评述

非线性宽频振动能量采集技术的研究进展

代显智^{①*}, 张章^②, 刘小亚^①, 卞雷祥^③^① 西华师范大学电子信息工程学院, 南充 637009;^② 西华师范大学物理与空间科学学院, 南充 637009;^③ 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094

* E-mail: daixianzhi@sina.com

收稿日期: 2015-12-23; 接受日期: 2016-05-10

国家自然科学基金(批准号: 51405231)、西华师范大学基本科研业务费专项资金(批准号: 15C001)和西华师范大学创新团队基金(批准号: CXTD2015-13)资助项目

摘要 环境中的振动大都不是单一频率的振动, 其频率成分分布在一个较宽的频带内. 为了充分采集环境中的振动能量, 实现无线传感器的自供电, 要求振动能量采集器具有宽频振动采集性能. 非线性振动法是目前研究最多的一种方法, 利用非线性振动法可较容易地实现宽频振动能量采集, 且能获得较好的能量采集性能. 本文阐述了非线性宽频振动能量采集器的工作原理、机电耦合理论, 根据不同的类型介绍了宽频振动能量采集器的最新研究进展, 总结了不同类型的优缺点, 并对非线性宽频振动能量采集器的发展趋势进行了展望.

关键词 自供电, 振动能量采集, 宽频, 非线性

1 引言

随着物联网的高速发展, 无线传感器网络得到了广泛的应用. 大多数的无线传感器都通过电池供给能量, 其能量有限, 不能满足长期工作的需要. 为了解决这个问题, 研究人员提出采用能量采集技术把环境中其他形式的能量转化为电能, 为电子设备提供能量. 振动能量广泛存在于机床、车辆、桥梁、船舶、家用电器等各种生产生活设备中, 也存在于人体的血液流动、心脏跳动、肢体运动等生命过程中, 因此采集环

境振动能量为无线传感器、便携式设备等低功耗产品提供能量具有非常广的应用前景. 然而环境中的振动大都不是单一频率的振动, 它的频率成分常分布在一个较宽的频带内. 线性谐振式振动能量采集器的频带窄, 无法满足实际应用需求^[1]. 为了充分采集环境中的振动能量, 要求振动能量采集器具有宽频采集特性. 目前实现宽频振动能量采集的方法有^[1]: 调谐法^[2,3]、非线性法^[4,5]、多模态法^[6,7]、升频法^[8,9]等. 这些方法各有优缺点, 其中非线性法研究的人较多. 本文将介绍非线性法的研究进展, 并展望其发展趋势.

引用格式: 代显智, 张章, 刘小亚, 等. 非线性宽频振动能量采集技术的研究进展. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 791–807

Dai X Z, Zhang Z, Liu X Y, et al. Research progress of broadband vibration energy harvesting technology using nonlinear method (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 791–807, doi: 10.1360/N092015-00227

2 非线性宽频振动能量采集器工作原理与机电耦合理论

2.1 工作原理

对于非线性振动能量采集器来说, 其振荡器的运动方程可表示为^[10-13]

$$\ddot{x} = -\frac{dU(x)}{dx} - \gamma\dot{x} + f(t), \quad (1)$$

式中, x 为振荡器振动位移, $U(x)$ 为势能函数, γ 为阻尼系数, $f(t)$ 为环境振动产生的振动力. 多数非线性振动能量采集器的振荡器采用非线性杜芬振荡器, 非线性杜芬振荡器的势能函数 $U(x)$ 可描述为^[1,14,15]

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4, \quad (2)$$

式中, a 和 b 为常数. 将式(2)代入式(1)得到

$$\ddot{x} + \gamma\dot{x} - ax + bx^3 = f(t). \quad (3)$$

从式(3)可看出, 非线性系统与线性系统的区别在于系统刚度是非线性的, 即式(3)含有 x 的二次方以上的项. 当运动方程式(3)中的 $b < 0$ 时, 系统为硬弹簧特性的非线性系统, 当 $b > 0$ 时, 系统为软弹簧特性的非线性系统. 非线性系统的振幅频率响应曲线一般如图 1 所示^[16], 图 1 中 β 为振幅, ω 为振动角频率. 软弹簧特性的非线性系统的频率曲线向左弯曲, 而硬弹簧特性向右弯曲. 这种弯曲的曲线使得采集器具有宽频采集特性.

图 1 (网络版彩图)非线性系统振幅频率响应曲线

(a) 软弹簧特性; (b) 硬弹簧特性

非线性系统又分为单稳态非线性系统和双稳态非线性系统. 式(3)中, 当 $a < 0$ 时, 系统为单稳态非线性系统; $a > 0$ 时, 系统为双稳态非线性系统. 这种分类可从势能函数的角度来解释. 不同 a 值下势能函数 $U(x)$ 的曲线图如图 2 所示. 从图 2 可看出: 当 $a < 0$ 时, 势能函数 $U(x)$ 的最小值只有一个(即 $x=0$ 处), 系统静平衡时只有一个稳定状态, 所以系统为单稳态非线性系统; 当 $a > 0$ 时, 势能函数 $U(x)$ 出现两个势阱和一个势垒, 两个势阱位于 $x = \pm\sqrt{a/b}$ 处, 势垒位于 $x=0$ 处, 系统静平衡时具有两个稳定状态, 位于两个势阱处, 这两个稳定状态在空间位置上是相互分离的, 所以系统为双稳态非线性系统. 对于双稳态系统, 当外界振动能量小于势垒值时, 系统将在其中一个势阱附近振动; 当外界振动能量大于势垒值时, 系统将跨越这两个势阱振动, 这时系统可获得更宽的响应频带, 且可用于随机振动能量采集. 由此可知, 双稳态非线性系统设计的关键是: 选择合适的参数, 使势垒值尽量小, 这样采集器在较小的外界振动下, 能跨越两个势阱振动, 容易得到更宽的频带.

2.2 机电耦合理论

2005 年 Lefeuvre 等人^[17,18]采用同步电荷提取法建立了线性压电振动能量采集器的机电耦合方程. 在此基础上, 2009 年 Stanton 等人^[19,20]研究了基于杜芬振荡器的非线性压电振动能量采集器机电耦合方程. 同年 Cottone 等人^[12]建立了随机振动下非线性压电式振动能量采集器的机电耦合方程^[12,21-25]为

$$m\ddot{x} = -\frac{dU(x)}{dx} - \gamma\dot{x} - K_p V(t) + \sigma\zeta(t), \quad (4)$$

图 2 (网络版彩图)势能函数 $U(x)$

$$\dot{V}(t) = K_c \dot{x} - \frac{V(t)}{R_L C}, \quad (5)$$

式中, m 为质量块质量, K_v 为电机耦合系数, $V(t)$ 为负载电阻 R_L 上的电压, $\sigma\dot{\xi}(t)$ 为随机振动力, 其中 σ 为噪声标准偏差, K_c 为机电耦合系数, C 为压电换能器电容, 其余参数与式(1)相同. 若将式(4)中 $\sigma\dot{\xi}(t)$ 随机振动力换成正弦振动力 $f(t)$, 就可得到正弦振动下的机电耦合方程^[19].

针对电磁式振动能量采集器, 2011 年 Arroyo 和 Badel^[26] 采用同步磁通提取法建立了线性电磁振动能量采集器的机电耦合方程. Karami 和 Inman^[25] 建立了非线性电磁振动能量采集器的机电耦合方程^[21,25,26]:

$$m\ddot{x} = -\frac{dU(x)}{dx} - \gamma\dot{x} - K_v I(t) + \sigma\dot{\xi}(t), \quad (6)$$

$$L\dot{I}(t) = K_c \dot{x} - (R_L + R_I)I(t), \quad (7)$$

式中, $I(t)$ 为负载电阻 R_L 上通过的电流, L 为线圈电感, R_I 为线圈内阻. 将式(2)分别代入式(4)和(6)就可得到采用杜芬振荡器的机电耦合方程.

3 非线性宽频振动能量采集器研究进展

从不同的角度非线性宽频振动能量采集器可分为不同的类型. 根据势能函数的特征, 可分为单稳态和双稳态非线性宽频振动能量采集器; 根据是否具有多方向采集能力, 可分为单方向和多方向非线性宽频振动能量采集器; 根据非线性振荡器工作机理, 可分为基于磁力、基于屈曲结构、基于摆式结构、基于多梁结构、基于碰撞等类型的非线性宽频振动能量采集器. 下面将主要从非线性振荡器工作机理这个角度, 结合其他分类法, 分别介绍非线性宽频振动能量采集器的研究进展.

3.1 基于磁力的非线性宽频采集器

3.1.1 基于磁力的单稳态宽频采集器

2009 年 Stanton 等人^[19] 提出了一种具有双向滞回现象的非线性振动能量采集器, 该采集器的结构示意图如图 3(a)所示. 采集器由一个末端固定有磁铁的压电悬臂梁和两个极性相反的固定磁铁组成. 这两个固定磁铁与压电梁上的磁铁放置在同一平面内. 研究两个固定磁铁位置对频带宽度的影响. 研究过程中, 保持 h 不变, 改变 d 值(h 和 d 代表的位置见图

3(a)), 得到如下结论: (1) 当两个磁铁放置在悬臂梁磁铁后面时(d 为正), 采集器是一个硬弹簧特性非线性系统; (2) 当两个磁铁放置在悬臂梁磁铁的前面时(d 为负), 采集器是一个软弹簧特性非线性系统. 他们测量得到的实验结果如图 3(b)所示. 实验结果表明: 软弹簧特性系统的带宽大于硬弹簧特性的带宽; 在 $d=-12.2$ mm, $h=40.65$ mm, 振动加速度为 0.3 g (1 g= 9.8 m/s², 下同)时, 采集器的带宽约为 4 Hz, 最大输出功率约 0.52 mW. 这种振动采集器特别适用于频率缓慢减少的振动能量采集场合.

同年, Xing 等人^[27] 提出了一种基于高磁导率悬臂梁的振动能量采集器. 该采集器由一个螺旋管线圈、一根高磁导率悬臂梁和两个磁铁构成(图 4(a)). 高磁导率悬臂梁放置在螺旋管线圈的中部. 两个完全相同的矩形磁铁放置在螺线管外, 且靠近悬臂梁自由端处. 两磁铁的磁场方向相反, 并与悬臂梁平行布置. 由于悬臂梁自由端处于非均匀空间磁场中, 在上下振动时, 高磁导率悬臂梁将被磁化, 且磁化方向将发生 180° 的翻转, 如图 4(b)所示. 在相同振动激励下, 这种翻转磁化使线圈能感应到更多的磁通变化量, 从而输出更高的电压. 利用欧拉伯努利方程推导

图3 非线性振动能量采集器与其实验测量的功率频率曲线图(引自 Stanton 等人^[19])

图4 (网络版彩图)基于高磁导率悬臂梁的振动能量采集器^[27]

(a) 结构图; (b) 磁通方向变化图

了梁的运动方程, 结合法拉第感应定律得到了采集器的电输出特性. 理论和实验研究表明: 采集器的振动是非线性振动, 其半功率带宽达到 10 Hz, 在 54 Hz, 0.57 g 加速度振动下, 产生的最大功率达到 74 mW, 功率密度达到 1.07 mW/cm^3 . 与其他发电机制的采集器相比, 这种基于高磁导率悬臂梁的振动能量采集器不仅能输出更高的功率, 而且能获得更宽的响应频带.

2009 年 Mann 和 Sims^[28]研究了基于磁悬浮的非线性振动能量采集器. 它由 3 个圆形磁铁、1 个圆形 Teflon 管、2 个线圈组成, 如图 5(a)所示. 两个磁铁通过螺纹固定在 Teflon 管的上下端, 中间磁铁在上下磁铁排斥力作用下, 悬浮在中间. 建立的运动方程为杜芬方程, 与式(3)相同. 理论和实验研究表明, 在小的振动激励下, 采集器的速度频率响应曲线为线性曲线, 在大的振动激励下, 为非线性曲线. 2013 年 Olaru 和 Gherca^[29]也对这种悬浮采集器进行了理论和实验研究, 并对采集器进行了优化设计. 设计的固定磁铁直径 10 mm 厚 2 mm, 中间磁铁直径 10 mm 厚 10 mm, 两个线圈的匝数都为 800 匝. 当固定磁铁间距为 75 mm 时, 在大振幅下采集器的非线性特性明显, 如图 5(b)所示. 在 7 mm 振幅下, 采集器输出的最大功率达到 64 mW, 半功率带宽达到 2.42 Hz.

2011 年 Sardini 和 Serpelloni^[30]提出了一种可在低频振动环境中将机械能转换为电能的非线性振动能量采集器. 采集器的结构如图 6 所示, 它由 2 个磁铁组、1 个扁平的薄膜谐振器、1 个圆筒框体等组成. 圆筒框体采用 Teflon 材料, 直径为 28 mm、高为 14 mm. 薄膜谐振器对称地放置在两磁铁组的中间位置. 每个磁铁组由 1 个环形磁铁和 1 个圆柱形磁铁构成, 其中, 圆柱形磁铁放入在环形磁铁的中间. 两个磁铁组与薄膜谐振器都牢固地固定在圆筒框体上. 薄膜

图5 (网络版彩图)磁悬浮非线性振动能量采集器及其输出功率频率曲线(引自 Olaru 和 Gherca^[29])

图6 (网络版彩图)Sardini 和 Serpelloni^[30]提出的非线性振动能量采集器

谐振器由线圈粘在聚合物材料上构成. 通过选择不同的聚合物材料可制成线性和非线性的振动能量采集器. 在实验研究中, 选用 FR4 材料(PCB 覆铜板的一种材料)和 Latex 材料(橡胶材料)分别制作了线性和非线性的采集器. 由于 Latex 材料的弹性模量不是常数, 所以用它制作的采集器是非线性采集器. 对采集器进行理论和实验研究, 实验研究结果表明: 线性采集器的谐振频率为 102 Hz, 最大输出功率为 $290 \mu\text{W}$, 能量转换效率为 0.5%; 非线性采集器的半功率带宽为 10 Hz(采集频率范围为 30~40 Hz), 最大输出功率为 $153 \mu\text{W}$, 能量转换效率为 3.3%.

2012 年马华安等人^[31]提出一种利用磁力的非线性拓宽采集器频带的结构, 如图 7 所示. 该采集器在压电悬臂梁末端固定 2 个磁铁, 然后在悬臂梁附近框体的上下方各固定 1 个磁铁. 根据 4 个磁铁间的磁力不同以及有无上下磁铁, 分成 5 种情况展开实验研

图7 马华安等人^[31]研究的非线性振动能量采集器

究: 1) 上下方均无磁铁; 2) 上方排斥, 下方吸引; 3) 上方吸引, 下方排斥; 4) 上下方均排斥; 5) 上下方均吸引. 研究中保持 0.5 g 的加速度不变, 将峰峰电压在 10 V 以上的频率范围称为有效带宽. 研究结果表明: 第2种方式的频带最宽为 $80\sim 100\text{ Hz}$, 对应的 3 dB 带宽为 10 Hz , 最大峰峰值电压为 15.4 V ; 其余几种的频带较窄, 最窄的是第3种方式, 其有效频带为 $72\sim 83\text{ Hz}$, 最大峰峰值电压为 22.2 V .

3.1.2 基于磁力的双稳态宽频采集器

2009年 Cottone 等人^[12]提出了一种基于压电倒立摆的双稳态振动能量采集器, 其结构如图8(a)所示. 压电倒立摆的顶端固定有一磁铁, 同时在其正上方框体上, 布置有一可调距离的磁铁. 该磁铁与倒立摆上磁铁间的磁力为排斥力. 研究在不同间距(Δ)下势能函数 $U(x)$ 与位移 x 的变化规律, 发现: 当两磁铁间距 Δ 较小时, 倒立摆成为双稳态非线性振荡器; 当 Δ 较大时, 倒立摆为线性振荡器. 在3种不同标准偏差的随机振动作用下, 研究采集器功率与 Δ 的关系曲线(图8(b)). 图8(b)中, 连续曲线为理论曲线, 离散点为实测数据. 根据图8(b)可看出: 建立的理论结构与实验结构吻合得较好; 双稳态结构能显著地提高采集器的输出功率和带宽; 两磁铁间距对输出功率和带宽有很大影响, 间距适中时才能更好地提高采集器的输出功率和带宽.

2009年 Erturk 等人^[10]提出了一种采用铁磁压电梁的双稳态振动能量采集器, 该采集器由铁磁压电梁、两个固定磁铁构成(图9(a)). 两个固定磁铁对称地布置在铁磁压电梁自由端附近. 通过理论研究发现: 铁磁压电梁在磁铁的磁化作用下, 存在多个稳定状态. 对加固定磁铁和不加固定磁铁两种情况进行了对比研究. 在 0.5 g 加速度振动下, 加固定磁铁的采集器具有更宽的响应频带($0\sim 8\text{ Hz}$), 且输出的电压

图8 (网络版彩图)压电倒立摆双稳态采集器^[12](a)和不同噪声标准偏差下的功率与 Δ 关系曲线(b)

图9 (网络版彩图)铁磁压电梁双稳态采集器

(a) Erturk 等人^[10]提出的采集器; (b) Ferrari 等人^[33]提出的采集器

是不加磁铁的3倍. 2014年 Kumar 等人^[32]进一步对该结构进行了理论研究, 讨论了该结构在高斯白噪声振动激励下的能量采集特性.

2011年 Ferrari 等人^[33]还对铁磁压电悬臂梁的双稳态非线性采集器进行了研究(图9(b)), 与 Erturk 等人的研究相比, 将两个固定磁铁换成一个固定磁铁. 铁磁压电梁由压电薄膜粘在铁磁材料上构成, 铁磁材料具有较高的磁导率($\mu_r=5000$). 在水平方向上, 悬臂梁的自由端部与磁铁相距为 d , 当 d 小于某一分叉距离 d_{bif} 时, 悬臂梁为双稳态梁; 当 $d>d_{\text{bif}}$ 时, 悬臂梁

变为单稳态梁. 磁铁厚度 t 不同, 分叉距离 d_{bif} 不同, 如: $t=2\text{ mm}$ 时, $d_{\text{bif}} \approx 7\text{ mm}$; $t=6\text{ mm}$ 时, $d_{\text{bif}} \approx 4\text{ mm}$. 当距离 d 足够小时, 理论和实验表明该采集器是一个具有软弹簧特性的非线性系统. 当工作在双稳态时, 实验表明采集器产生的电压大约为线性采集器的 400%.

2010 年 Ferrari 等人^[34]提出了一种双稳态非线性振动能量采集器. 它由 2 个磁铁和 1 个压电悬臂梁构成(图 10(a)). 两个磁铁间的磁力为排斥力, 所以悬臂梁有两个稳态位置, 分别位于固定磁铁的上下方. 在适当的条件下, 系统能在这两个稳定状态之间振动, 可感应随机振动, 且能提高能量转换效率. Ferrari 等人^[34]建立了采集器的运动方程, 并对采集器的势能函数进行了分析, 分析结果表明: 磁铁间排斥力调节到合适的大小时, 可获得双稳态非线性能量采集器. 还进行了实验研究, 研究结果表明: 与线性振动能量采集器相比, 双稳态采集器的输出电压提高了 88%, 且在电阻负载上获得的功率是线性采集器的 250%. 这种模型在微型化后也具有双稳态非线性特性, 因此可用作 MEMS 级的采集器. 2012 年 Vocca 等人^[13]、唐炜等人^[35]也对该结构进行了研究, Vocca 等人^[13]研究结果同样表明双稳态非线性采集器输出功率高于线性采集器, 是线性采集器的 5.5~34.4 倍.

2014 年周生喜等人^[36]提出了一种磁耦合双稳态压电振动能量采集器, 并对其非线性动力学模型进行了研究, 其结构如图 10(b)所示. 系统由双压电悬臂梁、悬臂梁端部磁铁、外部磁铁等组成. 由于悬臂梁受到外部磁铁的非线性磁场力作用, 使其变成非线性刚度的悬臂梁. 用微型测力仪测量了非线性回复力, 并用多项式拟合获得其表达式, 然后利用哈密顿原理、欧拉-伯努利梁理论和压电理论等, 建立了系

图 10 (网络版彩图)双稳态采集器

(a) Ferrari 等人^[34]提出的双稳态采集器; (b) 周生喜等人^[36]提出的双稳态采集器

统理论模型. 理论和实验研究结果表明: 该模型能描述非线性宽频能量系统的跳跃频率、最大电压和有效带宽等关键设计参数; 采集器的 3 dB 带宽约为 2.9 Hz.

2012 年 Andò 等人^[37]提出了一种基于双梁结构的双稳态非线性振动能量采集器. 采集器由两个平行的压电悬臂梁构成(图 11), 两个压电悬臂梁的末端分别固定有一个磁铁, 这两个磁铁的磁场方向完全相同. 研究结果表明: 双梁结构的双稳态振动能量采集器具有宽频响应特性, 且在 0.58 g 的加速度振动激励下, 在 500 kΩ 的电阻上获得 3.5 μW 的功率, 是单梁双稳态采集器(图 10(a)所示采集器)的 2 倍.

3.2 基于屈曲结构的非线性宽频采集器

2013 年 Xu 等人^[38]提出了一种采用弯曲压电梁的双稳态振动能量采集器, 如图 12(a)所示. 压电梁由两层压电片夹一层铍青铜构成, 并在中部固定有一质量块. 压电梁两端固定, 其中一个固定端可位动, 用来调整压电梁压缩程度. 当压电梁受到的轴向压缩力大于压电梁弯曲力时, 形成上凸或下凹两个稳态. 利用势能函数研究了势阱与轴向压缩位移 Δl 的关系, 改变 Δl 可改变势垒的大小, 从而实现最佳的采集器设计. 实验测量不同 Δl 的开路电压频率关系曲线如图 12(b)所示. 从图 12(b)可看出 $\Delta l=0.06\text{ mm}$ 时, 采集器的频带最宽(3 dB 带宽达到 17.2 Hz), 输出的电压也较高. 与采用磁铁的双稳态结构相比, 这种弯曲压电梁结构简单, 便于制作成 MEMS 级的振动能量采集器. 但该采集器要求外界振动的加速度要大于某个阈值加速度, 才能跨越两个势阱振动, 产生大的电压输出, 制作的采集器在 $\Delta l=0.08\text{ mm}$ 时, 阈值加速度约为 1.43 g, 若低于这个阈值加速度, 采集器输出的电压会低于传统线性压电采集器的输出(即 $\Delta l=0\text{ mm}$ 时的输出).

图 11 (网络版彩图)基于双梁结构的双稳态采集器^[37]

图 12 (网络版彩图)弯曲压电梁双稳态采集器结构图^[38](a)和开路电压频率关系曲线,在 20 m/s^2 加速度振动下测量(b)

为了提高弯曲压电梁双稳态采集器在低水平振动下的电输出特性,2013 年 Zhu 和 Zu^[39]提出了一种施加磁力的弯曲压电梁双稳态采集器,如图 13 所示.该采集器在压电梁的中心处粘有两个磁铁,另在梁中心附近的上下框体上各布置有一磁铁,这两个磁铁与压电梁中点的垂直距离均为 D . 固定磁铁时,使框体上的两个磁铁与压电梁磁铁均为排斥力. 在中心磁力作用下,梁有两个稳态和两个非平衡稳态(图 13(a)为两个稳态,图 13(b)为两个非平衡稳态). 实验测量了无磁力(仅去除框体两磁铁)和有磁力两种情况下,压电梁开路电压频率关系曲线(图 13(c)). 从图 13(c)可看出,施加了中点磁力后的电压和带宽都得到了很大的提高. 研究加速度、磁铁间距 D 对输出电压和频带的影响,发现:随着加速度的减小,输出电压和带宽均减小,但在 0.2 g 的低振动激励下采集器仍能输出有用的电压;随着磁铁间距 D 减小,输出的电压和带宽均增大,同时也提高了采集器的工作频率,因此调节 D ,可实现频率调谐,以适应不同的振动环境.

片状弯曲悬臂梁双稳态采集器,也能在较小的加速度下实现双稳态振动. 2013 年 Arrieta 等人^[5,40]研究的片状弯曲悬臂梁双稳态采集器,如图 14 所示. 片状

弯曲悬臂梁上粘有两个压电片. 片状弯曲悬臂梁的尺寸为 $320 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$, 两个压电片的尺寸均为 $95 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$. 研究表明:该采集器在 0.1 g 的加速度下,就可产生跨越势阱的振动;在 0.25 g 加速度下可实现 4.5 Hz 的带宽,输出最大功率达到 5 mW .

2015 年浙江大学彭利明等人^[41]提出了一种浅球壳型双稳态振动能量采集器. 该采集器是在浅球壳上对称布置压电层构成. 与前两种曲板结构相比,该结构在微电子工艺中更容易实现. 应用假设模态法及 Lagrange 方程法导出了浅球壳结构非线性随机微分方程,给出了最优无量纲几何参数与最优无量纲可收集功率. 得到的无量纲公式,可对这类采集器进行优化设计.

图 13 (网络版彩图)施加磁力的弯曲压电梁双稳态采集器^[39]

(a) 两个稳态; (b) 两个非平衡稳态; (c) 在 0.8 g 加速度振动下有、无中点磁力的开路电压频率关系曲线

图 14 (网络版彩图)片状弯曲悬臂梁双稳态采集器^[5]

3.3 基于摆式结构的非线性宽频采集器

由于摆在大幅摆动下具有非线性特性, 因此利用摆也可实现宽频振动能量采集. 2006 年 Spremann 等人^[42]提出了一种非谐振摆式振动能量采集器(图 15(a)), 它有两个摆, 每个摆嵌有两个极性相反的磁铁, 这两个摆通过轴承连在一起. 两个摆间装有一平板, 平板上嵌有 6 个线圈. 摆将环境中线性振动转化为摆的来回摆动, 摆动过程中磁铁产生变化的磁通, 使固定不动的线圈因电磁感应产生电输出. 当振动振幅从 30 Hz 的 100 μm 线性减少到 80 Hz 的 75 μm , 采集器样机能产生 0.4~3 mW 的功率, 最大功率密度为 2 mW/cm³, 最高转换效率达到 15%. 但该采集器有一个缺点, 需要给予一个横向初始扰动, 才能感应垂直方向的振动.

利用多个摆臂可以克服单摆臂采集器需要初始扰动的缺点, 2015 年 Yili 等人^[43]提出了采用 3 个摆臂的电磁式宽频振动能量采集器(图 15(b)), 用于采集人行走的能量. 对摆臂长度、摆臂夹角、质量块质量、摆臂有无质量块等进行了研究. 制作的样机在 4~6 km/h 的行走速度中, 能输出 8.47~23.39 mW 的功率, 功率密度为 0.059~0.162 mW/cm³.

为了研究频率失调的影响, 2015 年 Malaji 和 Ali^[44]提出了一种采用两个耦合摆和两个线圈的电磁式振动能量采集器, 如图 16 所示. 两个摆平行布置, 中间用一弹簧相连, 另外再用两个弹簧将两个摆与框体连在一起. 摆幅超过 5° 时, 耦合摆展现出非线性特性, 保持 3 mm 振幅不变时, 能实现 0.8 Hz 的带宽, 采集频率范围为 2~2.8 Hz, 最大输出功率达到 110 μ W.

2012 年 Ma 等人^[45]提出了一种参数激励的非线

图 15 (网络版彩图)非谐振的摆式采集器^[42](a)和采用 3 个摆臂的采集器^[43](b)

图 16 (网络版彩图)采用两个耦合摆的采集器^[44]

性宽频振动能量采集器,该采集器由1个摆、1个圆柱型磁铁和2个线圈构成(图17).摆与圆柱形磁铁固定连在一起,在外界振动作用下,摆带动磁铁来回摆动,产生变化的磁通,使静止不动的线圈产生电输出.制作的样机在0.14 g加速度条件下,能实现约2 Hz的带宽,最大功率达到0.78 mW.

2016 年 Dai^[46]提出了一种基于旋转摆的磁电式非线性宽频振动能量采集器,该采集器由 1 个旋转摆、1 个 Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D 磁电换能器和框体构成(图 18)。旋转摆由 2 个对称的扇形块和一根转轴构成,通过轴承固定在框体支撑板上,可相对于框体做自由摆动。每个扇形块又由 2 个子扇形块和 3 个磁铁构成。在振动作用下,磁铁与磁电换能器间的切向磁力始终试图将磁铁拉回静平衡位置,这样该切向磁力起到回复力的作用,使旋转摆绕静平衡位置来回地摆动。建立了采集器的机电分析模型,并进行了实验验证。研究表明该采集器具有宽频和倍频特性,制作的样机在 0.5 g 加速度条件下,能实现 3.2 Hz 的 3 dB 带宽(采集频率范围为 14.8~18.0 Hz),最大功率达到 0.9702 mW。

3.4 基于碰撞的非线性宽频采集器

分段线性刚度是非线性的另一种类型，可以通

图 17 参数激励的摆式采集器^[45]

图 18 (网络版彩图)采用旋转摆的磁电式采集器^[46]

过止动块和碰撞等方式引入。2008 年 Soliman 等人^[47,48]提出了一种采用止动块的电磁式宽频采集器,如图 19(a)所示。通过他们的理论和实验研究表明:采用止动块的采集器能提高向上和向下扫描的带宽,同时能采集随机振动能量。他们制作的样机在 0.1 g 加速度振动下的频率响应曲线如图 19(b)所示。实验测量的向上扫描半功率带宽达到 4.79 Hz, 是不加止动块时的 240%, 但最大功率与无止动块时的相比会

图 19 (网络版彩图)采用止动块的电磁式宽频采集器^[47,48]
(a) 结构图; (b) 频率响应图

降低 30%。

2012 年 Mak 等人^[49]研究了采用单个止动块的压电振动能量采集器的理论模型(图 20(a))。考虑了几何非线性和材料非线性影响,分别建立了有无止动块时采集器的非线性模型。建模时止动块产生的冲击力采用数值模拟法来估算。研究发现:材料非线性对结果的影响高于几何非线性;止动块能降低悬臂梁的偏转位移和最大弯曲应力,同时也降低了采集器的输出功率。

2015 年 Halim 等人^[50]研究了具有两个自由度且带止动块的压电式宽频采集器(图 20(b))。采集器由两个梁构成,主梁采用聚碳酸酯梁,第二个梁为压电悬臂梁,止动块用来限制主梁的振幅。止动块的引入实现了宽频振动采集,同时止动块产生的冲击传递到压电悬臂梁,可进一步提高采集器的能量输出。采集器样机在 0.3~1 g 加速度振动下,半功率带宽为 12~15 Hz,最大输出功率达到 449 μW (对应振动为 17 Hz, 1 g 加速度)。该装置能有效地采集冲击或低频随机振动的能量。

双稳态采集器容易陷入单个势阱中振动,导致采集效率降低。针对这个问题,2015 年蓝春波和秦卫阳^[51]研究了对称放置两个碰撞块的双稳态压电式宽

图 20 (网络版彩图)采用止动块^[49](a)和具有两自由度且带止动块的压电式宽频采集器^[50](b)

频采集器(图 21). 他们建立碰撞双稳态系统的机电耦合方程, 分析了碰撞对双稳态系统动力学特性的影响; 研究了简谐激励、低强度随机激励对动态响应特性和能量采集效率的影响. 结果表明: 碰撞使单势阱小幅运动变成双势阱的大幅运动, 有效地提高了输出功率.

采用无弹性机构连接的可动质量块, 通过碰撞也可实现宽频振动能量采集, 2010 年 Yang 和 Lee^[52]提出了一种可动质量块的非谐振宽频振动能量采集器(图 22(a)). 一个圆片形磁铁被放置在框体的中空孔中, 磁铁可在孔中上下移动. 框体四周绕有多层线圈. 制作的样机在 1.9 g 加速度振动下, 能输出 9 mV 的电压, 频率响应范围为 40~80 Hz, 输出的最大功率为 0.4 μ W,

图 21 (网络版彩图)带碰撞的双稳态压电能量采集器^[51]

图 22 (网络版彩图)可动质量块宽频采集器

(a) Yang 等人^[52]提出的采集器; (b) Bendame 等人^[53]提出的采集器

功率密度为 0.148 μ W/cm³. 该样机的带宽较宽, 但功率和功率密度较低.

2015 年 Bendame 等人^[53]提出了另一种采用可动质量块的宽频振动能量采集器见图 22(b), 可动质量块上嵌有 4 个磁铁, 可动质量块可沿线性导轨左右移动, 两个完全相同的弹簧安装在基座上, 用来限制可动质量块运动范围. 一个线圈固定在导轨上, 用来感应磁铁产生的交变磁场产生电输出. 制作的样机在 0.5 g 加速度振动下, 实现了 5 Hz 的半峰值带宽(3 dB 带宽为 3.02 Hz), 最大输出功率达到 12 mW.

3.5 基于多梁结构的非线性宽频采集器

2011 年杨进等人^[54]提出了一种非线性多频振动能量采集器. 采集器的原理图如图 23(a)所示, 该采集器包括两个悬臂梁 A 和 B, 两个磁电换能器和一个磁路. 磁路固定在采集器框体上, 由 4 个矩形永磁铁和 2 个磁轭构成, 4 个磁铁的位置和极性如图 23(a)所示. 磁电换能器 A 和 B 均由两个磁致伸缩层夹一压电层构成. 设计时, 两个悬臂梁具有不同的谐振频率. 当外界振动频率与任一梁的谐振频率匹配时, 都会使该悬臂梁产生较大幅度的相对运动, 实现了两个频率段上的扩频响应(图 23(b)). 根据牛顿第二定律建立了双梁的运动方程, 利用磁荷理论分析了换能器感应的磁场, 结合磁电理论建立了采集器的电输出模型. 根据理论模型, 分析了采集器的非线性振动、电输出特性以及结构参数对频率的影响. 实验结果表明: 在 0.2 g 的加速度振动下, 采集器 3 dB 带宽达到 5.6 Hz, 最大功率达到 0.25 mW. 另外, 还对另一种变形双梁结构的非线性振动能量采集器进行了研究^[55,56], 即: 将磁路和单个磁电换能器分别放在两个悬臂梁上的结构进行了研究, 在 0.2 g 加速度条件下, 采集器具有 5.4 Hz 的 3 dB 带宽和 0.2~0.56 mW/cm³ 的功率密度.

2012 年 Tang 和 Yang^[57]提出了一种基于磁振荡器的非线性振动能量采集器(图 24). 该采集器采用了两个铝悬臂梁, 悬臂梁末端分别安装有一个嵌有磁铁的质量块. 下面悬臂梁粘有压电片用于能量采集, 上面悬臂梁用作磁振荡器, 通过磁力的耦合实现宽频振动能量采集. 利用集中参数模型建立了采集器的理论模型. 理论和实验研究表明: 与线性采集器相比, 该采集器的带宽能增加 1 倍, 输出功率能增大 40%; 在 2 m/s² 振动加速度下, 采集器输出功率超过

图 23 (网络版彩图)非线性多频振动能量采集器^[54](a)和测量的输出功率频率曲线(b)

图 24 (网络版彩图)基于磁振荡器的非线性振动能量采集器^[57](a)和测量的输出功率频率曲线(b)

100 μW 的带宽达到 8 Hz, 输出最大功率达到 1430 μW .

2014 年 Su 等人^[58]提出基于磁耦合的双压电梁宽频振动能量采集器, 如图 25(a)所示. 双压电梁由内梁和外梁构成, 两个梁末端都固定有一对相互吸引的磁铁. 内梁与外梁存在排斥力作用, 使得梁具有两个稳态. 将每个梁看成一个施有磁力的单自由度系统, 建立该采集器的理论模型. 仿真和实验结果表明: 该采集器具有宽频响应特性, 其输出功率频率曲线如图 25(b)所示. 两个梁的磁铁间距 d 对采集器的

图 25 (网络版彩图)基于磁耦合的宽频振动能量采集器^[58](a)和 0.3 g 加速度振动下的输出功率频率曲线(b)

输出功率和带宽有影响, d 小时可增大谐振频率附近的输出功率, 但在其他某个频段会减小输出功率, 这是因为 d 小磁力大, 使梁无法越过两个稳态振动, 产生较小的功率输出. 利用肖特基二极管组成两个桥式整流电路, 将所有压电片连成一体, 向一个电阻负载提供能量. 在 0.3 g 加速度振动激励下, 采集器在整个频带内能输出 0.5 mW 以上的功率. 2014 年 Fan 等人^[4]也对这种磁耦合的双压电梁宽频振动能量采集器展开了研究. 仿真和实验研究表明: 相对于线性和非线性结构, 磁耦合双梁结构可增加主梁的带宽和输出电压, 也可增加副梁的带宽, 但副梁的输出电压会略有降低.

3.6 多方向非线性宽频采集器

2013 年 Andò 等人^[59]提出了一种两维的双稳态宽频振动能量采集器. 采集器的结构如图 26 所示, 它由两个相互垂直的压电悬臂梁组成, 两个压电悬臂梁的自由端均布置有一个磁铁, 磁铁间相互排斥, 这个排斥力使这两个梁具有两个稳定状态. 由于两个悬臂梁间存在磁力的耦合作用, 任一梁发生振动, 都会带动另一梁发生振动, 因此采集器可实现二维振动能量采集. 建立两个梁运动方程和电输出模型, 并根据不同的振动输入方向, 对采集器的采集能力进行了仿真和实验研究. 研究结果表明: (1) 采集器具有宽频采集特性; (2) 对于 $\psi=0^\circ$ (ψ 为振动方向与 z

轴的角度)的振动, 加速度必须大于 60 m/s^2 , 才能使压电梁产生振动, 这个最小加速度的大小与采集器的具体结构密切相关, 不同的结构实现其值不一样; (3) $\psi=0^\circ$ 、加速度为 95 m/s^2 时, 采集器在 $330 \text{ k}\Omega$ 的最佳负载上, 获得的最大功率为 $5.6 \text{ }\mu\text{W}$.

2013年 Su 等人^[60]提出一种三方向宽频振动能量采集器. 采集器由一个主梁、一个副梁以及一个弹簧质量系统构成(图 27). 主梁用来感应 u 方向的振动, 副梁用来感应 y 方向的振动, 质量弹簧系统用来感应 z 方向的振动. 主梁是一个中空的压电悬臂梁, 在末端放有磁铁和质量块, 另外有两个压电片粘接在中空梁的两个分支处, 用来采集振动能量. 副梁是一个与主梁相垂直的悬臂梁, 其末端也固定有磁铁和质量块. 弹簧质量系统只能沿 z 方向振动. 主梁、副梁以及弹簧质量系统通过 3 个磁铁间的排斥力耦合在一起. 副梁和弹簧质量系统感应到的 y 和 z 振动都通过磁力耦合传递到主梁, 使主梁振动, 主梁上的压电片将这两个方向上的振动能量转换为电能. 建立了采集器三方向耦合的理论模型, 其理论和实验研究表明: (1) 在 0.3 g 振动加速度下, 采集器 3 个方向的电压频率响应都具有硬弹簧非线性特性, 带宽都超过了 5 Hz ; (2) 采集器在 u 和 z 方向振动作用下, 输出的电压最高, 最大幅值达到 10.2 V , y 方向输出电压最低, 最大幅值只有 2 V .

图 26 (网络版彩图) 二维双稳态宽频振动能量采集器^[59]

图 27 (网络版彩图) 三方向宽频振动能量采集器^[60]

2013~2014 年杨进、岳喜海等人^[61,62]对多方向宽频振动能量采集器展开了研究. 其工作原理是: 利用弹性圆柱悬臂梁可以在平面内沿任意方向振动的特性, 结合磁力的非线性作用, 实现多方向宽频振动能量采集. 采集器由弹性圆柱悬臂梁、环形磁路、磁电换能器、壳体构成, 如图 28 所示. 环形磁路由两对厚度相同的圆环和圆柱永磁体嵌套而成. 磁电换能器由沿 x 方向磁化的磁致伸缩层和沿 z 方向极化的压电层复合而成, 固定在环形磁路空气隙中的支座上. 由于圆柱悬臂梁可感应 y - z 平面内任意方向的振动, 因此可实现 y - z 平面内任意方向上的振动能量采集. 推导了磁力作用下圆柱悬臂梁的非线性动力学方程, 以及电压输出模型; 借助磁场分析软件 Ansoft Maxwell 分析了矩形、圆形和环形永磁铁组成的 3 种磁路的磁场分布, 研究了不同磁路中磁力、磁场强度及其变化量等因素对动力学方程和电压输出的影响, 为获得更优性能的采集器提供了设计依据. 实验结果表明: 在 5.88 m/s^2 的加速度下, 分别对采集器施加 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 的多个方向振动激励时, 采集器的响应频带宽度分别达到 $5.6, 5, 4.4, 5, 5.5 \text{ Hz}$; 当负载为 $3 \text{ M}\Omega$, 在 0° 方向振动激励下, 采集器输出最大功率达到 0.5 mW .

2014 年余强模等人^[63]还对三维宽频振动能量采集器展开了研究. 该采集器是在图 28 的基础上, 将弹性圆柱悬臂梁改成伞状弹性结构(图 29), 伞状弹性结构由 3 根 $\Phi 0.5 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ (直径 $\times$ 长度) 的弧形不锈钢丝和夹具构成. 伞状弹性结构的一端安装在采集器框架上, 另一端可以沿任意方向自由振动, 实现三维方向的能量采集. 利用有限元分析软件 COMSOL multiphysics 分析了伞状弹性结构的振动模态, 用 Ansoft Maxwell 软件研究了两种磁路的磁场分布特性, 选择了一种最优的磁路组态, 并推导了磁力作用

图 28 多方向宽频振动能量采集器^[62]

图 29 采用伞状弹性结构的三维宽频振动能量采集器^[63]

下振动结构的动力学方程, 以及电压输出模型. 实验结果表明: 在 5.88 m/s^2 加速度振动下, 采集器可以实现三维振动能量采集, 在 x - y 平面内最大响应半峰值带宽达到 4.1 Hz , 最大输出功率达到 $41.2\text{ }\mu\text{W}$; z 方向最大半峰值带宽为 2.5 Hz , 最大输出功率达到 $43\text{ }\mu\text{W}$.

4 不同类型宽频采集器比较与研究趋势

4.1 不同类型宽频采集器比较

目前发展了多种不同类型非线性宽频采集器, 为了比较不同类型非线性宽频采集器的采集性能, 表 1 列出了一些重要参数的对比, 这些参数有: 中心频率 f_{center} 、半功率带宽 HPB(或 3 dB 带宽)、相对带

宽 Ra (半功率带宽与中心频率的比值)、振动加速度 a 、最大输出功率 P_{max} 、输出功率密度 P_d . 各种类型的非线性宽频采集器都有其优缺点, 有自己不同的应用场合. 下面将对各种类型采集器的自身特点和应用场合总结如下.

4.1.1 单双稳态非线性宽频采集比较

(1) 单稳态非线性宽频采集. 单稳态非线性系统具有软和硬两种组态, 对应的谐振曲线分别向左和向右弯曲. 采集器的非线性越强, 谐振曲线弯曲度越大, 获得的采集频带就越宽. 但要实现宽频振动能量采集需要满足一定的条件: 采集器的振荡器需要维持高能状态(即保持大幅度的振动); 如果振荡器处于低能状态, 则需要外部施加合适的扰动, 使其跳跃到高能状态, 才能实现宽频振动能量采集. 因此, 单稳态非线性宽频采集器适合于环境振动频率缓慢增加或缓慢减少场合, 不适合随机振动场合. 有研究表明在随机振动下, 单稳态非线性系统采集的能量还不如线性系统^[11].

(2) 双稳态非线性宽频采集器. 双稳态系统与单稳态系统相比其最大优势在于: 不仅能采集周期振动而且还能采集随机振动. 由于环境中的振动多是随机振动, 因此它是最具实用价值的振动能量采集器. 但双稳态非线性系统要求外界的振动能量要

表 1 不同类型非线性宽频采集器的参数对比

研究者	换能机制	类型	f_{center} (Hz)	HPB (Hz)	Ra (%)	a (g)	P_{max} (mW)	P_d (mW/cm ³)
Stanton 等人 ^[19]	压电	单方向、单稳态、基于磁力	11.93	2.3	19.3	0.3	0.515	—
Xing 等人 ^[27]	磁致伸缩	单方向、单稳态、基于磁力	54	10	18.5	0.57	74	1.07
Olaru 等人 ^[29]	电磁	单方向、单稳态、基于磁力	9.98	2.42	24.2	23.64	64	10.19
Sardini 等人 ^[30]	电磁	单方向、单稳态、基于磁力	41	3.3	8.1	1	0.153	0.0178
马华安等人 ^[31]	压电	单方向、单稳态、基于磁力	89.0	10.0	11.2	0.5	—	—
周生喜等人 ^[36]	压电	单方向、双稳态、基于磁力	17.19	2.9	16.87	0.585	—	—
Xu 等人 ^[38]	压电	单方向、双稳态、基于屈曲结构	27.96	17.2	61.5	2.04	—	—
Zhu 等人 ^[39]	压电	单方向、双稳态、基于屈曲结构	42.5	1.75	4.1	0.8	—	—
Arrieta 等人 ^[40]	压电	单方向、双稳态、基于屈曲结构	9.1	2.2	24.2	2	—	—
Dai ^[46]	磁电	单方向、单稳态、基于摆结构	16.4	3.2	19.5	0.5	0.9702	0.056
Ma 等人 ^[45]	电磁	单方向、单稳态、基于摆结构	3.25	0.5	15.4	0.14	1	0.0769
Yang 等人 ^[54]	磁电	单方向、单稳态、基于多梁结构	31.2	5.6	17.95	0.2	0.25	—
Tang 等人 ^[57]	压电	单方向、单稳态、基于多梁结构	26.89	1.08	4.0	0.204	1.43	—
Halim 等人 ^[50]	压电	单方向、单稳态、基于碰撞	16.49	15	90.96	1	0.449	—
Bendame 等人 ^[53]	电磁	单方向、单稳态、基于碰撞	17.3	3.02	17.46	0.6	12	—
Yang 等人 ^[62]	磁电	多方向、单稳态、基于磁力	22.5	4.2	18.7	0.6	0.6	—
余强模等人 ^[55]	磁电	多方向、单稳态、基于磁力	27.5	4.1	14.9	0.6	0.0412	—

大于一定的势能阈值, 才能实现双稳态振动. 如何降低双稳态系统的势垒值, 使双稳态系统在低水平振动下也能实现宽频振动能量采集, 是双稳态非线性宽频采集器设计的关键.

4.1.2 不同结构的非线性宽频采集比较

(1) 基于磁力的非线性宽频采集器. 利用磁力的非线性, 能较容易地设计出宽频振动能量采集器, 因此它是目前研究最多的一种方式. 在具体实施中, 利用磁的吸引或排斥都能构建出单稳态或双稳态宽频采集器, 且结构简单, 易于制作. 但结构中含有磁铁, 器件的微型化较困难, 另外由于磁铁的存在, 会干扰周边元器件的正常工作, 应用范围会受到一定的影响.

(2) 基于屈曲结构的非线性宽频采集器. 屈曲结构可以采用双端固定的弯曲梁, 也可采用片状弯曲的悬臂梁以及浅球壳状结构构成. 由于屈曲结构有上凸和下凹两种状态, 所以利用屈曲结构可以实现双稳态非线性宽频采集器. 屈曲结构易于制作出微型化的器件. 但屈曲结构的曲率不易控制, 会对频带和能量转换效率产生较大影响. 虽然理论分析表明浅球壳型双稳态系统在曲率控制上具有优势, 但还有待进一步的实验验证.

(3) 基于摆式结构的非线性宽频采集器. 实际上许多线性振动能量采集器在大幅度振动下都会表现出非线性特性, 但很多线性振荡器由于自身结构的限制, 不能工作在大幅度振动状态, 如悬臂梁振荡器大幅度振动时容易断裂. 而摆却可以工作在大幅度摆动状态, 因此利用摆式结构可实现宽频振动能量采集. 但摆式结构在低摆幅振动时, 频带会显著降低. 因此它一般用于低频(多在 20 Hz 以下)大幅振动的场合, 如人体活动时的能量采集. 如果在摆式结构中引入磁力, 也可实现较高频率的振动能量采集^[46].

(4) 基于碰撞的非线性宽频采集器. 该方法的原理是利用分段线性刚度实现宽频振动能量采集, 因为分段线性刚度也是非线性的一种表现形式. 分段线性刚度的引入一般采用止动块和碰撞块. 止动块实质是引入无穷大刚度, 碰撞块是引入另一种线性刚度. 基于碰撞的宽频采集器的相对带宽最宽(表 1), 适用于周期振动和随机振动场合. 缺点是有噪声、易于断裂、有机械磨损、输出功率会降低(低于无碰撞时的功率).

(5) 基于多梁结构的非线性宽频采集器. 基于多梁结构的非线性宽频采集器是多模态法和非线性法相结合的一种形式. 一般是在多个悬臂梁中引入磁力耦合来实现. 非线性磁力可以拓展单梁的带宽, 若将多个梁的频带设计成相邻的频带, 就可进一步拓宽采集器的带宽. 因此其优势在于能获得更宽的带宽, 但多梁的引入必然使结构变得复杂, 制作难度增大, 同时也增大了采集器的体积, 降低了输出功率密度.

4.1.3 单方向和多方向非线性宽频采集比较

单方向非线性宽频采集器只适用于单方向的环境振动采集, 不能用于复杂振动能量采集场合. 多方向非线性宽频振动能量采集器能采集多方向的宽频振动能量, 适用于复杂振动环境. 因此, 多方向非线性宽频振动能量采集器是目前研究的一个热点. 多方向非线性宽频采集器一般采用具有多方向拾振能力的振荡器与磁力耦合来实现. 其中, 多方向振荡器可由单个振荡器构成, 如圆柱悬臂梁、伞状弹性结构, 也可用多个单方向振荡器组合构成. 虽然多方向非线性宽频振动能量采集器适用于复杂的振动环境, 但其结构复杂, 制作难度增大, 体积也会增大, 输出功率密度较低. 但随着多方向单振荡器进一步研究和发展, 也许能克服这个缺点.

4.2 研究趋势

目前, 非线性宽频振动能量采集技术尚有仍处于初步探索研究阶段, 总结国内外的研究进展, 可从以下几个方面继续深入研究^[1,21,64-66].

(1) 继续发展完善双稳态宽频振动能量采集器. 双稳态采集器能采集周期和随机振动能量, 具有很强的实用性. 但目前还有许多问题需要解决. 如, 双稳态采集器实现跨势阱振动, 需要维持高能状态, 怎样设计以及哪些参数能帮助维持高能量状态, 有待进一步研究; 另外双稳态采集器在随机振动激励下的理论还不成熟, 需要进一步完善相关理论.

(2) 进一步提高采集带宽. 值得研究的一个思路是: 将不同种类、不同结构的宽频采集器结合, 可能会进一步提高带宽. 比如, 基于多梁结构的非线性宽频采集器就是非线性法与多模态法结合的一个典型例子. 因此, 进一步研究可将非线性法与调谐法、升频法相结合, 或将止动块引入到基于磁力、基于摆式

结构、基于多梁结构的采集器中,可能会得到更宽的频带。

(3) 继续发展完善多方向宽频振动能量采集器。目前多方向宽频振动能量采集技术在国内外的研究刚刚起步,尚有较多的理论及实验问题仍处于讨论状态。在研究中,可重点研究新型多方向宽频振荡器结构,以提高采集的带宽和输出功率。

(4) 研究新型高压电性压电材料提高振动能量采集器的转换效率。压电材料的压电性能好坏直接影响压电振动能量采集器的能量转换效率,因此高性能压电材料的制备有必要深入研究。

(5) 建立宽频采集器性能衡量标准。目前还没有统一的标准来衡量宽频采集器的采集性能,因此需要建立一个能在不同加速度,不同频带下都能评判的标准。

(6) 研究微型化的宽频能量采集结构。微型化是振动能量采集器未来发展的必然方向,因此需要与机电系统工艺结合,研究适用于微型化的宽频振动能量采集结构。这样可将能量管理电路、无线传感等模

块集成在一起,实现能量完全自给的无线传感网络。

5 总结

为了充分采集环境中的宽频振动能量,实现低功耗电子设备的自供电,非线性宽频振动能量采集技术已在国内外开展了很多的研究。本文简要介绍了非线性宽频振动能量采集器技术的工作原理、机电耦合理论以及研究动向,并从多个角度比较了不同类型非线性宽频采集器的特点,提出了未来的发展趋势。虽然现有非线性宽频振动能量采集技术获得了一定的研究进展,但要实用化,还需要进一步拓宽采集器的带宽,完善相关理论,将宽频和三维方向振动进一步结合,提高采集器的环境适应能力,发展 MEMS 级的振动能量采集器,将它集成在无线传感器中,真正实现无线传感器的自供电。相信不久的将来,非线性宽频振动能量采集器技术将在实际工程中得到广泛应用,推动无线传感网络等诸多领域的进步与发展。

参考文献

- 1 Tang L, Yang Y, Soh C K. Toward broadband vibration-based energy harvesting. *J Intel Mat Syst Str*, 2010, 21: 1867–1897
- 2 Aboulfotouh N A, Arafa M H, Megahed S M. A self-tuning resonator for vibration energy harvesting. *Sensor Actuat A-Phys*, 2013, 201: 328–334
- 3 Bisegna P, Caruso G, Vairo G. Coupled optimization of tuned-mass energy harvesters accounting for host structure dynamics. *J Intel Mat Syst Str*, 2014, 25: 1553–1565
- 4 Fan K Q, Xu C H, Wang W D, et al. Broadband energy harvesting via magnetic coupling between two movable magnets. *Chin Phys B*, 2014, 23: 084501
- 5 Arrieta A F, Delpero T, Bergamini A E, et al. Broadband vibration energy harvesting based on cantilevered piezoelectric bi-stable composites. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 173904
- 6 Bai X, Wen Y, Li P, et al. Multi-modal vibration energy harvesting utilizing spiral cantilever with magnetic coupling. *Sensor Actuat A-Phys*, 2014, 209: 78–86
- 7 Hu Y, Xu Y. A wideband vibration energy harvester based on a folded asymmetric gapped cantilever. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 053902
- 8 Tang Q, Yang Y, Li X. Repulsively driven frequency-increased-generators for durable energy harvesting from ultra-low frequency vibration. *Rev Sci Instrum*, 2014, 84: 1–5
- 9 Liu H, Lee C, Kobayashi T, et al. Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper. *Sensor Actuat A: Phys*, 2012, 186: 242–248
- 10 Erturk A, Hoffmann J, Inman D J. A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 254102
- 11 Daqaq M F. Response of uni-modal duffing-type harvesters to random forced excitations. *J Sound Vib*, 2010, 329: 3621–3631
- 12 Cottone F, Vocca H, Gammaitoni L. Nonlinear energy harvesting. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 080601
- 13 Vocca H, Neri I, Travasso F, et al. Kinetic energy harvesting with bistable oscillators. *Appl Energ*, 2012, 97: 771–776
- 14 孙舒, 曹树谦. 双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析. *物理学报*, 2012, 61: 210505
- 15 Gammaitoni L, Neri I, Vocca H. Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 164102
- 16 刘延柱, 陈文良, 陈立群. *振动力学*. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 17 Lefeuvre E, Badel A, Richard C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensor Actuat A-Phys*, 2006, 126: 405–416

- 18 Lefevvre E, Badel A, Richard C, et al. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *J Intel Mat Syst Str*, 2005, 16: 865–876
- 19 Stanton S C, McGehee C C, Mann B P. Reversible hysteresis for broadband magnetopiezoelectric energy harvesting. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 174103
- 20 Stanton S C, McGehee C C, Mann B P. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. *Phys D*, 2010, 239: 640–653
- 21 Harne R L, Wang K W. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems. *Smart Mater Struct*, 2013, 22: 023001
- 22 Daqaq M F. On intentional introduction of stiffness nonlinearities for energy harvesting under white Gaussian excitations. *Nonlinear Dynam*, 2012, 69: 1063–1079
- 23 Erturk A, Inman D J. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *J Sound Vib*, 2011, 330: 2339–2353
- 24 Halvorsen E. Fundamental issues in nonlinear wideband-vibration energy harvesting. *Phys Rev E*, 2013, 87: 042129
- 25 Karami M A, Inman D J. Equivalent damping and frequency change for linear and nonlinear hybrid vibrational energy harvesting systems. *J Sound Vib*, 2011, 330: 5583–5597
- 26 Arroyo E, Badel A. Electromagnetic vibration energy harvesting device optimization by synchronous energy extraction. *Sensor Actuat A-Phys*, 2011, 171: 266–273
- 27 Xing X, Lou J, Yang G M, et al. Wideband vibration energy harvester with high permeability magnetic material. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 134103
- 28 Mann B P, Sims N D. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *J Sound Vib*, 2009, 319: 515–530
- 29 Olaru R, Gherca R. Generator with levitated magnet for vibration energy harvesting. *Int J Appl Electrom*, 2013, 42: 421–435
- 30 Sardini E, Serpelloni M. An efficient electromagnetic power harvesting device for low-frequency applications. *Sensor Actuat A-Phys*, 2011, 172: 475–482
- 31 马华安, 刘景全, 唐刚, 等. 一种宽频的磁式压电振动能量采集器. *传感器与微系统*, 2011, 30: 66–68
- 32 Kumar P, Narayanan S, Adhikari S, et al. Fokker-Planck equation analysis of randomly excited nonlinear energy harvester. *J Sound Vib*, 2014, 333: 2040–2053
- 33 Ferrari M, Baù M, Guizzetti M, et al. A single-magnet nonlinear piezoelectric converter for enhanced energy harvesting from random vibrations. *Sensor Actuat A-Phys*, 2011, 172: 287–292
- 34 Ferrari M, Ferrari V, Guizzetti M, et al. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters. *Sensor Actuat A-Phys*, 2010, 162: 425–431
- 35 唐炜, 王小璞, 曹景军. 非线性磁式压电振动能量采集系统建模与分析. *物理学报*, 2014, 63: 240504
- 36 周生喜, 曹军义, Erturk A, 等. 压电磁耦合振动能量俘获系统的非线性模型研究. *西安交通大学学报*, 2014, 48: y1–y6
- 37 Andó B, Baglio S, Latorre L, et al. Magnetically-coupled cantilevers with antiphase bistable behavior for kinetic energy harvesting. *Procedia Eng*, 2012, 47: 1065–1068
- 38 Xu C, Liang Z, Ren B, et al. Bi-stable energy harvesting based on a simply supported piezoelectric buckled beam. *J Appl Phys*, 2013, 114: 114507
- 39 Zhu Y, Zu J W. Enhanced buckled-beam piezoelectric energy harvesting using midpoint magnetic force. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 041905
- 40 Arrieta A F, Hagedorn P, Erturk A, et al. A piezoelectric bistable plate for nonlinear broadband energy harvesting. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 104102
- 41 彭利明, 王永, 黄志龙. 浅球壳型双稳振动能量收集器件结构优化设计. *振动与冲击*, 2015, 34: 21–26
- 42 Spremann D, Manoli Y, Folkmer B, et al. Non-resonant vibration conversion. *J Micromech Microeng*, 2006, 16: S169–S173
- 43 Ylli K, Hoffmann D, Willmann A, et al. Investigation of pendulum structures for rotational energy harvesting from human motion. *J Phys Conf Ser*, 2015, 660: 012053
- 44 Malaji P V, Ali S F. Analysis of energy harvesting from multiple pendulums with and without mechanical coupling. *Eur Phys J Spec Top*, 2015, 224: 2823–2838
- 45 Ma T W, Zhang H, Xu N S. A novel parametrically excited non-linear energy harvester. *Mech Syst Signal Process*, 2012, 28: 323–332
- 46 Dai X. An vibration energy harvester with broadband and frequency-doubling characteristics based on rotary pendulums. *Sensor Actuat A-Phys*, 2016, 241: 161–168
- 47 Soliman M S M, Abdel-Rahman E M, El-Saadany E F, et al. A wideband vibration-based energy harvester. *J Micromech Microeng*, 2008, 18: 115021
- 48 Soliman M, Abdel-Rahman E M, El-Saadany E F, et al. A design procedure for wideband micropower generators. *J Microelectromech Syst*, 2009, 18: 1288–1299

- 49 Mak K H, Popov A A, McWilliam S. Experimental model validation for a nonlinear energy harvester incorporating a bump stop. *J Sound Vib*, 2012, 331: 2602–2623
- 50 Halim M A, Park J Y. Piezoceramic based wideband energy harvester using impact-enhanced dynamic magnifier for low frequency vibration. *Ceram Int*, 2015, 41: S702–S707
- 51 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. *物理学报*, 2015, 64: 210501
- 52 Yang B, Lee C. Non-resonant electromagnetic wideband energy harvesting mechanism for low frequency vibrations. *Microsyst Technol*, 2010, 16: 961–966
- 53 Bendame M, Abdel-Rahman E, Soliman M. Electromagnetic impact vibration energy harvesters. *Struct Nonlin Dyn Diagn*, 2015, 168: 29–58
- 54 Yang J, Wen Y, Li P. Magnetolectric energy harvesting from vibrations of multiple frequencies. *J Intel Mat Syst Str*, 2011, 22: 1631–1639
- 55 杨进, 文玉梅, 李平, 等. 采用复合磁电换能器的宽带振动能量采集器. *仪器仪表学报*, 2012, 33: 2863–2869
- 56 Yang J, Wen Y, Li P, et al. A magnetolectric, broadband vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensor Actuat A-Phys*, 2011, 168: 358–364
- 57 Tang L, Yang Y. A nonlinear piezoelectric energy harvester with magnetic oscillator. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 094102
- 58 Su W J, Zu J, Zhu Y. Design and development of a broadband magnet-induced dual-cantilever piezoelectric energy harvester. *J Intel Mat Syst Str*, 2014, 25: 430–442
- 59 Andò B, Baglio S, Maiorca F, et al. Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energy harvester. *Sensor Actuat A-Phys*, 2013, 202: 176–182
- 60 Su W J, Zu J. An innovative tri-directional broadband piezoelectric energy harvester. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 203901
- 61 岳喜海, 杨进, 文玉梅, 等. 多方向宽频磁电式振动能量采集器. *仪器仪表学报*, 2013, 34: 1961–1967
- 62 Yang J, Yue X, Wen Y, et al. Design and analysis of a 2D broadband vibration energy harvester for wireless sensors. *Sensor Actuat A-Phys*, 2014, 205: 47–52
- 63 余强模, 杨进, 文玉梅, 等. 基于磁电换能器的三维宽频振动能量采集器. *仪器仪表学报*, 2014, 35: 1707–1713
- 64 陈仁文, 任龙, 夏桦康, 等. 多方向宽频带压电式振动能量采集器研究进展. *仪器仪表学报*, 2014, 35: 2641–2652
- 65 Pellegrini S P, Tolou N, Schenk M, et al. Bistable vibration energy harvesters: A review. *J Intel Mat Syst Str*, 2012, 24: 1303–1312
- 66 Daqaq M F, Masana R, Erturk A, et al. On the role of nonlinearities in vibratory energy harvesting: A critical review and discussion. *Appl Mech Rev*, 2014, 66: 040801

Research progress of broadband vibration energy harvesting technology using nonlinear method

DAI XianZhi¹, ZHANG Zhang², LIU XiaoYa¹ & BIAN LeiXiang³

¹ College of Electronic and Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

² College of Physics and Space Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

³ School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Frequency of most ambient vibrations is not single, but varies within a broad frequency range. For supplying sufficient energy to the self-powered wireless sensors by harvesting ambient vibration energy, it is need that vibration energy harvesters have broadband acquisition performances. Currently nonlinear vibration methodes have been widely studied by researchers. It is easy to realize broadband vibration energy harvesting by using the nonlinear vibration method and the nonlinear broadband vibration energy harvesters have a better energy harvesting performances. In this paper, the working principles, the electromechanical coupling theories of the nonlinear broadband vibration energy harvesters are described, and the recent research progress is introduced by different types, with summarizing the advantages and disadvantages of the different types. Finally, the development trend of the nonlinear broadband vibration energy harvesters is also given.

self-powered, vibration energy harvesting, broadband, nonlinear

doi: 10.1360/N092015-00227