

# 一种基于压电片的能量转换装置及其优化设计

郭晓莹,李茂军,李琛

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410004)

**摘要:**为完成环境能量向电能的转化,设计了一种利用压电元件转化环境能量的能量转换装置。该装置利用风力驱动悬梁臂式压力发电组件旋转,同时使压电片振动而产生电能。依据压电材料的基本理论建立了装置的输出模型,并采用基于状态空间模型的进化算法对装置进行优化设计。开展了能量转换装置的实验测试,实验结果表明,该装置可高效地完成环境能量向电能的转化。本装置的设计为清洁环境能源的收集提供了新方法,也指出了振动能量采集装置的研究前景。

**关键词:**压电片;风能;发电装置;能量回收;压电效应

**中图分类号:** TN23

**文献标识码:** A

**DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.036

## An Energy Conversion Device Based on Piezoelectric Plate and Its Optimum Design

GUO Xiaoying, LI Maojun, LI Chen

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

**Abstract:** In order to complete the conversion of environmental energy to electric energy, an energy conversion device using piezoelectric element to convert environmental energy is designed. The device uses a wind-driven cantilever-arm type pressure-generating component to rotate while the piezoelectric plate is vibrated to generate electrical energy. Based on the basic theory of piezoelectric materials, the output model of the device is established, and the evolutionary algorithm based on the state space model is used to optimize the design of the device. The experimental test of the energy conversion device has been carried out. The experimental results show that the device can efficiently convert the environmental energy into the electrical energy. The design of this device provides a new method for the collection of clean environmental energy, and also points out the research prospects of the vibration energy harvesting device.

**Key words:** piezoelectric plate; wind energy; power generating device; energy recovery; piezoelectric effect

### 0 引言

随着不可再生能源的逐渐减少和环境问题的日益凸显,可再生无污染的新型能源的开发利用迫在眉睫。不受电磁干扰的压电材料受到压力时会产生形变,在其两端产生电位差,从而完成机械能到电能的转换<sup>[1]</sup>。利用压电材料采集风能有成本低,结构简单且高效清洁的优点,因此,越来越多的专家、学者致力于压电发电的研究。目前,多数学者研究的重点主要放在收集和提高单体压力发电片的发电能力上,并将采集的电能用于微机电系统<sup>[2]</sup>。文献[3]采用悬臂梁压电振子制成风车式压电发电装置进行机电能量转换。文献[4]设计了一种具有变频功能

的压电俘能器,可吸收多频段的振动能量。文献[5]设计了一种利用风能间接驱使多片压电片振动的装置,采集环境振动能量。文献[6]对多片压电振子的发电性能进行了分析,用于指导压电片连接方式的设计。文献[7]对悬臂梁压电振子振动发电理论进行了分析,研究了悬臂梁压电振子的功率输出特性。文献[3-7]设计的能量采集装置为振动能量的采集提供了广阔的思路,但对于压电片参数的选取描述较少,且装置输出功率较低。本文设计了一种利用风能直接驱使压力发电组件(由多片压电片构成)的旋转和压电片振动的能量采集装置,解决了单片压电片发电量低和发电效率低的问题,提高了低风速风力的利用率。

收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074018)

作者简介:郭晓莹(1993-),男,河南濮阳人,硕士,主要从事智能控制技术的研究。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。

### 1 能量转换装置的设计

该装置主要由转轴、转盘、支架及底座组成。装置上安装的转盘数目可改变。图 1 为装有 2 个转盘的 能量转换装置。每个转盘上装有 3 个支架,支架间两两呈 120° 夹角,用于压力发电组件的安装,且每个支架上最多可以安装 2 个压力发电组件。风吹向压力发电组件,致使其有一定幅度的摆动,压电片产生形变。压电片因压力形变在其表面上产生不同符号的异化电荷,从而将机械能转化为电能。

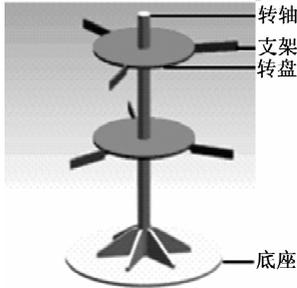


图 1 能量转换装置示意图

压力发电组件是由 2 个刚性长条固定成一组的多片压电片。刚性长条保证了多片压电片振动频率和幅度的一致,防止多片压电片串、并联后电压、电流的相互抵消。图 2 为 4 片压电片组成的 1 个压力发电组件。压力发电组件上的多片压电片可采取串联或并联的结构方式,为获得较大的负载功率<sup>[6]</sup>,本文选取并联连接。多个压力发电组件间的连接方式并不影响装置的输出功率,可根据负载电压确定压力发电组件之间的连接方式。

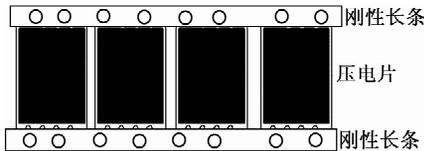


图 2 压力发电组件

## 2 能量转换装置的发电功率分析

### 2.1 压电片受力分析

对压电片进行受力分析,与对压力发电组件的受力分析类似,本文借助压力发电组件对压电片进行受力分析。设  $F$  为风力,  $\theta$  为  $F$  与压力发电组件 A 的夹角,  $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$  为压力发电组件 A、B、C 上压电片受到的正作用力,如图 3 所示。

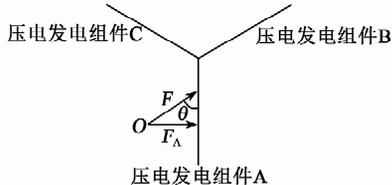


图 3 受力分析示意图

由图 3 可知,  $\theta \in [0, 120^\circ]$ , 得到压电片所受正压力为

$$\begin{cases} F_A = F \sin \theta \\ F_B = F \sin(60^\circ - \theta) \\ F_C = F \sin(120^\circ - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 单片压电片发电功率

单片压电片的发电功率在很多文献中早有推导,在此不再赘述。文献[8]中所导公式将实际情况理想化为风力正作用于压电片,单片压电片的发电功率为

$$P_1 = \frac{F_{压}^2 b^2 d^2 l^4 h_c^2 \omega^2 R (h_c + h_n)^2}{4E_p^2 I_x^2 s^2 \{4h_c^2 + R^2 b^2 l^2 \omega^2 \epsilon^2 [1 + (1 - k^2)^2]\}} \quad (2)$$

式中:  $F_{压}$  为压电片受到的正压力;  $\omega$  为风的频率;  $l$ 、 $b$  分别为压电片的长度和宽度;  $h_c$  和  $h_n$  分别为压电材料厚度和金属基板的厚度;  $d$  为压电片应变常数;  $\epsilon$  为压电片介电常数;  $k$  为压电片机电耦合系数;  $s$  为压电片弹性顺度系数;  $E_p$  为压电片弹性模量;  $I_x$  为截面惯性矩;  $R$  为负载电阻。

自然状况下风力与压电片会有一定夹角,考虑到夹角作用,单片压电片的发电功率为

$$P_2 = \frac{F_A^2 b^2 d^2 l^4 h_c^2 \omega^2 R (h_c + h_n)^2}{4E_p^2 I_x^2 s^2 \{4h_c^2 + R^2 b^2 l^2 \omega^2 \epsilon^2 [1 + (1 - k^2)^2]\}} \quad (3)$$

### 2.3 能量转换装置的发电功率

设压力发电组件 A 上并联压电片数目为  $n$ , 则压力发电组件 A 的发电总功率为

$$P_A = nP_2 = \frac{F^2 b^2 d^2 l^4 h_c^2 \omega^2 \sin^2 \theta R n (h_c + h_n)^2}{4E_p^2 I_x^2 s^2 \{4h_c^2 + R^2 b^2 l^2 \omega^2 \epsilon^2 [1 + (1 - k^2)^2]\}} \quad (4)$$

当装置旋转 1 周时压力发电组件 A 的平均发电功率为

$$P_{A平均} = \frac{0.315 9 F^2 b^2 d^2 l^4 h_c^2 \omega^2 R n (h_c + h_n)^2}{E_p^2 I_x^2 s^2 \{4h_c^2 + R^2 b^2 l^2 \omega^2 \epsilon^2 [1 + (1 - k^2)^2]\}} \quad (5)$$

显然,当装置旋转 1 周时压力发电组件 B、C 的平均发电功率与压力发电组件 A 的相同,则

$$P_{A平均} = P_{B平均} = P_{C平均} = P_{平均} \quad (6)$$

设装置上装有  $i$  个转盘,每个转盘装有  $j$  个压力发电组件,该能量转换装置在 1 个周期内的发电功率为

$$P = ij P_{平均} =$$

$$\frac{0.3159ijF^2b^2d^4l^2h_e^2\omega^2Rn(h_e+h_n)^2}{E_p^2I_xs^2\{4h_e^2+R^2b^2l^2\omega^2\epsilon^2[1+(1-k^2)^2]\}} \quad (7)$$

对于矩形压电片的截面惯性矩<sup>[9]</sup>为

$$I_x = \frac{bh_{压}^3}{12} = \frac{b(h_e+h_n)^3}{12} \quad (8)$$

式中  $h_{压} = h_e + h_n$ 。

将式(8)代入式(7)可得能量转换装置的发电功率为

$$P = \frac{45.4896ijF^2d^4l^2h_e^2\omega^2Rn}{E_p^2s^2(h_n+h_e)^4\{4h_e^2+R^2b^2l^2\omega^2\epsilon^2[1+(1-k^2)^2]\}} \quad (9)$$

### 3 能量转换装置参数优化

本文对能量转换装置上压电片的参数优化采用基于状态空间模型的进化算法<sup>[10]</sup>。该算法采用实数编码方式,构造一个状态进化矩阵来实现重组和变异功能,提高了算法的可操作性和可靠性,具有搜索能力强,收敛速度快,精度高的优点。

由式(9)可知,待优化参数有  $l, b, h_e, h_n, R$  及  $n$ 。根据压电材料的压电特性和结构特性可知<sup>[11]</sup>,  $h_e, h_n \in (0.01 \text{ mm}, 0.4 \text{ mm}), l, b \in (40 \text{ mm}, 90 \text{ mm})$ 。

由于装置转轴高度的限制,装置上安装3个转盘,每个转盘上安装了6个压力发电组件,每个压力发电组件上最多可安装15片压电片。

图4为能量转换装置上压电片参数优化流程图。

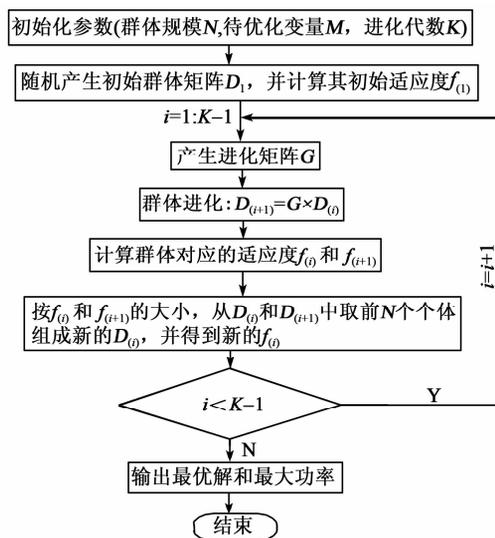


图4 能量转换装置优化流程图

设置群体规模为  $N=100$ , 进化代数  $K=80$ , 运

行优化程序后,可得到优化后的最优个体及其对应的参数值(见表1)。进化过程如图5所示。

表1 能量转换装置的最优参数值

$l/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h_e/\text{mm}$	$h_n/\text{mm}$	$R/\Omega$	$n/\text{片}$
88.23	85.17	0.047	0.045	2.55	9

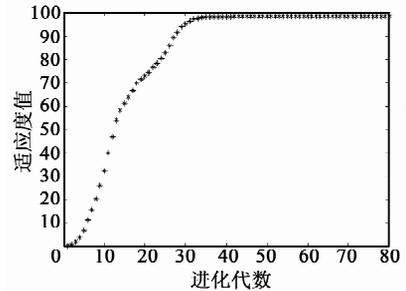


图5 进化过程

图6为压电片厚度和金属基板厚度的寻优过程及其优化结果。

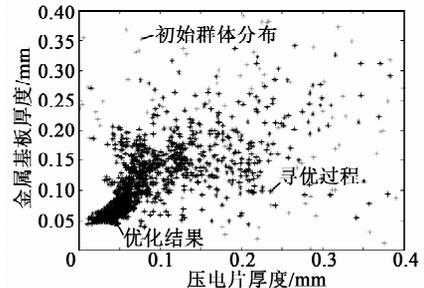


图6 压电片厚度和金属基板厚度优化结果

当能量转换装置按表1的参数选取压电片安装时,能量采集装置的输出功率达到最大。对于非优化参数  $d, E_p, s, \epsilon, k$  的选取可从PZT-5的压电陶瓷片生产商提供的参数中查找(见表2)。假设风力为5级,则可计算出压力发电组件受力  $F=0.47 \text{ N}$ , 取  $\omega=1 \text{ rad/s}$ , 最大功率  $P_{\max}=4.7504 \text{ W}$ 。

表2 非优化参数值

$d/(\text{C/N})$	$E_p/\text{Pa}$	$s/(\text{m}^2/\text{N})$	$\epsilon/(\text{F/m})$	$k$
$1.4 \times 10^{-10}$	$6.06 \times 10^{10}$	$1.3 \times 10^{-12}$	$1.46 \times 10^{-8}$	0.32

### 4 装置的发电能力测试

本文选用PZT-5的压电陶瓷片,该压电片由压电陶瓷和金属基片组成,具有产生高电压、小电流的特性。每个压力发电组件由9片压电片并联组成。能量转换装置上装有3个转盘,每个转盘装有6个压力发电组件。6个压力发电组件之间采用并联连接。外接负载可选用  $2.55 \Omega$  的贴片电阻器代替。自然风的实现利用额定功率为  $3 \text{ kW}$  的离心式通风机模拟,该通风机最大转速为  $2900 \text{ r/min}$ , 最大风

速可达 25 m/s。利用风速测量仪将风速调整至 5 级风速(8.0~10.8 m/s)即可进行试验。

压电片振动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的处理后才能供负载使用。本文采用并联电感同步开关电路来获取电能,能量收集与转换电路如图 7 所示。压电片产生的电流经过全波桥式整流电路整流后储存于  $C_1$  内, $C_1$  内的电能通过 DC-DC 转换芯片输出稳定的电压供负载使用。DC-DC 转换芯片采用 MAX632,该芯片输入电压为 1.5~12.6 V,输出为 12 V,不仅满足所涉及装置的要求,还具有效率高,功耗低,外围元件少及使用方便的特点。

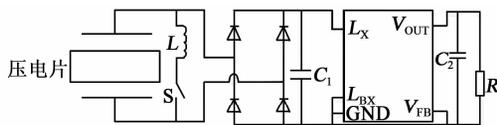


图7 能量收集与转换电路

试验中测得电阻  $R$  两端的电压为 11.351 V,电流为 0.298 A。由此可计算电阻消耗的功率为 3.383 W。压电片振动产生的能量经过整流电路和 DC-DC 电路有一定的能量损耗,致使电阻消耗的功率稍小于压电片的发电功率。

## 5 结束语

本文基于压电材料的基本理论,设计了一种新型的能量转换装置,对其发电功率进行了分析,并用基于状态空间模型的进化算法进行了优化设计。对装置进行发电能力的测试验证了优化参数的有效性。基于压电效应收集的微小能量是一种无污染、可再生循环的新型能源。本文装置的研究分析也为微小能量的收集提供了一种新的思路。

## 参考文献:

[1] 王剑,郭吉丰,郭帅. 压电发电技术研究综述[J]. 压电与声光,2011,33(3):394-398.  
WANG Jian, GUO Jifeng, GUO Shuai. A review of power generation technology using piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(3):

394-398.

- [2] 陈定方,孙科,李立杰,等. 微型压电能量收集器的研究现状和发展趋势[J]. 湖北工业大学学报,2012(4):1-8.  
CHEN Dingfang, SUN Ke, LI Lijie, et al. Research status and development trend of miniature piezoelectric energy harvesting[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012(4):1-8.
- [3] 李靖. 风车式压电发电装置研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [4] 薛欢. 具有不等长压电双晶片组的变频俘能器[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2010(9):41-44.  
XUE Huan. Piezoelectric energy harvester with adjustable operating frequency-band[J]. Huazhong University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2010(9):41-44.
- [5] 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.  
CHENG Li, LI Maojun, WANG Dingxiang, et al. Study on wind power generating method based on the piezoelectric effect[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2):361-364.
- [6] 李福. 振动能量收集系统的研究与实现[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2013.
- [7] 刘辉. 振动能量采收系统关键技术研究[D]. 赣州:江西理工大学,2009.
- [8] 刘黄. 基于风压发电的路灯供电方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2016.
- [9] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [10] 李茂军,刘黄,李奇,等. 基于状态空间模型的实数编码遗传算法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2015(3):1-7.  
LI Maojun, LIU Huang, LI Qi, et al. Real-code genetic algorithm base on state-space model[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2015(3):1-7.
- [11] 张福学. 现代压电学(上册)[M]. 北京:科学出版社,2001.