

基于摩擦纳米发电机的自驱动微系统

Self-Powered Microsystem Based on Triboelectric Nanogenerator

陈号天/CHEN Haotian

宋宇/SONG Yu

张海霞/ZHANG Haixia

(北京大学, 北京 100871)

(Peking University, Beijing 100871, China)

随着科学技术的飞速发展, 电子设备呈现出小型化、低功耗和多功能的趋势, 万物互联的物联网(IoT)时代已经拉开序幕。物联网的搭建依赖于无数的分布式传感器, 用于生命健康监测、环境污染防控、基础设施安全等诸多领域。尽管单个传感器能耗有限, 但是整个物联网包含着上亿个传感器, 这就对能源供给问题提出了挑战。电池是最为常见的储能元件, 但是在面对数量庞大的分布式传感器系统时, 电池因其有限的寿命, 需要循环充电以及自身体积过大等问题, 无法解决物联网中海量传感器节点的能量供给问题。因此, 开发出一种可以随时随地从周围环境中收集能量用于驱动微纳米传感器的自驱动微系统成为当务之急。

在周围环境中, 相比于光能、热能等, 机械能来源更为广泛, 种类更加丰富, 大到风能、水能, 小到人体的自身运动都充满着大量的机械能。常用的机械能采集方式包括电磁感应、压电效应和摩擦起电效应。环境

收稿日期: 2018-07-15

网络出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61674004, 91323304)、北京市自然科学基金(4141002)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0028-007

摘要: 针对物联网的多样性和应用环境复杂性, 提出基于摩擦纳米发电机(TENG)的自驱动微系统解决方案。首先分析搭建自驱动微系统需要的3个基础模块: 基于人体运动的摩擦纳米发电机的能量采集(EH)模块、主动式传感模块、高效率的能量存储模块, 在此基础上搭建适用于不同应用场景的自驱动微系统, 既可以有效地解决海量传感器节点的长期稳定能量供给问题, 又有利于物联网技术向着多维度和多形态的方向发展。

关键词: 微能源系统; EH; TENG; 自驱动; 主动式传感; 能量管理

Abstract: Triboelectric nanogenerator (TENG)-based self-powered microsystem is beneficial for solving the energy problem of Internet of things (IoT). In this paper, the design of the self-powered micro system is investigated, and three fundamental modulus including the human motion-based TENG, active sensor and energy storage unit to establish the self-powered system are proposed. This methodology can effectively overcome the difficulty of energy supply for mass various sensor units in IoT applications, which provides a promising solution for the long term energy supply problem in the IoT technology, and push the IoT forward to multi-dimensional and various morphological developing trend.

Keywords: micro energy system; energy harvesting; TENG; self-sensing; active sensor; power management

中的机械能多呈现频率偏低、振动随机等特点, 这就给能量采集(EH)方式提出了挑战。相比于传统的基于电磁感应原理的大型发电机, 新型的压电式纳米发电机和摩擦式纳米发电机更加适用于这类“低频随机能量”的采集。而摩擦纳米发电机(TENG)因为其优异的输出特性以及不受材料限制等突出优点, 成为近年来最受关注的微能源采集技术^[1]。同时, TENG可以自发地对外界的刺激产生响应, 也作为主动式传感器使用。因此, 基于TENG的自驱动微系统主要包含3个基本模块: EH模块、主动式传感模块和能量存储模块。文中, 我们将针对自驱动微系统的3

个基础模块的核心技术逐一介绍。

1 微型EH技术

1.1 TENG的工作原理

摩擦起电效应在数千年前就已经被人类发现, 该效应是一种由接触引发的带电效应, 广泛地存在于人们的日常生活当中。2012年佐治亚理工学院王中林院士首次提出了TENG, 它基于接触起电效应和静电感应效应。当2种不同材料接触之后, 电荷会在二者接触面进行转移并重新分布, 2个物体表面会产生电势差, 因此2种材料表面贴附电极并连接之后, 2个物体产生相对位移之

后,在电势差的驱动下会使电荷在2个电极之间移动,从而实现机械能转化为电能。

对 TENG 的分析就是揭示其电容行为的过程^[2]。对于任意 TENG 来说,都会有一对相互朝向的材料,成为2个摩擦层或者1组摩擦副。2个摩擦层之间的距离 x ,将会随外力作用产生变化。一旦通过外力作用接触,在接触起电原理的作用下,2个摩擦层将会携带符号相反数目相同的静电荷。通过在2个摩擦层外侧贴附电极,并当2个摩擦层距离产生变化时,电极电势的不同将驱使电荷在电极之间转移。如果定义转移的电荷量为 Q ,那么失去电荷量为 $-Q$,而得到的电荷量为 $+Q$,以保证电荷守恒。

两电极的电势差将分为2个部分。第1部分来自于极化的摩擦电荷,它们将贡献的电势差为 $V_{oc}(x)$ 。另外,已经转移的电荷也会导致一定的电势差变化。如果我们假设没有摩擦电荷在这个系统中,那么整个结构就是一个典型的电容结构,所以,将已转移的电荷贡献的电容记做 $-Q/C(x)$,这里 $C(x)$ 是两电极之间的电容。根据电场叠加原理,总的电势差可以记做:

$$V = -\frac{1}{C(x)}Q + V_{oc}(x) \quad (1)$$

式(1)为 TENG 的最基础公式。在短路情况下,转移的电荷量 Q_{sc} 将完全覆盖因剩余极化电荷造成的电势差,所以此时摩擦发电机的短路情况下可表示为:

$$0 = -\frac{1}{C(x)}Q_{sc} + V_{oc}(x) \quad (2)$$

$$Q_{sc}(x) = C(x)V_{oc}(x) \quad (3)$$

如图1所示,摩擦发电机有4种基本的工作方式^[3],分别为:接触分离式、滑动式、单电极式和自由式。

1.2 TEMG 的应用

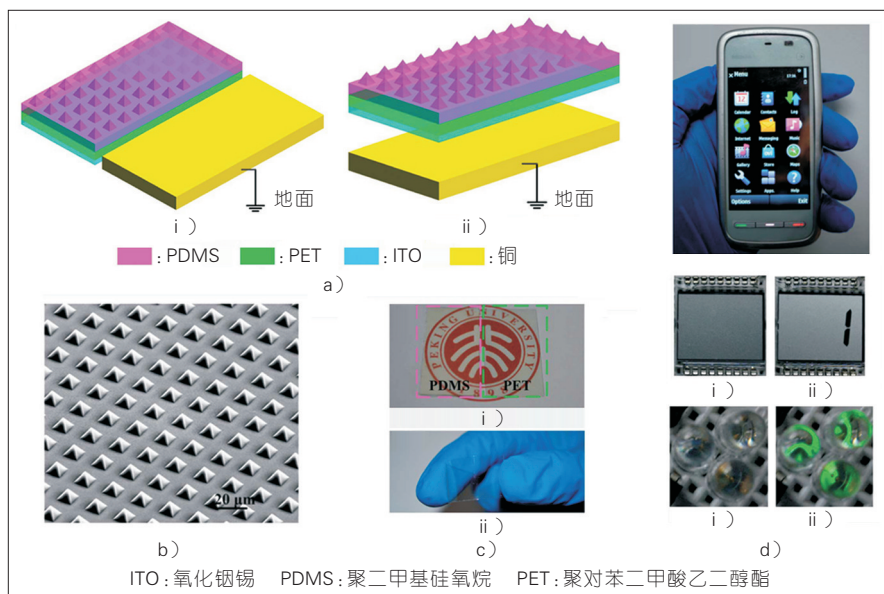
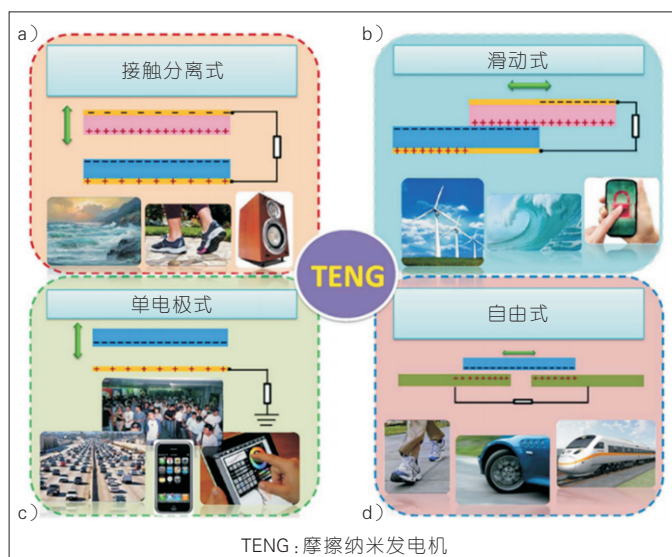
日常生活中蕴含着无数的能量,

以人体为例,我们每日的一举一动都能产生能量。研究表明^[4]:一个正常身材的男子挥动手臂 1 min 将产生 1.8 ~ 72 J 的能量,跑步 1 min 将产生 300 ~ 510 J 的能量,即使打字这种轻微的动作,持续 1 min 也可以产生 0.3 ~ 1.44 J 的能量;而现代电子设备,比如智能手机,一天消耗的电能约为 60 J。由此可见:如果可以将日常的运动能成功采集,可以满足绝大多数电子设备的能量供给。

2013 年研究人员提出一种单表面透明的 TENG^[5],如图2所示。该工

作采用单摩擦表面结构,简化了器件设计及制备工艺,极大地提高了发电机的输出,并拓展了 TENG 的应用领域。当手指等可动物体与摩擦表面触碰并分离时,即与摩擦表面构成摩擦副,产生摩擦电荷。在摩擦电荷所产生的电场驱动下,电荷经由外部负载电路,不断在感应电极和参考地之间往复流动,形成电流,从而将可动物体运动的机械能转化为电能输出。在手指轻敲驱动下,其输出电压可达 130 V,输出电流的密度大概为 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,远高于现有的透明纳米发

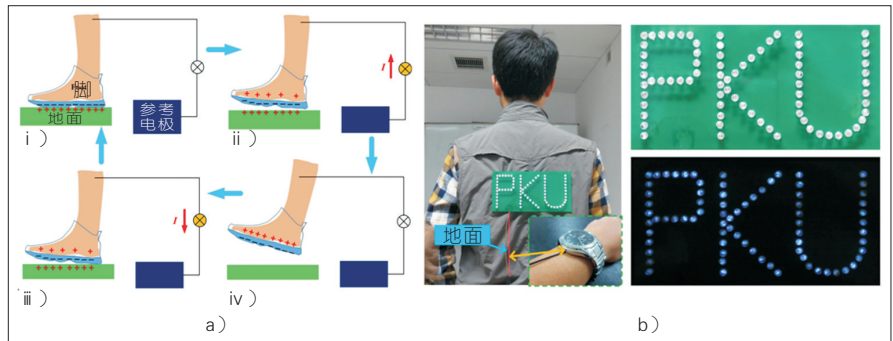
图1
摩擦发电机4种
基本工作形式



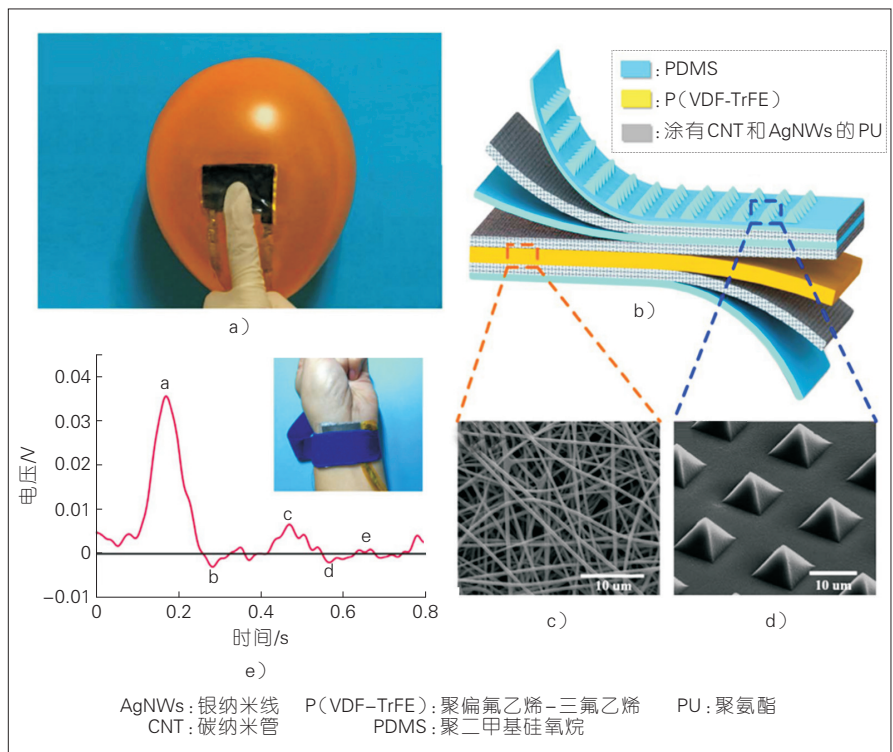
▲图2 单表面透明摩擦发电机

电机。将此发电机裁剪、装贴于智能手机屏幕上,在用户日常操作下,输出电能可同时点亮3个发光二极管。进一步地,以此发电机为基础,利用二极管搭建逻辑电路,研究人员开发了自供能的触觉传感器。当手机用户触摸由4个单表面摩擦发电机构成的触摸板时,即可驱动单色液晶显示屏,并可在屏幕上显示对应的数字。

进一步地,研究人员利用“人体是电的良好导体”的特点,将人体作为电导实现了一种柔性全透明的摩擦发电机,如图3所示^[6]。相比于上述工作,其结构更简单,无需单独提供对地电极,适用范围更广泛,输出电流和转移电荷的输出分别提高210%和81%。这种透明的TEG可贴于手机、平板电脑等设备表面,在设备后面贴一层电极用于与手掌、手腕等部位接触,形成人体接触电极,从而构成一个完整回路,在日常使用中,由于手指与电极材料得失电子能力不同,手指不断与透明发电机接触,即可引起电子在回路中流动,形成电流为一些低功率设备供电。由于以人体为电导有诸多优点,基于此有希望做出更多面向应用的新型发电机,如进一步提升发电机的输出,将可能作为移动设备、可穿戴设备的备用电源使用。



▲图3 可穿戴摩擦发电机



▲图4 复合式能量采集器件

1.3 复合式EH技术

相对于单一的EH技术,复合式EH技术将多种EH技术集成,从而进一步提高EH的效率。2017年研究人员提出了一种摩擦与压电复合的纳米发电机,如图4所示^[7]。该器件采用静电纺丝工艺加工的柔性纳米纤维作为功能材料和电极骨架,通过添加导电纳米材料制作柔性电极,引入纳米结构增加表面摩擦层接触面积。针对摩擦发电机需相对位移和压电发电机需产生形变的工作特点,将二者垂直结合,构成多层薄膜状结构,从而使器件可保形覆盖在人体皮

肤等柔性表面,并在外力情况下随柔性物体一起产生形变,进行能量转换。其中,TEG部分将物体与器件接触分离过程中的机械能转化为电能输出,压电发电机部分则对器件形变过程中的机械能进行能量转换,由此提升器件在一次按压释放过程中的EH效率。除了针对柔性表面进行EH外,由于压电静电纺丝薄膜具有比较高的压力灵敏度,器件还以可贴附于人体腹部或者手腕处,用于呼吸、脉搏振动等一系列生理信号的监测,在自供能健康监测系统中有着非

常广阔的应用前景。

2 主动式传感技术

利用摩擦发电的原理发展起来的新型主动式传感技术,无需外接电源即可对外部信号,包括力学、热学、声学等,产生响应,是一项潜力巨大的技术,特别在备受关注我们人造电子皮肤领域取得了一定的成功。电子皮肤同时兼备力学上的柔性和电学上的传感功能,但是应用环境如医疗健康、人工智能、便携式电子等领域又要求它体积小兼具柔性和舒适性,

因此不可能佩带硬质电池等电源,所以利用摩擦发电原理正好适合这一应用场景。

2.1 模拟定位传感技术

科研人员将摩擦起电原理与横向的静电感应效应相结合,研制出一种新型自驱动的柔性透明多功能电子皮肤,如图5 a)所示^[8]。有别于传统电子皮肤基于传感器阵列实现对压力、位置等物理量的数字式感知,该模拟电子皮肤利用目标物体与电子皮肤表面接触产生的摩擦电荷,根据距离对摩擦电荷与测量电极静电感应效应强度的影响,通过计算2个相对电极之间的电势比例(R_{ac} 和 R_{bd})来实现各个方向上的定位。如图5 b)所示,各个电极上的电压值可以直接测试得到。这里以a、c2个相对电极为例,通过计算两电极上电压的比例,可以得知接触位置,如图5 c)所示。由于利用摩擦表面自主产生的摩擦电荷,也实现了完全的自驱动传感。又由于模拟定位方法的运用,只需4个电极即可实现二维高精度定位,极大地减少电极数量,从而降低了后端处理电路的复杂性。

该电子皮肤通过使用表面具有

微结构且修饰氟碳聚合物的聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为摩擦面,不仅提高了摩擦电荷密度,也增强了信号的强度与高稳定性。该电子皮肤在平面和曲面一系列的重复测试中均达到1.9 mm的空间分辨率,表现出很高的感应灵敏度,例如:可以感知蜜蜂四肢(~0.16 g)落在电子皮肤上的扰动。此外,利用被测物体靠近电子皮肤时各个电极上信号强度的绝对值,还可以实现对接触速度的测量。由于使用了全透明柔性材料、银纳米线电极,该电子皮肤也表现出优异的柔性和透明性。

2.2 力学传感技术

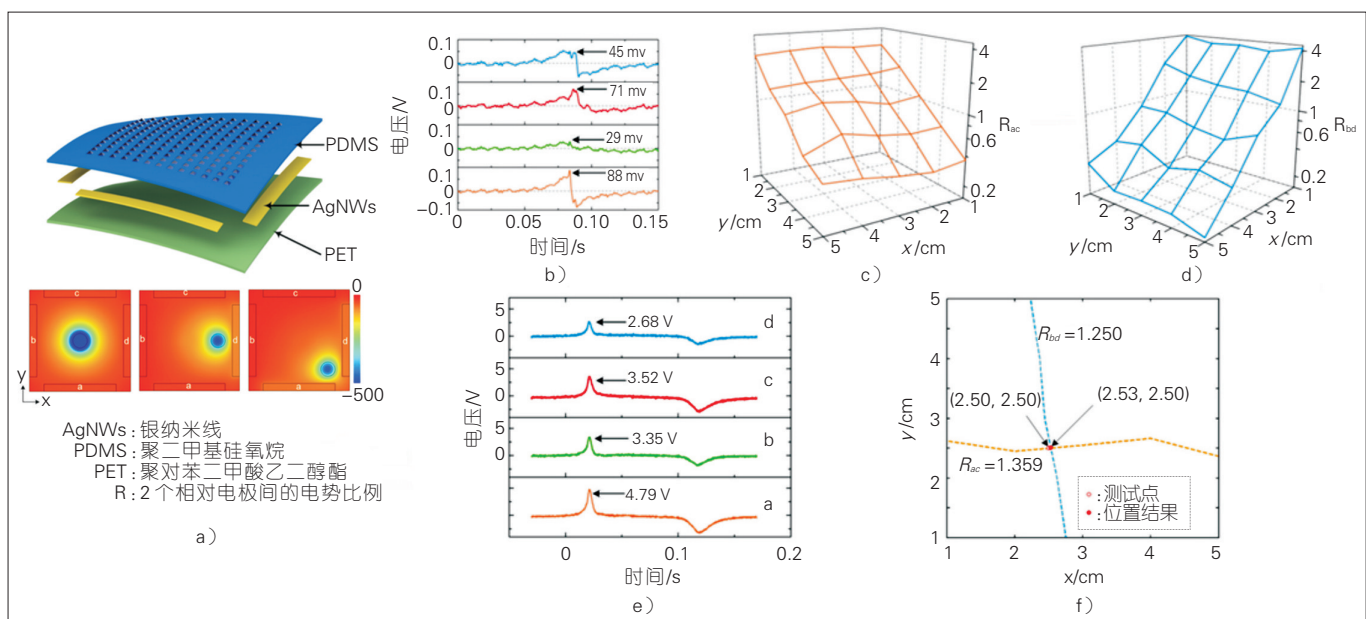
研究人员以人类指纹结构为突破口,受人体皮肤传感机制和结构的启发,通过研究皮肤传感生理机制和手指生理结构,创造性地将摩擦式动态传感与压阻式静态传感加以结合,设计了一种基于指纹结构的新型多功能电子皮肤,如图6所示^[9]。器件模仿指纹结构设计双螺旋电极的TEG,通过摩擦电压输出频率检测滑动物体的粗糙度,首次提出了数字式的摩擦检测方案。仿真皮结构制备多孔碳纳米管(CNT)/PDMS,通过

接触电阻变化检测压力大小,合理调控纳米导电网络及多孔率,可大幅提升压阻传感灵敏度。同时集成动态滑动检测和静态压力检测的功能,体现了该多功能电子皮肤在执行复杂任务的强大能力,显示了其在机器人传感领域的巨大潜力。

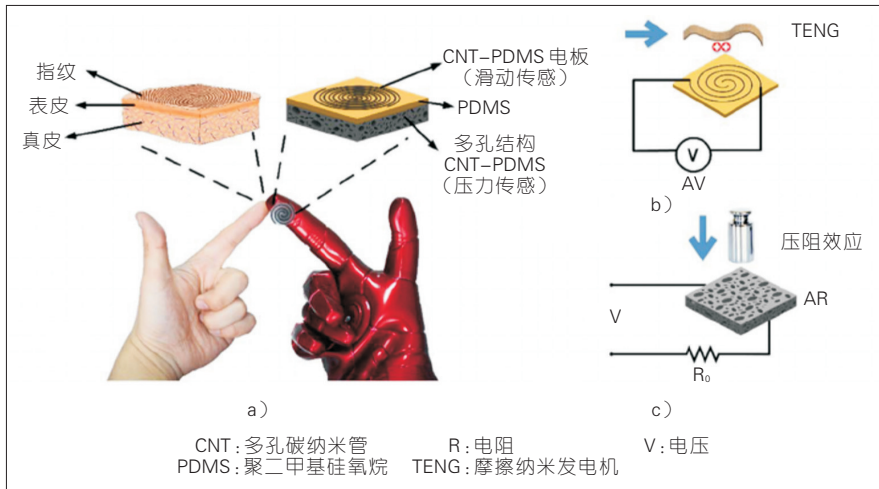
2.3 非接触传感技术

现有电子皮肤大多依靠集成压力传感元件的方式实现接触式位置传感,其分辨率受制于传感单元个数,且无法完全发挥电子皮肤的潜能与优势。针对这一问题,科研人员研制出一种新型的自驱动非接触式透明柔性电子皮肤,如图7所示^[10]。它结合摩擦起电原理与空间静电感应效应,利用4个电极即可达到1.5 mm的二维空间分辨率。与此同时,该电子皮肤还能够检测垂直距离不超过5 cm的带电体在平行平面内的运动,因此实现了非接触式位置传感。

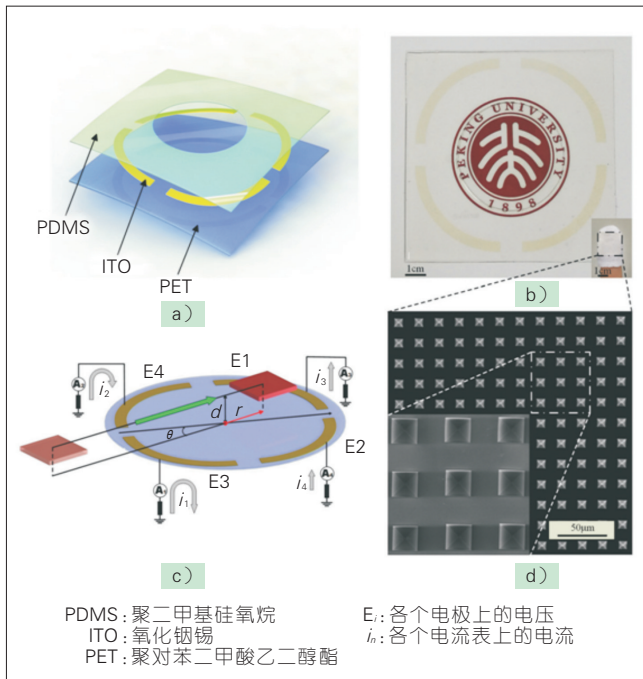
不同于传统电子皮肤基于传感单元阵列实现对于压力、位置等物理量的数字式感知,该模拟电子皮肤利用预起电过程中积累于带电体表面的电荷,根据空间位移造成的静电势变化在电极上所产生的感应电流,通



▲ 图5 自驱动模拟定位电子皮肤



▲图6 仿指纹多功能电子皮肤



▲图7 非接触电子皮肤

过计算多个电极电压的相对大小实现极坐标平面上的定位。由于利用摩擦表面自主产生的摩擦电荷，电子皮肤实现了完全的自驱动传感；又由于模拟定位方法的运用，只需4个电极即可实现二维高精度定位，相较于传统数字式电子皮肤，极大降低了电极数量；空间静电感应原理使得目标物体的位移可脱离并平行于电子皮肤所在平面，可作为实时游戏平台的人机交互界面使用，将用户的手指运动转化为电信号发送给计算机。该

电子皮肤通过使用表面具有微结构的PDMS作为摩擦面，不仅增强了摩擦电荷密度，也提高了信号的强度。此外，使用磁控溅射在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底表面的氧化铟锡(ITO)为电极，因此具有很好的柔性与透明性。

3 能量存储技术

3.1 超级电容器

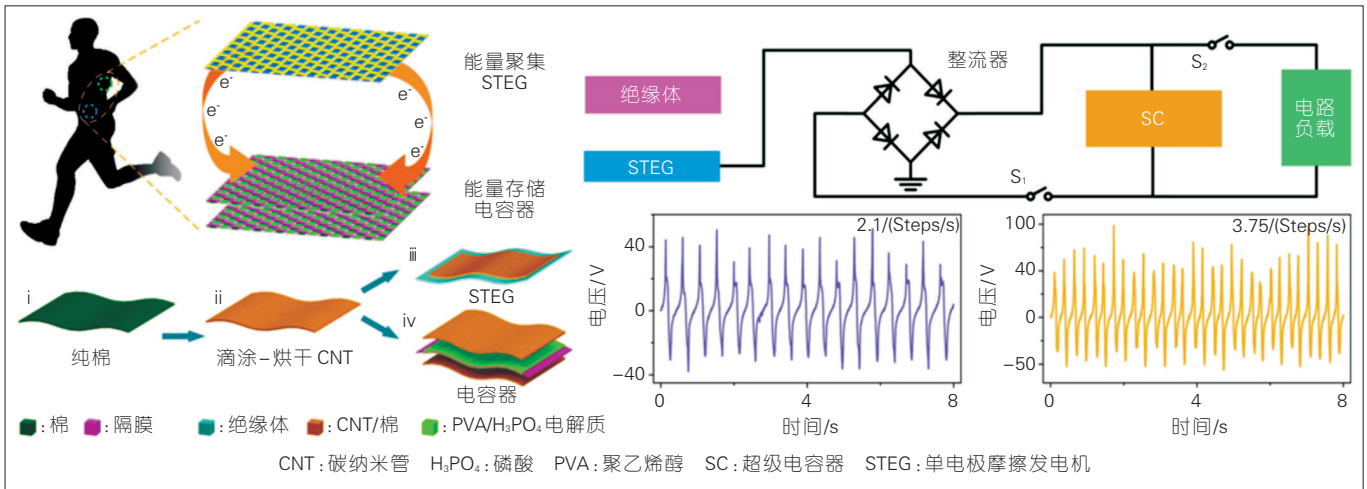
近年来，随着可穿戴电子设备的

迅猛发展，多功能集成化的智能器件的需求日益增长，电子设备不仅需要具有小型化、低功耗的特点，同时需要满足可穿戴的各项特质，并具有良好的稳定的性能。因此，具有同步EH与存储过程的自充电能量系统是一种潜在的解决方案。然而，现阶段高效稳定的能量系统的发展，仍然存在一定的制约。一方面，考虑到普通的能量存储设备充电不方便等劣势，研究学者提出将超级电容器与太阳能电池相结合的方式，为电子设备持续供电；但是，太阳能电池容易受到环境与工作条件的制约，无法实时采集能量，限制了太阳能电池在可穿戴设备中的应用。另一方面，随着各类EH器的快速发展，克服外部环境限制而随时采集环境中各类能量的TENG，在可穿戴电子中具有独特的优势；但是，普通的接触分离模式的摩擦发电机则需要较大的空间，无法满足集成式智能衣物的需求。因此，如何将EH与能量存储设备高效地集成起来，并应用于可穿戴电子系统，是一个亟待解决的巨大挑战。

研究人员以导电织物作为通用电极，将单表面TENG与柔性超级电容器集成起来，通过制备通用织物电极，得到一种高集成度的自充电能量服，在人体运动的过程中对机械能进行同步采集与存储，如图8所示^[11]。一方面，为了更有效地采集人体运动能量，单表面TENG可以直接贴附于衣物表面，并且表现出了极好的输出性能。同时，利用织物结构表面积大与碳纳米管导电性良好的优势，可穿戴的超级电容器同样具有较高的比电容值与稳定的循环特性。最终，在人体运动的过程中，这种高集成度的自充电能量服可以持续稳定地存储能量，具有较高的集成度与可穿戴兼容性，在自供能可穿戴电子与智能衣物等方面具有潜在的应用前景。

3.2 能量管理电路

TENG由于自身内阻较大，因此

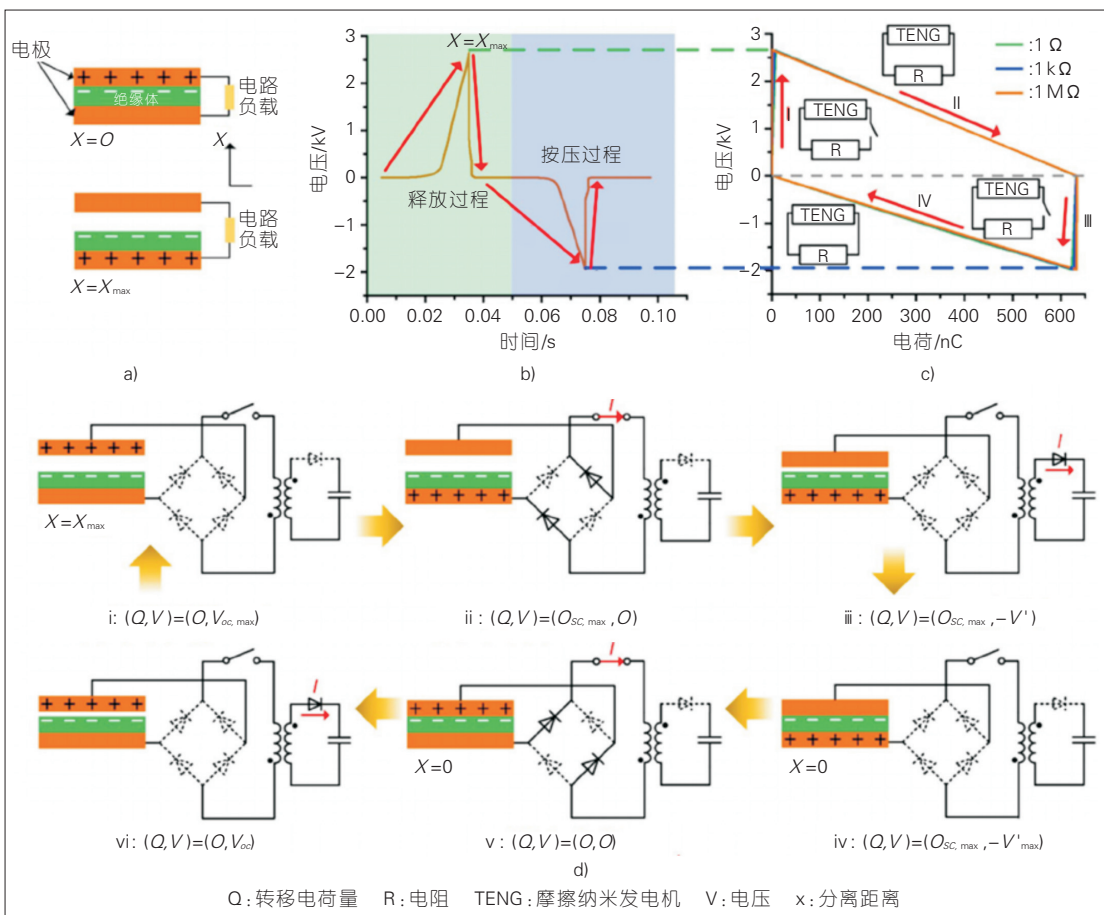


▲图8 可穿戴自充电能量服

对现有电路直接供电难以达到阻抗匹配,效率较低,是限制其实用化的一大因素。研究人员针对这一问题,利用谐振(LC)振荡原理,开发了一种适用于TENG的高效通用电源管理方案与系统,如图9所示^[2]。该工作

从理论分析摩擦发电机的内部阻抗模型出发,首先采用串联开关的方式,在短路情况下实现开路电压与短路电流同步输出,从而获得TENG单周期的最大输出能量。在此基础上采用LC振荡原理,于1/4周期内完成

能量从TENG内部电容到电感的转移,达到高能量转移效率。基于以上原理,该工作成功搭建了相应的能量管理模块,使用该模块对4.7 mF电容充电的能量存储效率相比于标准模块提升多达2 600倍,交直流功率



▲图9 高效摩擦发电机能量管理电路

转换效率高达72%，并且适用于不同模式的TENG。利用该能量管理模块，在手指按压、滑动过程中，即可成功驱动商用电子模块的实时工作，包括持续照明的发光二极管(LED)灯、电子计算器、计步器以及电子手表等。该工作不仅从原理上提出了适用于TENG电源管理的新思路与方案，同时搭建了一种通用的、高效的能量管理模块，清除了TENG未来实用化的一大障碍，成为本领域的一大突破。

4 结束语

摩擦发电作为一种新型的、高效的EH技术正在迅速蓬勃发展，本文从其工作原理入手，分析了其性能提升的关键因素，并给出若干实际应用案例，展现了TENG在日常EH中的强大潜力。此外，还介绍了基于TENG原理发展起来的主动式传感技术，无需外接电源即可对外部特定信号产生响应，大大降低了器件功耗。最后，针对TENG后端能量存储的问题进行了介绍，并重点研究了与超级电容器相集成的自充电能量单元及相应能量管理电路的设计。这3种技术是物联网的基础，它们的集成和组合将为多种物联网应用场景提供可行的解决方案。

参考文献

- [1] WANG Z L. On Maxwell's Displacement Current for Energy and Sensors: the Origin of Nanogenerators [J]. Materials today, 2017, 20 (2): 74–82. DOI:10.1016/j.attod.2016.12.001
- [2] 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
- [3] WANG S H, LIN L, WANG Z L. Triboelectric Nanogenerators as Self-Powered Active Sensors [J]. Nano Energy, 2015, 11: 436–462. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.10.034
- [4] BYUN K E, LEE M H, CHO Y, et al. Potential Role of Motion for Enhancing Maximum Output Energy of Triboelectric Nanogenerator [J]. APL Materials, 2017, 5(7): 074107. DOI:10.1063/1.4979955
- [5] MENG B, TANG W, TOO Z H, et al. A Transparent Single-Friction-Surface Triboelectric Generator and Self-Powered Touch Sensor [J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(11): 3235–3240. DOI: 10.1039/c3ee42311e
- [6] CHENG X L, MENG B, ZHANG X S, et al. Wearable Electrode-Free Triboelectric Generator for Harvesting Biomechanical Energy [J]. Nano Energy, 2015, 12: 19–25. DOI:10.1016/j.nanoen.2014.12.009
- [7] CHEN X X, SONG Y, SU Z M, et al. Flexible Fiber-Based Hybrid Nanogenerator for Biomechanical Energy Harvesting and Physiological Monitoring [J]. Nano Energy, 2017, 38: 43–50. DOI:10.1016/j.nanoen.2017.05.047
- [8] SHI M Y, ZHANG J X, CHEN H T, et al. Self-Powered Analogue Smart Skin [J]. ACS Nano, 2016, 10: 4083–4091. DOI: 10.1021/acsnano.5b07074
- [9] CHEN H, MIAO L, SU Z, et al. Fingertip-Inspired Electronic Skin Based on Triboelectric Sliding Sensing and Porous Piezoresistive Pressure Detection [J]. Nano Energy, 2017, 40: 65–72. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.08.001
- [10] WU H X, SU Z M, SHI M Y, et al. Self-Powered Noncontact Electronic Skin for Motion Sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(6): 1704641. DOI: 10.1002/adfm.201704641
- [11] SONG Y, ZHANG J X, GUO H, et al. All-Fabric-Based Wearable Self-Charging Power Cloth [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(7): 073901. DOI:10.1063/1.4998426
- [12] CHENG X L, MIAO L M, SONG Y, et al.

High Efficiency Power Management and Charge Boosting Strategy for a Triboelectric Nanogenerator [J]. Nano Energy, 2017, 38: 438–446. DOI:10.1016/j.nanoen.2017.05.063

作者简介



陈号天，北京大学前沿交叉学科研究院在读博士生；研究方向为可拉伸导电材料的制备和新型多功能电子皮肤；获得国家奖学金、北京大学“三好学生”等荣誉奖励；发表论文40余篇。



宋宇，北京大学信息科学技术学院在读博士生；研究方向为集成化微能源器件的研究与应用；曾多次获得国家奖学金、北京大学校长奖学金等荣誉奖励；发表学术论文25篇，拥有3项授权中国发明专利。



张海霞，北京大学信息科学技术学院教授，国际大学生iCAN创新创业大赛发起人、国际iCAN联盟主席、全球华人微纳米分子系统学会秘书长、IEEE NTC北京分会主席、2013年IEEE NEMS国际会议主席及其他10余个国际会议的组织者；多年来专注于微纳技术和微能源的研究；2006年获得国家技术发明二等奖，2013年获得北京市教学成果二等奖，2014年获得日内瓦国际发明展金奖，2017年被评为北京大学十佳导师和北京市优秀教师，2018年荣获北京市五一劳动奖章；发表学术论文共250篇，拥有42项授权中国发明专利和3项美国授权发明专利，出版专著和编著8本。