DOI: 10.3901/JME.2021.08.057

基于复合振动能量采集器的自供电无线传感微系统研究*

薛晨阳 张浩凌 崔娟 刘丹 崔丹凤 郑永秋

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 工业机械装备的在线实时状态监测和故障预警是保障工业生产安全、提高工业生产效率的重要手段。目前大多数机械装备的状态监测设备都存在体积大、功耗高的问题,并且依赖于电缆或化学电池供电,机动性、灵活性、环境适应性差。本文提出了一种基于复合振动能量采集器的高集成度自供电无线传感监测微系统,设计了压电-电磁-摩擦电三种发电方式复合的能量采集模块采集机械设备的振动能量,通过能源管理电路进行电能存储和整个系统供电。搭建了基于振动-温度高集成微纳传感芯片的环境信号采集及无线传输电路,并进行了低功耗电路设计。系统集成能源管理模块和传感电路模块后进行了采煤机状态监测测试。测试结果表明,该系统能够实时采集采煤机装备的振动、温度信号并无线传输给上位机,同时也证明系统内的能量采集模块能够收集采煤机的振动能量并转换为电能带动传感电路模块工作,这将为工业物联网传感网络节点的自供电、无线化发展提供技术支持。

关键词: 振动能量采集; 自供电; 传感监测; 无线传输; 能源管理

中图分类号: TM619

Research on the Self-powered Wireless Sensor Micro-system Based on the Hybrid Vibration Energy Harvester

XUE Chenyang ZHANG Haoling CUI Juan LIU Dan CUI Danfeng ZHENG Yongqiu

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: The on-line real-time monitoring and fault warning of industrial machinery and equipment are critical in ensuring the safety and improving the efficiency of industrial production. At present, most of the mechanical equipment condition monitoring devices are bulky, high-power consumption and rely on cable or chemical battery power supply. In this paper, a high integrated self-powered wireless sensor micro-system based on the hybrid vibration energy harvester is proposed. The energy harvesting model with hybrid piezoelectric-electromagnetic-triboelectric power generator and energy management circuit is designed to harvest and convert the vibration energy of the mechanical equipment into electric energy for power storage and supply of the whole system. The high-integrated vibration-temperature micro-sensor chip with lower-power signal acquisition and wireless transmission circuits is established. After integration of the energy harvesting model and the micro-sensor with circuits, the experiment of the whole system on the coal cutter is carried out. The results show that the vibration and temperature signals of the coal cutter can be monitored and transmitted wirelessly to the host computer in real time. It also proves that the energy harvesting model in the system can harvest vibration of the coal cutter and convert it into electrical power to drive the system. This research will provide a technical support for the self-powered and wireless development of sensor network nodes in the industrial internet of things.

Key words: vibration energy harvesting; self-powered; sensor monitoring; wireless transmitting; energy management

* 国家重点研发计划(2019YFB2004800)、国家自然科学基金(61727806, 61771434)、中北大学青年学术带头人支持计划(QX201804)和山西省自然科学基金青年面上(201801D221200)资助项目。20201130 收到初稿, 20210320 收到修改稿

0 前言

随着我国工业化和信息化的融合创新发展,工业物联网技术在能源、交通、电力等领域的应用越来越广泛。将工业生产、运作的各个环节通过感知、无线传输通信、智能终端分析等技术进行实时、自动化互联互通及监测,能够有效提高工业生产效率,降低工业生产成本,保障工业生产安全^[1]。工业设备的机械状态直接影响着工业生产效率和经济效益。目前,国内外较典型的机械状态监测方式主要有:① 离线定期监测方式;② 在线检测离线分析监测方式;③ 自动在线监测方式^[1]。离线定期监测只能是在某一特定时间对设备进行安全检测,没有时效性,同时设备检测会导致暂时的停产,造成经济损失;在线监测离线分析解决了离线定期检测耽误工时的弊端,但时效性仍未得到改善,极易因故障判断延时造成设备事故,存在安全隐患;自动在线监测方式解决了以上两种监测方式的弊端,是当下机械在线状态监测技术研究的热点。但由于监测系统体积大、功耗高、能源供给受限等核心问题难以解决,致使该方向研究进展缓慢。因此,如何开发出自供电、无线传输、低功耗的微纳传感监测系统,是目前工业机械装备在线状态监测中亟需解决的技术瓶颈。

近年来,微纳技术的飞速进步推动着各种电子和传感器件不断向“微体积”、“低功耗”方向发展。但电子传感器件的能源供给一直阻碍着分布式传感网络建设和发展。目前,电子及传感设备的能源供给大都依赖于传统的有线供电或化学电池^[2-3]。有线供电方式的能源供给稳定,但电缆布线复杂、繁琐,适用环境要求高。在一些极端复杂环境,如高振动、多尘的矿井下,铺设线缆不仅工程难度大,需要使用铠装防护,而且还存在被井下重型旋转机构缠绕的风险。电池供电避免了布线的繁琐,机动性更高。但电池供电寿命有限,更换或充电又费时费力。此外,化学电池引起的资源消耗、环境污染等问题也制约着其在新型技术产业的发展^[4]。因此,开发一种突破传统供电方式的能源采集器件,实现分布式传感网络节点的持续、有效自供电,将对工业物联网技术的发展和應用提供巨大推动作用。

将光(太阳能)、热、声和振动等环境能量收集并转化为电能的俘能方式由于具有清洁、可再生的优势,成为自供电技术的发展趋势^[5-7]。不同于光、热、声的能量分布环境局限,机械振动广泛存在于

工业生产中。特别是一些大型、重型机械装备,在运行过程中会产生持续的、强烈的振动机械能量,且不会受外界环境干扰^[8]。因此,采集环境机械能将其转换为电能,是解决传感网络节点供电一种便捷又行之有效的办法。目前,利用机械能的发电方式主要分为:压电式发电^[9-11]、电磁式发电^[12-14]、摩擦电式发电^[15-17]。这几种发电方式在实际使用中各有优劣,如何利用和改进这些方式,使机械能高效转换为符合电子器件供电需求的电能,是近年来微小型发电机的研究热点。

针对当前机械状态监测设备存在的体积大、功耗大以及能源供给等问题,本文提出了一种基于复合型振动能量采集器的自供电多源传感微系统。设计了压电-电磁-摩擦复合型振动能量采集器,通过能源管理电路实现了能量高效存储和系统的稳定供电。搭建了振动-温度微纳传感芯片及后端信号处理及无线传输电路,实现了对环境振动、温度信号的实时采集及无线传输。

1 系统整体结构

针对重型工业设备运行过程中的在线状态监测和故障预警需求,本文提出了一种集成复合型振动能量采集器的自供电无线传感微系统。该微系统整体结构如图 1 所示,主要由复合式能量采集模块和传感电路模块两大部分组成。其中,能量采集模块由压电单元、电磁单元以及摩擦电单元组成。传感电路模块集成了能源管理电路、MEMS 硅基振动-温度传感器芯片及其后续信号处理电路、无线数据传输电路。复合式能量采集模块是整个微系统的动力来源,内部集成了压电、电磁以及摩擦电式发电机。通过压电-电磁-摩擦复合式能量采集,最终可以实现能量采集器的高灵敏性、高输出性能。传感器及其信号处理电路依赖于复合式能量采集模块供能,收集环境振动、温度信号并完成无损无线传输。

图 1 复合型自供电传感微系统整体结构

2 复合能量采集模块

2.1 复合能量采集原理

微系统内部集成了三种发电单元: 电磁发电单元、压电发电单元以及摩擦电发电单元。

电磁发电(Electromagnetic generators, EMG)的基本设计理念来自于“电磁感应”。如图 2 所示, 通过利用机械能驱动闭合线圈相对于磁铁做切割磁感线运动, 使穿过闭合电路的磁通量发生变化, 电路内部就会产生感应电流^[18]。电磁式发电机的转化效率高, 输出电流大, 输出功率高, 是现阶段工业生产和生活中最常用的发电形式^[19]。然而, 传统的电磁发电机体积庞大、结构复杂, 无法满足工业物联网传感网络节点灵活、小型化的应用需求。并且电磁式发电机只能工作在低频环境条件下^[20]。对于频率高、幅度小的振动能, 由于难以产生磁通量变化, 无法产生电能输出。

图 2 电磁发电原理

压电式发电机的本质是压电材料的“正压电效应”。如图 3 所示, 压电材料固有的机-电耦合特性使其在受到物理形变后会产生内部极化, 在材料相对的表面产生相反电荷, 由此形成电势差并实现电压输出^[21]。相较于传统压电陶瓷, 近年来兴起的压电纳米材料具有更好的压电性能, 也推动了压电纳米发电机(Piezoelectric nanogenerators, PENG)的发展。2006 年, 王中林教授团队利用 ZnO 纳米线阵列制备了 PENG, 能够将环境中的机械能转换为电能^[22]。不过压电式发电机的输出功率密度有限, 且压电纳米材料制作过程复杂, 在实际应用中受到一定限制。

图 3 压电纳米发电原理

摩擦纳米发电机(Triboelectrical nanogenerator, TENG)是王中林教授团队于 2012 年提出的一种新型能量转换设备^[15]。TENG 利用了生活中最常见的摩擦起电原理。如图 4 所示, 不同电负性的材料相互接触时, 各自表面会产生得失电荷的现象, 使两种材料间形成电势差^[5]。凭借丰富的材料、简单的原理和多样性的结构, TENG 可以用来收集人体运动、海洋波浪、风能等各种机械能量。然而, TENG 的内阻较大, 导致其输出电压极高, 但输出电流极小, 难以直接用于一般电子设备的供电。

图 4 摩擦纳米发电原理

2.2 复合能量采集模块结构

由于电磁式、压电式、摩擦电式三种发电方式在输出特性和频率响应方面各有特点, 因此我们考虑将三种发电方式结合起来构建复合型能量采集器, 以满足不同实际应用需求。本文设计的复合式能量采集模块内部三种发电单元采用磁悬浮结构, 如图 5 所示。底部为圆柱形永磁铁, 材质为钕铁硼稀土强磁, 直径 30 mm, 厚度 5 mm。中间位置为电磁线圈。线圈采用 70 μm 的漆包铜线, 绕制匝数 4 000 匝。电磁线圈下表面的周边等间距地内嵌了直径 3 mm、厚度 1 mm 的小磁柱。磁柱的磁极和环形磁铁的磁极放置方向相反。根据磁场同极相斥、异极相吸的原理, 底部的永磁铁与小磁柱会产生相互排斥力。通过设计小磁柱在线圈下表面的位置, 可以使线圈在磁铁上方保持静止的悬浮状态。电磁线圈的上部设计了一个小凸起, 以增加对压电发电单元的激励。

在电磁单元中间, 固定了摩擦电单元。摩擦电单元选用高性能摩擦材料 Al(铝)和 PDMS(聚二甲基硅氧烷)。二者接触时, PDMS 会捕获 Al 上的电子而携带负电荷, Al 由于失去电子将携带正电荷。二者分离后就会形成电势差。在本系统中, 设计两个电极板直径均为 30 mm, 其中, PDMS 覆盖电极层 PET/ITO(聚对苯二甲酸乙二醇酯/氧化铟锡)导电薄膜作为负性电极板固定在圆柱形永磁铁上表面, Al 作为摩擦电单元正极板固定在线圈下表面。

图 5 复合能量采集模块结构及原理图

能量采集模块结构内部的上表面设计了一个直接 20 mm 的圆形凹槽。直径为 30 mm 的 PZT(铅钛酸铅压电陶瓷)压电片覆盖在圆形凹槽上并粘贴固定,作为压电单元。PZT 压电片以单晶硅片为基底,整体厚度为 900 μm 。

当能量采集模块收到外部振动激励时,中间悬浮的电磁线圈静止状态被打破,线圈相对于整个系统外壳进行上下运动。线圈运动过程中会切割永磁体的磁感线,使线圈中的磁通量发生变化。此时,根据电磁感应定律,线圈中产生了感应电动势。此为电磁模块发电状态。当线圈向下运动到底部,会带动摩擦电单元正极板触碰摩擦电单元负性电极板。由于接触起电效应,摩擦薄膜表面积累电子,正极板表面积累正电荷,负极板表面积累负电荷。随着线圈带动摩擦正极板运动,正负极板间的间隙发生改变,引起正负极板间电荷的转移,从而产生电流。当线圈向上运动到结构顶端,由于压电片四周固定,中间悬空,在线圈上方小凸起的作用下,压电片产生形变,进而在其上下表面产生相反电荷,形成电势差。

将能量采集器置于频率 8 Hz, 振幅 5 mm 的振动激励下进行电学性能测试,测试结果如下: EMG 的负载为 10 k Ω , 最大峰值输出功率达到 7.99 mW, 对应的最大功率密度为 6.97 W/m²。TENG 的最佳匹配阻抗为 10 M Ω , 最大瞬时峰值功率达到 1.95 μW , 相当于功率密度为 11.40 W/m³。在负载电阻为 10 k Ω 时, PENG 的最大瞬时峰值功率达到 183.05 mW, 瞬时最大功率密度为 79.93 W/m²。扫频测试中, 控制振幅值 5 mm 下的电输出参数表明, 三种能量采集器在 2~10 Hz 范围内, 输出性能随频率的增加而增加。

3 传感及电路模块

该微系统中传感及电路模块主要包括: 能源管理电路、多源集成传感芯片及后续信号处理电路和无线传输电路。

3.1 能源管理电路

在实际环境中采集到的机械振动能量相对微弱、无规律, 因此能量采集器采集到的能量不能直接为无线传感网络节点中的器件及功能模块提供充足、稳定的电量。必需要结合适当的电源管理及存储功能电路, 才能实现稳定的能量供给。因此, 能源管理模块的作用就是将能量采集器收集到的不稳定电量输入转化为稳定的电量输出, 供后续的系统数据采集、处理、发送等电路供电或是进行合理的存储, 以达到对系统能量进行最大限度的利用。针对电磁、压电和摩擦三种发电原理, 设计对应接口电路实现各自的阻抗匹配。本系统设计的能源管理电路工作示意图及电路图如图 6 所示, 主要包括交流/直流转换模块、电能存储模块、动态路径管理模块、输出功率控制模块及电池监测保护模块等。电池监测电路主要用于监测充放电过程中的电池端电

图 6 能源管理电路工作示意图及电路图

压和电流, 避免因过度充电和放电造成电池损坏。系统结合压电、电磁和摩擦电的发电特性, 将采集到的微小能量进行存储、升压-降压处理, 转化为稳定且可用的电能为电路供电。

能源采集电路如图 7 所示。其中, 全波桥式整流器为能量收集电路, C1、C2 为储能电容, S1、S2、S3、S4 为模拟开关。能量采集器输出的能量通过整流电路后对储能网络中的储能电容充电积累能量, 当能量积累到一定程度, 储能网络中的开关控制电路放电, 降压-升压(Buck-boost)型开关电源电路将储能网络释放出来的电能转化为稳定电压的直流输出。当收集的能量可用时, 该器件提供连续输出电流。采用一个简单的分流器将收集的能量给可再充电电池充电, 同时采用低电池电量断接功能保护电池以避免电池深度放电。当能量收集电源不再可用时, 电源管理电路通过动态路径管理模块自动转换为由电池供电。

图 7 能源采集电路原理图

3.2 传感信号处理及无线传输电路

工业装备运行过程中设备故障表现为振动和温度状态变化, 振动和温度信号中包含了系统、零部件由于冲击、磨损、疲劳、老化等因素引起的劣化和失效等重要信息, 对振动和温度信号的监测、分析和处理, 可以监测设备的运行状态, 识别机械设备的故障类型、故障来源。

本系统采用自主研发的多参量微纳传感芯片作为传感单元^[23]。该芯片集成了振动传感器和温度传感器, 其中振动传感器为压阻式的, 具有工艺简单、输入阻抗低、功耗低、可靠性高的优点。温度传感器采用 $100\ \Omega$ 的铂电阻, 利用金属铂在温度变化时自身电阻值也随之改变的特性来测量温度。该集成传感器芯片的振动量程为 $50\ g$, 振动灵敏度为 $49.89\ mV/g$; 温度灵敏度为 $1.04\ mV/^{\circ}C$ 。

该振动-温度集成传感器的信号处理及无线传输工作示意图如图 8 所示。主控芯片采用超低功耗的 MSP430 单片机, 控制整个电路的工作时序。传感器输出的信号首先经过信号调理电路转化为适合 A/D 芯片的信号, 然后经 A/D 转换为数字信号送入

数据缓存。主控芯片将缓存的数据传输给无线发射模块, 通过接收端无线接收模块接收后传输至上位机显示数据。无线传输采用 Zigbee 无线通信协议, 主芯片选择 TI 公司的 CC2530 芯片, 具有功耗低、及程度高、运行模式多等优点。

图 8 传感器信号处理及无线传输电路工作示意图

系统的功耗直接影响系统的工作可持续能力。为了降低系统功耗, 我们分析了各组成模块与系统总功耗的关系, 建立了系统的功耗模型。基于该模型, 实现了系统的动态功耗管理(Dynamic power management, DPM), 使振动-温度微纳传感器周期性采集环境信息。在 DPM 控制下, 系统循环进入活动模式和待机模式。活动模式消耗的电量为 $30\sim 40\ mA$, 待机模式下仅为 $10\ \mu A$ 左右。

系统低功耗工作逻辑流程如图 9 所示。首先, 微控制器初始化系统进入待机状态, 定时启动传感器模块, 之后系统进入低功耗模式 1, 然后系统进入数据转换模式并关闭传感器模块, 接着系统进入低功耗模式 2, 处理数据并依据电量情况和预警判断决定下一步的工作。如果电量充足, 数据超阈值, 选择启动低功耗模式 3, 立即发送数据报警并关闭系统, 之后进入下一次循环; 如果电量充足, 并无

图 9 系统低功耗工作逻辑图

报警情况, 进入待机状态, 进行数据处理循环; 如果电量不足, 直接关闭系统并进入待机模式, 等待纳米发电机提供充足电源。储能元件电压达到 3.3 V, 电路开始工作, 总功率为 132 mW, 传感器模块正常工作的功耗仅 3.63 mW, 能够满足正常工作的供电需求。

3.3 系统集成与封装

为了实现系统的微型化集成制造, 同时降低系统功耗和体积, 我们将传感信号处理模块、电源管理模块集成在一个 PCB 电路板上, 无线数据传输模块独立在另一块 PCB 电路板上, 从而使得高频信号与逻辑信号分离, 降低干扰。在电路板衔接组合后采用金属外壳将电路板进行封装, 组合内部填充环氧树脂、聚酰胺树脂材料灌封, 以起到敏感元件保护及抗振缓冲的作用, 各电路板之间以高精度接插件保证电学互连。

4 系统测试

4.1 能量采集模块振动测试

采用振动台搭建测试平台对能量采集模块及电源管理电路进行储能测试。测试结果如图 10 所示, 充电约 30 s 之后, 有一个相对稳定的电量输出, 输出持续时长约为 2 s。该输出呈周期性, 证明能量采集、电源管理电路实现正常工作。其中, 充电时间受能量采集器件及环境振动频率、幅度等因素影响变化, 放电时间随充电电容、负载电流大小变化。

图 10 能量采集存储测试

4.2 微系统工作流程

整个微系统的工作流程如图 11 所示。当系统受到外界振动激励时, 能量采集器开始工作并将获得的能量存储到储能元件中。当储能元件中电量达到阈值, 开始为传感电路系统供电。之后, 传感器及后端电路开始采集数据并按照既定时序发送数据。数据发送采用间断发送模式, 每发送 50 组数据休眠 30 s, 以降低系统功耗。

图 11 微系统工作流程图

4.3 微系统整体功能测试

为了验证基于复合能量采集器的自供电传感微系统在工业装备监测中的适用性, 我们将该微系统安装于煤矿开采中使用的重型采煤机械上, 以监测采煤机的工况, 该自供电无线传感微系统主要适用于低频振动的煤矿机械设备。采煤机在生产过程中, 工作环境恶劣, 易受到来自煤、岩的巨大冲击和煤尘污染, 使机械构件磨损疲劳, 出现机械故障。煤机装备的故障容易产生严重的安全事故并造成巨大经济损失。因此, 对煤机装备工况进行实时在线跟踪和监测, 对提高装备可靠性、经济性以及利用率具有重要意义。

微系统在采煤机上的功能测试试验如图 12 所

图 12 微系统功能测试

示。采煤机工作中产生的强振为微系统提供能量来源。从图 12 中可以看到, 在采煤机工作中, 微系统中振动-温度传感芯片能够实时采集采煤机振动和温度信号并通过无线发送至上位机, 进行实时显示。振动和温度信号是反映煤机设备是否正常运行的关键参数。一旦采煤机振动、温度信号出现异常, 通过远程上位机就可以直观、及时检测。该测试表明, 微系统中的能量采集模块能够采集到煤机工作时的振动信号并将其转换为电能供给传感电路模块, 使系统实时采集煤机振动、温度信号并无线传输到上位机。

5 结论

本文针对当前工业装备工况监测对实时、无线、自供电的需求, 提出了一种基于压电-电磁-摩擦复合型能量采集器的自供电无线多源传感微系统。该微系统内部集成了压电-电磁-摩擦复合型能量采集模块和振动-温度传感信号采集模块。能量采集模块通过能源管理电路为系统提供稳定电源, 振动-温度多源传感芯片通过信号处理及无线传输电路实现了对环境振动、温度信号的实时采集与无线传输, 并在采煤机工况监测测试中得到了验证。该微系统体积小、功耗小, 并且能量供给和数据传输均不需要线缆辅助, 因此可以大量排布形成自供电传感网络节点, 为工业生产系统的各个节点集中管理和监测提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] 马作贞. 螺杆压缩机在线状态监测与控制系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
MA Zuozhen. Research on on-line condition monitoring and control system of screw compressor[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [2] 汤宝平, 黄庆卿, 邓蕾, 等. 机械设备状态监测无线传感器网络研究进展[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(1): 1-7.
TANG Baoping, HUANG Qingqing, DENG Lei, et al. Research progress and challenges of wireless sensor networks for machinery equipment condition monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(1): 1-7.
- [3] 陈定方, 孙科, 李立杰, 等. 微型压电能量收集器的研究现状和发展趋势[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(4): 1-8.
CHEN Dingfang, SUN Ke, LI Lijie, et al. Research status and development trend of miniature piezoelectric energy harvesting devices[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(4): 1-8.
- [4] 陈延辉, 谢伟博, 代克杰, 等. 非谐振式低频电磁-摩擦电复合振动能收集器[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 316-325.
CHEN Yanhui, XIE Weibo, DAI Kejie, et al. Non-resonant and low-frequency triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator for vibration energy[J]. Acta Physics Science, 2020, 69(20): 316-325.
- [5] 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): 9533-9557.
- [6] SULTANA A, ALAM M M, MIDDYA T R, et al. A pyroelectric generator as a self-powered temperature sensor for sustainable thermal energy harvesting from waste heat and human body heat[J]. Applied Energy, 2018, 221(1): 299-307.
- [7] LEE S, BAE S H, LIN L, et al. Super-flexible nanogenerator for energy harvesting from gentle wind and as an active deformation sensor[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(19): 2445-2449.
- [8] 钟一鸣. 电磁-摩擦复合纳米发电机的流体能量收集及应用研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
ZHONG Yiming. Fluid energy harvesting and application of electromagnetic-triboelectric hybrid nanogenerator[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [9] HALIM M A, PARK J Y. Modeling and experiment of a handy motion driven, frequency up-converting electromagnetic energy harvester using transverse impact by spherical ball[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 229: 50-58.
- [10] YU R M, PAN C F, CHEN J, et al. Enhanced performance of a ZnO nanowire-based self-powered glucose sensor by piezotronic effect[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(47): 5868-5874.
- [11] WU W Z. High-performance piezoelectric nanogenerators for self-powered nanosystems: Quantitative standards and figures of merit[J]. Nanotechnology, 2016, 27(11): 112503.
- [12] HUANG L B, XU W, BAI G X, et al. Wind energy and blue energy harvesting based on magnetic-assisted noncontact triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy,

- 2016, 30: 36-42.
- [13] JEONG C K, BAEK C, KINGON A I, et al. Lead-free perovskite nanowire-employed piezopolymer for highly efficient flexible nanocomposite energy harvester[J]. *Small*, 2018, 14(19): 1704022.
- [14] BAI X L, WEN Y M, YANG J, et al. A magnetoelectric energy harvester with the magnetic coupling to enhance the output performance[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7): 1131.
- [15] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [16] JANG S, KIM H, KIM Y, et al. Honeycomb-like nanofiber based triboelectric nanogenerator using self-assembled electrospun poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) nanofibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 143901.
- [17] ZHANG L, ZHANG B B, CHEN J, et al. Lawn structured triboelectric nanogenerators for scavenging sweeping wind energy on rooftops[J]. *Advanced Materials*, 2015, 28(8): 1650-1656.
- [18] ZHAO J Q, ZHEN G W, LIU G X, et al. Remarkable merits of triboelectric nanogenerator than electromagnetic generator for harvesting small-amplitude mechanical energy[J]. *Nano Energy*, 2019, 61: 111-118.
- [19] DE QUEIROZ A C M. Electrostatic generators for vibrational energy harvesting[C/CD]// *Circuits & Systems. IEEE*, 2013.
- [20] TRUNG N H, TOAN N V, ONO T. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 467-476.
- [21] FANG H B, LIU J Q, XU Z Y, et al. Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting[J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(11): 1280-1284.
- [22] WANG Z L, SONG J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. *Science*, 2006, 312(5771): 242-246.
- [23] 宋金龙, 何常德, 王任鑫, 等. 多参量微纳集成传感器[J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(2): 119-125.
- SONG Jinlong, HE Changde, WANG Renxin, et al. Multi-parameter micro/nano integrated sensor[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2019, 56(2): 119-125.

作者简介: 薛晨阳, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为新型微米纳米器件(MEMS/NEMS)、微纳测试技术、固体光谱学与微光学气体传感器。

E-mail: xuechenyang@nuc.edu.cn