

收集振动能的摩擦纳米发电机设计与输出性能*

吴晔盛 刘启 曹杰 李凯 程广贵[†] 张忠强 丁建宁[‡] 蒋诗宇

(江苏大学智能柔性机械电子研究院, 镇江 212013)

(2019年5月26日收到; 2019年7月5日收到修改稿)

随着全球变暖和能源危机的到来, 寻找减少碳排放的可再生能源成为人类文明面临的最紧迫挑战之一. 振动作为一种常见的机械运动形式, 在人们的日常生活中普遍存在. 利用多种原理收集振动能量将其转化为电能成为研究热点. 基于接触生电和静电感应原理的摩擦纳米发电机 (TENG) 为收集振动能量提供了一种可行的方法. 本文设计了一种接触分离式 TENG, 推导了 TENG 的电极间电压-转移电荷量-板间距离 ($V-Q-x$) 之间的关系, 结合实验分析了负载电阻、振动频率等因素对其输出性能的影响关系, 当振动频率为 1—6 Hz 时, 每个工作循环内电荷的转移量几乎相同, 而电压和电流随着频率的增大而增大, 频率为 5 Hz 时, 最大输出功率达到 0.5 mW. 运用 COMSOL 软件对 TENG 进行模拟仿真, 揭示了其在接触分离过程中电势以及聚合物表面电荷密度的分布和变化规律, 为高效收集振动能量的摩擦纳米发电机及自供能振动传感器设计提供理论与实践支撑.

关键词: 摩擦纳米发电机, 输出性能, 振动能量收集, 接触分离, 金属-聚合物**PACS:** 02.70.Dh, 87.80.Ek, 45.20.dg, 28.50.Ma**DOI:** 10.7498/aps.68.20190806

1 引言

随着社会的发展, 我们生活中存在一系列被忽视的能量如: 人行走时产生的机械能、穿戴衣服时产生的摩擦能、材料变形产生的形变能、车辆行驶产生的振动能等, 它们未被开发或者使用效率低, 但它们无处不在. 由此摩擦纳米发电机 (TENG) 开辟了新道路, 巧妙地利用上述被忽视的能量将其直接转换为电能^[1-4], 实现持续供给、绿色环保、轻量化、低成本^[5-8]等, 这些特点使其可以成为新的能量补充方式, 作为当前最优解决方案^[9]之一来满足能量转换需求.

目前 TENG 得到迅速发展并不断更新, 已巧妙地与其他形式的能量结合, 如蓝色海洋能^[10-12]、风能^[13-15]、太阳能^[16]、振动能^[17]、摩擦能^[18]等. 为

为了更好地利用这些能量, 提升其电输出性能, 研究者们从材料表面^[19-21]、结构优化^[22-24]、管理电路^[25,26]等方面入手不断改进 TENG 输出性能. 另一方面, 为了有效满足各领域对能量的需求和环境适应性, 研究者们设计并研发了一系列 TENG 并应用于便携式电子产品^[27]、传感器^[28-31]、生物医学系统^[32,33]等. 本文设计了一种可收集振动能的垂直接触式 TENG, 结合接触生电和静电感应原理分析了其工作原理, 阐述了 TENG 的 $V-Q-x$ 关系, 研究了负载电阻、振动频率等因素对 TENG 输出性能的影响规律. 最后通过 COMSOL 软件对 TENG 进行模拟仿真计算, 分析了 TENG 在工作中的电势以及电能密度的分布和变化情况. 并通过实验分析了负载电阻、频率等因素对输出性能的影响.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51675236) 和国家自然科学基金重大研究计划 (培育)(批准号: 91648109) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn

2 实验

2.1 PDMS 薄膜的制备

将 PDMS 聚二甲基硅氧烷 (Sylgard184, Dow Corning) 弹性体和固化剂按 10:1 的质量比混合搅拌均匀, 在真空干燥器中真空脱气 20 min; 为了便于揭膜, 先将硅片浸入在聚十八烷基三氯硅烷 (OTS) 甲苯溶液中, 使硅表面自组装一层 OTS 分子膜, 从而降低硅片的表面能; 将经过真空脱气的 PDMS 倒在处理过的硅片上, 利用涂膜仪按照设定好的厚度, 刮出所需要厚度的薄膜; 接着将涂有 PDMS 混合液的硅片真空脱气 20 min, 取出放在烘胶台上, 在 80 °C 下固化 40 min, 最后将 PDMS 膜剥离硅片。

2.2 TENG 装置制备

为了促进两个摩擦层在不同外力作用下的有效接触分离作用, 我们设计了如图 1 所示垂直接触-分离结构基本模型的 TENG。

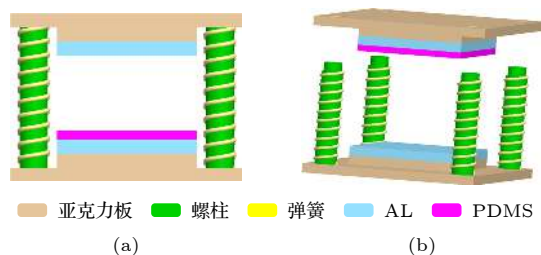


图 1 垂直接触摩擦纳米发电机 3D 示意图

Fig. 1. 3D schematic of vertical contact-separation TENG.

以亚克力板作为上下基板, 将铝箔和 PDMS 依次贴在上基板上, 作为上电极和摩擦层; 下基板均匀贴附铝箔 (铝箔既充当下电极并作为摩擦层), 在其四角分布四个支撑弹簧, 弹簧内部安置一个螺柱, 其中弹簧有助于储存机械能量和保持加卸载过程中两个摩擦层之间的间隙距离均匀, 螺柱限制其在水平方向的运动, 保障了两表面的可靠接触。

2.3 TENG 测试平台

本文采用商用泰克示波器 (Tektronix TBS1102B) 对 TENG 的输出电压进行测量. 输出频率 (1—6 Hz) 的曲柄连杆机构作为振动源, 装置示意图如图 2 所示, 在空气湿度 RH(45%—48%)、

室温 (20 °C) 和大气压力下获得输出性能随频率的响应曲线; 通过串入不同的电阻 (1—1000 M Ω) 获得不同负载情况下的输出性能. TENG 的回复力主要靠弹簧来实现, 保持其他条件 (如频率、机械力等) 不变, 施加不同的负载电阻, 获得输出性能随负载的响应曲线. 在其他因素不变的情况下, 通过改变接触分离频率, 计算单个周期的电荷转移量来分析频率对输出性能的影响。

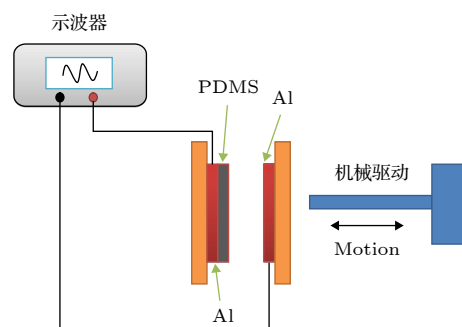


图 2 摩擦纳米发电机输出性能测试装置示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the output performance test system.

3 理论分析

3.1 工作原理

图 3 所示为基于 PDMS 垂直接触式 TENG 完整工作原理图. 在施加机械力之前, PDMS 层和铝箔没有接触, 因此在两摩擦层间无电荷转移, 如图 3(a) 所示. 在机械力的作用下, 两摩擦层形成物理接触, 此阶段由于两摩擦层对电荷亲和性的差异, 由材料电负性可知, PDMS 得电子表面电势为负, 而铝箔失电子表面电势为正, 如图 3(b) 所示. 两种摩擦材料之间的电荷亲和性差异较大, 产生较大量的瞬态电荷转移, 一旦机械力被释放, 因弹簧的弹性势能, 空气间隙在两带等量异性的摩擦层之间形成, 因而电势差在两摩擦层之间形成, 在电势差的驱动下, 上下电极之间形成电荷移动, 如图 3(c) 所示. 当在 TENG 上重新施加机械力时, 两摩擦层之间距离变小, 使得上电极电势高于下电极进而导致电子从下电极又流回上电极, 如图 3(d) 所示. 当机械力再次被释放, 两摩擦层之间距离较远, 两摩擦层电荷重新达到平衡状态, 如此往复进行发电。

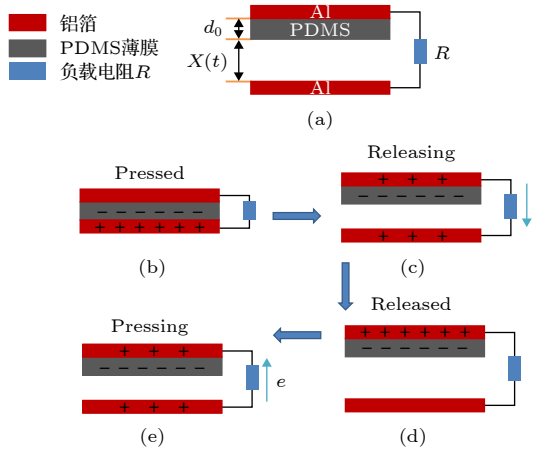


图 3 摩擦纳米发电机工作原理

Fig. 3. Working principle of friction generator.

3.2 基于 Comsol Multiphysics 的电学性能仿真

为了更清晰地理解基于 PDMS 垂直接触式 TENG 的原理及性能, 我们使用多物理场软件 Comsol Multiphysics 对 TENG 进行理论模拟仿真, 通过模拟该 TENG 结构的电势分布、电荷分布以及能量等方面来进行理论分析.

首先, 建立如图 4 所示的三维模型, 考虑整个模拟条件的建立是以实际实验为根据, 设定了空气

边界, 表面电荷密度设为 $10 \mu\text{C}/\text{m}^2$. 通过改变铝箔与 PDMS 的距离, 得到两电极相互接触后的电势云图.

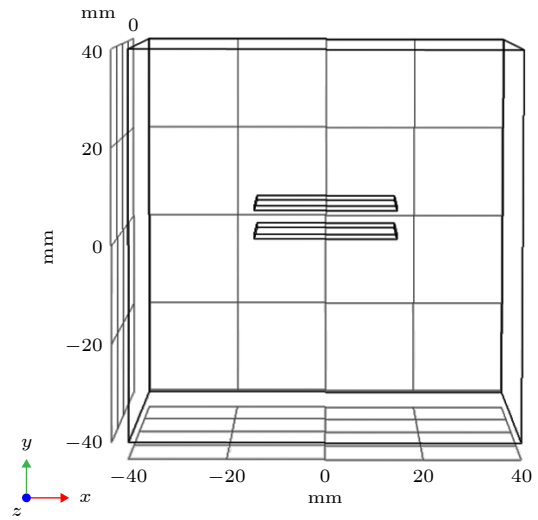


图 4 TENG 三维模型示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the TENGs 3D model.

3.3 TENG 的电学性能仿真结果分析

通过模拟仿真可以得到如图 5 所示的模拟计算结果. 由分析结果可以看出电势 (开路电压) 随着摩擦层间距离的增大而增大. 依据模拟条件, 电

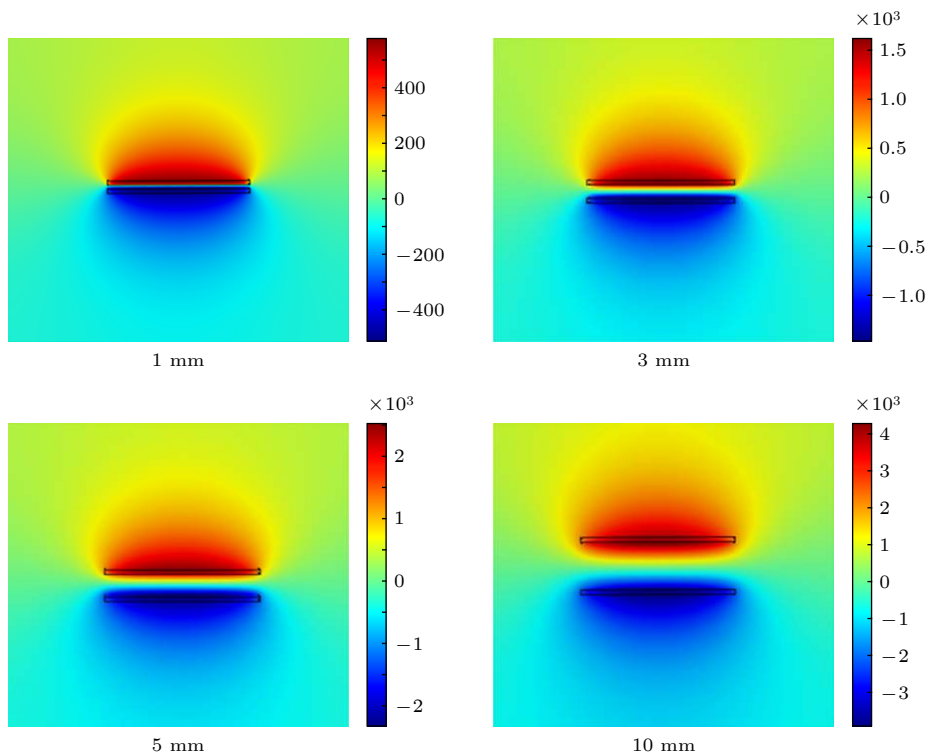


图 5 不同分离距离的电势分布图

Fig. 5. The potential distribution picture with different distance.

荷均匀分布在聚合物内表面, 两个绝缘体和空气间隙内部形成电场, 转移的电荷量决定电场强度大小, 在电场强度一定的情况下, 电势正比于摩擦层间距离, 因此电势也逐渐增大, 此种电势变化结果证明了 TENG 的电学原理. 此外在理论分析中, 常把两摩擦层当作理想模型, 即两摩擦层面积无限大, 但在模拟过程中, 设计的几何参量并不是无限大, 因此模拟结果也出现了边缘效应, 随着摩擦层间距离的增加, 出现电势向摩擦层中间集中的现象, 该现象主要是因为随着摩擦层间距离的增加, 摩擦层的尺寸 (面积 S) 相对分离距离不再是无穷大, 实际的电场线也不再是匀强电场, 电场线的分

布随着摩擦层距离的增大也越来越近似于两个点电荷间的电场线分布, 因此会出现边缘现象.

为进一步验证, 我们对电能密度进行仿真, 结果如图 6 所示. 由图可以看出, 随着两摩擦层间距离的增大, 电能密度呈现向摩擦层中部集中的趋势, 并且逐渐减小, 与电势分布呈现结果一致. 出现这一现象的原因还有空气击穿的原因, 与电势集中分布情况一样, 电能密度集中分布很大部分来源于边缘效应, 电能密度逐渐减小与空气击穿效应有着很大关系. 通常通过提高摩擦层表面的电荷密度来增加 TENG 的能量输出, 但在此过程中也要考虑到空气击穿等因素.

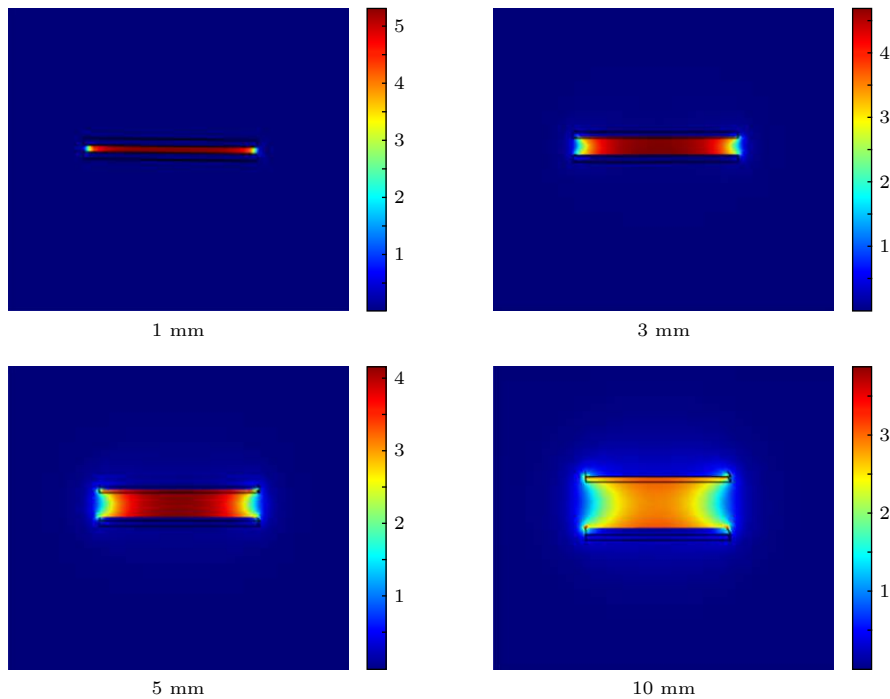


图 6 不同距离的电能密度分布图

Fig. 6. The energy density distribution picture with different distance.

3.4 数值分析

建立了如图 7 所示的垂直接触式 TENG $V-Q-x$ 模型, 在该结构中, 金属铝 (Al) 既作为上电极也作为摩擦电极, 其表面的电荷由两部分构成: 一部分是由摩擦产生的电荷量 ($S\sigma$), 另一部分是两个电极之间转移的电荷量 ($-Q$). 故金属 Al 电极上的电荷量为 $S\sigma - Q$, 两电极间的电压为

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{d_0}{\epsilon_r} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

其中 ϵ_0, ϵ_r 分别为空气及 PDMS 介电常数, σ 表示电荷量密度, d_0 为 PDMS 厚度, $x(t)$ 为上电极与

PDMS 的距离. 开路状态时, 电荷转移量为 Q 为 0, 代入 (1) 式可得开路电压 V_{oc} :

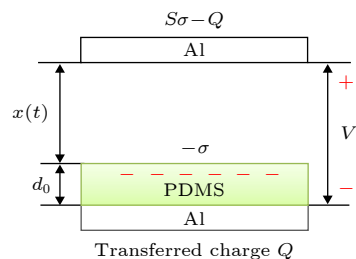


图 7 垂直接触 TENG 的 $V-Q-x$ 模型

Fig. 7. $V-Q-x$ model of vertical contact TENGs.

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0}. \quad (2)$$

$$Q = \int_a^b Idt. \quad (6)$$

短路状态下电压 V 为 0, 代入 (1) 式可得短路状态下电荷转移量 Q_{sc} :

$$Q_{sc} = \frac{S\sigma x(t)}{d_0 + x(t)}. \quad (3)$$

由电容计算公式:

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (4)$$

可得 TENG 的电容为

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 + x(t)}. \quad (5)$$

4 实验结果与讨论

4.1 TENG 输出电压以及短路电流

当振动频率为 5 Hz 时, TENG(3 cm × 3 cm × 0.1 mm) 产生的输出电压和短路电流的峰值能够达到 196 V 和 9.4 μA, 电压和电流曲线如图 8(a) 和 8(b) 所示. 图 8(c) 为一个周期中输出电流的放大图, A, B, C 三点为 Al 箔和 PDMS 薄膜初始接触、完全接触、完全分离时的状态. 通过对电流曲线积分可得到电荷转移量 Q , 电荷量的积分公式为

通过计算可得到上下半个周期内的电荷转移量如图 8(c) 所示. A-B 为初始接触到完全接触阶段(上半个周期), B-C 为完全接触到完全分离阶段(下半个周期), 利用 Origin 软件对上下半个周期分别进行积分可以得到转移的电荷量分别为 0.032 和 -0.031 μC, 正负号表示电荷转移过程相反. 结果表明, 在摩擦纳米发电机的一个周期内电荷转移总量近似为 0 C, 即上下半个周期内电荷转移方向相反. 而电荷转移量相同, 与电流曲线一致, 这进一步揭示了上述垂直接触 TENG 的工作原理.

4.2 负载电阻对 TENG 输出性能的影响

TENG 是基于接触起电和静电感应的耦合效应, 与传统的电磁感应发电机不同. TENG 本身是电容性的, 具有非常高的内部阻抗, 因此负载电阻对输出性能的影响较大, 而且存在一个最优电阻匹配问题. 图 9 为 TENG 输出功率、输出电流、输出电压随负载电阻 (1—1000 MΩ) 的变化趋势. 由图 9(a) 可以看出电压随着电阻的增大而增大, 当负载电阻由 1 MΩ 增大到 1000 MΩ 时, 输出电压从 9.4 V 逐渐增大到 200 V. 电流随着负载的增大

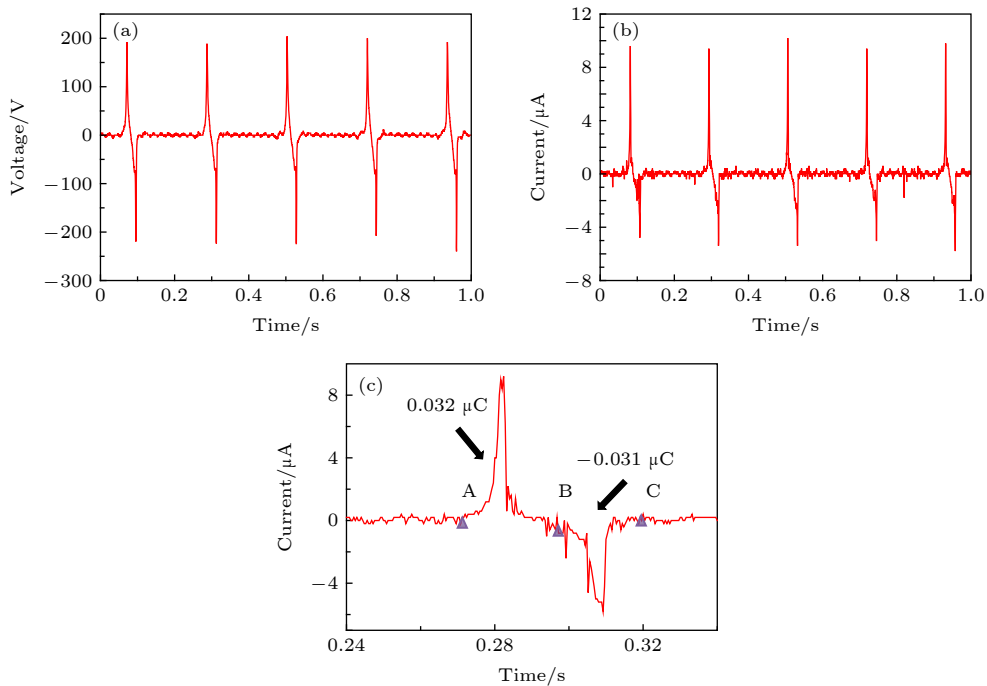


图 8 振动频率为 5 Hz 时, TENG 的输出特性 (a) 开路电压; (b) 短路电流; (c) 一个周期中电荷转移量

Fig. 8. Out performance of the TENG when the vibration frequency is 5 Hz: (a) The open circuit voltage; (b) the short circuit current of the TEGs; (c) the amount of the charge transferred in one cycle.

而减小, 当负载电阻由 1 MΩ 增大到 300 MΩ 时, 输出电流由 9.4 μA 逐渐减小到 0.6 μA. 根据功率和负载电阻的计算公式 $P = U^2/R$, 可以得出输出功率随电阻的变化曲线如由图 9(b) 所示. 结果表明输出功率随负载电阻先增大再减小, 并且在 33 MΩ 时, 输出功率达到最大, 最大输出为 0.5 mW. 即表明此发电机的功率匹配阻值约为 33 MΩ.

4.3 TENG 频率响应测试

接触-分离频率是影响 TENG 输出性能的一个重要因素. 控制 TENG 其他因素 (面积、测试压力、环境因素等) 不变的情况下, 对 TENG 施加

1—6 Hz 不同频率的外力, 获得不同频率下的输出电压以及电流情况. 如图 10 所示, 当频率从 1 Hz 增大到 6 Hz 时, 输出电压从 45 V 增大到 210 V, 输出电流从 2.8 μA 增大到 12.2 μA, 但在 TENG 接触压力、分离距离等因素不变的情况下, 一个周期内的电荷转移量几乎不变. 为了进一步验证上述理论, 对不同频率下单个周期的电荷量进行计算, 结果如图 10(c) 所示. 图示表明在不同频率下, 单个周期内的电荷转移量几乎相同, 与 TENG 基础理论得出的结论一致. TENG 是一个电流源, 它的输出性能一定程度上取决于电荷转移的数量、效率、速度等因素. 这里电荷的转移量几乎相同, 而

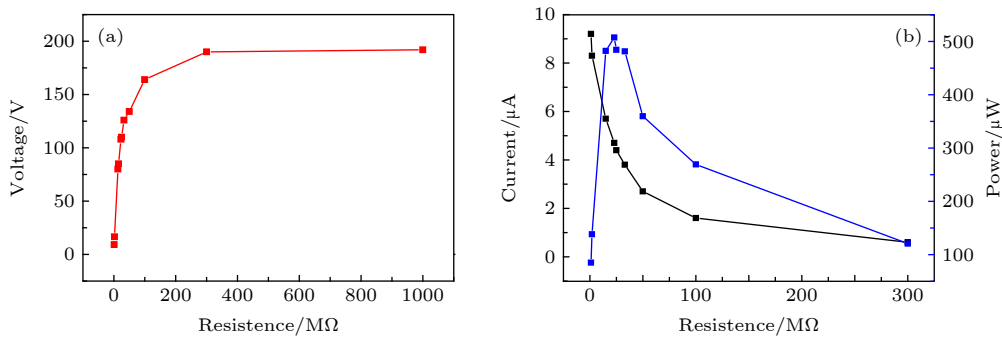


图 9 振动频率为 5 Hz 时 TENG 的输出性能随外负载的变化曲线 (a) 摩擦纳米发电机的输出电压; (b) 输出功率、电流
Fig. 9. The output performance curves with external load at a frequency of 5 Hz: (a) The output voltage; (b) the output power and current of TENG.

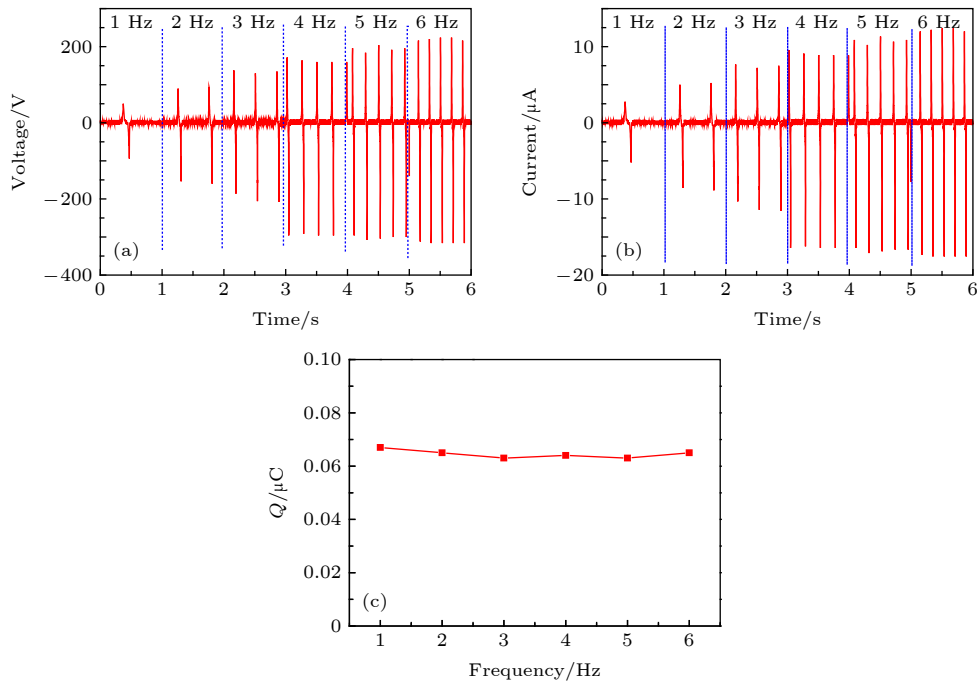


图 10 不同测试频率下的输出性能 (a) 输出电压; (b) 输出电流; (c) 单个周期内电荷转移量
Fig. 10. The output performance of the TENG under different testing frequency: (a) Output voltage; (b) output current; (c) the amount of transferred charge in a single cycle at different test frequencies.

电压和电流随着频率的增大而增大. 电流定义: 单位时间内转移的电荷量:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (7)$$

由 (7) 式可知随着频率的增大, 转移电荷的时间减小, 也即电流随频率的增大而增大, 根据电学知识可得电压与电流成正比, 因此电压的变化趋势与电流相同.

5 总 结

设计了一种可用于收集振动能的接触分离式摩擦纳米发电机, 基于摩擦生电和静电感应原理分析了 TENGs 的工作原理. 研究了外部负载电阻对 TENG 输出功率的影响, 随着负载电阻增加, 电流逐渐降低, 当负载电阻为 33 M Ω 时, 输出功率达到最大, 最大输出为 0.5 mW; 当振动频率从 1 Hz 增大到 6 Hz 时, 输出电压显著提高, 从 45 V 增大到 210 V, 输出电流从 2.8 μ A 增大到 12.2 μ A. 采用 COMSOL 软件对垂直接触模式 TENG 进行模拟仿真计算, 简述了仿真过程并对仿真结果进行了理论分析, 分析了 TENG 在工作中的电势以及电能密度的分布和变化情况, 为提高 TENG 输出性能提供了理论基础.

参考文献

- [1] Haque R I, Farine P A, Briand D 2018 *Sens. Actuators* **271** 88
- [2] Lin Z M, Yang J, Li X S, Wu Y F, Wei W, Liu J, Chen J, Yang J 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 4280
- [3] Chen X, Song Y, Chen H, Zhang J, Zhang H 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 508
- [4] Qian J, Kim D S, Lee D W 2018 *Nano Energy* **49** 126
- [5] Zi Y, Guo H, Wen Z, Yeh M H, Hu C, Wang Z L 2016 *ACS Nano* **10** 4797
- [6] Jiang T, Tang W, Chen X, Han C B, Lin L, Zi Y, Wang Z L 2016 *Adv. Mater. Technol.* **1** 1600017
- [7] Tang W, Jiang T, Fan F R, Yu A F, Zhang C, Cao X, Wang Z L 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 3718
- [8] Feng Y, Zheng Y, Ma S, Wang D, Zhou F, Liu W 2016 *Nano Energy* **19** 48
- [9] Wang Z L 2013 *Sci. Sin. Chim.* **43** 759 (in Chinese) [王中林 2013 中国科学: 化学 **43** 759]
- [10] Xu L, Jiang T, Lin P, Shao J, Wang Z L 2018 *ACS Nano* **12** 1849
- [11] Zhao X J, Kuang S Y, Wang Z L, Zhu G 2018 *ACS Nano* **12** 4280
- [12] Pan L, Wang J, Wang P, Gao R, Wang Y C, Zhang X 2018 *Nano Res.* 1–12
- [13] Dudem B, Huynh N D, Kim W, Kim D H, Hwang H J, Choi D, Yu J S 2017 *Nano Energy* **42** 269
- [14] Cheng G G, Jiang S Y, Li K, Zhang Z Q, Wang Y, Yuan N Y, Ding J N, Zhang W 2017 *Appl. Surf. Sci.* **412** 350
- [15] Wang S, Wang X, Wang Z L, Yang Y 2016 *ACS Nano* **10** 5696
- [16] Wang M, Zhang J H, Tang Y, Li J, Zhang B S, Liang E J, Mao Y C, Wang X D 2018 *ACS Nano* **12** 6156
- [17] Wu C, Kim T W, Sung S, Park J H, Li F 2018 *Nano Energy* **44** 279
- [18] Mao Y C, Geng D L, Liang E J, Wang X D 2015 *Nano Energy* **15** 227
- [19] Cheng G G, Zhang W, Fang J, Jiang S Y, Ding J N, Noshir S P, Zhang Z Q, Guo L Q, Wang Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 060201 (in Chinese) [程广贵, 张伟, 方俊, 蒋诗宇, 丁建宁, Noshir S P, 张忠强, 郭立强, 王莹 2016 物理学报 **65** 060201]
- [20] Wu Y, Hu Y, Huang Z, Hu Y, Peng Z, Li X, Wang F 2018 *Sens. Actuators* **271** 364
- [21] Chen S N, Chen C H, Lin Z H, Tsao Y H, Liu C P 2018 *Nano Energy* **45** 311
- [22] Wen T, He J, Zhang Z X, Tian Z M, Mu J L, Han J Q, Chou X J, Xue C Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 228401 (in Chinese) [温涛, 何剑, 张增星, 田竹梅, 穆继亮, 韩建强, 丑修建, 薛晨阳 2017 物理学报 **66** 228401]
- [23] Ren X, Fan H, Wang C, Ma J, Lei S, Zhao Y 2017 *Nano Energy* **35** 233
- [24] Shao H Y, Wen Z, Cheng P, Sun N, Shen Q Q, Zhou C J, Peng M F, Yang Y Q, Xie X K, Su X H 2017 *Nano Energy* **39** 608
- [25] Yang J, Yang F, Zhao L, Shang W, Qin H, Wang S, Jiang X, Cheng G, Du Z 2018 *Nano Energy* **46** 220
- [26] Cheng G, Zheng H, Yang F, Zhao L, Zheng M, Yang J, Qin H, Du Z, Wang Z L 2018 *Nano Energy* **44** 208
- [27] Wu Y, Jing Q S, Chen J, Bai P, Bai J J, Zhu G, Su Y J, Wang Z L 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 2166
- [28] Wang J, Ding W, Pan L, Wu C, Yu H, Yang L, Liao R, Wang Z L 2018 *ACS Nano* **12** 3954
- [29] Wu Z, Ding W, Dai Y, Dong K, Wu C, Zhang L, Lin Z, Cheng J, Wang Z L 2018 *ACS Nano* **12** 5726
- [30] Wang P H, Liu R Y, Ding W B, Zhang P, Pan L, Dai G Z, Zou H Y, Dong K, Xu C, Wang Z L 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1705808
- [31] Ren Z W, Nie J H, Shao J J, Lai Q S, Wang L F, Chen J, Chen X Y, Wang Z L 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1802989
- [32] Zheng Q, Shi B J, Fan F R, Wang X X, Yan L, Yuan W W, Wang S H, Liu H, Li Z, Wang Z L 2014 *Adv. Mater.* **26** 5851
- [33] Zhong J W, Zhang Y, Zhong Q, Hu Q Y, Hu B, Wang Z L, Zhou J 2014 *ACS Nano* **8** 6273

Design and output performance of vibration energy harvesting triboelectric nanogenerator*

Wu Ye-Sheng Liu Qi Cao Jie Li Kai Cheng Guang-Gui[†]
Zhang Zhong-Qiang Ding Jian-Ning[‡] Jiang Shi-Yu

(*Institute of Intelligent Flexible Mechatronics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

(Received 26 May 2019; revised manuscript received 5 July 2019)

Abstract

With the advent of global warming and energy crisis, the search for renewable energy to reduce carbon emissions has become one of the most urgent challenges. It has become a research hotspot to collect or harvest various mechanical energy in nature and convert it into electric energy. Vibration is a common form of mechanical movement in our daily life. It is visible both on most working machines and in nature and is a type of potential energy. There are several methods that can convert such mechanical energy into electric energy. Triboelectric nanogenerator (TENG) based on the principle of contact electrification and electrostatic induction which first appeared in 2012 by Zhonglin Wang provides a feasible method of efficiently collecting the vibrational energy with different vibrating frequencies. In this paper, a contact-separation mode of TENG is designed and implemented. The voltage- quantity of charge- distance(V-Q-x)relation of TENG is calculated. During the experiment, the factors such as load resistance, vibration frequency, etc. which affect the output performance, are considered and analyzed. An electrically driven crank-connecting rod mechanism is employed to provide the vibration source with adjustable frequency in a range of 1-6 Hz. The result shows that the amount of charge transfer in each working cycle remains almost unchanged, while the voltage and current increase with frequency increasing. When the frequency is 5 Hz, the best power matching resistance of the TENG is about 33 M Ω and the maximum output power reaches 0.5 mW. For a further study, a COMSOL software is used to simulate the distribution rule and variation rule of the electric potential in the contact-separation process, then the theoretical charge density and the experimental charge density on the polymer surface are compared and analyzed in order to provide theoretical and practical support for the design of TENG with collected vibration energy and self-powered vibration sensor. The result shows that the electric potential is proportional to the distance between two friction layers. While as the distance between two friction layers increases, the electric potential and the charge density both show a tendency to concentrate in the middle of the friction layer. The huge difference between experimental result and the simulation predicts that much work should be done continually to improve the output of the TENG. Finally, the obtained results conduce to understanding the contact electrification and electrostatic induction mechanism and also provide a new method of harvesting the vibration energy.

Keywords: triboelectric nanogenerator, output performance, vibration energy harvesting, contact separation, metal-polymer

PACS: 02.70.Dh, 87.80.Ek, 45.20.dg, 28.50.Ma

DOI: 10.7498/aps.68.20190806

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51675236) and the Training Program of the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91648109).

[†] Corresponding author. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn