

基于压电片的风力发电装置及其自动迎风研究

龙 军,李茂军

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410004)

摘 要:根据压电材料的压电效应,设计了一种利用压电片将风能转换为电能,且能自动迎风的风向标式风压发电装置。建立了该装置的数学模型,基于力矩分析,导出了其满足自动迎风要求的参数关系式。装置利用风力吹动压电片震荡,通过能量收集电路收集压电片产生的电能供负载使用。通过对整个装置进行力矩分析及系统稳定性研究表明,该装置在任意风向情况下能自动迎风稳定运行,可满足路灯等小功率负载的供电要求。

关键词:压电效应;压电片;发电装置;风能;自动迎风

中图分类号:TN384;TP23

文献标识码:A

Research on Wind Power Generator Based on Piezoelectric Plates and Automatic Windward

LONG Jun, LI Maojun

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: According to the piezoelectric effect of piezoelectric material, a vane-type wind power generator capable of automatic windward was designed by using the piezoelectric plates to convert the wind power into the electric energy. The mathematical model of the device was established. Based on the moment analysis, the parameter relation to satisfy the requirement of automatic wind was derived. The device took advantage of the wind-force to drive the piezoelectric plates vibrate and the energies generated from the piezoelectric plates were collected by the energy harvesting circuit and supplied for the load. The analysis of the moment and the investigation on the stability of the whole device show that the device can run stably into the wind under any wind direction, and it can meet the power supply requirements of small power loads such as street lamps.

Key words: piezoelectric effect; piezoelectric plate; power generating device; wind power; automatic windward

0 引言

随着我国社会经济的迅速发展,能源需求持续增长,面临的能源危机及环境保护等问题日趋严峻。开发可再生清洁能源已成为我国实现可持续发展战略的重大举措。风能因分布广泛,无污染,可再生,蕴藏量大等特点,成为能源开发利用的主要对象。

近年来,一种用于小功率负载,基于压电效应的全新风力发电方式因其成本低,制作简便,安全性高等优点而受到关注。压电效应^[1]是指压电材料受到压力作用产生形变时,内部发生极化,上、下表面产生相反电荷形成电势差。利用压电材料这一特性可将机械能转换为电能,通过特定的能量收集电路收

集电能并使用^[2-3]。文献[4-8]对压电材料的发电能力及发电性能进行了测试分析;文献[9-12]对几种常见压电材料的特点和适用环境进行了比较分析,从压电材料选择上提升了系统性能。压电材料所受振动和负载的不同,其适用的压电结构和连接方式也不同^[13-14]。改变压电片的形状质量及构造等因素可提高压电片的发电效率^[14]。

目前,对于压电式发电在风能利用上的研究应用还在不断深入,美国德州大学的 S. Priya 发明了一种压电袖珍风车,用于无线网络供电^[15]。文献[16-17]通过设计新型压电发电装置来利用风能发电,并对提高其发电效率进行了研究。本文设计了一种利用风能驱动压电片的压电式发电装置(简称

收稿日期:2016-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074018)

作者简介:龙军(1991-),男,湖南衡阳人,硕士,主要从事智能控制技术研究。通信作者:李茂军(1964-),男,湖南长沙人,教授,博士,主要从事智能控制、人工智能在电力系统中应用的教学与科研工作。

风压发电装置),基于风向标的原理,靠尾翼自动调整装置转向迎风方向,具有集风作用的气筒能够加强作用于压电片上的风力,提高压电片的发电效率。通过能量收集电路将压电片振动产生的电能收集起来供负载使用,可满足路灯等小功率负载的供电要求。

1 风压发电装置设计

设计风向标式风压发电装置的目的是利用风力驱动压电片振动发电,加强风对压电片的作用力,并根据风向自动调整装置本身,使压电片正面保持迎风,从而在风向变化的情况下始终获得最大激励,提高发电效率。其结构如图 1 所示。

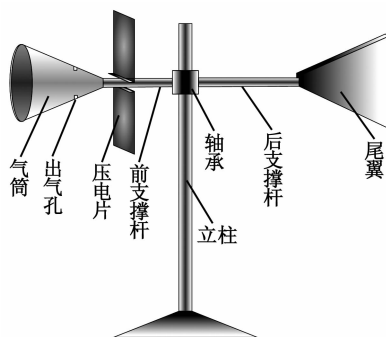


图 1 风压发电装置结构图

两组压电片组用悬臂梁式固定在前支撑杆的上下两端,喇叭状的气筒上、下两侧设有正对压电片的出气孔。前、后支撑杆成 180° ,通过轴承固定在立柱上,可绕立柱旋转。后支撑杆尾部装有调整方向的尾翼。工作原理:起风时,尾翼端受气流阻力大而后转动,气筒受阻力小从而转向迎风方向,此时气流在气筒内聚集由出气孔而出,通过出气孔的气流得到加强,吹动压电片震荡,压电效应使压电片表面发生极化产生电能,所有压电片接入能量收集电路,把产生的电能收集储存起来供负载使用。

2 装置模型及力矩分析

在风场中,装置的旋转力矩主要在气筒和尾翼处产生,因此,气筒和尾翼的参数是影响装置性能和稳定性的主要因素。本文采用解析法建立模型并进行分析。

2.1 建立模型

为了便于分析装置在风力作用下的状态,对装置进行简化,只考虑气筒和尾翼所受风力的力矩情况。设定装置的前支撑杆长为 L_1 ,后支撑杆长为 L_2 ,把气筒看成一个边缘为 20° 斜角的无底空心圆

锥体,圆锥高为 d ,则底面圆的半径 $r = d \cdot \tan 20^\circ$;尾翼看成是底角为 70° 的等腰三角形,高为 D ,则尾翼面积 $S = D^2 \cdot \tan 20^\circ$ 。装置的简化俯视图如图 2 所示。

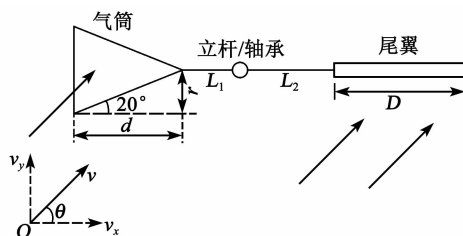


图 2 简化俯视图

气筒和尾翼分别作为整体进行力矩分析,设定自然风为水平风,风速为 v ,风与水平支撑杆夹角为 θ ,装置初始状态静止。由于气筒的形状特点,风力在平行支撑杆的方向(x 方向)和垂直支撑杆的方向(y 方向)都会产生力矩。考虑到实际上 x 方向的力矩很小,相对于 y 方向的力矩可忽略。因此,分析风对气筒端的作用时,把风速 v 按 x 轴(v_x)和 y 轴(v_y)进行分解,只考虑垂直支撑杆方向(y)产生的力矩。

2.2 力矩分析

尾翼端力的等效作用点位于等腰三角形重心处,力臂是 $L_2 + 2D/3$, y 轴方向所受风力为

$$f_y = \omega_p \cdot S = \frac{1}{2} \rho v_y^2 \cdot S \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; ω_p 为风压。

尾翼端产生的力矩为

$$T_2 = f_y \cdot \left(L_2 + \frac{2}{3} D \right) = \frac{1}{2} \rho v_y^2 S \cdot \left(L_2 + \frac{2}{3} D \right) \quad (2)$$

圆锥状气筒端 y 方向投影面是等腰三角形,力的作用点位于其重心处,气筒端的力臂是 $L_1 + 2d/3$ 。由于气筒形状特点,其受力情况与夹角 θ 相关,故分情况进行分析:

1) 当 $0 \leq \theta \leq 20^\circ$,气筒端只有内部受风力作用,如图 3 所示。

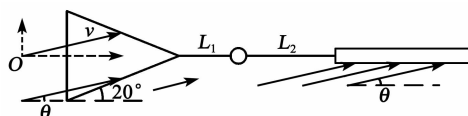


图 3 $0 \leq \theta \leq 20^\circ$ 受力情况

y 方向迎风投影面是等腰三角形,面积为 rd ,所受风力为

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_y \cdot rd \cdot v_y^2 \quad (3)$$

式中 C_y 为气筒内部 y 方向的空气阻力系数。

气筒端产生的力矩为

$$T_1 = F_y \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) = \frac{1}{2} \rho C_y \cdot rd \cdot v_y^2 \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) \quad (4)$$

2) 当 $20^\circ < \theta < 90^\circ$, 气筒内外部均有一侧受风力, 如图4所示。

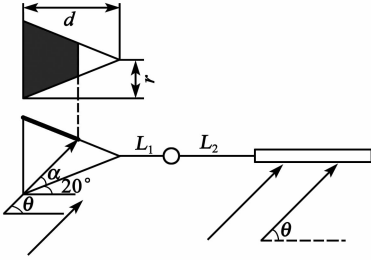


图4 $20^\circ < \theta < 90^\circ$ 受力情况

内部 y 方向迎风投影面是梯形, 面积为 $rd - (\alpha/70^\circ)^2 \cdot rd$ (大三角形减小三角形), $\alpha = \theta - 20^\circ$, 气筒内部受风力为

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_y \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta - 20^\circ}{70^\circ} \right)^2 \right] rd \cdot v_y^2 \quad (5)$$

外部 y 方向迎风投影面是整个等腰三角形, 面积为 rd , 气筒外部所受风力为

$$F'_y = \frac{1}{2} \rho C'_y \cdot rd \cdot v_y^2 \quad (6)$$

式中 C'_y 为外表面 y 方向的空气阻力系数。

气筒端产生的力矩为

$$T_1 = (F_y + F'_y) \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) = \frac{1}{2} \rho d \cdot v_y^2 \cdot \left\{ \left[1 - \left(\frac{\theta - 20^\circ}{70^\circ} \right)^2 \right] C_y + C'_y \right\} \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) \quad (7)$$

3) 当 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, 气筒只有外部受风力, 如图5所示。

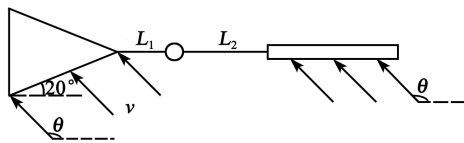


图5 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 受力情况

y 方向迎风投影面积为 rd , 所受风力为

$$F'_y = \frac{1}{2} \rho C'_y \cdot rd \cdot v_y^2 \quad (8)$$

气筒端产生的力矩为

$$T_1 = F'_y \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) = \frac{1}{2} \rho \cdot r C'_y d v_y^2 \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) \quad (9)$$

$\theta = 180^\circ \sim 360^\circ$ 时的情况与 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 相同。

综上所述, 气筒端力矩表达式为

$$T_1 = \begin{cases} \frac{1}{2} \rho C_y r d v_y^2 \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) & 0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ \\ \frac{1}{2} \rho d v_y^2 \left\{ \left[1 - \left(\frac{\theta - 20^\circ}{70^\circ} \right)^2 \right] C_y + C'_y \right\} \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) & 20^\circ < \theta < 90^\circ \\ \frac{1}{2} \rho C'_y r d v_y^2 \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (10)$$

3 装置自动迎风及仿真分析

当装置放置于风场中, 根据风向标的原理, 尾翼端产生的力矩必须大于气筒端的力矩时才能使其迎风。尾翼端力矩大于气筒端力矩 ($T_2 > T_1$) 时, 尾翼向后摆, 气筒端随之向迎风方向旋转, 当其转过迎风位置偏离平衡时, 又会因尾翼端力矩大于气筒端力矩而再次向迎风位置回转。如此往复, 装置于风力作用下在迎风方向左、右摆动, 直至其正面迎风趋于稳定。

凹面空气阻力系数大于凸面空气阻力系数 ($C_y > C'_y$), 对气筒和尾翼端的力矩进行比较分析, 只要保证 $T_2 > T_1$ 。将 $v_y = v \cdot \sin \theta$ 代入式(10)可知, 当 $20^\circ < \theta < 90^\circ$, T_1 能取到最大值。当 $T_2 > T_1$ 时, 有

$$S \cdot \left(L_2 + \frac{2}{3}D \right) > \left\{ \left[1 - \left(\frac{\theta - 20^\circ}{70^\circ} \right)^2 \right] C_y + C'_y \right\} rd \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) \quad (11)$$

θ 正方向趋于 20° , 令

$$\left\{ \left[1 - \left(\frac{\theta - 20^\circ}{70^\circ} \right)^2 \right] C_y + C'_y \right\} = \lambda C_y \quad 1 < \lambda < 2 \quad (12)$$

代入 $S = D^2 \tan 20^\circ$, $r = d \cdot \tan 20^\circ$ 的关系式, 可得

$$D^2 \cdot \left(L_2 + \frac{2}{3}D \right) > \lambda C_y d^2 \cdot \left(L_1 + \frac{2}{3}d \right) \quad (13)$$

取 $D^3 = \lambda C_y d^3$, 式(13)可简化为

$$D^2 L_2 > \lambda C_y d^2 L_1 \quad (14)$$

即

$$\frac{L_2}{L_1} > \frac{D}{d} = \sqrt[3]{\lambda C_y} \quad (15)$$

因此,只要 L_1 、 L_2 满足式(15),尾翼端产生的力矩大于气筒端的力矩,装置能在任意方向风场中调整至迎风方向;同时,压电片也能始终保持正面迎风,从而获得最大的风力驱动使之振动产生电能,再通过与压电片相接的能量收集电路收集储存以便利用。

风压发电装置设计的新颖处在于整个风压发电装置利用了压电片的发电特性和风能的优越性,再结合装置本身的特点,使压电片能在不同风向环境中获得最大的发电功率,提高了压电片在风能利用方面的能量转换效率。因此,为了直观地了解在不同风向下装置的应力情况,对装置可旋转部分进行仿真分析。

ANSYS CFD 是一个应用于计算流体力学的专业仿真软件,成本低、效率高、结果准确等特点使其广泛应用于复杂流动动力学的实验仿真。结合实际情况以及操作的可行性,在相同风速条件下,对 θ 的 3 种情况($0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$, $20^\circ < \theta < 90^\circ$, $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)进行仿真,对仿真结果进行分析比较,如图 6 所示。

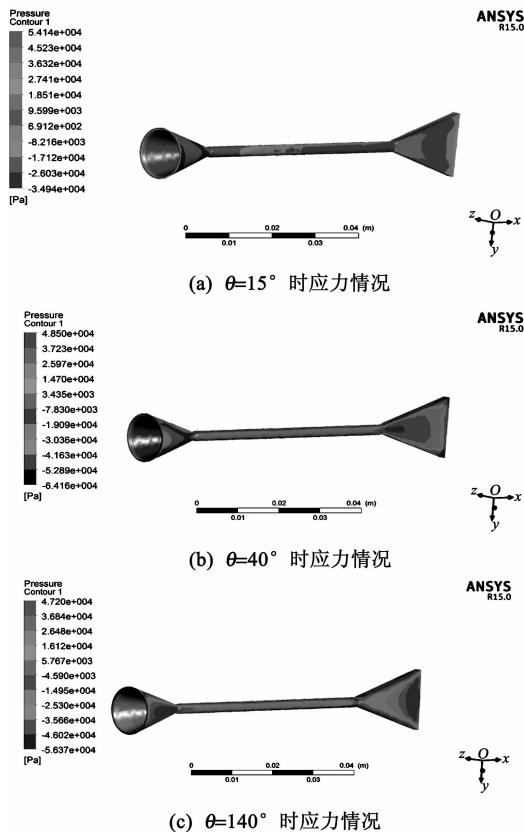


图 6 不同风向下应力仿真图

由于气筒端形状特点,风向不同,风力作用对象不同。由图 6(a)可见,气筒外部应力最小,内部应力最大,风力主要作用于气筒内部;由图 6(c)可见,气筒外部应力最大,内部应力最小,风力主要作用于气筒外部;由图 6(b)可见,气筒内、外部应力都较大,风力作用于整个气筒结构。仿真结果符合上述推论。

4 能量收集电路

压电片震荡所产生的电能是不稳定的交流电,必须经过能量收集与转换电路处理后才能供负载使用。串、并联电感同步开关电路是目前效果较好的电能获取方法。串联电感同步开关适用于负载较小的情况,并联电感同步开关适用于负载较大的情况,可根据负载的大小选择串联或并联电感同步开关来收集电能。实际情况中,通过压电片产生的电能需要通过转换电路转换成稳定的电压才能被使用。常用的 PZT-5 压电陶瓷产生的最大电压能达到 30 V,而电流只有 0.3~0.5 mA。根据这一特性可以采用整流 DC-DC 转换电路来降低电压,提高电流。LM2596 降压稳压芯片能够调节输出 3.3~15 V 的稳定电压,具有 3 A 的负载驱动能力,且外接元件少,效率高,满足设计要求。LM2596 与收集电路组成的能量收集与转换电路能提升能量收集效率,操作简单,适合实际需求,如图 7 所示。

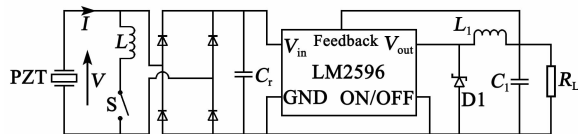


图 7 能量收集电路

目前,由于单个压电片自身的发电功率有限,因此,要获得较大的电能时,需将多个压电片同时接入收集电路进行使用。

5 结束语

本文针对目前压电发电在风能利用方面较少的现状,设计了一种能够自动迎风,利用风能驱动压电片的压电发电装置,并根据力矩分析,推导出其满足自动迎风条件的参数关系式。通过研究分析表明,该装置能够提升压电片在风能利用上的能量收集与转换效率,在风能利用及压电发电方法上有一定创新。

参考文献:

- [1] 王强,骆英,顾建祖. 基于压电材料的振动能量获取技术的研究[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(3): 47-50.
- WANG Qiang, LUO Ying, GU Jianzu. Research on

- harvested technique of vibration energy based on piezoelectric materials[J]. *Electronic Components and Materials*, 2008, 27(3): 47-50.
- [2] 刘祥建, 陈仁文. 压电振动能量收集装置研究现状及发展趋势[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(16): 169-176.
LIU Xiangjian, CHEN Renwen. Current situation and developing trend of piezoelectric vibration energy harvests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(16): 169-176.
- [3] 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.
CHENG Guangming, PANG Jianzhi, TANG Kehong, et al. Development of measuring system for electricity generating capacity of piezoelectric ceramics[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(2): 367-371.
- [4] 闫震, 何青. 激励环境下悬臂梁式压电振动发电机性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(30): 140-144.
YAN Zhen, HE Qin. Performance analysis on incentive environment of micro cantilever piezoelectric vibration generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(30): 140-144.
- [5] 温建强, 章力旺. 压电材料的研究新进展[J]. *应用声学*, 2013, 32(5): 413-418.
WEN Jianqiang, ZHANG Liwang. New advances in piezoelectric materials[J]. *Applied Acoustics*, 2013, 32(5): 413-418.
- [6] 龚俊杰, 阮志林, 李康超, 等. 新型多层悬臂梁压电发电装置发电性能研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(5): 135-140.
GONG Junjie, RUAN Zhilin, LI Kangchao, et al. Study on the generating performance of a novel piezoelectric generator with multilayer cantilevers[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5): 135-140.
- [7] 邱清泉, 肖立业, 辛守乔, 等. 微型振动式压电发电机的设计与特性分析[J]. *电机与控制学报*, 2011, 15(7): 1-7.
QIU Qingquan, XIAO Liye, XIN Shouqiao, et al. Design and performance analysis for micro piezoelectric vibration generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(7): 1-7.
- [8] 王浩金, 鄧丹燕, 肖金, 等. 悬臂梁式压电发电结构理论模型及其仿真研究[J]. *机电工程*, 2011, 28(11): 1412-1415.
WANG Haojin, WU Danyan, XIAO Jin, et al. Theoretical model and simulations of piezoelectric cantilever generators[J]. *Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, 2011, 28(11): 1412-1415.
- [9] 孙舒, 曹树谦. 双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(21): 1-11.
SUN Shu, CAO Shuqian. Dynamic modeling and analysis of a bistable piezoelectric cantilever power generation system[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(21): 1-11.
- [10] LEE B S, HE J J, WU W J, et al. MEMS generator of power harvesting by vibrations using piezoelectric cantilever beam with digitate electrode[C]//USA: *Proc Smart Structures and Materials Conf ; SPIE*, 2006: 616-619.
- [11] 许小勇, 张学红, 刘树林, 等. 压电式振动发电研究与应用综述[J]. *机电一体化*, 2010, 3: 14-17.
XU Xiaoyong, ZHANG Xuehong, LIU Shulin, et al. An overview of the study and application of piezoelectric vibration generation[J]. *Mechanical and Electrical Integration*, 2010, 3: 14-17.
- [12] 温永清, 刘小鱼, 鲁飞, 等. 压电发电技术及其应用研究[J]. *稀土*, 2013, 34(5): 82-85.
WEN Yongqing, LIU Xiaoyu, LU Fei, et al. Research on technology of piezoelectric generator and its application[J]. *Chinese Rare Earths*, 2013, 34(5): 82-85.
- [13] KOYAMA D, NAKAMURA K. Electric power generation using vibration of a polyurea piezoelectric thin film[J]. *Applied Acoustics*, 2010, 71(5): 439-445.
- [14] 边义祥, 杨成华. 基于压电材料的振动能量回收技术现状综述[J]. *压电与声光*, 2011, 33(4): 612-622.
BIAN Yixiang, YANG Chenghua. A review of current research for energy harvesting based on vibration of piezoelectric materials[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(4): 612-622.
- [15] PRIYA S, CHEN C, FYE D, et al. Piezoelectric windmill: a novel solution to remote sensing[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 90: 0154106-3.
- [16] 成立, 李茂军, 王鼎湘, 等. 基于压电效应的风力发电方法研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(2): 361-364.
CHEN Li, LI Maojun, WANG Dingxiang, et al. Study on wind power generating method based on the piezoelectric effect[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2015, 37(2): 361-364.
- [17] 隋丽, 刘国华, 石庚辰, 等. 柔性压电发电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.