复合型电磁-摩擦纳米发电机

杨亚*, 杨婉璐

中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 100083

* 联系人, E-mail: yayang@binn.cas.cn

2015-06-22 收稿, 2015-08-25 修回, 2015-09-21 接受, 2015-10-29 网络版发表

北京市自然科学基金(2154059)、国家自然科学基金(51472055, 61404034)和海外高层次人才引进计划资助

摘要 复合型电磁-摩擦纳米发电机主要是利用电磁发电机和摩擦纳米发电机从同一种机械运动中转换机械能为电能. 与单独的电磁发电机或摩擦纳米发电机相比, 复合型纳米发电机具有更大的输出功率, 更高的机-电转换效率, 可以解决一些具有更大功率的电子器件的供电问题. 复合型电磁-摩擦纳米发电机的最新研究成果表明, 该发电机在自驱动传感器、可穿戴设备的供电和物联网等方面具有重要的应用前景. 本文系统阐述了近期摩擦纳米发电机与电磁发电机复合型能源体系的相关工作.

关键词 摩擦纳米发电机, 电磁发电机, 复合型纳米发电机, 生物机械能, 单一方向机械运动

我们生存的环境中存在着多种多样的能源, 包括机械能、光能、热能和化学能等. 这些废弃能源的收集对满足长期的能量需求和可持续开发至关重要. 然而, 由于天气、工作环境及其他因素的影响, 这些能源往往不能被同时获取. 复合能源体系的开发能够同时或分别地获取各种能源, 以保证器件或传感器在任何条件下都能持续工作. 在过去的5年里, 研究者开发了多种复合纳米发电机用于收集多种能源, 它们不仅能够提高能源器件的转换效率, 在自供能电子设备方面也有潜在的应用价值. 同时, 多形态纳米发电机被广泛研究, 以用于构筑自供能体系, 并作为有源传感器. 收集小规模机械能的物理途径主要包括压电效应和摩擦效应. 摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)通过两种带有相反摩擦极性材料之间的接触-分离或相对滑动产生的摩擦起电和静电感应之间的耦合效应将机械能转换为电流, 在新能源技术领域和自供能有源传感器领域有着巨大的潜在应用价值.

1 背景

摩擦纳米发电机能够用于获取人们日常生活中常见的但被浪费掉的各种机械能, 包括人体运动、步行、振动、机械触发、轮胎旋转、风、流水等. 收集人体运动产生的生物机械能作为移动能量源在驱动个人电子产品领域具有可实现性. 现阶段, 这些设备都需要一个外接电源(如锂离子电池)来供电, 导致了存储电量的局限性和环境污染的问题. 为了解决人们在偏远地区较高的电量需求, 能够采集多种能量的复合纳米发电机的开发成为一个新的研究热点. 通过集成器件的构筑, 不同种类的能量可以被同时或单独地被收集起来, 以满足传感器或个人设备在其工作环境中的能量需要^[1,2]. 虽然研究者已经设计出一些能够同时/分别获取机械能、太阳能和热能的复合型纳米发电机^[3,4], 但关于从一种运动中采集机械能的复合体系的相关报道却很少, 该体系能够提高设备的能量转换效率, 也能够极大地扩展复合型纳米发电机的应用范围.

引用格式: 杨亚, 杨婉璐. 复合型电磁-摩擦纳米发电机. 科学通报, 2016, 61: 1268-1275

Yang Y, Yang W L. Hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1268-1275, doi: 10.1360/N972015-00684

通过整合两种机械能源收集单元,一种复合机械能获取技术被广泛地用于大规模提高能量装置整体的输出功率^[5-7],其核心思想是通过一种机械运动来获取更多电量. TENG能够通过两种摩擦材料的接触/分离收集机械能,而电磁发电机(electromagnetic generator, EMG)通过磁铁与线圈间的相对移动来工作^[8]. 通过结合摩擦材料、磁铁和线圈能够实现TENG与EMG沿着相同机械运动方向的能量收集. 由此,EMG的重量可以因TENG的加入而减小,而体系的整体输出功率也能够得到保证,使自供能的移动设备和传感器成为可能,并实现了器件的更多潜在应用. 近期,一系列基于摩擦纳米发电机和电磁发电机的复合型纳米发电机被开发出来,包括同时从一种机械运动获取机械能的单电极TENG基复合体系,收集气流能量的复合纳米发电机,和基于旋转圆盘、采集人体步行生物机械能的可以持续为可穿戴电子设备供电的复合型器件等. 本文将对这几项领域的前沿工作加以概述.

2 电磁-摩擦纳米发电机复合型能源体系

将摩擦纳米发电机与传统的电磁发电机集成为一个复合能源体系,用于能量收集和振动传感/分离是较为前沿的工作. 这种悬挂式体系是由线圈包围

的中空立方体两端固定着取向相反的两块磁铁组成的,其震荡响应于外部环境的干扰,并同时通过摩擦效应和电磁感应收集能量^[9]. 该项工作突破了以往的复合能源体系只能通过多种方式来收集一种能量的方式. 在同一个器件结构中,能同时实现滑动摩擦和接触摩擦式的TENG. 为了使TENG和EMG能够同时工作,需要用变压器来平衡两种能量源的输出电阻. 对两个体系的阻抗进行匹配后,TENG和EMG在同为5 k Ω 的外加电阻负载下,分别能够达到7.7和1.9 mW的最大输出功率. 得益于图1所示的旋转式设计,TENG和EMG的输出信号是同相的. 通过并联,两种体系的输出电压和输出电流能够直接被叠加,分别达到4.6 V和2.2 mA. 将一种电源管理电路与复合能源体系相连,就能够得到稳定的3.3 V电压和恒电流. 此项工作制备的复合能源体系被同时用作半加器电路的能量源和输入数字信号,同时证明了该体系可以作为减振器,在振动阻尼器、触发器和传感器领域都有巨大的潜在应用价值.

可穿戴电子设备在过去的几十年里引起了人们的广泛关注,随着科技的不断发展,使人类与周围环境能够更好地交流和接触. 可重复利用、人体运动驱动的移动电源能够取代作为供电装置的锂离子电池电源,且能够为设备的持续工作提供长期的持久动

图1 (网络版彩色)滑动形式TENG和EMG复合体系的示意图^[9]

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the hybrid cell integrated with a sliding-mode TENG and EMG^[9]

力. 通过将人体浪费的生物机械能(如人体移动、肌肉伸缩、血压等)转换成电量能够很好地供给穿戴在人体身上的电子设备. 目前为止, 已有一些关于从人体活动获取生物机械能的报道^[9-11], 但大多是基于电磁或压电效应的. 这些体系的局限性在于电磁发电机太重(>1 kg), 不方便随身穿戴; 而压电纳米发电机的输出能量又不足以驱动可穿戴设备. 最近, 通过将低频机械能转换成电能的TENG与EMG结合制成复合型能量获取装置的方式, 能够从一种机械运动获取更多的电量, 以满足这些可穿戴设备的能量需求.

可穿戴设备和能源收集单位直接嵌入鞋中, 利用人体步行就可以采集步数、距离和能量消耗等信息. 本课题组^[12]开发了一种基于磁铁、磁感应线圈、摩擦材料(分别采用Al和聚二甲基硅氧烷(PDMS))、电极和弹簧的电磁-摩擦复合型纳米发电机, 用来采集生物机械能为便携式电子设备持续供电(图S1(a)). 在步行过程中, 脚后跟挤压复合纳米发电机, 通过摩

擦起电和电磁感应持续地获取能量. 设备的整体尺寸为5 cm×5 cm×2.5 cm, 重量为60 g, 能够直接结合到商业鞋中(图S1(b)). 为了诱发更大的摩擦电荷密度, PDMS的制备引入了一个Si的金字塔形模板, 使其表面出现微米/纳米结构(图S1(c)). Al与PDMS膜间的快速接触/分离过程中, TENG产生的短路电流为61 μA , 开路电压高达268 V(图S1(d)和(e)). 图S1(g)中, 在较高内阻(6 M Ω)时, TENG表现出最大的输出功率(4.9 mW), 对应的能量密度为5.1 W/m². TENG中, 负载电阻为6 M Ω 和2 k Ω 时, 电极接触产生的电流脉冲, 由此计算得到TENG的单次脉冲能量在连接变压器后从7.8下降至1.1 μJ (图S1(f)). 虽然只有14%的电量得到了转换, 但是在TENG上连接变压器能够输出更小的电压、更大的电流, 有利于给锂离子电池充电. 复合纳米发电机表现出了很好的稳定性, 且比单一组分具有更优秀的充电性能, 为锂离子电池充电存储的电容量可以达到0.66 mAh. 当用作可穿戴电子

图2 (网络版彩色)(a) 复合电磁-摩擦纳米发电机的结构示意图; (b) 复合纳米发电机的操作原理示意图; (c) 不同设备整流后的输出电流信号; (d) 不同设备给 3300 μF 电容充电的充电曲线; (e), (f) 由复合纳米发电机、电容和 4 个温度传感器组成的自供能温度传感器系统的照片^[13]

Figure 2 (Color online) (a) Schematic diagrams of the hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator; (b) schematic diagrams of the operating principle for the hybridized nanogenerator; (c) rectified output current signals of the different devices; (d) measured charging curves of a capacitor with 3300 μF by using the different devices; (e), (f) photograph of a self-powered temperature sensor system including a hybridized nanogenerator, a capacitor, and four temperature sensors^[13]

设备的电源时,通过人体移动获取的生物机械能能够持续地为LED灯和无线计步器供电,在25 m的距离内能够发送计步数据.这种复合纳米发电机具有为可穿戴设备、安装在鞋上的LED、健康指标检测器供能的潜力,也能够为移动电话甚至是便携电子产品充电(图2(h)和(i)).

为了从单一方向机械运动中获取更多能量,基于TENG和EMG的复合型机械能采集技术能够实现自供能移动设备或传感器.研究的核心是实现两种能量获取单元的同时工作以获取最大电量.本课题组^[13]开发了一种将空气溢流的动能转换成电能的新型复合型磁电-摩擦电纳米发电机,可以为温度传感器持续供能.在这种空气溢流驱动装置中,亚克力管中Kapton膜的振动使两个一端固定的TENG和设备前端的两个EMG能同时工作,结构如图2(a)所示.该装置具有体积小、重量轻的特点(尺寸为6.7 cm×4.5 cm×2 cm,重量为42.3 g),因而可以将其直接用到商业温度传感器中.图2(b)显示了两个TENG和两个

EMG在一个循环中的发电过程.其中,顶端聚四氟乙烯(PTFE)膜的一部分与Kapton上Cu膜的一部分接触,由两极中不同的摩擦极性产生了摩擦感应电荷.而Kapton膜上磁铁的往复运动造成了顶部和底部线圈中磁通量的变化,由洛伦兹力导致了线圈中的溢流电流.连接了变压器的TENG, EMG和复合体系(EMG//连接变压器的TENG)经过整流后的输出电流信号结果表明,与单独能量获取单元相比,复合设备中没有出现明显的信号增长,这是由TENG与EMG的非同步效应导致的^[14].相比于单独的能量获取单元(TENG或EMG),复合型体系具有更好的充电性能(图2(d)).在不使用锂离子电池的条件下,使用这种复合纳米发电机能够使4个温度传感器同时工作;同时,产生的电能也能够被存储在锂离子电池中以驱动无线温度传感器或其他电子器件.

为了解决复合能源电池在多种环境中的应用,设计了一种基于旋转圆盘的EMG-TENG复合型纳米发电机^[15].它能够从一种旋转运动中最大限度地采

图3 (网络版彩色)EMG(a)和TENG(b)的工作原理示意图; TENG(c)和EMG(d)输出电流/功率随着负载电阻的变化; (e) 连接变压器的EMG、连接变压器的TENG和复合型设备的短路电流对比图; (f) TENG、连接着变压器的TENG与EMG和复合体系给6600 μF 充电的电压变化曲线; (g) 连接6600 μF 电容的复合纳米发电机给球形灯供电的照片; (h) (g)中球形灯的照明度^[15]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of working principle of EMG (a) and TENG (b); the relationships between the output current/power and the loading resistance of TENG (c) and EMG (d); (e) the comparison of short-circuit current for the EMG with transformer, TENG with transformer, and the hybridized device; (f) measured voltages of a 6600 μF capacitor charged by the TENG, TENG or EMG with transformer, and the hybridized nanogenerator; (g) photographs of a globe light that can be directly powered by the hybridized nanogenerator with a capacitor of 6600 μF ; (h) the illumination intensity of the globe light in (g)^[15]

集生物机械能量,并可作为移动电源.这种复合纳米发电机具有平面结构,直径为14 cm.该复合体系基于转子和定子的相对转动的工作原理如图3(a)和(b)所示.由于法拉第电磁感应作用,EMG可以通过线圈中电磁流的交替变化传递出交流电.而在TENG中,顶端的Cu片沿着聚酰胺(PA)膜的表面滑动,Cu与PA间摩擦极性相差较大,两电极在往复接触/分离过程

中产生了电量输出.通过采集人手运动产生的机械能,TENG和EMG分别能够输出17和50 mW的输出功率.通过复合2种能量采集方式,器件整体的输出电流信号显著增加,如图3(e)中不同体系短路电流对比图所示.该复合体系充电性能良好,能够为6600 μF 的电容充电(图3(f)).同时,通过这种复合纳米发电机给电容器充电,在户外可以点亮商业球形灯,并且

图4 (网络版彩色)(a) 复合型纳米发电机的结构示意图; (b), (c) 与复合型纳米发电机连接的LED照片; EMG (d), (e)和S-TENG (g), (h)在下落高度为100和300 mm时测得的短路电流和开路电压; (f) EMG的短路电流和开路电压峰随物质坠落高度的变化; (i) S-TENG的最大输出短路电流与开路电压随坠落高度的变化; (j) 复合型纳米发电机在物质不同坠落高度下给100 μF 电容器充电的电压变化曲线; (k) 电容的充电电压和存储电量随器件中物质坠落高度的变化^[6]

Figure 4 (Color online) (a) Schematic diagram of the hybrid energy cell; (b), (c) photograph of the LEDs connected with the hybrid energy cell; measured short-circuit current and open-circuit voltage of the EMG (d), (e) and S-TENG (g), (h) under the dropping heights of 100 and 300 mm; (f) dependence of the largest short-circuit current peak and open-circuit voltage peak of the EMG on the dropping height of the mass in the device; (i) dependence of the largest short-circuit current density and open-circuit voltage of the S-TENG on the dropping height of the mass in the device; (j) the measured voltage of a 100 μF capacitor charged by the hybrid energy cell with the different dropping heights of the mass; (k) dependence of the charged voltage and the stored electricity energy in the capacitor on the dropping height of the mass in the device^[6]

照明为1700 lx(图3(g)). 基于该复合纳米发电机的移动电源在驱动一些移动电子设备方面具有潜在应用价值.

为了更有效地采集单一方向运动的机械能, 研究者开发了基于PDMS膜和PA膜间周期性接触/分离的单电极摩擦纳米发电机(S-TENG)^[6]. 通过结合摩擦效应和电磁感应, PDMS膜与PA膜间周期性距离的变化可以导致PA膜底端Al电极与地面间的电荷转移. S-TENG能够传递出600 V的开路电压、3.5 μ A的开路电流, 最大输出功率为0.25 mW, 并可以直接点亮几十个并联的LED灯(图4(b)). 通过同一种机械运动, EMG能够输出3 V的开路电压和1 mA的短路电流, 其最大输出功率为0.58 mW, 也能够直接点亮并联的几十个LED. 为了进一步考察复合体系如何采集单一方向机械能, 针对器件顶端电极坠落的不同高度对输出性能进行了考察, 实验结果表明, 在物体的重力能和弹簧的弹性势能的共同作用下, 顶端电极1次下落时会出现几个电压/电流信号, 从而获得更多的电量输出. 这种复合型纳米发电机采集到的能量能够存储在电容器或锂离子电池中. 该工作对于最大限度收集单一机械能技术的发展和复合型纳米发电机作为一些电子器件电源的实际应用具有重要价值.

基于摩擦纳米发电机的发展前景, 王中林教授课题组^[17]针对TENG和EMG的基本性能做了系统深入的研究. EMG和TENG的功率输出性能具有特殊的补偿关系, EMG可以作为电压源, 而TENG则可作为电流源. 通过电源转换和电源管理系统, TENG的输

出电流能够达到3 mA, 与EMG结合成一个体系能够得到更大的输出功率. 同时证明了将EMG和TENG结合成1个器件用来同时获取机械能的可能性, 其器件组成及电压、电流输出性能如图S2所示. 此外, 该复合型纳米发电机能够独立输出较高的电压和电流以满足不同的能量需求.

3 总结与展望

从我们周边的生存环境中获取多种形式废弃的能量能够有效地解决传感器和个人电子设备供电的问题. 本文概述了近期复合型纳米发电机领域的研究进展, 复合型纳米发电机的研发致力于从环境中最大限度地获取废弃的能量. 通过将摩擦纳米发电机与电磁发电机整合成复合型能源体系, 使器件可以同时/单独工作. 从周边环境获取能量, 能够为传感器或其他设备持续供电, 避免了外接电源的使用. 制备的复合型纳米发电机还能够用于点亮商用LED或球形灯, 并能够为电容或锂离子电池充电以实现能量存储. 而且, 复合型能源采集单元体系表现出优于单独发电机的充电性能. 可以预见在未来几年中, 器件整体的输出功率密度会得到大幅度提升, 复合型能源器件需要进一步在小型化、集成化、大功率、长寿命等方面深入开展工作, 以便相关的研究成果可以在不久的将来实现产业化. 输出性能的进步能够解决一些手机或智能产品等个人电子设备的供电问题, 基于复合型纳米发电机的自供电能源包将是用于实现微/纳米系统持续工作的一个新方向.

参考文献

- 1 Wang Z L, Wu W. Nano-enabled energy harvesting for self-powered micro/nano-systems. *Angew Chem Int Ed*, 2012, 51: 11700–11721
- 2 Xu S, Qin Y, Xu C, et al. Self-powered nanowire devices. *Nat Nanotechnol*, 2010, 5: 366–373
- 3 Guo H, He X, Zhong J, et al. A nanogenerator for harvesting airflow energy and light energy. *J Mater Chem A*, 2014, 2: 2079–2087
- 4 Yang Y, Zhang H, Zhu G, et al. Flexible hybrid energy cell for simultaneously harvesting thermal, mechanical, and solar energies. *ACS Nano*, 2012, 7: 785–790
- 5 Hu Y, Yang J, Niu S, et al. Hybridizing triboelectrification and electromagnetic induction effects for high-efficient mechanical energy harvesting. *ASC Nano*, 2014, 8: 7442–7450
- 6 Wu Y, Wang X, Yang Y, et al. Hybrid energy cell for harvesting mechanical energy from one motion using two approaches. *Nano Energy*, 2015, 11: 162–170
- 7 Zhang C, Tang W, Han C, et al. Theoretical comparison, equivalent transformation and conjunction operations of electromagnetic induction generator and triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy. *Adv Mater*, 2014, 26: 3580–3591
- 8 Fan F R, Tang W, Yao Y, et al. Complementary power output characteristics of electromagnetic generators and triboelectric generators. *Nanotechnology*, 2014, 25: 135402
- 9 Hu Y F, Yang J, Niu S M, et al. Hybridizing triboelectrification and electromagnetic induction effects for high-efficient mechanical

- energy harvesting. *ACS Nano*, 2014, 8: 7442–7450
- 10 Khaligh A, Zeng P, Zheng C. Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies—State of the art. *IEEE Trans Ind Electron*, 2010, 57: 850–860
 - 11 Rome L C, Flynn L, Goldman E M, et al. Generating electricity while walking with loads. *Science*, 2005, 309: 1725–1728
 - 12 Donelan J M, Li Q, Naing V, et al. Biomechanical energy harvesting: Generating electricity during walking with minimal user effort. *Science*, 2008, 319: 807–810
 - 13 Zhang K W, Wang X, Yang Y, et al. Hybridized electromagnetic triboelectric nanogenerator for scavenging biomechanical energy for sustainably powering wearable electronics. *ACS Nano*, 2015, 9: 3521–3529
 - 14 Wang X, Wang S H, Yang Y, et al. Hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for scavenging air-flow energy to sustainably power temperature sensors. *ACS Nano*, 2015, 9: 4553–4562
 - 15 Yang Y, Zhang H, Liu R, et al. Fully enclosed triboelectric nanogenerators for applications in water and harsh environments. *Adv Energy Mater*, 2013, 3: 1563–1568
 - 16 Zhong X D, Wang X, Yang Y, et al. Rotating-disk-based hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for scavenging biomechanical energy as a mobile power source. *Nano Energy*, 2015, 13: 771–780
 - 17 Fan F R, Tang W, Yao Y, et al. Complementary power output characteristics of electromagnetic generators and triboelectric generators. *Nanotechnology*, 2014, 25: 135402–135409
-

补充材料

图 S1 用于可穿戴设备的电磁-摩擦复合型纳米发电机

图 S2 TENG 和 EMG 的性能

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator

YANG Ya & YANG WanLu

Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Due to the energy crisis, more and more research works have been focused on the renewable energies in the environment for solving the issues of the power sources. Harvesting mechanical energy in our daily life has been attracting more and more attentions due to its potential capability for providing power source to drive some sensors without the external Li-ion batteries. As one of the most commonly available energies, mechanical energy can be effectively converted into electricity by using some energy scavenging devices, such as electromagnetic generators, piezoelectric nanogenerators, and triboelectric nanogenerators. Many researches have been achieved to high-efficient conversion from mechanical energy into electricity. By choosing the different materials or changing the structure of the energy harvesting device, the output performance of the device can be enhanced. New approaches need to be exploited for largely increasing the conversion efficiency of the energy harvesting devices. A hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator is to utilize electromagnetic and triboelectric nanogenerators to simultaneously scavenge mechanical energy from one mechanical motion. As compared with the individual energy harvesting units, the hybridized nanogenerator has much larger output power, higher conversion efficiency so that it can be used to solve the power source issue of some electronic devices with larger power consumption. The hybridized nanogenerators have the potential applications in self-powered sensors, wearable devices, and networks. The recent development of hybridized nanogenerator will be described in this review.

triboelectric nanogenerator, electromagnetic generator, hybridized nanogenerator, biomechanical energy, one mechanical motion

doi: 10.1360/N972015-00684