

# 新型风力压电发电装置设计及发电性能

陈扬东, 龚俊杰, 吉灵龙, 陈 敢, 边义祥

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘 要:**为了利用压电发电装置采集自然界中的风能,并解决传统压电发电装置受外界振源限制的缺陷,设计了一种新型的风力压电发电装置。对装置中的悬臂梁压电振子进行了发电电压的理论分析及有限元验证,结果表明,压电振子发电电压的理论计算结果与 ANSYS 仿真结果基本吻合,两者之间的误差仅为 0.54%。在此基础上,运用 ANSYS 有限元软件来计算该新型风力压电发电装置的发电能力,计算得到装置在振幅为 1 mm、频率为 20 Hz 的简谐力作用下,一个悬臂梁压电振子所产生的电压为 30.1 V。为了获得最佳的发电性能,对发电装置的结构参数进行了优化设计,研究结果表明,当悬臂梁压电振子的上表面比风车轴凸轮上凸点的最低点位置高 2 mm 时,该装置具有最佳的发电性能,一个悬臂梁压电振子可产生约 60.3 V 的发电电压。

**关键词:**压电发电装置;风力发电;有限元分析;发电性能;结构优化

**中图分类号:**TN384; TN712; TM31 **文献标识码:**A

## Design of a Novel Wind Piezoelectric Generator and Its Generating Performance

CHEN Yangdong, GONG Junjie, JI Linglong, CHEN Gan, BIAN Yixiang

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** In order to make use of the piezoelectric generating device to collect the natural wind power, and to solve the defects of conventional piezoelectric generators restricted by external vibration source, a novel wind piezoelectric generator is designed. The generating voltage of the cantilever piezoelectric vibrator enclosed in the device is analyzed theoretically and the corresponding finite element verification is carried out. The results show that the theoretical results are consistent with the ANSYS simulation ones, and the error is only 0.54%. Based on this, the generating capacity of the novel wind piezoelectric generator is calculated by using ANSYS finite element software, and the results show that a cantilever piezoelectric vibrator can produce the voltage of 30.1 V under the simple harmonic force with the amplitude of 1 mm, frequency of 20 Hz. Finally, the structural parameters are optimized for obtaining the best generating performance. It is found that the device has the best power performance when the cantilever piezoelectric vibrator on the surface than wind axle CAM on convex point to the lowest point higher than 2 mm, and a cantilever piezoelectric vibrator will generate the output voltage of 60.3 V.

**Key words:** piezoelectric power generator; wind power generation; finite element analysis (FEA); generating performance; structure optimization

## 0 引言

为了解决化石燃料的短缺及其所带来的一系列环境恶化问题。近几年来,各国科技工作者一直在致力于寻找一种绿色能源以替代化石燃料。潮汐能、太阳能和风能等绿色能源,在我们生活中已被广泛应用,如风力发电、太阳能发电、潮汐发电等。风

能作为一种绿色环保的可再生能源,越来越受到世界各国的重视,其蕴藏量巨大,比地球上可开发利用的水能总量大 10 倍。风很早就被人们利用,当时主要通过风车来抽水、磨面等,而现在,人们更感兴趣的是如何利用风车来发电<sup>[1]</sup>。目前的风力发电装置存在造价高,效率低,技术有待改进的缺陷,同时由

收稿日期:2016-08-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275447);江苏省 2014 年度普通高校研究生实践创新计划基金资助项目(SJLX-0601)

作者简介:陈扬东(1992-),男,江苏扬州人,硕士生,主要从事压电传感器方面的研究。E-mail:337490633@qq.com。通信作者:龚俊杰(1969-),男,江苏姜堰人,教授,硕士生导师,博士,主要从事工程力学、机械设计与理论等方面的研究。E-mail:gjunj@126.com。

于自然风的间歇性,使风力发电受地域和气候的限制较明显。

压电发电是利用压电陶瓷的正压电效应来实现机械能向电能的转换,压电发电装置通过压电材料将环境中振动的能量收集起来,并将其转换成可以替代电池为微电子产品供电的电能,该装置具有结构简单,无需外部供电,寿命几乎无限,易于实现机构的微小化和集成化等优点。但压电发电装置的发电能力受环境振动的影响较大,对于振幅较大且振动频率与发电装置固有频率接近的振源才可以实现较好的发电性能,否则发电功率很差。所以可以考虑将风力发电与压电发电技术结合起来,设计新型的风力压电发电装置。

近年来,将风能与振动机械能相结合的技术已得到了人们更多的关注<sup>[2-5]</sup>。Priya<sup>[6-7]</sup>设计了一种可以为无线网络传感器提供电能的压电式袖珍风车,并将压电陶瓷片安装在此风车上,该压电发电装置可以产生约7.5 mW的电能。董志利等<sup>[8]</sup>设计了一种创新型悬臂梁式压电陶瓷风力发电机,该装置采用“曲轴-连杆”的能量传递方式,能够实现能量的自供给,可以解决那些不能提供电源、不易更换电池的地区的微型器件的供电问题。龚俊杰、阮志林等<sup>[9]</sup>设计了一种新型蝴蝶式多层悬臂梁压电发电装置,并对其进行了有限元分析及实验测试,结果表明,该多层悬臂梁压电发电装置,在受到频率为38 Hz,振幅为1.25 mm的环境振动载荷作用时,具有最佳的发电性能,能够有效地吸收环境中的风能和各种振动能量。

本文针对传统压电发电装置的局限性,设计了一种借助风力压电来发电的新型风车结构,对其中的悬臂梁压电振子进行理论分析及相应的有限元仿真,以验证有限元计算的正确性。在此基础上,研究整个风力压电发电装置的发电性能,用于预测结构的发电能力,并对装置的结构进行参数化研究,以便为该风力压电发电装置的设计提供最优化方案。

## 1 新型风力压电发电装置的结构设计

图1为新型风力压电发电装置的结构示意图。风车轴的两侧设有两个大风车,便于提供足够的对称驱动力,风车轴中间部分设有6个凸轮,每个凸轮上有两个互成180°的凸点,相邻凸轮的凸点交错垂直,风车轴通过设有轴承的轴承孔,架于支架板上。与风车轴交错垂直的支架板的两侧面上设有6块悬

臂梁,每个侧面各有3块,呈相间布置,且这6块悬臂梁正好位于风车轴上6个凸轮的正下方,悬臂梁上表面到底座的距离比凸轮上凸点转到最低点时到底座的距离高1 mm,每块悬臂梁的根部贴覆有压电陶瓷片。

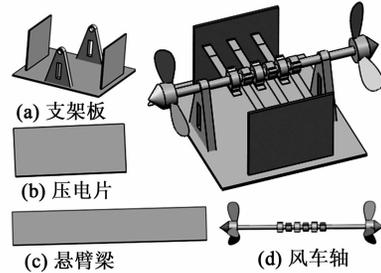


图1 装置示意图

图1中,新型风力压电发电装置工作时,首先将支架板的底座固定,当风吹动风车轴两侧的风车转动时,会带动风车轴及固定在风车轴上的6个凸轮一起转动,由于悬臂梁的上表面到底座的距离比凸轮上凸点转到最低点时到底座的距离高1 mm,这样当凸轮上的凸点转到最低点时,便会按压悬臂梁的自由端,使悬臂梁的自由端发生向下1 mm的位移,从而带动贴覆在悬臂梁根部的压电片产生形变,使压电片产生正压电效应,进而压电发电产生电能。

该结构的新颖之处在于巧妙地将风车与悬臂梁压电振子组合在一起,形成了一种新型风力压电发电装置,该装置可以将外界不稳定、不连续的风能,通过风车转化为连续稳定的旋转机械能,再强迫多个悬臂梁压电振子发生变形,进而压电发电,将风能最终转化为电能。该压电发电装置不受外界振动振源的限制,可以更有效地收集自然界中的风能,发电效率更高,发电量更大。相对于传统压电发电装置而言,该装置具有明显的优势和创新之处。

## 2 发电电压的理论分析及有限元验证

新型风力压电发电装置发电的主要元部件是悬臂梁压电振子,所以首先简单介绍悬臂梁压电振子的工作原理,然后从理论上分析悬臂梁压电振子的发电电压,并建立相应的悬臂梁压电振子的有限元分析模型,将有限元仿真结果与理论公式计算结果进行比较,以验证有限元仿真模型的正确性,便于利用有限元软件进行结构的优化设计。

### 2.1 压电振子的工作原理

压电发电装置的工作原理是利用压电材料的正压电效应将环境中的振动机械能转化为电能。压电

振子常见的激励方式有惯性自由振动方式、冲击自由振动方式和强制振动方式<sup>[10]</sup> 3 种。本文研究的新型风力压电发电装置采用的是强制振动方式,将风车轴的旋转转化为在悬臂梁压电振子的自由端施加一个振幅为 1 mm 的简弦激励,强迫悬臂梁压电振子不断产生交替的弯曲变形,将风能最终转化为电能。图 2 为正压电效应原理图,其中  $F$  为所施加的外力。

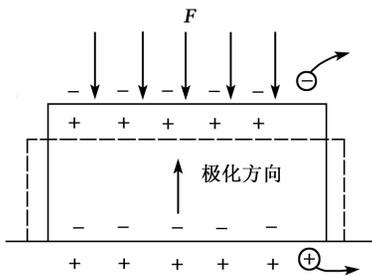


图 2 正压电效应原理图

### 2.2 悬臂梁压电振子的理论发电电压

压电振子的发电能力主要取决于输出功率 ( $P$ )、发电电压 ( $V$ ) 和电荷量 ( $Q$ )。此处采用  $V$  来衡量悬臂梁压电振子的发电能力。

图 3 为悬臂梁压电振子的理论模型,设图中压电材料的长为  $L$ , 宽为  $b$ , 厚为  $t$ , 悬臂梁基板具有相同的  $b$  和  $t$ , 其  $L$  略大于压电材料。

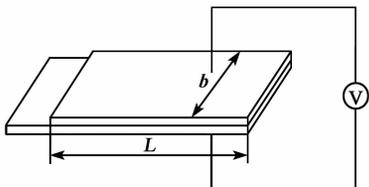


图 3 悬臂梁压电振子数学理论模型

悬臂梁压电振子通过正压电效应将外界机械能转换成电能,压电材料在外力作用下变形,从而在上、下电极表面产生感应电荷,进而吸引大量自由电子聚集成高压<sup>[11]</sup>。当压电片发生变形时,在上、下两个电极表面之间所产生的电压为

$$V = g_{31} \frac{F}{b} \quad (1)$$

式中  $g_{31}$  为压电材料的压电电压常数。

1) 激励为压电振子的自由端位移。当在悬臂梁压电振子的自由端施加一位移时,1 个压电陶瓷片上所产生的发电电压为

$$V = A_2 g_{31} E_p \left( \frac{t}{L} \right)^2 u \quad (2)$$

式中:  $A_2$  为常数;  $u$  为在自由端处施加的位移;  $E_p$  为

压电材料的弹性模量。

2) 激励为力。当在悬臂梁压电振子的自由端施加一力时,1 个压电陶瓷片上所产生的发电电压为

$$V = A_1 g_{31} \frac{L}{tb} F \quad (3)$$

式中  $A_1$  为常数。

对于悬臂梁压电振子,式(2)、(3)中的  $A_1$ 、 $A_2$  分别为  $3/4$  和  $3/16$ ,  $g_{31} = -9.3 \times 10^{-3}$  ( $V \cdot \text{gm})/\text{N}$ 。

理论模型中悬臂梁压电振子的基本尺寸和性能参数如表 1 所示。

表 1 理论模型中压电振子的基本性能参数

组 成	悬臂梁基板	压电片
材 料	铍铜	PZT-5H
密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8 230	7 500
弹性模量/GPa	130	106
泊松比	0.42	0.32
$L/\text{mm}$	54	50
$b/\text{mm}$	10	10
$t/\text{mm}$	0.5	0.5

对于本文研究的发电装置,是在悬臂梁压电振子的自由端中心处施加一向下为 1 mm 的位移,故将  $A_2$  及压电电压常数等参数代入式(2)可得 1 个压电陶瓷片上所产生的电压为 18.5 V。

### 2.3 悬臂梁压电振子的压电耦合分析

压电耦合分析主要是模拟在悬臂梁压电振子的自由端中心处施加一向下为 1 mm 的位移时,1 个压电陶瓷片上所产生的电压的大小。经有限元计算得到该压电片在 1 mm 位移作用下的发电电压云图如图 4 所示。

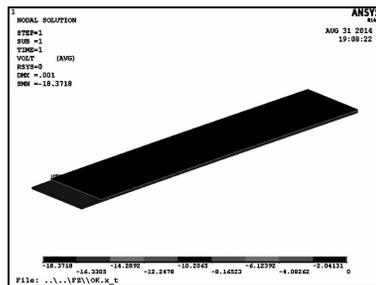


图 4 悬臂梁压电振子的电压云图

由图 4 可知,悬臂梁压电振子的自由端在 1 mm 的位移作用下,1 个压电陶瓷片上所产生的电压为

18.4 V。

ANSYS 仿真值与理论计算结果基本吻合,两者间的误差仅为 0.54%,从而验证了有限元仿真模型的正确性。

### 3 发电性能研究及结构的优化设计

#### 3.1 装置的发电性能研究

该新型风力压电发电装置主要是通过风吹动风车转起来,带动风车轴转动,相对于在悬臂梁压电振子的自由端施加一简谐振动。本文主要是通过 ANSYS 有限元软件中的瞬态动力学分析模块来模拟风车转速达 600 r/min 时的发电电压,相当于在悬臂梁压电振子的自由端施加一振幅为 1 mm、频率为 20 Hz 的简谐激励,即  $F=0.001\sin(40\pi t)$ ,恒定阻尼比为 0.02。对于瞬态分析,压电耦合分析中用 TINTP 命令指定瞬态积分常数  $ALPHA=0.25$ 、 $DELTA=0.5$  和  $THETA=0.5$ 。

该新型风力压电发电装置中悬臂梁压电振子的基本尺寸和性能参数如表 2 所示。其中压电片到悬臂梁固定端的距离为 5 mm。

表 2 实物中压电振子的基本性能参数

组成	悬臂梁基板	压电片
材料	铍铜	PZT-5H
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	8 230	7 500
弹性模量/GPa	130	106
泊松比	0.42	0.32
L/mm	100	40
b/mm	20	20
t/mm	0.5	0.5

依照表 2 所给出的悬臂梁压电振子的基本尺寸和性能参数,建立相应的有限元分析模型,并在其自由端施加一简谐力  $F=0.001\sin(40\pi t)$ ,通过计算可得到悬臂梁压电振子在应力最大时刻的应力分布云图及电压波动曲线如图 5、6 所示。

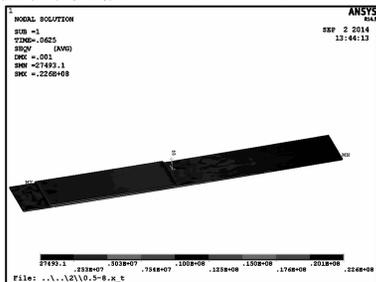


图 5 悬臂梁压电振子的应力云图

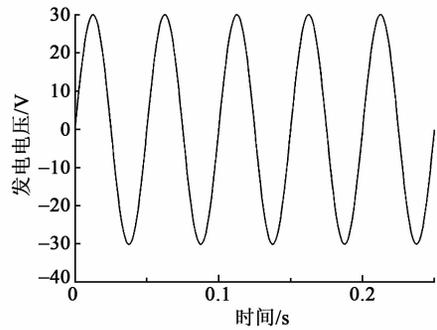


图 6 悬臂梁压电振子的电压波动曲线

由图 5 可知,悬臂梁的最大应力值为  $0.226 \times 10^8$  Pa,压电陶瓷片上产生的最大应力为  $0.1 \times 10^8$  Pa,均小于材料的许用应力值,所以整个装置是安全的。

由图 6 可知,在振幅为 1 mm、频率为 20 Hz 的简谐力作用下,1 个悬臂梁压电振子产生的最大峰值电压为 30.1 V。

#### 3.2 结构的最优化设计

为了使该装置具有最佳的发电性能,需要对装置的结构参数进行优化。悬臂梁压电振子的上表面到风车轴凸轮上凸点转到最低点时的距离,决定了风车在转动过程中施加在悬臂梁压电振子自由端振幅的大小,即直接决定了该装置发电能力的大小。故在悬臂梁压电振子的自由端分别施加 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 的位移,从而得到悬臂梁压电振子的发电电压及压电陶瓷片上的最大应力值如表 3 所示。

表 3 压电振子的发电电压及应力值

位移/mm	1	2	3	4	5
发电电压/V	30.1	60.3	90.2	120.5	150.7
应力值/MPa	10.4	20.6	30.7	40.5	50.6

由表 3 可知,悬臂梁压电振子自由端的位移越大,其发电电压及压电陶瓷片上的最大应力值也越大。考虑到压电陶瓷片的许用应力值应小于 30 MPa,故当悬臂梁压电振子的上表面到风车轴凸轮上凸点转到最低点时的距离为 2 mm 时较合适,此时该装置具有较好的发电性能,一个悬臂梁压电振子将产生约 60.3 V 的发电电压,且此时压电陶瓷片上的最大应力值仅为 20.6 MPa,小于其许用应力值,整个装置不会发生强度破坏。

### 4 结束语

本文设计了一种新型风力压电发电装置,对结

构中的一个典型悬臂梁压电振子进行了理论分析及相应的有限元仿真,从而验证了有限元仿真模型的正确性。在此基础上,用 ANSYS 有限元软件模拟仿真悬臂梁压电振子的发电性能,在频率为 20 Hz 的简谐力作用下,分析悬臂梁压电振子的自由端位移对发电装置发电量的影响,以便获得最佳的发电性能。结果表明,当悬臂梁压电振子的上表面比风车轴凸轮上凸点转到最低点时还要高 2 mm 时,该装置不会发生强度破坏,且具有较好的发电性能。

#### 参考文献:

- [1] 李红叶,陈森林. 中国可再生能源发电发展战略探讨[J]. 中国农村水利水电,2011,3:131-135.
- [2] SALEM S, OTHMAN S. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011(52): 500-504.
- [3] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 126(2): 405-416.
- [4] 何学文,黄国平. 基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 968-972. HE Xuewen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(6): 968-972.
- [5] 陈晓宇,陈永泽. 基于进化算法的风力机叶片优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016(5): 47-52. CHEN Xiaoyu, CHEN Yongze. Wind turbine blades optimization based on evolutionary algorithm [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016(5): 47-52.
- [6] PRIYA S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers [J]. *Journal of Electroceramics*, 2007, 19(1): 656-661.
- [7] PRIYA S, CHEN C T, FYE D, et al. Piezoelectric windmill: a novel solution to remote sensing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44 (3): 104-107.
- [8] 董志利,张广明,徐飞. 压电陶瓷风力发电机的创新设计[J]. 微特电机, 2014, 42(1): 25-27. DONG Zhili, ZHANG Guangming, XU Fei. Innovative design of piezoelectric ceramics wind turbine [J]. *Emotorcn*, 2014, 42(1): 25-27.
- [9] 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.
- [10] GLYNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al. Anelectromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems [J]. *Sensors and Actuators*, 2004, A(110): 344-349.
- [11] 闫世伟. 压电发电装置实验设计与应用研究 [M]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [1] 李红叶,陈森林. 中国可再生能源发电发展战略探讨[J]. 中国农村水利水电, 2011, 3: 131-135.
- [2] SALEM S, OTHMAN S. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011(52): 500-504.
- [3] LEFEUVRE E, BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 126(2): 405-416.
- [4] 何学文,黄国平. 基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 968-972. HE Xuewen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(6): 968-972.
- [5] 陈晓宇,陈永泽. 基于进化算法的风力机叶片优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016(5): 47-52. CHEN Xiaoyu, CHEN Yongze. Wind turbine blades optimization based on evolutionary algorithm [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016(5): 47-52.
- [6] PRIYA S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers [J]. *Journal of Electroceramics*, 2007, 19(1): 656-661.
- [7] PRIYA S, CHEN C T, FYE D, et al. Piezoelectric windmill: a novel solution to remote sensing [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44 (3): 104-107.
- [8] 董志利,张广明,徐飞. 压电陶瓷风力发电机的创新设计[J]. 微特电机, 2014, 42(1): 25-27. DONG Zhili, ZHANG Guangming, XU Fei. Innovative design of piezoelectric ceramics wind turbine [J]. *Emotorcn*, 2014, 42(1): 25-27.
- [9] 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.
- [10] GLYNNE-JONES P, TUDOR M J, BEEBY S P, et al. Anelectromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems [J]. *Sensors and Actuators*, 2004, A(110): 344-349.
- [11] 闫世伟. 压电发电装置实验设计与应用研究 [M]. 长春: 吉林大学, 2007.
- (上接第 514 页)
- [2] COKL A, DOBERLET MV. Communication with substrate-borne signals in small plant-dwelling insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2003, 48(1): 29-50.
- [3] PEREZ G P, KATSUMATA-WADA A, OKADA K. Morphology and neurophysiology of tarsal vibration receptors in the water strider *aquarius paludum* (Heteroptera; Gerridae) [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2009, 55(9): 855-861.
- [4] FAN Z F, CHEN J, ZOU J, et al. Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, 12 (5): 655-661.
- [5] JUNG I, ROH Y. Design and fabrication of piezoelectric bimorph vibration sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(98): 259-266.
- [6] BIAN Y X, QIU J H. Dynamic admittance matrix of metal core piezoelectric fiber [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2011, 35 (3): 189-200.
- [7] QIU J H, JI H L, ZHU K J, et al. Response of metal core piezoelectric fibers to unsteady airflows [J]. *Mod Phys Lett B*, 2010, 24(13): 1453-1456.
- [8] HU H, LIU C, CHEN N. A robust tactile shear stress sensor derived from a bio-inspired artificial hair-cell sensor, *Sensors [C]//Lecce, Italy: IEEE*, 2008: 1517-1519.
- [9] JUNG I, ROH Y. Design and fabrication of piezoelectric bimorph vibration sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 69(98): 259-266.