

# 压电能量俘获系统建模及仿真

吴志东<sup>1,2</sup>, 房俊龙<sup>1</sup>, 何义波<sup>2</sup>, 潘迪<sup>3</sup>, 李强<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学 电气与信息学院, 黑龙江, 哈尔滨 150030; 2. 齐齐哈尔大学 机电工程学院, 黑龙江, 齐齐哈尔 161006; 3. 齐齐哈尔大学 理学院, 黑龙江, 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 针对压电悬臂梁结构能量俘获系统进行建模, 利用电路系统和机械系统的相似关系, 将压电俘能结构模型等效为电路系统模型; 为建立压电能量俘获系统完整模型, 基于 LTC3588-1 为核心的能量转换电路等效为降压及整流电路, 并利用 LTspice 软件仿真验证该等效电路的正确性. 在 Matlab/Simulink 系统中搭建压电能量俘获系统整体模型并进行仿真, 根据仿真结果对模型参数进行优化. 通过对实验数据对比、分析, 验证系统模型的合理性, 结果表明系统可以稳定输出 3.3 V 直流电压, 最佳阻抗匹配条件下, 输出功率为 2.6 mW.

**关键词:** 压电能量俘获器; 系统建模; 等效电路; 仿真

中图分类号: TP29

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2020)08-0894-07

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.194

## Modeling and Simulation of Piezoelectric Energy Harvesting System

WU Zhi-dong<sup>1,2</sup>, FANG Jun-long<sup>1</sup>, HE Yi-bo<sup>2</sup>, PAN Di<sup>3</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

3. College of Science, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

**Abstract:** The energy harvesting system for piezoelectric cantilever beam structure was modeled, the piezoelectric energy harvesting structure model was equated with the circuit system model by using the similar relationship between circuit system and mechanical system. To establish a complete model of piezoelectric energy harvesting system, the energy conversion circuit based on LTC3588-1 was equated with buck and rectifier circuit, the correctness of the equivalent circuit was verified by LTspice simulation. The whole model of piezoelectric energy harvesting system was built and simulated in Matlab/Simulink system, model parameters were optimized according to simulation results. Through the comparison and analysis of experimental data, the rationality of the system model was verified. The system can output 3.3 V DC voltage stably, and the output power is 2.6 mW under the optimal impedance matching condition.

**Key words:** piezoelectric energy harvester; system model; equivalent circuit; simulation

近年来通过收集环境中振动能量来为分布式无线传感器网络(WSN)供电成为一个热点研究方向,而压电能量收集(PEH)技术则是最有效的解决方案之一<sup>[1-4]</sup>. 机械振动几乎处处存在,同时

由于压电材料具有较高的能量密度以及便于和结构集成等优点,利用正压电效应将机械能转换成能成为了振动能量回收的一种主要方式<sup>[5-7]</sup>. 目前压电能量收集技术的研究已经较为成熟,对于压

收稿日期: 2019-07-16

基金项目: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135209309); 齐齐哈尔大学教育科学研究项目(2017090); 齐齐哈尔市科技局工业攻关项目(GYGG201907).

作者简介: 吴志东(1985—),男,讲师,博士生, E-mail: wzd139446@163.com.

通信作者: 房俊龙(1971—),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: jlfang@neau.edu.cn.

电能量系统的仿真分析也很多. 在压电能量收集方面, 现有的研究多以机电耦合方式研究压电俘能器机械结构理论模型<sup>[8-13]</sup>, 很少有对整体压电俘能器系统, 包括压电俘能结构和后端能量转换电路进行综合建模、仿真以及测试验证. 本文利用机械系统和电路系统的相似关系及规律性<sup>[14]</sup>, 将悬臂梁式压电能量俘获系统的结构转化为电路系统, 并与能量转换电路连接, 利用 Matlab/Simulink

软件对其进行整体系统仿真, 通过建模、仿真验证系统输出电压的稳定性, 更加直观反应整体压电俘获系统的输出特性, 可为深入研究压电能量俘获系统的研究提供理论与实验基础. 系统建模及仿真方案如图 1 所示, 首先对压电能量俘获器结构进行相似电路转化; 然后, 建立 LTC3588 等效电路模型; 最终将两部分电路模型结合, 对其进行仿真、验证.

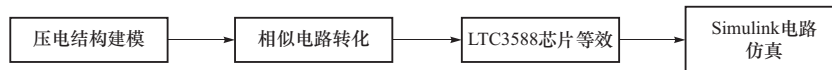


图 1 系统建模及仿真方案

Fig. 1 Scheme of system modeling and simulation

## 1 压电悬臂梁结构及建模

### 1.1 压电悬臂梁的结构

图 2 为压电悬臂梁能量俘获系统机械结构. 图中: 压电片附着于悬臂梁上, 梁的一端固定不动, 另一端固定质量块; 质量块振动带动悬臂梁产生振动使压电片发生变形极化产生电压.

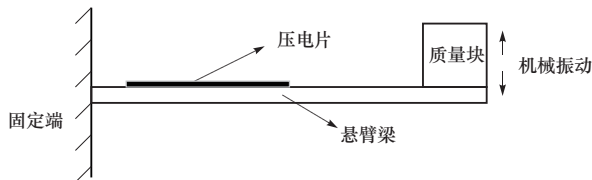


图 2 压电能量俘获器结构

Fig. 2 Structure of piezoelectric energy harvester

通过测试, 该压电悬臂梁俘能器输出电压与振动频率之间关系如图 3 所示, 确定压电悬臂梁俘能器共振频率为 54 Hz, 输出电压峰值 8.55 V.

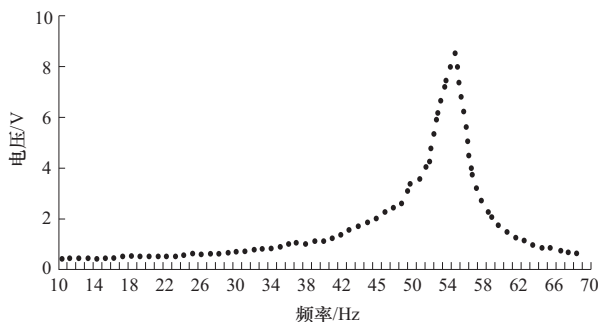


图 3 电压-频率曲线

Fig. 3 Curves of voltage-frequency

### 1.2 压电悬臂梁的建模

对压电能量俘获器机械结构进行物理建模<sup>[15-16]</sup>, 对应机械系统物理模型如图 4 所示, 其中悬臂梁的上下振动等效为弹簧 K 的伸缩, 悬臂梁固定端等效为阻尼器 C, 质量块等效为 M, 悬臂梁所受脉冲力即为机械系统输入.

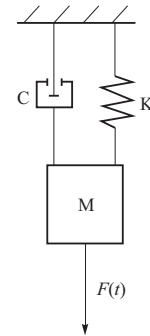


图 4 压电悬臂梁模型

Fig. 4 Piezoelectric cantilever beams model

压电悬臂梁机械系统数学模型为

$$m \frac{dx(t)}{dt} + c(t) + \frac{1}{\rho} \int x(t) dt = F(t), \quad (1)$$

式中:  $c$  为阻尼系数;  $k$  为弹簧系数;  $m$  为质量;  $F(t)$  为系统输入即作用在悬臂梁上的激振力;  $x(t)$  为系统输出, 即为振动速度, 也可视为振动幅度;  $\rho$  为弹簧柔度. 根据牛顿第二定律写出系统微分方程为

$$F(t) - kx(t) - c \frac{dx(t)}{dt} = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2}, \quad (2)$$

其传递函数为

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}. \quad (3)$$

根据等式(3)的传递函数可得出系统框图如图 5 所示.

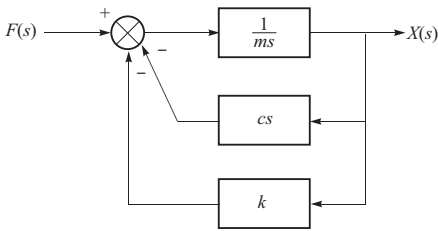


图 5 系统方框图

Fig. 5 System block diagram

利用  $F$ - $V$  相似方法,根据表 1 中的电路系统和机械系统相似关系,可将图 4 所示压电悬臂梁模型机械系统模型等效为电路模型,如图 6 所示.

表 1 电路系统和机械系统相似关系

Tab. 1 Similar relationship between circuit system and mechanical system

| 机械平移系统              | 力-电压相似变换            |
|---------------------|---------------------|
| 力, $F$              | 电压, $\mu$           |
| 位移, $x = \int v dt$ | 电荷, $q = \int i dt$ |
| 速度, $v = dx/dt$     | 电流, $i = dq/dt$     |
| 质量, $m$             | 电感, $L$             |
| 黏滞阻尼系数, $c$         | 电阻, $R$             |
| 弹簧柔度, $\rho = l/k$  | 电容, $C$             |
| 电-力耦合               | 理想变压器               |
| 连接点                 | 闭合回路                |
| 参考壁(地)              | 地                   |

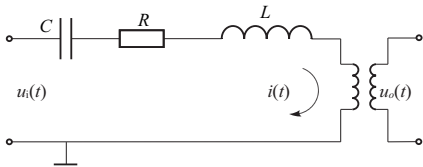


图 6  $F$ - $V$  相似电路

Fig. 6  $F$ - $V$  similar circuit

根据图 6 所示可列出数学模型(4).

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = u_i(t). \quad (4)$$

2 系统等效电路模型及仿真

2.1 系统等效电路模型

压电能量俘获器输出为交流,需要利用整流电路,电容滤波,稳压管来对压电片产生的波动电压进行稳压,但该整体电路由较多的电子元件组成,电路自身消耗能量较大,导致能量收集效率低.为解决上述问题,采用 LTC3588-1 芯片,该芯片内部集成一个低损耗、全波桥式整流器和一个高效率降压型转换器,能量转换效率较高.

LTC3588-1 在 2.7~20.0 V 的输入电压范围内工作,可将压电俘能器收集的振动能量转换稳定的能量输出,供给用电设备.

本文以 LTC3588-1 芯片为核心搭建能量转换电路, Matlab/Simulink 软件中尚未建立与 LTC3588-1 芯片类似的功能模块,所以搭建模型过程中,需根据 LTC3588-1 芯片特性自行建立相应电路. 本文将该芯片简化为降压电路和整流电路的组合形式,前端与压电源相连接,后端连接相应负载,系统模型框图如图 7 所示.

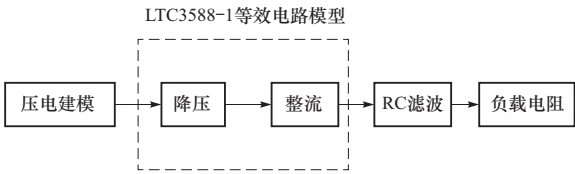


图 7 系统电路模型框图

Fig. 7 System circuit model block diagram

压电俘能器可等效为压电源电路模型<sup>[17]</sup>,由电压源、电阻、电容、电感、变压器等组成,本文压电俘能器等效电路模型中各元件参数如表 2 所示.

表 2 电路元件参数

Tab. 2 Parameters of circuit component

| 序号 $i$ | $R_i/\Omega$      | $L_i/H$ | $C_i/F$                 | 变压器 $T_i$ (变比) |
|--------|-------------------|---------|-------------------------|----------------|
| 1      | 22.2195           | 1       | $16.407 \times 10^{-6}$ | 1 : 10         |
| 2      | $4.3 \times 10^3$ | 1       | $4.7 \times 10^{-3}$    | 2 : 1          |

压电俘能器等效电路压电源模型与 LTC3588-1 简化电路模型相连接构成单悬臂梁式压电能量俘获系统模型,等效电路模型如图 8 所示. 图中 AC Voltage Source 为 1.101 5 V 电压源; $C_1$ 、 $C_2$  为电容, $C_2$  用于滤波; $R_1$ 、 $R_2$  为电阻, $R_2$  作为负载使用,俘能器与负载之间存在最佳耦合条件,即满足最佳阻抗匹配条件时,可计算负载阻值  $R_2$  约为 4.3 k $\Omega$ ;  $L_1$ 、 $L_2$  为电感; $T_1$ 、 $T_2$  为变压器, $T_1$  为电-力耦合转化的理想变压器,用于升压, $T_2$  为 LTC3588-1 芯片的简化降压器; $D_1 \sim D_4$  为整流二极管,构成 LTC3588-1 芯片的简化整流电路;Current Measurement、Voltage Measurement、Scope 分别为电流表、电压表、示波器,监测电路模型各参数.

2.2 等效电路及系统仿真

设置仿真时间为 1 s,电压源为正弦交流信号,其幅值为 1.101 5 V,频率为 54 Hz,仿真结果可在示波器中观察,如图 9~图 11 所示.

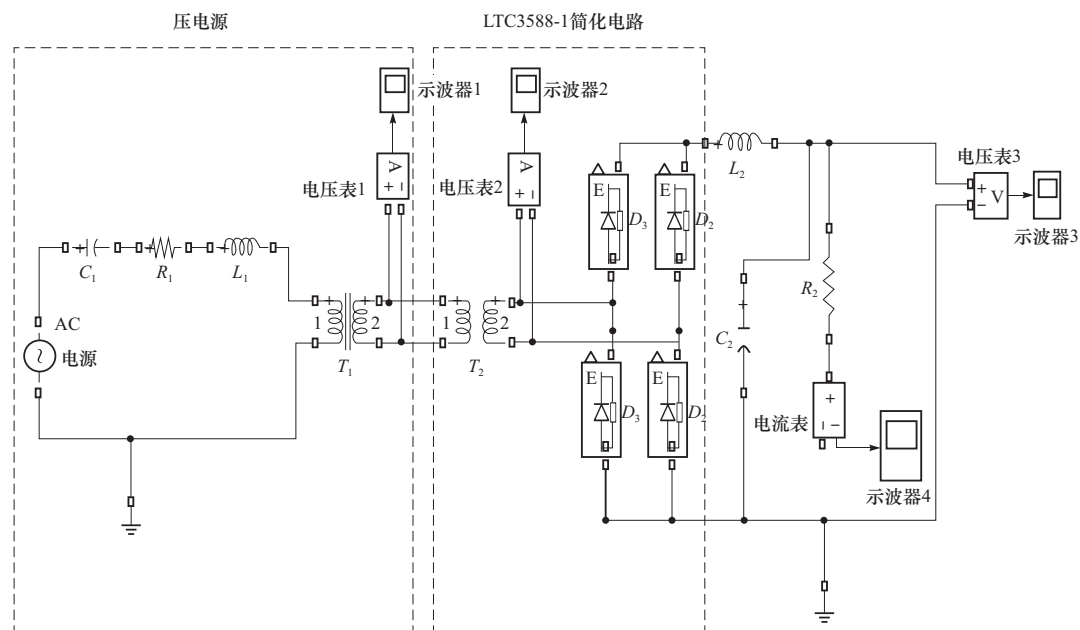


图 8 系统等效电路模型

Fig. 8 Equivalent circuit model of system

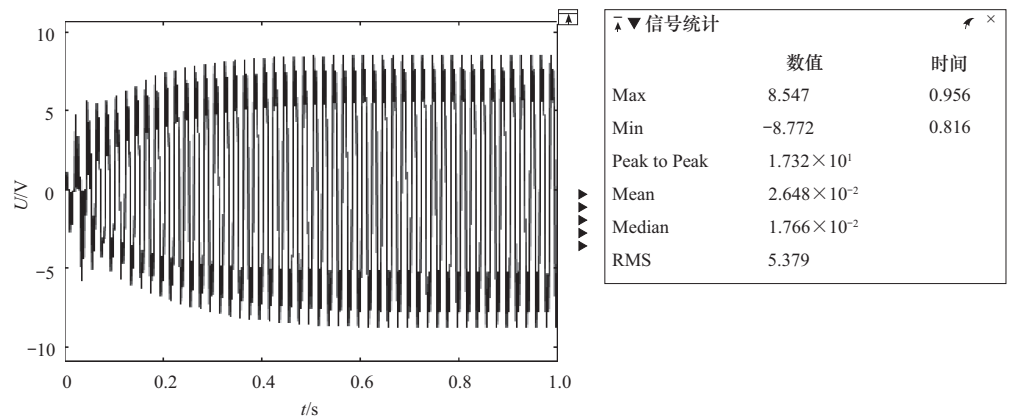


图 9 压电源输出电压曲线

Fig. 9 Output voltage curve of piezoelectric power supply

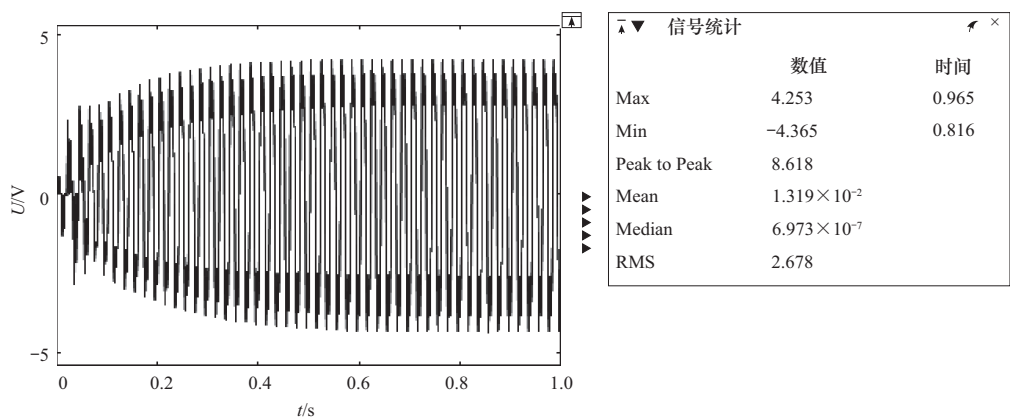


图 10 降压电路输出电压曲线

Fig. 10 Output voltage curve of buck circuit

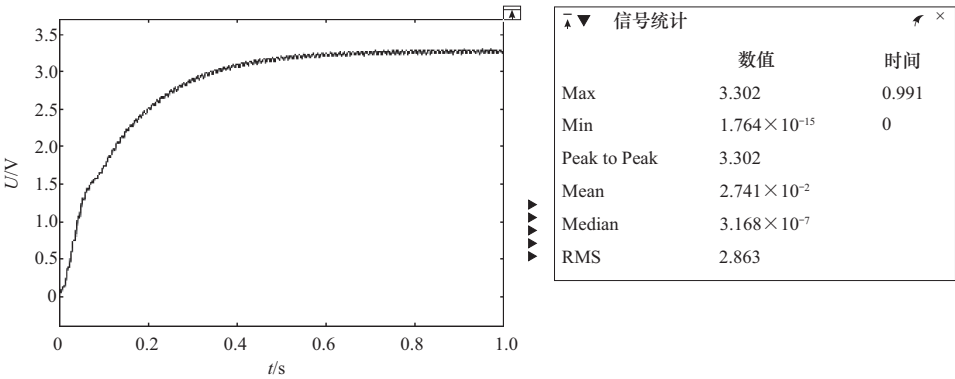


图 11 负载电压曲线  
Fig. 11 Load voltage curve

图 9 为示波器 Scope1 显示压电俘能器振动状态下的输出电压曲线,输出电压随时间的增加而增加,约 0.4 s 后电压输出趋于稳定,曲线呈周期性变化,输出最大值为 8.547 V,最小值为−8.772 V,符合压电片输出电压特性.

图 10 为示波器 Scope2 显示为经降压电路后输出电压曲线,压电俘能器输出电压经过变压器 T2 降压后电压波形从 0 s 开始逐渐增大,约 0.6 s 后电压趋于稳定,电压输出最大值为 4.253,为变压器  $T_2$  输入电压的 1/2,且电压波形仍为周期性变化.

图 11 为示波器 Scope3 显示为经过整流电路后

施加于负载电阻的输出电压曲线. 压电俘能器输出电压经过降压电路,整流电路以及 RC 滤波电路后作用到负载电阻上,电压从 0 V 缓慢上升,约 0.8 s 后达到最大值,并可稳定输出 3.302 V,且为直流,仿真结果与 LTC3588-1 输出特性一致.

图 12 为示波器 Scope4 显示图,其为单悬臂梁式压电能量俘获系统输出电压作用于负载电阻时的电流,示波器显示为电流输出波形. 通过负载的电流从 0 A 缓慢上升,约 0.8 s 后与电压同时达到最大值,并稳定在 0.775 2 mA,可计算得出负载功率为 2.558 mW.

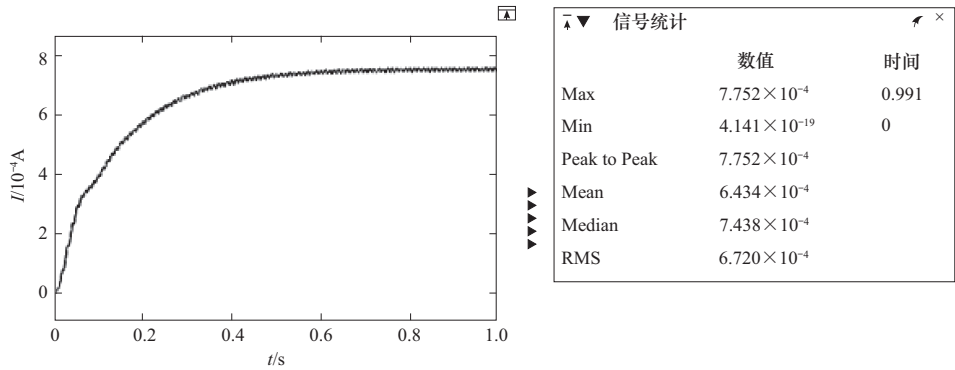


图 12 负载电流曲线  
Fig. 12 Load voltage curve

### 3 LTC3588-1 等效电路验证

利用 LTspice 软件对 LTC3588-1 能量收集电路进行仿真、测试,与 Simulink 系统仿真进行对比,验证 LTC3588-1 简化等效电路的正确性. 如图 13 所示为 LTC3588-1 能量收集电路,图中 PZ1 和 PZ2 为压电片产生电压的输出端,即为 LTC3588-1 芯片输入端,芯片内部全波整流桥电路将输入交

流转换为直流电,再流经运放放大器进行 DC/DC 降压处理,最后输出 3.3 V 稳定直流电压,可直接为低功耗设备供电.

测试  $U_{out}$  输出电压如图 14 所示,输出电压为 3.3 V; $U_{out}$  输出端电压作用在负载电阻  $R_2$  两端. 输出电流如图 15 所示,约为 0.77 mA. 电压、电流仿真结果与 Simulink 系统仿真结果基本一致,表明 LTC3588-1 简化等效电路合理、正确.

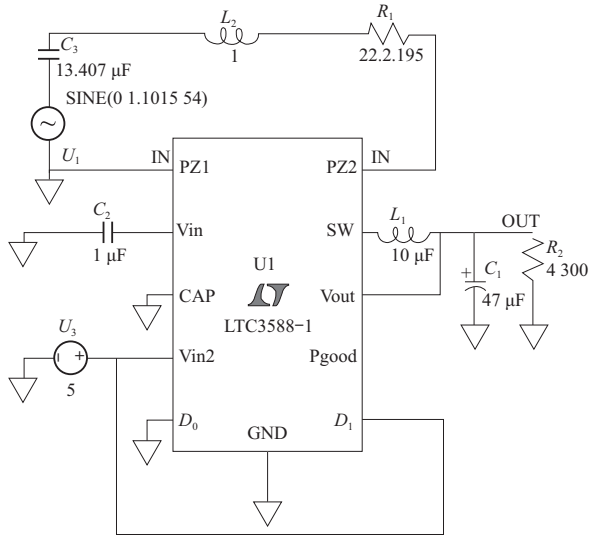


图 13 LTC3588-1 能量收集电路原理图

Fig. 13 Schematic of LTC3588-1 energy harvesting circuit

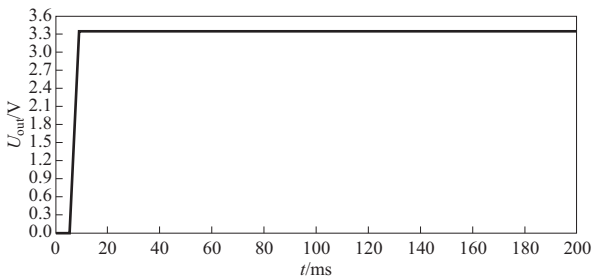


图 14 LTC3588-1 电路仿真输出电压

Fig. 14 Output voltage of LTC3588-1 circuit simulation

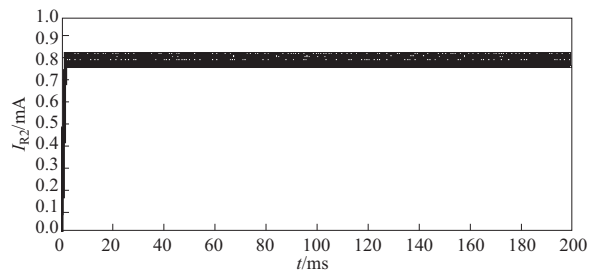


图 15 LTC3588-1 电路仿真输出电流

Fig. 15 Output current of LTC3588-1 circuit simulation

## 4 系统测试验证

为了进一步验证仿真模型的准确性,搭建如图 16 所示测试系统,通过实验观察、记录系统的输出结果. 测试系统由函数信号发生器、万用表、示波器、压电俘能器、激振器、功率放大器、功率放大器、LTC3588 转换电路以及负载电阻组成.

测试系统连接如图 17 所示,图中信号发生器输出简谐信号,信号经过功率放大器处理,从而控制激

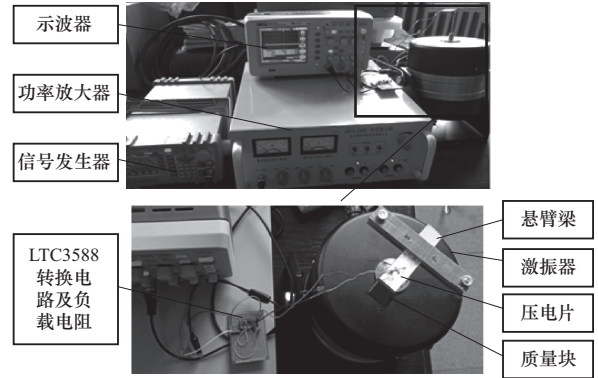


图 16 测试系统

Fig. 16 Test system

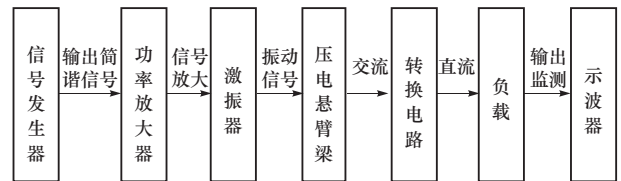


图 17 测试系统连接框图

Fig. 17 Diagram of test system connection

振器的振动幅度与频率,达到压电悬臂梁的固有频率,然后由激振器提供激励驱动压电悬臂梁俘能器工作,俘能器输出电能经过 LTC3588 转换电路处理后输出,输出电压加载到负载电阻两侧,利用示波器进行监测、记录.

测试系统正常工作,当激振频率为 54 Hz 时,示波器稳定显示电压数值为 3.32 V. 如图 18 所示为不同外接阻值时输出功率的仿真与实验结果对比图,系统在激振频率等于固有频率励下,系统仿真与实验结果接近,验证了系统建模的正确性.

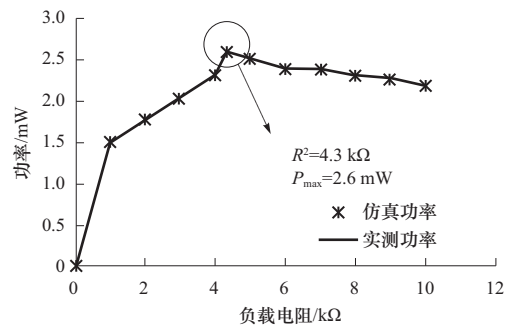


图 18 负载功率实验与仿真对比

Fig. 18 Comparison of experimental data and simulation results

## 5 结论

本文利用机械结构与电路系统的相似关系,提出了一种压电俘能整体系统建模方法. 建立了压电

悬臂梁模型机械系统模型等效为电路模型;根据 LTC3588-1 芯片特性,简化等效电路,利用 LTspice 软件验证等效电路的正确性;在 Simulink 系统下搭建压电能量俘获系统整体模型,并详细阐述了 Simulink 系统下仿真和分析过程. 模型仿真结果与系统测试实验结果基本一致,固有频率为 54 Hz,最佳阻抗匹配条件下,负载电阻为 4.3 k $\Omega$ ,输出功率为 2.6 mW,系统建模合理、正确.

#### 参考文献:

- [1] Liang J R, Liao W H. Piezoelectric energy harvesting and dissipation on structural damping[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(5): 515 - 527.
- [2] 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.
- [3] Liao W H, Liang J. Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(1): 015005 - 1 - 015005 - 11.
- [4] Wu Y P, Badel A, Formosa F, et al. Nonlinear vibration energy harvesting device integrating mechanical stoppers used as synchronous mechanical switches[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(14): 1658 - 1663.
- [5] Booker J D, Truman C E. Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(4): 557 - 572.
- [6] Teuvo J. Torsional fretting fatigue strength of a shrink-fitted shaft with a grooved hub[J]. Tribology International, 2000, 33(8): 537 - 543.
- [7] Alfredsson B, Gutkin R. Growth of fretting fatigue cracks in a shrink-fitted joint subjected to rotating bending[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15(5): 582 - 596.
- [8] 张广义, 高世桥, 刘海鹏, 等. 一种低频压电俘能器准静态分析与能量收集试验[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(6): 656 - 660.  
Zhang Guangyi, Gao Shiqiao, Liu Haipeng, et al. Quasi-static analysis and energy collection experiment on a low-frequency piezoelectric energy harvester[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(6): 656 - 660. (in Chinese)
- [9] 隋丽, 刘国华, 石庚辰, 等. 柔性压电发电机的发电性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(1): 8 - 12.
- Sui Li, Liu Guohua, Shi Gengchen, et al. Power performance analysis of flexible piezoelectric generator [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(1): 8 - 12. (in Chinese)
- [10] 张广义, 金磊, 高世桥, 等. 双端固支梯形梁压电俘能器机电耦合模型与试验分析[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(6): 600 - 605.  
Zhang Guangyi, Jin Lei, Gao Shiqiao, et al. Electromechanical coupling model and experimental analysis of double clamped trapezoidal beam piezoelectric energy harvester[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(6): 600 - 605. (in Chinese)
- [11] Wang Y, Inman D J. Experimental validation of a multifunctional wing spar design with sensing, harvesting and gust alleviation capabilities [J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(4): 1289 - 1299.
- [12] Wu Y N, Li D C, Xiang J W. Performance analysis and parametric design of an airfoil-based Piezoelectric energy harvester [J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2014, 116(9): 1114 - 1128.
- [13] Anton S R, Erturk A, Inman D J. Multifunctional unmanned aerial vehicle wing spar for low-power generation and storage[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(1): 292 - 301.
- [14] 严阳阳, 周凌峰, 丁英涛, 等. 压电合成射流激励器 LEM 方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(3): 326 - 330.  
Yan Yangyang, Zhou Lingfeng, Ding Yingtao, et al. Research of LEM on piezoelectric synthetic jet actuators [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(3): 326 - 330. (in Chinese)
- [15] Wang X, Liang X Y, Hao Z Y, et al. Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters with different interface circuits[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72 - 73: 906 - 924.
- [16] Zhao L Y, Yang Y W. On the modeling methods of small-scale piezoelectric wind energy harvesting [J]. Smart Structures and Systems, 2017, 19(1): 67 - 90.
- [17] Wang H Y, Tang L H, Shan X B, et al. Modeling and performance evaluation of a piezoelectric energy harvester with segmented electrodes[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 14(2): 247 - 266.

(责任编辑: 刘雨)