

自调谐宽频带压电振动发电机的改进

朱莉娅 陈仁文 刘祥建 隆志远

(南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京, 210016)

摘要:压电振动发电机使无线传感器网络实现能量自给。然而,压电振动发电机仅在与外界振源共振时才得到较高的能量转换效率。为此提出一种改进的自适应频率调谐的压电振动发电机,利用同步开关刚度控制电路改变结构固有频率,使之趋近于激励频率,是一种控制简单、控制效果好的半主动控制方法。在建立系统机电模型基础上,推导了开关控制电路相关公式,并根据系统特点运用基于梯度法的模型参考自适应控制方法。实验结果与理论分析结果一致,改变调频系数,结构固有频率相对变化率可以达到5.1%,且在一定频率调节范围内可以实现自供能。

关键词:压电振动发电机;同步开关;刚度控制;自调谐

中图分类号:TN712;TP274

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)03-0327-06

Improved Design of Self-tuning Broadband Piezoelectric Vibration Generator

Zhu Liya, Chen Renwen, Liu Xiangjian, Long Zhiyuan

(Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The development of piezoelectric vibration generator provides a possibility of self-powered wireless sensors network. However, the piezoelectric generator can obtain a relatively high energy transferring efficiency only when the excitation frequency matches exactly with the resonance frequency of the generator. Thus, a frequency self-tuning piezoelectric generator is proposed. It utilizes the synchronized switch stiffness control circuit to change the resonance frequency of the generator towards the vibration frequency, which is a simple, well-performed semi-active control method. On the basis of the electro-mechanical models, several equations about synchronized switch circuit are conducted and a usage of the model-reference adaptive control method is given. Experimental results confirm the theory that the resonance frequency can be varied. Specifically, adapting the frequency tuning factor offers a variation of 5.1% in terms of the resonance frequency. Meanwhile, the self-tunable generator can be self-powered within a certain frequency range.

Key words: piezoelectric vibration generator; synchronous switch; stiffness control; self-tuning

振动能量采集领域研究的不断深入使低功耗无线传感器网络实现能量自给成为可能。研究表明,振动能量采集结构的输出电能总在共振时达到最大^[1]。然而,外界激励通常是随机未知的信号,振动发电机的设计工作通常是在假定外界振动激励

频率已知的情况下进行的,因此大大减少了振动发电机的实用性和适应性^[2]。

如何保证振动发电机工作在共振状态,已经成为振动能量采集领域的关键技术问题。目前国内外解决频率匹配问题的策略可以分为两种:(1)通过

拓宽发电机的带宽,使其在宽频带激励输入时有较好的响应;(2)通过调节发电机自身的固有频率,使其与外界激励相同。拓宽发电机带宽的方法包括采用多悬臂梁结构、增加限幅器等^[3-5],相比较而言,频率自调谐方式适用范围更加广泛。Guyomar 等提出一种振动发电机频率自调谐方法,通过可调电压源控制压电驱动器,以此改变系统刚度,并以实验验证了发电机固有频率可调范围达到 3.55%^[6]。本文在其研究基础上进行改进,将基于梯度法的模型参考自适应控制方法应用于压电振动发电机的频率调谐策略,以悬臂梁结构为研究对象,详细推导了基于同步开关电感电路的结构频率控制方法

相关公式,给出具体实施方案,并通过实验验证控制方案的可行性。

1 自适应调频压电振动发电机基本结构

自适应频率调谐压电振动发电机的基本结构见图1,采用双层悬臂梁压电结构,分别用于能量采集与调频驱动,另于基座、悬臂梁末端各附加一个激光位移传感器。两个传感器测量信号送入鉴相器,比较两者相位差,经过信号调理电路后送入自适应控制单元。根据一定控制策略调节可调电压源大小,通过控制电路作用于压电驱动层,改变压电

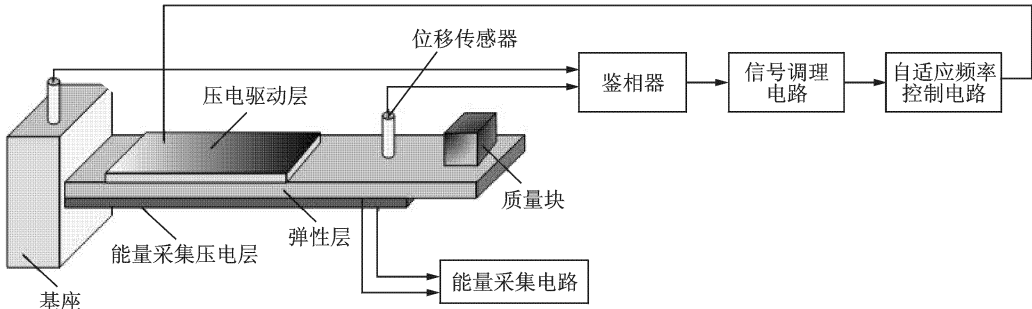


图1 自适应调频压电振动发电机结构示意图

振动发电机固有频率,使之趋于外界激励频率。

2 自适应压电发电机理论分析

2.1 压电能量采集层建模

假设外界振动源为基础简谐激励,基座位移信号为 v ,悬臂梁位移信号为 u 。建立系统振动微分方程如下^[7]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = M\ddot{v} - \alpha V_h \quad (1)$$

式中: M 为质量块; C 为发电机等效阻尼系数; K_E 为接电学负载时发电机等效刚度; α 为压电元件等效应力因子; V_h 为压电能量采集元件两端电压。等效刚度 K_E 、压电元件应力因子 α 可以分别表示为^[8]

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{\omega_p h_p e_{31}}{2} [\dot{\varphi}(l_p) - \dot{\varphi}(0)] = 1.457 \frac{\omega_p h_p e_{31}}{l_p} \\ K_E &= \frac{3EI_z}{l_p^3} = \frac{3(2E_p h_p + E_m h_m)}{l_p^3 (2h_p + h_m)} \cdot \left(\frac{2}{3} \omega_p \left(\frac{h_m}{2} + h_p \right)^3 - \frac{2}{3} \omega_p \left(\frac{h_m}{2} \right)^3 + \frac{E_p}{12E_m} \omega_m h_m^3 \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:弹性基片的长度、宽度和厚度分别为 l_m, ω_m 和 h_m ;压电元件长度、宽度和厚度分别为 l_p, ω_p 和

$h_p; e_{31}$ 为压电应力常数; φ 为悬臂梁的一阶固有振型函数; E, E_p, E_m 分别为悬臂梁等效弹性模量、压电片弹性模量及弹性基片的弹性模量。

2.2 经典能量采集电路

采用经典能量采集电路,即压电能量采集元件输出经整流桥和滤波电容接负载,列写回路微分方程如下

$$\dot{V}_h + \frac{1}{C_h R_L} V_h = \frac{\alpha}{C_h} \dot{u} \quad (3)$$

式中: C_h 为压电能量采集元件静态夹持电容,可以表示为

$$C_h = \frac{2\epsilon_{33}^S l_p \omega_p}{h_p} \quad (4)$$

式中: ϵ_{33}^S 为压电元件应变为零时的介电常数。

根据式(3),可以得到压电能量采集元件输出电压 $V_h(s)$ 与悬臂梁位移 $u(s)$ 的传递函数 $H(s)$

$$H(s) = \frac{V_h(s)}{u(s)} = \frac{\alpha R_L}{R_L C_h s + 1} \quad (5)$$

代入式(1),可以得到悬臂梁位移信号 $u(s)$ 与基座激励位移信号 $v(s)$ 的传递函数 $G(s)$

$$G(s) = \frac{u(s)}{v(s)} = \frac{Ms^2}{Ms^2 + Cs + K_E + \frac{\alpha^2 R_L}{R_L C_h s + 1}} \quad (6)$$

2.3 频率调谐基本原理

根据振动理论知道,当悬臂梁位移信号与基座位移信号的夹角为 $-\pi/2$ 时,悬臂梁与外界振动激励达到共振。因此,可以根据监测相位差 ϕ 判断振动发电机工作状态。设鉴相器输出为 u_d ,鉴相器增益为 K_d ,则有^[9]

$$u_d = K_d \phi \quad (7)$$

鉴相器输出信号包含直流分量和叠加的交流分量,因此信号调理电路设计为低通滤波。设低通滤波器的传输特性为 $F(s)$,则低通滤波电路输出电压 u_c 可以表示为

$$u_c = F(s)u_d \quad (8)$$

同步开关刚度控制电路(Synchronized switch stiffness control,SSSC),如图2所示^[6,10]。其控制原理为:当悬臂梁位移过零时,闭合开关S,压电驱动元件等效电容 C_a 与电感 L 形成振荡回路,经过 $1/2$ 个 LC_a 振荡周期,压电元件两端电压反向,则通过压电驱动层向悬臂梁施加一个反方向的机械应力,压电元件两端电压受可调电压源控制,SSSC电路工作波形图如图3所示。

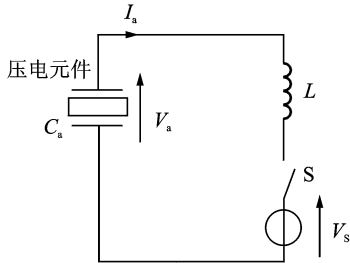


图2 同步开关刚度控制电路原理图

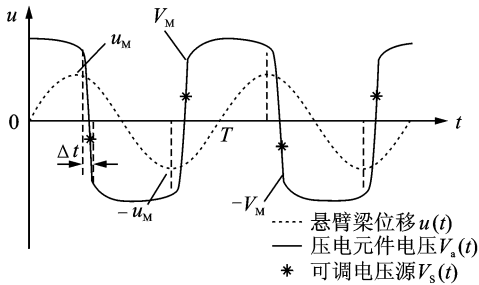


图3 同步开关刚度控制电路波形图

压电驱动元件输出电流 I_a 可以表示为

$$I_a = \alpha \dot{u} - C_a \dot{V}_a \quad (9)$$

根据SSSC电路工作原理,压电驱动元件两端电压 V_a 可以表示为

$$V_a = \frac{\alpha}{C_a} u + V_M \text{sign}(u) \quad (10)$$

式中: V_M 是开关断开后压电元件反向电压。

开关闭合期间,开关网络存在能量损耗,设电压翻转系数为 γ ,则 V_M 可以进一步表示为

$$V_M = \frac{1+\gamma}{1-\gamma} V_s \quad (11)$$

可调电压源 V_s 由式(12)给出

$$V_s = -\beta \frac{\alpha}{C_0} \text{sign}[u(t-\tau)] \cos \phi \quad (12)$$

式中: β 为调频系数。

在SSSC电路控制作用下,压电振动发电机微分方程可以重写为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = M\ddot{v} - \alpha V_a - \alpha V_h \quad (13)$$

联合式(6,10~12),传递函数 $G(s)$ 可以重写为 $G(s) =$

$$\frac{Ms^2}{Ms^2 + Cs + K_E + \frac{\alpha^2 R_L}{R_L C_h s + 1} + \frac{\alpha^2}{C_0} + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0} \beta \cos \phi} = \frac{Ms^2}{Ms^2 + Cs + K_D + \frac{\alpha^2 R_L}{R_L C_h s + 1} + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0} \beta \cos \phi} \quad (14)$$

式中:开路刚度 $K_D = K_E + \frac{\alpha^2}{C_0}$ 。

则相位差 ϕ 可以表示为

$$\phi = -\arctan \left\{ \frac{C\omega}{-M\omega^2 + K_D + \frac{\alpha^2 R_L}{R_L C_h s + 1} + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0} \beta \cos \phi} \right\} \quad (15)$$

SSSC电路控制作用下,压电发电机等效刚度 K_{SSSC} 可以表示为

$$K_{SSSC} = K_D + \frac{\alpha^2 R_L}{R_L C_h s + 1} + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0} \beta \cos \phi \quad (16)$$

下面根据 ϕ 取值不同简述SSSC电路控制过程:(1) $\phi \in (-\pi, -\pi/2)$,对应激励频率 $\omega <$ 发电机固有频率 ω_n ,根据式(16), $\cos \phi < 0$,使 K_{SSSC} 减小,从而使 ω_n 减小,趋近于 ω ;(2) $\phi \in (-\pi/2, 0)$, $\omega > \omega_n$,SSSC电路控制下 ω_n 增加;(3) $\phi = -\pi/2$,达到共振状态。

3 模型参考自适应控制规律

设计一种基于梯度法的模型参考自适应控制规律,根据相位差 ϕ 自动调整频率系数 β ,根据式(12)改变可调电压源电压,系统结构如图4所示。

图中, ϕ_m, ϕ_p 分别为期望输出相位差、SSSC电路控制下实际输出相位差,且 $\phi_m = -\pi/2$; k_c 为可调增益; $\Phi(s)$ 为被控SSSC电路传递函数,输出为相位差 $\phi(s)$,输入为调频系数 $\beta(s)$, $\Phi(s)$ 可根据式

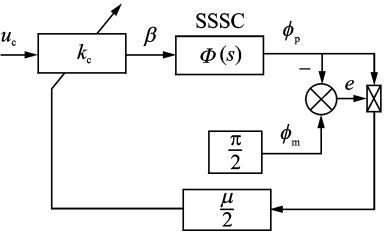


图4 自适应控制系统结构框图

(15)求出^[11]。

SSSC 控制输出相位差 ϕ_p 可以表示为

$$\phi_p = u_c k_c \varphi(s)$$
 (17)

定义输出误差

$$e(t) = \phi_m - \phi_p$$
 (18)

取性能指标函数为

$$J(k_c) = e^2(t)$$
 (19)

k_c 变化方向取负梯度方向,即采用最陡下降法使 J 在参数空间能找到最优解

$$\dot{k}_c = \frac{dk_c}{dt} = \mu e \phi_m$$
 (20)

式中: μ 为自适应增益,需要结合稳定性、作用,使 e 逐渐变小至零,则发电机固有频率调整到与外界激励频率一致。

4 自适应调谐压电发电机能量分析

压电驱动电路不作用时,压电能量采集元件输出功率为

$$P_h = \frac{\alpha^2 R_L \omega^2 u_M^2}{\left(R_L C_h \omega + \frac{\pi}{2}\right)^2}$$
 (21)

自适应调频压电振动发电机功率损耗主要存在两个方面:一是信号检测、调理及分析电路耗能;一是压电驱动层耗能。其中,第一部分耗能主要集中在信号检测部分,信号调理及分析电路最低耗能在 μW 级别。由于本系统中激光位移传感器采用外部供电,因此,调频发电机功耗主要集中在压电驱动部分。压电驱动元件耗能可以表示为

$$P_a = \frac{2\omega}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_a} \beta^2 u_M^2$$
 (22)

忽略信号调理及分析电路耗能,压电发电机净输出功率可以表示为

$$P = P_h - P_a$$
 (23)

5 压电发电机自调谐实验系统及系统参数确立

如图5所示搭建自适应压电振动发电机实验系统,悬臂梁尺寸为 $80\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,压电

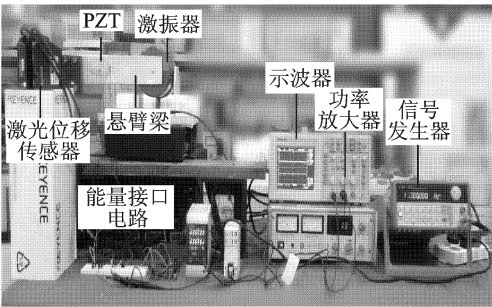


图5 自调谐压电发电机实验系统

片选择 PZT-5H,能量采集压电片尺寸为 $59\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,驱动压电片尺寸为 $30\text{ mm} \times 13\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 。分别于悬臂梁自由端和基座上方安装激光位移传感器(KEYENCE LK-081),LK-081 测量范围为 $\pm 15\text{ mm}$ 。

信号调理电路包括鉴相器及低通滤波电路。鉴相器采用双 D 触发器组成,为降低电路损耗,鉴相电路中均选择超低功耗器件,包括运算放大器 MAX4494,静态工作电流 $770\text{ }\mu\text{A}$; D 触发器 SN74AUP1G74,静态工作电流 $0.5\text{ }\mu\text{A}$;与非门 SN74AUC2G00,静态工作流 $0.5\text{ }\mu\text{A}$ 。信号 u, v, u_d 工作波形如图6所示。

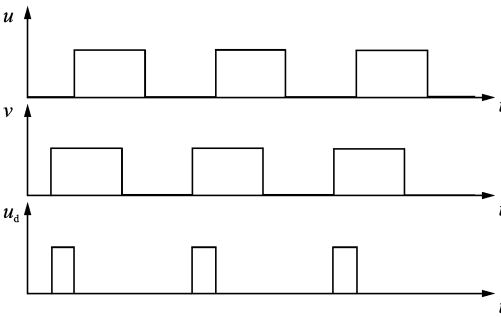


图6 鉴相器工作波形图

滤波电路处于瞬态时, u_d 在高电平持续时间内向滤波电容充电,在低电平时间内,电容向 u_d 放电。至稳态,电容累积电荷与释放电荷数量相等,则电容两端电压 u_c 与 u_d 占空比呈线性关系。直流电压信号 u_c 由单片机 PIC16F688 采集并处理,待机电流 50 nA ,工作频率 32 kHz 时电流 $11\text{ }\mu\text{A}$ 。

关键系统参数如表1所示。

6 实验结果与分析

鉴相器输出电压 u_d 、信号调理电路输出电压 u_c 如图7所示,鉴相器输出方波 u_d 的占空比与两个位移信号的相位差成正比,且直流电压 u_c 随方波 u_d 占空比的增加而增加。

表1 系统参数

系统参数	取值
质量块 M/g	50
发电机等效阻尼系数 $C/(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	0.02
发电机短路等效刚度 $K_E/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1 722
铜的弹性模量 $E_m/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	1.31×10^{11}
PZT-5H 的弹性模量 $E_p/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	7.69×10^{10}
PZT-5H 弹性刚度常数 c_{11}^E/GPa	114.25
PZT-5H 介电常数 $\epsilon_{33}^S/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	1 950
能量采集压电元件电容 C_h/nF	53
驱动压电元件电容 C_a/nF	27
压电应力因子 $\alpha/(\text{mN} \cdot \text{V}^{-1})$	0.658
SSSC 电路翻转系数 γ	0.75

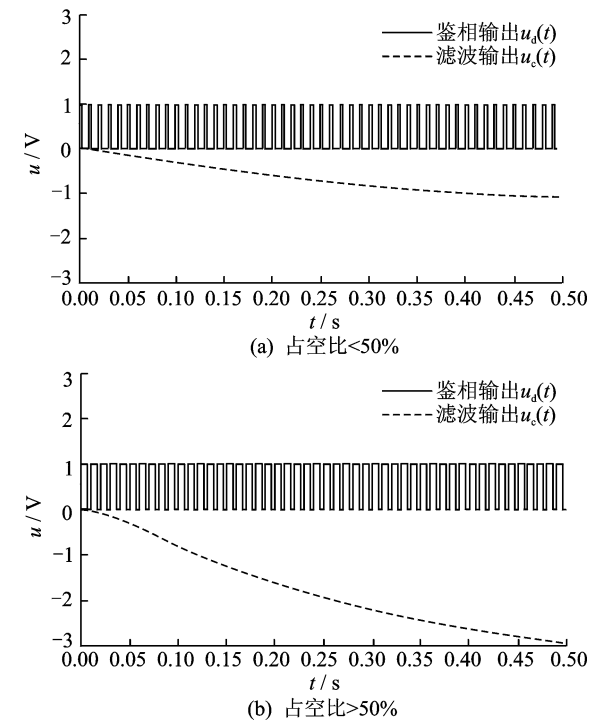


图7 鉴相器、低通滤波输出电压波形图

自适应频率调谐电路控制下,悬臂梁位移信号与外界激励频率关系曲线如图8所示。

调频系数 β 取值由用户自定义, β 愈大,频率

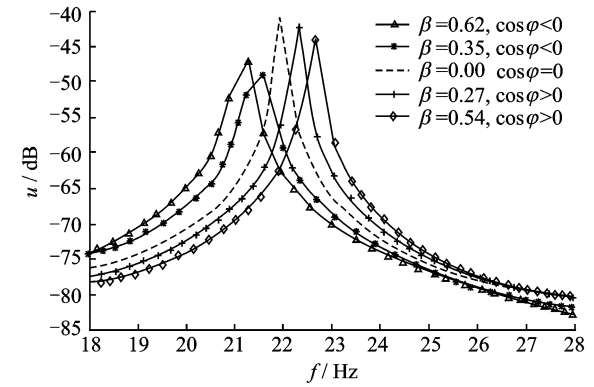


图8 悬臂梁位移与外界激励关系曲线

调节速度愈快,但若 β 取得过大,可能会发生发散(不稳定)的状态; β 愈小,频率调节速度愈慢,但调节精度愈高。从图中可以看出,改变调频系数 β 可以有效调节结构固有频率,固有频率从21.28 Hz变化至22.69 Hz,频率变化率达到5.1%。在实验中,悬臂梁位移信号与基座位移信号相位差 ϕ 可能处于不同的相角区间,实验结果表明,当 $\cos\phi < 0$ 时,结构固有频率向左偏移;当 $\cos\phi > 0$ 时,结构固有频率向右偏移,且频率偏移量随 β 绝对值增大而增加; $\cos\phi = 0$ 时,固有频率不变。实验结果符合式(16)推导结果,可以看出外界激励改变情况下,自适应调谐压电振动发电机通过改变固有频率,使之趋近于外界激励频率。图中悬臂梁输出位移略有衰减,因为控制电路存在损耗。

压电发电机输出功率如图9所示。从图中可以看出,通过调节 β 可以使结构固有频率趋于外界激励频率,并获得较大净输出功率。从图中可以看出,当 $\beta \geq 0.45$ 时,压电发电机对于部分激励频率净输出功率小于0,即能量采集电路输出能量无法满足驱动电路耗能,自适应调频压电发电机无法实现能量自给。可以通过提高能量采集电路输出功率及进一步减少信号调理电路、压电驱动耗能,来提高结构自适应频率调谐范围。另外,在进一步研究中考考虑由压电加速度传感器代替激光位移传感器,真正实现自适应调频系统小型化与能量自给。

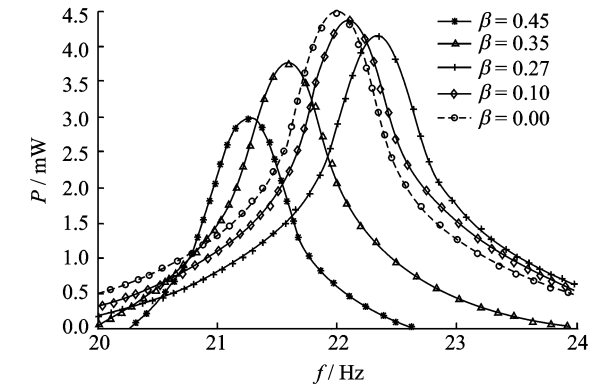


图9 发电机净输出功率与激励频率关系曲线

7 结束语

本文在同步开关刚度控制电路基础上,提出一种自适应频率调谐压电振动发电机,可以根据外界激励频率变化自主调谐发电机固有频率,与激励保持共振状态。建立了系统模型,并推导了系统自适应控制规律相关公式。实验结果表明,自适应调频压电发电机工作频带可以有效展宽,在一定频率范围内保持较高的能量输出水平,并实现能量自给。

参考文献:

- [1] Zhu D, Tudor M J, Beeby S P. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(2):022001-022029.
- [2] Beeby S P, Tudor M J, White N M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(12):175-195.
- [3] Youngsman J M, Luedeman T, Morris D J, et al. A model for an extensional mode resonator used as a frequency-adjustable vibration energy harvester[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(3):277-288.
- [4] Osorio T S, Daqaq M F. Energy harvesting under excitations of time-varying frequency[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(13):2497-2515.
- [5] Peters C, Maurath D, Schock W, et al. A closed-loop wide-range tunable mechanical resonator for energy harvesting systems [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(9):1-9.
- [6] Guyomar D, Lallart M, Monnier T. Stiffness tuning using a low-cost semiactive nonlinear technique[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(5):604-607.
- [7] Lefeuvre E, Badel A, Richard C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. *Sensors and Actuators*, 2005, 126(2):405-416.
- [8] 杜小振. 环境振动驱动微型压电发电装置的关键技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- Du Xiaozhen. Micro piezoelectric power generator driven by ambient vibration[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [9] Best R E. 锁相环设计、仿真与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:8-18.
- Best R E. Phase locked loops design, simulation and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:8-18.
- [10] 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.
- [11] 徐湘元. 自适应控制理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:96-101.
- Xu Xiangyuan. Theory and application of adaptive control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007:96-101.