

DOI: 10.3901/JME.2022.20.027

压电能量俘获结构及其升频转换技术的发展现状*

吴义鹏¹ 李森¹ 蓝春波¹ 周圣鹏² 谢维泰³ 裘进浩¹ 季宏丽¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016;

2. 上海卫星工程研究所 上海 201109;

3. 中国航空无线电电子研究所电子部 上海 200241)

摘要: 压电材料作为一种良好的机电换能元件, 具有体积小、成本低、工作性能可靠等优势, 但如何设计压电振子高效地俘获环境振动能, 仍是本领域的关键技术难题。以定频式、调频式和宽频式三类典型压电振子为代表的结构共振频率匹配设计能部分解决上述难题, 但面向环境低频、超低频振动能俘获, 上述振子仍面临输出功率低、可靠性差等问题, 途径之一是通过机械式升频转换技术将低频激励转换成压电振子的高频振荡, 同时突破超低频压电元件功率密度低的限制。几类机械式升频转换技术被区分并简要介绍, 重点阐述一种借助非线性系统内共振现象实现的机械升频转换方法。内共振升频技术具有激励加速度阈值低、升频转化能量损失少等优势, 进一步拓宽压电振子领域内的机械式升频转换研究。

关键词: 振动能量收集; 压电振子; 共振频率匹配; 升频转换; 内共振

中图分类号: TB122; TB535

Recent Development of Piezoelectric Energy Harvesting Structures and the Technology of Frequency Up-converting Oscillators

WU Yipeng¹ LI Sen¹ LAN Chunbo¹ ZHOU Shengpeng²
XIE Weitai³ QIU Jinhao¹ JI Hongli¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109;

3. Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200241)

Abstract: Piezoelectric material is a kind of excellent electromechanical conversion element, has the advantages of small volume, low cost, reliability and so on. But how to design piezoelectric oscillators and efficiently scavenge ambient vibration energy, is still a key technical problem needed to be solved in the corresponding field. Three kinds of typical piezoelectric oscillators based on the resonant frequency matching strategy, represented by constant resonant frequency, resonant frequency tuning and wideband operating frequency structures, are the partial solution to the problem mentioned above. However, the problems such as the low output power and the reliability of oscillating structures are still existing, while harvesting the ambient low or ultra-low frequency vibration energy. To up-convert the excitation frequency into high oscillation frequency of piezoelectric structures through mechanical frequency up-conversion technology, is a reasonable approach and can break through the low power density limitation of piezoelectric elements under the condition of ultra-low frequency. Several kinds of mechanical frequency up-conversion techniques are distinguished and introduced, especially for an internal resonance based frequency up-conversion approach in nonlinear vibration systems. Such approach has the advantages of low threshold of excited acceleration, less energy losses during the frequency conversion stage, etc., broadening the mechanical frequency up-conversion research in the field of piezoelectric oscillators.

* 国家自然科学基金(51705251)和中央高校基本科研业务费(NS2021006)

资助项目。20211205 收到初稿, 20220610 收到修改稿

Key words: vibration energy harvesting; piezoelectric oscillator; resonant frequency matching; frequency up-conversion; internal resonance

0 前言

随着科学技术的持续发展, 人工智能(Artificial intelligence, AI)成为了全球目前的热点研究问题, 未来 AI 技术的发展水平必将决定一个国家在世界科技竞争体系中所处的地位。物联网技术可连接大量传感器设备, 直接感知客观世界的物理信息, 为 AI 自主学习和积累知识奠定了关键基础^[1]。随着 5G 通信技术有效地解决了时延和可靠性不达标等问题, 物联网技术将得到进一步的开发, 工业界将迎来巨大的市场机遇和革命^[2], 届时将会有数以百亿计的智能传感器节点遍布各种系统, 为 AI 技术提供源源不断的大数据流^[3-4]。

然而, 目前大多数独立自治的无线传感器节点仍然采用传统的电池供电模式, 这存在许多局限^[5]。例如频繁地充电或更换电池将产生大量后期维护费用; 大量的废旧电池会给环境带来沉重的负担; 假如节点布置在敌对、危险区域或者结构体内部, 甚至可能由于无法及时补充能量而影响设备的正常运行^[6-7]。基于上述原因, 如何从周围环境中俘获能源并转化为电能, 进而为独立自治的智能设备持续供电, 成为了一项亟待解决的技术问题。

自然环境中可供俘获的能量源主要有太阳能、风能、温差能、射频能、振动机械能等^[8-9]。总体来说, 上述各种能量源的俘获使用都有其优势和劣势, 具体如何选择需要根据实际应用场景及被供电设备的功耗需求决定^[10]。由于振动机械能广泛存在于各种环境中, 同时也具有相当可观的能量密度, 受到了大量的关注^[11]。近期, 作者以各种能量源(“solar”, “vibration”, “thermal”, “wind”)加“energy harvesting”作为搜索词, 通过谷歌学术仅在近十年发表的学术文献标题中搜索, 最终得到了如图 1 所示各类能量俘获技术研究的论文数量。可以发现以振动能量俘获为主题发表的学术论文数量占到了大多数, 有 1 490 篇, 其关注度甚至超过了太阳能收集技术。究其原因大概有三点: ① 太阳能发电技术相对比较成熟, 几乎能直接工程应用, 因此发表的学术文献数量相对较少; ② 绝大多数太阳能收集均基于光电效应, 而振动能量收集可基于电磁感应效应、压电效应等多种机电换能机制实现, 理论研究的内容更加丰富; ③ 对于温差能、风能俘获技术, 目前还有一

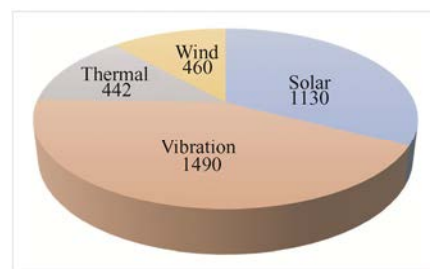


图 1 近十年发表的关于各种环境能源俘获技术的学术文献数量及饼状比较图

种研究趋势是先将它们转化为振动能, 再通过振动能量收集技术转化为电能, 如图 2 所示^[12-13]。

图 2a 所示的温差能俘获装置由于冷源和热源没有直接接触, 省去了体积庞大的散热器, 若参数优化得当, 两次能量转化的综合效率仍会大于直接进行的热-电转化效率^[12]。图 2b 所示为基于涡激振动现象设计的风能俘获装置, 该装置结构简单, 无需复杂的涡轮叶片等转动机构, 结构布局紧凑的同时, 大大降低了结构设计难度和生产维护成本^[13]。

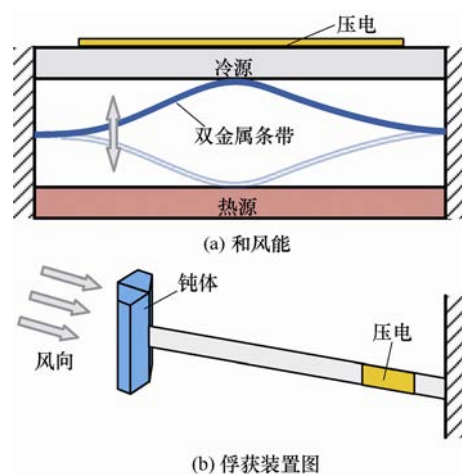


图 2 基于振动-电能转化的温差能和风能俘获装置图

环境振动能量收集技术发展至今, 出现的各类俘能装置数以千计, 且难以准确归类区分。根据不同的换能机制, 它们大致可分为磁电式^[14-15]、压电式^[16]、静电式^[17-18]和摩擦电式^[19-20]四大类, 并且在不同的场景中均有试点应用(图 3)。其中磁电式振动能量收集装置通过电磁感应效应发电, 技术最为经典且成熟^[21-23]。摩擦电式和静电式发电装置则得益于近些年来微机电系统的迅速发展, 获得了广泛的关注, 相关的学术研究热度持续增涨^[24-27]。事实上, 自 20 世纪 50 年代压电陶瓷材料被发明以来, 压电

元件的应用范围就开始不断拓展,如打火机、倒车雷达、声呐、B 超、雾化器等^[28-32]。此类产品的大量使用已经表明压电元件具备了较高的技术成熟

度,考虑其容易与结构集成、性能可靠、无电磁干扰等优势,本文将重点关注基于压电元件的振动能量俘获装置^[33-35]。

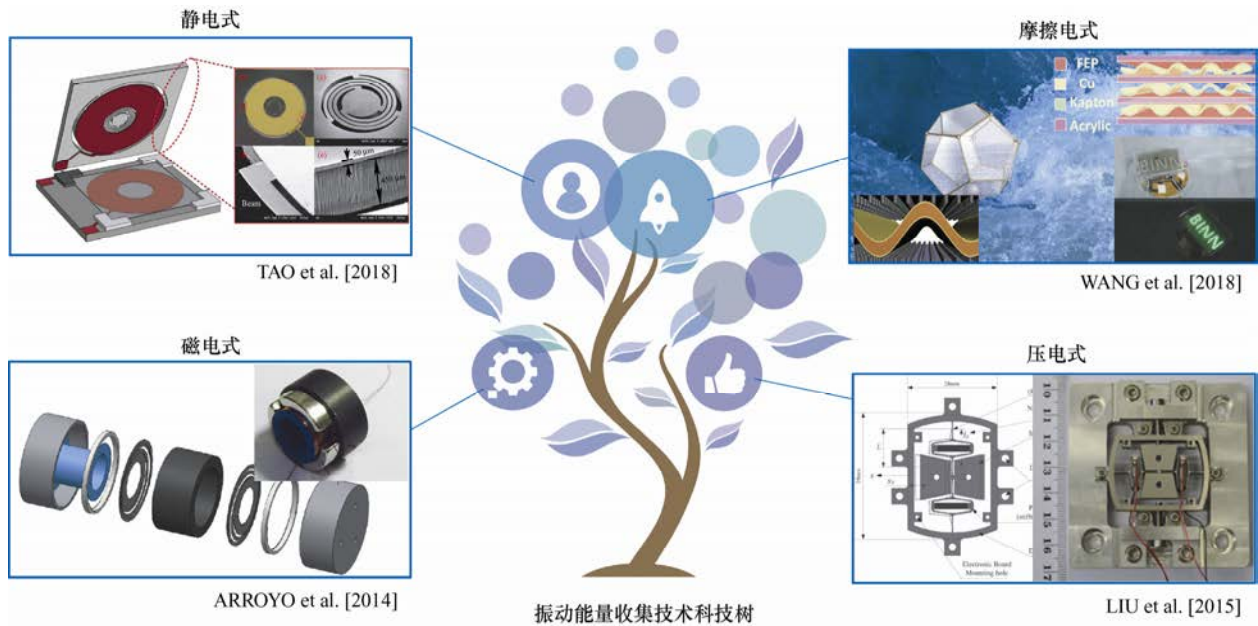


图 3 振动能量俘获技术中的四种主要机电能量转化机制及典型振子结构示意图

1 压电式振动能量俘获系统

典型的压电式振动能量收集系统主要包括直接用于俘获环境振动能的压电振子结构,用于高效提取压电电荷能的接口电路,以及用于电能存储与充电或稳压管理的存储管理模块,如图 4 所示。其中压电振子结构是振动能量转化的源头,通过压电元件直接将振动机械能转化成电能,决定了收集系统潜在的最大发电功率;能量提取接口电路可通过阻抗匹配^[36]、同步电荷能提取(Synchronous electric charge extraction, SECE)^[37]、能量预注入^[38]等方法,决定收集系统的实际输出功率^[39-42]。电能存储管理模块则是整个自供电系统的调节器,它需要在不断变化的输出和负载功率之间找到平衡,确保自供电系统能够稳定可靠的运行^[43-45]。打个简单比方,如果把独立自治的无源传感器看作一辆汽车,那么压电振子就是发动机,能量提取接口电路像是变速箱,电能存储管理模块则是汽车的能量管理系统。只有各子系统相互协作配合,才能最大化能源的利用效率。此时压电振子的俘能功率就约等于发动机的排量,成为了汽车动力系统中的重要参数。

环境振动能量收集这一概念的提出,似乎可以

溯源到 WILLIAMS 等^[46]在 1996 年发表的一篇原理介绍和性能预测的文章,他们假设振动能量俘获装置的等效动力学模型是一个单自由度质量-弹簧-阻尼系统,那么一个 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的结构就可以分别在 70 Hz 和 330 Hz 的振动频率下输出 $1\text{ }\mu\text{W}$ 和 0.1 mW 的电功率(假设惯性质量的振幅等于 $50\text{ }\mu\text{m}$),能够满足一般微功耗系统的供电需求。

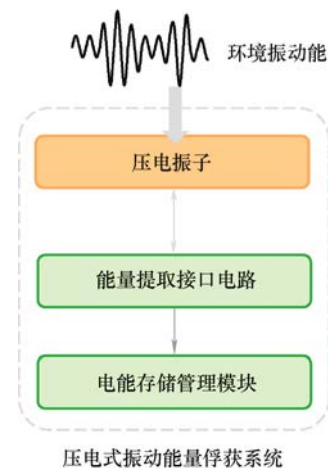


图 4 典型压电式振动能量俘获系统结构框图

图 5 基于压电耦合元件给出了所描述的单自由度质量-弹簧-阻尼系统模型^[47],其中 K 为压电元件短路时振子结构的等效刚度, M 是结构的等效惯性质量, D 为振动系统的等效阻尼;在外界激励加速

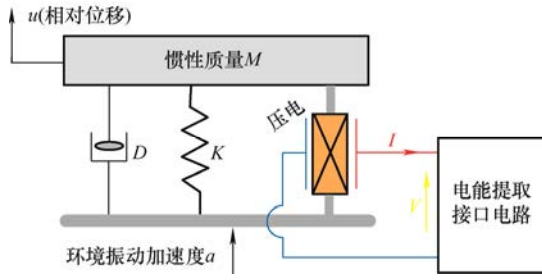


图 5 经典压电振子的等效动力学模型示意图

度 a 作用下, 惯性质量和装置基础之间的相对位移为 u 。最终, 压电振子模型的动力学方程可以表示成

$$Ma = M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku + \alpha V \quad (1)$$

式中, α 和 V 分别为压电振动系统中的力-电耦合系数和输出电压。式(1)两边同时乘以速度 \dot{u} 并对时间进行积分, 可得该单自由度振动系统的能量平衡方程, 如式(2)所示, 即压电振子“俘获的振动能”等于“系统动能”、“系统势能”、“阻尼耗散能”和压电元件的“机电转换能”。

$$\int Ma\dot{u} dt = \frac{1}{2}M\dot{u}^2 + \frac{1}{2}Ku^2 + \int D\dot{u}^2 dt + \int \alpha V\dot{u} dt \quad (2)$$

从能量平衡方程可以发现当振动系统处于稳态时, 惯性力 Ma 和振动速度 \dot{u} 同相位, 即振子共振状态时, 俘获的振动能最多; 另外在半周期的整数倍时间内, 系统的动能和势能均无变化, 振子俘获的振动能等于阻尼耗散能加机电转换能。

为简化分析上述能量平衡方程, 假设采用 SECE 电路来提取压电元件产生的电荷能, 相关波形如图 6 所示。绝大多数时刻, 压电振子系统内的压电元件处于开路状态, 此时压电元件电压 V 和振子相对位移 u 成正比关系, 比例系数是 $(2\alpha/C_0)^{[37]}$, C_0 是压电元件的等效电容值。当振子振幅达到极值 u_M 时, 压电电压 V 也达到其极值 V_M , 如式(3)所示, 此时利用 SECE 电路将压电元件上的电荷能完全提取出来, 则在图 6 所示的半个振动周期内, 式(2)的能量平衡方程可以简化成式(4)所给出的表达形式。最终, 振子系统在稳态条件下振幅 u_M 表达式如式(5)所示, ω 为系统的振动角频率。

$$V_M = 2\frac{\alpha}{C_0}u_M \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+T/2} Ma\dot{u} dt = \int_{t_0}^{t_0+T/2} D\dot{u}^2 dt + \frac{1}{2}C_0V_M^2 \quad (4)$$

$$u_M = \frac{Ma}{D\omega + \frac{4\alpha^2}{\pi C_0}} \quad (5)$$

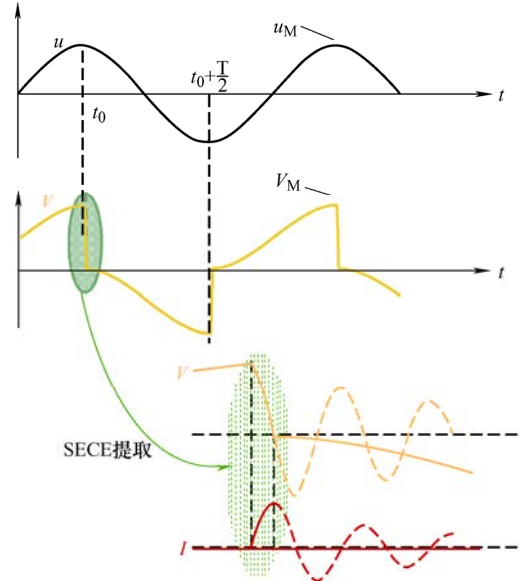


图 6 同步电荷提取技术中的压电电压和电流波形图

参考 BADEL 和 LEFEUVRE 的研究^[48], 定义压电振子的品质因数(Figure of merit, FOM)

$$FOM = k_m^2 Q_m = \frac{\alpha^2}{D\omega C_0} \quad (6)$$

式中, k_m^2 为结构修正的机电耦合系数, Q_m 为结构机械品质因数。最终压电元件的输出电功率 P_h 为

$$P_h = \frac{\omega C_0 V_M^2}{2\pi} = \frac{\pi k_m^2 Q_m}{\left(\frac{\pi}{4} + k_m^2 Q_m\right)^2} \frac{(Ma)^2}{8D} \quad (7)$$

此时当 FOM 等于 $\pi/4$ 时, 压电元件有最大输出功率 P_h^{\max} , 且等于系统的阻尼耗散功率 P_1 , 即

$$P_h^{\max} = P_1 = \frac{(Ma)^2}{8D} \quad (8)$$

式(8)说明压电式振动能量俘获系统的最大机电能量转化效率是 50%, 且与使用何种能量提取接口电路无关^[48]。事实上, 该结论也是一般振动俘能系统能量转化效率的最大值^[49]。

2 共振频率匹配式压电振子

从单自由度压电能量收集系统的基本工作原理可以看出, 当激励频率在系统共振频率附近时, 系统才具有最高俘获效率。然而一般环境中

不同的振源具有不同的频率特性, 例如定频振源、变频振源、宽频振源等等。对于这些不同类型的振源, 都需要满足激励频率与结构共振频率匹配的基本条件, 才具有良好的能量收集效率。针对这一问题, 学者们通过多年的努力取得了许多进展, 本节将从该角度出发, 详细介绍各种以共振频率匹配为基本设计准则的压电振子结构研究现状。

2.1 定频振动能量收集

根部粘贴有压电元件的悬臂梁是最为常见和经典的压电振子结构。它具有加工制造简单, 工作稳定可靠等特点, 当悬臂梁一阶固有频率接近或等于环境振动频率时会发生大幅振荡, 迫使压电元件产生大幅变形, 从而实现振动能量的高效收集^[50]。基于上述优点, 许多学者在线性压电悬臂梁结构能量收集系统上开展了一系列深入细致的研究。

阚君武等^[51]对压电单、双晶片悬臂梁进行了精确建模和仿真分析, 得到了杨氏模量比对两种压电梁发电性能的影响规律。ERTURK 等^[52]则对此类压电双晶梁建立了较为完善的理论分析模型。刘琪等^[53]对贴有柔性压电薄膜的悬臂梁进行了力学建模和试验研究, 通过标准整流接口电路被动提取压电电荷能, 对比分析了振子在不同运动状态下的电压输出性能。马天兵等^[54]对矩形和三角形压电悬臂梁进行了比较, 发现三角形悬臂梁的能量密度比较高, 这是因为三角形悬臂梁在振动过程中压电元件的应变分布较为均匀, 其材料或体积利用率最高, 从侧面证明了等应变形式的悬臂梁结构具有较高的能量密度^[55]。另一方面, 相关学者还针对特殊应用场景对压电悬臂梁结构的俘能效果进行了研究, 如 ARROYO 等^[56]研究了压电悬臂梁在 20 °C 到 160 °C 温度变化范围内的工作特性, 建立了基于温度变化的俘能模型并通过试验进行了验证。CHEN 等^[57]针对多方向振动源, 特别设计了一种类蒲公英状的压电悬臂梁阵列结构并进行了理论分析和试验测试, 装置的最大输出功率可达 0.28 mW。

随着研究的深入, 人们发现此类线性悬臂梁振子存在一个关键问题, 即可用带宽较窄并且无法自适应变化, 当环境振源频率变化且偏离振子固有频率时, 发电功率将急剧下降。由于实际环境中大多数振源的功率谱峰值频率随环境变化而

变化, 因此线性悬臂梁式压电能量收集系统在面对宽频或变频振源时, 其效率就得不到保证, 这导致其实际应用范围十分有限^[58]。为解决该问题, 调频式^[59]、宽频式^[60-61]的压电振子结构得到了越来越多的关注。

2.2 调频式振动能量收集

调频式压电振子一般原理是通过改变结构的等效刚度或等效质量来调节系统的共振频率, 使其匹配环境振源的频率。根据调节机制不同, 可分为手动式^[62-63]、被动^[64-65]和主动^[66-67]自适应式等。

例如 WU 等^[62]提出了一种极其简单可靠的共振频率可调式压电振子结构, 通过调节悬臂梁末端质量块的等效重心位置手动调节结构的一阶固有频率, 使之与变化的激励频率匹配。TANG 等^[63]则借助非线性磁力, 通过手动改变磁间距或磁极来实现结构的调频功能。试验结果表明, 当磁吸力间距从 4 mm 增加到 14.5 mm 时, 共振频率从 58 Hz 降低到 28 Hz 左右; 当磁斥力磁间距从 9.5 mm 增加到 15.5 mm 时, 共振频率从 12 Hz 增加到 23 Hz, 有效拓宽结构的响应频带。另外, PILLATSCH 等^[64]提出了一种质量块滑动式压电振子结构, 该结构能够根据外界激振频率被动调节质量块的位置, 进而改变结构的共振频率获得较大振幅, 该装置不需要外界干预即能实现频率自适应匹配调节。LAN 等^[65]同样利用了滑块质量结构, 提出了基于模态自主重构机制的具有自动追踪振源频率功能的能量收集器。在这个系统中, 外激励频率的变化会诱导系统中的滑块发生自主滑动, 调整系统共振频率与外激励频率相匹配, 从而实现共振与大幅输出功率。

不同于手动、被动式调节, 为提高结构响应速度, 适应频率变化较快的振动源。CHENG 等^[66]基于调谐、滤波电路和压电叠堆提出了一种自调谐压电能量俘获方法, 通过在悬臂梁上施加轴向力来调节结构的共振频率, 且该方法无需任何外部电能。类似的, LALLART 等^[67]利用压电悬臂梁可通过反向施加电压改变等效刚度的特性, 提出一种共振频率主动调节方法, 包含能量俘获和频率自适应调节两部分, 三层压电元件分别用于能量俘获、刚度调节和信号识别。试验表明该结构可在完全自供电的情况下将功率带宽从 4.1 Hz 增加到 8.1 Hz。

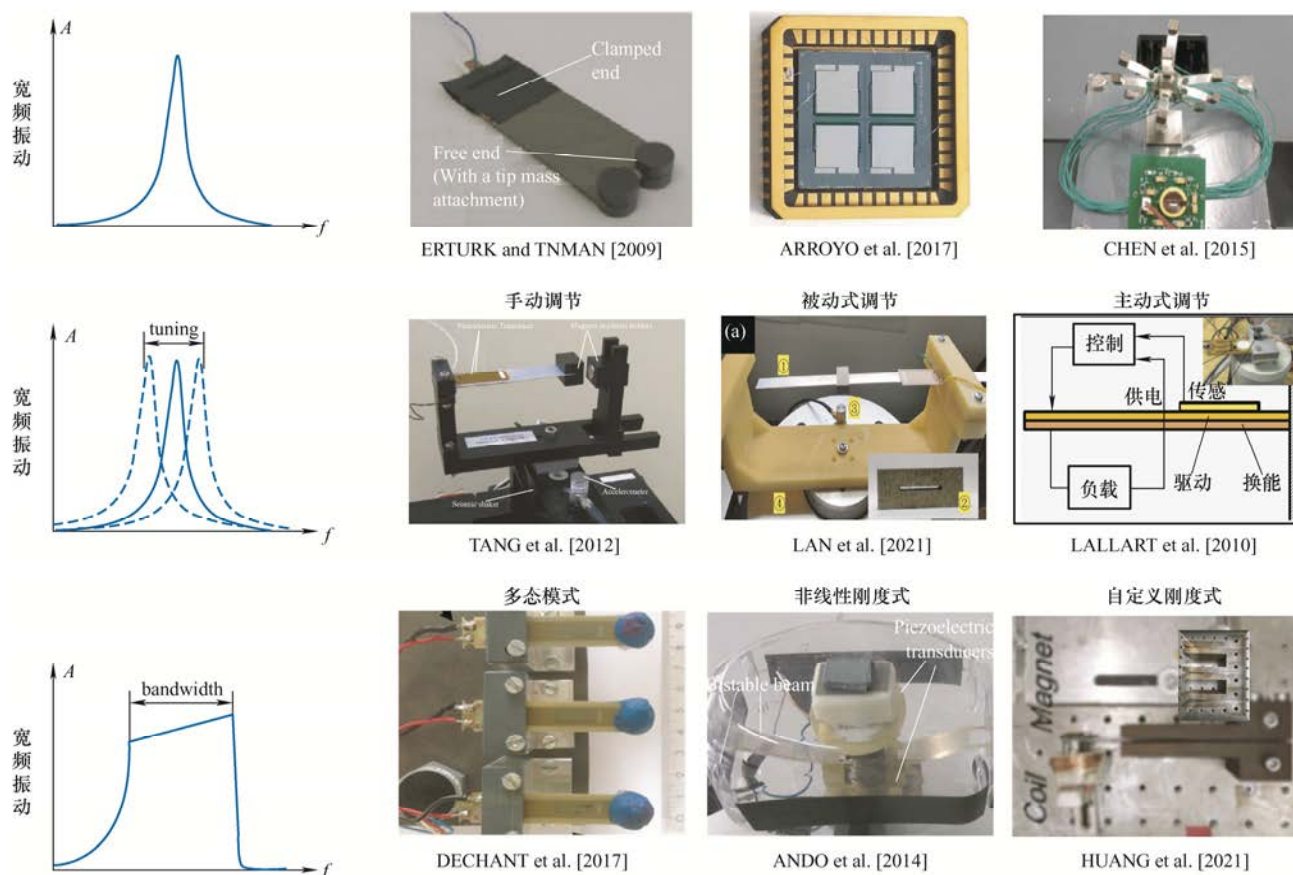


图 7 以共振频率匹配为基本设计准则的压电振子结构举例

2.3 宽频振动能量收集

解决振源频率变化问题的另一有效方法是发展宽频振动能量收集技术。在该技术所设计的压电振子具备一个较宽的工作频带，且能包含环境振源功率谱中所有峰值频率，从而高效俘获振动能量。近些年来，出现了许多宽频振动能量收集技术，根据振子工作原理可分为多模态或多自由度式^[68-69]，非线性刚度式^[70]以及自定义刚度式^[71-72]。

2.3.1 多模态式

多模态式压电振子基本动力学原理与单自由度系统相同，是线性单自由度系统向线性多自由度系统的扩展，同样具有稳定性好，输出功率高，制作简单等特点。另外，大部分线性悬臂梁振子均可看作高阶振动模态不在感兴趣频率范围内或其影响可忽略的一种单模态简化，若关注频率范围，振子结构拥有多个良好动态响应和俘获性能的模式，其工作频带也可进一步拓宽。WU 等^[73]提出的一种两自由度压电振子就是典型的多模态式振动俘能系统。DECHANT 等^[74]将多根悬臂梁集成在同一个刚性基础上，通过调节结构参数使每根悬臂梁的固有频率依次错开，因而俘能器整体的幅频特性曲线在 40~44 Hz 内有三个谐振峰，且平均可保持 1 mW 以上

的输出功率。类似地，UPADRASHTA 等^[75]将三根共振频率不同的分支梁连接在压电悬臂主梁上，使振子的前三阶模态处于 14~20 Hz，进而获得较宽的工作频带。TOYABUR 等^[76]将不同悬臂梁布置成“H”型结构，利用系统的前四阶模态俘获 8~22 Hz 频段内的振动能。YANG 等^[77]提出一种俘获垂直方向振动能的三角形组合梁结构，组合梁的偏转角度可调，且每根悬臂梁都被设计成两段式结构，通过调节两段之间的夹角改变结构的响应频率，通过合理配置参数后可使振子在 14~19 Hz 存在三个谐振峰，该方法简单可靠，还可通过调节组合梁的旋转角实现共振频率可调。

多模态能量俘获的另一特点是它可以简单实现多方向振动能量的收集。例如 ZHAO 等^[78]提出一种螺旋式矩形截面压电梁结构，其具有沿任意方向弯曲和拉伸的特性，可将环境中任意方向的振动能量转化为结构的伸缩、扭转应变能，当结构的前三阶固有频率分别匹配到外部振源频率时，就能获得较高的输出功率。WEI 等^[79]提出了一种基于弯折梁的塔状振子结构，可响应空间内任一方向的振动激励，尤其是俘获 3 Hz 和 12 Hz 附近两个频段内的振动能。另外，DENG 等^[80]设计的一种“T”型复合双梁

结构, 利用其前四阶模态也可在 22 Hz 内俘获竖直和水平两个方向的振动能。

2.3.2 非线性刚度式

非线性式压电振子是近些年来研究较为热门的俘能结构, 主要通过引入非线性刚度环节来拓宽频带^[81]。根据振子稳定时的平衡位置数目, 其又可分为单稳态, 双稳态甚至多稳态结构^[82-84]。

对于单稳态振子, 常见的有达芬振子型^[85]和分段线性型^[86]两种。达芬振子型一般指其刚度非线性平滑变化, 动力学方程可用达芬方程描述的振子结构; 分段线性式指其刚度变化可分段描述, 但在每一段内刚度为常数的结构, 一般用限位器来突然改变线性振子的刚度方式实现拓宽频带的目的。FAN 等^[87]通过在自由端含磁铁的压电双晶梁两端再对称布置一对永磁体, 利用磁斥力实现了单稳态特性, 与相似的线性振荡器相比, 该结构在 3 m/s^2 的激励下能将工作带宽提高 54%, 输出功率提高 2.53 倍。LAN 等^[88]基于一对永磁体设计了磁吸力的压电振子结构, 同样实现了单稳态的振荡特性, 有效拓宽了工作频带。ZHAO 等^[89]基于线性压电悬臂梁和限位器提出了一种分段线性变化的单稳态振子, 该结构的工作带宽达到了 4.7 Hz。

对于双稳态振子, 两个稳态位置分别对应两个势能阱, 当势能阱设计合理时, 振子会在两个势能阱之间来回跳跃, 利用其非线性跳跃机制来扩大结构的频率响应范围^[90]。双稳态振子通常可利用非线性磁力或几何非线性来设计实现, FAN 等^[91]针对此类非线性磁力模型做了大量的验证和优化工作, 有效降低了势能阱之间的势垒, 在低至 0.36 g 的激励加速度阈值下, 有效工作频带可达到 $10 \sim 17.3 \text{ Hz}$ 。REZAEI 等^[92]基于磁力耦合提出了一种可用于吸振的能量俘获装置, 其减振效果和能量俘获能力分别比线性振子高出 46.5% 和 158%, 且能在 $80 \sim 100 \text{ Hz}$ 频带范围内工作。在几何非线性设计方面, ANDO 等^[93]根据质量双弹簧理论模型, 利用受压屈曲梁结构实现了振子结构的双稳态振荡。该结构制造简单, 当屈曲梁受到外界激励在两个稳态之间切换时, 均能通过撞击两侧的压电元件实现机械能到电能的转化, 以较低的成本实现了宽频功率输出。MASANA 等^[94]通过在悬臂梁一端施加轴向载荷, 对比研究了双稳态和单稳态的动态响应特性。数值仿真和试验结果均表明双稳态结构的输出特性比单稳态更好, 并且对于浅势阱结构来说, 即使激励幅值很低, 其超谐波响应也可引起大幅的阱间振荡, 进而在低频范围内产生较高的电能输出。除此之外, YANG

等^[95]和 WEN 等^[96]的斜拉簧机构也可构成双稳态振子, 展现了良好的动态响应特性。

为了进一步提高非线性振子在低频或超低强度激励下的能量俘获效率, 研究人员进一步提出了三稳态和多稳态结构, 实现此类结构的主要方法是充分利用磁力耦合机制^[97]。LI 等^[98]通过数值计算和试验验证了所提出的三稳态压电振子在高斯白噪声和简谐激励下的系统动态响应, 并与双稳态振子进行了对比: 三稳态振子在 $1 \sim 20 \text{ Hz}$ 的谐波激励下具有更宽的高能阱间振荡能力。WANG 等^[99]研究了重力和几何非线性对三稳态压电振子动态响应和有效带宽的影响, 发现非对称势阱可以显著提高低频激励下的系统输出功率。LENG 等^[100]首次采用等效励磁电流理论计算了三势阱的磁场力和势函数, 证明当激励强度发生变化时, 相应的最佳磁间距变化较小, 无需调整系统参数, 该方法更适用不同磁间距的磁体, 为多稳态研究提供了新思路。ZHOU 等^[101]还提出了一类基于磁耦合力的四稳态、五稳态压电振子结构, 发现与传统的双稳态非线性磁力结构相比, 此类结构有效地降低了势垒, 有更小的激发阈值和更宽的工作带宽。

2.3.3 自定义刚度式

根据前文描述, 可知通过向结构中引入非线性刚度可以有效拓宽工作频带; 那能否自定义结构刚度, 让结构等效刚度随振子振幅的变化自定义变化, 最终实现工作频带的自定义配置^[102]。

基于上述假设, 西南交大刘伟群课题组近期开始了自定义配置振子响应频带的探索研究^[71]。由于等效刚度随振子振动位移的变化而实时变化, 因此可假设振子等效刚度主要由三部分构成, 分别是平均刚度(对应线性振子的刚度 K_1), 位置相关的动刚度 K_2 及势能等效刚度 K_3 。等效刚度 K_e 表达式可以写成

$$\begin{cases} K_e = \frac{K_1 K_3}{K_1 + K_3} \frac{2}{\sqrt{1 - \xi(K_2/K_0)}} \\ K_1 = \frac{F_r}{u} \quad K_2 = \frac{dF_r}{du} \quad K_3 = \frac{2 \int F_r du}{u^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, F_r 为振子在相对位移为 u 时的回复力, K_0 是振子位移为 0 时的初始动刚度, ξ 是修正系数, 与振子的非线性特性等因素相关。这里自定义刚度振子与调频振子的最大区别在于刚度随振动位移的变化而实时变化, 后者则没有该明显特征。

在取得非线性振子不同位置的等效刚度后, 则可由等效刚度构造出相应的线性等效振子, 进而由

线性振子的响应去近似非线性振子在给定位置处的响应,这种方法被他们称之为非线性响应与刚度的映射方法。应用这一方法,在已知任意硬化刚度曲线的条件下,可以获得对应的响应,反过来,在已知任意硬化非线性响应时,也可求得对应的刚度特性。即便响应和刚度不遵循常规典型的非线性振子规律,也就是所称的非典型振子情形下,这一方法仍可适用^[72]。其特征在于响应可以如图 8 所示在硬化前提下任意变化,从而为定制非线性响应和刚度提供了有效的工具。

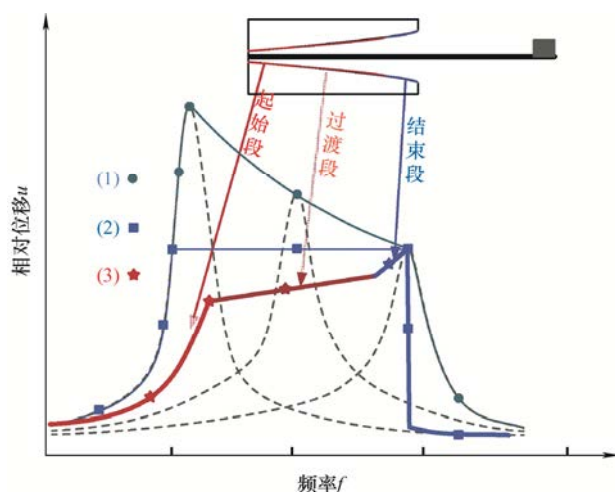


图 8 自定义刚度式非线性振子及其工作频带

实现自定义响应的关键在于构建相对应的自定义刚度并加以实现,刘伟群等人通过一种曲面夹具装置及悬臂梁结构实现了该想法。当悬臂梁振动时,其根部会随着振幅的增大不断贴合曲面夹具,导致悬臂梁的等效长度不断缩短;又由于曲面形状是自定义设计的,因此梁根部贴合曲面的振型也是特定的,最终实现了等效刚度的自定义设计。图 8 中虚线为对应线性刚度下悬臂梁的幅频响应,若通过手动调节振子等效刚度且振子始终是线性的,则可获得图 8 中(1)所示的工作频带;理想的刚度自定义振子应该能达到图 8 中(2)所描绘的响应频带;通过曲面夹具实现的自定义刚度振子,其理论频响曲线由图 8 中(3)所示。

由于曲面夹具和梁之间存在接触碰撞,目前振子仍采用磁电式机电转化机制,但该思想完全可以被借鉴应用到压电振子的结构设计中。

3 升频转换式压电振子

上述压电振子的核心都是如何实现频率匹配,然而频率匹配原则在一些情况下会带来新的问题,如超低频振动能量收集。但自然环境中许多振动又

是以低频或超低频形式存在的,如海浪运动^[103]、大型结构的风致振动^[104]、生物体的运动^[105]等。此时,如果按照共振频率匹配准则去设计压电振子,会导致振子拥有很大的质量或者很小的刚度,并且低频共振时,振子的振幅也会很大。大质量和大振幅会给微小化设计带来困难,而小刚度会带来结构的可靠性问题。

另一方面,若不考虑振幅、耦合系数等参数的影响,可简单认为压电元件的输出功率和其工作频率的三次方成正比。这一结论也可从实际测试结果中得到一定程度的验证:压电陶瓷元件在 20 Hz 的工作频率下,功率密度为 80 mW/cm^3 ;而在 10 kHz 的工作频率下,功率密度能达到 150 W/cm^3 。因此可以认为在低频、超低频振动能量收集装置中,压电元件作为关键的换能器件,其功率密度的限制严重影响了装置的实际输出功率。

事实上,磁电式发电装置也有类似问题。以风力发电机为例,考虑到噪声、结构强度、疲劳寿命等因素,风机叶片转速通常非常缓慢。直接用该转速带动线圈切割磁感应线发电,输出功率几乎为零。所以风力机内部通常安装庞大的齿轮增速装置,将每分钟几十转的叶片转速提升至每分钟一千多转,结合多磁极对数等措施提升切割磁感应线频率。类比可知,压电式发电装置的输出功率同样会受到实际工作频率的影响。

鉴于此,对于超低频振动能量收集,有必要将低频激励转化为较高频率的振子振荡,最后利用压电效应进行能量转化。机械式升频转换技术可以实现上述想法,突破压电元件功率密度低的限制,因此,近些年来受到了众多学者的关注。根据升频转换机制的不同,大致可分为机械碰撞式^[106]、机械拨动式^[107]、磁致升频式^[108]、惯性冲击式^[109]和内共振式^[110-111]五种形式。

3.1 机械碰撞式

图 9 所示为 HUANG 等^[106]提出的一种机械碰撞式压电振子结构,它由两种线性悬臂梁组成,其中用钢材制成的悬臂梁固有频率较低,容易响应外界低频激励进而发生大幅振荡,一旦钢梁冲撞到固有频率较高的硅梁时,能量会通过碰撞发生转移,引发硅梁的高频振荡。在外部持续激励作用下,硅梁会因周期性地冲击而持续高频振荡,带动压电元件以较高的频率输出电能。试验表明,该碰撞升频机制可使压电振子工作频率从 40 Hz 提升至 1 012 Hz,功率密度增加 34 倍。LIU 等^[112]也基于类似的机制提出了一种微型振子结构,通过在低频振

子的运动自由度上放置高频振子和限位装置, 不仅确保了低频振子不会因为受到过量冲击而损坏, 还拓宽了振子的工作频带, 最终还实现了升频转换功能。低、高频振子的固有频率分别为 38 Hz 和 618 Hz, 虽然高频振子的振幅较小, 但升频转换后发电效率却是低频振子的 3.6 倍。HALIM 等^[113]在此类结构上进行了改进, 低频振子受迫大幅振动时可同时冲撞两根不同固有频率频率的压电悬臂梁, 实现了从 13.5 Hz 到 606 Hz 的升频转换。

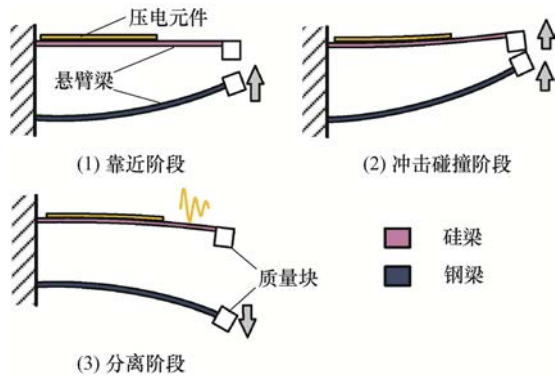


图9 机械碰撞式压电振子结构

3.2 机械拨动式

图10所示为POZZI等^[107]提出的一种机械拨动式升频结构, 它由拨片和压电悬臂梁两部分组成。其中拨片部分跟随基础激励运动或振动, 在其运动过程中, 周期性地拨动压电悬臂梁, 使其在较高的一阶固有频率处产生振荡, 进而输出较高的电功率。KATHPALIA等^[114]在上述研究基础上改进提出了一种非线性拨片和压电双晶梁之间的耦合结构, 通过调整几何、弹拨接触面积等参数优化了升频转换性能。FU等^[115]则完善了此类机械弹拨的升频理论, 给出了拨动速度、弹拨接触面积等对压电悬臂梁动态响应特性的影响关系。

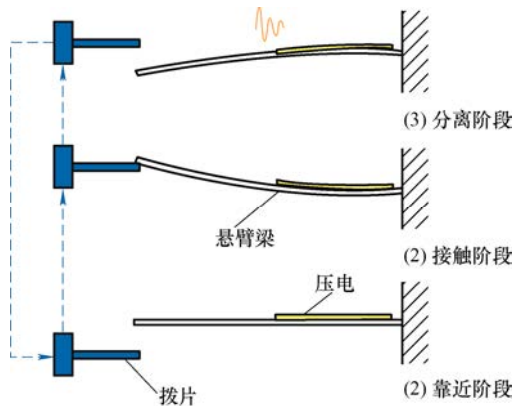


图10 机械拨动式压电振子结构

机械碰撞式和拨动式都是利用低频运动部件周期性地接触高频压电振子来实现升频转换功能, 但

两者的转换机制存在明显差别。从压电振子角度来说, 前者在初始时刻的势能为零、动能最大, 而后者却势能最大、动能为零。通俗地讲, 机械碰撞机制类似于弹钢琴, 机械拨动机制则更像弹吉他。

3.3 磁致升频式

磁致升频式则是利用两个运动部件之间的非线性磁力来实现升频转换的, 相比于机械碰撞式和拨动式, 磁力的变化更为平缓, 有利于提高结构的疲劳寿命, 且没有因机械接触而产生的声、热等能量损耗^[116-117]。

图11所示为KUANG等^[118]在拨动机构的研究基础上, 特别针对压电悬臂梁结构的激励机制进行优化, 提出的一种旋转阵列式的压电振子结构。KUANG等分别从磁间距、外圈阵列磁体数两方面开展了分析研究: 当磁间距设为 1.5 mm, 阵列磁体数为 32, 且转子以 2 rad/s 的角频率运动时, 压电双晶梁将以高于 12 Hz 的频率振动。在针对人体膝关节运动的能量俘获研究中测试表明, 该发电装置最低可在 0.9 Hz 的运动下输出超过 5.8 mW 的电功率。XUE等^[119]则提出了直接排斥力布局、正交斥力布局以及错位斥力布局三种基于不同平面的非线性磁力布局, 通过建立永磁体和压电悬臂梁的耦合动力学模型研究了不同磁铁布局对振子动态特性的影响规律。XIE等^[120]研究了一种基于受压屈曲压电悬臂梁的非线性磁力振子, 该结构利用非线性磁力拨动俘获角动能, 利用悬臂梁的突弹跳变提高输出电压, 可在 1~14 Hz 的外部激励下输出 6.91~48.01 μ W 的电功率。

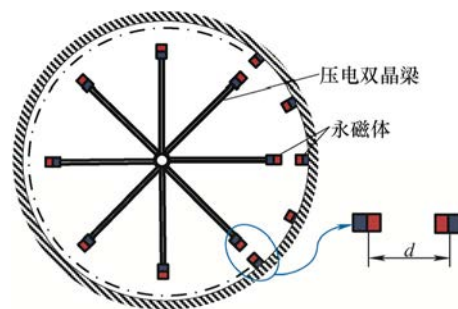


图11 磁致升频式压电振子结构

3.4 惯性冲击式

惯性冲击式以无需物理接触且激励加速度阈值较低的优良特性同样得到了关注。此类结构可通过在非线性低频振子上设置高固有频率的压电悬臂梁来实现, 如在类双稳态结构平台上固定一定数量的压电悬臂梁结构, 当平台受到环境激励在两个稳态之间切换时会产生冲击加速度, 进而激发压电悬臂梁的持续振荡, 输出较高的电功率。

图12为HAN等^[109]提出的一种惯性冲击式压电俘能器,图12a~12c过程阐述了系统在受到外界加速度激励时的形变状态。柔性侧壁在两个稳态之间的切换有效地降低了结构响应外界加速度的阈值,使中间弯梁更容易发生周期性突弹跳变,进而促使附加有压电元件的悬臂梁振子在其一阶固有频率处振荡。该团队基于不同材料和参数的柔性侧壁结构,对突弹跳变机制进行了大量研究。试验表明该装置最低可在激励加速为 4.9 m/s^2 的情况下进行升频转换。类似的,SPECIALE等^[121]在受压屈曲的双稳态梁结构上增加了一根高固有频率的压电双晶梁,当结构受到 20 Hz 、 1 g 的加速度激励时,其压电双晶梁的振动信号中出现了远大于 100 Hz 的频率成分,并能持续输出 $100 \text{ }\mu\text{W}$ 的电功率。

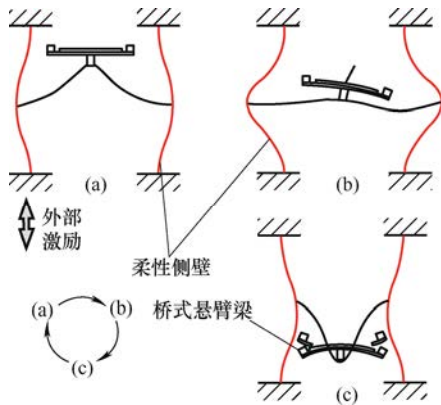


图12 惯性冲击式压电振子结构

4 内共振式升频转换的压电振子

在总结前人研究的基础上^[122],吴义鹏等^[123]于2017年提出了一种基于多自由度系统内共振现象的机械升频转换方法,该方法相比于机械碰撞式、机械动式,磁致升频式等结构,具有所需加速度阈值低、升频转换过程能量损失少、无噪声、疲劳寿命长等优势。内共振系统能够让能量在不同的振动模式之间相互转换^[124-125]。假设两个自由度对应振动模式共振频率之比为 $1:n$,而动力学方程中也恰巧出现 n 次项,则当激励频率在低阶共振频率附近时,高阶振动模式也会发生大幅度振荡。利用该现象尽可能地将振动能量集中在高阶振动模式,可实现升频转换及较高的电能输出。

基于上述理论,利用双悬臂梁非线性耦合^[123]和弹簧摆原理^[110]的 $1:3$ 和 $1:2$ 内共振升频转换振子先后被提了出来,升频因子分别为 3 和 2。为提高升频因子,一种利用弹簧摆和双悬臂梁耦合的 $1:2:6$ 内共振型升频转换振子随之被提了出来^[126]。

值得一提的是,摆动机构也是一种常见的机械振荡结构,并且固有频率仅与摆长有关,特别匹配超低频振动源。然而此类机构较难集成机电换能元件,因此在振动能量收集领域受到的关注并不多。作者在 $1:2$ 内共振型的弹簧摆机构中,巧妙利用了一种金属夹片弹簧解决了压电元件的集成问题^[110],并利用摆的超低共振频率匹配及系统的升频转换机制,获得了较为可观的机电转化效率。

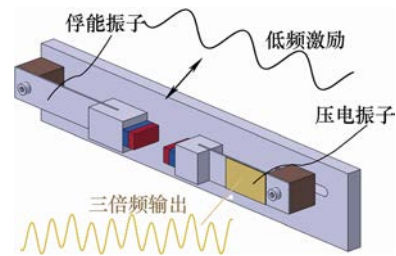


图13 $1:3$ 内共振型压电振子结构

4.1 $1:3$ 内共振

图13所示为基于 $1:3$ 内共振现象实现机械升频转换的压电振子结构示意图。该结构主要由一对悬臂梁结构及其自由端互相耦合的永磁体组成,悬臂梁的结构参数不一致,其中用于俘能的悬臂梁振子共振频率较低,用于换能的压电振子共振频率为俘能振子的 3 倍。根据文献[123]可知,此处布置的一对永磁体可等效成磁偶极子,磁力模型简化并泰勒展开后存在线性项及立方非线性项。假设压电元件处于开路状态,系统动力学方程最终可以用式(10)表示,式中 γ 为环境激励的加速度, x_1 和 x_2 分别为俘能和压电振子的相对振动位移, M_i 、 D_i 、 K_i ($i=1, 2$) 则分别为它们的等效质量、阻尼及刚度; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2$) 是结构中耦合磁力表达式的系数,仅与磁间距、悬臂梁的等效梁长及永磁体特征相关。因此一旦振子结构给定,磁力表达式系数将变成固定的常数。

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix} \gamma = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 - a_1 & a_2 \\ a_1 & K_2 + \frac{\alpha^2}{C_0} - a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 - b_2 - c_1 & c_2 \\ -b_1 & b_2 & c_1 - c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^3 \\ x_2^3 \\ x_1^2 x_2 \\ x_1 x_2^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

此时再看式(10), 可见该动力学平衡方程中有两个自由度 x_1 和 x_2 , 并且只有线性项 $(x_1, x_2)^T$ 和三次非线性项 $(x_1^3, x_2^3, x_1^2 x_2, x_1 x_2^2)^T$ 。根据非线性动力学理论, 当俘能振子和压电振子的共振频率之比等于或接近 1:3 时, 结构将发生 2 自由度立方非线性系统所特有的 1:3 内共振现象。即俘能振子的共振频率匹配上了外界低频激励, 随之发生了大幅振荡, 通过非线性磁力引入的三次非线性项, 激发了压电振子在其共振频率处的大幅振荡, 最终压电元件输出的电压频率将是环境激励频率的 3 倍。文献[127]建立了所述结构的理论模型, 详细分析了内共振现象产生的基本条件, 并比较了升频效应对系统输出功率的提升关系。

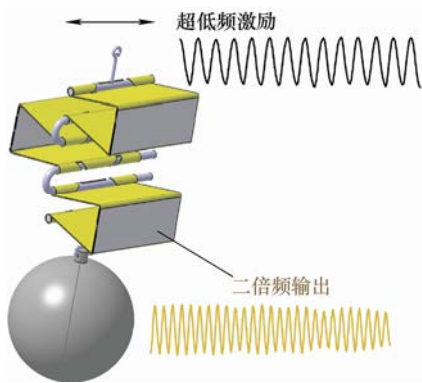


图 14 1:2 内共振型压电振子结构

4.2 1:2 内共振

图 14 所示为基于弹簧摆模型实现的机械升频式压电振子结构示意图。该结构由夹片弹簧、质量球及相应的联接部件装配而成。单个夹片弹簧有 6 个平面, 均可以粘贴压电陶瓷元件。但夹片弹簧伸缩变形时只有底面应变分布较为均匀, 将压电元件粘贴于底面时材料的利用率最高^[128]。

所述压电弹簧摆振子有两个自由度: 摆动自由度和弹簧伸缩自由度; 当摆球摆动一个周期时, 弹簧正好伸缩振荡两个周期。根据非线性动力学理论, 通过调节弹簧的等效刚度和摆球的质量, 使两个自由度的共振频率之比等于或接近 1:2, 就可实现所述的内共振现象, 高效俘获并转化超低频振动能。

试验结果表面, 上述弹簧摆振子在 2.03 Hz, 0.26 g 的激励条件下, 可输出平均 13.29 mW 的电功率, 超出了大多数低频振动能量俘获装置。另外, 振子在 0.89~1.93 Hz 频率范围内变化的激励条件下, 还能输出 3.77 mW 的电功率, 展现出了良好的宽频、随机振动能量收集性能^[110], 在人体运动能收集、波浪能俘获等领域有着极高的应用前景。

4.3 1:2:6 内共振

由于摆机构具有超低频俘获特性且容易设计制造, 仅由弹簧摆组成的内共振型振子的升频因子又过低。为此, 一种升频因子可以高达 6 的 1:2:6 内共振型超低频振动能量俘获装置被提了出来^[126], 如图 15 所示。该装置可近似看成 3 自由度的非线性振荡系统: 第一自由度是摆机构, 可以直接俘获水平方向上的振动能量; 第二自由度由共振频率较低的类悬臂梁组成, 其与单摆机构产生 1:2 的内共振耦合^[129]; 第三自由度是共振频率较高的压电悬臂梁振子, 当第二自由度上的永磁体发生大幅振荡时, 通过磁力的非线性耦合使其发生 1:3 的内共振, 进而高效地换能发电。

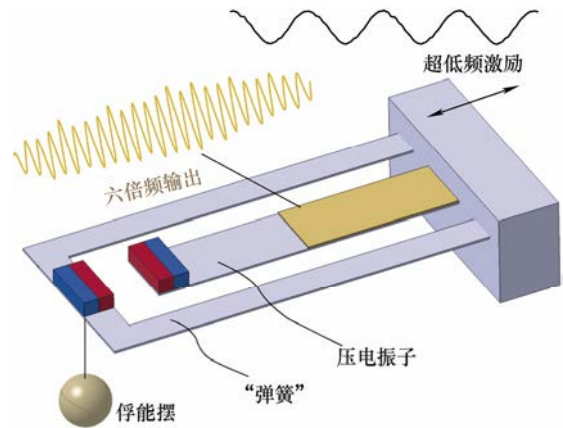


图 15 1:2:6 内共振型压电振子结构

随着试验研究的深入发现图 15 所示单摆机构极容易因为摆幅过大而发生圆锥摆等复杂运动, 反而影响了装置最终俘能效率, 为此对摆结构进行了优化设计^[111]: 将质量球替换成了铜片叠堆, 方便在试验过程中及时调整第一、第二自由度的等效质量; 采用了质量较轻的刚性摆臂, 将单摆机构变成了复摆; 在刚性摆臂运动路径上增加了限位器, 防止因为摆幅过大而影响俘能效果。优化后的结构图片如图 16 所示。

为清楚地阐述内共振升频转换机制, 图 16 还参照振子实际运动状态的视频截图, 画出了其中一种运动过程的简化示意图。整个过程中, 俘能摆正好从右侧最高点摆动到左侧最高点, 经历了半个摆动周期。

从压电振子角度看, 其从(I)处的最高点运动到(II)处的最低点, 正好是半个振动周期, 第二自由度的类悬臂梁振子振荡了六分之一一个周期; 当压电振子再运动到(III)处最高点时, 即完成了一个周期的振荡, 类悬臂梁振子却振荡了三分之一一个周期。当压电振子再运动到(IV)处最低点时, 完成了一个半周期的振荡, 类悬臂梁振子正好振荡了半个周期。

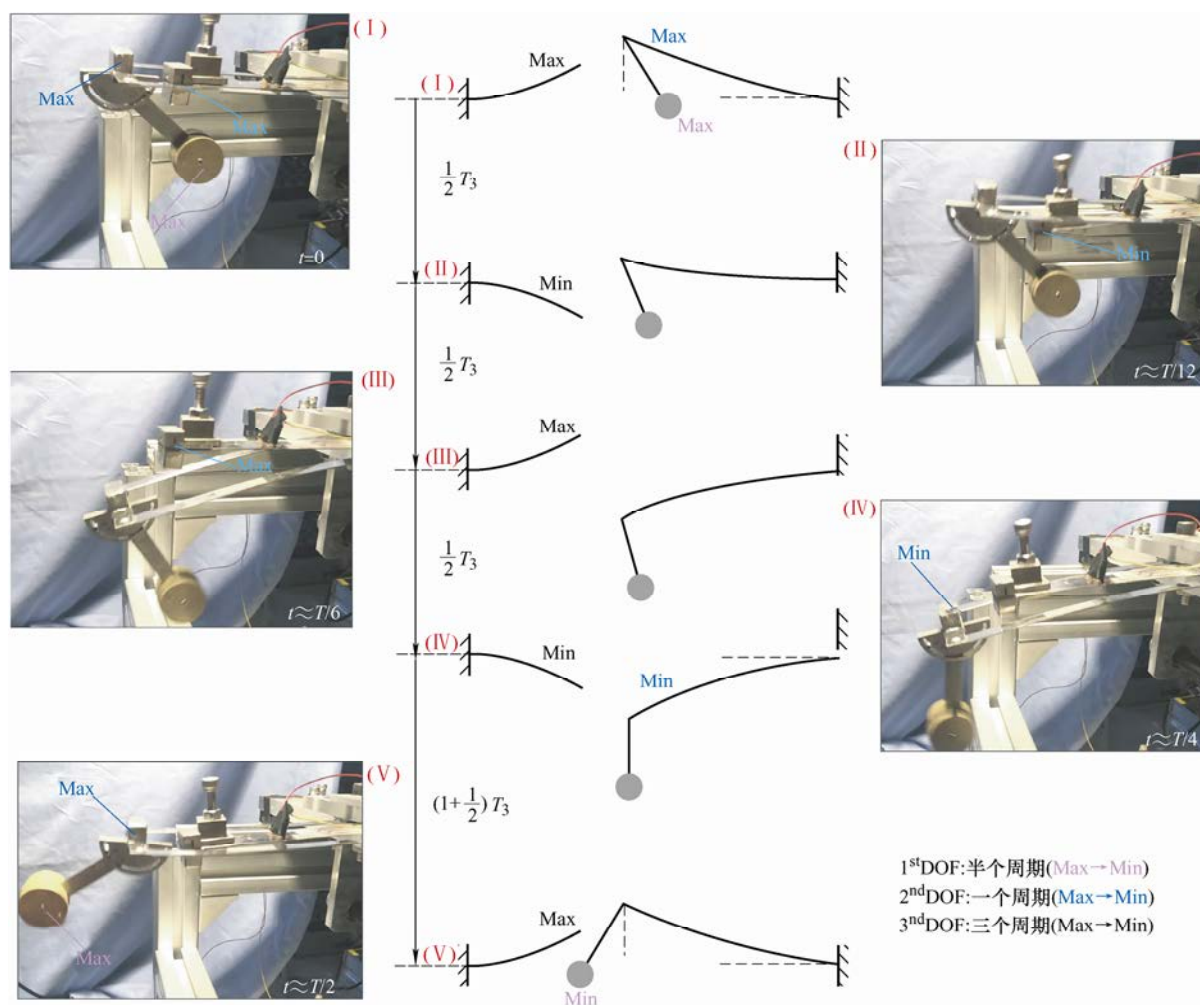


图 16 1 : 2 : 6 内共振型压电振子结构的升频示意简图及对应的运动视频截图

表 1 机械升频转换式压电振子的关键参数对比表

文献	简化示意图	升频转换机制	升频因子	环境激励源
HUANG 等 ^[106]		机械碰撞式	$\frac{25}{40 \text{ Hz} \rightarrow 1\,012 \text{ Hz}}$	2.9 m/s ² 的振动源
POZZI 等 ^[107]		机械拨动式	$\frac{297}{\sim 1 \text{ Hz} \rightarrow 297 \text{ Hz}}$	人正常行走
KUANG 等 ^[118]		磁致升频式	$\frac{13}{0.9 \text{ Hz} \rightarrow 12 \text{ Hz}}$	人正常行走
HAN 等 ^[109]		惯性冲击式	$\frac{6}{12 \text{ Hz} \rightarrow 77 \text{ Hz}}$	4.9 m/s ² 的振动源
WU 等 ^[123]		内共振式	$\frac{3}{7.8 \text{ Hz} \rightarrow 23.4 \text{ Hz}}$	1.0 m/s ² 的振动源
WU 等 ^[110]		内共振式	$\frac{2}{2.0 \text{ Hz} \rightarrow 4.1 \text{ Hz}}$	人手制造的运动源
WU 等 ^[111]		内共振式	$\frac{6}{1.7 \text{ Hz} \rightarrow 10.4 \text{ Hz}}$	1.9 m/s ² 的振动源

需要说明的是,图 16 所展示的运动示意图仅仅是其一种典型的运动模态,事实上该非线性振荡系统还具有一定的宽频俘获能力^[11],在所处的工作频段范围内还有其他形式的运动模态,但系统均能实现升频转换。试验结果表明,当激励加速度频率为 1.70 Hz 并且幅值为 1.9 m/s^2 时,第二自由度类悬臂梁振动频率为 3.52 Hz,压电振子输出电压频率为 10.39 Hz,实际输出频率提升了 6.1 倍,在最优负载下平均可输出 2.07 mW 的电功率。另外,结构优化后所引入的碰撞反而促进了机械运动能在第一和第二自由度之间的直接转移,即第一自由度上富余的机械能可以直接转移到第二自由度上,迅速提高第二自由度的振幅,诱发第三自由度的压电振子发生高频大幅振荡,最终输出电功率能提高近 1 倍。

5 结论

本文从压电式振动能量收集系统开始,分析了系统各部分模块的作用及重要性,得出了压电振子结构性能好坏是提升环境振动能量俘获功率的关键因素,同时从动力系统能量平衡方程角度,得出了机电能量转化效率最大不超过 50% 的重要结论。

随后基于共振频率匹配设计准则,分类介绍了三类压电振子,分别是共振频率固定式、共振频率可调式以及宽工作频带式。其中第一种压电振子在振动源信号特征已知且保持不变的应用场景下有优异的俘获性能,后两种压电振子在一般环境条件下适应生存能力更强。

考虑到低频、超低频振动广泛存在于自然环境中,机械式升频转换振子更适用于此类情况。因此根据升频转换机制的不同,分别介绍了机械碰撞式、机械拨动式、磁致升频式、惯性冲击式和内共振式五种不同类型的压电振子研究现状,其典型的参数比较如表 1 所示。结合作者自身的研究工作,内共振型的压电升频振子被详细地介绍了基本理论及对应的具体实现。相对而言,内共振型压电振子具有所需加速度阈值低、升频转换过程能量损失少等优势,尤其是基于弹簧摆模型设计的俘能振子能够较好地匹配环境超低频振动,在人体、波浪运动等频率低于 2 Hz 的振动源下具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] THOMBRE S, ZHAO Z, RAMM-SCHMIDT H, et al. Sensors and AI techniques for situational awareness in autonomous ships: A review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(1): 64-83.
- [2] 林京. 机器信息学: 机械产品智能化的学科支撑[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 11-20.
- [3] LIN Jing. Machinery Informatics: A fundamental discipline to intelligent machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 11-20.
- [3] 李江腾, 王非. 基于知识嵌入和 DNN 的工商业用户异常用电检测[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 158-165.
- LI Jiangteng, WANG Fei. Non-technical loss detection based on energy measurement knowledge and deep neural network among industrial and commercial customers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 158-165.
- [4] 张政, 张波. 移动负载的动态无线供电系统发展及关键技术[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 21-30.
- ZHANG Zheng, ZHANG Bo. Development and key technologies of dynamic wireless power transfer system for moving load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 21-30.
- [5] HAN S, KIM J, WON S M, et al. Battery-free, wireless sensors for full-body pressure and temperature mapping[J]. Science Translational Medicine, 2018, 10(435): 4950.
- [6] YUAN X, LI L, GOU H, et al. Energy and environmental impact of battery electric vehicle range in China[J]. Applied Energy, 2015, 157: 75-84.
- [7] TIAN X, WU Y, HOU P, et al. Environmental impact and economic assessment of secondary lead production: Comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 142-148.
- [8] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems [C]//IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. IEEE, 2005: 457-462.
- [9] ROUNDY S, LELAND E S, BAKER J, et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers[J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1): 28-36.
- [10] 曹自平, 王楚, 袁明, 等. 环境能量采集技术的研究现状及发展趋势[J]. 南京邮电大学学报, 2016, 36(4): 1-10.
- CAO Ziping, WANG Chu, YUAN Ming, et al. Survey on ambient energy harvesting techniques and its development tendency[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016, 36(4): 1-10.
- [11] JIA Y. Review of nonlinear vibration energy harvesting:

- Duffing, bistability, parametric, stochastic and others[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(7): 921-944.
- [12] BOUGHALEB J, ARNAUD A, MONFRAY S, et al. Coupling of a bimetallic strip heat engine with a piezoelectric transducer for thermal energy harvesting[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2016, 628(1): 15-22.
- [13] WANG J, ZHANG C, GU S, et al. Enhancement of low-speed piezoelectric wind energy harvesting by bluff body shapes: Spindle-like and butterfly-like cross-sections[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 103: 105898.
- [14] ARROYO E, BADEL A, FORMOSA F. Energy harvesting from ambient vibrations: Electromagnetic device and synchronous extraction circuit[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(16): 2023-2035.
- [15] YANG F, DU L, YU H, et al. Magnetic and electric energy harvesting technologies in power grids: A review[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1496.
- [16] LIU W, BADEL A, FORMOSA F, et al. A wideband integrated piezoelectric bistable generator: Experimental performance evaluation and potential for real environmental vibrations[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(7): 872-877.
- [17] TAO K, TANG L, WU J, et al. Investigation of multimodal electret-based MEMS energy harvester with impact-induced nonlinearity[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(2): 276-288.
- [18] KIM D W, KIM S W, JEONG U. Lipids: Source of static electricity of regenerative natural substances and nondestructive energy harvesting[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(52): 1804949.
- [19] TAO K, CHEN Z, YI H, et al. Hierarchical honeycomb-structured electret / triboelectric nanogenerator for biomechanical and morphing wing energy harvesting[J]. *Nano-micro letters*, 2021, 13(1): 1-16.
- [20] WANG Z L, JIANG T, XU L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks[J]. *Nano Energy*, 2017, 39: 9-23.
- [21] WANG Z, HU J, HAN J, et al. A novel high-performance energy harvester based on nonlinear resonance for scavenging power-frequency magnetic energy[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64 (8): 6556-6564.
- [22] CARNEIRO P, SOARES DOS SANTOS M P, RODRIGUES A, et al. Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114191.
- [23] AMBROŹKIEWICZ B, LITAK G, WOLSZCZAK P. Modelling of electromagnetic energy harvester with rotational pendulum using mechanical vibrations to scavenge electrical energy[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 671.
- [24] DĄBROWSKA A, GRESZTA A. Analysis of the possibility of using energy harvesters to power wearable electronics in clothing[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 1-13.
- [25] KAHOU LI B. Does static and dynamic relationship between economic growth and energy consumption exist in OECD countries?[J]. *Energy Reports*, 2019, 5: 104-116.
- [26] LEE B, KIM D H, PARK J, et al. Modulation of surface physics and chemistry in triboelectric energy harvesting technologies[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2019, 20(1): 758-773.
- [27] SLABOV V, KOPYL S, SOARES DOS SANTOS M P, et al. Natural and eco-friendly materials for triboelectric energy harvesting[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 1-18.
- [28] SUNG C, BAI C, CHEN J, et al. Controllable fuel cell humidification by ultrasonic atomization[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239: 151-156.
- [29] PUTRA I, SUNU P W, TEMAJA I W, et al. Investigation on application of ultrasonic humidifier for air conditioning system[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020, 1450(1): 012050.
- [30] AL-ABED M, ANTICH P, WATENPAUGH D E, et al. Phantom study evaluating detection of simulated upper airway occlusion using piezoelectric ultrasound transducers[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2017, 89: 325-336.
- [31] TRESSLER J F. *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*[M]. Boston: Springer, 2008.
- [32] WANG W, JIANG Y, THOMAS P J. Structural design and physical mechanism of axial and radial sandwich resonators with piezoelectric ceramics: A review[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1112.
- [33] 汪恒, 唐荣江, 郑伟光, 等. 基于非完美声学黑洞的压电能量收集系统[J]. *压电与声光*, 2020, 42(6): 859-863.
- WANG Heng, TANG Rongjiang, ZHENG Weiguang, et al. Piezoelectric energy harvesting system based on

- imperfect acoustic black hole[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2020, 42(6): 859-863.
- [34] 黄瑶, 万小丹, 刘伟群. 基于振动能量发电的自适应机械同步开关[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(4): 741-746.
- HUANG Yao, WAN Xiaodan, LIU Weiqun. Optimized adaptive mechanical switch for vibration energy generator[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(4): 741-746.
- [35] 郭晓莹, 李茂军, 李琛. 一种基于压电片的能量转换装置及其优化设计[J]. *压电与声光*, 2018, 40(2): 300-303.
- GUO Xiaoying, LI Maojun, LI Chen. An energy conversion device based on piezoelectric plate and its optimum design[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2018, 40(2): 300-303.
- [36] 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.
- [37] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16(10): 865-876.
- [38] LALLART M, GUYOMAR D. Piezoelectric conversion and energy harvesting enhancement by initial energy injection[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(1): 014104.
- [39] LIU W, ZHAO C, BADEL A, et al. Compact self-powered synchronous energy extraction circuit design with enhanced performance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(4): 47001.
- [40] CHEN Z, XIA Y, HE J, et al. Elastic-electro-mechanical modeling and analysis of piezoelectric metamaterial plate with a self-powered synchronized charge extraction circuit for vibration energy harvesting[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 143: 106824.
- [41] LEFEUVRE E, BADEL A, BRENES A, et al. Power and frequency bandwidth improvement of piezoelectric energy harvesting devices using phase-shifted synchronous electric charge extraction interface circuit[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(20): 2988-2995.
- [42] LIU W Q, BADEL A, FORMOSA F, et al. Wideband energy harvesting using a combination of an optimized synchronous electric charge extraction circuit and a bistable harvester[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(12): 125038.
- [43] BABAYO A A, ANISI M H, ALI I. A Review on energy management schemes in energy harvesting wireless sensor networks[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 1176-1184.
- [44] CARREON-BAUTISTA S, HUANG L, SANCHEZ-SINENCIO E. An autonomous energy harvesting power management unit with digital regulation for IoT applications[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, 51(6): 1457-1474.
- [45] 刘轩, 王越, 吴义鹏. 基于超级电容的储能模块自放电分析[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(3): 2-6.
- LIU Xuan, WANG Yue, WU Yipeng. Self-discharge analysis of energy storage module based on super-capacitor[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(3): 2-6.
- [46] WILLIAMS C B, YATES R B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, 52: 8-11.
- [47] WU Y, BADEL A, FORMOSA F, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 24(12): 1445-1458.
- [48] BADEL A, LEFEUVRE E. Nonlinearity in energy harvesting systems[M]. Cham: Springer, 2016.
- [49] ARROYO E, BADEL A, FORMOSA F, et al. Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: Model and experiments[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 183: 148-156.
- [50] 刘丽兰, 钟声, 吴子英. 雨滴冲击下双稳态压电悬臂梁俘能装置动力学特性及试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 182-189.
- LIU Lilan, ZHONG Sheng, WU Ziyang. Dynamic characteristics study and tests of bistable piezoelectric cantilever beam energy harvester under raindrop impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 182-189.
- [51] 阚君武, 唐可洪, 王淑云, 等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 71-75.
- KAN Junwu, TANG Kehong, WANG Shuyun, et al. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008 16(1): 71-75.
- [52] ERTURK A, INMAN D J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy

- harvesting from base excitations[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(2): 25009.
- [53] 刘琪, 李波, 梅杰, 等. 基于 PVDF 的压电悬臂梁非线性动力学分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2021, 43(6): 69-75.
- LIU Qi, LI Bo, MEI Jie, et al. Nonlinear dynamic analysis of piezoelectric cantilever based on PVDF[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2021, 43(6): 69-75.
- [54] 马天兵, 丁永静, 杜菲, 等. 变截面三角形压电振动能量收集器的特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(6): 27-29.
- MA Tianbing, DING Yongjing, DU Fei, et al. Study on characteristics of variable section triangle piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(6): 27-29.
- [55] 赵娟, 刘伟群, 刘永斌, 等. 压电等应变梁能量回收装置研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(3): 406-409.
- ZHAO Juan, LIU Weiqun, LIU Yongbin, et al. Research on uniform-strain piezoelectric energy harvesting mechanism[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(3): 406-409.
- [56] ARROYO E, JIA Y, DU S, et al. Experimental and theoretical study of a piezoelectric vibration energy harvester under high temperature[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(6): 1216-1225.
- [57] CHEN R, REN L, XIA H, et al. Energy harvesting performance of a dandelion-like multi-directional piezoelectric vibration energy harvester[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 230: 1-8.
- [58] 亓有超, 赵俊青, 张弛. 微纳振动能量收集器研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(13): 1-15.
- QI Youchao, ZHAO Junqing, ZHANG Chi. Review and prospect of micro-nano vibration energy harvesters[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 1-15.
- [59] 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, 5: 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, 5: 12-16.
- [60] LI H, DAI F, DU S. Broadband energy harvesting by exploiting nonlinear oscillations around the second vibration mode of a rectangular piezoelectric bistable laminate[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(4): 45024.
- [61] LI H, LI A. Potential of a vibro-impact nonlinear energy sink for energy harvesting[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159: 107827.
- [62] WU X, LIN J, KATO S, et al. A frequency adjustable vibration energy harvester[C]//*Proceedings of PowerMEMS*, 2008: 245-248.
- [63] TANG L, YANG Y, SOH C. Improving functionality of vibration energy harvesters using magnets[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(13): 1433-1449.
- [64] PILLATSCH P, MILLER L M, HALVORSEN E, et al. Self-tuning behavior of a clamped-clamped beam with sliding proof mass for broadband energy harvesting[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2013, 476(1): 012068.
- [65] LAN C, CHEN Z, HU G, et al. Achieve frequency-self-tracking energy harvesting using a passively adaptive cantilever beam[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107672.
- [66] 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.
- [67] LALLART M, ANTON S R, INMAN D J. Frequency self-tuning scheme for broadband vibration energy harvesting[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(9): 897-906.
- [68] SHAHRUZ S M. Design of mechanical band-pass filters for energy scavenging[J]. *Journal of sound and vibration*, 2006, 292(3-5): 987-998.
- [69] 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): 22001.
- [70] CHEN L, XUE J, PAN S, et al. Study on cantilever piezoelectric energy harvester with tunable function[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(7): 75001.
- [71] YUAN Z, LIU W, ZHANG S, et al. Bandwidth broadening through stiffness merging using the nonlinear cantilever generator[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 132: 1-17.
- [72] HUANG H, YUAN Z, LIU W. Design strategy for optimizing the bandwidth of the hardening vibration generator with customized response[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332: 113197.
- [73] WU H, TANG L, YANG Y, et al. Development of a

- broadband nonlinear two-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(14): 1875-1889.
- [74] DECHANT E, FEDULOV F, FETISOV L, et al. Bandwidth widening of piezoelectric cantilever beam arrays by mass-tip tuning for low-frequency vibration energy harvesting[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(12): 1324.
- [75] UPADRASHTA D, YANG Y. Trident-shaped multimodal piezoelectric energy harvester[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 5(31): 4018070.
- [76] TOYABUR R M, SALAUDDIN M, PARK J Y. Design and experiment of piezoelectric multimodal energy harvester for low frequency vibration[J]. *Ceramics International*, 2017, 43: 675-681.
- [77] YANG L, ZHANG H. A wide-band piezoelectric energy harvester with adjustable frequency through rotating the angle of the jointed beam[J]. *Ferroelectrics*, 2017, 520(1): 237-244.
- [78] ZHAO N, YANG J, YU Q, et al. Three-dimensional piezoelectric vibration energy harvester using spiral-shaped beam with triple operating frequencies[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 15003.
- [79] WEI X, ZHAO H, YU J, et al. A Tower-shaped three-dimensional piezoelectric energy harvester for low-level and low-frequency vibration[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8(5): 1537-1550.
- [80] DENG H, DU Y, WANG Z, et al. A multimodal and multidirectional vibrational energy harvester using a double-branched beam[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 213901.
- [81] 杨涛, 周生喜, 曹庆杰, 等. 非线性振动能量俘获技术的若干进展[J]. *力学学报*, 2021, 53(11): 2895-2909.
- YANG Tao, ZHOU Shengxi, CAO Qingjie, et al. Some advances in nonlinear vibration energy harvesting technology[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(11): 2895-2909.
- [82] MEI X, ZHOU S, YANG Z, et al. Enhancing energy harvesting in low-frequency rotational motion by a quad-stable energy harvester with time-varying potential wells[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 148: 107167.
- [83] LU Z, SHAO D, FANG Z, et al. Integrated vibration isolation and energy harvesting via a bistable piezo-composite plate[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2020, 26(9-10): 779-789.
- [84] YAN Z, SUN W, HAJJ M R, et al. Ultra-broadband piezoelectric energy harvesting via bistable multi-hardening and multi-softening[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 100(2): 1057-1077.
- [85] CHEN Y, CHEN L, XU X, et al. Chaotic motion in a nonlinear car model excited by multi-frequency road surface profile[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(3): 689-697.
- [86] LI X, KEFU L. Development and validation of a piecewise linear nonlinear energy sink for vibration suppression and energy harvesting[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 503: 116104.
- [87] FAN K, TAN Q, ZHANG Y, et al. A monostable piezoelectric energy harvester for broadband low-level excitations[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(12): 123901.
- [88] LAN C, LIAO Y, HU G, et al. Equivalent impedance and power analysis of monostable piezoelectric energy harvesters[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(14): 1697-1715.
- [89] ZHAO D, WANG X, CHENG Y, et al. Analysis of single-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester with stopper by incremental harmonic balance method[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(5): 55502.
- [90] HARNE R L, WANG K. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22: 023001.
- [91] FAN Y, GHAYESH M H, LU T. A broadband magnetically coupled bistable energy harvester via parametric excitation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114505.
- [92] REZAEI M, TALEBITOOTI R, LIAO W. Exploiting bi-stable magneto-piezoelectric absorber for simultaneous energy harvesting and vibration mitigation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 207: 106618.
- [93] ANDÒ B, BAGLIO S, BULSARA A R, et al. A bistable buckled beam based approach for vibrational energy harvesting[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 211: 153-161.
- [94] MASANA R, DAQAQ M F. Relative performance of a vibratory energy harvester in mono- and bi-stable potentials[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(24): 6036-6052.
- [95] YANG T, CAO Q. Time delay improves beneficial

- performance of a novel hybrid energy harvester[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 96(2): 1511-1530.
- [96] JIANG W, CHEN L. Snap-through piezoelectric energy harvesting[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(18): 4314-4325.
- [97] 芮小博, 李一博, 曾周末. 压电悬臂梁振动能量收集器研究进展[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(17): 112-123.
- RUI Xiaobo, LI Yibo, ZENG Zhoumo. Research progress of piezoelectric cantilever vibration energy collector[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 39(17): 112-123.
- [98] LI H, QIN W, LAN C, et al. Dynamics and coherence resonance of tri-stable energy harvesting system[J]. *Smart materials and structures*, 2015, 25(1): 15001.
- [99] WANG G, ZHAO Z, LIAO W, et al. Characteristics of a tri-stable piezoelectric vibration energy harvester by considering geometric nonlinearity and gravitation effects[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106571.
- [100] LENG Y, TAN D, LIU J, et al. Magnetic force analysis and performance of a tri-stable piezoelectric energy harvester under random excitation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 406: 146-160.
- [101] ZHOU Z, QIN W, ZHU P. A broadband quad-stable energy harvester and its advantages over bi-stable harvester: Simulation and experiment verification[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 84: 158-168.
- [102] YUAN Z, LIU W, YE M. A mapping method of dynamic response and stiffness characteristics for realizing a customized nonlinear oscillator[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 102(4): 2531-2548.
- [103] CHANDRASEKHAR A, VIVEKANANTHAN V. A fully packed spheroidal hybrid generator for water wave energy harvesting and self-powered position tracking[J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104439.
- [104] LAI Z, WANG S, ZHU L, et al. A hybrid piezo-dielectric wind energy harvester for high-performance vortex-induced vibration energy harvesting[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150: 107212.
- [105] CAI M, YANG Z, CAO J, et al. Recent Advances in Human Motion Excited Energy Harvesting Systems for Wearables[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(10): 2000533.
- [106] HUANG M, HOU C, LI Y, et al. A Low-frequency MEMS piezoelectric energy harvesting system based on frequency up-conversion mechanism[J]. *Micromachines*, 2019, 10(10): 639.
- [107] POZZI M, ZHU M. *Advances in energy harvesting methods*[M]. New York: Springer, 2013.
- [108] ZOU H, ZHANG W, LI W, et al. Magnetically coupled flextensional transducer for wideband vibration energy harvesting: Design, modeling and experiments[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 416: 55-79.
- [109] HAN D, YUN K. Piezoelectric energy harvester using mechanical frequency up conversion for operation at low-level accelerations and low-frequency vibration[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(8): 1669-1676.
- [110] WU Y, QIU J, ZHOU S, 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.
- [111] WU Y, LI S, FAN K, et al. Investigation of an ultra-low frequency piezoelectric energy harvester with high frequency up-conversion factor caused by internal resonance mechanism[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 108038.
- [112] LIU H, LEE C, KOBAYASHI T, et al. Investigation of a MEMS piezoelectric energy harvester system with a frequency-widened-bandwidth mechanism introduced by mechanical stoppers[J]. *Smart materials and structures*, 2012, 21(3): 35005.
- [113] HALIM M A, PARK J Y. Theoretical modeling and analysis of mechanical impact driven and frequency up-converted piezoelectric energy harvester for low-frequency and wide-bandwidth operation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 208: 56-65.
- [114] KATHPALIA B, TAN D, STERN I, et al. An experimentally validated model for geometrically nonlinear plucking-based frequency up-conversion in energy harvesting[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(1): 15024.
- [115] FU X, LIAO W. Modeling and analysis of piezoelectric energy harvesting with dynamic plucking mechanism[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2019, 141(3): 031002.
- [116] TRAN N, GHAYESH M H, ARJOMANDI M. Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2018, 127: 162-185.
- [117] FAN K, LIU S, LIU H, et al. Scavenging energy from

- ultra-low frequency mechanical excitations through a bi-directional hybrid energy harvester[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 8-20.
- [118] KUANG Y, YANG Z, ZHU M. Design and characterization of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking[J]. *Smart materials and structures*, 2016, 25(8): 85029.
- [119] XUE T, ROUNDY S. On magnetic plucking configurations for frequency up-converting mechanical energy harvesters[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 253: 101-111.
- [120] XIE Z, KITIO KWUMIY C A, WANG Z, et al. A piezoelectric energy harvester for broadband rotational excitation using buckled beam[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(1): 15125.
- [121] SPECIALE A, ARDITO R, BAÙ M, et al. Snap-through buckling mechanism for frequency up-conversion in piezoelectric energy harvesting[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3614.
- [122] CAO D X, LEADENHAM S, ERTURK A. Internal resonance for nonlinear vibration energy harvesting[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(14): 2867-2880.
- [123] 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.
- [124] 黄玲璐, 毛晓晔, 丁虎, 等. 内共振作用下轴向运动黏弹性梁横向受迫振动[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 69-73.
- HUANG Linglu, MAO Xiaoye, DING Hu, et al. Transverse non-linear forced vibration of an axially moving viscoelastic beam with an internal resonance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 36(17): 69-73.
- [125] 冯志华, 胡海岩. 直线运动柔性梁非线性动力学直线运动柔性梁非线性动力学——组合参数共振与内共振联合激励[J]. *振动工程学报*, 2004, 17(3): 253-257.
- Feng Zhihua, Hu Haiyan. Nonlinear dynamics of flexible beams undergoing a large linear motion of basement: Combinational parametric and Internal resonances[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2004, 17(3): 253-257.
- [126] WU Y, QIU J, KOJIMA F, et al. Design methodology of a frequency up-converting energy harvester based on dual-cantilever and pendulum structures[J]. *AIP Advances*, 2019(9): 045312.
- [127] WU Y, JI H, QIU J, et al. An internal resonance based frequency up-converting energy harvester[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(13): 2766-2781.
- [128] KAN B, YUE W, XUEWEN H, et al. Equivalent stiffness of metal clip-like piezoelectric spring structure[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 6(37): 963-970.
- [129] XU J, TANG J. Modeling and analysis of piezoelectric cantilever-pendulum system for multi-directional energy harvesting[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(3): 323-338.

作者简介: 吴义鹏, 男, 1986 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为基于压电材料的振动控制与能量收集。

E-mail: yipeng.wu@nuaa.edu.cn

裘进浩(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为压电智能材料, 结构健康监测, 振动噪声控制等。

E-mail: qiu@nuaa.edu.cn