

压电-电磁复合式俘能器设计及能量收集测试

王彩锋,高世桥,刘海鹏,武丽森

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:设计了一种压电-电磁复合式俘能器,利用机电耦合状态方程推导了输出功率表达式。应用试验测试对比分析了压电式、电磁式、复合式俘能器的输出特性,结果表明,复合式俘能器的3 dB带宽比压电式、电磁式俘能器分别增大了67%、25%,最大功率提高了38%、118%。设计了压电-电磁复合式俘能器能量收集电路,分别利用LTC3588、LTC3108芯片收集压电俘能单元、电磁俘能单元输出的电能,并用超级电容存储。分别应用3种俘能器进行超级电容充电测试,结果表明,复合式俘能器的充电时间比压电式、电磁式俘能器分别减少了29%和52%。

关键词:超级电容;输出功率;充电时间;带宽;振动

中图分类号: TN384; TP212 **文献标识码:** A

Design of Coupled Piezoelectric-Electromagnetic Energy Harvester and Energy Collecting Tests

WANG Caifeng, GAO Shiqiao, LIU Haipeng, WU Lisen

(State Key Lab. of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvester was designed, the expression of output power was derived by the electromechanical coupling state equations. The output characteristics of piezoelectric, electromagnetic and coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvesters were compared through experimental tests. The results show that the 3 dB bandwidth of the coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvester was increased by 67% and 25% compared with piezoelectric and electromagnetic energy harvesters, respectively, resulting in an increase of 38% and 118% in maximum output power respectively. The energy collecting circuit of coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvester was designed. The electric energy converted from piezoelectric energy-harvesting unit and electromagnetic energy-harvesting unit were collected by LTC3588 and LTC3108 chips separately, and then stored in a super-capacitor. The charge tests of super-capacitor were conducted using three energy harvesters separately. It is indicated that the charge time of coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvester was decreased by 29% and 52% compared with piezoelectric and electromagnetic energy harvesters, respectively.

Key words: super-capacitor; output power; charge time; bandwidth; vibration

0 引言

随着传感器和无线传感网络的发展,为解决低功耗微器件的供电问题,振动俘能技术成为研究的热点。按照俘能机理的不同,振动型俘能器可分为压电式、电磁式和静电式3类^[1]。压电式和电磁式俘能器因具备结构简单、机电耦合系数大、无需外接电源等优点而备受关注。Andosca等^[2]设计了一种基于锆钛酸铅(PZT)的平板梁型振动俘能器,采用分布参数模型推导了微俘能器的输出电压、输出功率;Park等^[3]研究出一种低频振动微电磁式俘能器,在0.57g

($g=9.8\text{ m/s}^2$ 为重力加速度)的加速度激励下,测试得到最大输出电压和功率分别为68.2 mV、115.1 μW ;谢涛等^[4]在单悬臂梁压电振子的基础上,设计制作了多悬臂梁压电俘能器,测试得到最大输出功率为毫瓦级;崔岩等^[5]研究了一种非线性压电能量采集器,得到了基于Duffing模型的非线性压电俘能振动方程。针对压电式和电磁式俘能器不能同时输出大电压、大电流的缺点,为得到更大的输出功率,研究人员尝试将压电和电磁两种俘能机理结合在同一结构上,提出了压电-电磁复合式俘能器^[6-8]。

收稿日期:2016-02-05

基金项目:国家“八六三”计划基金资助项目(SS2013AA041104)

作者简介:王彩锋(1987-),男,山东潍坊人,博士生,主要从事俘能器方面的研究。高世桥(1961-),男(满),北京人,教授,博士生导师,主要从事微机电技术、冲击动力学方面的研究。

本文设计了一种压电-电磁复合式俘能器,对其输出特性进行了试验分析,并设计了压电-电磁复合式俘能器能量收集电路,使用复合式俘能器对超级电容进行了充电测试。

1 结构设计及理论模型

设计的压电-电磁复合式俘能器结构如图1所示。磁铁作为质量块在整个结构中心,通过双端固支梁支撑,梁的上表面粘结PZT层,磁铁的上、下对称布置两个线圈。在外激励下,磁铁振动使梁发生形变,通过线圈的磁通量发生改变,根据压电效应和电磁感应定律,PZT层和线圈将同时产生电压信号。如图2所示,将压电-电磁复合式俘能器的工作模型简化为质量-弹簧-阻尼-压电单元-电磁单元的机电耦合系统,并考虑压电、电磁俘能单元的机电耦合特性。

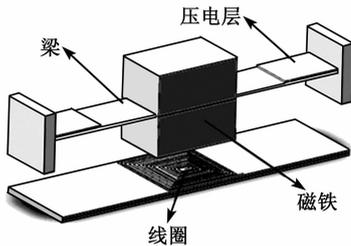


图1 压电-电磁复合式俘能器结构示意图

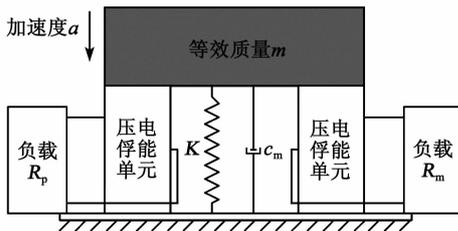


图2 压电-电磁复合式俘能器等效模型

当 $z(t)$ 为磁铁的振幅, U_p 为压电单元的输出电压, I_c 为电磁单元的输出电流时,压电-电磁复合式俘能器的状态方程为

$$m\ddot{z}(t) + c_m\dot{z}(t) + Kz(t) + g_c I_c(t) + \theta U_p(t) = ma(t) \quad (1)$$

$$L_c \dot{I}_c(t) + (R_c + R_m) I_c(t) - g_c \dot{z}(t) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{U_p(t)}{R_p} + C_p \dot{U}_p(t) - \theta \dot{z}(t) = 0 \quad (3)$$

式中: $a(t)$ 为激励加速度; m 为等效质量; K 为等效刚度; c_m 为机械阻尼系数; θ , g_c 分别为压电俘能单元和电磁俘能单元的传递因子; R_p , R_m 分别为压电俘能单元和电磁俘能单元的外接负载; C_p 为压电层的等效电容; R_c 和 L_c 为线圈的电阻和电容。

低频振动中线圈的电感可忽略,对式(2)、(3)利用傅里叶变换得到

$$I_c(\omega) = \frac{g_c}{R_c + R_m} z(\omega) i\omega \quad (4)$$

$$U_p(\omega) = \frac{\theta R_p}{1 + j\omega C_p R_p} z(\omega) i\omega \quad (5)$$

利用系统的传递函数得到质量块的最大振幅 z_m 为

$$z_m = (ma_m) / \left\{ \left[-m\omega^2 + K + \frac{\omega^2 R_p^2 \theta^2 C_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \right]^2 + \omega^2 \left[c_m + \frac{g_c^2}{R_c + R_m} + \frac{\theta^2 R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中 a_m 为加速度的最大幅值。

压电俘能单元的输出电压和电磁俘能单元的输出电流分别为

$$|U_p| = \sqrt{\frac{\omega^2 R_p^2 \theta^2}{1 + (\omega C_p R_p)^2}} z_m \quad (7)$$

$$|I_c| = \frac{\omega g_c}{R_m + R_c} z_m \quad (8)$$

复合式俘能器的总功率为压电俘能单元和电磁俘能单元的输出功率之和:

$$\bar{P} = P_p + P_c = \left[\frac{R_m g_c^2 \omega^2}{2(R_m + R_c)^2} + \frac{R_p \omega^2 \theta^2}{2 + 2(\omega C_p R_p)^2} \right] z_m^2 \quad (9)$$

因此,压电-电磁复合式俘能器的输出功率受外界振动频率及幅值、材料属性、压电俘能单元和电磁俘能单元的特性参数等因素的影响。

2 输出特性试验

振动型俘能器在达到最佳匹配负载时,其谐振频率点处的输出功率最大。本文采用试验测试的方法,分析复合式俘能器的输出功率特性。建立如图3所示的试验测试系统,它由动态信号分析仪(Crystal CoCo-80)、示波器、信号发生器(RIGOL DG2041A)、功率放大器(扬州泰司 TS5730)、激振台、加速度传感器(PCB 393B04)、万用表、电阻箱和微型压电-电磁复合式俘能样机等组成。试验中首先由信号发生器生成简谐信号,信号经功率放大器输入到激振台,然后由激振台提供激励驱动俘能器工作。激振台的激励由加速度传感器记录,俘能器的输出电压由动态信号分析仪和示波器记录,负

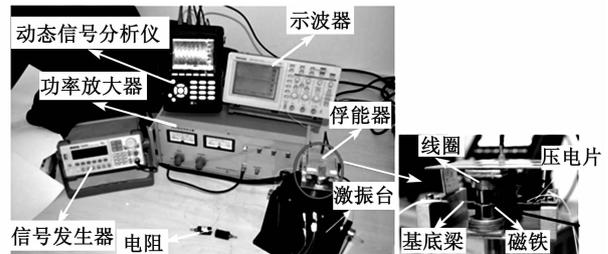


图3 试验测试系统图

载大小通过电阻箱调节。

为了准确比较3种俘能器的输出性能,压电式俘能器与压电-电磁复合式俘能器的基底梁、质量块和PZT层的特性参数都相同,测试压电式俘能器时移除感应线圈;电磁式俘能器与压电-电磁复合式俘能器的基底梁、质量块、线圈的特性参数都相同,测试电磁式俘能器时去除基底梁上的PZT层。在0.6g的简谐激励下,3种俘能器在各自最佳负载处的输出功率如图4所示。

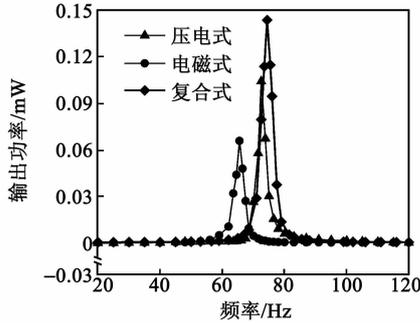


图4 3种俘能器的输出功率

由图4可得出:

1) 压电式、电磁式、复合式俘能器的谐振频率分别为72.5 Hz、65.5 Hz、74.4 Hz,压电式、电磁式

俘能器的最佳负载分别为279 kΩ、63.2 Ω,复合式俘能器压电俘能单元的最佳负载为320 kΩ,电磁俘能单元的最佳负载为70 Ω,复合式俘能器的谐振频率高于压电式、电磁式俘能器。

2) 压电式、电磁式、复合式俘能器的3 dB带宽分别为1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz,故复合式俘能器的3 dB带宽分别提高了67%、25%。

3) 在各自的谐振频率点处,压电式、电磁式、复合式俘能器的最大输出功率分别为0.104 mW、0.066 mW、0.144 mW,故复合式俘能器的总输出功率比压电式俘能器提高了38%,比电磁式俘能器提高了118%。

3 能量收集电路

3.1 能量收集电路设计

俘能器输出的能量不能被微器件直接使用,这是因为微器件需要直流供电,而俘能器输出的是交流电,且能量较小。因此,本文设计了压电-电磁复合式俘能器能量收集电路,将俘能器输出的交流电转化为直流电,并用储能器件存储能量。压电-电磁复合式俘能器能量收集电路包括压电俘能单元能量收集电路、电磁俘能单元能量收集电路和超级电容3部分,如图5所示。

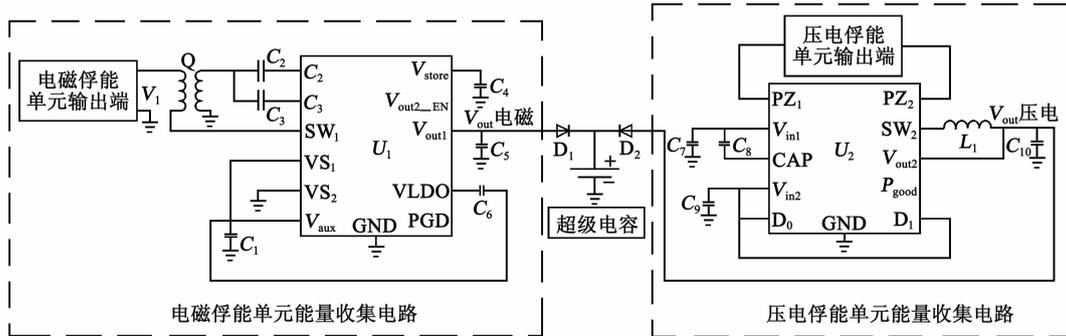


图5 压电-电磁复合式俘能器能量收集电路

针对压电俘能单元输出电压大、电流小的特点,设计了压电俘能单元能量收集电路,采用LTC3588芯片来收集压电俘能单元产生的能量,并提高能量转换效率。该器件可以直接连接压电俘能单元输出端,用一个外部电容整流电压和存储能量,通过内部并联稳压器消耗过多的电力,并由一个毫微功率的同步降压稳压器维持稳定的输出电压,运用SPICE软件仿真得到其最佳电路参数如表1所示。

表1 压电俘能单元能量收集电路最佳参数

$C_7/\mu\text{F}$	$C_8/\mu\text{F}$	$C_9/\mu\text{F}$	$C_{10}/\mu\text{F}$	$L_1/\mu\text{H}$
10.0	1.0	4.7	47.0	10.0

针对电磁俘能单元输出电流大、电压小的特点,

设计了电磁俘能单元能量收集电路,采用LTC3108芯片来提高其能量转换效率。LTC3108是一款高度集成的AC/DC转换器,其升压型拓扑结构可在输入电压低至20 mV的环境下工作。交流电压经过外接变压器和一个耦合电容形成的振荡器进行放大,再接入芯片内部,最后在输出端得到不同的直流电压,运用SPICE软件仿真得到其最佳的电路参数如表2所示。

表2 电磁俘能单元能量收集电路最佳参数

$C_1/\mu\text{F}$	C_2/nF	C_3/pF	$C_4/\mu\text{F}$	$C_5/\mu\text{F}$	$C_6/\mu\text{F}$
1.0	1.0	330.0	1 000.0	470.0	2.2

俘能器通常只能产生微安级别的电流,电流泄

露对能量的存储很关键,而超级电容泄露电流可以小于 $1 \mu\text{A}$,因此,超级电容适用于能量存储。此处采用 SE-5R5-D224VY/V/H 型 5 V 、 0.22 F 的超级电容,分别通过二极管接入压电俘能单元能量收集电路输出端和电磁俘能单元能量收集电路输出端,确保对其持续充电。

3.2 充电测试

应用设计的压电-电磁复合式俘能器能量收集电路,分别使用压电式、电磁式、复合式俘能器进行充电测试。方法如下:压电式俘能器接入压电俘能单元能量收集电路的 PZ_1 和 PZ_2 端,采用 $D_0 = 0$, $D_1 = 1$, $V_{\text{out}} = 3.3 \text{ V}$ 通道;电磁式俘能器接入电磁俘能单元能量收集电路的 V_1 端,采用 VS_1 接 V_{aux} , VS_2 接 GND , $V_{\text{out}} = 3.3 \text{ V}$ 通道;复合式俘能器的压电俘能单元、电磁俘能单元分别按照与上述相同的通道设置接入能量收集电路。在 $0.6g$ 的加速度激励下,3种俘能器分别在各自最佳负载和谐振频率下工作,对超级电容进行充电,测试如图6所示。

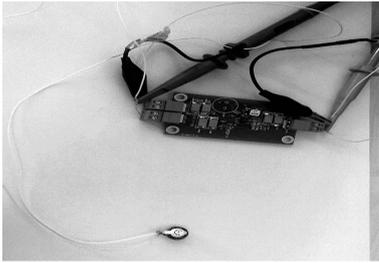


图6 超级电容充电

每隔 10 min 记录一次超级电容的电压值,充电曲线如图7所示。图中,为使超级电容两端电压达到 3.3 V ,压电式、电磁式、复合式俘能器的充电时间分别为 170 min 、 250 min 、 120 min ,可见复合式俘能器的充电时间比压电式俘能器节约了 29% ,比电磁式俘能器节约了 52% 。因此,采用设计的压电-电磁复合式俘能器能量收集电路对超级电容充电是可行的,且复合式俘能器的俘能效率明显优于单一俘能机理的压电式和电磁式俘能器。

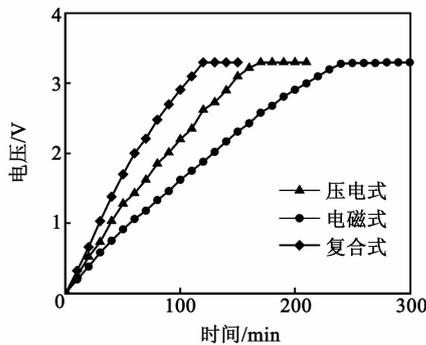


图7 3种俘能器的超级电容充电曲线

4 结束语

本文设计了双端固支梁压电-电磁复合式俘能器,通过其机电耦合状态方程推导了输出功率表达式。经过试验分析,压电-电磁复合式俘能器的工作频带、输出功率较之于压电式、电磁式俘能器均有了大幅提高。设计了压电-电磁复合式俘能器能量收集电路,将俘能器输出的交流电转化为直流电,实现了超级电容的充电,且复合式俘能器的充电时间明显短于压电式和电磁式俘能器。

参考文献:

- [1] HARNE R L, WANG K W. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(2): 1-12.
- [2] ANDOSCA R, MCDONALD T G, GENOVA V, et al. Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 178: 76-87.
- [3] PARK J C, PARK J Y. A bulk micromachined electromagnetic micro-power generator for an ambient vibration-energy-harvesting system[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2011, 58(5): 1468-1473.
- [4] 谢涛,袁江波,单小彪,等.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(2): 98-101.
- [5] XIE Tao, YUAN Jiangbo, SHAN Xiaobiao, et al. Frequency analysis and electricity generated by multiple piezoelectric cantilevers in energy harvesting[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010(2): 98-101.
- [6] 崔岩,王飞,董维杰,等.非线性压电式能量采集器[J].光学精密工程,2012,20(12):2737-2743.
- [7] CUI Yan, WANG Fei, DONG Weijie, et al. Nonlinear piezoelectric energy harvester[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12):2737-2743.
- [8] CHALLA V R, PRASAD M G, FISHER F T. A coupled piezoelectric-electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 95029-11.
- [9] TADESSE Y, ZHANG S, PRIYA S. Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electromagnetic[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(5): 625-632.
- [10] 关世伟.梁式结构压电-电磁复合俘能技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.