

## Study on a Micro Piezoelectric Wind Energy Harvester with a Proof Mass\*

HE Xuefeng<sup>1,2\*</sup>, LI Jiang<sup>2</sup>, ZHAO Xingqiang<sup>2</sup>, WEN Zhiyu<sup>1,2</sup>, WANG Xiaolan<sup>2</sup>

(1. Microsystem Research Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Key Lab of Optoelectronic Technology and Systems of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Micro wind energy harvesters based on wind-induced-vibration mechanism, which convert wind energy into electrical energy, are promising in such fields as wireless sensing network and so on. The vortex shedding frequency is directly proportional to the wind velocity. The output power of a wind energy harvester is high when the vortex shedding frequency is close to the natural frequency of the harvester. The frequency of the wind energy harvester needs to be decreased when we want to use it in low velocity wind environments. Proof masses were added onto wind energy harvesters to improve the output power under low velocity wind loading. For a cantilevered piezoelectric wind energy harvester with a proof mass, the lumped parameter modeling method was used to derive the frequency expression. For a prototype of micro cantilevered piezoelectric wind energy harvesters, experimental results show that the introduction of the proof mass decreases the critical wind velocity from 17.2 m/s to 13.5 m/s.

**Key words:** wind energy harvesting; wind-induced-vibration; piezoelectric; vortex shedding

EEACC: 8340; 2860

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.07.011

## 带质量块的微型压电式风能采集器研究\*

贺学锋<sup>1,2\*</sup>, 李江<sup>2</sup>, 赵兴强<sup>2</sup>, 温志渝<sup>1,2</sup>, 王晓兰<sup>2</sup>

(1. 重庆大学微系统研究中心, 重庆 400044;  
2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 基于风致振动机理的微型风能采集器可以将风能转换为电能, 在无线传感等领域具有广阔应用前景。漩涡脱落频率与风速成正比, 当漩涡脱落频率与微型风能采集器固有频率接近时, 采集器有较高输出功率, 因此为了在低风速环境应用风能采集器, 需要降低其固有频率。引入质量块可以降低微型压电式风能采集器的固有频率, 使其在较低风速下产生较高输出功率。为了预测带质量块的微型悬臂梁压电式风能采集器的固有频率, 基于集总参数建模方法得到了固有频率解析表达式。实验结果表明, 对于所制作的风能采集器原理样机, 质量块的引入使其临界风速由 17.2 m/s 降低为 13.5 m/s。

**关键词:** 风能采集; 风致振动; 压电; 漩涡脱落

中图分类号: TM919; TM359.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)07-0986-04

微型的环境能量采集器可以将环境中广泛存在的机械能、光能、热能等转换为电能, 具有体积小、寿命长等优点, 是无线传感网络节点等迫切需求的一种微小电源, 逐步成为国内外微能源研究的热点。在将环境中的机械能(如振动能、风能、声能)转换为电能的微型能量采集器方面, 由于振动能在环境中广泛存在, 国内外对将环境振动能转换为电能的微型振动能采集器开展了深入研究<sup>[1-6]</sup>, 但是对将环境中其它形式的机械能转换为电能的微型能量采

集器的报道相对较少。

由于风能在自然界中的广泛存在, 因此同微型振动能采集器一样<sup>[1-2]</sup>, 微型风能采集器在无线传感网络和自治式微系统等方面也有着广阔应用前景<sup>[7]</sup>。基于风致振动机理的微型风能采集器利用固体结构的风致振动现象将环境风能转换为微结构振动能, 进一步利用压电效应、电磁感应等原理将微结构振动能转换为电能, 具有结构简单、易于加工等优点, 是目前微型风能采集器研究的热点。Kim 等

项目来源: 国家自然科学基金项目(61076106); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708072); 国家高技术研究计划(863 计划)项目(2008AA04Z310)

收稿日期: 2011-01-18 修改日期: 2011-03-02

于2009年报道了基于风致振动机理的微型电磁式风能采集器,其最大输出电压约 $81\text{ mV}_{\text{p-p}}$ <sup>[7]</sup>。Wang等于2010年报道了一种基于风致振动机理微型风能采集器,其利用风载荷引起的压电复合膜振动发电,其输出电压和输出功率分别为 $2.2\text{ V}_{\text{p-p}}$ 和 $0.2\text{ }\mu\text{W}$ <sup>[8]</sup>。Kwon于2010年报道了压电式风能采集器的输出功率达 $4\text{ mW}$ <sup>[9]</sup>。Akaydin等对基于风致振动机理的风能采集器的工作机理进行了分析<sup>[10]</sup>。

对基于风致振动机理的微型风能采集器而言,只有当风速超过临界值时,才有较大的输出功率,这限制了它在大量低风速环境中的应用。在微型悬臂梁压电式风能采集器的梁末端增加一个质量块可以有效降低其正常工作的临界风速,扩大其应用范围。下面将从机理和实验方面分析质量块的引入对降低悬臂梁压电式风能采集器正常工作临界风速的有效性。

## 1 带质量块的压电式风能采集器低风速应用的工作机理

基于风致振动机理的微型风能采集器的输出功率由采集器振动部分的振幅决定,而该振幅直接依赖于环境风速的大小。风对结构施加的风载荷包含静风载荷和动风载荷两部分,采集器振动部分的振幅大小主要由动风载荷的幅值及频率决定。根据结构风致振动机理可知,当动风载荷的频率接近或达到采集器固有频率时,其振动部分将产生强烈振动,此时采集器有较高输出功率。动风载荷主要是由旋涡脱落引起,旋涡脱落频率为<sup>[11]</sup>

$$f_w = \frac{\varphi U}{D} \quad (1)$$

式中 $\varphi$ 为斯脱罗哈数(Strouhal数), $D$ 是结构垂直于来流方向平面上的特征尺寸, $U$ 是风速。由式(1)可见,旋涡脱落频率随着风速 $U$ 的提高而提高。只有当风速增大到使旋涡脱落频率与风能采集器振动部分的固有频率很接近时,采集器才有较大能量输出。当风速继续增大时,锁频现象<sup>[12]</sup>将使采集器振动部分在一个较大的风速范围内保持较大的振动幅度,产生较大的功率输出。为了使采集器在低风速环境得到应用,必须增加斯脱罗哈数或降低采集器的固有频率。在一个压电式悬臂梁风能采集器的自由端增加一个质量块将降低其固有频率,因此该质量块的引入将降低采集器正常工作的临界风速,使其可以在更低的风速下得到应用。

带质量块的悬臂梁压电式风能采集器的结构与悬臂梁压电式振动能采集器一样<sup>[4]</sup>,其由悬臂梁、

支座和质量块组成(见图1)。悬臂梁的上层和下层为压电材料,中间层为金属层,该金属层同时也是上、下压电层的共用电极,在上压电层的顶部和下压电层的底部有作为引出电极的金属层。质量块位于悬臂梁的自由端,悬臂梁的另一端固定在支座上。当风载荷引起悬臂梁及质量块振动时,由于压电效应,压电层的上、下电极之间将产生变化的电势差,利用该电势差就可以为储能器充电或直接对某些负载供电。

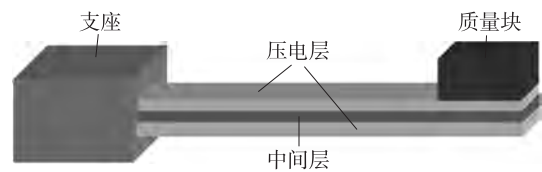


图1 带质量块的悬臂梁压电式风能采集器

## 2 悬臂梁压电式风能采集器固有频率计算

下面通过引入一个基础加速度来推导压电式悬臂梁风能采集器的固有频率。图2是悬臂梁压电式风能采集器模型的示意图,悬臂梁的轴向为 $x$ 方向,基础加速度为 $\ddot{y}(t)$ ,悬臂梁与质量块连接点的挠度为 $z_1(t)$ ,质量块质心挠度为 $z(t)$ ,悬臂梁与质量块的长度分别为 $l_b$ 和 $l_m$ ,上、下压电层的厚度均为 $t_c$ ,中间金属层厚度为 $t_{sh}$ ,悬臂梁宽度为 $w$ ,质量块质量为 $m$ 。由于质量块厚度远大于悬臂梁厚度,质量块自身变形相对很小,这里忽略质量块变形,将其简化为一个理想刚性体,此时质量块的转角与悬臂梁自由端的转角相同。

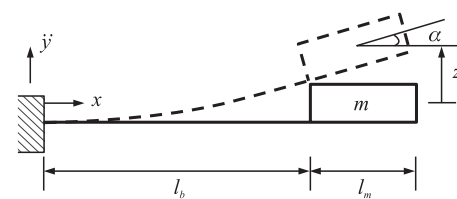


图2 悬臂梁风能采集器模型示意图

质量块的质量远大于梁的质量,因此下面忽略梁本身受到的惯性力,只计入质量块受到的惯性力。悬臂梁在任一截面处受到的弯矩为

$$M_l(x) = -m(\ddot{y} + \ddot{z})(l_b + 0.5l_m - x) \quad (2)$$

将上式代入梁挠度方程 $d^2z/dx^2 = M_l(x)/Y_cI$ ,积分可得悬臂梁自由端( $x=l_b$ )的挠度 $z_1(t)$ 和转角 $\alpha_1(t)$ ,质量块质心挠度为悬臂梁自由端挠度加上质量块转动引起的位移,小变形情况下的质量块质心挠度为

$$z = z_1 + \frac{1}{2}\alpha_1 l_m = -\frac{m(\ddot{y} + \ddot{z})}{Y_cI} \left( \frac{l_b^3}{3} + \frac{l_m l_b^2}{2} + \frac{l_m^2 l_b}{4} \right) \quad (3)$$

由式(3)得到质量块的运动微分方程为

$$\ddot{z} + \frac{6Y_c I}{ml_b(2l_b^2 + 3l_b l_m + 1.5l_m^2)} z = -\ddot{y} \quad (4)$$

对于式(4)的运动方程,其无阻尼频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6Y_c I}{ml_b(2l_b^2 + 3l_b l_m + 1.5l_m^2)}} \quad (5)$$

频率表达式(5)考虑了质量块质心的挠度与悬臂梁末端的挠度的差异。当质量块的长度趋近于零时,表达式(5)与 Roundy 等<sup>[2]</sup>在忽略该差异基础上

得到的频率公式  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6Y_c I}{ml_b(2l_b + 1.5l_m)}}$  结果一致;当质量块的长度与悬臂梁的长度相当时, Roundy 等的公式误差较大,而公式(5)仍然具有较高精度。

### 3 计算结果和分析

为了验证质量块对降低微型振动式风力采集器正常应用的临界风速的有效性,分别对没有质量块和有质量块的微型风力采集器原理样机开展了实验研究。采用微组装技术制作了基于悬臂梁结构的带质量块和不带质量块的微型振动式风力采集器样机,其中样机一带质量块,样机二不带质量块。含压电层的振动梁的上、下压电层均为 139  $\mu\text{m}$  厚的 PZT 压电层,两个压电层的极化方向相反,中间金属为铜,其厚度为 102  $\mu\text{m}$ ,压电复合梁的宽度为 6.4 mm。样机一和样机二的压电复合梁长度分别为 18.02 mm 和 24.7 mm,样机一的质量块为一个密度约 17 930  $\text{kg}/\text{m}^3$  的钨块,其尺寸为 8 mm×6.4 mm×3.88 mm。

首先在振动台上对带质量块和不带质量块的微型振动式风力采集器样机的振动特性进行了测试。对于样机一,由式(5)得到的一阶频率为 60.8 Hz,由 Roundy 等<sup>[2]</sup>的公式得到的一阶频率为 71.0 Hz,在振动台上通过实验测得的频率为 56.4 Hz,即公式(5)得到的固有频率相对误差约为 8.5%,而 Roundy 等的公式的相对误差约为 25.9%。由此可见,由于公式(5)考虑了质量块质心的挠度与悬臂梁末端的挠度的差异,其预测精度高于 Roundy 等的公式。测得的样机二的一阶频率为 296 Hz。

为了对微型风力采集器的性能进行测试,设计并制作了开口式小型风洞,搭建了微型风力采集器测试平台,其包括小型风洞、风速计、夹具、示波器、可变电阻等。通过实验测得的样机一和样机二在不同风速下的开路电压有效值见图 3。由图可见,在 10 m/s 的风速作用下,样机一和样机二的开路电压均很低,小于 100 mV。当风速达到 11 m/s 后,样机一

的开路电压有效值由 86 mV 快速增大 250 mV,而此时样机二的开路电压增加较慢,在 13.5 m/s 风速作用下的开路电压约 110 mV。当风速达到 16 m/s 后,样机二的考虑电压快速增加,当风速从 16.1 m/s 增大 17.2 m/s 时,样机二的开路电压有效值由 153 mV 快速达到 297 mV。在风速达到 22 m/s 时,样机一和样机二的开路电压有效值分别约为 763 mV 和 460 mV。由以上实验结果可见,质量块的引入使采集器固有频率降低,带质量块的微型风力采集器的开路电压在更低的风速下就快速增加,而没有质量块的采集器由于固有频率较高,其开路电压在更高风速下才发生快速增加,其中样机一和样机二的临界风速分别约为 13.5 m/s 和 17.2 m/s,即质量块的引入使微型悬臂梁压电式风能采集器的临界风速由 17.2 m/s 降低为 13.5 m/s。

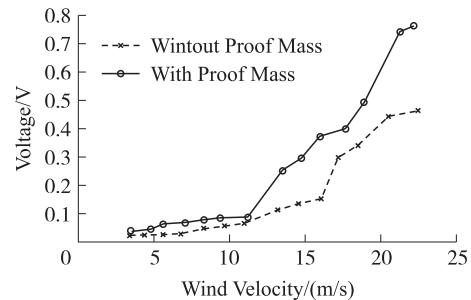


图3 不同风速下的开路电压有效值

以上实验结果表明,质量块的引入降低了基于风致振动机理的微型压电式风能采集器正常工作的临界风速,使采集器在较低的风速下产生较高的输出电压。

### 4 结论

对基于风致振动机理的微型压电式风能采集器而言,当漩涡脱落频率与采集器固有频率接近时,采集器有较高输出功率。为了在低风速环境应用微型悬臂梁压电式风能采集器,需要降低其正常工作的临界风速。在悬臂梁末端引入一个质量块将降低采集器的固有频率,进而达到降低其正常工作的临界风速的目的。考虑了质量块质心的挠度与悬臂梁末端的挠度的差异,基于集总参数建模方法得到的带质量块的微型悬臂梁压电采集器固有频率的计算公式具有较高精度。实验结果表明,质量块的引入有效降低了微型悬臂梁压电式风能采集器正常工作的临界风速,使其在较低风速下产生较大的输出电压及输出功率。

### 参考文献:

- [1] Beeby S P, Tudor M J, White N M. Energy Harvesting Vibration

- Sources for Microsystems Applications [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17: R175-R195.
- [2] Roundy S, Wright P K. A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics [J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 1131-1142.
- [3] Halvorsen E, Westby E R, Husa S, et al. An Electrostatic Energy Harvester with Electret bias [C]//Transducers 2009, Denver, CO, USA; 2009. 1381-1384.
- [4] 贺学锋,温志渝,温中泉,等. 振动式压电发电机的理论模型与实验 [J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(4): 307-310.
- [5] 沈修成,方华斌,王亚军,等. 基于 MEMS 的压电微能量采集器的电路研究与测试 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(4): 692-694.
- [6] 于慧慧,温志渝,温中泉,等. 宽频带微型压电式振动发电机的设计 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 643-646.
- [7] Kim S H, Ji C H, Galle P, et al. An Electromagnetic Energy Scavenger from Direct Airflow [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19, 094010.
- [8] Wang D A, Ko H H. Piezoelectric Energy Harvesting from Flow-Induced Vibration [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20, 025019.
- [9] Kwon S D. A T-Shaped Piezoelectric Cantilever for Fluid Energy Harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(16): 102-105.
- [10] Akaydin H D, Elvin N, Andreopoulos Y. Wake of a Cylinder: a Paradigm for Energy Harvesting with Piezoelectric Materials [J]. Experiments in Fluids, 2010, 49(1): 291-304.
- [11] Shyy W, Lian Y S, Tang J, et al. Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers. Cambridge University Press, 2008. 107-108.
- [12] Williamson C H K, Govardhan R. A Brief Review of Recent Results in Vortex-Induced Vibrations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 713-735.



贺学锋(1970-),男,博士,副教授,主要从事微加工技术、微能源与声波器件研究,hexuefeng@cqu.org.cn;



李江(1985-),男,重庆大学光电工程学院硕士研究生,研究方向为微能源技术;



赵兴强(1982-),男,重庆大学光电工程学院博士研究生,研究方向为微能源;



温志渝(1949-),男,教授,博导,主要从事光电技术、微纳技术研究;



王晓兰(1959-),女,实验员,主要从事微加工技术研究。