。从图中可以看出, 增加液滴数量可以显著提升能量收集器的输出

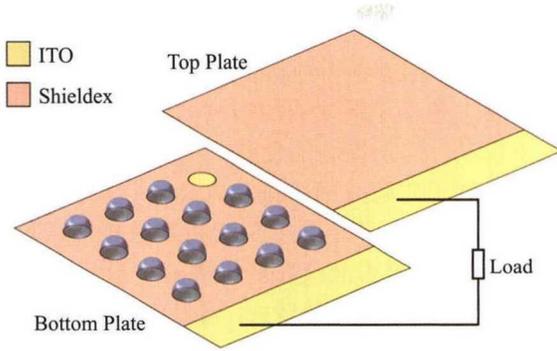


图 6 并联液滴型振动式能量收集器结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vibrational energy harvester based on droplet array

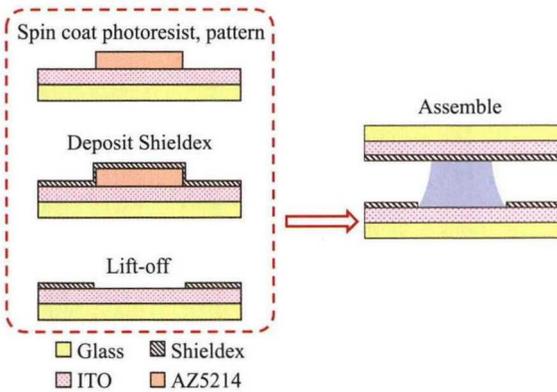


图 7 并联液滴型振动式能量收集器的制作流程

Fig. 7 Process flow of vibrational energy harvester based on droplet array

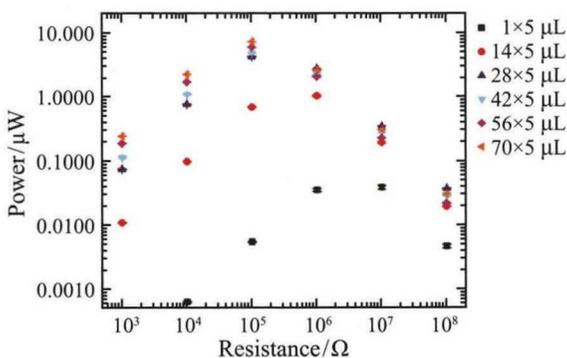


图 8 并联液滴型振动式能量收集器的输出功率随负载电阻的变化

Fig. 8 Output power of the energy harvester based on droplet array as a function of load resistance

功率。当液滴数量从 1 颗增加至 70 颗时, 输出功率可从 0.04 μW 提高至 7.55 μW 。另外, 随着负载电阻的增大, 输出功率呈现先增加后减小的趋势, 即存在

一个最佳匹配电阻, 使得输出功率达到最大值。从图 8 中还可以看出, 当只有一颗液滴时, 最佳匹配电阻在 1~10 $\text{M}\Omega$ 之间; 当 14 颗液滴并联时, 最佳匹配电阻约为 1 $\text{M}\Omega$; 当并联液滴的数量继续增加, 最佳匹配电阻降低至 100 $\text{k}\Omega$ 。可以发现, 随着并联液滴数量的增加, 最佳匹配电阻逐渐减小。这是因为, 液滴是能量转换装置中内阻的主要组成部分, 当并联的液滴数量增加, 相当于并联的内阻数量增多, 使得能量转换装置的内阻降低。对于纯电阻电路, 当电源的内阻减小, 使得输出功率最大的最佳匹配电阻也随之减小。

3.3 误差分析

为了证明本文实验测量结果的可靠性, 本文将对能量收集器的性能测试数据进行误差分析。本文主要通过数字电表 Keithley 6517B 测量液滴型振动能量收集器的输出电压, 再通过计算得到输出功率, 作为液滴型振动能量收集器的性能评价指标。因此, 需要对输出功率的测量误差进行分析。

数字电表 Keithley 6517B 在 2 V 档位的电压测量误差为 $\Delta U = 0.00054 \text{ V}$ 。电压有效值通过式 (1) 进行计算:

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N\Delta t} \sum_1^N U^2 \Delta t} \quad (1)$$

其中, N 为数字电表 Keithley 6517B 在 1 s 时间间隔内所采集的数据点的个数, 在本文的实验中, $N = 437$; U 为数字电表 Keithley 6517B 所采集的电压值; Δt 为数字电表 Keithley 6517B 所采集的相邻两个数据点的时间间隔。因此, 由数字电表的测量误差引起的电压有效值的测量误差为:

$$\Delta U_{\text{RMS},1} = \frac{\Delta U}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

当所测量的电压有效值越小, 电压有效值的相对误差越大。本文中所测量的最小的电压有效值为 3.56 mV。

另外, 由电压有效值的计算方法引起的电压有效值的相对误差^[10]为:

$$\frac{\Delta U_{\text{RMS},2}}{U_{\text{RMS}}} = \frac{2\pi^2}{3N^2} \quad (3)$$

因此, 电压有效值的总相对误差为:

$$\frac{\Delta U_{\text{RMS}}}{U_{\text{RMS}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{\text{RMS},1}}{U_{\text{RMS}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{\text{RMS},2}}{U_{\text{RMS}}}\right)^2} \quad (4)$$

能量收集器的输出功率通过式 (5) 进行计算:

$$P = \frac{U_{\text{RMS}}^2}{R} \quad (5)$$

因而输出功率的相对误差为

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{2^2 \left(\frac{\Delta U_{\text{RMS}}}{U_{\text{RMS}}} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2} \quad (6)$$

其中, $\frac{\Delta R}{R}$ 为负载电阻的相对误差, 在本文的实验中, $\frac{\Delta R}{R} = 1\%$ 。通过计算可得, 输出功率的相对误差为 1.96%。

液滴型振动式能量收集器的功率密度也是评价其性能的重要指标。本文所采用的功率密度为输出功率与液滴和下板的接触面积之比。液滴与下板的接触面积是通过高速摄像机所拍摄的图像进行测量的。图像中一个像素点所代表的真实长度为 0.0196 mm, 可以认为液滴直径测量的精度 $\Delta D = 0.0196$ mm。本文中所测量的最小的液滴直径为 $D = 3.0716$ mm, 因此液滴直径测量的最大相对误差为 $\frac{\Delta D}{D} = 0.64\%$ 。液滴与下板的接触面积通过式 (7) 进行计算:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (7)$$

因而接触面积的相对误差为:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} \quad (8)$$

通过计算可得接触面积的相对误差为 1.28%。能量收集器的功率密度可通过式 (9) 进行计算:

$$p = \frac{P}{A} \quad (9)$$

因而功率密度的相对误差为

$$\frac{\Delta p}{p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2} \quad (10)$$

通过计算可得功率密度的相对误差为 2.34%。

综上所述, 通过误差分析可以得到本文实验中液滴型振动能量收集器的输出功率的相对误差为 1.96%, 功率密度的相对误差为 2.34%, 并藉此可以证明本文的实验测量数据具有较高的精度与可靠性。

4 结 论

本文主要研究了液滴型振动式能量收集器的输出性能和性能的影响因素。本文首先制作了基于单

颗液滴的振动式能量收集器, 测量了该能量收集器的输出电压和输出功率。和无液滴的振动式能量收集器相比, 由于液体与固体的有效接触面积更大, 因此在实验中基于单颗液滴的振动式能量收集器的输出功率更高。为了提高能量收集器的输出功率, 本文制作了基于并联液滴的振动式能量收集器, 并研究了输出功率、负载电阻以及液滴数量的相互影响。实验结果表明, 随着液滴数量的增加, 输出功率会显著提高。随着负载电阻的增大, 输出功率会先增加后减小, 存在一个最佳匹配电阻, 使得输出功率最高。最佳匹配电阻的阻值与液滴数量有关, 并联液滴的数量越多, 最佳匹配电阻的阻值越小。

参 考 文 献

- [1] Miljkovic N, Preston D J, Enright R, et al. Jumping-Droplet Electrostatic Energy Harvesting [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(1): 013111
- [2] Mitcheson P D, Yeatman E M, Rao G K, et al. Energy Harvesting from Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(9): 1457-1486
- [3] Roundy S, Wright P K, Rabaey J. A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes [J]. *Computer Communications*, 2003, 26(11): 1131-1144
- [4] Boisseau S, Despesse G, Seddik B A. Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting [M]. London: IntechOpen, 2012: 92-134
- [5] Lin Z H, Cheng G, Lin L, et al. Water-Solid Surface Contact Electrification and Its Use for Harvesting Liquid-Wave Energy [J]. *Angewandte Chemie*, 2013, 125(48): 12777-12781
- [6] Moon J K, Jeong J, Lee D, et al. Electrical Power Generation by Mechanically Modulating Electrical Double Layers [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1487
- [7] Kwon S H, Park J, Kim W K, et al. An Effective Energy Harvesting Method from a Natural Water Motion Active Transducer [J]. *Energy Environmental Science*, 2014, 7(10): 3279-3283
- [8] Yildirim E, Kùlah H. Electrostatic Energy Harvesting by Droplet-Based Multi-Phase Microfluidics [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2012, 13: 107-111
- [9] Tang W, Jiang T, Fan F R, et al. Liquid-Metal Electrode for High-Performance Triboelectric Nanogenerator at an Instantaneous Energy Conversion Efficiency of 70.6% [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25: 3718-3725
- [10] 李沂乘. 采样计算方法测量交流电压有效值误差分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2008, 22(S2): 62-65
LI Yicheng. Error Analysis of Sampling Computation Method for RMS Measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2008, 22(S2): 62-65