

Experimental Study on Sectional Power Generation of a Piezoelectric Cantilever Beam with Silver Electrode

Xiaochao Tian¹, Zhigang Yang², Yue Wu², Anjun Xu¹, Yunguang Cai¹, Yan Zhang¹

¹Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Changchun University, Changchun Jilin

²Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Email: tianxczb@163.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 27th, 2018

Abstract

In order to improve the power generation capacity of a piezoelectric cantilever beam, a method of segmented power generation by the silver electrode of a piezoelectric cantilever beam is proposed in this paper. First, the sectional mode of the piezoelectric vibrator is determined, and the sectional mode is theoretically analyzed, and the expression of the output voltage of each section is obtained. Then the power generation capacity of three different sections of the piezoelectric cantilever beam is tested. The optimum distribution ratio is 1:2:3, and the maximum power generation capacity is 15 V. It provides a theoretical basis and technical reference for the optimal design of a piezoelectric cantilever beam.

Keywords

Piezoelectric Power Generation, Electricity Collection, Silver Electrode, Segmentation Method

压电悬臂梁银电极分段发电实验研究

田晓超¹, 杨志刚², 吴越², 徐安俊¹, 蔡云光¹, 张雁¹

¹长春大学机械与车辆工程学院, 长春 吉林

²吉林大学机械科学与工程学院, 长春 吉林

Email: tianxczb@163.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月27日

摘要

为了提高压电悬臂梁发电能力, 本文提出了一种将压电悬臂梁银电极分段发电的方法, 首先确定了压电

振子分段的方式,并对分段方式进行了理论分析,得出每段电极输出电压的表达式。然后进行了压电悬臂梁不同分段发电能力测试,进行了三种不同分段方式的测试,得出最佳分配比例为1:2:3,最大发电量达到15 V,为压电悬臂梁发电优化设计提供了理论依据和技术参考。

关键词

压电发电,电量收集,银电极,分段方法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来压电发电技术越来越受到广大科研工作者的关注,其主要是利用压电陶瓷材料的正压电效应将机械能转换为电能,并通过特定的装置收集起来,实现发电的目的[1][2]。发电形式多种多样的,例如利用流体运动进行发电[3]、噪声振动以及环境中的能源构成发电系统[4][5],这种发电技术具有环保性能好、自适应性强,结构简单等特点,在未来发电领域具有广泛应用前景[6][7][8][9]。

压电器件一般在共振状态下性能最好,但由于压电材料本身的限制,外在的激振频率与压电陶瓷材料本身的固有频率不一定相同或者接近,因此,机械能转化电能的效率很低,达不到理想的效果,这就需要采取相应的措施提高压电发电的转化效率。

目前为了提高压电发电转化效率,相关学者设计了多种结构和模型。文献[10]中提出了在系统中增加一个弹簧的模型,改变了压电悬臂梁的弹性系数,从而改变了系统的固有频率实现宽频发电。文献[11]提出一种组合式悬臂梁的方法,提高系统的频宽来改变系统的固有频率。文献[12]是在单个压电悬臂梁加入两个质量块,改变系统固有频率来增加系统的频宽。但是以上几种方法都需要较大的横向空间和纵向空间,在有限空间或者特殊环境中提高发电量会受到一定的限制。

本文提出了一种将压电悬臂梁银电极分段发电的方法,用电极分段的方式来改变压电悬臂梁振子的应变节点,形成多个发电电峰来增加频宽,拓宽系统在振动周期中的共振频率,提高机械能向电能转化的效率。把不同位置的压电晶片作为一个个体独立出来,然后通过一定的电路连接方式连接在一起,从而实现宽频发电。该装置可应用在狭窄空间或特殊环境中自适应供电,同时避免了正负电荷中和的现象。

2. 压电悬臂梁分段方法

压电悬臂梁银电极分段方法通常有两种:第一种分段方式是均分法,将银电极平均分为几段,将其表面电荷正负性质相同的银电极串联后经过整流电路接入收集电路,如图1所示。这种方法的缺点是不容易把握银电极表面产生的电荷正负性质,从而给收集电量带来困难。第二种分段方法是不均匀分段,即按照一定的比例来将电极分为几段,如图2所示。这种分段方法的优点是能充分利用有限长度的压电悬臂梁收集足够的电量,提高了发电能力。

3. 理论分析

压电振子的弯曲应变 $S_1(x,t)$ 由该点到中性轴的距离 h_c 和曲率半径 $\rho(x,t)$ 共同决定,表达式如下:

$$S_1(x,t) = -\frac{h_c}{\rho(x,t)} \quad (1)$$

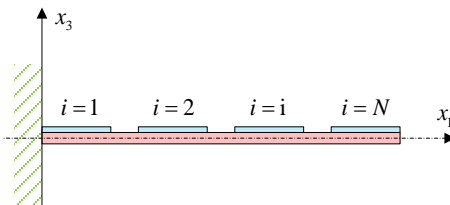


Figure 1. Partition method of partition method
图 1. 均分法电极分段方式

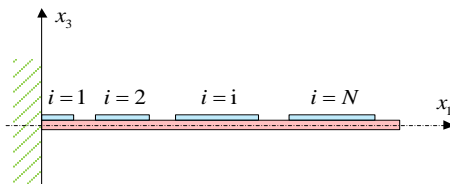


Figure 2. Proportion method of electrode section
图 2. 比例法电极分段方式

式中, $\frac{1}{\rho(x,t)} = \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2}$

根据胡克定律, 可得电位移

$$D_3(x,t) = -d_{31} Y_p h_c \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中, Y_p 是杨氏模量, d_{31} 是压电常数, w_{rel} 是中心点最大振幅。

电位移对面积的积分可得到银电极表面的电荷量为:

$$q(t) = \int_A D \cdot n dA = - \int_{x=x_i}^{x=x_j} d_{31} Y_p h_c b \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2} dx \quad (3)$$

式中, n 为单位法向量, b 是银电极的宽度, A 是电极面积。

用银电极表面的电荷量与电容 C_p 的比值可得到银电极的开路电压为:

$$v(t) = - \frac{d_{31} Y_p h_c b}{C_p} \int_{x=x_i}^{x=x_j} \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2} dx \quad (4)$$

式中, $C_p = \int_{a_1}^{a_2} \frac{\delta_1}{t_{p1}} A_{p1} dx$ 。

由以上表达式可知, 银电极产生的电压与其长度所在位置的弯曲曲率有关, 因此提高输出电压就要将银电极固定在沿悬臂梁长度方向弯曲振动剧烈曲率较大的位置。银电极表面产生的电荷量与积分面积成正比, 输出电压由相应面积的银电极应变曲线决定, 单一连续银电极的压电悬臂梁应变曲线随长度变化而变化。因此将银电极分为多段可以有效提高压电悬臂的发电能力。

4. 实验测试

4.1. 测试装置

本文采用三种不同的分段方法将压电悬臂梁分成三段, 分别将电极分为 1:2:3, 1:1:1, 3:2:1 三种比例。

测试这三种不同分段方法的发电能力, 然后进行对比。本次实验用到的压电悬臂梁由铍青铜和压电陶瓷粘接而成, 铍青铜尺寸为 $74 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 压电陶瓷尺寸为 $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。悬

臂梁的左端边缘留出 6 mm 距离,用于夹持在激振器上,悬臂梁的右端留出 8 mm 距离,用于固定质量块,其结构尺寸示意图如图 3 所示。实验所用的仪器如表 1 所示。

4.2. 测试分析

分段比例有多种,本文实验测试三种分段方式的输出电压、输出电流、输出功率和充电时间。为了减少实验误差,在相同的外界激励下测量每种分段方式的发电能力。

三种测试装置中自由端的质量块质量为 5 克,激振频率为系统共振频率 40 Hz。第一种分段方式将压电陶瓷表面的银电极均匀分为三段,每段银电极的长度均为 20 mm,如图 4 所示。第二种分段方式是将银电极按照 1:2:3 的比例分为三段,从固定端到自由端分为 10 mm、20 mm、30 mm 的三部分,如图 5 所示。第三种分段方式是将银电极从固定端到自由端按 3:2:1 的比例进行划分,银电极的长度分别为 30 mm、20 mm、10 mm,如图 6 所示。测试结果如表 2 所示。

这三种不同分段方式装置发电充电过程中用秒表计时,用电压表测量充电电压的变化,用示波器观察输出电压的波形和峰值。第一种方式为电容 C 两端的电压从 0 到 10 V 所用的时间为 25 min,电阻 R 两端电压为 10 mV,流过电阻的电流为 0.01 mA,输出电流为 0.01 mA,输出电压为 10 V,输出功率为 $P = 0.01 \text{ mA} \times 10 \text{ V} = 0.1 \text{ mW}$ 。

第二种分段方式装置发电作为储能器的电容两端电压从 0 增加到 10 V 所用的时间为 10 min,输出电压为 10 V,输出功率为 $P = 10 \text{ V} \times 0.03 \text{ mA} = 0.3 \text{ mW}$ 。这种分段方法比均匀分段银电极的输出功率增加了两倍,提高了发电能力。

第三种分段方式装置发电电容 C 两端电压从 0 增加到 10 V 所用的时间为 18 min,流过电阻的电流为 0.024 mA,输出电流为 0.024 mA,输出电压为 11 V,输出功率为 $P = 11 \text{ V} \times 0.024 \text{ mA} = 0.26 \text{ mW}$ 。这种

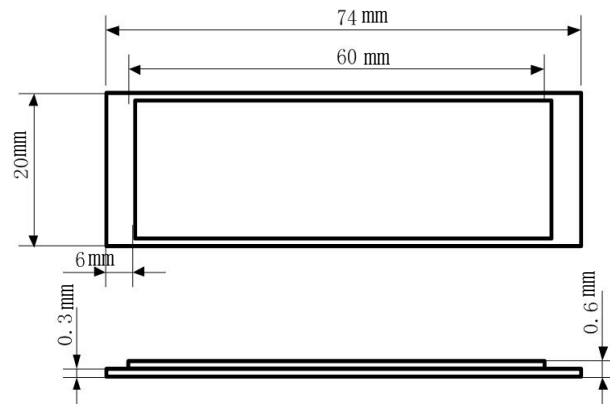


Figure 3. Schematic diagram of the structure of a piezoelectric cantilever beam

图 3. 压电悬臂梁结构尺寸示意图

Table 1. Experimental instruments and uses

表 1. 实验仪器及用途

实验装置	用途
HEV-50 激振器	给压电振子提供外界激励
HEAS-5 功率放大器	调节激振器的振幅和频率
RIGOL DS5042 示波器	显示压电振子的输出电压
计算机	采集、处理数据

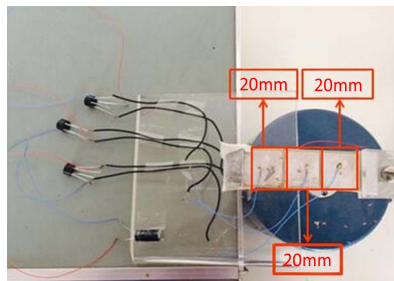


Figure 4. Uniform silver electrode power generation device

图 4. 均分银电极发电装置

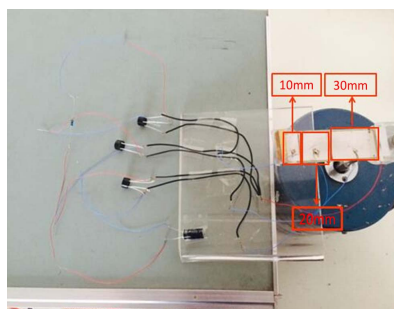


Figure 5. Power generation device with a 1:2:3 silver electrode

图 5. 比例为 1:2:3 银电极的发电装置

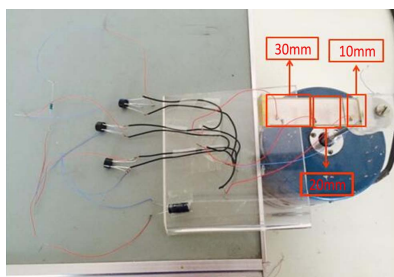


Figure 6. Power generation device with a 3:2:1 silver electrode

图 6. 比例为 3:2:1 银电极发电装置

Table 2. Comparison of generation capacity of silver electrode in subsection

表 2. 银电极分段方式发电能力对比

分段方式	充电时间 min	输出电流 mA	输出电压 V	输出功率 mW
第一种	25	0.01	10	0.1
第二种	10	0.03	15	0.45
第三种	18	0.024	11	0.26
不分段	94	0.007	8	0.06

银电极分段方式的输出功率比第一种分段方式的输出功率增加了 1.6 倍，充电时间大大缩短。在共振状态下在第一段银电极中存在一个应变节点。应变节点两侧的应变符号相反，银电极表面产生的电荷正负性质相反，所以第一段银电极会有部分电荷中和，降低发电量。

不分段的压电悬臂梁从充电时间、输出电压和输出功率相对其他方式的数值都比较小，这也验证了银电极分段方式提高发电性能的正确性。

实验结果分析：

从测试数据可得出，压电悬臂梁三种分段方式的充电时间都比银电极不分段充电时间要短，第二种分段方式用的充电时间最短，它的输出功率是第一种分段方式的四倍多；第三种分段方式也明显比第一种分段方式的充电速度快，输出功率是第一种 1.6 倍，但是没有第二种分段方式的发电能力强，所以银电极按照 1:2:3 的比例来划分为三部分时发电能力最强。主要是因为振动过程中，压电悬臂梁长度方向上存在应变节点，在应变节点的两侧应变符号相反，银电极表面的电荷正负性质是相反的。10 到 20 毫米之间存在应变节点，会有正负两种电荷产生，所以会有部分电荷中和，输出电压会减小。经计算第二种分段方式节点位置在 10~30 mm 的长度范围内，分段的银电极可以将正负电荷分开，避免了电荷的中和。第一种分段方式中第一段银电极所在的长度区间是 0~20 mm，包含了这个应变节点，存在电荷中和现象，所以输出电压受到影响。第三种分段方式中，第一段银电极处于 0~30 mm 长度范围内，应变节点基本处于中间位置，节点两侧的正负电荷中和现象较为严重，输出电压受到的影响相对较大，因此产生的电压较小。

5. 结论

本文提出的将压电悬臂梁银电极分段发电式有效的提高了系统的发电能力，分段比例有多种，本文设计了三种分段方法，其中第二种分段方法即将银电极从固定端向自由端按照 1:2:3 的比例分段，该方法发电量最大，充电时间最短，输出功率最大。本文的研究为压电悬臂梁发电优化设计以及核心部件发电提供了理论依据和技术参考。

基金项目

国家自然科学基金项目：压电驱动气体柔性驱动器设计理论与关键技术研究(51705031)；吉林省教育厅科学研究项目资助：压电疲劳试验机系统的非线性动力学特性研究(JJKH20170489KJ)；长春大学国家级科研项目培育项目：压电式微小载荷疲劳试验系统驱动机理与实验研究(2016JBC01L02)。

参考文献 (References)

- [1] 雷淑梅, 匡同春, 白晓军, 等. 压电陶瓷材料的研究现状与发展趋势[J]. 佛山陶瓷, 2005, 15(3): 36-39.
- [2] 秦立峰, 陈劲, 宋天佳, 等. 汽车爆胎报警及控制系统的研究现状及发展趋势[J]. 世界科技研究与发展, 2010, 32(4): 501-504.
- [3] 张永良, 林政. 海洋波浪压电发电技术的进展[C]//中国可再生能源学会海洋能专业委员会第三届学术讨论会论文集. 杭州: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会, 2010.
- [4] Szarka, G.D., Stark, B.H. and Burrow, S.G. (2012) Review of Power Conditioning for Kinetic Energy Harvesting Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 803-815. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161675>
- [5] Roundy, S., Wright, P.K. and Rabaey, J. (2003) A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes. *Computer Communications*, **26**, 1131-1144. [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)
- [6] Yamagishi, S., Fujimoto, S., Ichiki, M., et al. (2013) Characterization of the Piezoelectric Power Generation of PZT Ceramics under Mechanical Force. 2013 *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, Barcelona, 1-6.
- [7] 程光明, 庞建志, 唐可洪, 等. 压电陶瓷发电能力测试系统的研制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 367-371.
- [8] 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[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 98-101.
- [9] 何仁, 胡青训, 薛翔. 汽车轮胎气压监测系统发展综述[J]. 中国安全科学学报, 2006, 15(10): 105-109.

-
- [10] 张传忠. 压电材料的发展及应用[J]. 压电与声光, 1993(3): 64-70.
- [11] Zhang, L. (2010) Analytical Modeling and Design Optimization of Piezoelectric Bimorph Energy Harvester. The University of Alabama.
- [12] Sodano, H.A. and Inman, D.J. (2005) Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, **16**, 67-75. <https://doi.org/10.1177/1045389X05047210>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org