

压电振动发电机的研究现状与发展趋势

朱莉娅 陈仁文 雷 娴

南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室,南京,210016

摘要:综述了国内外压电振动发电机的技术发展,阐述了压电发电机工作原理,系统介绍了压电材料与压电换能元件结构形式,重点报道了能量转换接口电路及共振频率调整策略的研究现状。举例说明了压电振动发电机的应用领域,并针对目前研究中存在的问题对压电振动发电机发展趋势进行了预测。随着低功耗微电子技术及微机械加工技术的发展,压电振动发电机在各种 MEMS 产品、无线传感器网络及低功耗电子设备中的应用将逐渐实用化、普及化。

关键词:压电发电机;能量采集;同步开关阻尼;频率调谐

中图分类号:TN712;TM619

文章编号:1004—132X(2011)24—3016—07

Current Status and Development Trends of Vibration-based Piezoelectric Generator

Zhu Liya Chen Renwen Lei Xian

Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials & Structures,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The current status of piezoelectric generator was reviewed, including the working principles and the species of piezoelectric elements. The energy scavenging circuits and the strategies for increasing the operating frequency range were focused. Some application examples were illustrated and the trends were pointed out according to the problems in current researches. With the development of microelectronic and micromachining technology, the piezoelectric generators will be widely used in powering MEMS, wireless sensor networks and low dissipation electronic devices.

Key words: piezoelectric generator; energy harvesting; synchronous switch damping; frequency tuning

0 引言

随着大规模集成电路技术、超精密加工技术及网络通信技术的发展,各种微小型电子设备、微机电系统(MEMS)广泛应用于工业、通信、军事、医学及家庭生活等领域,其研究重点之一在于能量管理,包括自身耗能和供能方式两个方面^[1]。尽管利用微型化、集成化和优化网络通信协议等方法可以有效地降低功耗,寻找清洁、可再生的能量取代传统电池供电仍然是解决能量问题的关键所在。

振动能量存在形式多样,振动能量采集是一种行之有效的环境能量发电方法。根据发电原理不同,振动发电机可以分为静电式、电磁式与压电式。其中,压电式振动发电机以其能量转换效率高、结构简单、无电磁干扰、易于实现整体结构的微型化与集成化等优点成为国内外振动发电领域研究的重点^[2-3]。

本文对目前国内外压电振动发电机研究现状进行综述,介绍压电振动发电机工作原理(包括发电机模型、压电材料、压电换能结构及其优化等),

重点阐述有关压电发电机接口电路及共振频率调整策略,最后提出压电发电机应用领域与发展趋势。

1 压电振动发电机工作原理

振动发电机可以等效为单自由度的弹簧—质量块系统,如图 1 所示^[4]。研究表明,振动发电机与外界振动激励振动频率相同即共振时发电机输出平均功率最大。其中,压电式振动能量采集结构利用压电材料的压电效应,当压电元件在外界振动源激励作用下随之振动时,压电元件产生变形,压电元件表面随之累积电荷,从而在压电元件的上下两个电极之间形成电势差,通过能量采集电路将该电势差转换并存储,完成机械振动能向电能的转换。

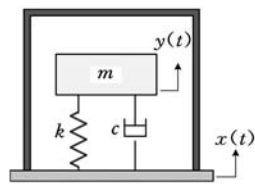


图 1 振动发电机机电模型示意图

1.1 压电材料

常用压电材料包括压电单晶体、压电陶瓷、压电聚合物、压电复合材料等^[5-7]。其中,压电陶瓷锆钛酸铅(PZT)已经成为国内外压电振动发电领

域最常用的压电材料之一,并在此基础上发展了低温烧结 PZT、透明压电陶瓷 PLZT、无铅系列压电陶瓷及纳米陶瓷等多种压电陶瓷材料。压电陶瓷的优点在于压电常数大、灵敏度高、工艺成熟、成形效果好等,缺点在于其韧性差、易破裂。另一种常用压电材料是聚偏二氟乙烯(PVDF),PVDF具有压电应变常数高、柔性和加工性好、频响宽、机械强度高优点。普林斯顿大学研究出了一种压电橡胶薄膜(piezo-rubber),该材料将纳米 PZT 并排嵌入到硅胶中,有效结合了硅胶的高延展性、生物相容性与 PZT 良好的压电特性,适用于体内医疗装置发电^[8]。新型压电纤维复合材料(PFC)采用了压电陶瓷纤维和交叉指形电极技术,具有较大的压电常数和横向压电效应,抗破坏能力强,适用于曲面结构。

1.2 压电换能结构

压电换能结构是压电发电机的研究重点之一。压电换能结构已由传统的压电单晶片(uni-morph)发展为压电双晶片(bimorph)、多层叠堆形(stack)、虹形(rainbow)、铍形(cymbal)与弹珠形(moonie)等多种结构。其中,压电单晶片、双晶片及虹形压电换能元件适用于激励幅值较小的振动环境,多层叠堆形压电换能结构适用于激励幅值较大的环境,铍形与弹珠形压电换能元件适用范围介于上述两类元件之间。

压电双晶片在金属基片上下表面分别粘贴压电片,根据电极连接方式不同可分为串联压电双晶片和并联压电双晶片,如图 2 所示。

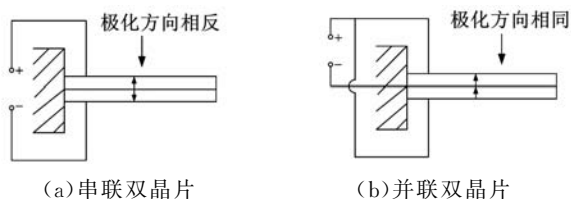


图 2 压电双晶片示意图

虹形压电换能结构将压电陶瓷放在石墨衬底上发生高温还原反应,并在室温下迅速冷却,利用收缩率不同,形成具有内部预应力的拱形结构,其优点在于:整体型结构,不易出现层间脱落;变形能力强,输出电压水平高;可承受较大应力载荷。南京航空航天大学沈星等^[9]对虹形压电结构进行了力学分析,研究了还原制备技术并观察了其微观组织结构,指出其未来发展方向在于层叠化、微型化与集成化。

铍形压电换能元件由两片铍形金属平顶间夹一片压电陶瓷构成,如图 3 所示。铍形压电换能元件将压电陶瓷的横向应力转换并放大为纵向应

力,具有低阻抗、大弯曲变形、高承载能力等优点。哈尔滨工业大学刘智等^[10]利用有限元理论对铍形压电换能结构进行了建模并得到有限元动力学方程。研究表明,通过增大压电陶瓷厚度、增大金属帽内腔底径、减小金属帽厚度和内腔顶径,可以提高输出电压水平,并且基振频率随金属帽厚度、最优内腔高度的增大而增大,随金属帽内腔底径增大而减小。

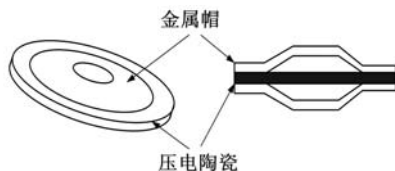


图 3 铍形压电换能元件结构示意图

1.3 振动式压电发电机的理论模型与实验

为充分利用环境振动能量,首先需要优化压电换能结构,使输出电能最大化。悬臂梁式换能结构实现方便,得到了广泛研究。

美国加州伯克利分校 Roundy 等^[11]以悬臂梁末端挠度为自由度,建立了悬臂梁式压电换能结构的 Roundy 模型,并与实验数据进行了对比,验证了该模型的正确性。重庆大学贺学峰等^[12]在此基础上进行改进,分别建立了悬臂梁式压电换能结构单自由度、二自由度模型。其中单自由度模型以质量块质心为自由度,二自由度模型以质量块质心挠度和质量块转角为自由度。实验结果表明,对于结构的固有频率和最大输出功率值预测,单自由度模型的相对误差分别为 1% 和 33.8%,二自由度模型的相对误差分别为 9.2% 和 16.3%,基于上述两个模型预测的谐振频率和输出功率等发电机参数与实验结果比 Roundy 模型更符合实际情况。

哈尔滨工业大学卢有为等^[13]建立了悬臂梁式压电发电机单晶片、双晶片串联和双晶片并联压电换能结构的电压输出灵敏度模型。仿真结果表明,上述三种压电换能结构输出电压水平按高低排列依次为串联压电双晶片、串联压电单晶片、并联压电双晶片,且串联压电双晶片具有较高电压灵敏度。

西南科技大学齐洪东等^[14]建立了压电双晶片悬臂梁换能结构的数学模型,在此基础上对换能结构接阻性、容性负载时的输出电压及功率与振动频率、加速度幅值之间的关系进行分析预测,并对换能结构输入输出特性进行了仿真,得出阻性负载输出电压高于容性负载输出电压的结论。

哈尔滨工程大学单小彪等^[15]设计了一种上

下表面压电片不对称粘贴的压电悬臂梁发电装置,并利用 ANSYS 软件建立有限元模型,实验表明,随着悬臂梁上下表面压电片重合度的增大,发电装置输出电压先增大后减小,当重合度为 0.2 时,压电振子输出电压最大。

2 压电振动发电机能量转换接口电路

受环境激励影响,压电发电机输出功率通常较低、输出电流较小,且发电机本身存在多种损耗因素,因此很难直接为负载供电。同时,压电元件输出电压是交变、随机的^[16-17]。因此,为了提供持续、稳定的电能,需要设计一定形式的能量转换接口电路,增加储能元件。

2.1 单级能量转换接口电路

目前研究集中于单级压电发电机接口电路,包括经典接口电路(standard circuit)、同步电荷提取电路(synchronous charge extraction, SCE)、并联同步开关电感电路(Parallel-SSHI)及串联同步开关电感电路(Series-SSHI)^[18]。其中,经典接口电路由整流桥和滤波电容组成,如图 4 所示。整流桥将压电元件输出的交流电压转换为直流电压,并经滤波电容输出稳定的直流信号。

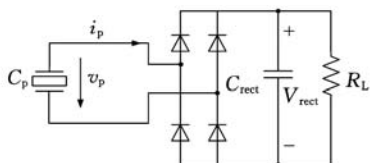


图 4 经典接口电路

Ottman 等^[19]分析了经典接口电路的电能转换过程,并推导出输出功率与压电元件电压的关系,通过实验验证了电学等效模型的正确性,根据最小二乘法拟合出模型关键参数,并验证了输出功率最大理论。Lefeuvre 等^[18]提出了三种由同步开关阻尼电路改进的接口电路,通过维持压电元件电压与振动速度符号一致、增加压电元件阻尼作用时间来提高输出电能水平。其中同步电荷提取电路如图 5 所示。

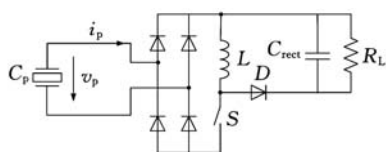


图 5 同步电荷提取接口电路

当压电元件电压达到峰值时闭合开关,在 1/4 个 LC 周期内将累积电荷转移到电感上;之后断开开关,电感存储的电荷通过二极管转移到储能元件上。另一种并联同步开关电感电路如图 6 所

示,同样在电压峰值处闭合开关,经过 1/2 个 LC 周期后断开开关,电压瞬时反向。串联同步开关电感电路如图 7 所示,与并联开关电感电路不同点在于其电感和开关串接在压电元件和整流桥之间,压电元件多数时间处于开路状态。

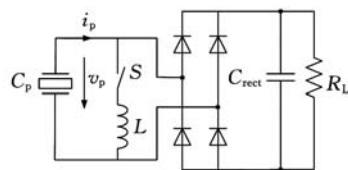


图 6 并联同步开关电感电路

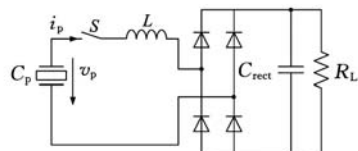


图 7 串联同步开关电感电路

Lefeuvre 等^[18]将上述三种同步开关阻尼电路与经典电路进行实验比较,经典电路在弱机电耦合情况下存在最优负载,在强机电耦合情况下存在两个最优负载;同步电荷提取电路输出功率与负载无关,输出功率受到机电耦合系数的影响;串联同步开关电感电路的最优负载小于并联同步开关电感电路的最优负载;同步电荷提取电路输出功率为经典电路输出最大功率的 6.5 倍,而两种同步开关电感电路输出最大功率为经典电路的 15 倍以上。

2.2 多级能量转换接口电路

Ottman 等^[19]提出利用降压式 DC-DC 变换电路,通过调节占空比,使中间电容上的电压维持在压电元件开路电压的一半,调节输出电压与负载所需电压匹配,同时保持输出功率始终最优,如图 8 所示。实验结果表明,通过自适应调节占空比,降压式 DC-DC 变换电路输出功率比经典电路输出功率高 4 倍。在随后的研究中,Ottman 等^[20]提出一种优化电路:将接口电路分为两个部分,针对机械激励较高的情况,采用固定占空比,电路结构简单、功耗低;针对机械激励较低的情况,将 DC-DC 电路旁路,利用脉冲充电电路为负载充电。

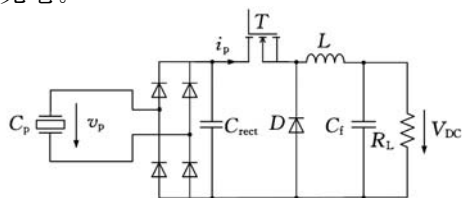


图 8 降压式 DC-DC 接口电路

Lallart 等^[21]提出了一种双同步开关电感电路,如图 9 所示,该电路结合了 SCE 电路和 DC-DC 电路的优点,即保持较高输出功率,同时保证输出功率与负载无关。当压电元件电压达到极值时,闭合开关管 S1,压电元件上存储的电荷转移至中间电容;电荷转移完成后,断开开关 S1、闭合开关管 S2,Buck-Boost 电路开始工作,电能首先转移至电感 L_2 ;转移完成后,断开 S2,电感上的能量通过续流二极管转移至滤波电容,为负载供电。实验结果表明,双同步开关电感电路输出功率为经典电路的 5 倍以上。

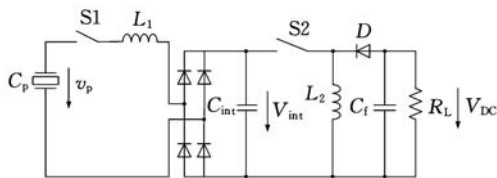


图 9 双同步开关电感接口电路

3 压电振动发电机共振频率调整策略

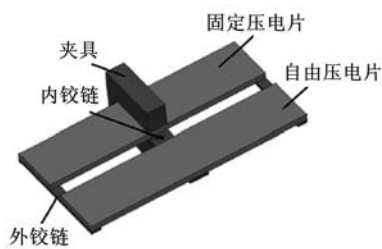
振动发电机只有在共振状态下输出电能水平才能达到最高,且输出功率与响应带宽相互制约。目前国内外解决频率匹配问题的策略有两种:一是通过调节发电机自身的固有频率,使其与外界激励相同;二是通过拓宽发电机的带宽,使其在宽频带激励输入时有较好的响应^[22]。

可以通过改变发电机的机械特性或改变发电机的电学负载来调节发电机自身频率。其中,机械特性调节方法包括主动调节和被动调节。以悬臂梁式压电振动发电机为例,调节机械参数的方法包括改变几何尺寸、质量块位置、弹簧刚度及对结构施加应力等。

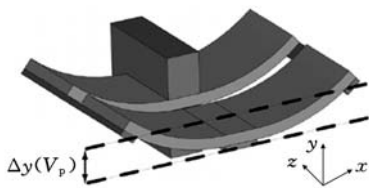
Wu 等^[23]通过调节固定于质量块上螺钉的位置改变质量块的几何中心,压电发电机的固有频率可在 180Hz 到 130Hz 之间连续变化。Challa 等^[24]在压电悬臂梁自由端上下表面对称布置两块永磁体,并在支座对应位置布置另两块永磁体,通过改变永磁体间的距离调节结构固有频率。实验结果表明,该压电振动发电机在激励加速度为 0.8m/s^2 时输出功率为 $240\sim 280\mu\text{W}$,结构固有频率调节范围为 $22\sim 32\text{Hz}$ 。

Peters 等^[25]通过对压电元件施加电场使压电元件发生弯曲变形,进而改变整体结构的固有频率,如图 10 所示。实验结果表明:施加 $\pm 5\text{V}$ 的电场,固有频率可在初始频率 78Hz 周围浮动 $\pm 15\%$;通过施加轴向拉力或轴向压力,可分别增加或降低压电振动发电机的固有频率。Eichhorn

等^[26]在悬臂梁两侧附加两个梁结构,通过螺钉与弹簧对悬臂梁施加 22.75N 的压力作用,发电机固有频率调节范围为 $380\sim 292\text{Hz}$ 。



(a) 无电场,自由状态



(b) 施加电场,弯曲变形

图 10 可调频率压电振动发电机示意图

压电发电机通常采用多层结构,分别用于能量采集和频率调节。Charnegie^[27]对压电双晶片发电机进行研究,只取一层压电结构作为频率调节使用时,容性负载从 0 增加至 10mF ,发电机频率变化 4Hz ;若取两层压电结构同时为频率调节或能量采集所用时,容性负载变化相同的情况下,发电机频率变化增加至 6.5Hz 。

Lallart 等^[28]提出一种自适应调频方法,通过监测悬臂梁位移与基座加速度之间的相位差,输出信号经调理后控制可调电压源,可调电压源通过电子开关与压电元件及感性元件构成共振回路。Guyamor 等^[29]证明了通过调节电压源输出电压可以改变系统刚度,进而实现调频目的。实验结果表明,该压电振动发电机可以在自供电、保证输出电能水平的前提下,将工作频带拓宽 400% 。

拓宽发电机带宽的方法包括采用多悬臂梁结构、增加限幅器等。多悬臂梁振动发电机由一组机械参数不同因而固有频率不同的悬臂梁振动发电机组成。Ferrari 等^[30]提出一种多悬臂梁振动发电机,由三个尺寸相同、质量块不同的悬臂梁依次排列组成,固有频率分别为 113Hz 、 183Hz 和 281Hz 。发电机响应频率范围为 $10\sim 400\text{Hz}$,其输出可以满足一个无电池传感器模块完成信号测量及传输功能。

4 压电振动发电机应用实例及发展趋势

4.1 压电振动发电机应用实例

压电振动发电机目前主要用于为各种微小型

电子设备及微机电系统供电,振动源包括人体动能、旋转设备机械能、结构振动能量等。

Roundy 等^[11]采用一种悬臂梁式压电采集结构,最大输出功率密度可以达到 $375\text{mW}/\text{cm}^3$,该能量采集结构可为一个 1.9GHz 无线传输系统提供电能。Kymissis 等^[31]利用 ThunderTH-6R 系统从频率为 1.1Hz 的步行中输出功率为 8.4mW 的电能,经 DC-DC 变换器输出稳定的 $+5\text{V}$ 电压,为串行 ID 编码器和 RF 发送器及无线发射器供电。

在旋转机械能应用方面,廖海洋等^[32]将 PZT5 压电材料粘贴在轮胎内底面,如图 11 所示。汽车行进时轮胎的运动频率与人行走相比较为稳定,且轮胎负重、可转换能量水平高。实验结果表明,压电阵列式轮胎发电机平均输出功率为 $150\sim 350\mu\text{W}$,瞬时最大功率可达 50mW 。

加利福尼亚州近期通过了一项将压电能量采集技术用于公路交通的新法案,该系统已为以色列、意大利试用, 1km 公路单行线的年发电量多达 44MW ,足以供 30800 户人家使用一年。

除了上述研究较为集中的振动源外,法国 CEA-LETI-MINATEC 实验室^[33]开始研究采集雨滴降落产生的机械能。该雨滴能量采集系统以 PVDF 为能量转换元件,将雨滴下落的能量转换为电能。实验结果表明,当雨滴直径分别为 5mm 或 1mm 左右时,该压电发电机输出能量分别为 $12\mu\text{W}$ 和 $1\mu\text{W}$ 。

以上应用主要针对微小型电子设备,在微机电系统领域,欧盟 VIBES 项目组设计了压电振动发电机^[34],其质量块为厚度 $400\mu\text{m}$ 的 SOI 晶体,其上覆盖一层 $2\mu\text{m}$ 的氧化层和 $5\mu\text{m}$ 厚的硅层, PZT 材料层厚度为 $1\mu\text{m}$,设备输出功率为 600nw 。Jeon 等^[35]设计了一种微型悬臂梁结构的压电式能量采集器,其悬臂部分由热延伸出的氧化硅、氮化硅沉积和溶胶凝胶工艺沉积的氮化锆组成。顶部 PZT 层厚度为 0.58mm ,由溶胶凝胶工艺沉积而成。梁末端添加有 SU8 光敏树脂的质量块。实验结果表明:激励加速度为 $10\text{m}/\text{s}^2$ 、频率为 13.9kHz 时,输出功率为 $1.01\mu\text{W}$ 。

目前,已有一些压电振动发电机集成产品问世,现列举部分如表 1 所示。

表 1 压电振动发电机产品举例

公司	产品	特点
Coninium Control Corp.	iPower 振动能量采集系统	采用 PiezoFlex 复合材料,系统自供电
Advanced Linear Devices	ALD's EH300	低功耗,间歇性工作,储能长
Enocean	ECO100	复合收集振动能、热能等
SolarBotanica	人工能量采集树(阔叶树、常青树)	能量采集,降温、遮阳、隔音、美化环境,年平均发电量 $2000\sim 12\ 000\text{kW}\cdot\text{h}$
Active Energy	Joule-Thief™	低功耗,输出电能水平高,集成度好,成品套件
Linear	LTC3588-1	集成低损耗、全波桥式整流器和高效率降压型转换器

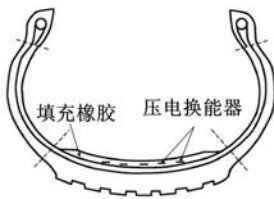


图 11 压电轮胎发电机原理图

4.2 压电振动发电机发展趋势

随着纳米技术、微机械加工技术、大规模集成电路制作技术的迅速发展,压电振动发电机研究重点及发展趋势主要包括以下几个方面。

4.2.1 发电机机械结构

随着微机械加工技术的不断提高和压电材料研究的不断深入,压电发电机将逐渐向微型化、集成化方向发展。这就要求压电振动发电机要提高能量转换密度、减小体积且必须与 MEMS 加工工艺相兼容。同时,必须加强研究具有自适应调频及多方向能力的压电发电机,拓宽发电机响应频带。

4.2.2 接口电路

现有能量接口电路自身消耗能量较高,影响输出电能水平及能量转换效率。需要通过改进充电控制策略降低控制电路自身能耗,提高压电发电机实用价值。

4.2.3 压电材料

需要开发高性能、可植入式压电材料,压电纳米材料比传统压电材料具有更高能量转换密度,有利于实现压电振动发电机的微型化。针对医疗用压电发电机,需要研制可植入式新型压电材料,为植入式医疗设备或随身低功耗电子设备供电。

5 结语

研究压电振动发电技术,目的是解决各种微

小电子设备电能供给问题,目前国内外的研究已经取得了一定进展。本文简要介绍了压电发电机的工作原理及压电元件相关研究动向,对现有能量接口技术与频率调谐技术进行了归纳总结,并提出压电振动发电机研究的发展方向。相信在未来,压电振动发电机将会在更多领域得到应用,在利用可再生清洁能源的同时推动社会的进步与发展。

参考文献:

- [1] Beeby S P, Tudor M J, White N M. Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(12):175-195.
- [2] Küah H, Najafi K. Energy Scavenging from Low-frequency Vibrations by Using Frequency Up-conversion for Wireless Sensor Applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(3):261-268.
- [3] Liu W Q, Feng Z H, He J, et al. Maximum Mechanical Energy Harvesting Strategy for a Piezoelement [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6):2130-2136.
- [4] Beeby S P, Tudor M J, Torah R N, et al. Macro and Micro Scale Electromagnetic Kinetic Energy Harvesting Generators [C]//Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS - DTIP'06. Stresa, Lago Maggiore, Italy, 2006:1-6.
- [5] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京:国防工业出版社, 1997.
- [6] 李晓娟, 李全禄, 谢妙霞, 等. 国内外压电陶瓷的新进展及新应用[J]. *硅酸盐通报*, 2006, 25(4):101-106.
- [7] Kim H, Tadesse Y, Priya S. Piezoelectric Energy Harvesting[M]. New York:Springer, 2009.
- [8] Qi Y, Jafferis N T, Lyons K, et al. Piezoelectric Ribbons Printed onto Rubber for Flexible Energy Conversion[J]. *Nano Letter*, 2010, 10(2):524-528.
- [9] 沈星, 万建国. 具有大位移驱动能力的 RAINBOW 压电陶瓷研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2004, 22(3):429-431.
- [10] 刘智, 单小彪, 袁江波, 等. Cymbal 压电换能器发电性能的有限元仿真分析[J]. *机械设计与制造*, 2010(5):12-14.
- [11] Roundy S, Wright P K, Rabaey J. A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes [J]. *Computer Communications*, 2003, 26(11):1131-1144.
- [12] 贺学锋, 温志渝, 温中泉, 等. 振动式压电发电机的理论模型与实验[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, 5(4):307-310.
- [13] 卢有为, 单小彪, 袁江波, 等. 悬臂梁压电俘能器的建模研究[J]. *机械设计与制造*, 2010(5):118-120.
- [14] 齐洪东, 杨涛, 韩宾, 等. 悬臂梁式压电振动发电机的建模及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(23):6359-6364.
- [15] 单小彪, 袁江波, 谢涛, 等. 不对称悬臂梁压电发电装置的实验研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(4):608-614.
- [16] Renno J M, Daqaq M F, Inman D J. On the Optimal Energy Harvesting from a Vibration Source [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 320(1):386-405.
- [17] Shu Y C, Lien I C, Wu W J. An Improved Analysis of the SSHI Interface in Piezoelectric Energy Harvesting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(6):2253-2264.
- [18] Lefeuvre E, Badel A, Richard C, et al. A Comparison between Several Vibration-powered Piezoelectric Generators for Standalone Systems[J]. *Sensors and Actuators*, 2005, 126(2):405-416.
- [19] Ottman G K, Hofmann H F, Bhatt A C, et al. Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(5):669-676.
- [20] Ottman G K, Hofmann H F, Lesieutre G A. Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-down Converter in Discontinuous Conduction Mode[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(2):696-703.
- [21] Lallart M, Garbuio L, Petit L, et al. Double Synchronized Switch Harvesting(DSSH): a New Energy Harvesting Scheme for Efficient Energy Extraction[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics and Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(10):2119-2129.
- [22] Zhu D, Tudor M J, Beeby S P. Strategies for Increasing the Operating Frequency Range of Vibration Energy Harvesters: a Review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2):022001-022029.
- [23] Wu X, Lin J, Kato S, et al. A Frequency Adjustable Vibration Energy Harvester [C]//Proceedings of PowerMEMS 2008+ MicroEMS2008. Sendai, Japan, 2008:245-252.
- [24] Challa V R, Prasad M G, Shi Yong, et al. A Vibration Energy Harvesting Device with Bidirectional Resonance Frequency Tenability[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(1):015035-035044.
- [25] Peters C, Maurath D, Schock W, et al. Novel Electrically Tunable Mechanical Resonator for Energy

- Harvesting [C]//Proceedings of PowerMEMS 2008+ MicroEMS2008. Sendai, Japan, 2008; 253-258.
- [26] Eichhorn C, Goldschmidtboeing F, Woias P. A Frequency Piezoelectric Energy Convert Based on a Cantilever Beam[C]//Proceedings of PowerMEMS 2008+ MicroEMS2008. Sendai, Japan, 2008; 309-320.
- [27] Charnegie D. Frequency Tuning Concepts for Piezoelectric Cantilever Beams and Plates for Energy Harvesting[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2007.
- [28] Lallart M, Anton S, Inman D. Frequency Self-tuning Scheme for Broadband Vibration Energy Harvesting[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(9): 897-906.
- [29] Guyomar D, Badel A. Nonlinear Semi-passive Multimodal Vibration Damping; an Efficient Probabilistic Approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294: 249-268.
- [30] Ferrari M, Ferrari V, Guizzetti M, et al. Piezoelectric Multifrequency Energy Converter for Power Harvesting in Autonomous Microsystems[J]. Sensors and Actuators, 2008, 142(1): 329-335.
- [31] Kymissis J, Kendall C, Paradiso J, et al. Parasitic Power Harvesting in Shoes[C]//2nd IEEE International Conference on Wearable Computing. Pittsburgh, PA, USA, 1998: 132-140.
- [32] 廖海洋, 钟正青. 压电陶瓷轮胎发电机的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1327-1331.
- [33] Guigon R, Chaillout J J, Jager T, et al. Harvesting Raindrop Energy: Experimental Study[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(1): 015039-015045.
- [34] Marzeneki M, Basrou S, Charlot B, et al. Design and Fabrication of Piezoelectric Micro Power Generators for Autonomous Microsystems[C]//Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS-DTIP'05. Montreux, Switzerland, 2005: 299-302.
- [35] Jeon Y B, Sood R, Jeong J H, et al. MEMS Power Generator with Transverse Mode Thin Film[J]. Sensors and Actuators, 2005, 122(1): 16-22.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 朱莉娅, 女, 1986 年生。南京航空航天大学航空宇航学院博士研究生。研究方向为传感器与测试计量技术、振动能量收集技术等。获中国专利 4 项。发表论文 3 篇。陈仁文, 男, 1966 年生。南京航空航天大学航空宇航学院教授、博士研究生

导师。香烟, 女, 1986 年生。南京航空航天大学航空宇航学院硕士研究生。

(上接第 3005 页)

参考文献:

- [1] Srivastava N, Haque I. A Review on Belt and Chain Continuously Variable Transmissions (CVT): Dynamics and Control[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44: 19-41.
- [2] Sluis F, Dongen T, Spijk G, et al. Efficiency Optimization of the Pushbelt CVT[J]. SAE Paper, 2007-01-1457, 2007.
- [3] 何仁, 夏晶晶, 张涌, 等. 基于滞后特性的无级变速器速比控制策略[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1403-1406.
- [4] Sluis F. A New Pump for CVT Applications[J]. SAE Paper, 2003-01-3207, 2004.
- [5] 罗勇, 孙冬野, 秦大同, 等. 考虑 CVT 效率的无级变速车辆最佳经济性控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 80-86.
- [6] 卢延辉. 双状态无级变速器综合控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [7] Ryu W, Kim H. CVT Ratio Control with Consideration of CVT System Loss[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(4): 459-465.
- [8] Ryu W, Kim H. Belt-pulley Mechanical Loss for Metal Belt Continuously Variable Transmission[J]. Proc. IMechE Part D: J. Automotive Engineering, 2007, 221: 57-65.
- [9] Nasdal R, Link M. GALOP - IAV's Universal Speed Ratio Selection Strategy for ATs, CVTs, and Hybrid Drivetrains[J]. SAE Paper, 2002-01-1256, 2002.
- [10] Masahiro Y, Tatsuo W, Hirofumi O, et al. Hydraulic System, Shift and Lockup Clutch Controls Developed for a Large Torque Capacity CVT[C]//CVT Congress Paper 04CVT-07, SAE International, Detroit, 2004: 1850-1857.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 郝允志, 男, 1982 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生, 西南大学智能传动工程技术研究中心讲师。主要研究方向为车辆动力传动及其综合控制。发表论文 3 篇。孙冬野, 男, 1966 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。秦大同, 男, 1956 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。尹燕莉, 女, 1980 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。