

摩擦纳米发电机等效电路模型研究

Equivalent Circuit Models of Triboelectric Nanogenerators

魏子钧/WEI Zijun¹
耿来鑫/GENG Laixin²
边森/BIAN Sen¹

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 北京交通大学, 北京 100044)

(1. The Research Institution of China

Mobile, Beijing 100053, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing

100044, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0035-005

摘要: 推导出了摩擦纳米发电机(TENG)的电路方程, 由此建立了TENG等效电路, 并进行了PSpice仿真。该项工作对后续TENG的发电机理论分析、能量管理电路开发等工作提供了理论依据和实际物理模型。

关键词: TENG; 能量收集; 等效电路; 机械能

Abstract: In this paper, the circuit equation of triboelectric nanogenerators (TENG) is derived. Then, the equivalent circuit of TENG is established and the PSpice simulation is carried out. This work provides theoretical basis and actual physical model for the subsequent theoretical analysis of generators and energy management circuit development of TENG.

Key words: TENG; energy harvesting; equivalent circuit; mechanical energy

随着便携式电子设备、传感器低功耗电子设备应用的快速增长, 从周围环境收集机械能量驱动这些设备的可持续电源的研究已经引起了全世界的关注。迄今为止, 基于压电^[1-4]、电磁^[5-9]效应的能量收集技术证明了收集环境机械能的可行性。其中, 电磁式收集方法密度低、集成度差、成本高; 压电式收集法中的压电材料若在较大应变下工作, 压电陶瓷会出现电疲劳, 使电性能下降^[7-8], 且该过程不可逆。近几年发明的摩擦纳米发电机(TENG)因结构简单、可靠性高、无污染等优点^[9-12], 为能量收集技术提供了全新的思路和方案。

通过近几年的研究, TENG的面积功率密度达到了 313 W/m^2 , 体积功率密度达到了 490 kW/m^3 ^[13], 机械能转换效率最高已达85%左右^[14]。TENG已被用作直接电源给手机电池充电, 并可作为自供电有源传感器^[15-16]。然而, TENG的实际广泛应用还需要解决2方面的难题: 一方面仍然需要从

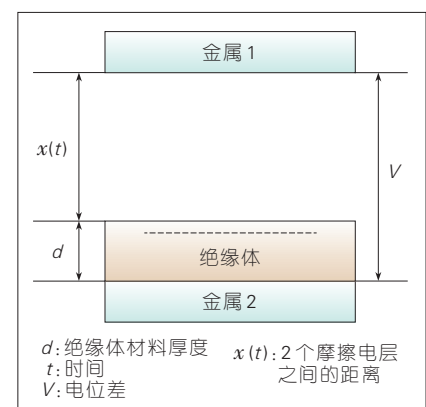
材料、结构、工艺等多方面进一步优化提升器件的输出性能; 另一方面, 面向TENG的电源管理电路、信号处理电路、能量存储元件开发等电路开发工作也是实用化的关键环节, 这要从TENG发电的物理过程出发, 建立等效电路模型和仿真, 分析整个系统的输出性能。Niu等人^[17]对TENG的机理进行了详细分析, 理论与实验结果吻合较好。然而, 在Niu的理论中, 摩擦带电是通过指定的现象参数表面摩擦电荷密度(σ_0)来考虑的, 仅分析了电场的输出, 忽略了内部高阻损耗, 这并不具有实际的物理意义。本文从接触-分离式TENG的物理图像出发, 推导得到等效电路方程和电路模型, 最后我们用PSpice实现TENG的电学仿真, 为TENG开发和优化设计提供理论指导。

1 TENG建模和等效电路方程

在Niu的工作中, 我们了解到

TENG可分为导体-介质型(c-d)和介质-介质型(d-d)2种。其中c-d型和d-d型TENG输出特性具有相同的数学表达式, 以下我们以c-d型TENG为例进行分析。

如图1所示, c-d型TENG的2个摩擦电层在外界激励作用下受迫彼此接触, 然后在自身弹力作用下发生分离。2个摩擦电层之间的距离设为 $x(t)$ 。2个摩擦层接触后, 忽略表面电



▲图1 导体-介质(c-d)型摩擦纳米发电机的物理模型

收稿日期: 2018-07-18
网络出版日期: 2018-10-15

荷的衰减影响,摩擦电层的内表面将产生电量相同、电性相反的静电荷(摩擦电荷),因此也具有相等的电荷密度。有研究表明:摩擦电荷量在2~3个周期趋于稳定^[18],故电荷密度 σ 为常数。当2个摩擦电层开始彼此分离时,随着距离增加,2个电极之间产生了电位差 V 。绝缘材料厚度为 d ,介电常数为 ϵ_0 。

通常 TENG 的金属电极的面积大小 S 比发电机在外力作用下的分隔距离 x 大几个数量级,因此可以假设2个金属极板为无限大平行极板。在这种条件下,金属电极上的电荷将均匀地分布在2种金属的内表面上,在电介质和空气间隙内,忽略其边缘效应,电场可视作匀强电场,电场方向为仅具有垂直于表面的方向的分量。由当上极板纵向移动时,因摩擦表面为绝缘介质,通过静电感应实现电荷的转移。现假设转移电荷量为 Q_i ,此时电阻两端电压为 V_R 。因聚二甲基硅氧烷(PDMS)的相对介电常数 $2 < \epsilon_r < 3$,且 $d < x(t)$,故我们可以近似认为 $d/\epsilon_r = d$ 。

由静电学基本定理,可求出空气间隙电势,如式(1):

$$U_{air} = \frac{\sigma S - Q_i}{S \cdot \epsilon_0} x(t) \quad (1)$$

摩擦层和金属电极之间的电场强度:

$$E = \frac{1}{d}(V_{air} - V_R) \quad (2)$$

由 $\sigma = \epsilon E$ 可得:

$$Q_i = \frac{\epsilon_0 S}{d} \left(-\frac{Q_i}{S} + \sigma \right) \cdot x(t) - V_R \quad (3)$$

将式(3)整理可得:

$$Q_i = \frac{S}{d} (\sigma x(t) - \epsilon_0 V_R) \quad (4)$$

流经外部电阻 R 的电流为:

$$i = \frac{dQ_i}{dt} \quad (5)$$

将式(4)带入式(5)可得:

$$i = \frac{S}{(d+x(t))^2} \left[\sigma dx'(t) - \epsilon_0 [d+x(t)] \frac{dV}{dt} + \epsilon_0 V_R x'(t) \right] \quad (6)$$

由欧姆定律可知 $i = V/R$, 带入式(6),整理可得:

$$\frac{\epsilon_0 S}{d+x(t)} \cdot \frac{dV}{dt} + \left(\frac{1}{R} - \frac{S \epsilon_0 x'(t)}{(d+x(t))^2} \right) V_R = \frac{S \epsilon_0 x'(t)}{(d+x(t))^2} \cdot \frac{\sigma d}{\epsilon_0} \quad (7)$$

$$\text{令 } C(t) = \frac{\epsilon_0 S}{d+x(t)}, V_i = -\frac{\sigma d}{\epsilon_0},$$

带入式(7)可得:

$$\frac{dV_R}{dt} + \left(\frac{1}{RC} + \frac{1}{C(t)} \cdot \frac{dC(t)}{dt} \right) V_R + \frac{V_i}{C(t)} \cdot \frac{dC(t)}{dt} = 0 \quad (8)$$

TENG 工作时,电极做纵向运动,由于电极距离变化,导致其电容量发生变化,从而在外电路中产生电流,整个等效电路如图2所示,由带直流电源的可变电容和可变电阻来等效模拟。其中,直流电源 V_i 是由绝缘层表面电位引入的等效直流电源, r 为电源限流电阻,其值与电路结构有关, R_p 为等效内阻, C_r 为隔直电容。

2 TENG 等效电路 PSpice 仿真分析

上述分析中我们已经得到如图2所示的 TENG 等效电路,但在 PSpice 库中并不存在随时间变化的非线性可变电阻和非线性电容。接下来我们需要构建可变电阻和可变电容器件的 PSpice 模型,以实现 TENG 等效

电路的 PSpice 仿真分析。

2.1 可变电阻的 PSpice 模型

构造非线性时变元件的 PSpice 模型必须解决好2个问题:首先,必须做出非线性时变元件的非线性特性曲线,并求出表达该曲线的逼近多项式的数学表达式,即进行曲线拟合工作;然后,根据曲线拟合的结果构造出 PSpice 程序能识别的非线性时变元件的模型拓扑结构,即等效电路。

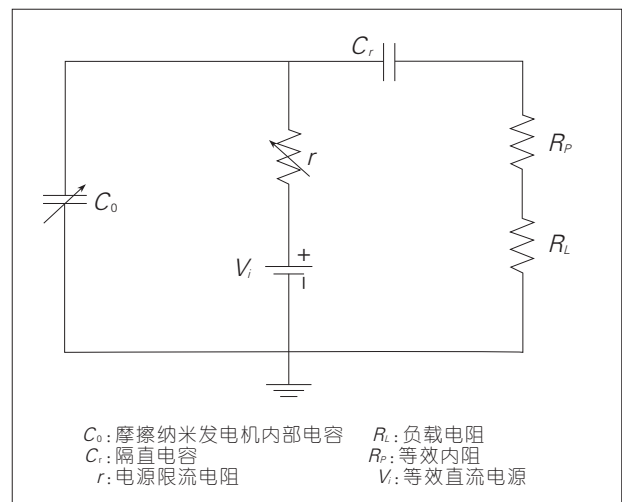
对于可变电阻,可用如图3电路拓扑结构来模拟。图中 $v_1(t)$ 是随时间变化的电压源, $v(t)$ 是固定电阻 R 两端的瞬时电压值; E_R 是一个受 $v(t)$ 和 $v_1(t)$ 双电压源控制的电压源, $E_R = v(t) f[v_1(t)]$; R_1 是 PSpice 源程序的需要,在 $v_1(t)$ 两端并入的常值电阻; $R(t)$ 为从2-0端口看入的等效电阻;流过固定电阻 R 的电流为 $i(t) = v(t)/R$ 。则有:

$$R(t) = \frac{V_{总}}{i(t)} = \frac{v(t) + E_R}{i(t)} = \frac{v(t) + v(t) f[v_1(t)]}{v(t)/R} = R[1 + f[v_1(t)]] \quad (9)$$

显然 $R(t)$ 是由固定电阻 R 和电压源 E_R 控制的可变电阻。

对于 TENG,设限流电阻 r 是与结构有关的大值电阻,当 TENG 电路的极板距离做微小的周期变化时, r 简化处理为: $r(t) = R + r \sin(\omega t) = R[1 + r/R \sin(\omega t)]$,此即是可变电阻 $r(t)$ 的电阻值

图2 摩擦纳米发电机等效电路示意图



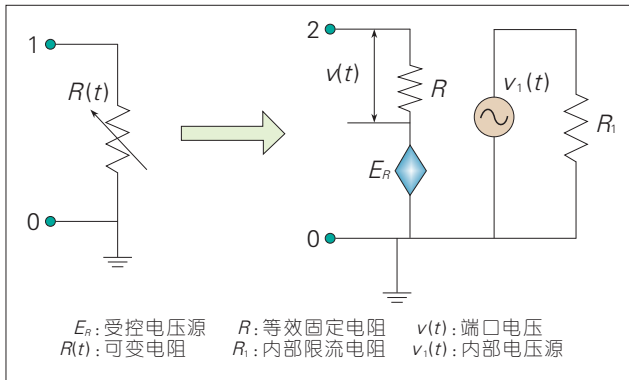


图3 可变电阻的PSpice模型

非线性特性曲线。为构造 PSpice 程序能识别的非线性时变元件的模型拓扑结构,令左端的 $R_i=1$, $v_1(t)$ 为幅度为 r/R , 频率为 ω 的交流电压源, 则 R_i 两端的电压值为:

$$v_1(t) = \frac{r}{R} \sin(\omega t), \quad (10)$$

则 2-0 端口的等效电阻为:

$$r(t) = R + r \sin(\omega t) = R[1 + \frac{r}{R} \sin(\omega t)]. \quad (11)$$

2.2 可变电容的 PSpice 模型

对于可变电容,其构造如图 4 所示:图中 $v_1(t)$ 是随时间变化的独立电压源, $v(t)$ 是端口 2-0 两端的瞬时电压值; C 是等效模型中恒定电容; E_R 是一个受 $v(t)$ 和 $v_1(t)$ 双电压源控制的电压源, $E_R = v(t)f[v_1(t)]$, 其中 $f[v_1(t)]$ 是独立时变电压源的多项式函数; R_i 是根据 PSpice 源程序的需要,在 $v_1(t)$ 两端并入的常值电阻; $C(t)$ 为从 2-0 端口看入的等效电容值。端口 2-0 间的积累的电荷总量与固定电容 C 上积累的电荷总量相等,故有 $Q = C \times V_c(t) = C(t) \times v(t)$, 而 $V_c(t)$ 是固定电容 C 两端的电压值:

$$v_c(t) = v(t) - E_c = v(t) - v(t)f[v_1(t)] = v(t)(1 - f[v_1(t)]). \quad (12)$$

因此有:

$$C(t) = \frac{C \cdot v_c(t)}{v(t)} = C(1 - f[v_1(t)]). \quad (13)$$

我们首先对可变电容部分做模拟。通过有限元法模拟分析,文献 [19] 给出了图 4 中的电路电容值的经

验公式:

$$C(x) = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} \times \cos\left(\frac{2\pi x}{b}\right), \quad (14)$$

其中 $x = X \sin(\omega t)$, X 是振幅。若是电路的电容值 $C(t)$ 可表示成随时间变化的函数, 则可进行泰勒展开。如图 5 所示, 为了在 PSpice 中模拟电容值 $C(t)$, 对式 (14) 逼近多项式的数学表达式中余弦函数做泰勒展开, 并取前 4 项做为近似。

2.3 等效电路仿真验证

综合可变电容和可变电阻的

PSpice 模型, 最终得到 TENG 的仿真电路图, 如图 6 a) 所示。其中电流源 I_1 , 电阻 R_2 、 R_0 和电压控制的电压源 E_2 构成可变电阻的模型电路, 电压控制的电流源 G_2 , 电阻 R_1 、 R_3 , 电流源 I_1 , 固定电容 C_1 和电压控制的电压源 E_1 构成可变电容的模型电路, 直流电压源 V_1 是由于表面电位引入的等效直流电源, R_i 为外接电阻, R_p 为等效内阻, C_d 为隔直电容。

根据我们实际制备的摩擦纳米发电机的输出性能测试结果, 当负载电阻 $R_L = 60 \text{ M}\Omega$ 时, TENG 达到最大输出功率, 因此设定电路的等效内阻 $R_p = 60 \text{ M}\Omega$ 。当 $R_L = 60 \text{ M}\Omega$, 有 $R_L = R_p$, 满足电路的输出功率最大的条件。由于电路限流电阻 R_0 是额外引入的元件, 通过电阻值扫描的方法来确定其值, 最终定在 $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ 时, 等效电路能最佳地模拟原电路的电学性能。我们制备和测试 TENG 实际参数如表 1 所示。根据表 1 中参数及式 (8)、(9), 我们可以得到元件参数, 并能够进行仿真, 仿真的具体结果如

图4 可变电容的 PSpice 模型

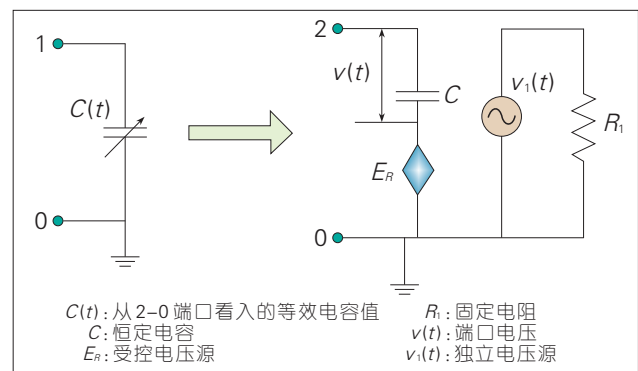
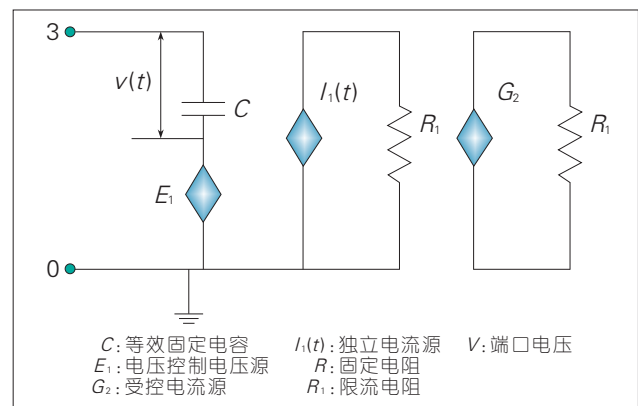
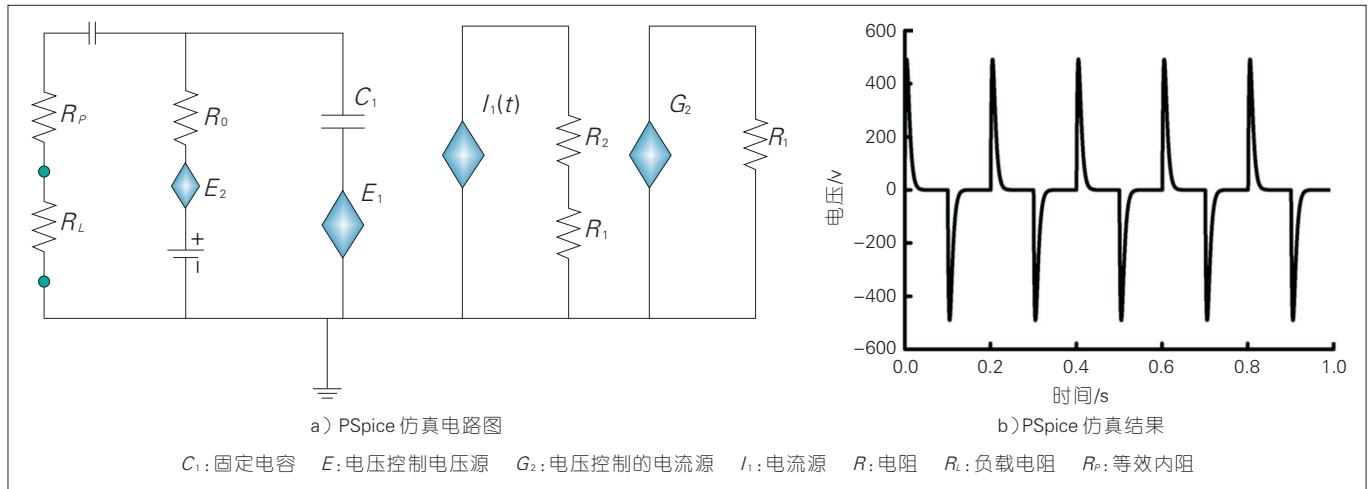


图5 可变电容的等效电路拓扑结构图





▲图6 摩擦纳米发电机的PSpice仿真

▼表1 TENG实际运行参数

参数项	介质层厚度/m	金属板面积/cm ²	摩擦层表面电荷密度/ $\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	最大分离距离/m	外界激励周期/Hz
参数值	2×10^{-4}	36	16	0.02	5

图6 b)所示。

2.4 模型仿真与实验对比

我们搭建了实测TENG输出特性的平台,该平台提供可控频率、压力的外界激励信号,如图7所示。测试平台共由3个部分构成:第1部分为可控信号源输出系统,由RIGOL公司DG1022U型号的信号发生器和SINOCERA公司YE6872A型号的功率放大器组成;第2部为可控激振系统,由SINOCERA公司JKZ-20型号的激振器组成;第3部分为纳米摩擦发电机的输出信号测试系统,由RIGOL公司DS1102E型号的数字示波器组成,其探头阻抗为100 M Ω 。我们通过示波器来测试摩擦纳米发电机的输出电压特性。

将TENG的实测输出特性和等效电路PSpice仿真曲线对比分析,如图8所示。从图中可见:输出电压为正极性时,拟合较为相似;输出电压为负极性时,拟合不佳。这是由于仿真和实测中,TENG的压缩和回弹2个过程的速率不同。在实测中由稳定控制的外界激励压缩TENG的2个电

极,而回弹过程主要靠电极材料本身的弹力,这2个过程中电极移动的速率是不同的;而在仿真过程中,这2个过程中电极移动的速率则是相同的。若要更加精准地修正仿真模型,

则需要在仿真中加入一个衰减速度 v 来近似逼近。但从对比分析来看:2条特性曲线具有良好的重叠,这已经充分说明了TENG等效电路模型的正确性。

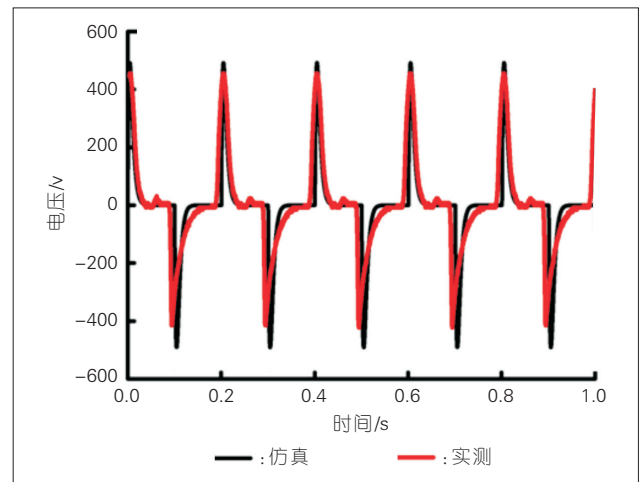
3 结束语

本文介绍了摩擦纳米发电机的基本理论,分析了分离-接触型摩擦纳米发电机发电机理,并根据V-Q-x

图7 摩擦纳米发电机测试平台



图8 仿真与实测波形



分析得到了发电机输出控制方程,结合发电过程的实际物理意义,创造性地建立了TENG等效电路模型,同时还对等效电路进行了PSpice仿真分析,最后通过仿真和实验结果的对比分析验证了等效电路的正确性。该项工作对后续TENG的发电机理论分析、能量管理电路开发等工作提供了理论依据和实际物理模型。

参考文献

- [1] WANG J, SHI Z F, XIANG H J, et al. Modeling on Energy Harvesting from A Railway System Using Piezoelectric Transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10): 105017. DOI: 10.1088/0964-1726/24/10/105017
- [2] YANG R S, QIN Y, DAI L M, et al. Power Generation with Laterally Packaged Piezoelectric Fine Wires [J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(1): 34-39. DOI: 10.1038/nnano.2008.314
- [3] XU S, QIN Y, XU C, et al. Self-Powered Nanowire Devices [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(5): 366-373. DOI: 10.1038/nnano.2010.46
- [4] CHANG C, VAN H T, WANG J B, et al. Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency [J]. Nano Letters, 2010, 10(2): 726-731. DOI: 10.1021/nl9040719
- [5] BEEBY S P, TORAH R N, TUDOR M J, et al. A Micro Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(7): 1257-1265. DOI:10.1088/0960-1317/17/7/007
- [6] KOUKHARENKO E, BEEBY S P, TUDOR M J, et al. Microelectromechanical Systems Vibration Powered Electromagnetic Generator for Wireless Sensor Applications [J]. Microsystem Technologies, 2006, 12(10/11): 1071-1077. DOI: 10.1007/s00542-006-0137-8
- [7] 杨刚, 岳振星, 李龙土. 压电陶瓷场致疲劳特性与机理研究进展[J]. 无机材料学报, 2007, 22(1): 1-6. DOI:10.3321/j.issn:1000-324X.2007.01.001
- [8] 刘海峰, 田时, 谢军. 压电陶瓷电疲劳研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(6):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2000.06.001
- [9] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible Triboelectric Generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334. DOI:10.1016/j.nanoen.2012.01.004
- [10] WANG S, LIN L, WANG Z L. Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics [J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6339-6346. DOI: 10.1021/nl303573d
- [11] LIN L, WANG S H, XIE Y N, et al. Segmentally Structured Disk Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Rotational Mechanical Energy [J]. Nano Letters, 2013, 13(6): 2916-2923. DOI:10.1021/nl4013002
- [12] ZHU G, LIN Z H, JING Q S, et al. Toward Large-Scale Energy Harvesting by Ananoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator [J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 847-853. DOI:10.1021/nl4001053
- [13] WANG Z L. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors[J]. ACS Nano, 2013, 7(11): 9533. DOI: 10.1021/nn404614z
- [14] XIE Y, WANG S, NIU S, et al. Grating-Structured Freestanding Triboelectric-Layer Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy at 85% Total Conversion Efficiency [J]. Advanced Materials, 2014, 26(38):6599-6607
- [15] ZHU G, CHEN J, ZHANG T J, et al. Radial-Arrayed Rotary Electrification for High Performance Triboelectric Generator [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3426. DOI:10.1038/ncomms4426
- [16] ZHU G, ZHOU Y S, BAI P, et al. A Shape-Adaptive Thin-Film-Based Approach for 50% High-Efficiency Energy Generation Through Micro-Grating Sliding Electrification [J]. Advanced Materials, 2014, 26(23): 3788-3796. DOI:10.1002/adma.201400021
- [17] NIU S M, WANG Z L. Theoretical Systems of Triboelectric Nanogenerators [J]. Nano Energy, 2015, 14: 161-192. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.11.034
- [18] ZI Y L, NIU S M, WANG J, et al. Standards and Figure-of-Merits for Quantifying the Performance of Triboelectric Nanogenerators [J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 8376. DOI: 10.1038/ncomms9376
- [19] STERKEN T, ALTENA G, FIORINI P, et al. Characterisation of an Electrostatic Vibration Harvester [EB/OL]. [2018-07-18]. http://www.academia.edu/6081850/Characterisation_of_an_Electrostatic_Vibration_Harvester

作者简介



魏子钧, 中国移动通信有限公司研究院绿色通信技术研究中心研究员; 主要从事从材料、工艺、器件等层面开展绿色能量收集和节能技术研究; 已发表论文2篇, 专利2篇。



耿来鑫, 北京交通大学电气工程学院牵引供电研究所读硕士研究生; 主要从事微弱能量收集及其应用技术的研究; 发表论文2篇, 专利1篇。



边森, 中国移动通信有限公司研究院绿色通信技术研究中心高级技术经理; 主要从事无线网络能量效率的提升, 包括RAN的资源休眠机制、热控制技术; 已发表论文10余篇, 专利16篇。