

多方向压电振动能量收集技术与进展

张旭辉^{1,2}, 谭厚志¹, 杨文娟^{1,2}, 左 萌¹, 樊红卫^{1,2}

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要:煤矿井下综采设备工作时会产生较大振动, 利用压电振动能量收集系统实现煤矿综采设备无线监测节点自供电, 有望解决传统化学电池使用寿命有限, 更换困难, 污染环境等问题。传统线性能量收集装置的谐振频率难以满足外界振动复杂多变的要求, 导致俘能效率低下。如何提高压电振动系统俘能效率是一个亟待解决的问题。多方向是提高复杂振动环境压电俘能效率的有效途径。该文从击打式和悬臂梁式两种能量转换方式总结分析国内外学者在多方向振动能量收集方面的研究, 从阵列式、自调谐、非线性、频率泵浦、弹性放大器等方面分析多方向振动能量收集系统的效率提升技术; 最后, 从采用新型压电材料提升俘能效率、考虑非线性和多场耦合动力学优化俘能结构、工程应用研究等方面对多方向压电能量收集技术进行了展望。

关键词:压电式能量收集装置; 振动能量收集; 效率提升; 多方向; 宽频带

中图分类号: TN384; TD67; TM919 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.031

Research and Development of Multi-directional Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Technology

ZHANG Xuhui^{1,2}, TAN Houzhi¹, YANG Wenjuan^{1,2}, ZUO Meng¹, FAN Hongwei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: When the coal mine comprehensive mining equipment works, it will generate large vibration. The piezoelectric energy harvesting (PEH) system can be used to collect the vibration energy during the mining equipment working and realize the self-power supply of the wireless monitoring node of the mining equipment, thus the problems such as limited service life of traditional chemical battery, difficulty in replacement and environmental pollution are expected to solve. The resonant frequency of the traditional linear energy harvesting device is difficult to meet the complex and variable requirements of external vibration, resulting in low energy efficiency. How to improve the energy harvesting efficiency of piezoelectric vibration system is an urgent problem to be solved. The multi-direction is an effective way to improve piezoelectric energy harvesting efficiency in complex vibration environments. The researches on multi-directional vibration energy harvesting by domestic and foreign scholars from the two energy conversion modes of impact and cantilever beam are summarized and analyzed in this paper. The efficiency improvement technology of multi-directional vibration energy harvesting system is analyzed from the aspects of array, self-tuning, non-linearity, frequency pumping and elastic amplifier etc. Finally, the prospects of multi-directional piezoelectric energy harvesting technology are presented from the aspects of using new piezoelectric materials to enhance energy harvesting efficiency, the engineering applications by considering non-linearity and multi-field coupling dynamic optimization of energy harvesting structure.

Key words: piezoelectric energy harvesting equipment; vibration energy harvesting; efficiency improvement; multi-direction; wide band

0 引言

随着微电子技术的飞速发展, 传感器技术已在

环境监测^[1-2]、航空^[3-4]、汽车^[5-6]、物联网^[7-8]等领域

得到了广泛的应用。目前, 大多数传感器以电池供

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 国家绿色制造系统集成基金资助项目(工信部节函[2017]327号); 中国博士后科学基金面上基金资助项目(2015M582692); 陕西省创新人才计划基金资助项目(2018TD-032)

作者简介: 张旭辉(1972-), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事智能检测与控制, 环境能量收集等方面的研究。E-mail: xust_zxh@163.com.

电为主,而传统化学电池存在使用寿命有限,体积大,更换难,性能受环境影响严重等问题,故而寻找其替代品至关重要。自然环境中存在着太阳能、热能、振动能等多种能量形式,太阳能、热能等由于对自然环境的依赖性较大,在某些场合无法使用,振动能由于普遍存在且能量密度高而具有极大的优越性。根据能量转换的机理不同,振动能量收集方式主要有静电式^[9-11]、电磁式^[12-15]和压电式^[16-30]3大类。与其他两种振动能量收集方式相比,压电式能量收集具有供能充足,受环境影响小,无污染和易于实现小型化和集成化等优点,并因能满足低能耗产品的电能需求而成为目前研究的热点之一^[31]。

研究表明,当外界振动频率与压电俘能器谐振频率相匹配时,俘能效率最高。但实际应用时不同场合的振动方向和频率往往不同,且同一场合振动频率和方向也时有变化,这将严重影响压电俘能器的俘能效率。故使压电俘能器对多个方向上的振动能量进行收集是提高其俘能效率的一种重要途径。

1 多方向压电振动能量收集装置现状

压电振动能量收集技术的研究最早始于2000年左右,国内外很多高校和研究机构都在此方面取得了相应进展。依据压电振动能量收集装置的能量转换原理不同,可将其主要分为击打式和悬臂梁式。

1.1 击打式多方向压电振动能量收集装置

击打式压电振动能量收集装置的压电材料为压电陶瓷。压电陶瓷的特点是^[32-33]:压电性强,介电常数高,便于成型加工;但机械品质因数较低,电损耗较大,稳定性较差。Lee等^[34]的研究表明,压电陶瓷在高频周期载荷下工作时会产生疲劳裂纹,甚至发生断裂,这也是压电陶瓷使用过程中的一大缺陷。击打式压电振动能量收集装置的工作原理是利用了 d_{33} 模式^[35],作用力方向与极化方向相同,通过质量块撞击压电振子使其产生变形,从而实现对振动能量的收集。击打式压电振动能量收集装置发电时间短,但能产生较高的电压,且其机电耦合系数较高。

Davide Alghisi等^[36]提出了一种三轴球可变自由度的击打式压电振动能量收集装置,该装置振动时通过内部球体击打相应方向的压电陶瓷片产生电能,可对多个方向的振动能量进行收集,图1为该能量收集装置的示意图。实验结果表明,该装置适用于

低频环境中,且工作频带较宽。当装置外加电阻为10 k Ω 时,每个发电薄片在1.8 g($g=9.8$ m/s²)平均加速度白噪声激励下可实现4 μ W的功率转换。通过给该装置的输出进行整流,人以4 km/h的速度行走1 min可给470 mF的电容器输送1 mJ的能量。

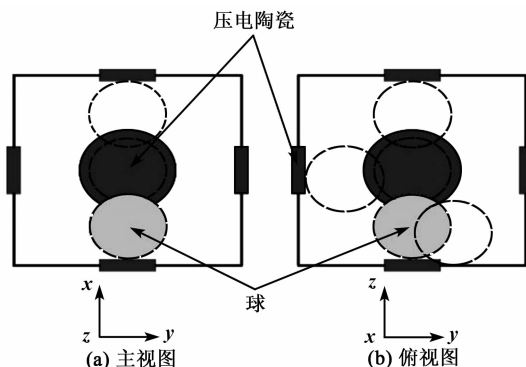


图1 三轴球压电能量收集装置示意图

张旭辉等^[37-38]提出了一种全方向振动能量收集器及其改进装置,该装置利用击锤击打压电陶瓷产生电能,如图2所示。图2(a)中装置谐振频率与外界振动频率匹配时输出电压高达28 V,且能对多个方向上的振动能量进行收集。图2(b)为其改进后的全方向振动能量收集装置,改进后的装置各个俘能模块之间相互独立,可更换且系统阻尼较小。实验研究表明,该改进装置(见图2(b))由于能够转换方向,从而使其有效俘能带宽较改进前(见图2(a))有明显增加,且其输出电压峰值较改进前提高约11倍,最大输出功率可达到28.75 μ W。但由于其压电材料为压电陶瓷,长时间在大振幅,高频率作用下易碎,故其更适合在低频、小振幅的环境下工作。

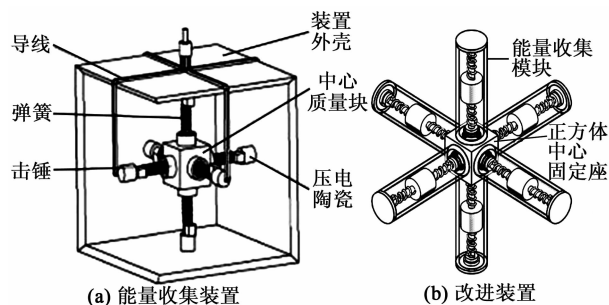


图2 全方向击打式能量收集装置及其改进装置

1.2 悬臂梁式多方向压电振动能量收集装置

悬臂梁式压电振动能量收集装置的压电材料多为压电薄膜材料和压电陶瓷,其中压电薄膜材料的典型代表是聚偏氟乙烯(PVDF),PVDF的压电特性首次由Heiji Kawai于1969年提出,其材质柔韧,

阻抗低,压电电压常数高,响应频带宽且抗腐蚀,因能加工成大面积的膜而非常适合于压电式振动能量收集应用。但其压电应变常数较低,导致能量转换效率偏低^[32,39]。压电陶瓷较压电薄膜材料能量转换效率高,但其材质柔韧性相对较差,长时间在交变应力作用下易产生疲劳裂纹。悬臂梁式压电振动能量收集装置的工作原理主要运用 d_{31} 模式^[35],作用力方向与极化方向垂直,当能量收集装置受到外界振动的激励时,由于正压电效应的作用,就会在压电材料表面输出电能。

针对悬臂梁式多方向压电振动能量收集装置,国内外一些专家学者也对其进行了深入的研究。国外, Su W J 等^[40]于2013年提出了一种磁力耦合的多方向振动能量收集装置,如图3所示。该装置由1个弹簧-质量块系统,2个主悬臂梁和1个辅助悬臂梁3部分组成,3个组成部分之间通过磁力耦合作用构成1个非线性系统,可以收集3个方向的振动能量。其中,装置沿竖直方向振动时可输出电压幅值为10.2 V,且可收集较宽频带范围内的振动能量,但是装置由于引入多个磁铁而使系统较复杂,对其建模分析存在一定困难。

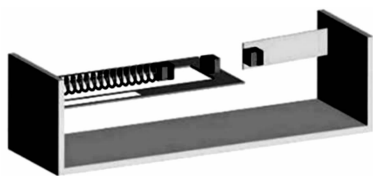


图3 一种磁力耦合的多方向能量收集装置示意图

意大利卡塔尼亚大学的 Andò B 等^[41]研究了一对磁力耦合的双稳态非线性压电能量收集装置,如图4所示。该装置的工作频带较宽且能够收集 y 、 z 两个方向上的振动能量,能量收集效率较高,在实验中可实现 $5.6 \mu\text{W}$ 的功率输出。

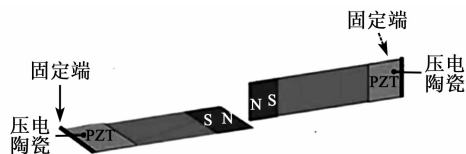


图4 磁力耦合双稳态非线性压电能量收集结构

陈仁文等^[42]提出了一种立方体-质量块结构的全方向振动能量收集装置,如图5所示。该装置的拾能单元为 Rainbow 型,实验表明该装置可以对环境中多个方向上的振动能量进行收集,从而提高了机械能向电能的转换效率。但是当振动方向处于装置对角线方向时,能量收集效率较低。

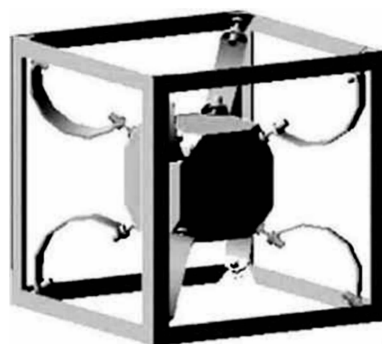


图5 立方体-质量块结构能量收集装置

陈仁文等^[43]还提出了另一种蒲公英状的全方向能量收集装置,如图6所示。该装置由一个多面体支撑块,多个悬臂梁结构和基座组成,其中多个悬臂梁按不同的方位均匀安装在支撑块上。当其随外界产生受迫振动时,总有相应方向的悬臂梁会产生弯曲,从而利用应变片的正压电效应进行能量转换,实现全方向的振动能量收集。另外,该能量收集装置为复合悬臂梁结构,若悬臂梁的共振频率不同,则在某一方向下,该装置能进行宽频带的振动能量收集。

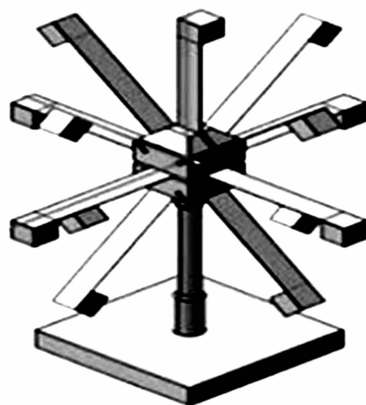


图6 蒲公英状能量收集装置

总之,多方向压电振动能量收集装置相对于单方向装置由于能量收集方向增多而使其俘能效率提高,但外界振动环境往往多变,而振动频率等因素的改变会使装置的能量收集效率降低,故而需要进一步研究多方向压电振动能量收集装置的俘能效率提升方法。

2 多方向压电振动能量收集效率提升方法

针对目前多方向压电振动能量收集装置发电能力提升问题,国内外相关学者都对此进行了深入的研究,并取得了较大进展。主要是通过阵列式^[44-45]、自调谐^[46-47]、非线性^[48-50]等方法拓宽振动能量收集装置的俘能带宽;通过转升频^[51-52]来增加

振动能量收集装置单位时间内的响应次数;通过自动参数谐振技术^[53-54]来放大基础激励等。

2.1 阵列式

阵列式能量收集是在振动能量收集装置上安装多个压电俘能单元,且每个俘能单元的谐振频率不同,装置随外界环境发生振动时,必有相应的压电振子能够对外界振动进行有效收集,从而拓宽整个压电振动能量收集装置的俘能带宽。图 7 为 Tanjin Yildirim 等^[44]提出的一种三自由度的阵列式振动能量收集装置。图中 4 个悬臂梁压电振子的悬臂梁宽度、质量块质量均不同,故其谐振频率均不相同,该振动能量收集装置通过多个压电振子俘能带宽叠加实现拓频的功能。实验结果显示,当 4 个悬臂梁耦合阵列配置时,在 1.5 g($g=9.8\text{m/s}^2$)的激励下,其模态响应会出现 8 个共振峰,可拓宽频带为 5~12.5 Hz。另外,温志渝等^[45]研究指出,若阵列式振动能量收集装置各压电俘能单元属性相同且使用同一个顶端质量块(见图 8),则各个压电俘能单元串联可提高能量收集装置输出电压。实验数据表明,多个压电振子串联后的开路输出电压约为并联的 4.5 倍。

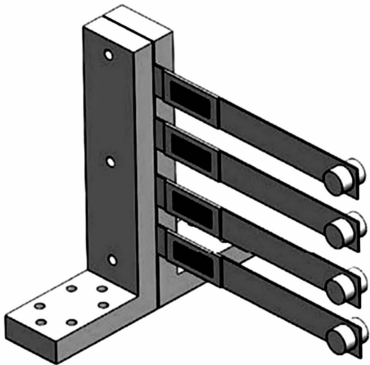


图 7 一种三自由度阵列式振动能量收集装置

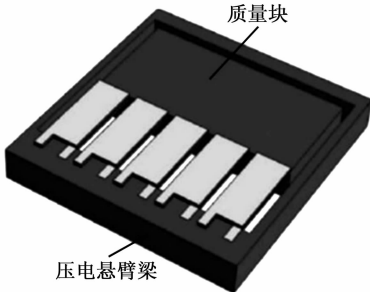


图 8 MEMS 压电阵列振动能量收集装置

2.2 自调谐

自调谐振动能量收集通过能量收集装置在振动过程中自发调节结构,改变装置谐振频率使其与外

界振动频率相匹配,实现共振,从而提高能量收集效率。国外,Jo S E 等^[55]在 2012 年提出了一种利用悬臂梁自身的水平滑动来实现装置自身频率调节的结构,如图 9 所示。实验表明,在振动过程中,该装置其悬臂梁能够以凸台为中心滑动,且能在几秒钟之内实现外界振动频率与装置谐振频率相一致,实现自调谐。张旭辉等^[56]于 2015 年提出了一种自调谐全方向振动能量收集装置,如图 10 所示。当能量收集装置随外界产生受迫振动时,组合悬臂梁可根据外界振动方向自动调节方向,以达到与外界环境振动方向相适应,实现能量的有效收集与转换。另外,通过改变上、下永磁体的间距可调节系统的谐振频率,以接近外界环境振动频率,提高能量转换效率,适用范围较广。

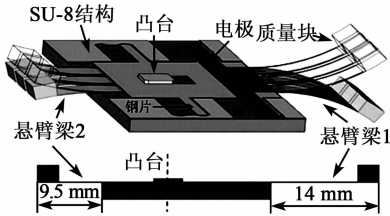


图 9 滑块悬臂梁自调谐结构示意图

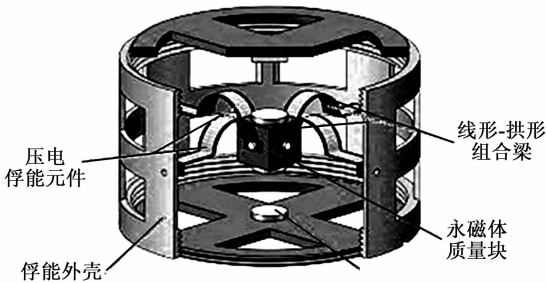


图 10 自调谐全方向振动能量收集装置

2.3 非线性

大量研究表明,线性的能量收集装置只有在外界振动源发生共振时才能输出最大的电能,但外部振动环境多变,这使线性振动能量收集装置的俘能效率降低。为此,国内外专家学者从线性振动能量收集装置的研究转到非线性收集装置的研究。意大利佩鲁贾大学 NiPS 实验室在国际上较早提出了“非线性振动能量俘获”思想。并对非线性拓宽振动能量收集装置的俘能带宽做了理论研究。在构建非线性压电俘能器方面,概括起来大致分为两类^[57-58]:

- 1) 引入非线性磁力。
- 2) 引入弯曲压电梁。

2015 年,蓝春波等^[59]提出了一种带对称碰撞磁斥力双稳态压电振动能量收集装置,如图 11 所

示。装置中的碰撞弹簧可以将压电振子的单势阱运动转变为双势阱大幅值运动,不仅增大了压电振子的振动幅值且拓宽了俘能频带,提高了其俘能效率。Yang 等^[60]使用弧形压电贴片作为能量收集装置中的核心转换元件,以改善其性能,如图12所示。实验表明,弧形压电俘能单元能够产生等同于平板式压电俘能单元 2.55~4.25 倍的能量。

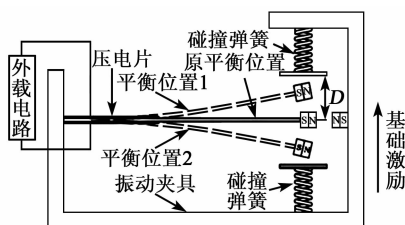


图 11 带对称碰撞磁斥力双稳态振动能量收集装置

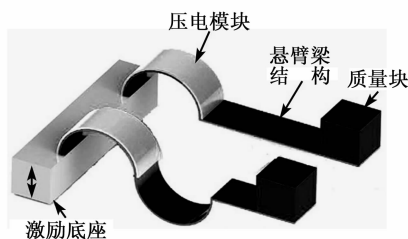


图 12 弧形压电贴片能量收集装置

张旭辉等^[61]于 2017 年提出了一种新型组合梁式双稳态压电振动能量收集装置,如图13所示。该装置可通过调节磁铁的间距使其动态响应呈现大幅值、宽频带运动,且由于组合悬臂梁的引入,使其能够收集多个方向上的振动能量,具有结构非线性,适用范围广。

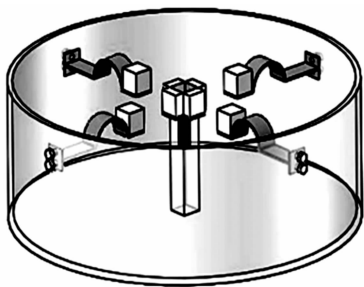


图 13 新型组合梁式双稳态压电振动能量收集装置

2.4 频率泵浦

频率泵浦是提高振动能量收集效率的方法之一,能够使装置在相同时间内产生更多的振动,以此来提高能量收集效率,一种简单的方法是利用弹簧来实现输入信号振动频率的放大。因此,有关专家学者利用惯性质量的低频运动激发压电振子的高频

谐振原理,制成了各种振动能量收集装置。Huicong Liu 等^[62]提出了一种利用悬臂式止动器的压电式能量收集装置,如图14所示。该装置由低固有频率的激励振荡器和高固有频率的转升频止动器组成。当激励振荡器振动幅值超出一定范围而激励转升频止动器时,转升频止动器将以更高的振动频率振动,从而实现单位时间内振动频率的提升,提高装置输出。

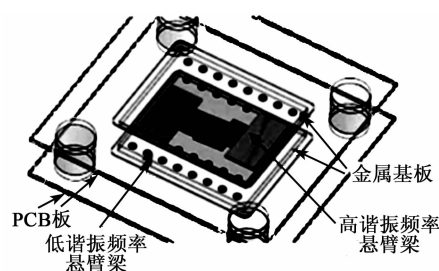


图 14 悬臂式止动器压电能量收集装置

王晨等^[63]提出了一种上变频的宽频带稳频能量收集器,如图15所示。图中,压电材料粘贴在发电悬臂梁上。在悬臂梁的挠度极限范围内,悬臂两侧各放置两个柔性止动器。装置基座上安装具有磁吸力的永磁体。当柔性挡块撞击悬臂梁时,其振动首先在其耦合振动频率下激励,然后以其自身较高的谐振频率激励,增加单位时间内的响应次数。且磁吸力可将悬臂梁的阱间运动扩展到更低的频带,降低阱间势垒,从而提高装置的俘能效率。数据表明,此方法可将能量收集装置的俘能效率显著提高 35 倍。

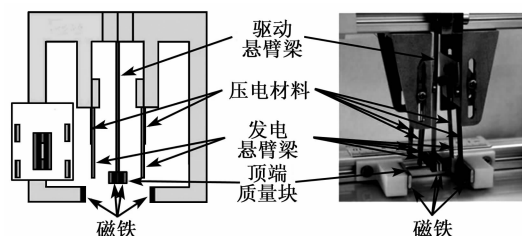


图 15 上变频的宽频带稳频能量收集器示意图和实物图

2.5 弹性放大器

弹性放大器是在振动能量收集装置与基础激励之间引入线性放大器,通过线性放大器将基础激励幅值放大后,为振动能量收集装置提供更大的激励幅值,同时也会使线性振动能量收集装置更快进入谐振状态或使非线性振动能量收集装置更快进入高能状态,从而提高振动能量收集装置的俘能效率。21 世纪 20 年代初,国内外专家学者已对自动参数

谐振技术做了研究,并证实能够提高振动能量收集装置的俘能效率^[64-66]。

近年来,王光庆等^[53]提出了一种带弹性放大器的双稳态压电能量收集装置,如图16所示。该装置借助压电能量采集器与基础激励之间的线性放大器,实现基础激励的放大。实验证明,通过选用合理的弹簧参数,可使带线性放大器的能量采集器轻松进入高能状态,另外增加能量采集器和线性放大器的质量比和刚度比可拓宽能量收集频带,有效地缓解能量采集装置在低激励幅值下俘能效率不高的现状。

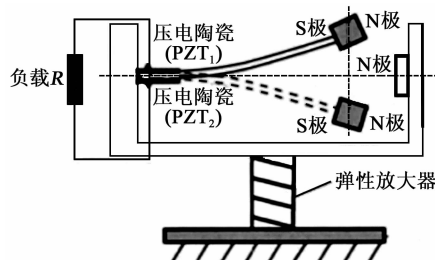


图16 带弹性放大器的双稳态压电能量收集装置

Yu Jia 等^[54]提出了一种带放大作用的自动参数谐振器,如图17所示。该能量收集装置的放大器采用软钢片作为谐振器的弹簧,可通过调整基部夹具的定位来改变软钢片的有效长度,从而实现放大器刚度的调节。实验表明,该自动参数谐振器相比单悬臂梁可更早进入谐振状态,且具有更高的功率输出。

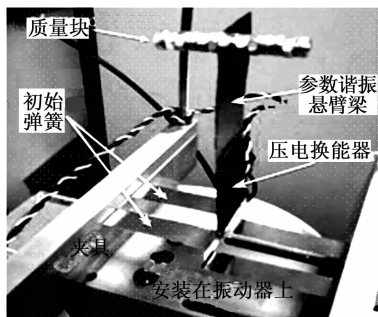


图17 带放大作用的自动参数谐振器实物图

3 多方向压电振动能量收集面临的难题

综合国内外研究的现状,多方向压电振动能量收集技术的研究主要面临以下几个方面的难题。

3.1 智能结构的设计

振动能量收集装置智能结构的设计有利于收集多个方向上的振动能量,且可拓宽能量收集频带,从而更好地适应外界振动环境,提高能量收集效率。虽然到目前为止,许多专家学者陆续提出了不同的

装置结构,但大多数的振动能量收集装置只对单一方向上的振动敏感,且收集频带较窄,而实际外界振动环境往往表现为低频、宽频带且具有随机性,因此如何进行多方向能量收集以及将外界振动特性与振动能量收集机构有机结合起来,是提高宽带低频环境振动能量俘获效率迫切需要解决的一个核心应用基础理论问题。

3.2 复杂系统建模与动力学特性研究

一个完整的振动能量收集装置常存在力场、磁场、重力场及电场等多场之间的耦合关系。就力-磁-电耦合而言,通过调节磁铁间距来改变磁场强弱,以此改变振动能量收集装置的受力振动状态,加之外界复杂多变的振动环境,该多场耦合非线性系统将会相当复杂;而对于振动能量收集装置本身,存在结构非线性、压电材料非线性等;对于耦合场而言,存在磁场、电路及温度场等非线性,均对复杂系统建模与分析带来一定困难。

3.3 微能量收集电路设计

振动能量收集装置转换的电能为交流电,往往需要经过能量收集电路进行整流、稳压后才能为负载供电。另外,压电材料阻抗极高,输出电流和功率较小,如何设计能量收集效率高,且能与能量收集装置实现阻抗匹配的微能量收集电路,进行机械能到电能的有效转换与利用,是目前压电振动能量收集面临的主要难题之一。

4 多方向振动能量收集发展趋势

关于振动能量收集技术的研究,虽然国内外专家学者已取得了一定进展,但目前仍然存在一些问题需要逐步解决完善。

4.1 采用新型压电材料提升俘能效率

压电振动能量收集是利用压电材料的正压电效应将机械能转换成电能,因此,压电材料的性能将直接影响能量收集装置的能量转换效率。到目前为止,压电材料主要有压电单晶体、压电陶瓷、压电聚合物、压电纤维复合材料等,对于压电材料的研究仍处在初步阶段,而新型压电材料的研究与使用对能量收集装置俘能效率的提升至关重要,故本领域将会是今后压电振动能量收集技术重点研究的内容之一。

4.2 考虑非线性和多场耦合因素的系统动力学研究优化能量收集结构

通过设计振动能量收集装置智能结构及采用新

型压电材料,可提高俘能装置对于外界低振幅、宽频带环境振动的收集效率,但装置动力学建模与解算对其响应分析至关重要。目前多数专家学者对振动能量收集装置动力学建模均采用简化的集中参数模型,在建模过程中多数未考虑电路对机械结构部分产生的影响,有的缺少对机械阻尼作用的分析等。另外,全方向振动能量收集装置结构复杂,压电材料、振源频率、加速度、机械阻尼系数及能量收集电路效率等因素都会影响俘能器的性能。因此,建立更精确的振动能量收集装置动力学模型,可以更准确地分析装置的响应特性,对装置的优化具有极其重要的意义。

4.3 振动能量收集系统工程应用研究

对于压电振动能量收集技术的研究,包括压电振动能量收集理论研究、微能量储存技术研究和能量应用研究。随着微电子技术的不断发展,在一些特殊的场合已实现压电俘能技术的应用,如高楼振动监测、可穿戴式微器件供电、无线传感器微能源供给等,但其在某些复杂恶劣环境下的微能源供给(如煤矿井下综采设备无线监测传感器供电)尚未实现,仍需进一步研究,因此,压电振动能量收集技术应用研究将成为本领域研究的热点内容之一。

5 结束语

本文研究了多方向压电振动能量收集设计及优化问题,针对如煤矿井下复杂环境下微电子低能耗设备供电问题,由于实际应用中外部环境的振动往往存在方向不确定和频率离散性,因此,要实现对外部环境中振动能量的有效收集,对振动能量收集装置效率提升方法的研究至关重要。目前,国内外针对多方向压电振动能量收集装置的研究已取得了一些进展,本文分析了近年来国内外专家的研究成果,总结了提升多方向压电振动能量收集装置效率的有效方法及其面临的难题,对多方向压电振动能量收集的研究具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] MUDULI L, MISHRA D P, JANA P K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 106: 48-67.
- [2] KS R, SREENIVAS B T H, KULKARNI A B D. Remote monitoring and reconfiguration of environment and structural health using wireless sensor networks[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 1169-1175.
- [3] LOPATIN C. Aerospace applications of optical fiber mechanical sensors[M]. Oxford, United Kingdom: Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors, 2018: 237-262.
- [4] 何永勃, 贾辉, 姜坤, 等. 基于 Android 终端陀螺仪传感器的无人机飞行姿态控制[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 474-478.
HE Yongbo, JIA Hui, JIANG Kun, et al. UAV attitude control based on gyroscope sensor of the android terminal[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 474-478.
- [5] KRIEG J G, JAKLLARI G, TOMA H, et al. Unlocking the smartphone's sensors for smart city parking[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2018, 43: 78-95.
- [6] 侯庆红, 朱春红, 梁时光. 传感器技术在电动汽车上的应用与发展趋势研究[J]. 汽车实用技术, 2018(2): 15-17.
HOU Qinghong, ZHU Chunhong, LIANG Shiguang. Application and development trend of sensor technology in electric vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2018(2): 15-17.
- [7] 丁恩杰, 金雷, 陈迪. 互联网+感知矿山安全监控系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 129-134.
DING Enjie, JING Lei, CHEN Di. Study on safety monitoring and control system of internet+ perception-mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 129-134.
- [8] HUANG Y, WANG L, HOU Y, et al. A prototype IOT based wireless sensor network for traffic information monitoring[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(2): 146-152.
- [9] ZHANG Y, WANG T, LUO A, et al. Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density[J]. Applied Energy, 2018, 212: 362-371.
- [10] HONMA H, MITSUYA H, HASHIGUCHI G, et al. A three-ports structure for electrostatic energy-harvester to lower constraint force and to enhance fast storage[C]//Kaohsiung, Taiwan: Solid-state Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2017 19th International Conference on, IEEE, 2017: 2167-2170.
- [11] 傅利峰. 基于 MEMS 技术的非线性静电式能量采集器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [12] LI Y, ZHANG W, ZHANG Y, et al. A batch-fabricated electromagnetic energy harvester based on flex-rig-

- id structures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263:571-579.
- [13] KUMAR A, BALPANDE S S, ANJANKAR S C. Electromagnetic energy harvester for low frequency vibrations using MEMS[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 79:785-792.
- [14] 吴子英, 叶文腾, 刘蕊. 一种新型双稳态电磁式振动能量捕获器动力学特性研究[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(5):848-854.
- WU Ziyang, YE Wenteng, LIU Rui. Study on dynamic characteristics of a new type of bi-stable electromagnetic vibration energy harvester[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(5): 848-854.
- [15] 刘祥建, 朱莉娅. 微型电磁振动发电装置研究新进展[J]. *机械设计与制造工程*, 2016, 45(6):18-22.
- LIU Xiangjian, ZHU Liya. New progress in research of micro electromagnetic vibration power generation device[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2016, 45(6):18-22.
- [16] 刘祥建. 环境适应型压电振动发电微电源研究新进展[J]. *机械设计与制造*, 2017(3):222-224.
- LIU Xiangjian. Development on ambient adaptation type piezoelectric vibration micro power generators [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017 (3): 222-224.
- [17] 朱秀, 许桂生, 刘锦峰. 无铅压电材料的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(4):39-48.
- ZHU Xiu, XU Guisheng, LIU Jingfeng. Research progress of lead-free piezoelectric materials[J]. *Materials China*, 2017, 36(4):39-48.
- [18] 宋汝君, 单小彪, 李晋哲, 等. 压电俘能器涡激振动俘能的建模与实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(2):55-60.
- SONG Rujun, SHAN Xiaobiao, LI Jinzhe, et al. Modeling and experimental study of piezoelectric energy harvester under vortex-induced vibration[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(02):55-60.
- [19] 郭亚子, 朱玉川. 压电叠堆执行器迟滞非线性建模与分析[J]. *压电与声光*, 2017, 39(4):520-524.
- GUO Yazi, ZHU Yuchuan. Modeling and analysis on hysteresis nonlinear characteristics of the piezoelectric stack actuators [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(4):520-524.
- [20] 樊康旗, 刘朝辉, 王连松, 等. 从人体行走中收集能量的鞋上压电俘能器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5):1272-1280.
- FAN Kangqi, LIU Zhaohui, WANG Liansong, et al. Shoe-mounted piezoelectric energy harvester for collecting energy from human walking[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5):1272-1280.
- [21] 吴义鹏, 季宏丽, 裘进浩, 等. 共振频率可调式非线性压电振动能量收集器[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(0):12-16.
- WU Yipeng, JI Hongli, QIU Jinhao, et al. A nonlinear piezoelectric vibration energy harvesting device with tunable resonance frequencies[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5):12-16.
- [22] YANG Z, ERTURK A, ZU J. On the efficiency of piezoelectric energy harvesters [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2017, 15:26-37.
- [23] SRIKANTH K V A K. State of art: Piezoelectric vibration energy harvesters [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 1091-1098.
- [24] STANTON S C, OWENS B A M, MANN B P. Harmonic balance analysis of the bistable piezoelectric inertial generator[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(15):3617-3627.
- [25] JIANG X Y, ZOU H X, ZHANG W M. Design and analysis of a multi-step piezoelectric energy harvester using buckled beam driven by magnetic excitation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 145:129-137.
- [26] WU Y, JI H, QIU J, et al. A 2-degree-of-freedom cubic nonlinear piezoelectric harvester intended for practical low-frequency vibration[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 264: 1-10.
- [27] XIE X D, CARPINTERI A, WANG Q. A theoretical model for a piezoelectric energy harvester with a tapered shape[J]. *Engineering Structures*, 2017, 144:19-25.
- [28] 白凤仙, 包华宇, 董维杰, 等. 阵列式压电俘能拓宽频带的研究[J]. *压电与声光*, 2016, 38(5):695-703.
- BAI Fengxian, BAO Huayu, DONG Weijie, et al. Study on frequency bandwidth widening by piezoelectric energy harvesters array[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(5):695-703.
- [29] TIAN Y, LI G, YI Z, et al. A low-frequency MEMS piezoelectric energy harvester with a rectangular hole based on bulk PZT film[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, 117:21-27.
- [30] CHENG Y, WU N, WANG Q. An efficient piezoelectric energy harvester with frequency self-tuning [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 396:69-82.

- [31] SAADON S, SIDEK O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 500-504.
- [32] 陈仲生. 压电式振动能量俘获理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 22-23.
- [33] 彭泽辉, 张静, 郑德一, 等. PSN-PNN-PZT 系压电陶瓷的制备及其性能研究[J]. *压电与声光*, 2017, 39(6): 928-930.
- PENG Zehui, ZHANG Jing, ZHENG Deyi, et al. Preparation and properties of PSN-PNN-PZT quaternary piezoelectric ceramics [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(6): 928-930.
- [34] LEE B S, LIN S C, WU W J. Comparison of the piezoelectric MEMS generators with interdigital electrodes and laminated electrodes [C]//San Diego, USA: Proc of Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks and Systems, 2008: 1-8.
- [35] PRIYA S, INMAN D J. *Energy Harvesting Technologies*[M]. Nanjing: Dongnan University Press, 2011: 3-4.
- [36] ALGHISI D, DALOLA S, FERRARI M, et al. Ball-impact piezoelectric converter for multi-degree-of-freedom energy harvesting from broadband low-frequency vibrations in autonomous sensors[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 1529-1532.
- [37] 张旭辉, 林然. 全方向振动能量收集系统[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(1): 84-87.
- ZHANG Xuhui, LIN Ran. Collection system of omnidirectional vibration energy[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(1): 84-87.
- [38] 张旭辉, 吴中华, 邓鹏飞, 等. 可更换式多方向振动能量收集装置优化研究[J]. *压电与声光*, 2017, 39(4): 594-598.
- ZHANG Xuhui, WU Zhonghua, DENG Pengfei, et al. Study on the optimized design of replaceable multi-directional vibration energy harvesting device[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, 39(4): 594-598.
- [39] 狄长安, 薛松松, 夏镇娟. PVDF 薄膜机电特性试验装置设计[J]. *压电与声光* 2014, 36(5): 765-767.
- DI Chang'an, XUE Songsong, XIA Zhenjuan. An experimental setup design to study electromechanical characterization of PVDF films [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(5): 765-767.
- [40] SU W J, ZU J. An innovative tri-directional broadband piezoelectric energy harvester[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(20): 203901.
- [41] ANDÒ B, BAGLIO S, MAIORCA F, et al. Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energy harvester[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 202: 176-182.
- [42] 侯志伟, 陈仁文, 刘祥建. 多方向压电振动能量收集装置及其优化设计[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(16): 33-37.
- HOU Zhiwei, CHEN Renwen, LIU Xiangjian. Optimization design of multi-direction piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(16): 33-37.
- [43] 刘祥建, 陈仁文, 侯志伟. 蒲公英状压电振动能量收集装置宽频带设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1850-1856.
- LIU Xiangjian, CHEN Renwen, HOU Zhiwei. Wide-band design of dandelion-shape piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1850-1856.
- [44] YILDIRIM T, ZHANG J, SUN S, et al. Design of an enhanced wideband energy harvester using a parametrically excited array[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 410: 416-428.
- [45] 余引, 温志渝, 赵兴强, 等. MEMS 压电阵列振动能量收集器[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(8): 1033-1037.
- SHE Yin, WEN Zhiyu, ZHAO Xingqiang, et al. The MEMS vibration energy harvester with piezoelectric array[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(8): 1033-1037.
- [46] 朱莉娅, 陈仁文, 刘祥建, 等. 自调谐宽频带压电振动发电机的改进[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(3): 327-332.
- ZHU Liya, CHEN Renwen, LIU Xiangjian, et al. Improved design of self-tuning broadband piezoelectric vibration generator[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(3): 327-332.
- [47] ABOULFOTOH N A, ARAFA M H, MEGAHED S M. A self-tuning resonator for vibration energy harvesting[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201: 328-334.
- [48] FAN Kangqi, XU Chunhui, WANG Weidong, et al. Broadband energy harvesting via magnetic coupling between two movable magnets[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(8): 084501.
- [49] 陈仲生, 骆彦廷, 杨拥民. 非线性压电振动能量俘获行为建模及其不同参数影响机理研究[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(2): 154-158.
- CHEN Zhongsheng, LUO Yantian, YANG Yongmin,

- Modeling of nonlinear piezoelectric vibration energy harvesting behaviors and the effects of its different parameters[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 154-158.
- [50] ARRIETA A F, DELPERO T, BERGAMINI A E, et al. Broadband vibration energy harvesting based on cantilevered piezoelectric bi-stable composites[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(17): 173904.
- [51] LIU H, LEE C, KOBAYASHI T, et al. Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 186: 242-248.
- [52] TANG Q, YANG Y, LI X. Repulsively driven frequency-increased-generators for durable energy harvesting from ultra-low frequency vibration[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(4): 045004.
- [53] 王光庆, 杨斌强, 徐文潭, 等. 非线性宽频压电振动能量采集器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 221-230.
- WANG Guangqing, YANG Binqiang, XU Wentan, et al. Research on a nonlinear broadband piezoelectric vibration energy harvester[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2016, 37(1): 221-230.
- [54] JIA Y, SESHIA A A. An auto-parametrically excited vibration energy harvester[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220: 69-75.
- [55] JO S E, KIM M S, KIM Y J. Passive-self-tunable vibrational energy harvester[C]// Beijing, China: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (Transducers), 2011 16th International. IEEE, 2011: 691-694.
- [56] 张旭辉, 吴中华, 邓鹏飞, 等. 自调谐全方向振动能量收集装置的设计及优化[J]. 压电与声光, 2016, 38(6): 915-919.
- ZHANG Xuhui, WU Zhonghua, DENG Pengfei, et al. Design and optimization of self-tuning omnidirectional vibration energy harvester[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016, 38(6): 915-919.
- [57] HARNE R L, WANG K W. A review of the recent research on vibration energy harvesting via biastable systems[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22, (2): 023001.
- [58] PELLEGRINI S P, TOLOU N, SCHENK M, et al. Bi-stable vibration energy harvesters: a review[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24 (11): 1303-1312.
- [59] 蓝春波, 秦卫阳. 带碰撞双稳态压电俘能系统的俘能特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 191-202.
- LAN Chunbo, QIN Weiyang. Research on energy harvesting characteristics of collisional bistable piezoelectric energy harvesting system[J]. Chinese Journal of Physics, 2015, 64(21): 191-202.
- [60] YANG Z, WANG Y Q, ZUO L, et al. Introducing arc-shaped piezoelectric elements into energy harvesters[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 260-266.
- [61] 张旭辉, 赖正鹏, 吴中华, 等. 双稳态多悬臂梁式压电振动能量收集系统的响应特性研究[C]//北京: 中国力学大会, 2017: 99.
- [62] LIU H, LEE C, KOBAYASHI T, et al. Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 186: 242-248.
- [63] WANG C, ZHANG Q, WANG W. Low-frequency wideband vibration energy harvesting by using frequency up-conversion and quin-stable nonlinearity [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 399: 169-181.
- [64] ARAFA M, AKL W, ALADWANI A, et al. Experimental implementation of a cantilevered piezoelectric energy harvester with a dynamic magnifier[C]//S. l.: International Society for Optics and Photonics, 2011, 7977: 79770Q.
- [65] LI W, LIU T S, HSIAO C C. A miniature generator using piezoelectric bender with elastic base[J]. Mechatronics, 2011, 21(7): 1183-1189.
- [66] WANG H, SHAN X, XIE T. An energy harvester combining a piezoelectric cantilever and a single degree of freedom elastic system[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2012, 13(7): 526-537.