DOI: 10.3901/JME.2020.13.001

微纳振动能量收集器研究现状与展望*

亓有超^{1,2} 赵俊青^{1,2} 张弛^{1,2}

(1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所 北京 100083;

2. 中国科学院大学纳米科学与技术学院 北京 100049)

摘要: 振动能量广泛分布在我们周围的环境中, 比如人体运动、机器振动、微风吹动、水纹波动、声音振动等, 收集环境中的振动能量对未来电子器件的自驱动化具有十分重要的意义。阐述了电磁、压电、摩擦电三种微纳振动能量收集器的工作原理和最新研究进展。对三种微纳振动能量收集器的特点和面临的挑战做出了归纳与概括。最后, 对微纳振动能量收集器的发展趋势做出了展望。

关键词: 振动能量收集; 微纳能源技术; 电磁; 压电; 摩擦电

中图分类号: TH703; TM619

Review and Prospect of Micro-nano Vibration Energy Harvesters

QI Youchao^{1,2} ZHAO Junqing^{1,2} ZHANG Chi^{1,2}

(1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083;

2. School of Nanoscience and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Harvesting vibration energy, which is widely distributed in the ambient environment, such as human motions, machine vibration, breeze blowing, water ripple and sound vibration, is of great significance for self-powering of electronics. The working mechanisms and current research progress of micro-nano vibration energy harvesters based on electromagnetic, piezoelectric, triboelectric are elaborated. The characteristics and existing challenges are summarized. The development prospect of the micro-nano vibration energy harvesters is finally expected.

Key words: vibration energy harvesting; micro-nano energy technology; electromagnetic; piezoelectric; triboelectric

0 前言

物联网是将互联网以及各种信息传感设备结合的一个巨大网络, 是信息化时代的核心。物联网的发展需要智能感知、识别及通讯等技术的支撑, 而感知的关键是传感器等相关技术^[1-3]。近年来, 随着物联网需求的增加, 目前国内传感器呈现一种高速增长的态势。据统计, 预计到2021年将增至5937亿元, 未来五年中国传感器产业年均复合增长率约30%, 远高于全球平均水平。然而这些传感器大都需要不间断的工作。因此, 能量供应成为这些传感器长期正常工作的主要问题。由于传统电池供电存在供能寿命有限、封装工艺复杂、易漏液、毒性污染严重、尺寸固定、成本高等缺点^[4-6], 国内外研究人员一直致力于研究如何将环境中的能量收集起来, 以便于实现电子设备的自供电。微米纳米技术

以及材料与机械工程的迅速发展, 使得收集环境中的振动能量成为可能^[7], 工业机器的振动, 交通工具的振动, 和其他环境中的微小振动等都含有我们可以利用的能量, 其回收利用已经成为广泛关注的研究热点。表1列出了不同振动源的振动频率以及振动加速度^[8]。

表1 不同振动源的振动频率及振动加速度

振动源	振动频率/Hz	振动加速度/g
洗衣机	39	0.030
手提电脑	90	0.010
吸尘器	100	0.158
电风扇	100	0.610
汽车仪表盘	10	0.020
空调	33	0.100
热水器	100	0.006
冰箱	100	0.002
磨床	49	0.358
摩托车	17	0.031
人跑步	10	0.500
铁路	5~20	0.150

* 国家自然科学基金资助项目(51922023)。20190725 收到初稿, 20190928 收到修改稿

收集环境中的振动能量为传感器及电子设备供电具有非常广阔的应用前景。然而,环境中振动源的振动频率大小不同且振动幅度通常较小,这就要求振动能量收集器在较低振幅下具有宽频特性。目前振动能量收集器主要有:电磁振动能量收集器、压电振动能量收集器、静电振动能量收集器、摩擦电振动能量收集器这四种收集器^[8-13]。1998年,美国麻省理工学院 AMIRTHARAJAH^[14]团队基于法拉第电磁感应定律设计出了动线圈式电磁振动能量收集器并给出了相应的几何模型。但是,这种电磁振动能量收集器的收集效率较低,设计不完善。经过几年的发展,国内外很多科学家又设计出动铁式以及谐振式电磁振动能量收集器^[15],结构已较为完善。压电振动能量收集器的基本原理是压电效应。1998年 KYMISSIS 等^[16]基于此原理设计出了压电振动能量收集器。虽然该收集器对振动能量的收集效率低,但其具有制造方便、易于集成等优点,引起了国内外很多科学学者的关注。静电振动能量收集器采用可变电容结构,通过两块板之间的相对运动产生电荷。然而,静电振动能量收集器的工作一般需要外部电压源,并且振动能量收集效率低、制作精度要求高,这些缺点限制了静电振动能量收集器的应用。摩擦电振动能量收集器是由一个或几个摩擦纳米发电机^[17]集成的。2012年王中林团队首次提出摩擦纳米发电机的概念,它是基于摩擦起电与静电感应耦合效应的一种新时代发电机^[18]。相较于静电振动能量收集器,摩擦电振动能量收集器通过摩擦起电就可以产生高电压,再通过相对运动产生电输出,有效解决了静电振动能量收集器需要外部电压源的问题。所以,本文只讨论电磁、压电、摩擦电振动能量收集器。

本文将围绕振动能量收集器,首先介绍电磁振动能量收集器、压电振动能量收集器以及摩擦电振动能量收集器的机理与特性;其次分别介绍它们作为振动能量收集器的不同设计结构、输出特性以及在无线传感等领域的研究进展;最后对三种振动能量收集器的优缺点进行对比,并分析与讨论目前面临的挑战,展望其未来的研究趋势。

1 电磁振动能量收集器

1.1 电磁振动能量收集器的机理与特性

电磁振动能量收集器是由一个或者几个电磁发电机集成的。电磁发电机的基本工作原理是法拉第电磁感应定律^[19]。法拉第电磁感应定律是物理学中的重要理论,是电磁领域的重大发现,是指因磁通

量的变化产生感应电动势。由电磁感应定律,线圈中产生的感应电动势可以由式(1)表示

$$E_{coil} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -n \frac{\partial \phi}{\partial t} = -n \frac{d(B \cdot S)}{dt} \quad (1)$$

式中, n 指线圈匝数; Ψ 指总磁通量; ϕ 指一匝线圈的磁通量; B 指磁感应强度矢量; S 指线圈面积矢量。

感应电动势的产生来源可以分为两种:动生电动势以及感生电动势。动生电动势是导体在磁场中以垂直于磁感线的方向运动,在同时垂直于运动方向和磁场的两端产生的电动势^[20],通过此原理可以制造发电机设备。感生电动势是由于线圈所处环境磁场发生变化而产生电动势,通过此原理可以制造变压器设备。动生电动势可以表示如下

$$E = BLV \quad (2)$$

式中, B 指磁感应强度矢量; V 指导体在磁场中的运动速度; L 指导体的长度。

通过对式(1)与式(2)的分析,可以得出电磁振动能量收集器对外输出感应电压,感应电压是电磁感应过程中磁场变化的结果。并且输出的感应电压依赖于磁感应强度以及线圈缠绕的匝数。

1.2 电磁振动能量收集器研究进展

目前,电磁振动能量收集器主要分为三大类,即动线圈式、动铁式以及谐振式。

1998年,麻省理工学院 AMIRTHARAJAH 课题组利用自制的微型电磁振动能量收集器对自供电信号进行研究,并给出了相应的几何模型^[14],如图 1a 所示。这种振动能量收集器的特点是磁铁不动,线圈相对于磁铁运动。它可以在 94 Hz 的激励下产生 400 μ W 的峰值功率。但是它的使用需要借助变压器,并且输出效率较低。2018年, HOU 团队利用此几何模型设计出用于收集桥梁振动能量的电磁振动能量收集器^[21],如图 1b 所示。该收集器可以在低于 10 Hz 的振动频率下产生 176.5 mW/cm³ 的峰值功率密度。但是需要进一步优化质量和几何尺寸、永磁体的成本以及能量收集效率等。

电磁振动能量收集器在收集由列车引起的轨道偏转产生的振动能量中有很大的应用前景。但用于铁路的告警信号器、无线通信器、轨道开关、轨道健康监测系统等都需要较大的功率。LIN 设计的机械运动整流式电磁振动能量收集器较好地解决了此问题,如图 1c 所示^[22]。该收集器在 1 Hz 的振动频率下,可以产生 28 W 的峰值功率。基于动线圈式的电磁振动能量收集器,在医学研究领域也有很重要的应用。2019年由 THOLL 设计的基于心内径流的的心脏起搏电磁振动能量收集器可以较好地解决目前心脏起搏器供电问题。图 1d 所示是它的整体结构

图以及部分结构剖面图^[23]。通过采用双稳态机制, 可将心脏的低收缩频率(1~3 Hz)转换为更高频率的振动(260 Hz)。该收集器重 6.4 g, 体积为 2 cm³, 在 1 m/s 峰值流速的台架试验中, 在 60 bpm(1 Hz)

激励下可以产生(14.39±8.38 μW)的平均功率, 在 200 bpm(3.33 Hz)激励下产生高达(82.64±17.14 μW)的平均功率。其在无电池和无引线心脏起搏器中具有重要的应用前景。

图 1 基于动线圈式的电磁振动能量收集器

2001 年, 英国谢菲尔德大学的 WILLIAM 研究小组为动铁式电磁振动能量收集器建立了一个通用的几何模型^[24], 如图 2a 所示。该模型的特点是, 线圈不运动, 磁铁相对于线圈运动。该收集器可以在 4 MHz 的激励下产生 0.3 pW 的功率。基于此几何模型, ZHANG 等于 2019 年设计出滚动磁铁高效电磁

振动能量收集器^[25], 如图 2b 所示。采用滚动磁铁的方式切割磁通量, 与使用滑动磁铁相比, 可以显著提高切割线圈时的磁通量。并且引入摩擦效应以提高能量收集性能, 输出平均功率进一步增加了 50%。在以 3.1 Hz 的频率进行手抖动的试验中, 该收集器可以产生 1.02 mW 的平均功率。在正常骑车

图 2 基于动铁式的电磁振动能量收集器

速度下, 可以获得 0.22 mW 的平均功率, 远大于垂直切割收集器(仅能产生 0.05 mW 功率)。这表明了滚动磁铁高效电磁振动能量收集器在集成自供电可穿戴传感器的潜在应用。

如何有效收集低频下的振动能量, 是目前电磁振动能量收集器所面临的问题。FAN 等设计出的基于扭转振动的电磁振动能量收集器可以较好地收集低频下的振动能量^[26], 如图 2c 所示。此收集器是基于拉弦转子实现振动能量的收集, 拉弦转子的使用, 使得轴或轴承结构成为旋转能量收集器中可有可无的组件, 使得它的设计具有更简单的结构和更低的能量损失。该收集器可以在 1.5~2.5 Hz 的频率下产生 0.1~0.15 V 的电压以及 0.08~0.125 mW 的功率。基于扭转振动的电磁振动能量收集器还可以扩展到具有类似转子结构的压电和摩擦电振动能量收集器中。CHAE 等^[27]提出了一种电磁振动能量收集器, 如图 2d 所示。此收集器采用铁磁流体润滑, 可在 12 Hz 以及 3 g 振动时产生的最大开路电压为 0.47 V, 比没有润滑剂的装置高 8%。

除此之外, 采用铁磁流体润滑, 可在负载电阻为 40.8 Ω 时, 产生 71.26 μ W 的峰值功率。为了从振动源中提取最大的能量, ARUN 等^[28]设计出多磁铁振动能量收集器, 如图 2e 所示。该电磁振动能量收集器的输出取决于磁体相对于线圈的相对位移、磁体的磁通量密度以及振动周期的频率。在收集器的固有频率下可获得最大幅度, 通过保持磁铁相对于线圈的适当相对位置可增强装置的总输出。此收集器可以在最大相对位置处及 14 Hz 的振动频率下产生 11.44 mW 的功率。

美国密歇根州立大学 HALUK KULAH 研究小组于 2004 年提出了谐振式电磁振动能量收集器的几何模型^[29-30], 如图 3a 所示。这种结构的特点在于两者之间的相对运动。它实现了高频率转换和高能量转换效率。他们设计的收集器可以在 2 kHz 激励下产生 2.5 μ W 的峰值功率。基于此几何模型, 一种非接触式高功率密度能量收集器于 2018 年由 CHEN 等提出^[31], 如图 3b 所示。该收集器可以将 5 Hz 输入频率转换为 30 Hz 的频率输出, 在 500 Ω 的

图 3 基于谐振式的电磁振动能量收集器

负载电阻下, 可以产生 183 mW 的最大输出功率。2019 年 CHEN 等设计出双电磁振动能量收集器, 如图 3c 所示^[32]。两个转子能够同时工作并分别产生 3.0 V 的最大电压, 这与传统的电磁能量收集器不同。电路整流后, 与之前的设计相比, 该收集器可以提供 3.1 mW 的稳定直流功率, 带宽增加 50% (3.0~9.5 Hz), 可以容易地收集低频振动产生的能

量, 例如波浪能和风能等。

由上述内容可知, 电磁振动能量收集器大多是收集中高频率的振动能量, 其不需外加电压源就可以工作, 并且输出电流大, 但也有输出电压较低、制造体积较大等缺点。为了对试验结果有直观地对比, 现通过表 2 汇总上述电磁振动能量收集器的试验结果。

表 2 部分基于电磁振动能量收集的试验结果

研究进展	结构形式	谐振频率/ Hz	加速度/ g	负载电阻/ Ω	输出电压/ V	峰值输出功率/ μW	平均输出功率/ μW	功率密度/ (mW/cm^3)
文献[14]	动线圈式	94	—	10	0.18	—	400	—
文献[21]	动线圈式	—	3.71	—	194	35.3×10^6	—	176.5
文献[22]	机械运动整 流式	—	—	2	8	—	28×10^6	—
文献[23]	动线圈式	260	—	250	1	—	99.78	49.89
文献[24]	动铁式	—	—	39	—	0.3	—	—
文献[27]	动铁式	—	3	40.8	0.47	71.26	—	—
文献[28]	动铁式	—	—	—	7.64	11 440	—	—
文献[25]	动铁式	—	—	1 100	—	—	1 020	—
文献[26]	动铁式	—	—	—	0.1~0.15	125	—	—
文献[29-30]	谐振式	—	—	—	—	2.5	—	—
文献[31]	谐振式	—	—	500	—	183 000	—	—
文献[32]	谐振式	—	0.5	3 000	16	3 100	—	—

注: “—”表示文献未提及

2 压电振动能量收集器

2.1 压电振动能量收集器的机理与特性

压电振动能量收集器是由一个或者多个压电发电机集成的。压电发电机的基本原理是压电效应^[33]。压电效应分为正压电效应以及逆压电效应。正压电效应是指某些电介质受到沿一定方向上外力的作用而发生变形时, 其内部就会产生极化的现象, 同时在它的两个相对表面上分别产生正电荷以及负电荷。当外界力去除后, 它又会恢复到原来不带电的状态。逆压电效应是指当外界力的作用方向改变时, 电荷的极性也随之改变。相反, 当在电介质的极化方向上施加电场, 这些电介质也会发生变形, 电场去掉后, 电介质的变形随之消失^[34]。

采用合适的压电材料有利于收集振动能量。目前最常见的压电材料是压电陶瓷, 因为其具有较大的机电耦合系数以及较高的收集效率而被广泛使用。但是, 压电陶瓷容易破裂, 不能承受外界较大的应变^[35]。除此之外, 聚偏氟乙烯也是一种常用的压电材料。它虽然没有大的机电耦合系数, 但是它具有较好的柔韧性、耐老化性, 因此, 常用于收集人体的运动能等^[36-37]。

根据压电材料所受应力方向以及极化方向, 压

电振动能量收集器可以分为三种工作模式: d_{31} 模式、 d_{33} 模式以及 d_{15} 模式^[34]。在理论上 d_{15} 模式的收集效率是最高的, 但实际应用中很难有效地利用剪切方向的载荷。 d_{31} 模式是指施力方向与极化方向相垂直, d_{33} 模式是指施力方向与极化方向相同, 如图 4 所示^[38]。压电材料在各个方向上表现出不同的性能, 从而可以将压电振动能量收集器分为不同的结构: 基于 d_{31} 模式的悬臂梁结构以及基于 d_{33} 模式的击打结构^[39]。悬臂梁结构在外界较小的力作用下就可以产生较大的变形, 从而提高收集效率。与悬臂梁结构不同的是, 击打式结构主要是在大作用力下进行能量的收集。

图 4 压电材料的工作模式

2.2 压电振动能量收集器研究进展

利用压电材料的特性, KYMISSIS 等于 1998 年设计出第一个为电子模块供电的压电振动能量收集器^[16], 如图 5a 所示。虽然这种收集器可以为电子模块供电, 但是, 也存在较多的问题: 压电

收集器能否承受长期磨损、单个收集器能否满足要求等。有效地收集低频振动能量,不仅是电磁振动能量收集器需要解决的问题,压电振动能量收集器也需要解决这一问题。因此,一种基于普通装订夹结构的简单压电弹簧收集器被设计^[40],如图 5b 所示。该收集器的特点是具有摆动弹簧结构,不仅可以有效地收集超低频振动能量,而且可以有效地收集多方向振动能量。在负载为 $54.16\text{ k}\Omega$ 以及外界激励为 0.26 g 时,可以产生 13.29 mW

的峰值功率。

超声波驱动的无线电技术最近引起了极大的关注。然而,大多数的超声波能量收集器体积大,不能应用于一般的复杂表面。2019 年 JIANG 等^[41]设计的柔性压电超声振动能量收集器,如图 5c 所示,可以较好地收集超声振动能量。柔性压电超声振动能量收集器可由超声波驱动,在平面和曲面上产生连续的电压和电流输出,输出电压可达 2 V ,输出电流可达 $4\text{ }\mu\text{A}$ 。

图 5 基于不同压电材料的振动能量收集器

除了利用不同压电材料的压电特性设计振动能量收集器外,还可以通过改变压电材料的结构,设计振动能量收集器。ZHANG 等^[42]设计出基于冲击和绳索驱动的悬臂梁式压电振动能量收集器,如图 6a 所示。该收集器中间有固定空间 L ,两个悬臂梁采用有一定余量的绳索在端部连接,通过改变绳索的长度可以调节工作频率,从而实现宽带振动能量收集。利用此振动能量收集器可以将振动频率从 74.75 Hz 轻松地改变到 106 Hz ,是传统振动能量收集器振动频率的 4.2 倍。这项研究的结果将有益于宽带振动能量收集器的未来发展,特别是在可变和复杂的低频环境中的应用。ZHAO 等^[43]也提出了一种宽带振动能量收集器,如图 6b 所示,该收集器通过机械止动器同时从基础振动和风流中获取能量。传统风能收集器的一个问题是它只能在共振频率附近有效地收集来自两种类型激励的能量。由于机械止动器的引入,准周期性振动被转换为周期性振动,这迫使两个激励频率彼此锁定,因此实现了宽带振动

能量的收集。在振动频率为 19.1 Hz 以及振动台加速度为 0.5 g 时,收集器可以产生 3.8 mW 的平均功率。该振动能量收集器为宽带振动能量收集提供了又一可行的解决方案。FU 等^[44]设计出一种基于 PVDF 柔性纳米复合材料的高度耐用压电振动能量收集器,如图 6c 所示,具有较好的输出性能,输出功率密度可以达到 $27.4\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^3$

MAURYA 等^[45]设计出一种基于轮胎振动的压电振动能量收集器,如图 6d 所示。振动能量收集器可以通过轮胎的振动以及变形来收集振动能量,并为压力传感器提供能量。在负载为 $2\text{ M}\Omega$ 时,可以产生 $150\text{ }\mu\text{W}$ 的峰值功率。压电振动能量收集器收集环境振动能量可以为无线传感器及小型电子设备供电。有相当一部分压电振动能量收集器都是由单个金属层作为基板以及粘合在其上的压电材料构成的,由前面所述内容也可以看出。大部分压电悬臂梁式收集器的谐振频率较高,输出功率较低。研究人员将一种新颖的夹层结构用作收集器的基板,基

板结构包括夹在金属层之间的软芯材料^[46], 如图 6e 所示。这种收集器可以有效地解决输出功率较低的

问题, 在负载为 $150\text{ k}\Omega$ 以及振动频率为 30 Hz 时, 可以产生 $426.6\text{ }\mu\text{W}$ 的峰值功率。

图 6 基于压电悬臂梁结构的振动能量收集器

总之, 压电振动能量收集器的结构经过近几年的发展已经有了很大的创新, 具有了很多的结构, 比如悬臂梁结构、柔性复合材料结构、夹芯压电结构、摆动弹簧式结构等, 对压电振动能量收集器的发展作出贡献。在以上结构中, 科研人员广泛关注的是悬臂梁结构, 在应用方面也取得

较大的进展。压电振动能量收集器不需要外加电压源就可以工作, 并且输出电压较高、制作较方便、具有高电容。表 3 表明, 压电振动能量收集器收集的振动能量频率一般较高, 不适合低频振动能量收集。但输出的功率较高, 可以为小型电子器件充电。

表 3 部分基于压电振动能量收集的试验结果

研究进展	结构形式	谐振频率/ Hz	加速度/ g	负载电阻/ Ω	输出电压/ V	峰值输出功率/ μW	平均输出功率/ μW	功率密度/ (mW/cm^3)
文献[16]	基于压电材料	—	—	2.5×10^5	150	8×10^4	—	—
文献[42]	悬臂梁式	74.75	0.6	2×10^5	7	45	—	—
文献[41]	柔性压电	—	—	—	2	—	—	4.1
文献[45]	悬臂梁式	—	—	2×10^6	88	150	—	—
文献[40]	摆动弹簧式	—	0.26	5.41×10^4	10	13 290	—	—
文献[46]	夹芯压电	30	0.1	1.5×10^5	20	426.6	—	—
文献[43]	宽带式	17.6	0.5	2.75×10^5	50	—	5 000	—
文献[44]	基于柔性复合材料	13	10	2.2×10^7	25	4.1	—	27.4

注: “—”表示文献未提及。

3 摩擦电振动能量收集器

3.1 摩擦电振动能量收集器的机理与特性

摩擦电振动能量收集器是由一个或几个摩擦纳米发电机集成的。摩擦纳米发电机是利用两种材料表面的相互摩擦或接触来产生电能的输出^[8]。因此, 分

析材料表面的接触电荷转移机制, 将有助于理解摩擦电的产生机理, 如图 7a 所示^[47]。物质是由原子组成的, 当两种材料相互接触时, 原子与原子中的电子云相互重叠, 使得原本势阱不同的原子在电子云交互重叠时, 形成的势阱中间的势垒降低, 电子可以自由转移, 达到新的平衡态。在外力作用下, 两种材料分离, 在材料表面的电子中形成新的势垒, 使得材料表面带

有电荷。从而解释了为什么即使不靠摩擦,只需要相互接触就可以起电的机理。电磁发电机是自由电子通过洛伦兹力的驱动在导体内流动产生电流,而压电发电机以及摩擦纳米发电机的理论源头都来自于麦克斯韦位移电流的第二项^[48],详见式(3)。

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3)$$

式中, J_D 指位移电流; D 指位移场; E 指电场; P 指极化场密度; ε_0 指真空介电常数。

图 7b 以接触分离式中的四层摩擦纳米发电机为例^[49], 对摩擦纳米发电机的基本原理做出了解释, 其中两种电介质的介电常数分别为 ε_1 和 ε_2 , 厚度分别为 d_1 和 d_2 。当两种电介质物理接触后, 会通过接触带电效应, 静电电荷会被转移到两种材料的表面。两种电介质之间的接触次数的增加会导致表面电荷密度 $\sigma_c(t)$ 的增加, 最终会达到饱和态。材料中的电子在摩擦电荷建立的静电场驱动下流经外部负载, 导致电极中的自由电子累积 $\sigma_1(z, t)$, 这是两个电介质间距 $z(t)$ 的函数。通过这种方式的不断循环, 从而将机械能转换为电能。电介质 1 与 2 中的电场分别为 $Ez = \sigma_1(z, t)/\varepsilon_1$ 和 $Ez = \sigma_2(z, t)/\varepsilon_2$, 在间隙中, $Ez = (\sigma_1(z, t) - \sigma_c)/\varepsilon_0$ 。由此得出两个电极之间的相对电压差为

$$V = \sigma_1(z, t) \left[d_1 / \varepsilon_1 + d_2 / \varepsilon_2 \right] + z \left[\sigma_1(z, t) - \sigma_c \right] / \varepsilon_0 \quad (4)$$

当 $V=0$ 时

$$\sigma_1(z, t) = \frac{z \sigma_c}{d_1 \varepsilon_0 / \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_0 / \varepsilon_2 + z} \quad (5)$$

由此可以得出材料内部的位移电流密度是

$$J_D = \frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\sigma_1(z, t)}{\partial t} = \sigma_c \frac{dz}{dt} \frac{d_1 \varepsilon_0 / \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_0 / \varepsilon_2}{[d_1 \varepsilon_0 / \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_0 / \varepsilon_2 + z]^2} + \frac{d\sigma_c}{dt} \frac{z}{d_1 \varepsilon_0 / \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_0 / \varepsilon_2 + z} \quad (6)$$

其中, 第一项表示电介质表面的电荷密度与位移电流密度和两个电介质被接触或分离的速度成比例^[48], 第二项表示表面电荷密度变化的速率和位移电流密度有关。因此, 设计不同结构形式的摩擦纳米发电机可以收集不同振动频率下的振动能量。一般来说, 摩擦纳米发电机具有四种基本工作结构: 独立层式结构、垂直接触-分离式结构、水平滑动式结构以及单电极式结构^[50], 如图 7c 所示。

图 7 摩擦纳米发电机发电机理以及结构图

前面所提到的电磁振动能量收集器早已出现, 然而摩擦电振动能量收集器是最新的一种振动能量收集器, 它的出现引起了许多科研工作者的关注。分析电磁振动能量收集器以及摩擦电振动能量收集器的收集机理及特性, 可以得出两者在输出特性以及频率与幅度响应上的关系。电磁振动能量收集器与摩擦电振动能量收集器的输出特性具有对称互补性^[51]。电磁振动能量收集器的开路电压较小, 短路电流较大, 其相当于一个内阻很小的电压源; 摩擦电振动能量收集器的开路电压较大、短路电流较小,

其相当于一个内阻很大的电流源; 此外, 两种收集器的频率与幅度响应也具有对称互补性^[52], 电磁振动能量收集器适合在高频、大振幅下工作, 可以输出较大的电能; 而摩擦电振动能量收集器在低频、小振幅下更有优势。

3.2 摩擦电振动能量收集器研究进展

在收集振动能量方面, 垂直接触-分离模式以及独立层模式的摩擦纳米发电机相较于滑动式及单电极式摩擦纳米发电机有其结构上的优势。因此, 本部分主要讲述垂直接触-分离式摩擦纳米发

电机以及独立层式摩擦纳米发电机在收集振动能量方面的研究进展。图 8a 展示了一种基于弹簧辅助多层结构的球形摩擦纳米发电机^[53], 可以很好地收集水波能。球形摩擦纳米发电机的基本结构为垂直接触-分离结构。试验中通过改变振动的频率、振幅以及改变弹簧结构中的质量块来探究发电机的发电性能。在负载电阻 $4.7 \text{ M}\Omega$ 以及振动频率为 1 Hz 时, 所产生的输出电压为 560 V , 输出峰值功率为 7.96 mW , 相应的功率密度为 15.2 W/m^3 , 这都表明了发电机在收集水波能中具有重要的应用前景。

振动能量收集器收集频率范围较窄的问题, 不仅是电磁振动能量收集器及压电振动能量收集器面临的问题, 也是摩擦电振动能量收集器面临的问题。WANG 团队发明的弹性摩擦纳米发电机^[54]可以在宽带频率范围内有效地收集环境振动能量, 如图 8b 所示。它有效地集成多个振动单元, 空间利用率较高, 可在低至 7 Hz 的频率以及外部负载为 $0.8 \text{ M}\Omega$ 时, 输出 19 mW 的峰值功率、 102 W/m^3 的峰值功率密度以及 480 V 的电压。用它收集来自机器或自行车的振动能量可以持续地为小型电子设备如温度计、湿度计和加速度计等供电。这种发电机在环境监测、机器安全和运输的自供电系统中也具有潜在的应用。DIVIJ 设计出具有级联冲击结构的摩擦电纳米发电机^[55], 如图 8c 所示。该摩擦纳米发电机可以将低频振动转换成高频振动, 实现了频率的连续

性, 可以将低频振动能量转换为 $0 \sim 40 \text{ Hz}$ 的宽带振动能量。在 10 Hz 输入频率以及 $5 \text{ M}\Omega$ 负载电阻下, 可以产生的最大输出功率为 $3.2 \mu\text{W}$, 最大输出电压为 7.5 V ; 在 20 Hz 、 30 Hz 、 40 Hz 输入频率以及 $10 \text{ M}\Omega$ 负载电阻下, 可以分别产生最大输出功率为 $1.8 \mu\text{W}$ 、 $0.9 \mu\text{W}$ 以及 $0.6 \mu\text{W}$, 最大输出电压分别为 6 V 、 4.5 V 以及 3 V 。虽然收集水波的振动、空气压缩机的振动以及汽车仪表板的振动, 证明了它的宽带特性。但是该级联冲击结构的摩擦电纳米发电机也有几个显著的缺点: 输出电压较低; 结构中所用的摩擦材料较少; 结构空间利用率较低等。

由前述可知, 利用垂直接触-分离结构收集振动能量时, 一般都会用到弹簧这一弹性介质。为了实现既可以收集垂直方向的能量又可以收集水平方向的能量, 研究人员设计出基于弹簧和弹性体一体化的摩擦纳米发电机^[56], 如图 8d 所示, 它可以有效地将来自环境激励的机械能转换成电能。从理论上、数值上和试验上分别分析了垂直和水平激励产生的两种基本振动模式, 并且得到了较好的结果。在垂直共振 (16 Hz) 和水平共振 (8.5 Hz) 以及负载为 $10 \text{ M}\Omega$ 与加速度激励为 23 m/s^2 下, 最大的功率密度分别为 240 和 45 mW/m^2 。摩擦纳米发电机在收集多方向振动能方面有着巨大的潜在应用, 例如车辆振动, 建筑物振动以及由海浪、风和行走引发的振动, 还可以作为一个自驱动传感器。

图 8 基于接触分离式的摩擦纳米发电机

独立层式摩擦纳米发电机的结构, 如图 7c 所示。其基本工作原理是在介电层的表面连接两个不相连的对称电极, 用一个可以自由移动的物

体在这两个电极之间往复运动, 就会在这两个电极之间产生电势差的变化, 从而驱动电子通过外电路负载在两个电极之间来回流动, 以平衡电势

差的变化。电子在电极之间的往复运动可以形成功率输出^[39]。并且,这个带电体可以不与介电层的上表面接触或者摩擦就能产生电的输出,这对于提高摩擦纳米发电机的使用寿命是非常有帮助的。

CHOY 等^[57]设计出接地金属独立层式摩擦纳米发电机,如图 9a 所示。接地金属独立层式摩擦纳米发电机与一般的独立层式摩擦纳米发电机相比,最大的区别是在中间加入了一层金属带,这使其可以获得更多的电荷。利用此方法可以将输出电流增加到原来的四倍,功率达到原来的八倍,极大地改善了独立层式摩擦纳米发电机的输出性能。在负载电阻为 1 kM Ω 时,摩擦纳米发电机的输出功率可以

达到 127.449 μ W。基于垂直接触-分离模式的摩擦纳米发电机可以有效地收集水波振动能量。但其大部分依赖于弹簧结构,在多方向收集水波振动能量方面受到限制。DONG 等^[58]设计出具有浮标的独立层式摩擦纳米发电机在收集水波振动能量以及在恶劣海域实现自供电浮标和气象监测系统向前迈出了重要一步。如图 9b 所示,每个摩擦纳米发电机包含 4 个发电机组,每个发电机组相隔 45°。所设计的基于浮动浮标式的摩擦纳米发电机在收集水波振动能量方面具有诸多优势,它能连续可靠地获取振动能量。单个发电机在外界振动频率为 1.7 Hz 以及负载电阻为 50 M Ω 时,可以输出 7 μ W 的峰值功率以及 30 V 的峰值电压。

(a) 具有接地金属结构的摩擦纳米发电机

(b) 具有浮动浮标结构的摩擦纳米发电机

(c) 具有单胶囊结构的摩擦纳米发电机

图 9 基于独立层式的摩擦纳米发电机

独立层式摩擦纳米发电机也可收集宽带振动能量。WU 等^[59]利用独立层式结构设计出胶囊式摩擦电纳米发电机，如图 9c 所示。胶囊式摩擦纳米发电机可以容易地集成一维，二维和三维结构，以实现高输出。它具有随意组合以及收集宽带振动能量的优点。在 5 Hz 振动频率以及 7.5 MΩ 负载电阻下，单个胶囊式摩擦纳米发电机可以输出 2.6 μW 的峰值功率。在组成混合胶囊式摩擦纳米发电机时，它的电压输出按照 $4.6 \times n$ 的规律线性增加，功率输出按照 pn^2 的规律增加。其中 p 是

每个胶囊的峰值输出功率， n 是胶囊的数量。但是，此摩擦纳米发电机也有其缺点，在制造时较麻烦，单个胶囊式摩擦纳米发电机发电效率很低，必须集成使用等。

摩擦电振动能量收集器近年来得到广泛关注，相较于电磁振动能量收集器及压电振动能量收集器，摩擦电振动能量收集器具有输出电压高、制作简单以及非常适用于低频环境下收集振动能量的优势。表 4 列出了关于摩擦电振动能量收集器的重要试验结果，以便直观对比分析。

表 4 部分基于摩擦电振动能量收集器的试验结果

研究进展	结构形式	谐振频率/	加速度/	负载电阻/	输出电压/	峰值输出功率/	功率密度/
		Hz	g	Ω	V	μW	(mW/cm ³)
文献[54]	弹性接触分离式	—	—	8×10^5	480	19 000	0.102
文献[53]	弹簧形式的球结构	1	—	4.7×10^6	560	7 960	0.015 2
文献[56]	弹簧和弹性体一体化	8.5	2.3	1×10^7	85	—	0.024
文献[58]	浮标浮动式	1.7	—	5×10^7	30	7	—
文献[59]	胶囊式	5	—	7.5×10^6	5	2.6	40
文献[57]	接地金属独立层式	—	—	1×10^9	48	127.449	—
文献[55]	多级接触分离式	—	0.2~0.5	5×10^6	7.5	3.2	—

注：“—”表示文献未提及

4 三种振动能量收集器的对比

无论是电磁、压电还是摩擦电振动能量收集器，它们都具有一定的共同点和各自的优势及一定的局限性。一般情况下，三种振动能量收集器都可以设计在不同频率下收集振动能量，也可以设计出不同的机械结构，使其具有一定的宽频特性。但是，从原理上来讲，这三种振动能量收集器在输出特性以及频率响应优势上具有一定的分布性。电磁振动能

量收集器更适用于在高频下工作，它具有高的输出电流及功率，但是它的体积较大以及高频特性，在微振动能采集方面限制了它的发展；压电振动能量收集器适用于在中高频范围内工作，它具有结构简单，易于制造的特点，但是它的制作材料昂贵，在一定方面也限制了它的发展；摩擦电振动能量收集器适用于在低频下工作，它具有输出电压高、制作简单的优点，但是它具有输出电流低、阻抗高的劣势。下面，将通过表 5 进行三种振动能量收集器的详细对比。

表 5 三种振动能量收集器的对比

	摩擦电	压电	电磁
振动能量收集方式			
收集机理	摩擦起电以及静电感应	压电效应	法拉第电磁感应定律
阻抗类型	电容式	电容式	电阻式
优势频率	低频	中频	高频
优点	高输出电压，质量小，制作简单，低频下效率高，低成本，多工作模式	结构简单，较高输出电压，微米纳米级别制造，不需控制间隙，高电容，高耦合系数	高输出电流及功率，高效率，低输出阻抗，易于在中高频工作，易于大规模制造，使用寿命长
缺点	低输出电流，高阻抗	低输出电流，材料昂贵	低输出电压，体积大

5 当前存在的挑战及研究展望

通过对比上述三种振动能量收集器,它们有各自的优势与不足,但要想进一步创新振动能量收集器,要研究明白它们的收集机理。从机理出发,找出它们的影响因素并进行改进从而改善发电机的性能。当前电磁、压电及摩擦电振动能量收集器也面临着一些共同的挑战,比如三种振动能量收集器的转化效率还不够高,很大一部分能量都被自身消耗了;三种振动能量收集器的结构设计还不够完善,不能充分利用空间;此外,它们在材料选择上也具有较大的问题,目前并没有一种多用途的材料被发现。但是,根据三种振动能量收集器的机理特性、频率响应以及幅度响应,可以设计出一种复合型振动能量收集器,实现对响应频带、幅度范围的多级覆盖,以及多维度振动的能量收集。

电磁振动能量收集器具有较高的能量输出密度,并且其厘米级装置可以很容易地制造出来。与压电和摩擦电振动能量收集器相比,它的阻抗小。然而,电磁振动能量收集器也有自身的局限性,若设备的空间有限,磁线圈会使结构非常复杂,使用受到限制,并且可能受到电磁波的干扰,难以与微机电系统集成,它的输出电压较小,很难达到二极管整流器的阈值电压。然而,其在收集较高频率振动能量时,具有较大的优势,可以与摩擦电振动能量收集器进行耦合,以提高振动能量收集范围。通过改变结构,也会使其有更广阔的应用空间。目前新出现的采用磁流体结构的电磁振动能量收集器,相较于动线圈式、动铁式以及谐振式电磁振动能量收集器具有设计方便、能量收集效率高的优势,有广阔的应用前景。

自从设计出运动鞋中的压电振动能量收集器为电子模块供电后,压电振动能量收集器得到了迅速的发展。其具有结构简单、输出电压较高、易于在微米纳米级别制造、不易受到外部/内部电磁波的影响以及在较高频率下可以很好地收集振动能量等优点。并且用于振动能量收集的压电材料通常是薄膜,因此可以很容易地将其最小化。但是,它也面临一些挑战,如去极化、本体压电层脆性和压电薄膜耦合性差。此外,PVDF 薄膜与电极材料的附着力较差,给器件制造带来困难。PZT 材料容易破裂,限制了 PZT 材料的整体性能。除此之外,压电振动能量收集器的悬臂梁结构还存在收集频率较单一的缺点。针对上述挑战,可以从以下几方面进行考虑。压电发电机的效率可以通过改变压电材料、改变应

力方向等多种方式得到提高。找出更优于 PZT 或者 PVDF 的材料将有效地解决上述问题。在振动能量收集方面,为了满足环境振动的低频范围,压电振动能量收集器可以在较薄的压电单晶悬臂梁上附加相对较大的质量,以有意降低机械共振,达到有效收集振动能量的目的。若能设计出优于悬臂梁的结构,也将有广阔的应用前景。

摩擦电振动能量收集器是一种很有前景的获取环境机械能的收集器。它的特点是结构简单、成本低、质量小、转化效率较高、功率输出密度较高以及输出电压高等。但是摩擦电振动能量收集器发展这些年来,也遇到一些挑战。上述三种振动能量收集器关于材料选择的共性问题,摩擦电振动能量收集器更偏向于对材料耐磨性以及耐腐蚀性的要求。尤其在收集海洋水波振动能量时,其应具有强的抵抗恶劣环境条件的能力,如强烈的紫外线照射、海水侵蚀的影响等等。同时,在提高表面电荷密度方面还遇到较大的挑战,这需要不断改进摩擦表面的结构以提高两个表面的接触面积,增大电荷密度。在提高振动能量转换效率方面,除了集成化之外,还可以选择具有高效率的转化材料以及后续电路管理的优化设计。在提高耐磨性以及耐腐蚀性方面,可以在外部增加保护装置。在提高摩擦表面电荷密度方面,可以通过微纳加工的方法,使得接触表面生长一层纳米结构,或者通过设计较好的表面结构以提高两表面的接触面积,或者通过表面离子注入以提高材料表面电荷密度。对于改善振动频率方面,可以从材料的弹性系数以及材料质量方面进行合理的设计。对于宽频振动设计时,可以采用非线性力、磁力等方式对结构进行优化设计。

6 结论

周围环境中的振动能量分布非常广泛,收集这些振动能量为传感器以及其他小型电子设备供电是很有前景的。基于法拉第电磁感应定律的电磁振动能量收集器、基于压电效应的压电振动能量收集器以及基于摩擦起电与静电感应的摩擦电振动能量收集器可以有效地收集振动能量。文中详述了三种振动能量收集器的收集机理以及研究进展。电磁振动能量收集器分为动线圈式、动铁式以及谐振式三种类型,主要收集高频率的振动能量。它的结构设计已经较为完善,但新兴的磁流体式结构具有较大的研究前景。压电振动能量收集器主要是通过压电效应来收集振动能量。它的结构设计具有多样性,易于收集中高频率的振动能量。摩擦电振动能量收集

器主要分为垂直接触-分离式、滑动式、单电极式以及独立层式四种基本结构, 在收集低频振动能量方面具有较大的优势。研究这三种振动能量收集器, 对收集宽频带、微幅度、多维度振动能量具有极大的指导作用。当环境振动频率较单一时, 可根据不同振动频段选择不同的收集器; 当环境振动较复杂时, 可根据三种振动能量收集器的收集特性, 设计制造出复合型振动能量收集器来收集宽频带、微幅度、多维度振动能量。文中还对上述三种振动能量收集器的优缺点、阻抗类型进行了对比, 并且展望了其未来的发展趋势。

随着振动能量收集器的不断发展, 其可以有效地收集周围环境中的振动能量, 如工业环境的振动、人体运动、微风吹动、水纹波动等。振动能量收集器可以实现微小型电子器件的自驱动化, 用于环境监测、人机交互健康监测、生物传感等。振动能量收集器的出现为实现大规模分布式能源供应打下了坚实的理论及技术基础, 将应用于物联网领域、人工智能领域、环境保护领域以及国防安全领域等, 甚至影响人类生活的各个方面。

参 考 文 献

- [1] DING Wenxiu, JING Xuyang, YAN Zheng, et al. A survey on data fusion in internet of things: Towards secure and privacy-preserving fusion[J]. *Information Fusion*, 2019, 51: 129-144.
- [2] GILBERT J M, BALOUCHI F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2008, 5 (4): 334-347.
- [3] LUKATSKAYA M R, DUNN B, GOGOTSI Y. Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage[J]. *Nature. Communications.*, 2016, 7: 12647.
- [4] GUAN M J, LIAO W H. On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages[J]. *Smart Materials & Structures*, 2007, 16 (2): 498-505.
- [5] YILDIRIM T, GHAYESH M H, LI W, et al. A review on performance enhancement techniques for ambient vibration energy harvesters[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 435-449.
- [6] NIU Simiao, WANG Xiaofeng, YI Fang, et al. A universal self-charging system driven by random biomechanical energy for sustainable operation of mobile electronics[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8975.
- [7] ROUNDY S, WRIGHT P K, PISTER K S. In Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters[C]//ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2002: 487-496.
- [8] PARK J Y, SAL A M, RASEL M. SALAUDDIN. Nanogenerator for scavenging low frequency vibrations[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29 (5): ab0241.
- [9] BEEBY S P, TORAH R N, TUDOR M J, et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17 (7): 1257-1265.
- [10] GUPTA K, BRAHMA S, DUTTA J, et al. Recent progress in microstructure development of inorganic one-dimensional nanostructures for enhancing performance of piezotronics and piezoelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2019, 55: 1-21.
- [11] AHMED R M, FARIHA B S. A review on energy harvesting approaches for renewable energies from ambient vibrations and acoustic waves using piezoelectricity[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26 (8): 085031.
- [12] AHMAD S, ABDUL M M, FAROOQI M A. Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43 (6): 1974-2015.
- [13] MARIELLO M, GUIDO F, MASTRONARDI V M, et al. Nanogenerators for harvesting mechanical energy conveyed by liquids[J]. *Nano Energy*, 2019, 57: 141-156.
- [14] AMIRTHARAJAH R, CHANDRAKASAN A P. Self-powered signal processing using vibration-based power generation[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1998, 33 (5): 687-695.
- [15] 孟祥凯, 侯玉亮. 振动能量收集技术的近况与展望[J]. *科技与创新*, 2019(11): 94-95.
- [15] MENG Xiangkai, HOU Luliang. Review and prospect of vibration energy harvesting technology[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2019(11): 94-95.
- [16] KYMISSIS J, KENDALL C, PARADISO J, et al. Parasitic power harvesting in shoes[C]//Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No. 98EX215), IEEE: 1998: 132-139.
- [17] FAN Fengru, TIAN Zhongqun, WANG Zhonglin. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [18] 王中林, 林龙, 陈俊, 等. 摩擦纳米发电机[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [18] WANG Zhonglin, LIN Long, CHEN Jun, et al. Triboelectric nanogenerators[M]. Beijing: Science Press,

- 2017.
- [19] RYU H, YOON H J, KIM S W. Hybrid energy harvesters: Toward sustainable energy harvesting[J]. *Adv. Mater.*, 2019: e1802898.
- [20] 颜琳, 王小云, 全秀娥. 动生电动势的产生机理[J]. *吉首大学学报*, 2007(1): 70-72, 117.
YAN Lin, WANG Xiaoyun, QUAN Xiue. Mechanism of production of motional electromotive force[J]. *Journal of Jishou University*, 2007(1): 70-72, 117.
- [21] HOU Wenqi, LI Yankun, GUO Wei, et al. Railway vehicle induced vibration energy harvesting and saving of rail transit segmental prefabricated and assembling bridges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 946-959.
- [22] LIN Teng, WANG J J, ZUO Lei. Efficient electromagnetic energy harvester for railroad transportation[J]. *Mechatronics*, 2018, 53: 277-286.
- [23] THOLL M V, HAEBERLIN A, MEIER B, et al. An intracardiac flow based electromagnetic energy harvesting mechanism for cardiac pacing[J]. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 2019, 66 (2): 530-538.
- [24] WILLIAMS C B, SHEARWOOD C, HARRADINE M A, et al. Development of an electromagnetic micro-generator[J]. *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems*, 2001, 148 (6): 337-347.
- [25] ZHANG L B, DAI H L, YANG Y W, et al. Design of high-efficiency electromagnetic energy harvester based on a rolling magnet[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 185: 202-210.
- [26] FAN Kangqi, TAN Qinxue, LIU Haiyan, et al. Harvesting energy from twisting vibration of a rotor suspended by a piece of string[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(7): 07LT01.
- [27] CHAE S H, JU S, CHOI Y, et al. Electromagnetic vibration energy harvester using springless proof mass and ferrofluid as a lubricant[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 476: 012013.
- [28] BHOSALE A, ANDERSON A, DESHMUKH P S. Voltage enhancing using multi-magnetic arrangement for low frequency vibrational energy harvesting[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2018, 20 (4): 1720-1732.
- [29] ZHAO Ning, LUO Hao, LIANG Pengwei, et al. The design and implementation of electromagnetic vibration energy acquisition system[J]. *Energy Procedia*, 2017, 136: 34-40.
- [30] KULAH H, NAJAFI K. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations[C]// 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Maastricht MEMS 2004 Technical Digest, IEEE: 2004: 237-240.
- [31] CHEN Jingfan, DENG Wei, WANG Ya, et al. Parametric study of low frequency broadband rectilinear-to-rotary vibrational energy harvesting[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018(1): 1-9.
- [32] CHEN Jingfan, WANG Ya. A dual electromagnetic array with intrinsic frequency up-conversion for broadband vibrational energy harvesting[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114 (5): 053902.
- [33] ZHANG Jin, WANG Chengyuan, BOWEN C. Piezoelectric effects and electromechanical theories at the nanoscale[J]. *Nanoscale*, 2014, 6 (22): 13314-13327.
- [34] PRIYA S, INMAN D J. *Energy harvesting technologies*[M]. London: Springer: 2009.
- [35] FLYNN A M, SANDERS S R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers In *Pesc 98 Record - 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, IEEE, 1998: 1463-1471.
- [36] LEE M, CHEN C, WANG Sihong, et al. A hybrid piezoelectric structure for wearable nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24 (13): 1759-1764.
- [37] SUN Chengliang, SHI Jian, BAYERL D J, et al. PVDF microbelts for harvesting energy from respiration[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4 (11): 4508-4512.
- [38] 徐振龙, 单小彪, 谢涛. 宽频压电振动俘能器的研究现状综述[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(8): 190-199.
XU Zhenlong, SHAN Xiaobao, XIE Tao. A review of broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8): 190-199.
- [39] 张旭辉, 谭厚志, 杨文娟, 等. 多方向压电振动能量收集技术研究进展[J]. *压电与声光*, 2019, 41(2): 140-149.
ZHANG Xuhui, TAN Houzhi, YANG Wenjuan, et al. Research and development of multi-directional piezoelectric vibration energy harvesting technology[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(2): 140-149.
- [40] WU Yipeng, QIU Jinhao, ZHOU Shengpeng, et al. A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting[J]. *Applied Energy*, 2018, 231, 600-614.
- [41] JIANG Laiming, YANG Yang, CHEN Ruimin, et al. Flexible piezoelectric ultrasonic energy harvester array for bio-implantable wireless generator[J]. *Nano Energy*, 2019, 56: 216-224.
- [42] ZHANG Jinhui, QIN Lifeng. A tunable frequency up-conversion wideband piezoelectric vibration energy harvester for low-frequency variable environment using a novel impact- and rope-driven hybrid mechanism[J].

- Applied Energy, 2019, 240: 26-34.
- [43] ZHAO Liya, YANG Yaowen. An impact-based broadband aeroelastic energy harvester for concurrent wind and base vibration energy harvesting[J]. Applied Energy, 2018, 212: 233-243.
- [44] FU Jing, HOU Yudong, GAO Xin, et al. Highly durable piezoelectric energy harvester based on a PVDF flexible nanocomposite filled with oriented BaTi₂O₅ nanorods with high power density[J]. Nano Energy, 2018, 52: 391-401.
- [45] MAURYA D, KUMAR P, KHALEGHIAN S, et al. Energy harvesting and strain sensing in smart tire for next generation autonomous vehicles[J]. Applied Energy, 2018, 232: 312-322.
- [46] LI Xiangyang, UPADRASHTA D, YU Kaiping, et al. Sandwich piezoelectric energy harvester: Analytical modeling and experimental validation[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176, 69-85.
- [47] WANG Zhonglin, WANG A. On the origin of contact-electrification[J]. Materials Today, 2019(5): 16.
- [48] WANG Zhonglin. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: The origin of nanogenerators[J]. Materials Today, 2017, 20 (2): 74-82.
- [49] XU Liang, BU Tianzhao, YANG Xiaodan, et al. Ultrahigh charge density realized by charge pumping at ambient conditions for triboelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2018, 49: 625-633.
- [50] WANG Sihong, LIN Long, WANG Zhonglin. Triboelectric nanogenerators as self-powered active sensors[J]. Nano Energy, 2015, 11, 436-462.
- [51] ZHANG Chi, TANG Wei, HAN Changbao, et al. Theoretical comparison, equivalent transformation, and conjunction operations of electromagnetic induction generator and triboelectric nanogenerator for harvesting mechanical energy[J]. Adv. Mater., 2014, 26 (22): 3580-91.
- [52] ZHAO Junqing, ZHEN Gaowei, LIU Guoxu, et al. Remarkable merits of triboelectric nanogenerator than electromagnetic generator for harvesting small-amplitude mechanical energy[J]. Nano Energy, 2019, 61, 111-118.
- [53] XIAO Tianxiao, LIANG Xi, JIANG Tao, et al. Spherical triboelectric nanogenerators based on spring-assisted multilayered structure for efficient water wave energy harvesting[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28 (35): 1802634.
- [54] WANG Xiaofeng, NIU Simiao, YI Fang, et al. Harvesting ambient vibration energy over a wide frequency range for self-powered electronics[J]. ACS Nano, 2017, 11(2): 1728-1735.
- [55] BHATIA D, HWANG H J, HUYNH N D, et al. Continuous scavenging of broadband vibrations via omnipotent tandem triboelectric nanogenerators with cascade impact structure[J]. Science Report, 2019, 9 (1): 8223.
- [56] XU Minyi, WANG Peihong, WANG Yicheng, et al. A soft and robust spring based triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional vibration energy and self-powered vibration sensing[J]. Advanced Energy Materials, 2017: 201702432.
- [57] CHOY T H, OYING Ying, ZHOU Feichi, et al. Enhanced output power of a freestanding ball-based triboelectric generator through the electrophorus effect[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 38(6), 18518-18524.
- [58] KIM D Y, KIM H S, KONG D S, et al. Floating buoy-based triboelectric nanogenerator for an effective vibrational energy harvesting from irregular and random water waves in wild sea[J]. Nano Energy, 2018, 45: 247-254.
- [59] WU Chaoxing, PARK J H, KOO B, et al. Capsule triboelectric nanogenerators: Toward optional 3D integration for high output and efficient energy harvesting from broadband-amplitude vibrations[J]. ACS Nano, 2018, 12(10): 9947-9957.

作者简介: 亓有超, 男, 1995 年出生。主要研究方向为摩擦纳米发动机结构设计与优化。

E-mail: qiyouchao@163.com

张弛(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为纳米发电机与自驱动微/纳机电系统。

E-mail: czhang@binn.cas.cn