

面向负载功率的压电悬臂梁研究

李霞,董亚东,田海港,张伟伟

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:基于电路负载阻抗匹配原理,为最大程度利用压电悬臂梁发电装置收集环境振动能量,保证压电悬臂梁外接负载能够正常工作,需要研究压电悬臂梁结构参数对其最佳输出功率以及相对应外接负载匹配阻值的影响。该文通过压电电路分析,研究了基板和压电陶瓷片的长度、厚度、宽度和质量块质量对压电悬臂梁最佳输出功率以及相对应负载匹配阻值的影响。结果表明,一定范围内,增加基板长度、压电陶瓷片厚度、质量块质量可以增加压电悬臂梁外接负载匹配阻值,增加基板厚度、压电陶瓷片长和宽可降低压电悬臂梁外接负载匹配阻值;随着基板长度、压电陶瓷片宽和长、质量块质量的增加,压电悬臂梁最佳输出功率得到显著提高,基板宽度对压电悬臂梁最佳输出功率基本无影响,增加压电陶瓷片的厚度,压电悬臂梁最佳输出功率先增加后降低,存在一个最佳输出功率。

关键词:压电能量收集器;阻抗匹配;输出功率;压电电路分析

中图分类号:TN384;TH16

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.012

Research on Piezoelectric Cantilever Beam for Load Power

LI Xia, DONG Yadong, TIAN Haigang, ZHANG Weiwei

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to maximize the use of piezoelectric cantilever beam generator for collecting environmental vibration energy and ensure that the piezoelectric cantilever beam external load can work properly based on the principle of circuit load impedance matching, it is necessary to study the effect of the structure parameters of the piezoelectric cantilever beam on its optimal output power and the corresponding external load matching resistance. In this paper, the influences of the length, thickness, width and mass quality of the substrate and the piezoelectric ceramic piece on the optimal output power of the piezoelectric cantilever beam and the corresponding load matching resistance are studied by means of piezoelectric circuit analysis. The results show that the external load matching resistance of the piezoelectric cantilever beam can be increased significantly with the increase of the length of the substrate, the thickness of the piezoelectric ceramic piece and the quality of the mass within a certain range, and the external load matching resistance of piezoelectric cantilever beam can be reduced significantly with the increase of the thickness of the substrate, the length of the piezoelectric ceramic piece and the width of the piezoelectric ceramic piece. With the increase of the length of the substrate, the width and length of the piezoelectric ceramic piece, and the quality of the mass, the output power of the piezoelectric cantilever beam is improved significantly, the width of the substrate has no effect on the output power of the piezoelectric cantilever beam, with the thickness of the piezoelectric ceramic piece increasing, the optimum power of the piezoelectric cantilever beam increased first and then decreased, and there is a maximum optimal output power.

Key words: piezoelectric energy collector; impedance matching; output power; piezoelectric circuit analysis

0 引言

压电发电装置可利用压电材料的压电效应将环境中的振动能量转化为电能,从而为低功耗的微电子器件供电^[1-3]。其中,压电悬臂梁发电装置因其结构简单、能量密度高、易实现等特点得到了国内外学

者的关注^[4-6]。

目前,相关研究主要围绕压电悬臂梁的谐振频率和开路电压开展^[7-8],但实际应用压电悬臂梁发电装置为低功耗传感器或其他电子设备供电时,需考虑压电悬臂梁提供给负载的输出电压和输出功率。

收稿日期:2017-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107121);河南省高等学校重点科研项目应用研究基金资助项目(15A460032,16A460010)

作者简介:李霞(1973-),女,山东鄄城人,副教授,博士,主要从事超声驱动技术及应用的研究。

压电悬臂梁可等效为一个有内阻的交流电压源^[7-8],具有高输出电压低输出功率的特点,收集电能的一部分被其内阻消耗掉,只有当其内阻和外接负载阻值相等时(阻抗匹配),负载才能获得最佳输出功率,以保证负载正常工作,因此有必要研究压电悬臂梁负载匹配阻值与自身结构参数的相互关系。

本文利用 ANSYS 参数化设计语言(APDL)对压电悬臂梁发电装置进行压电电路分析,研究压电悬臂梁结构参数对其最佳输出功率的影响,其研究结果利用压电悬臂梁为低功耗电子设备供电,为实现低功耗电子设备自供能提供理论指导。

1 压电悬臂梁结构及工作原理

压电悬臂梁结构如图 1 所示,压电陶瓷片粘贴在金属基板上,构成压电发电振子;质量块安装在金属基板的末端,起到增加压电发电振子振动位移、降低压电悬臂梁发电装置固有频率的作用;金属基板前端固定在搭载物上。

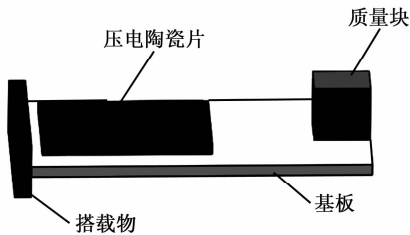


图 1 压电悬臂梁结构

当搭载物产生振动时,质量块在惯性力作用下带动压电悬臂梁产生振动,使压电陶瓷片产生应变,压电陶瓷片正压电效应使压电陶瓷片上、下表面产生相反的电荷,并形成电势差,从而实现将搭载物的振动能转化为电能。

2 压电悬臂梁电路分析

利用 ANSYS 电路分析模块 CIRCU94 单元进行压电电路有限元分析,得到外接负载获得的输出电压和输出功率。CIRCU94 单元直接与压电悬臂梁有限元模型连接在一起^[9],如图 2 所示,将其节点

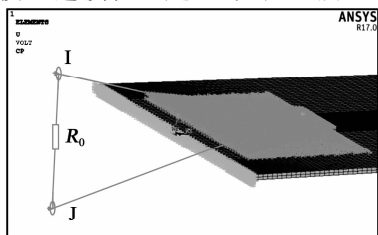


图 2 压电能量收集器压电电路分析有限元模型

I 和 J 分别连接到压电陶瓷片的上、下电极, R_0 为外接负载电阻。

实际应用时,压电悬臂梁一阶固有频率应与周围环境的振动频率相匹配^[10],使压电悬臂梁产生共振,从而收集更多的电能,本文采用谐响应压电电路分析法研究压电悬臂梁工作在谐振频率下的最佳输出功率及相对应的负载匹配阻值。

3 压电悬臂梁参数化研究

压电振子在压电悬臂梁中承担着收集环境振动能并将其转换为电能的核心作用,其结构尺寸对其发电性能影响很大,本节将研究基板结构参数和压电陶瓷片结构参数对压电悬臂梁输出功率及负载匹配阻值的影响。

3.1 基板结构参数研究

矩形压电陶瓷片长为 40 mm,宽为 20 mm,厚为 0.4 mm,质量块质量 4.5 g,分别改变基板长度、厚度和宽度,变化范围如表 1 所示,通过谐响应压电电路分析,研究基板的长度、厚度和宽度对压悬臂梁输出功率和负载匹配阻值的影响。分析结果如图 3~5 所示。

表 1 基板结构参数取值范围

参 数	基板长度/mm	基板厚度/mm	基板宽度/mm
变化范围	50~100	0.3~1.0	14~30

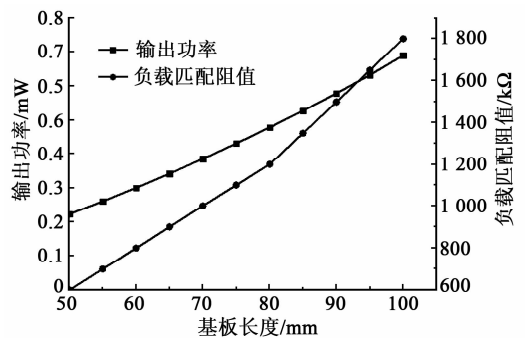


图 3 基板长度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

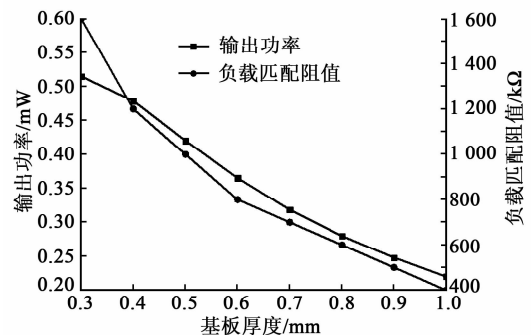


图 4 基板厚度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

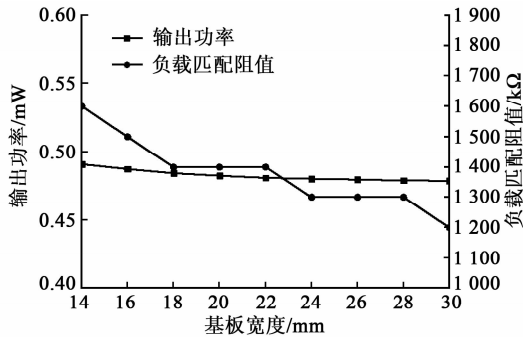


图5 基板宽度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

由图3可知,随着压电悬臂梁基板长度的增加,其最佳输出功率呈大幅度线性增加,相对应的负载匹配阻值也大幅度增加。由图4可知,随着压电悬臂梁基板厚度的增加,其最佳输出功率线性降低,相对应的负载匹配阻值非线性减小,且减小的幅度越来越缓慢。由图5可知,随着压电悬臂梁基板宽度的增加,其最佳输出功率逐渐降低,但总的降低幅度很小,相对应的负载匹配阻值逐渐降低,且存在某个宽度范围负载匹配阻值基本无变化。

综合考虑到基板各结构参数对压电悬臂梁最佳输出功率及相对应的负载匹配阻值的影响,在其他参数不变的情况下,基板长度过长将增大基板的最大应力,降低基板本身的强度,因此,本文基板结构参数确定为长80 mm、厚0.4 mm、宽30 mm。

3.2 压电陶瓷片结构参数研究

设置基板的长为80 mm,宽为30 mm,厚为0.4 mm,质量块质量为4.5 g,分别改变压电陶瓷片的长度、厚度和宽度,取值范围如表2所示,通过谐响应压电电路分析,研究压电陶瓷片长度、厚度和宽度对压电悬臂梁最佳输出功率及相对应负载匹配阻值的影响。分析结果如图6~8所示。

表2 压电陶瓷片结构参数取值范围

参数	压电陶瓷片长度/mm	压电陶瓷片厚度/mm	压电陶瓷片宽度/mm
变化范围	6~20	0.1~1.1	5~24

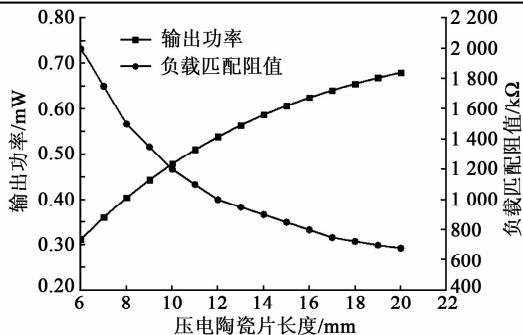


图6 压电陶瓷片长度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

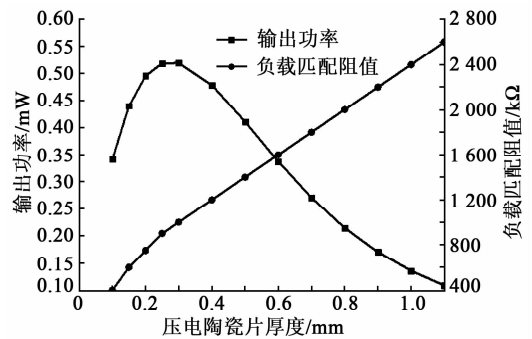


图7 压电陶瓷片厚度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

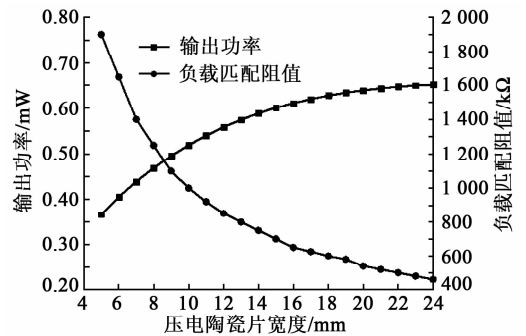


图8 压电陶瓷片宽度对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

由图6可知,随着压电陶瓷片长度的增加,压电悬臂梁最佳输出功率大幅度非线性增加,但增加的趋势逐渐平缓;其相对应的负载匹配阻值呈现非线性降低,降低的趋势逐渐平缓。由图7可知,随着压电陶瓷片厚度的增加,压电悬臂梁最佳输出功率先是非线性增加然后非线性降低,在厚为0.2~0.4 mm的范围内,最佳输出功率变化不大,中间存在一个最佳输出功率。相对应的负载匹配阻值呈现大幅度线性增加。由图8可知,随着压电陶瓷片宽度的增加,压电悬臂梁最佳输出功率非线性增加,相对应的负载匹配阻值非线性降低。

综合考虑到压电陶瓷片各结构参数对压电悬臂梁最佳输出功率及相对应的负载匹配阻值的影响,考虑到基板的尺寸,本文压电陶瓷片结构参数确定为长10 mm、厚0.3 mm、宽24 mm。

3.3 质量块质量研究

根据上文分析确定基板的长为80 mm,宽为30 mm,厚为0.4 mm,压电陶瓷片的长为10 mm,宽为24 mm厚为0.3 mm,改变压电悬臂梁质量块的质量,研究质量块质量对压电悬臂梁最佳输出功率及相对应负载匹配阻值的影响,分析结果如图9所示。

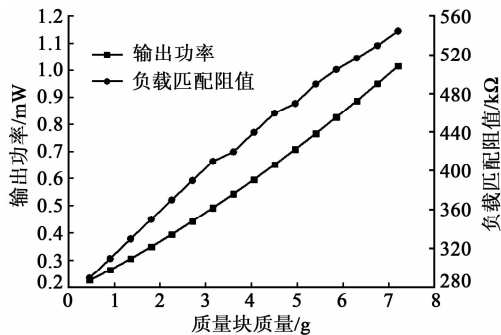


图 9 质量块质量对压电悬臂梁最佳输出功率的影响

由图 9 可知,随着质量块质量的增加,压电悬臂梁最佳输出功率大幅度线性增加,且增加的趋势越来越大,相对应的负载匹配阻值大致呈线性增加,考虑到质量块质量增加将使基板和压电陶瓷片所受到的应力、应变发生改变,因此,质量块质量不宜太大。

4 结论

本文以压电悬臂梁为研究对象,利用 APDL 参数化语言建立压电悬臂梁压电电路模型,分析其在谐振频率简谐激励下的输出功率,研究了基板结构参数、压电陶瓷片结构参数、质量块对压电悬臂梁最佳输出功率以及相对应负载匹配阻值的影响,得到如下结论:

1) 一定范围内,增加基板长度、压电陶瓷片厚度、质量块质量可以显著增加压电悬臂梁外接负载匹配阻值;增加基板厚度、压电陶瓷片长和宽可以显著降低压电悬臂梁外接负载匹配阻值;增加基板的宽度可以在一定程度上降低压电悬臂梁外接负载匹配阻值。

2) 一定范围内,增加基板长度、压电陶瓷片宽度和长度、质量块质量可以显著增加压电悬臂梁最佳输出功率;增加基板厚度可以显著降低压电悬臂梁最佳输出功率;增加基板宽度对压电悬臂梁最佳输出功率基本无影响;增加压电陶瓷片的厚度,压电悬臂梁最佳输出功率先增加后降低,且当压电陶瓷片厚度与基板厚度比在 0.5~1.0 之间,以及压电陶瓷片厚为 0.2~0.4 mm 时,压电悬臂梁最佳输出功率变化不大,且中间存在一个最佳输出功率。

3) 由于本文采用电路负载阻抗匹配的原理,所以各个参数下压电悬臂梁最佳输出功率相对应的负载匹配阻值也即是压电悬臂梁的等效内阻。因此,压电悬臂梁基板、压电陶瓷片、质量块对外接负载匹配阻值的影响规律和这些参数对压电悬臂梁内阻的影响规律是一致的,另外通过本文的研究可以发现,压电悬臂梁输出电流呈现高输出电压低输出功率的特点是因为其内阻较大,变化范围可以从 400~

2 600 kΩ。

综上所述,在利用压电悬臂梁为低功耗传感器或其他电子设备供电时,要从这些负载所能获得的输出功率和负载阻值的角度出发,选取合适的压电悬臂梁结构参数,从而保证负载能够正常的工作。

参考文献:

- [1] 王军龙,鲍丙豪,闻凤连,等.双晶压电悬臂梁发电装置的建模与有限元分析[J].机械设计与制造,2010(9):3-5.
WANG Junlong, BAO Binghao, WEN Fenglian, et al. Modeling and analysis of bimorph cantilever generators [J]. Machinery Design and Manufacture, 2010(9):3-5.
- [2] 孙舒,曹树谦,姜南,等.一种冲击式压电发电机的实验研究[J].振动与冲击,2012,31(17):95-98.
SUN Shu, CAO Shuqian, JIANG Nan, et al. Experimental study on an impact piezoelectric generator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(17):95-98.
- [3] LIU W Q, FENG Z H, HE J, et al. Maximum mechanical energy harvesting strategy for a piezoelement [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6):2130-2136.
- [4] WANG Hongjin, MENG Qingfeng. Analytical modeling and experimental verification of vibration-based piezoelectric bimorph beam with a tip-mass for power harvesting [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(1):193-209.
- [5] 单小彪,袁江波,谢涛,等.不对称悬臂梁压电发电装置的实验研究[J].压电与声光,2010,32(4):608-610.
SHAN Xiaobiao, YUAN Jiangbo, XIE Tao, et al. Experimental study on piezoelectric generator with asymmetric cantilever [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4):608-610.
- [6] 孙舒,曹树谦.白噪声激励下双稳态压电发电系统的响应分析[J].压电与声光,2015,37(6):969-972.
SUN Shu, CAO Shuqian. The response analysis of bistable piezoelectric power generation system under white noise excitation [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(6):969-972.
- [7] SODANO H A, INMAN D J, PARK G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials [J]. Shock and Vibration Digest, 2004, 36(3):197-206.
- [8] 刘辉,韩树人,何鹏举,等.压电悬臂梁采收振动发电能力分析与仿真[J].矿山机械,2011,39(3):98-102.
LIU Hui, HAN Shuren, HE Pengju, et al. Analysis and simulation of power generation capacity of piezoelectric cantilever harvesting vibration energy [J]. Mining & Processing equipment, 2011, 39(3):98-102.
- [9] 阎照文. ANSYS 工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:407-439.
- [10] 缪建,朱若谷.基于 ANSYS 的压电微悬臂梁双梁的有限元分析[J].压电与声光,2011,33(4):557-560.
MIAO Jian, ZHU Ruogu. The finite element analysis of twin piezoelectric micro cantilever based on ANSYS [J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2011, 33(4):557-560.