

基于摩擦纳米发电机的自供能发光地板系统^{*}

谷晓楠, 谭宝芳, 李嘉怡, 陈 杰
(重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 401331)

摘要:为保证物联网中承担着信息采集与传输等重要任务的传感器持续、稳定、免维护地工作,其中一种解决方案为收集广泛分布在环境中的振动机械能,构建自供能系统。而摩擦纳米发电机(TENG)作为机械能俘获技术之一,在收集低频无规则振动机械能方面具有更高的能量转换效率。因此,针对人行走时产生的振动机械能,设计并制作了硅胶半球支撑的接触分离式 TENG。该 TENG 器件在 1 Hz 频率下的开路电压峰值为 348 V,短路电流峰值为 7.7 μ A,外接 40 M Ω 电阻时瞬时功率可达 265 μ W,将它与树脂浇筑构建的硬质板面集成,则可实现自供能发光地板系统,能够在不同人流量的条件下正常工作。该发光地板可应用于人群密集的商场、步行街、游乐园等场所。

关键词:摩擦纳米发电机;俘能;发光地板;传感;自供能系统

中图分类号: TM919; TM910.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2024)01-0118-07

万物互联已经成为当今社会发展的必然趋势^[1]。截至 2020 年,连接到物联网中的传感器数量多达 500 亿个^[2-3],它们被应用到工业生产^[4-6]、智能家居^[7-9]、海洋探测^[10-12]、环境保护^[13-14]等众多领域,承担着信息采集与传输的重要任务。中国的大功耗传感器往往通过电网系统直接供给 220 V 电压,低功耗小型传感器则采用电池进行供能。但电池的使用受到 2 个因素的限制:1) 电池存在使用寿命有限的问题,需要耗费大量人力定期对废旧电池进行更换;2) 废旧电池处理不及时可能导致电解液泄露,造成严重的环境污染问题^[15]。因此,如何利用环境中广泛存在的分布式能源,实现传感器可持续的能源自补给,是突破物联网传感产业发展瓶颈并引领未来发展的重要方向。与光能、热能、生物质能等分布式能源相比,机械能更为广泛地存在于日常生活和工业制造中,是构建自供能传感系统能源输入端的重要组成部分^[16]。

纳米发电技术作为一种新兴的机械能俘获技术,近些年来受到广泛关注^[17-19]。目前,纳米发电机主要包括压电发电机(PENG)^[20]和摩擦纳米发电机(TENG)^[21-24]。基于 PENG 的工作原理,电子在外电路往复运动,只有当工作频率增加时,才能引起较高的电流。研究表明,在频率小于 4 Hz 时,TENG 的输出性能优于 PENG^[25],能够更有效地收集低频无规则能量。基于以上特性,TENG 已经在可穿戴设备^[26-29]、人体运动监测^[30-35]等领域获得了丰富的研究成果,在收集人体运动机械能方面具有巨大潜力。

基于此,本文提出了一种基于摩擦纳米发电技术的自供能发光地板,应用于收集和转化人行走时产生的振动机械能。首先结合发电原理与应用场景设计制作适配的 TENG 器件,并优化该器件的结构参数。再对器件的开路电压和短路电流进行测试,并研究负载对它的输出功率、接触频率对器件输出性能的影响。最后将 4 个 TENG 单元集成于树脂浇筑的 LED 硬质板面下,制成发光地板,可应用于商场、步行街、游乐园等多种场所。该发光地板摆脱了对电源的依赖,工作所需能量完全由人行走时产生的机械能提供,工作时输出电流可作为信号,在人流监测、智能家居等领域具有潜在应用价值。

^{*} 收稿日期:2022-11-23 修回日期:2023-12-14 网络出版时间:2023-06-21T11:36

资助项目:重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2021jcyj-msxmX0746);重庆市教育委员会科学技术研究计划项目(No. KJQN202100522; KJQN2022005140);重庆市博士“直通车”科研项目(No. CSTB2022BSXM-JCX0091);大学生创新创业项目(No. S202110637125)

第一作者简介:谷晓楠,女,研究方向为摩擦纳米发电技术,E-mail:guxiaonan0810@163.com;通信作者:陈杰,女,副教授,博士,E-mail:chenjie@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20230620.1153.009

1 实验

1.1 TENG 的制备

根据 TENG 的发电原理以及发光地板收集竖直方向上行走产生的机械能的特点,设计了如图 1 所示的垂直接触-分离式 TENG 模型。上下极板采用 2 层 2 mm 厚度,大小 70 mm×70 mm 的亚克力板,内层亚克力板的 4 个角使用激光切割机(聊城市绘邦激光科技有限公司)切割直径为 10 mm 的圆孔,外侧亚克力板不切割圆孔,两层亚克力板叠加可形成圆柱形凹槽,用于安置弹簧。亚克力板之间使用聚酰亚胺胶带粘贴。下极板依次均匀贴附铝膜和 FEP(氟化乙烯丙烯共聚物)膜,分别作电极和摩擦层,面积大小为 50 mm×50 mm。上极板均匀贴附铝膜,同时作为电极和摩擦层;为了防止因上下电极接触漏电而降低器件输出性能,上极板铝膜的大小应略小于下极板,为 45 mm×45 mm。4 角分别安装长度为 10 mm 的弹簧。从上下两电极上分别引出导线,连接部位使用点银胶,提升导电效果。在自由状态下,上下表面之间间隔约为 2 mm。

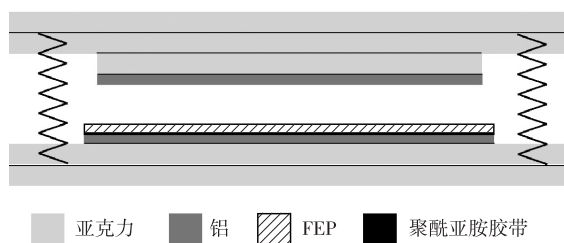


图 1 TENG 结构设计图

Fig. 1 Structural design of TENG

1.2 结构优化

TENG 作为发光地板的采能部件,不仅需要承受行走时竖直方向上的压力,还必须能够抵抗水平方向上的摩擦力。而弹簧支撑的 TENG 在水平方向极易发生摇晃和异响,并不适用于实际应用场景。为了消除上述干扰因素,提高发光地板的稳定性,将弹簧更换为具有可调节弹性的硅胶半球来支撑 TENG。

使用绘图软件设计并绘出半球形状模具,利用 3D 打印技术制作该半球形状模具。将硅胶(E635B,深圳市红叶杰科技有限公司)的 A 胶、B 胶按质量比 1:1 混合均匀后,倒入已均匀涂抹好脱模剂的模具中固化 4 h 以上,脱模得到如图 2 所示硅胶半球,底面直径 10 mm,高 4.5 mm。硅胶半球的大小可通过模具大小进行调节、软硬程度可通过选择不同型号的 A 胶和 B 胶根据实际应用场景自由调节。在自由状态下,两摩擦层之间的距离约为 1.5 mm。

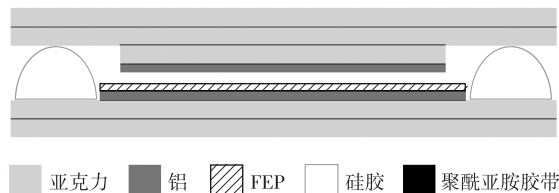


图 2 硅胶半球支撑的 TENG 结构图

Fig. 2 Structure diagram of TENG supported by silicone hemisphere

1.3 TENG 测试平台

采用步进电机滑台(FSL40E15010C7,成都福誉科技有限公司)为 TENG 提供精确可调的往复运动,采用静电计(KEITHLEY 6514,上海坚融实业有限公司)对 TENG 的输出信号进行测量,搭建如图 3 所示的测试平台,对制作的 TENG 进行性能测试。

在室温 15℃、空气湿度 60% 的实验条件下,测量得到控制滑台的频率分别为 0.25、0.5、1、1.5 及 2 Hz 下 TENG 的开路电压、转移电荷量与接触频率之间的关系;相同条件下,在控制滑台频率为 1 Hz(约为人行走时的

频率)时串联阻值不同的电阻($0 \sim 200 \text{ M}\Omega$)时,通过测量和计算得到电流、电压及功率随负载变化的关系。

1.4 TENG 的工作原理

在初始状态下,上下极板静止,FEP 和铝膜之间没有接触,二者之间未发生电荷转移,均保持电中性,电极间不存在电势差。

当施加外力时,上板铝电极和 FEP 相互接触,二者相互摩擦并发生电荷转移。由于 FEP 具有更强的负电性,电子从上板铝电极转移到 FEP。此时,上板铝电极带正电荷,FEP 带负电荷(图 4a)。当撤去外力时,两板在硅胶的支撑下开始相互分离,两电极间形成电势差。电子开始自下而上运动,电流方向向下(图 4b)。当两板完全分离时,自由电子全部转移至上板铝电极,此时下板铝电极带正电,上板铝电极不带电(图 4c)。此后,两板再次相互接触,电子重新回到下板铝电极,电流方向向上(图 4d)。如此周而复始,即可产生交流电。

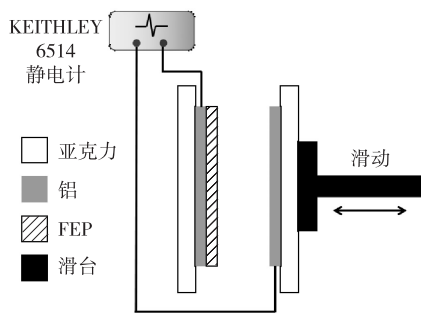


图 3 TENG 输出性能测试平台

Fig. 3 TENG output performance test platform

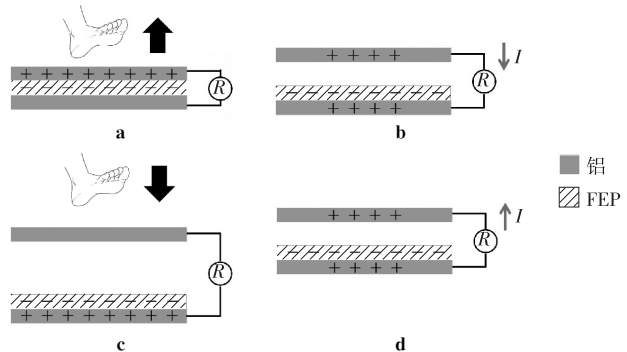


图 4 TENG 工作原理图

Fig. 4 Working principle of TENG

2 实验结果与讨论

利用 1.3 中搭建的测试平台对 TENG 的输出性能进行测试。模拟人的行走,设置滑台频率为 1 Hz (1 s 内完成 1 组接触分离),测试单个 TENG (有效面积 $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$) 的开路电压和短路电流。

如图 5 所示,两板分开静止时开路电压的值为 0,两板相互接触时开路电压的值开始上升,直至到达峰值 348 V ,两板相互分离时开路电压的值开始下降,直至回到 0。类似地,初始时短路电流的值为 0,两板相互接触和分离时都能产生瞬时电流,但方向相反,短路电流峰值达到 $7.7 \mu\text{A}$ 。

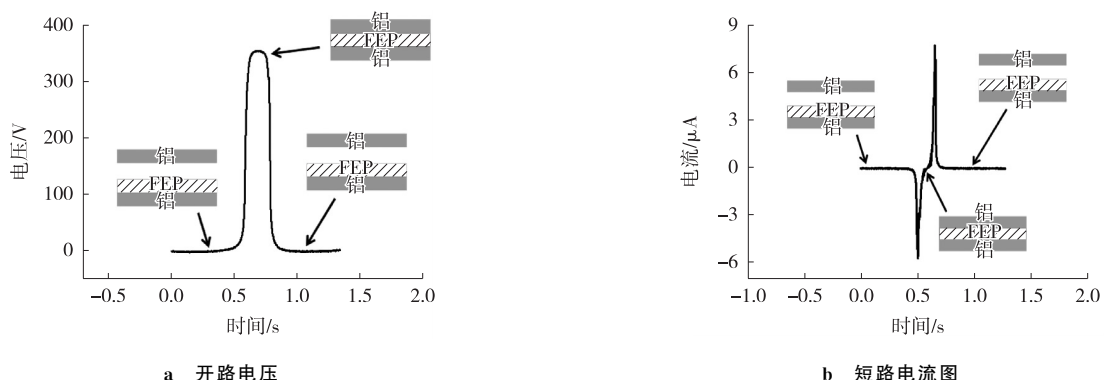


图 5 1 Hz 频率下 TENG 的输出性能

Fig. 5 Output performance of TENG at 1 Hz

实际使用中,人行走时产生的机械能大小不定。为了探究地板中 TENG 的输出效果是否与工作频率有关,以判断 TENG 在不同接触频率下是否都能正常工作,本文针对 TENG 的输出随频率的变化关系进行了测试。

保持其他条件不变时,控制滑台分别以不同频率在相同距离内做往复运动,分别测试 TENG 的开路电压以

及转移电荷量的大小。如图 6 所示,在工作频率从 0.25 Hz 提升至 2 Hz 的过程中,TENG 的开路电压值始终维持在 360 V 左右,转移电荷量的值始终维持在 220 nC 左右,器件整体的输出性能均没有发生明显的变化。因此,该 TENG 器件在一个接触分离的过程中输出的电能不会随频率的变化而发生变化。也就是说,踩踏频率对于 TENG 构建的发光地板输出没有明显影响,发光地板能在不同人流量的条件下正常工作。

若以该 TENG 作为发光地板的电源,则需要确定该 TENG 输出随负载的变化关系,以匹配最优阻抗,并计算输出的最大功率。

将 0~200 M Ω 的电阻分别与 TENG 串联后接入静电计测量经过电阻的电流值。同样采用 1 Hz,即人行走时的频率,保持其他条件不变,测试结果如图 7 所示。从图中可以看出,输出电流随外接负载的增大而减小,电压随外接负载的增大而增大。在负载从 0 M Ω 增至 200 M Ω 的过程中,电流从 5.7 μ A 减少到 0.9 μ A,电压从 0 V 增加到 182 V。根据功率与电流、电压的转换方式: $P=UI$,计算得到该 TENG 输出瞬时功率随负载的变化曲线(图 7),可以看出,在负载大约为 40 M Ω 时输出功率达到峰值 265 μ W。

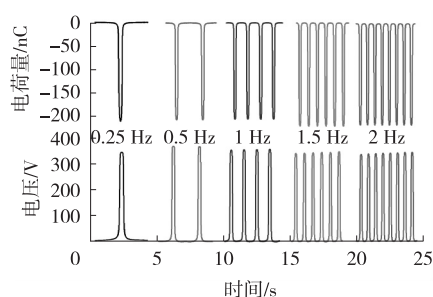


图 6 开路电压和转移电荷量随频率的变化关系

Fig. 6 The relationship between open circuit voltage and transfer charge with frequency

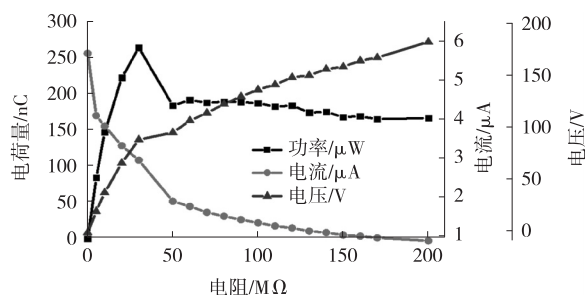


图 7 电流、电压和功率随负载的变化关系

Fig. 7 The relation of current, voltage, and power to load

3 发光地板

利用上述 TENG 制作发光地板,它的结构如图 8a 所示,自供能发光地板分为底部的供能部分和上部的显示部分。底部供能部分由 2 块 145 mm×145 mm 上下分布的亚克力板构成,在上下 2 块亚克力板之间的 4 个角及中央用胶水固定 5 个硅胶半球作为支撑,5 个硅胶半球之间包含 4 个 50 mm×50 mm 的并联而成的 TENG 单元。显示部分为 LED 硬质板面,上下两部分之间利用亚克力矩形框支撑,TENG 引出的导线通过整流桥与上部 LED 硬质版面相连,导线与整流桥均集成于自供能发光地板内部。

其中,上部 LED 硬质板面采用定制的 PCB 板,将 LED 灯引脚孔绘制在 PCB 上的相应位置,排列组成“CQNU”字样,将圆头聚光绿色 LED 灯珠插在已打好孔的 PCB 板上,通过锡焊焊接固定,剪掉引脚,字母之间用导线连接。由于发光地板需要承受人正常行走产生的力,地板表面需要足够坚固,且需要有一定的透明度。采用高硬度、高透明度的环氧树脂对已经焊接好的 PCB 板进行浇筑。在 PCB 板边缘固定竖直高度为 1.5 cm 的亚克力板,在外围边缘缝隙涂抹热熔胶防止浇筑时漏液。A、B 胶按 2.5 : 1 的体积比配置环氧树脂(实验使用“简恩”牌环氧树脂),充分搅拌至透明,倒入密封性能良好的 PCB 内,放在水平桌面上静置 24 h,完全固化后形成坚硬、高透明的发光地板表面。

图 8b、c 分别为制作完成的自供能发光地板实物俯视图和侧视图。当器件受到外力按压,“CQNU”字样的 LED 阵列能够发出明亮醒目的光芒,如图 8d 所示。在室内进行行走测试中,地板在踩下和抬脚瞬间均能发出明亮醒目的光芒,如图 8e 所示。按 21 Hz 频率连续工作 100 万次,每隔 1 h 测试 1 次电压,以测试发光地板的稳定性,实验结果(图 8f)显示,在长期工作过程中发光地板仍保持较为稳定的输出。TENG 在地板方面的应用多为智能传感和运动监测^[36],采用单电极模式,以人的鞋底作为独立电极,能通过电信号识别用户运动状态,但对鞋底材料的选择具有一定的限制。本实验制作的发光地板采用接触分离式,对用户着装没有限制,收集到的机械能用于发光,适用于商场、步行街、KTV 等人流量较为密集的场所。同时,相较于商用发光地板,本实验制作的

发光地板摆脱了对电源的依赖,能够适应更多工作场景,独立工作,更加清洁、安全。

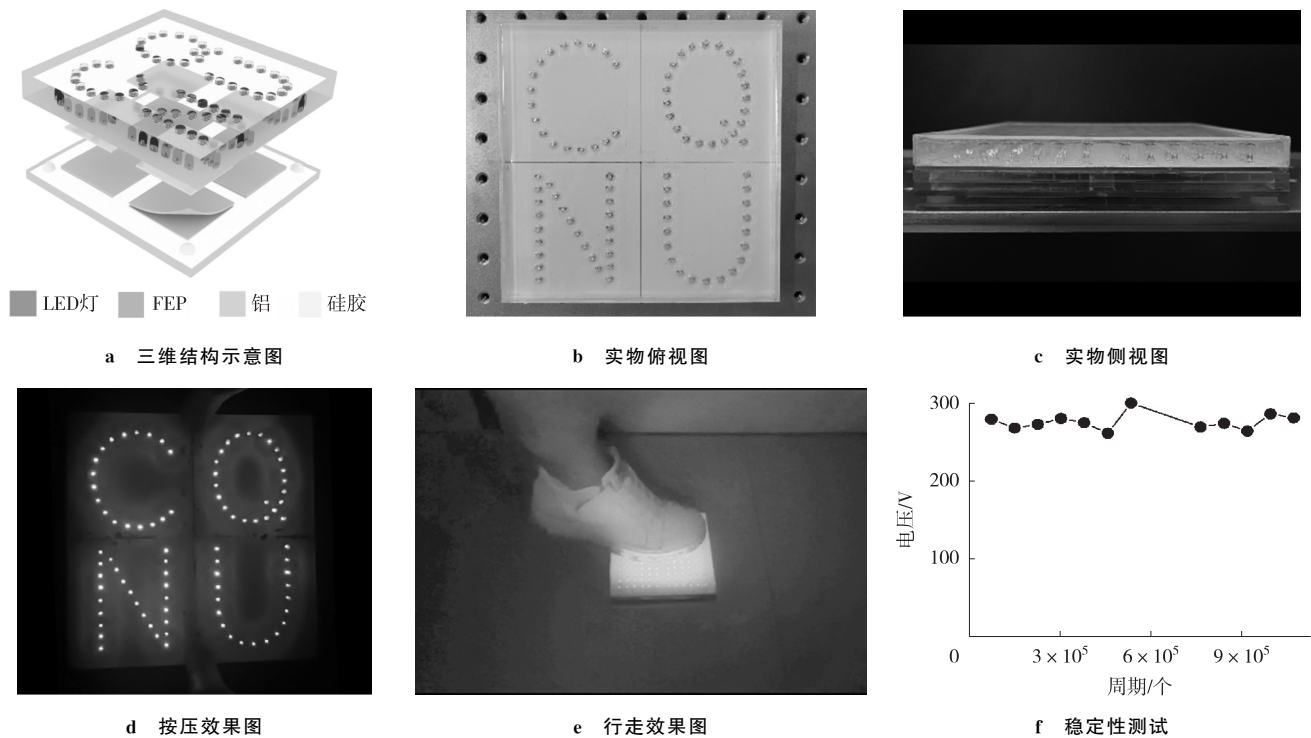


图 8 发光地板

Fig. 8 Luminous floor

4 结论

为了俘获人行走时产生的振动机械能,本研究设计并制作了一种基于 TENG 的自供能发光地板,包含 4 个并联而成的接触分离式 TENG 单元,5 个硅胶半球,以及树脂浇筑封装的 LED 硬质板面。系统研究 TENG 单元的电学输出性能后,得到在 1 Hz 频率下开路电压为 348 V、短路电流为 $7.7 \mu\text{A}$ 。在 0.25~2 Hz 频率间,TENG 的开路电压和转移电荷量保持稳定。根据电流随负载的变化关系曲线,当外电阻约为 $40 \text{ M}\Omega$ 时,瞬时输出功率达到 $265 \mu\text{W}$ 。由 4 个 TENG 单元构建的自供能发光地板可点亮 144 盏绿色 LED 灯,能够在人走过时发出明亮的光芒。该发光地板系统安全、稳定,可以应用于步行街、商场、儿童乐园等场所。不仅如此,输出电流还可作为电信号进行数据监测,在智能家居领域具有潜在应用价值。

参考文献:

- [1] ZHU M L, YI Z R, YANG B, et al. Making use of nanoenergy from human: nanogenerator and self-powered sensor enabled sustainable wireless IoT sensory systems[J]. Nano Today, 2021, 36: 101016.
- [2] WANG Z. L. Entropy theory of distributed energy for internet of things[J]. Nano Energy, 2019, 58: 669-672.
- [3] AHMED A, HASSAN I, EL-KADY M F, et al. Integrated triboelectric nanogenerators in the era of the internet of things[J]. Advanced Science, 2019, 6(24): 1802230.
- [4] ALHAYANI B S A, LLHAN H. Visual sensor intelligent module based image transmission in industrial manufacturing for monitoring and manipulation problems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021, 32: 597-610.
- [5] APONTE-LUIS J, GOMEZ-GALAN J A, GOMEZ-BRAVO F, et al. An efficient wireless sensor network for industrial monitoring and control[J]. Sensors, 2018, 18(2): 182.
- [6] CHEN W, WANG X Z. Coal mine safety intelligent monitoring based on wireless sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(22): 25465-25471.
- [7] BIANCO S, CELONA L, CIOCCA G, et al. A smart mirror for emotion monitoring in home environments[J]. Sensors, 2021, 21

- (22):7453.
- [8] CHKROUN M, AZARIA A. A safe collaborative chatbot for smart home assistants[J]. *Sensors*, 2021, 21(19):6641.
- [9] HAYASHI V, RUGGIERO W. Non-invasive challenge response authentication for voice transactions with smart home behavior [J]. *Sensors*, 2020, 20(22):6563.
- [10] SUN K, CUI W, CHEN C. Review of underwater sensing technologies and applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(23):7849.
- [11] NARMEEN R, CHUNG J. Relay selection for capacity increase in underwater acoustic sensor network[J]. *Sensors*, 2021, 21(19):6605.
- [12] FENG O Y, JIA Y, LIU H P, et al. Underwater imaging system based on light field technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(12):13753-13760.
- [13] HSU-SHENG T, WANG Y, LIU C M, et al. The elemental 2D materials beyond graphene potentially used as hazardous gas sensors for environmental protection[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423:127148.
- [14] MOHAMMAD U M. A review of micro-nano-scale wireless sensor networks for environmental protection: prospects and challenges[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2005, 6(3/4):302-306.
- [15] ZHOU L F, YANG D R, DU T, et al. The current process for the recycling of spent lithium ion batteries[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8:578044.
- [16] 张弛, 付贤鹏, 王中林. 摩擦纳米发电机在自驱动微系统研究中的现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(7):89-101.
- ZHANG C, FU X P, WANG Z L. Review and prospect of triboelectric nanogenerators in self-powered microsystems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(7):89-101.
- [17] FAN F R, TANG W, WANG Z L. Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22):4283-4305.
- [18] NIU Z X, CHENG W L, CAO M L, et al. Cellulose-based nanogenerators: an overview of cellulose-based nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2021, 6(3):2170018.
- [19] YANG L X, MA Z H, TIAN Y, et al. Progress on self-powered wearable and implantable systems driven by nanogenerators [J]. *Micromachines*, 2021, 12(6):666.
- [20] JIAO P C. Emerging artificial intelligence in piezoelectric and triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2021, 88:106227.
- [21] VIDAL J V, SLABOV V, KHOLKIN A L, et al. Hybrid triboelectric-electromagnetic nanogenerators for mechanical energy harvesting: a review[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13:199.
- [22] 禹健, 郭艳婕, 杨雷. 固-液摩擦纳米发电机[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(21):160-181.
- YU J, GUO Y J, YANG L. Solid-liquid triboelectric nanogenerator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(21):160-181.
- [23] 肖渊, 刘进超, 吕晓来, 等. CNT/PDMS 介电层微结构成型及摩擦纳米发电机制备[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15):177-185.
- XIAO Y, LIU J C, LÜ X L, et al. Preparation of triboelectric nanogenerators with CNT-containing and micro-structure PDMS composite films[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15):177-185.
- [24] ZHANG H, YAO L J, QUAN L W, et al. Theories for triboelectric nanogenerators: a comprehensive review[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2020, 9(1):610-625.
- [25] AHMED A, HASSAN I, HALAL A S, et al. Triboelectric nanogenerator versus piezoelectric generator at low frequency (<4 Hz): a quantitative comparison[J]. *iScience*, 2020, 23(7):101286.
- [26] 丁亚飞, 陈翔宇. 基于摩擦纳米发电机的可穿戴能源器件[J]. *物理学报*, 2020, 69(17):170202.
- DING Y F, CEHN X Y. Triboelectric nanogenerator based wearable energy harvesting devices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(17):170202.
- [27] 杨潍旭, 王晓力, 陈平. 摩擦纳米发电机表面织构的优化设计[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3):130-136.
- YANG W X, WANG X L, CHEN P. Optimal design of surface texture in triboelectric nanogenerators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3):130-136.
- [28] WANG H B, HAN M D, SONG Y, et al. Design, manufacturing and applications of wearable triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2021, 81:105627.
- [29] HE T Y, WANG H, WANG J H, et al. Self-sustainable wearable textile nano-energy nano-system (nens) for next-generation healthcare applications[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(24):1901437.

- [30] XI Y H, HUA J, SHI Y J. Noncontact triboelectric nanogenerator for human motion monitoring and energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104390.
- [31] SUN P, CAI N X, ZHONG X D, et al. Facile monitoring for human motion on fireground by using MiEs-TENG sensor[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106492.
- [32] ZHANG Z X, CAI J. High output triboelectric nanogenerator based on PTFE and cotton for energy harvester and human motion sensor[J]. *Current Applied Physics*, 2021, 22: 1-5.
- [33] QLA B, HONG C, YZB D, et al. Intelligent facemask based on triboelectric nanogenerator for respiratory monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022, 91: 106612.
- [34] LU X, ZHANG H, ZHAO X, et al. Triboelectric nanogenerator based self-powered sensor with a turnable sector structure for monitoring driving behavior[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106352.
- [35] LIU Y, ZHAO W, LIU G, et al. Self-powered artificial joint wear debris sensor based on triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 105967.
- [36] 马金铭. 摩擦纳米发电机传感特性研究及其在智能系统中的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- MA J M. Research on sensing characteristics of triboelectric nanogenerator and its applications in intelligent system[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

A Self-Powered Luminous Floor System Based on TENG

GU Xiaonan, TAN Baofang, LI Jiayi, CHEN Jie

(College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In the era of big data, a large number of sensors undertake the important task of information collection and transmission in the Internet of Things. It is an urgent problem that how to keep these sensors working steadily, consistently and maintenance-freely. Collecting vibration mechanical energy widely distributed in the environment and building a self-energy supply system, which provides a solution to the problem. As a mechanical energy capture technology, Triboelectric Nanogenerator (TENG) has a higher energy conversion efficiency in collecting low-frequency and irregularity vibrational mechanical energy. A contact-separation mode TENG supported by silicone hemispheres is designed and fabricated for vibration mechanical energy generated by walking. The open-circuit voltage peak of the TENG is 348 V and the short-circuit current peak is $7.7 \mu\text{A}$ at 1 Hz. With a $40 \text{ M}\Omega$ external resistor, the instantaneous power reaches $265 \mu\text{W}$. When integrated with the resin pouring hard board surface, the self-powered luminous floor system can be realized, which can work normally under different human flow conditions. The luminous floor can be used in shopping malls, pedestrian streets, amusement parks and other places.

Keywords: triboelectric nanogenerator; mechanical energy capture; luminous floor; sensing; self-powered system

(责任编辑 黄 颖)