

磁性摩擦纳米发电机的构筑及其能量收集与传感应用

王玺

兰州文理学院, 甘肃 兰州 730000

DOI: 10.61369/TACS.2025050055

摘 要 : 磁性摩擦纳米发电机作为一种新兴的能源转换设备, 具备高效率、低成本以及可大规模应用等优势, 为自驱动传感系统、微电子设备和可穿戴设备等领域提供了全新的能源解决方案。本文深入阐述了磁性摩擦纳米发电机的构筑方式, 详细探讨了其在能量收集与传感应用方面的巨大潜力, 同时对该领域的未来发展趋势进行了展望。

关 键 词 : 磁性摩擦纳米发电机; 构筑; 能量收集; 传感应用

Construction of Magnetic Triboelectric Nanogenerator and Its Energy Harvesting and Sensing Applications

Wang Xi

School of Electronics and Communication Engineering, Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou, Gansu 730000

Abstract : As an emerging energy conversion device, magnetic triboelectric nanogenerators have the advantages of high efficiency, low cost and large-scale application, providing new energy solutions for fields such as self-driven sensing systems, microelectronic devices and wearable devices. This paper deeply expounds the construction methods of magnetic triboelectric nanogenerators, discusses in detail their great potential in energy harvesting and sensing applications, and prospects the future development trends in this field.

Keywords : magnetic triboelectric nanogenerator; construction; energy harvesting; sensing application

随着物联网技术的兴起以及各种便携式电子装置的日益普及, 对能源的绿色、微型化需求也愈发强烈, 传统电池能量获取寿命短、更换成本高、环保压力大, 难以满足未来能源需求^[1]。摩擦纳米发电机作为一种将机械能有效转化成电能的微纳新型器件, 由于具有价格低廉、高效化、低频乱杂能收集的优势, 成了环境能源获取研究的热点。作为摩擦纳米发电机的一个重要成员, 磁摩擦纳米发电机以磁性材料和磁性结构为突破点, 延展了摩擦纳米发电机的应用范围和发展优势, 在能量收集、传感器等多个领域具有巨大的应用前景^[2]。

一、磁性摩擦纳米发电机的构筑

(一) 材料选择

1. 摩擦材料

摩擦材料应具备良好的摩擦特性和耐磨性, 以确保在长期使用过程中能够稳定地产生摩擦电荷。常见的摩擦材料包括聚合物材料、金属氧化物以及一些具有特殊表面结构的纳米材料。例如, PVDF 具有较高的压电常数和良好的柔韧性, 适合用于制备摩擦纳米发电机的摩擦层; PA66 则具有较好的耐磨性和化学稳定性, 可作为正摩擦电层材料^[3]。

2. 磁性材料

磁性摩擦纳米发电机选择的磁性材料会极大地影响磁性摩擦纳米发电机的整体性能。理想的磁性材料须具备高磁导率、小磁滞损耗和高耐磨性的特征, 如铁、钴、镍及其合金类磁性氧化物

等均可作为磁性摩擦纳米发电机用的磁性材料^[4]。

(二) 结构设计

合理的结构设计是实际应用中提升磁性摩擦纳米发电机能量转换效率的重要因素之一, 常用结构设计类型有双面结构(或更多面结构)、磁浮结构等^[5]。

1. 双层或多层结构

不同摩擦材料与不同磁性材料互层成双层或多层结构可以有效提升摩擦界面面积, 提高电荷产生和分离的效率。以 PVDF/磁性高熵合金复合纤维膜为负摩擦电层, PA66 纳米纤维膜为正摩擦电层, 中间层为 Al 电极, 这种垂直接触-分离模式的摩擦纳米发电机可以有效提高电学输出性能。

2. 磁悬浮结构

磁悬浮结构是磁辅助摩擦纳米发电机中一种典型的结构形式。在这种结构中, TENG 可简化为刚度和质量的机械动力系

统,利用磁体之间的非接触性、非线性电阻特性,使磁体充当系统刚度,从而增强系统性能,减小摩擦阻力,提高环境恢复能力,实现非接触式力传递,促进复杂的机械动作,同时保持与混合电摩擦发电机(HETG)所需磁场的兼容^[9]。

(三) 制备工艺

1. 微纳加工技术

如光刻、电镀、刻蚀等微纳加工技术可以加工得到任意设计的、微米尺度结构,进行材料的纳米级别加工、组装。例如可采用光刻技术制得具有图案的电极及摩擦层结构,采用电镀技术将具有导电性的金属层镀在电极表面,增强电极的导电性。

2. 静电纺丝技术

静电纺丝技术是一种制备纳米纤维的有效方法,可用于制备磁性纳米复合材料纤维膜。例如,青岛大学龙云泽教授课题组采用静电纺丝技术制备了PVDF/磁性高熵合金(HEA)复合纳米纤维膜和PA66纳米纤维膜,分别作为摩擦纳米发电机的负摩擦电层和正摩擦电层,该方法制备的纤维膜具有较大的比表面积和良好的摩擦性能。

3. 溶液旋涂技术

溶液旋涂法是指把溶液涂布到基底表面,再通过加热或蒸发等方法去除溶剂获得的均匀薄膜。溶液旋涂法适用于制作摩擦纳米发电机绝缘层或摩擦层,可以控制溶液浓度、旋涂速度来调节薄膜的厚度和平整度^[7]。

二、磁性摩擦纳米发电机的能量收集应用

(一) 自驱动传感系统

磁摩擦纳米发电机可以作为自驱动传感系统的动力来源,给系统中的传感器及信号处理电路提供能量。如将磁摩擦纳米发电机与温度传感器、压力传感器集成,当受外界环境的影响而发生机械变化或振动时(受热、压力),其驱动磁摩擦纳米发电机发电,从而为传感器自身以及传感器的信号传输处理提供能量,实现对环境参数的及时、稳定检测感知,不使用额外的电池电源提供能量,使系统更加自主可靠。

(二) 微电子设备

磁性摩擦纳米发电机的微型化、轻量化特性适合为一些微型传感器、无线通信等低功耗、小型化系统供电。例如,在一些微型无线传感器网络中,可在每个传感器节点中集成磁性摩擦纳米发电机,利用环境振动能或机械能,如人体运动、车辆行驶产生的振动,为传感器节点供电,从而增加传感器节点的工作时间,减少更换电池的频率与成本。

(三) 可穿戴设备

可穿戴设备的快速发展对其能源供应提出了更高的要求。磁性摩擦纳米发电机可以作为可穿戴设备的能量收集器,将人体运动产生的机械能转化为电能,为可穿戴设备中的传感器(如加速度传感器、心率传感器等)、显示屏、蓝牙模块等提供电力。例如,将磁性摩擦纳米发电机集成到衣服、鞋子或手环等可穿戴设备中,当人体进行行走、跑步、挥手等动作时,发电机能够捕获

这些机械能并转化为电能,实现可穿戴设备的自供电,提高其便携性和使用便利性。

(四) 微型机器人和无人机

磁性摩擦纳米发电机能为微小型机器人及无人机供应额外的电能,提升微小型机器人及无人机续航工作时间。在微小型机器人应用中,将磁性摩擦纳米发电机与机器人运动部件组合,如机器人腿、轮等,使机器人运动产生摩擦电效应,通过磁性摩擦纳米发电机将机械能转化为电能,从而为机器人的电机、控制器等部件供电。无人机应用中,可利用磁性摩擦纳米发电机利用风力、空气流动等自然力,通过一定的结构设计(如将发电机放置于无人机的机翼或尾部)使风力、空气流动等机械能产生摩擦电效应,为无人机的电子系统提供备用功率,节省电能电池储备,从而提升无人机续航能力^[8]。

三、磁性摩擦纳米发电机的传感应用

(一) 物理量传感

1. 温度传感

利用磁摩擦纳米发电机与温度敏感材料的耦合效应可实现温度检测。如一些具有热膨胀性能的材料当环境温度变化时,体积会发生相应的变化,带动磁摩擦纳米发电机摩擦层或磁性层的相对运动,输出摩擦电荷,得到相应的电信号,通过测量电信号的变化值就可获得温度的变化信息。同时也可以利用磁性材料的磁性随温度变化的特性,设计磁摩擦纳米发电机作为温度传感器使用,当温度变化时,磁材料的磁导率、矫顽力等参数随之发生变化,进而改变磁摩擦纳米发电机的输出性能,实现温度监控。

2. 压力传感

压力传感:磁性摩擦纳米发电机对压力相对敏感,利用受力时摩擦层之间的接触面积与压力分布差异,引发摩擦电荷的产生与分离发生变化,因而改变了发电机的输出电压和电流,从而实现感知输出电信号大小的变化,进而精确地感知压力的大小与变化情况。比如,在智能鞋垫中利用磁性摩擦纳米发电机感知人体行走时脚底受到的压力分布情况,为运动健康监测、康复治疗等提供数据支撑;在轮胎压力监测系统中利用磁性摩擦纳米发电机监测轮胎内压力大小的变化,保障行车安全。

3. 位移和速度传感

由于磁摩擦纳米发电机的输出与运动位移及速度之间存在相关性,可通过设计磁摩擦纳米发电机结构和输出信号处理电路等方法,获得运动位移大小及方向、运动速度的快慢等信息。例如,在一些精密机械加工设备中,在运动部件上粘贴磁摩擦纳米发电机,可对部件位移和速度的大小及方向进行实时测量,进而实现加工过程的精确控制。

(二) 生物医学传感

1. 生命体征监测

磁性摩擦纳米发电机可以与生物传感器相结合,对生物信号进行实时测量并记录,用于生命体征监测。如将其与心电图仪相结合,人体心脏跳动时会产生微弱的机械振动和生物电信号,磁

性摩擦纳米发电机可以将其机械能转化为电能为心电图仪工作提供能量，同时可以通过监测发电机的输出信号的变化间接反映出心脏跳动的频率、节律等信息；将其与血压计相结合，可根据手臂血压变化时所产生的机械压力变化驱动发电机发电，监测血压的实时变化；此外，还可以将磁性摩擦纳米发电机应用于呼吸、体温监测等，为医疗保健提供方便快捷、实时的生命体征监测。

2. 生物分子检测

将磁性摩擦纳米发电机和生物识别元件（如抗体、核酸适体等）相集成，即可构成自供电的生物分子传感器系统。生物分子特异性结合生物识别元件会使体系的物理、化学性质发生变化，引发磁性摩擦纳米发电机输出信号发生变换。通过对信号的分析与检测便可进行生物分子的定性和定量分析。比如疾病诊断中，便可通过这一方法检测血液中的某些蛋白质、病毒核酸等生物标志物，为疾病的早期诊断、治疗提供依据^[9]。

（三）环境监测

1. 风速和风向监测

将磁性摩擦纳米发电机与风速传感器、风向传感器相结合，可以获得实时监测的风速和风向信息，例如基于磁悬浮结构的磁性摩擦纳米发电机当风通过发电机时，通过转动带动发电机磁体发生振动，激发电荷，产生摩擦电，输出电信号，通过电信号的大小来判断风速的大小，通过在不同方向安置发电机，由各发电机构件产生的电信号的差别来确定风向，基于磁性摩擦纳米发电机的自供电风速、风向监测器可以运用于风力发电场及气象观测场等，为环境观测，风能利用提供数据参考。

2. 湿度监测

磁性摩擦纳米发电机也可用于湿度传感。由于某些材料在湿度改变时表面性质会发生改变，如表面电阻、亲水性等。将这些湿度敏感材料与磁性摩擦纳米发电机相结合，当外界湿度发生改

变时，湿度敏感材料的性质发生变化，影响摩擦层间电荷的产生和分离，致使发电机输出信号发生变化。检测输出信号变化，实现对湿度的实时监测^[10]。

在构筑方面，采用静电纺丝技术制备的 PVDF/ 磁性高熵合金复合纳米纤维膜与 PA66 纳米纤维膜作为摩擦层，结合磁悬浮结构设计的磁性摩擦纳米发电机，已在实际场景中发挥作用。在能量收集上，将其集成于运动鞋底，能把人体行走时的机械能转化为电能，为鞋内嵌入式定位芯片和压力传感器供电，续航稳定且无需频繁更换电源。

在传感应用中，基于该发电机的智能床垫可通过压力传感实时监测人体翻身动作，利用温度传感感知体表温度变化，数据经处理后能为睡眠质量分析提供依据。此外，将其用于管道监测，借助位移传感可精准捕捉管道微小形变，为设备安全运行提供保障，充分展现了其在构筑与应用上的协同优势。

四、结论

磁性摩擦纳米发电机作为一种新兴的能源转换设备，以其独特的构筑方式和优异的性能，在能量收集与传感应用方面展现出了巨大的潜力。其能够有效地将环境中的机械能转化为电能，为自驱动传感系统、微电子设备、可穿戴设备等提供可持续的能源供应，同时还可以与各种传感器集成，实现对物理量、生物医学信号和环境参数的实时监测和感知。未来，随着纳米技术、材料科学和微纳加工技术的不断发展，磁性摩擦纳米发电机的性能将得到进一步提升。同时，随着人们对可持续能源和智能化传感系统的需求不断增加，磁性摩擦纳米发电机将在更多领域得到广泛应用，为人类社会的可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

[1] 王幸尊, 张曙林, 金欣, 等. 掺杂对导电聚合物基直流纳米发电机输出性能优化的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2024, 53(02): 7–12+20.
[2] 鲍艳, 朱孝锋, 高璐, 等. 摩擦纳米发电机输出性能提升策略的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 42(06): 2958–2970.
[3] 杨甲一. 基于摩擦纳米发电机的柔性自供电传感器研究 [D]. 北京交通大学, 2024.
[4] 项会景. 磁性摩擦纳米发电机的构筑及其能量收集与传感应用 [D]. 北京科技大学, 2024.
[5] 郑昊. 磁性液体摩擦—电磁复合式能量收集器设计研究 [D]. 河北科技大学, 2024.
[6] 严熠萌, 李彬, 齐宝亮, 等. 基于 NiFe2O4/BaTiO3 复合摩擦材料的输出性能 [J]. 上海工程技术大学学报, 2023, 37(04): 359–362.
[7] 杨晓锐, 郑昊, 龙辉, 等. 磁性液体摩擦—电磁复合能量收集器的机电耦合机制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4406–4417.
[8] 王墨. 摩擦纳米发电机的输出能量优化及高效能量管理 [D]. 重庆大学, 2023.
[9] 金旭. 基于摩擦纳米发电机的热能采集与传感装置 [D]. 广西大学, 2022.
[10] 张皓钧. PVC 基摩擦纳米发电机的构建及其在防腐中的应用研究 [D]. 兰州理工大学, 2021.