

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.014

带U型切口的非线性压电能量采集器的动力学仿真研究

申俊¹, 宋芳^{2*}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;
2. 上海工程技术大学工程实训中心, 上海 201620)

摘要:针对目前压电采集器采集频带较窄、采集效率较低的问题,笔者在压电采集器中引入磁场构建了非线性振动系统,拓宽了采集器的采集频带。设计了一种带U型切口的非线性压电振动能量采集器;通过建立采集器的理论模型,分析了该采集器的势能系统,并仿真研究了不同激励频率下内梁磁铁与外梁磁铁的水平间距 D 的改变对采集器输出均方根电压的影响。数值分析发现:减小间距 D ,可以使该采集器的内、外梁的势能系统从单稳态系统过渡到双稳态系统;并随着间距 D 的减小,该能量采集器在其谐振频率处输出的均方根电压逐渐增大,但对该能量采集器的有效采集频带影响并不大。该研究表明引入磁场的带U型切口的双悬臂压电梁能有效提高压电能量采集器采集效率。

关键词:压电采集器;谐波响应分析;低频振动能量;系统势函数;采集频带

中图分类号:TH825;TM619

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)01-0085-06

Dynamics Simulation Analysis of Nonlinear U-Shaped Cutout Piezoelectric Energy Harvester

SHEN Jun¹, SONG Fang^{2*}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Engineering Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of narrow acquisition frequency band and low acquisition efficiency of piezoelectric energy harvester, a nonlinear vibration system was constructed based on the introduction of magnetic field into piezoelectric energy harvester to broaden the acquisition frequency band of the energy harvester. A nonlinear piezoelectric vibration energy harvester with U-shaped cutout was designed. By establishing the theoretical parameter model of the energy harvester, the potential energy system of the energy harvester was analyzed, and the influence of the change of the horizontal distance D between the inner beam magnet and the outer beam magnet on the output RMS voltage of the energy harvester under different excitation frequencies was studied by simulation. The numerical analysis shows that the potential energy system of the inner and outer beams of the energy harvester can transition from monostable system to bistable system by reducing the distance D . With the decrease of the distance D , the RMS voltage output by the energy harvester at its resonant frequency gradually increases, while it has little effect on the effective acquisition frequency band of harvester. The results show that the double cantilever piezoelectric beam with the introduction of magnetic field and U-shaped cutout can effectively improve the acquisition efficiency of piezoelectric energy harvester.

Keywords: piezoelectric harvester; harmonic response analysis; low frequency vibration energy; system potential function; acquisition frequency band

收稿日期:2021-08-09;修回日期:2021-11-10

第一作者简介:申俊(1996),女,四川江油人,硕士研究生,主要研究方向为振动能量采集技术。通信作者:宋芳(1980),女,黑龙江大庆人,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为振动能量采集、微驱动与机器人技术研究。E-mail: songfang2005@163.com

随着无线传感器网络节点的大范围分布使用,如何给无线传感器网络节点供电成为一个难题。因此,学者们提出收集环境周围的振动能量,将其转化为电能给无线传感器网络节点供电^[1-4]。目前,振动能量采集技术根据采集原理不同可以分为:电磁式、静电式、压电式和磁致伸缩式^[5]。压电式采集器具有结构简单、环境适应能力强和输出电压大的优点^[6-7]。因此,压电振动采集器设备在微能量采集领域备受关注。传统单一的线性压电悬臂梁结构存在的问题是:当周围环境中的振动频率偏离其结构本身的谐振频率时,压电悬臂梁输出的电压会大幅度下降^[8]。引入磁场而具有非线性特性的压电采集器相比传统的线性压电采集器而言,其对环境中的振动具有相对较宽的采集频带,有利于提高机电转换效率^[9]。

Ando 等^[10]提出了由磁力构建的具有非线性双稳态性质的 MEMS 振动采集器,实验结果表明该采集器能有效收集低频环境中的振动能量。Shah 等^[11]进一步在磁力引入的压电采集器中,研究了悬臂梁末端磁铁和外部磁铁的间距变化对采集器电压输出的影响,研究结果表明间距在 8.5 mm 时该采集器的采集效果最佳。为了证明磁力引入后压电振动采集器的宽频作用,Song 等^[12]设计了一种磁力耦合阵列式的压电振动采集器。该采集器既能在杂乱的磁场中响应,又能在外界振动能量的激励下响应,并且该采集器具 30 Hz 的频带宽。

笔者考虑到磁场引入构成的非线性压电采集器系统具有宽频的优势,提出了一种引入磁场的带 U 型切口的非线性压电振动采集器;建立了该采集器的理论模型,运用数值仿真研究了激振频率的变化对该采集器电压输出的影响,以及内、外梁磁铁间距变化对该采集器电压输出的影响。

1 系统模型和基本结构

该采集器的三维结构如图 1 所示,其结构包括内部矩形悬臂梁(内梁)、外部 U 型悬臂梁(外梁)、压电片、磁铁 1 和磁铁 2。其中基底材料为铜;永磁铁为 Nd₂Fe₁₄B。

该采集器可以等效为 2 个单自由度的弹簧-阻尼-质量系统,其等效模型如图 2 所示。其中,内、外梁压

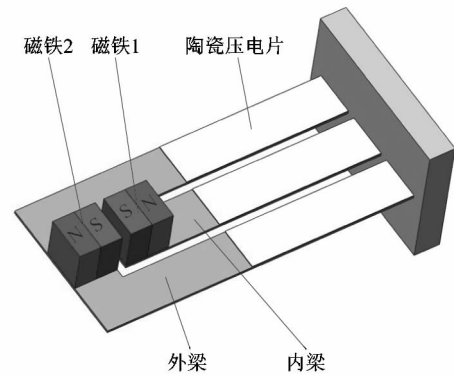


图 1 采集器三维结构示意图

Figure 1 Three dimensional structure diagram of harvester

电片均表示为电容 C_p ,用导线将压电片并联,与外接负载电阻 R_L 串联,构成一个闭合电路。

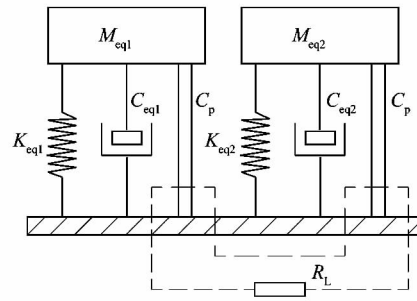


图 2 采集器等效模型

Figure 2 Harvester equivalent model

根据振动力学可以得到该能量采集系统的动力学模型方程^[13-14]:

$$\left. \begin{aligned} M_{eq1} \ddot{Z}_1(t) + C_{eq1} \dot{Z}_1(t) + K_{eq1} Z_1(t) &= u(t) + \varphi \frac{V(t)}{3} + F_{mv}; \\ M_{eq2} \ddot{Z}_2(t) + C_{eq2} \dot{Z}_2(t) + K_{eq2} Z_2(t) &= u(t) + \varphi \frac{2V(t)}{3} + F_{mv} \circ \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: M_{eq1} , C_{eq1} , K_{eq1} 和 $Z_1(t)$ 分别为内部悬臂梁的等效质量、等效阻尼、等效刚度和磁铁 1 沿垂直方向的位移; M_{eq2} , C_{eq2} , K_{eq2} 和 $Z_2(t)$ 分别为外部 U 型悬臂梁的等效质量、等效阻尼、等效刚度和磁铁 2 沿垂直方向的位移; $u(t)$ 为外部激振源; $V(t)$ 为该采集器输出的电压; φ 为压电陶瓷 (PZT) 的机电耦合系数; F_{mv} 为 2 个磁铁之间磁力沿垂直方向的分力。

根据基尔霍夫第一定律,可以得到采集器的机电耦合方程:

$$\varphi(\dot{Z}_1(t) - \dot{Z}_2(t)) = \frac{3}{2}C_p \dot{V}(t) + \frac{V(t)}{R_L} \quad (2)$$

式(1)中 M_{eq1} , C_{eq1} 和 K_{eq1} 具体计算公式如下^[15-16]:

$$\left. \begin{aligned} M_{eq1} &= m_1 + \rho_c l_{il} w_{il} t_{il} + \rho_p l_p w_p t_p; \\ K_{eq1} &= \frac{3E_i I_i}{l_{il}^3}; \\ C_{eq1} &= 2\xi_c \sqrt{M_{eq1} K_{eq1}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: I_i 为内梁中压电片与基底铜粘合在一起后整体悬臂梁的惯性矩; E_i 为内梁中压电片与基底铜片粘合在一起后整体悬臂梁的弹性模量; l_{il} , w_{il} , t_{il} 和 l_p , w_p , t_p 分别为内梁基底材料铜和陶瓷压电片(PZT)的长、宽和厚度; m_1 为内梁末端磁铁的质量; ρ_c 为基底材料铜的密度, ρ_p 为陶瓷压电片(PZT)的材料的密度; ξ_c 为采集器的阻尼比。

其中:

$$I_i = \frac{1}{12} [t_p^2 (w_p t_p + 3w_{il} t_{il}) + t_{il}^2 (w_{il} t_{il} + 3w_p t_p)]; \quad (4)$$

$$E_i = \frac{1}{12I_i} [(w_p t_p^3 + 3w_p t_p t_{il}^2) E_p + (w_{il} t_{il}^3 + 3w_{il} t_{il} t_p^2) E_c]. \quad (5)$$

式中: E_c 为基底材料铜的弹性模量, E_p 为陶瓷压电片(PZT)的弹性模量。

式(1)中 M_{eq2} , C_{eq2} 和 K_{eq2} 的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} M_{eq2} &= m_2 + 2\rho_c (l_{o1} - l_{o2}) w_{o1} t_{o1} + 2\rho_p l_p w_p t_p; \\ K_{eq2} &= \frac{6E_{o1} I_{o1} E_{o2} I_{o2}}{2E_{o1} I_{o1} l_{o2}^3 + E_{o2} I_{o2} (l_{o1} - l_{o2})^3}; \\ C_{eq2} &= 2\xi_c \sqrt{M_{eq2} K_{eq2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: I_{o1} 为外部 U 型矩形悬臂梁的直角拐角前部分整体的惯性矩; I_{o2} 为外部 U 型直角拐角后部分的惯性矩; E_{o1} 为外部 U 型矩形悬臂梁直角拐角前粘有压电片部分整体的弹性模量; E_{o2} 为外部 U 型直角拐角后部分的弹性模量; l_{o1} , w_{o1} , t_{o1} 分别为外部 U 型矩形梁的长、宽和厚度; l_{o2} 为外部 U 型梁直角拐角末端的长度; m_2 为外梁末端磁铁的质量。

其中:

$$\left. \begin{aligned} I_{o1} &= \frac{1}{12} [t_p^2 (w_p t_p + 3w_{o1} t_{o1}) + t_{o1}^2 (w_{o1} t_{o1} + 3w_p t_p)]; \\ I_{o2} &= \frac{w_{o2} t_{o2}^3}{12}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$E_{o1} = \frac{1}{12I_{o1}} [(w_p t_p^3 + 3w_p t_p t_{o1}^2) E_p + (w_{o1} t_{o1}^3 + 3w_{o1} t_{o1} t_p^2) E_c]. \quad (8)$$

式中: E_{o2} 为外部 U 型直角拐角后部分的弹性模量, 数值上 $E_{o2} = E_c$; w_{o2} 和 t_{o2} 分别为外部 U 型梁直角拐角末端的宽度和厚度。

采集器尺寸如图 3 所示。

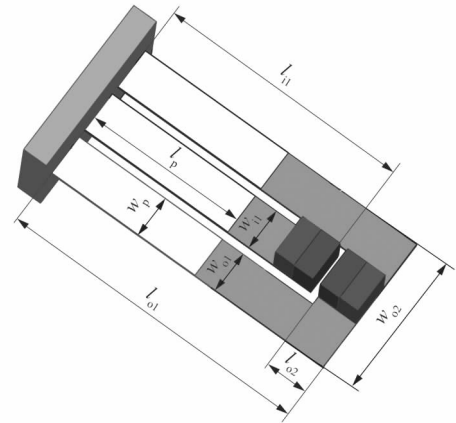


图 3 采集器尺寸示意图

Figure 3 Dimension diagram of harvester

2 系统非线性势函数分析

2.1 磁力计算

图 4 所示为磁铁 1 和磁铁 2 的几何尺寸示意图。磁铁 1 和磁铁 2 在平衡位置处产生的排斥力为^[17]:

$$F_m = \frac{1.5}{1+3D} \times \frac{w_1 h_1}{2\mu_0} \times \left[\frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{w_1 h_1}{2D \sqrt{w_1^2 + h_1^2 + 4D^2}} - \tan^{-1} \frac{w_1 h_1}{2(l_1 + D) \sqrt{w_1^2 + h_1^2 + 4(l_1 + D)^2}} \right) \right]^2 \quad (9)$$

式中: l_1 , w_1 和 h_1 分别为磁铁的长度、宽度和高度; D 为 2 块磁铁之间水平方向间距; B_r 为永磁铁的磁性能参数; μ_0 为真空导磁率。

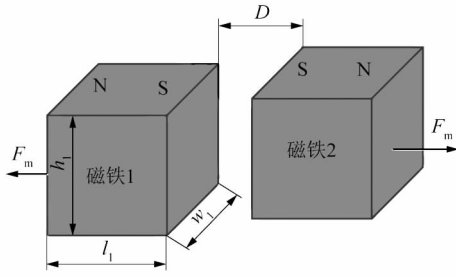


图4 磁铁几何尺寸示意图

Figure 4 Schematic diagram of magnet geometry

2.2 势函数分析

图5所示为采集器受力分析图。由图可知磁铁在垂直方向磁力的分力 F_{mv} 的表达式为:

$$F_{mv} = F_m \frac{Z_1(t) - Z_2(t)}{\sqrt{(Z_1(t) - Z_2(t))^2 + D^2}} \quad (10)$$

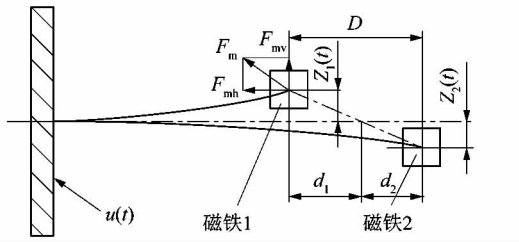


图5 采集器受力分析

Figure 5 Stress analysis of harvester

不考虑磁铁在平衡位置时磁铁所受重力对悬臂梁的影响,由图5可知 d_1 和 d_2 间满足如下关系^[18]:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1(t)}{Z_2(t)} \quad (11)$$

2块磁铁沿垂直方向的磁力为:

$$\left. \begin{aligned} F_{mv1} &= F_m \frac{Z_1(t)}{\sqrt{(Z_1(t))^2 + d_1^2}}; \\ F_{mv2} &= F_m \frac{Z_2(t)}{\sqrt{(Z_2(t))^2 + d_2^2}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当磁铁1和磁铁2在任意时刻位于某一位置时,如 $Z_1(t) = z_{o1}$, $Z_2(t) = z_{o2}$,则该采集器内梁的势能 V_1 与外梁的势能 V_2 表达式分别为:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \int_0^{z_{o1}} K_{eq1} Z_1 dZ_1 - \int_0^{z_{o1}} F_{mv1} dZ_1; \\ V_2 &= \int_0^{z_{o2}} K_{eq2} Z_2 dZ_2 - \int_0^{z_{o2}} F_{mv2} dZ_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

因 D 在该采集器振动中始终保持固定不变,因

此,在任意时刻 d_1 和 d_2 的取值都在 $(0, d)$ 的区间范围内。取表1和表2中的参数,并取水平间距 $D = 6 \text{ mm}$,在任意的时刻下 d_1 分别取6个值 $\frac{1}{10}D, \frac{1}{5}D, \frac{1}{4}D, \frac{1}{2}D, \frac{3}{4}D$ 和 $\frac{4}{5}D$,对式(13)进行分析计算,可以绘制出内梁 V_1 和外梁 V_2 在任意时刻随 d_1 变化而动态变化的势函数趋势如图6所示。

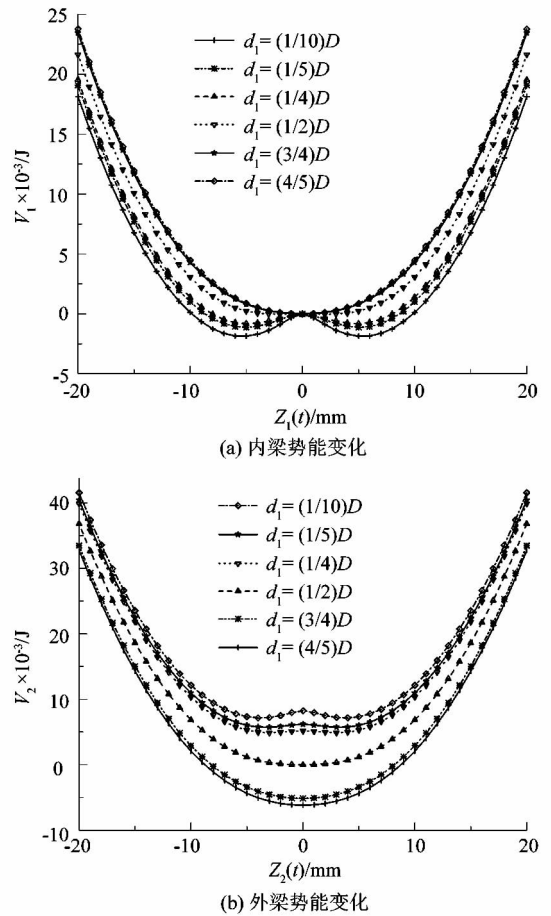


图6 采集器势能系统

Figure 6 Harvester potential energy system

由图6可知,在外界的随机激励下,该采集器的 V_1 和 V_2 随着 d_1 的取值而产生随机变化。这种随机变化体现在势函数会从单势阱过渡到双势阱。因此,在该采集器受到外界的振动激励源作用时,内梁在某一时刻处于单稳态振荡;而其外梁则可能处于双稳态振荡模式。由于二者处于随机变化的振荡模式下,当磁铁1越过水平位置时,必然会牵引磁铁2的运动;当磁铁2越过水平位置时,必然也会牵引磁铁1的运动;从

而为内、外悬臂梁做大幅度持续振荡创造了条件,有利于提高采集器对振动能量的采集效率。

3 仿真分析

仿真过程中采用的外界随机激励 $u(t) = A \cos$

$(2\pi ft)$, 该激励为余弦激励, 激励源的幅值大小为 $A = 0.1$; 在仿真过程中通过选取不同余弦激励的激励频率 f 对式(1)和(2)在 MATLAB 中采用 Runge-Kutta 法进行数值分析。

表1 采集器材料参数

Table 1 Material parameters of energy harvester

弹性模量/GPa		密度/(kg · m ⁻³)			$\mu_0 \times 10^{-7}/(\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$	φ	$C_p \times 10^{-7}/\text{F}$	ξ_c
E_c	E_p	ρ_c	ρ_p	ρ_1				
106.0	71.6	8 270	7 600	7 500	4π	0.35	2.7	0.02

表2 采集器结构尺寸参数

Table 2 Structural dimension parameters of harvester

长度					宽度				厚度				高度
l_{i1}	l_{o1}	l_{o2}	l_p	l_1	w_{i1}	w_{o1}	w_{o2}	w_p	t_{i1}	t_{o1}	t_{o2}	t_p	h_1
80	100	10	60	10	20	20	64	20	0.4	0.4	0.4	0.2	10

由于环境中振动能量大多是低频振动源,因此仿真过程中选取的频率变化范围为 $0 \sim 40$ Hz, 频率的步长取为 1 Hz; 不断调整采集器内、外梁末端磁铁间距 D , 获取采集器均方根电压输出响应结果。如图 7 所示为该采集器随激励频率 f 和不同间距 D 的变化趋势。由图可知, 采集器存在一个明显的谐振频率, 并在该谐振频率下, 采集器输出的均方根电压值到达最大。当间距 $D = 2$ mm 时, 该采集器的谐振频率为 28 Hz, 而当 D 的取值范围在大于 2 mm, 小于 10 mm 时, 该采集器的谐振频率集中在 27 Hz。

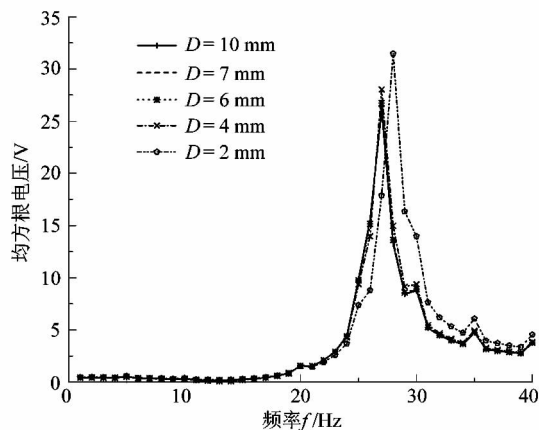


图7 采集器均方根电压响应输出

Figure 7 RMS voltage response output of Harvester

仿真结果表明: 压电采集器随着间距 D 的取值范围减小, 其谐振频率输出的均方根电压逐渐增大, 当 $D = 10$ mm 时, 该采集器输出的均方根电压为 26.095 V, 而当 $D = 2$ mm 时, 该采集器输出的均方根电压到达了 31.47 V。但是采集器有效频带为 3 Hz 并不随间距 D 的减小而发生较大的改变。

4 结论

将磁场引入采集器中能拓宽采集频带的宽度, 同时兼顾采集器结构的紧凑型, 笔者提出了一种非线性 U 型切口压电振动能量采集器; 分析了采集器系统内、外梁势能的变化趋势, 建立了采集器的理论振动模型; 在 MATLAB 中进行数值模拟分析了激励源的频率和内、外悬臂梁末端磁铁间距 D 对采集器均方根电压输出的影响。

主要结论如下: ①采集器内、外梁的势能趋势会在采集器受到外界激励时, 处于动态变化中, 采集器内梁的势能趋势可以从单稳态系统过渡到双稳态系统; 同时采集器外梁也可能从双稳态系统过渡到单稳态系统。这种随机变化的不确定性, 有利于实现采集器大幅度、持续地振荡。②伴随着磁铁间距 D 的减小, 该采集器在其谐振频率输出的均方根电压逐渐增大, 且 D 的减小对采集器输出的有效频带宽影响不大。

笔者所提出的压电振动能量采集器可以作为微能量采集器领域中采集器结构设计的一种新思路,但是由于本研究中将磁铁产生的复杂磁场直接简化成一种力,可能降低了采集器模型的精确性,因此,下一步应对理论模型进行优化。

参考文献:

- [1] ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006) [J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16(3): 1-21.
 - [2] 刘成龙, 孟爱华, 陈文艺, 等. 振动能量收集技术的研究现状与发展趋势[J]. 装备制造技术, 2013(12): 43-47.
 - [3] 刘祥建, 陈仁文. 压电振动能量收集装置研究现状及发展趋势[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 169-176.
 - [4] 王浩宇, 杨欢, 彭利平, 等. 分段线性复合式振动俘能器的建模与实验[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1459-1465.
 - [5] 孙诗. 电磁式振动采集器非线性拓频方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 4.
 - [6] KIM H S, KIM J H, KIM J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(6): 1129-1141.
 - [7] 赵林. 非线性振动压电式采集器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 2-4.
 - [8] YANG W, TOWFIGHAN S. A hybrid nonlinear vibration energy harvester[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 90: 317-333.
 - [9] 王光庆, 张伟, 刘创, 等. 非线性压电振动采集器的振动特性与实验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(10): 1494-1502.
 - [10] ANDO B, BAGLIO S, TRIGONA C, et al. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting applications[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2010, 20(12): 1-12.
 - [11] SHAH V, KUMAR R, TALHA M, et al. Numerical and experimental study of bistable piezoelectric energy harvester [J]. Integrated Ferroelectrics, 2018, 192(1): 38-56.
 - [12] SONG H C, KUMAR P, SRIRAMDAS R, et al. Broadband dual phase energy harvester: vibration and magnetic field [J]. Applied Energy, 2018, 225: 132-142.
 - [13] TRIPLETT A, QUINN D D. The effect of non-linear piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesting [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2009, 20(16): 1959-1967.
 - [14] WU H, TANG L H, YANG Y W, et al. Development of a broadband nonlinear two-degree-of-freedom piezoelectric energy harvester [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2014, 25(14): 1875-1889.
 - [15] 王光庆, 金文平, 展永政, 等. 压电振动采集器的机电耦合模型及其功率优化[J]. 传感技术学报, 2013, 26(8): 1092-1100.
 - [16] MEIROVITCH L. Fundamentals of vibrations [M]. Long Grove, Illinois: Waveland Press, 2003: 20-50.
 - [17] 陈仲生, 杨拥民. 悬臂梁压电振子宽带低频振动能量俘获的随机共振机理研究[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074301.
 - [18] 高毓璠, 冷永刚, 范胜波, 等. 弹性支撑双稳压电悬臂梁振动响应及能量采集研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 090501.
- +++++
- (上接第84页)
- [6] XU W, WANG Q, YU M G, et al. Path planning for multi-AGV systems based on two-stage scheduling [J]. International Journal of Performability Engineering, 2017, 13(8): 1347-1357.
 - [7] 姜辰凯, 李智, 盘书宝, 等. 基于改进 Dijkstra 算法的 AGVs 无碰撞路径规划[J]. 计算机科学, 2020, 47(8): 272-277.
 - [8] HU Y J, DONG L C, XU L. Multi-AGV dispatching and routing problem based on a three-stage decomposition method [J]. Mathematical biosciences and engineering, 2020, 17(5): 5150-5172.
 - [9] ZHONG M S, YANG Y S, DESSOUKY Y, et al. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106371. 1-106371. 11.
 - [10] LIU C B, TAN J, ZHAO H S, et al. Path planning and intelligent scheduling of multi-AGV systems in workshop [C]// 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: IEEE, 2017: 5.
 - [11] YUAN Z H, YANG Z M, Lü L L, et al. A bi-level path planning algorithm for multi-AGV routing problem [J]. Electronics, 2020, 9(9): 1351-1351.
 - [12] ZHAO Y L, LIU X P, WANG G, et al. Dynamic resource reservation based collision and deadlock prevention for multi-AGVs [J]. IEEE Access, 2020(99): 1.
 - [13] 曹小华, 朱孟. 基于冲突预测的多自动导引小车避碰决策优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(8): 2092-2098.
 - [14] 张中伟, 李俊兰, 吴立辉, 等. 考虑能耗的制造车间单 AGV 路径规划研究[J]. 制造技术与机床, 2021(3): 118-122.
 - [15] 张浩杰, 苏治宝, HERNANDEZ D E, 等. 移动机器人低能耗最优路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 19-26.
 - [16] 刘贵杰, 刘鹏, 穆为磊, 等. 采用能耗最优改进蚁群算法的自治水下机器人路径优化[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 93-94.