

悬臂梁式压电振动能量收集系统 输出功率的优化研究

白凤仙¹, 马桂帅¹, 董维杰¹, 孙建忠²

(1. 大连理工大学电子科学与技术学院, 辽宁大连 116023; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁大连 116023)

摘 要: 针对环境振动能量较小、振动源频带较宽导致压电能量收集系统输出功率较低的问题, 探究了悬臂梁式结构能量收集系统采用并联或串联电感优化统输出功率的方法和特性, 分析了不同并、串联电感值对输出功率的影响. 鉴于压电悬臂梁的工作频率较低, 匹配电感值较大, 采用无损模拟电感进行了实验验证. 理论分析与实验结果均表明, 在不同的激振频率下对应不同的匹配电感值, 在偏离谐振频率附近也可获得与谐振状态几乎相同的最大输出功率, 从而拓宽了工作频率, 提高了压电振动能量收集系统的能量收集水平. 当激振频率分别是谐振频率的 0.8 和 1.2 倍时, 并联或串联电感获得的最大输出功率分别是无电感纯电阻负载的 26.4 倍和 18.2 倍.

关键词: 能量收集; 悬臂梁; 输出功率; 电感

中图分类号: TN712.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)05-0883-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.008

Optimization of the Output Power of Cantilever Piezoelectric Vibration Energy Harvesting

BAI Feng-xian¹, MA Gui-shuai¹, DONG Wei-jie¹, SUN Jian-zhong²

(1. College of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China;

2. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: In order to solve the problem of low output power of piezoelectric energy harvesting systems caused by less energy and wide band of ambient vibration, the method of optimizing the output power of cantilever piezoelectric energy harvesting system with the parallel or series inductance are explored and the influence of different parallel or series inductance to the output power is analyzed. Since the frequency of piezoelectric cantilever is low, and the matching inductor value is large, lossless simulated inductor is used in experiment. The theoretical analysis and experiment results show that the maximum output power of resonance can also be obtained at the deviating points with different matching inductance corresponding to different excitation frequencies, which broadens the operating frequency band and improves the total energy harvesting energy level of the system. When the excitation frequency is 0.8 or 1.2 times of the resonant frequency, the maximum output power with parallel or series inductance is 26.4 and 18.2 times of that of the purely resistive load.

Key words: energy harvesting; piezoelectric cantilever; output power; inductor

1 引言

压电式振动能量采集方法因其机电转换系数高、不需外接电源、适用 MEMS 技术, 成为振动能量采集领域研究的热点之一^[1,2]. 但由于环境振动能量较小、输出功率低, 自然环境中的压电振动能量采集系统还难以作为独立的微能源器件来满足商业和生活需求.

针对环境振动能较小而振动源频带较宽或激励水平未知的应用场合及压电换能器输出功率低的问题, 国内外的研究主要围绕高能量密度压电材料、多模态、多谐振频率宽频带振动发电机结构、阵列发电、能量管理电路改进等方面. Yang 等通过对不同模式的压电元件进行了数值分析, 研究表明, 工作在 d_{33} 模式下的压电发电装置的机电耦合系数越高, 俘获的能量越多, 俘能效

率越高^[3].若采用多模态 d_{33} 模式压电-电磁耦合装置至少可以提高 65% 的能量输出^[4,5];采用曲面压电梁给定应力下可产生更多的电荷^[6];锥形压电梁可以提高 300% 的能量收集能力^[7];螺旋形压电梁可以延长结构的疲劳寿命,并有利于传感器微型化^[8];多方向压电振动能量采集结构实现了对不同方向振动能量的有效收集,提高了能量收集器总效率^[9].为了与环境中的振动源实现良好的频率匹配,提高转换效率,哈尔滨工业大学谢涛等人设计了多悬臂梁压电阵列来拓宽其谐振频带^[10].文玉梅等人设计了一种采用频率变换的自供电电源管理电路,将低频信号变换至较高频率,从而减小了匹配电感值,有利于电路的小型化,并在宽频带内实现与压电换能器的匹配^[11].Guyomar 等人以标准能量收集电路为基础提出了同步开关电感电路,通过提高输出电压来提高输出功率,目前被认为是一种非常有效的提高输出功率的方法^[12].为了优化压电振动能量收集系统的功率,Renno 等人针对 d_{33} 模式的压电元件提出了在负载电路中并或串联电感的方式,分析了阻尼和机电耦合系数对输出功率的影响,当阻尼比小于分叉阻尼比时,激励频率除了在谐振点和反谐振点之间,仍可以获得最大功率^[13].考虑压电能量收集系统的容性阻抗特性和适合在低频振动环境收集能量的悬臂梁式结构,本文在不改变压电悬臂梁结构参数的情况下,采用并联或串联电感调节能量收集系统频率的方法,使其在非谐振点处获得与谐振状态几乎相同的输出功率,从而拓宽了工作频率,提高了压电振动能量收集系统总的能量收集水平.

2 功率分析

本文分析了悬臂梁式压电振动能量收集系统串并联电感对输出功率的影响.如图 1 为并联电感的压电悬臂梁能量收集示意图.

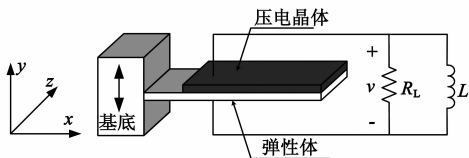


图1 并联电感的悬臂梁能量收集示意图

图 1 中,压电晶体和弹性体组成悬臂梁; R_L 为负载电阻; L 为并联电感.当悬臂梁受到振动源激励作用时,发生弯曲变形,进而在压电晶体表面产生与激励力成正比的电荷.当所产生的电荷量较大时,可用来构成微型发电装置或直接为电子器件提供能源供应.

2.1 纯电阻

基于哈密顿原理^[14],压电悬臂梁发电振子的单自由度方程如下:

$$M\ddot{r} + D\dot{r} + Kr - \theta v = B_f \ddot{w}_B \quad (1)$$

$$\theta \dot{r} + C_p \dot{v} + 1/R_p v = 0 \quad (2)$$

式中,加点表示一阶求导运算; r 为一个只与时间有关的位置函数; v 表示电压; D 为阻尼系数; R_L 为负载电阻; \ddot{w}_B 为激振加速度; M 为质量; K 为刚性系数; θ 为耦合系数; C_p 为夹持电容; B_f 为外力;并有 $M = \int_{V_s} \rho_s \phi_r^2 dV_s + \int_{V_p} \rho_p \phi_r^2 dV_p$; $K = \int_{V_s} c_s (-\gamma \ddot{\phi}_r)^2 dV_s + \int_{V_p} c^E (-\gamma \ddot{\phi}_r)^2 dV_p$; $\theta = \int_{V_p} e (-\nabla \phi_v) (-\gamma \ddot{\phi}_r) dV_p$; $C_p = \int_{V_p} \epsilon^S (-\nabla \phi_v)^2 dV_p$; $B_f = -\int_0^l m \psi_r dx$.

式中, ϕ_r 表示振动模式函数; ϕ_v 表示电势分布函数; ρ_s 表示衬底材料密度; ρ_p 表示衬底材料弹性系数; c^E 表示 PZT 的弹性系数; V 表示体积; γ 表示距离中性轴的距离; l 表示装置长度; e 表示压电常数; ϵ^S 表示常应力下介电常数; ∇ 表示梯度因子; m 表示单位长度的质量.下标 p 表示压电材料, s 表示衬底结构.

利用拉普拉斯变换,得到时间函数、输出电压和输出功率在频域的表达式为:

$$\left| \frac{r}{w_B} \right| = \frac{B_f/K \sqrt{1 + \alpha^2 \Omega^2}}{[1 - (1 + 2\zeta_m \alpha) \Omega^2]^2 + [(2\zeta_m + (1 + k_e^2) \alpha) \Omega - \alpha \Omega^3]^2} \quad (3)$$

$$\left| \frac{V}{w_B} \right| = \frac{B_f/(KC_p) \alpha \Omega}{[1 - (1 + 2\zeta_m \alpha) \Omega^2]^2 + [(2\zeta_m + (1 + k_e^2) \alpha) \Omega - \alpha \Omega^3]^2} \quad (4)$$

$$\left| \frac{P_{out}}{(w_B)^2} \right| = \frac{B_f^2 / K \omega_N \alpha k_e^2 \Omega^2}{[1 - (1 + 2\zeta_m \alpha) \Omega^2]^2 + [(2\zeta_m + (1 + k_e^2) \alpha) \Omega - \alpha \Omega^3]^2} \quad (5)$$

式中, ω_N 为固有角频率; ζ_m 为阻尼比; α 为等效时间常数; Ω 为角频率比; k_e 为等效机电耦合系数,且有 $\omega_N = \sqrt{K/M}$; $\xi_m = D/(2M\omega_N)$; $\alpha = \omega_N R_L C_p$; $\Omega = \omega/\omega_N$; $k_e^2 = \theta^2/(KC_p)$.

当负载为匹配负载时,输出功率达到最大值,此时,时间常数为:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{\Omega^4 + (4\zeta_m^2 - 2)\Omega^2 + 1}{\Omega^6 + (4\zeta_m^2 - 2(1 + k_e^2))\Omega^4 + (1 + k_e^2)^2 \Omega^2}} \quad (6)$$

匹配的负载电阻值为

$$R_{opt} = \alpha_{opt}/(\omega_N C_p) \quad (7)$$

由上式可以看出,在不同的激振频率下,当负载电阻达到匹配负载时可以获得最大输出功率.而匹配的负载受激振频率、系统的固有角频率、阻尼比和机电耦合系数等的影响.

2.2 并联或串联电感

考虑压电振动能量收集系统容性的阻抗特性,本

文在不改变压电悬臂梁结构参数的情况下,采用并串联电感调节能量收集系统频率的方法,使其在较宽的振源频带范围内获得与谐振状态下相同或相近的输出功率。

并联电感时式(2)转化为

$$\ddot{\theta} + C_p \ddot{v} + 1/R_l \dot{v} + 1/Lv = 0 \quad (8)$$

联立式(1)和式(8),并利用拉普拉斯变换,得到

$$\left| \frac{r}{w_B} \right| = \frac{B_f \sqrt{\alpha^2 (1 - \beta \Omega^2)^2 + \beta^2 \Omega^2}}{K \sqrt{A}} \quad (9)$$

$$\left| \frac{V}{w_B} \right| = \frac{B_f / \theta \alpha \beta \Omega^2 k_e^2}{\sqrt{A}} \quad (10)$$

$$\left| \frac{P_{out}}{(w_B)^2} \right| = \frac{B_f^2 \omega_N \alpha \beta^2 K_e^2 \Omega^4}{KA} \quad (11)$$

式中, $\beta = \omega_N^2 C_p L$, 而 $A = [\alpha \beta k_e^2 \Omega^2 - \alpha (1 - \Omega^2) (1 - \beta \Omega^2) + 2 \zeta_m \beta \Omega^2]^2 + [(1 - \Omega^2) \beta \Omega + 2 \zeta_m \Omega \alpha (1 - \beta \Omega^2)]^2$ 功率达到最大值时对应的 α 和 β 的最佳值为:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{((1 - \Omega^2) \beta_{opt} \Omega)^2 + (2 \zeta_m \beta_{opt} \Omega^2)^2}{(\beta_{opt} \Omega^2 k_e^2 - (1 - \Omega^2 - \beta_{opt} \Omega^2 + \beta_{opt} \Omega^4))^2 + (2 \zeta_m \Omega (1 - \beta_{opt} \Omega^2))^2}} \quad (12)$$

$$\beta_{opt} = \frac{(1 - \Omega^2)^2 + 4 \zeta_m^2 \Omega^2}{\Omega^2 (1 - \Omega^2) (1 - \Omega^2 + k_e^2) + 4 \zeta_m^2 \Omega^4} \quad (13)$$

从而,对应的匹配电感 L_{opt} 和匹配负载电阻 R_{opt} 分别为

$$L_{opt} = \beta_{opt} / (\omega_N^2 C_p) \quad (14)$$

$$R_{opt} = \alpha_{opt} / (\omega_N C_p) \quad (15)$$

类似地,串联电感时,有

$$\ddot{r} + 2 \zeta_m \omega_N \dot{r} + \omega_N^2 r - \theta (\dot{q} R_l + \ddot{q} L) / M = B_f \ddot{w}_B / M \quad (16)$$

$$C_p L \ddot{q} + C_p R_l \dot{q} + q + \theta r = 0 \quad (17)$$

式中,电流 $i = \dot{q}$, 并有

$$\left| \frac{r}{w_B} \right| = \frac{B_f \sqrt{(1 - \beta \Omega^2)^2 + \alpha^2 \Omega^2}}{K \sqrt{B}} \quad (18)$$

$$\left| \frac{I}{w_B} \right| = \frac{B_f / K \omega_N \theta \Omega}{\sqrt{B}} \quad (19)$$

$$\left| \frac{P_{out}}{(w_B)^2} \right| = \frac{B_f^2 K_e^2 \Omega^2 \alpha \omega_N}{KB} \quad (20)$$

其中, $B = [\alpha \Omega (k_e^2 + 1 - \Omega^2) + 2 \zeta_m \Omega (1 - \beta \Omega^2)]^2 + [\beta k_e^2 \Omega^2 - (1 - (1 + \beta) \Omega^2 + \beta \Omega^4) + 2 \zeta_m \alpha \Omega^2]^2$

功率优化达到最大值时对应的 α 和 β 的值分别为

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{(\beta_{opt} \Omega^2 k_e^2 - (1 - \Omega^2) (1 - \beta_{opt} \Omega^2))^2 + (2 \zeta_m \Omega (1 - \beta_{opt} \Omega^2))^2}{(\Omega k_e^2 + \Omega (1 - \Omega^2))^2 + (2 \zeta_m \Omega^2)^2}} \quad (21)$$

$$\beta_{opt} = \frac{4 \zeta_m^2 \Omega^2 + (1 - \Omega^2) (1 - \Omega^2 + k_e^2)}{4 \zeta_m^2 \Omega^4 + \Omega^2 (1 - \Omega^2 + k_e^2)} \quad (22)$$

由上式可以看出,无论是并联电感还是串联电感,获得最大功率对应的匹配电感值均受激振频率、阻尼比和机电耦合系数等的影响。因此,不同激振频率环境的能量收集系统可以通过优化外电路的电感值而实现功率的优化。

3 仿真分析

本文实验采用压电材料为 PZT-5H,悬臂梁为磷青铜,激振台加速度为 3 m/s^2 ,其悬臂梁尺寸和材料特性如表 1 所示。

表 1 材料特性

材料特性	数值
PZT 密度, ρ_p	$7.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
PZT 弹性刚度, c_{11}^E	76.9 GPa
PZT 应变常数, d_{31}	$-186 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
PZT 介电常数, ϵ_{33}^T	4500
磷青铜密度, ρ_s	$8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
磷青铜弹性刚度, c_s	106 GPa
装置长度, l	45 mm
装置宽度, w	20 mm
PZT 厚度, t_p	0.2 mm
磷青铜厚度, t_s	0.3 mm

由表 1 所示的模型参数,分别求得悬臂梁振子的仿真参数为:有效的集总模态质量 $9.72 \times 10^{-4} \text{ kg}$, $K = 617.4 \text{ N/m}$, $\theta = -2.9 \times 10^{-3} \text{ N/V}$, $C_p = 1.79 \times 10^{-7} \text{ F}$, $B_f = -2.9 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。

3.1 阻尼比的确定

仿真分析采用的阻尼比 ξ_m 由于与具体的实验环境有关,所以通常采用实验测量的方法。在阻尼比 $0 < \xi_m < 1$ 时,悬臂梁单自由度自由响应是一个振幅随时间按指数规律衰减的振动。图 2 给出了三次实验测得的单片压电梁的衰减振动曲线,阻尼比的计算如式(23)所示^[15]。

$$\xi_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}} \quad (23)$$

式中, A_i , A_{i+n} 分别为衰减振动的第 i 次和第 $i + n$ 次振动的振幅。

由图 2 所示的实验测试结果分别取相隔 10 个周期的峰值电压 A_i 和 A_{i+n} 值及 $n = 10$ 代入式(23)计算,得到的阻尼比分别为 0.0230, 0.0260, 0.0245。可见三次测量阻尼比的值比较接近,为了使仿真结果更精确,仿真计算采用三次测量的平均值 0.0245。

3.2 匹配电阻和电感值

当工作频率与谐振频率的比值分别为 $\Omega = 0.8$ 、1.0、1.2 时,由式(11) ~ (15)求得并联电感时获得的最

大功率及对应的匹配负载和匹配电感值如表 2 所示. 由式(20)~(22)结合(14)和(15)求得串联电感时获得最大功率及对应的匹配负载和匹配电感值如表 3 所示.

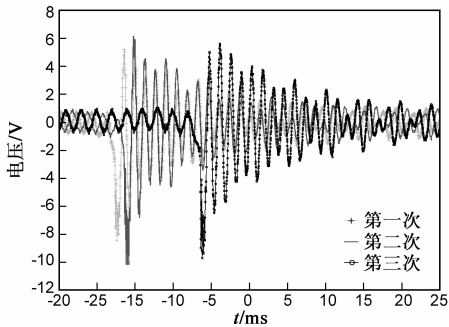


图2 三次测量阻尼比的实验结果

表 2 并联电感在不同频率比下的最大输出功率及对应的匹配负载和电感值

角频率比 Ω	0.8	1	1.2
R_{opt} (并电感/纯电阻)/ohm	361.42k /6.97k	4.24k /3.59k	241.38k /6.85k
L_{opt}/H	10.58	8.24	6.93
P_{opt} (并电感/纯电阻)/ μW	30.9/1.17	30.9/28.38	30.9/1.7
最大功率比((并电感/纯电阻))	26.4	1.09	18.2

表 3 串联电感在不同频率比下的最大输出功率及对应的匹配负载和电感值

角频率比 Ω	0.8	1	1.2
R_{opt} (串电感/纯电阻)/ohm	134.4/ 6.97k	3.05k /3.59k	194.1 /6.85k
L_{opt}/H	10.58	2.31	6.93
P_{opt} (串电感/纯电阻)/ μW	30.9/1.17	30.9/28.38	30.9/1.7
最大功率比((串电感/纯电阻))	26.4	1.09	18.2

由表 2 和表 3 可以看出,负载端并联或串联电感在偏离谐振点附近最大输出功率均能达到 30.9 μW ;在谐振点处最大输出功率略有增加. 显然,无论是并联电感还是串联电感,当激振频率偏离谐振点时最大输出功率都能得到很大的提升,当频率比为 $\Omega = 0.8$ 和 $\Omega = 1.2$ 时,输出功率分别为纯电阻负载时的 26.4 倍和 18.2 倍,且匹配电感值基本相同. 只是并联电感时匹配负载值较串联电感时大很多. 所以,并联电感提高输出功率的方法更适合较大的工作负载.

3.3 并或串联电感优化功率分析

为了进一步研究并或串联电感及负载对输出功率的影响,由式(11)仿真得到 $\Omega = 0.8$ 时并联不同电感时输出功率和负载的特性曲线如图 3 所示.

当频率比 $\Omega = 0.8$ 时,由图 3 所示的仿真结果可以看出:(1)随着并联电感值由 500mH~10.58H 逐渐增大时,输出功率逐渐增大,匹配电阻值也随着增大. 在匹配电阻为 361.42k Ω 、匹配电感为 10.58H 时获得最大功率,其值为 30.9 μW . 当并联电感值超过 10.58H 继续增大电感时,输出功率逐渐减小,对应的匹配电阻值也逐渐减小;(2)存在一个介于 5.25H 和 5.35H 之间的临界电感值. 超过该值时,并联电感可以达到提高输出功率的目的;(3)当并联电感值超过 100H 时,其输出功率逐渐接近无感状态的输出功率,并联电感失去意义.

当 $\Omega = 1.2$ 时,并联电感后的输出功率曲线变化规律与 $\Omega = 0.8$ 时基本一致,最大输出功率均为 30.9 μW ,临界电感值为 3.45H;当 $\Omega = 1.0$ 时,并联 8.24H 的电感输出功率仅提高了 2.52 μW ,即在谐振点并联电感意义不大.

如图 4 给出了 $\Omega = 0.8$ 时,串联不同值的电感对输出功率的影响.

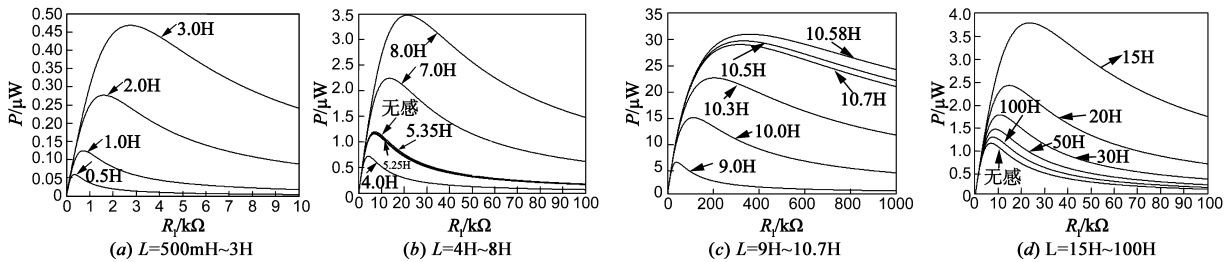


图3 并联不同电感时输出功率与负载电阻的关系曲线

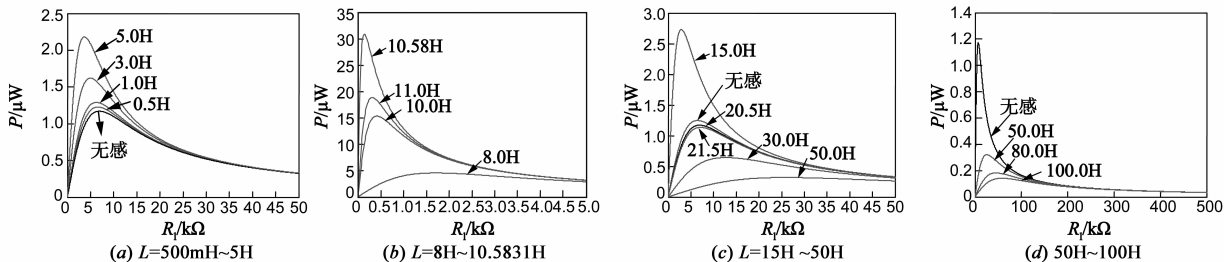


图4 串联不同电感值下输出功率与负载电阻关系

当 $\Omega = 0.8$ 时,由图 4 可以看出:(1)随着串联电感值由 $500\text{mH} \sim 10.58\text{H}$ 逐渐增大时,输出功率逐渐增大,匹配电阻值随着变小,在匹配电阻为 134.4Ω 、匹配电感 10.58H 处获得最大值,其值为 $30.9\mu\text{W}$ 。当超过串联电感值 10.58H 继续增大,输出功率减小,而匹配电阻值逐渐变大;(2)存在一个介于 20.5H 和 21.5H 之间的临界电感值,超过该值时,串联电感对提高输出功率不起作用。

当 $\Omega = 1.2$ 时,串联电感后的输出功率曲线变化规律与 $\Omega = 0.8$ 时一致,临界电感值为 14H 左右。当匹配电感值为 6.93H 时,最大输出功率均为 $30.9\mu\text{W}$;当 $\Omega = 1.0$ 时,串联 2.31H 的电感输出功率仅提高了 $2.52\mu\text{W}$ 。

比较以上并联和串联电感的仿真结果可以看出:(1)随着并联电感值的增大,匹配负载电阻值是先增大后减小的变化趋势;而串联电感时则相反,表现为匹配负载电阻值先减小后增大的趋势;(2)并联电感时获得的最大输出功率对应的匹配电感值是临界电感值的 2 倍,而串联时匹配电感值则是临界电感值的 0.5 倍;(3)串并联电感时,在匹配电感处获得的最大输出功率几乎相同。

综上,在偏离谐振频率附近并联或串联合适的电感均可获得与谐振状态几乎相同的最大输出功率,即采用并或串联电感提高输出功率的方法是可行的。

4 实验验证

本文采用并或串联电感的方法实现压电振动能量收集系统输出功率的提高,但由于压电悬臂梁的工作频率较低,其匹配电感值较大,实际制作较困难,因此实验采用了无损模拟电感的方法实现高电感值,其电路原理图如图 5 所示。图 5 中正弦电流源 $i_p(t)$ 与静态夹持电容 C_p 为压电换能部分的等效部分; R_L 为负载等效电阻;虚框部分电路用于实现模拟电感,其电感值与图 5 中各参数的关系为 $L_{eq} = 2R^2C^{[16]}$,不同的电感值可以通过调节可变电阻 R 实现。为了保证运放有一个宽的线性工作区并保持电感的作用,供电电源为 $\pm 20\text{V}$ 。

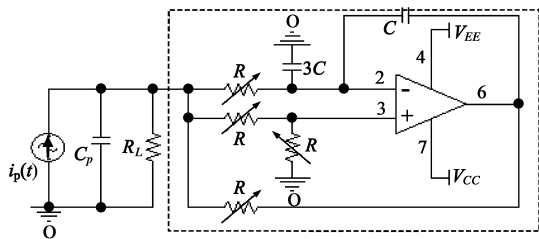


图5 带有实现模拟电感电路的实验原理图

本实验采用 AFG3021B 信号发生器为 YE5871A 功率放大器提供信号,从而驱动 JZK-5 系列小型激振台,可以调节信号发生器的原始信号幅度来控制激振强度;ST-1 通用型电涡流位移传感器检测激振台的振幅;TDS1002 示波器用于来观察输出电压波形,并记录实验结果,实验装置如图 6 所示。

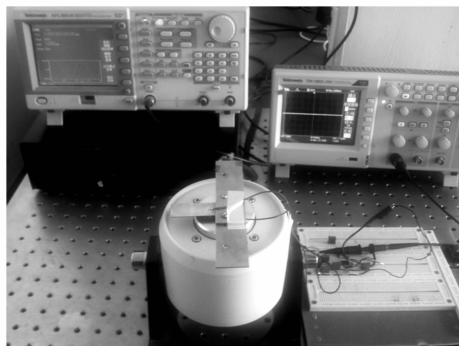


图6 实验装置图

4.1 并联电感

由于实验采用如图 5 所示模拟电感电路实现大电感值,串联电感的接“地”问题不易解决,所以,本文仅以并联电感为例做了实验验证。实验测得开路谐振频率为 76Hz ;实验采用的加速度幅值是通过电涡流位移传感器测量激振台的振动幅度来间接获得,其值为 3m/s^2 。对多根悬臂梁多次实验得到与仿真结果相近的实验结果如图 7~9 所示。

由图 7~9 可以看出,谐振状态 $\Omega = 1.0$ 时,最大输出功率约 $26.5\mu\text{W}$,匹配负载为 $4.4\text{k}\Omega$ 。当 $\Omega = 0.8$ 时,并

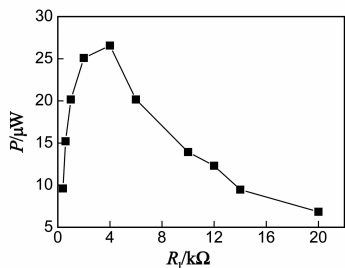


图7 $\Omega = 1.0$,工作频率 $f = 70\text{Hz}$ 时,输出功率与负载电阻的关系曲线

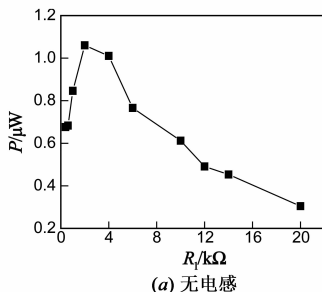
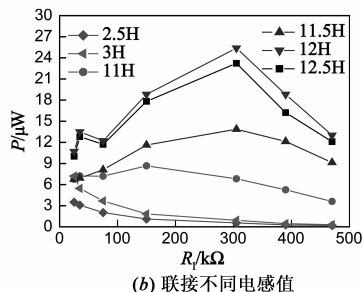


图8 $\Omega = 0.8$ 时,不同电感值输出功率与负载电阻的关系曲线



联 12H 的电感获得的最大输出功率是无电感时的 23.95 倍; $\Omega = 1.2$ 时,并联 8H 的电感获得的最大输出功率是无电感时的 16.77 倍.可见,在偏离谐振状态并联合适的电感可以达到提高输出功率的目的,该结论与仿真结果相吻合.

4.2 结果分析

比较图 7~9 和图 3 可以看出,并联电感后输出功率与负载的变化曲线与仿真结果相吻合,匹配电阻值、最大输出功率略低于仿真值,匹配电感值略高与仿真结果,如表 4 所示.就其原因主要有:

(1)所购压电振子生产厂家没有给出压电陶瓷的具体参数,现有实验条件又无法测量,仿真计算直接采用了设计要求的 PZT-5 材料的参数,与实际值存在一些

误差.

(2)由于振动幅值是实验测量值,换算成加速度幅值后导致理论计算误差被放大.如图 10 给出了激振加速度与输出功率的特性曲线.

由图 10 可以看出,输出功率在谐振频率点获得最大值,随着激振加速度的增加而增加,所以激振加速度的误差对输出功率是有一定影响的.但由于本实验采用的激振加速度较小为 3m/s^2 ,误差的影响不会导致输出功率有较大范围的变化.

(3)由于实验采用了模拟电感电路实现大电感值,从而引起匹配电感、匹配负载和最大输出功率与仿真结果的偏差.

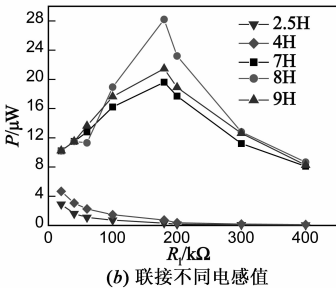
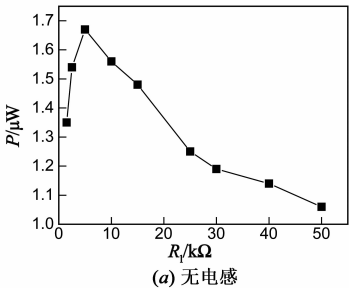


图9 $\Omega=1.2$ 时,不同电感值输出功率与负载电阻的关系曲线

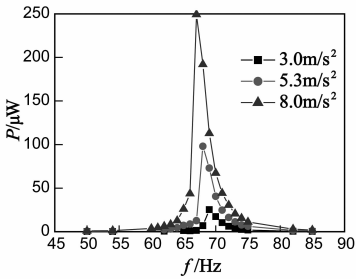


图10 输出功率与激振加速度的关系

表 4 并联电感时匹配电阻、匹配电感和最大输出功率的计算值和实验测量值

主要参数	P_{out} (并感/无感)/ohm		L_{opt}/H		R_{opt} (并感/无感)/ μW		最大功率比(并感/无感)	
	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量
角频率比								
$\Omega = 0.8$	361.42k/6.97k	305k/2k	10.6	12.0	30.9/1.17	25.39/1.06	26.4	23.95
$\Omega = 1$	4.24k/3.59k	/4.4k	8.24	/	30.9/28.38	/26.5	1.09	/
$\Omega = 1.2$	241.38k/6.85k	180k/5k	6.93	8.0	30.9/1.7	28.2/1.67	18.2	16.89

5 结论和展望

本文探究了悬臂梁式压电能量收集系统采用并联或串联电感提高输出功率的可行性.推导了输出功率与频率、阻尼比、耦合系数及负载的关系并进行了仿真分析,结果表明,在不同的激振频率下对应不同的匹配电感值,在偏离谐振频率附近也可获得与谐振状态几乎相同的最大输出功率.当激振频率分别为谐振频率的 0.8 和 1.2 时,输出功率分别是无电感纯电阻负载的约 26.4 倍和 18.2 倍.由于实验采用了无损模拟电感的方法实现高电感值,其输出功率偏低与仿真值,但在非谐振点处输出功率的提高程度与仿真结果接近.可见,并联或串联电达到了提高压电俘能系统输出功率和宽频、拓频的目的.

由于悬臂梁的工作频率较低,当激振频率偏离谐振频率时,输出功率达到最大所需匹配的并或串联电

感值较大,很难满足实际应用.但随着激振频率的增加,匹配电感值在减小.因此,可以探究将低频信号转化为较高频率的频率变换方法,获得较小的匹配电感,使实际应用成为可能.

参考文献

[1] Xianzhi Dai, Yumei Wen, et al. Modeling, characterization and fabrication of vibration energy harvester using Terfeno-I D/PZT/Terfeno-I D composite transducer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 156(2): 350 – 358.

[2] Ming Li, Yumei Wen, et al. A rotation energy harvester employing cantilever beam and magnetostrictive/piezoelectric laminate transducer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 166(1): 102 – 110.

[3] Yang J, Zhou H, Hu Y, et al. Performance of a piezoelectric harvester in thickness-stretch mode of a plate[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(10): 1872 –

- 1876.
- [4] Alireza Khaligh, Peng Zeng, et al. A hybrid energy scavenging topology for human-powered mobile electronics [A]. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics [C]. Publishing Industrial Electronics, IEEE, 2008, IECON 2008: 448 – 453.
- [5] Vinod R Challa, M G Prasad, Frank T Fisher. A coupled piezoelectric electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching [J]. Smart Mater, Struct, 2009, 18(9): 095029 – 095040.
- [6] Yung Ting, Gunawan Hariyanto, et al. Investigation of energy harvest and storage by using curve-shape piezoelectric unimorph [A]. 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Publishing Industrial Electronics, IEEE, 2009, ISIE2009: 2407 – 2412.
- [7] Shahab Mehraeen, S. Jagannathan, Keith Corzine. Energy harvesting using piezoelectric materials and high voltage scavenging circuitry [A]. 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology [C]. Publishing Industrial Technology, 2008. ICIT 2008: 1 – 8.
- [8] Hongping Hu, Huan Xue, Yuntai Hu. A spiral-shaped harvester with an improved harvesting element and an adaptive storage circuit [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(6): 1177 – 1187.
- [9] 侯志伟, 陈仁文, 刘祥建. 多方向压电振动能量收集装置及其优化设计 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 33 – 37.
HOUZhi-wei, CHEN Ren-wen, LIU Xiang-jian. Optimization design of multi-direction piezoelectric vibration energy harvester [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 33 – 37. (in Chinese)
- [10] 谢涛, 袁江波, 单小彪, 陈维山. 多悬臂梁压电振子频率分析及发电实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 98 – 101.
XIETao, YUAN Jiangbo, SHAN Xiaobiao, CHEN Weishan. Frequency analysis and electricity generated by multiple piezoelectric cantilevers in energy Harvesting [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(2): 98 – 101. (in Chinese)
- [11] 文玉梅, 吴翰钟, 李平, 尹文建. 一种采用频率变换的自供电电源管理电路 [J]. 电子学报, 2012, 40(11): 2324 – 2329.
WEN Yu-mei, WU Han-zhong, LI Ping, YIN Wen-jian, A self powered power supply management circuit using frequency conversion network [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(11): 2324 – 2329. (in Chinese)
- [12] Daniel Guyomar, Adrien Badel, Elie Lefeuvre, Claude Richard. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing [J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(4): 584 – 595.
- [13] Jamil M Renno, Mohammed F Daqaq, Daniel J. Inman. On the optimal energy harvesting from a vibration source [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(1 – 2): 386 – 405.
- [14] zhangbing, 经典力学的哈密顿理论 [EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-91841917769.html>. (2010.09.30).
zhangbing, Hamiltonian theory of classical mechanics [EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-91841917769.html>. (2010.09.30). (in Chinese)
- [15] 闫世伟. 胎压报警器用压电供电系统设计与实验研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2010. 45 – 64.
YAN Shiwei. The design and experiment research on piezoelectric power supply system for TPMS [D]. Jilin: Jilin University, 2010. 45 – 64. (in Chinese)
- [16] 李芳, 李征, 柯熙政. 基于模拟电感的混沌同步电路的研究 [J]. 现代电子技术, 2004, 27(15): 54 – 61.
LI Fang, LI Zheng, KE Xizheng. Research of chaotic synchronization circuit based on stimulated inductances [J]. Modern Electronic Technique, 2004, 27(15): 54 – 61. (in Chinese)

作者简介



白凤仙 女, 1963 年出生, 山西交城人, 硕士, 副教授, 主要从事电路与系统、压电振动发电的理论与应用研究。

E-mail: baifx63@163.com



马桂帅 男, 1987 年出生, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究领域为压电振动能量收集系统的优化工作。

E-mail: mgs407@mail.dlut.edu.cn