

基于压电双晶片的风速辨识系统*

姚新科, 彭瀚旻, 胡捷, 吴辉阳

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了感知飞行器外部流场,间接获得航速和姿态角等飞行参数,提出了一种基于压电双晶片阵列的风速辨识集成部件。在尽可能减小空气动力学特性影响的情况下,设计了一种双晶片两轴对称的飞行器头部风传感实物模型,由 4 片双晶片阵列组成。首先,在风洞实验中采集单片双晶片的感应电信号,经过电荷放大器、NI 数据采集卡与 Labview 虚拟仪器分析软件,利用最小二乘法获得各自压电双晶片的感应电压(均方根值)与风速(矢量)之间的函数关系;其次,建立风速辨识集成部件的双变量(风速大小与风向角)传感函数模型,由此反求风速大小和方向。实验结果表明,所设计的风速辨识压电集成部件在风洞内可实现风速的二维测量,采样时间为 5 s 时,其传感精度在 3%(风速大小)和 3°(风向角)以内,最高分辨率可达 0.5%(风速大小)和 0.55°(风向角)。此应用于飞行器上的风速辨识集成部件可以快速感知风速大小和方向,其传感函数模型的精度满足外部环境风速辨识的要求,为今后飞行器传感系统集成化与小型化奠定理论与实验基础。

关键词 传感器;压电陶瓷;流场;风速辨识;压电双晶片阵列

中图分类号 TP212.6;TM282;P412.16

引 言

获取飞行器姿态信息是控制飞行器自身姿态的重要参数,也是近年来航空测控领域的研究热点。传统的姿态信息获取方法可以获取某一姿态信息,但却无法直接感知外部环境的变化,例如风速大小与方向的突变。此种突变往往造成飞行器的失稳。因此,国内外研究人员利用各种智能传感材料在风速感知领域进行了研究。

文献[1-2]研制了一种基于微机电系统(micro electro mechanical systems,简称 MEMS)技术的圆形热流传感器,以检测流动方向和速度。测试结果显示,最大角度误差为 5°,速度误差不超过 0.5 m/s,但响应时间较长,约为 10 s。文献[3]运用 MEMS 研制出基于悬臂梁结构的电阻应变式微米级气体流量传感器,其对超低风速具有一定的灵敏度(0.028 4 Ω/ms^{-1})且响应时间快(0.53 s)。Liu^[4]利用微纳加工技术制作了仿生纤毛传感器,纤毛根部贴有应变片,能感知风速的大小,纤毛长度小于 1.5 mm。Dagamsch 等^[5]模仿蟋蟀尾部的纤毛能感受空气周围振动的原理,通过 MEMS 技术制造了

电容式仿生毛发传感器,能检测到 1 mm/s 的气流变化。Marinov 等^[6]制作了基于聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride,简称 PVDF)压电薄膜的十字形传感结构,实验结果表明 PVDF 产生的电信号是可以判断风速大小和方向的,但不能准确测量风速。文献[7]研制了直径约为 0.7 mm 含金属芯的 PVDF 压电纤维,该纤维产生的电荷与气流速度成正比,同时可探测气流的方向。费海平等^[8]在微型飞行器翼表上采用微型热式流速传感器,通过测量翼表流速大小来感知外部流场环境的变化,其传感器精度为 4%。刘旭东等^[9]利用热式流速传感器测量翼表的流场,实现了风速大小、迎角和侧滑角的测量,但不能同时测量 3 个参数。此传感器自身体积和质量比较小,易于集成在机翼表面且分辨率和灵敏度较高,但传感器需要通电加热,实际的功率消耗为 625 mW。为了进一步提高飞行器的传感速度,同时感知风速大小与方向的突变,笔者利用压电材料^[10]的快响应、宽频带的优势来测量环境风速。

笔者运用压电双晶片作为传感器件,采用 4 片双晶片将其阵列集成在飞行器模型上,每片形成悬臂梁结构,其安装方式对气动特性影响很小。基于

* 国家自然科学基金青年基金资助项目(51405224);江苏省科技计划青年基金资助项目(BK20140818);江苏高校优势学科建设工程资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(SJLX16_0094);大学生创新创业训练项目(2017CX00124)

收稿日期:2017-07-12;修回日期:2017-09-20

Labview 虚拟仪器的测试方法^[11-12],通过采集在外界风的作用下压电双晶片振动产生的感应电信号,获得各自双晶片的感知电压信号(均方根值)与风速大小和方向之间的函数关系,建立风速辨识集成部件的双变量(风速大小与风向角)传感函数模型。利用此测量模型求出风速(矢量)大小,实现飞行器外部流速的监测。

1 风速辨识系统

1.1 测试系统

笔者利用压电双晶片的快速响应特性,设计了如图 1 所示的风速辨识压电集成部件,它由 4 片压电双晶片、飞行器头部模型与导线共同组成。飞行器头部模型为椎体,顶角倒圆角,夹角为 60°,由 3D 打印机打印成型,材料为树脂。其中,沿椎体表面开有 4 个直槽,每个直槽用于安装 1 片压电双晶片(江苏联能电子技术有限公司购得),压电双晶片在飞行器模型前端部固支(悬臂梁结构),相邻 2 片双晶片在 $x-z$ 平面内的投影夹角为 90°,尺寸长为 36 mm,宽为 2 mm,厚为 0.2 mm。实验中,导线连接压电双晶片的中间层(铜电极)与内侧压电陶瓷层(无风一侧),即仅采集内测压电陶瓷上的感应电信号,用以计算风速大小及方向。

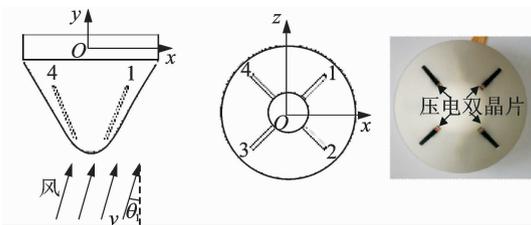


图 1 风速辨识压电集成部件

Fig. 1 The wind identification components based on piezoelectric bimorphs array



图 2 信号采集系统

Fig. 2 Signal acquisition system

图 2 为信号采集系统,它由小型低速风洞、压电集成部件、步进电机、电荷放大器、NI 数据采集卡和 Labview 虚拟仪器分析软件等部件组成。通过控制风洞风机转速来调整风速大小 v ,步进电机控制压电集成部件与风的夹角 θ (简称风向角)大小,电荷放大器将压电双晶片在风作用下产生的感应电荷信号进行放大,其输出的电压信号通过数据采集卡采集并将信号传输到计算机,通过 Labview 虚拟仪器分析软件进行信号处理,获得压电双晶片内侧陶瓷上的感应电信号,从而近似获得输入风速大小和方向与系统感应电压(均方根值)之间的关系。

1.2 风速辨识原理

如图 3 所示,压电双晶片构成的悬臂梁在风速激励下发生受迫振动,其变形而产生电荷。设梁长度为 l ,宽度为 w ,压电层厚度为 h_p ,基板厚度为 h_m ,总厚度为 h 。

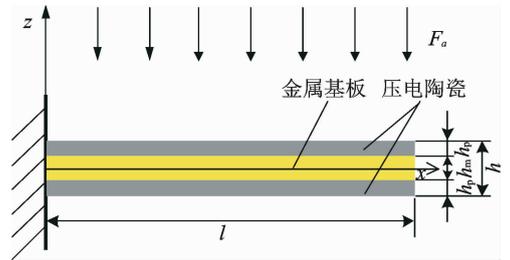


图 3 压电双晶片悬臂梁结构简图

Fig. 3 Structure schematic diagram of piezoelectric cantilever

对于风致振动这类气动弹性力学问题,外载荷通常是作用在结构上的气动力(F_a),则

$$F_a = \frac{1}{2} \rho v^2 A \xi \quad (1)$$

其中: ρ 为空气密度; v 为来流风速; A 为与气动力作用相关的结构有效面积; ξ 为结构无量纲气动力系数,可能与流场变量 q ,结构运动位移 x 和速度 \dot{x} ,时间 t 和雷诺数 Re 有关^[13]。

当均布气动力载荷 F_a 垂直于作用于压电梁时,产生的弯矩为

$$M = \frac{1}{2} F_a l \quad (2)$$

在外力矩 M 的作用下,压电悬臂梁上层压电片产生的电荷量 Q ^[14] 为

$$Q = - \frac{6d_{31} E_p M l (h_p + h_m)}{E_m h_m^3 + 2E_p h_p (3h_m^2 + 4h_p^2 + 6h_p h_m)} \quad (3)$$

其中: E_p 和 E_m 分别为压电陶瓷和金属基板的弹性模量。

将式(1),(2)带入式(3),得到

$$Q = -\frac{3d_{31}E_p l^3 \omega \xi (h_p + h_m) \rho v^2}{2E_m h_m^3 + 4E_p h_p (3h_m^2 + 4h_p^2 + 6h_p h_m)} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,压电梁的输出电荷受其结构尺寸、压电耦合系数、材料的弹性模量及风速等影响,且电荷量与风速为2次方的关系。此关系为文中压电器件实验线性拟合奠定了理论基础。

为了能够测量两个未知量,即风速大小 v 和风向角 θ ,需要得到各压电双晶片输出感应电信号与风速(矢量)之间的关系,即输出特性,以信号的均方根(root mean square,简称RMS)表征风速之间关系的特征值,对系统进行标定。由实验得到的传感特性曲面,通过数学方法建立RMS与风速大小和方向的数学模型。风速辨识实验过程中,同时采集4通道双晶片的RMS,作为已知量代入已建立的函数模型,通过求解方程组求出风速大小和方向。图4为此系统的风速辨识流程图。

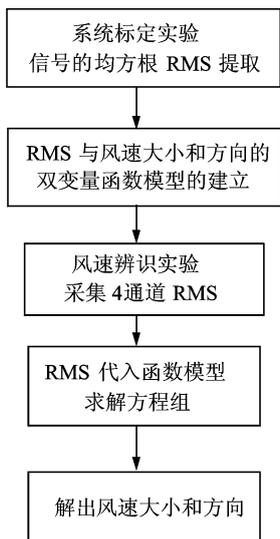


图4 系统风速辨识流程图

Fig. 4 Flowchart of wind speed identification

2 信号采集及分析

2.1 实验方案

测试过程中,采样频率设置为 $f_s = 2$ kHz,采样点数为 $n = 10\ 000$,电荷放大器灵敏度设置为 100 pc/mV。具体信号采集实验步骤如下。

1) 对系统进行标定,建立4通道传感信号与风速的关系模型。利用单通道数据采集卡单独采集每片双晶片在不同风速 v 和风向角 θ 情况下的感应电信号,其中 v 的取值范围是 $3.3 \sim 10.3$ m/s,取8组数据; θ 的范围是 $-30^\circ \sim 30^\circ$ (以 y 轴顺时针旋转为正、逆时针为负),每间隔 6° 取一组数据,共11组。

根据实验数据,获得4片压电陶瓷各自的感应电压(均方根值)与风速大小和风向角之间的数学关系。

2) 对系统风速辨识能力进行测试。利用4通道数据采集卡同时采集4片压电双晶片的感应电信号,实验中风速 $v = 8$ m/s保持不变,改变风向角 θ ,从 $-30^\circ \sim 30^\circ$,间隔 10° ,共7组。位置与风向角的对应关系如表1所示。根据上述4片压电陶瓷的各自传感特性的数学关系,建立双变量(风速大小与风向角)测量的数学模型及感应电压(均方根值)之间的相互关系,求解 v 和 θ ,最终获得压电集成部件风传感特性的误差。

表1 位置与风向角之间的对应关系

Tab. 1 The relationship between the positions and wind angles

位置	1	2	3	4	5	6	7
风向角/ $^\circ$	-30	-20	-10	0	10	20	30

2.2 信号处理

测试中,电信号先通过电荷放大器放大,经NI数据采集卡获得的数据在Labview软件中进行数字滤波。程序采用Chebyshev滤波的带通模式,设置低截止频率为5 Hz,高截止频率为160 Hz。基于Savitzky-Golay平滑滤波的方法,其单侧数据点数设为20,多项式阶数设为4。在 v 从不同风向角 θ 作用于模型时,通过采集压电双晶片的感应电压信号来辨识风速。以1号压电双晶片为例,当 $v = 10$ m/s和 $\theta = 0^\circ$ 时,其功率谱如图5所示。可以看出,

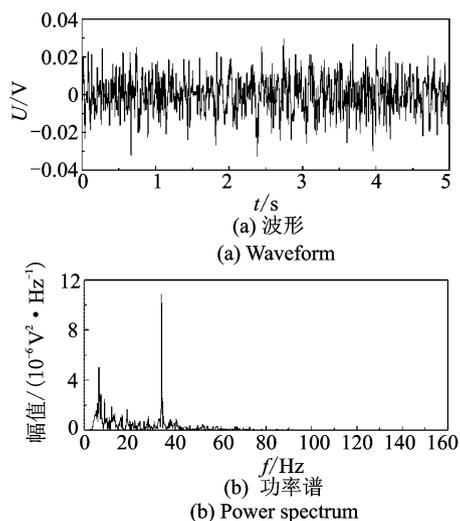


图5 1号片在 $v = 10$ m/s和 $\theta = 0^\circ$ 时感应电信号的波形与功率谱

Fig. 5 Waveform and power spectrum of inductive signals of No. 1 at $v = 10$ m/s and $\theta = 0^\circ$

风致压电梁的振动频率属于低频,振动的频率主要在 60 Hz 以下。实验采用感应电压的均方根值 U_{rms} 作为表征风速的特征参数,其表达式为

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2} \quad (5)$$

其中: n 为采样点数; x_i 为第 i 个采样点对应的电压值。

根据实验中风速大小和方向与感应电压(均方根)之间的关系,可以近似假设 U_{rms} 与 v 和 θ 的函数关系为

$$U_{rms} = f(v, \theta) = \sum_{i=0, j=0}^{i=m, j=n} a_{ij} v^i \theta^j \quad (6)$$

其中: m 与 n 为待定阶数。

利用最小二乘法^[15-16],根据实验数据点近似拟合出上述函数表达式,利用单片压电双晶片的传感特性推导出整个压电集成部件的来流风速辨识的误差。1~4 号压电双晶片的函数表达式为

$$U_{krms} = f_k(v, \theta) \quad (7)$$

其中: $k = 1, 2, 3, 4$,即双晶片编号。

实验测得的 U_{krms} 为已知,为求解出 v 和 θ ,联立式(7)得方程组,即方程组共 $C_i^2 = 6$ 组, v 和 θ 分别有 6 组解,分别取其平均值,得到 \bar{v} 和 $\bar{\theta}$ 。风速大小相对误差(relative error,简称 RE)和风向角绝对误差(absolute error,简称 AE)计算公式分别为

$$RE_v = \frac{|\bar{v} - v|}{v} \times 100\% \quad (8)$$

$$AE_\theta = |\bar{\theta} - \theta| \quad (9)$$

风速误差越小,说明测量得到的风速大小和风向角越接近实际值,系统的传感性能越好。

3 讨论与分析

为了获得 $U_{rms} = f(v, \theta)$ 表达式,利用风速辨识系统与信号处理方法获得不同风向角下飞行器头部模型中所有压电双晶片的感应电压(均方根值)与风速之间的关系,如图 6 所示。可以看出,在 θ 一定时,1~4 号压电双晶片中的感应电压信号随着风速的增大而增加,其函数关系近似呈 2 次方的关系,与式(4)输出电荷量是风速大小的 2 次方关系相近似。同样,在 v 一定时,1 号和 2 号的感应电压信号随着风向角的增大而减小,3 号和 4 号的感应电压信号随着风向角的增大而增大,并且也呈近似 2 次方的关系。因此,该函数的最高阶数取为 2,即 $m = n = 2$ 。

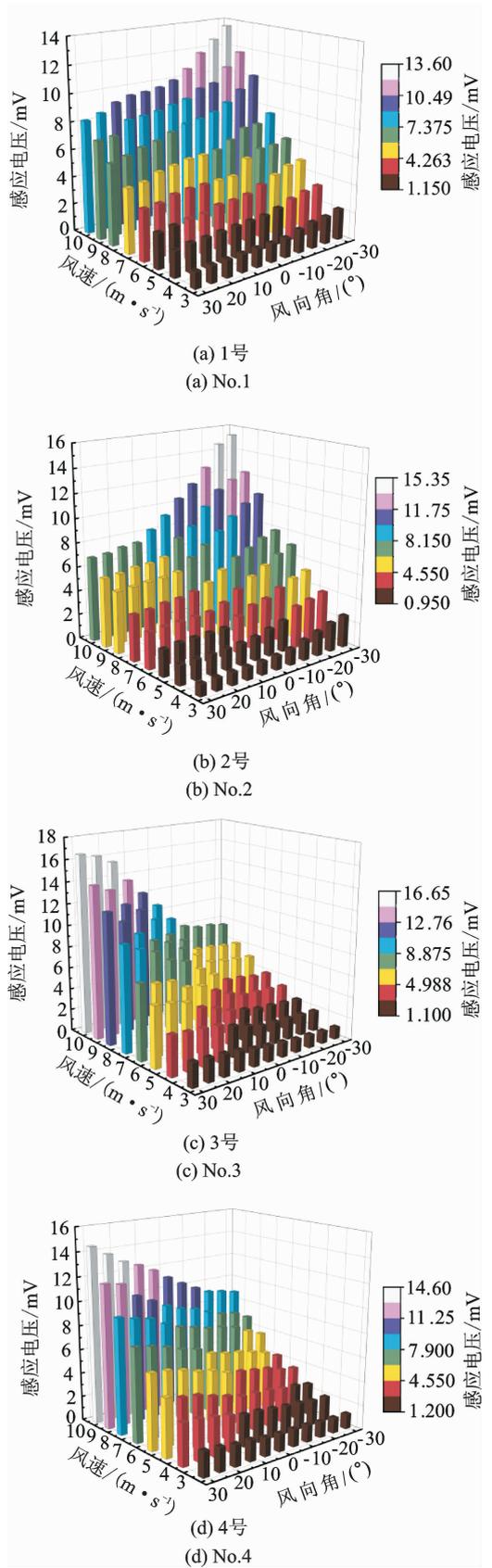


图 6 感应电压(均方根值)与风速大小和风向角之间的关系
Fig. 6 The relationship between response voltage (root mean square) and wind velocity and angle

根据最小二乘法,结合风速大小与风向角与感应电压之间的实验数据,获得压电双晶片各自拟合函数的表达式为

$$\begin{bmatrix} U_{1rms} \\ U_{2rms} \\ U_{3rms} \\ U_{4rms} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.096 & -0.061 & 0.386 & 0.0433 \\ 0.554 & 0.145 & 0.0716 & 0.1635 \\ 0.0507 & 0.073 & 0.0888 & 0.0806 \\ 7.14 \times 10^{-3} & -0.017 & -0.0192 & -2.5 \times 10^{-3} \\ 9.5 \times 10^{-4} & 8.26 \times 10^{-4} & 5.26 \times 10^{-4} & 9.63 \times 10^{-4} \\ -6.65 \times 10^{-3} & 6.14 \times 10^{-4} & 8.17 \times 10^{-3} & 3.3 \times 10^{-3} \\ -1.82 \times 10^{-4} & -1.29 \times 10^{-4} & 1.05 \times 10^{-3} & 6.26 \times 10^{-4} \\ -2.4 \times 10^{-4} & -8.08 \times 10^{-5} & -1.92 \times 10^{-4} & -2.85 \times 10^{-4} \\ 2.52 \times 10^{-5} & 2.03 \times 10^{-5} & 3.76 \times 10^{-6} & 2.48 \times 10^{-5} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ \theta \\ \theta^2 \\ v\theta \\ v^2\theta \\ v\theta^2 \\ v^2\theta^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解式(10),即可求出飞行器头部模型在不同位置下的风速(矢量)精度,如图7所示。采样时间为5s时,最大风速误差为2.38%(位置1),最小风速大小误差为0.5%(位置5);最大风向角误差为2.37(位置7),最小风向角误差为0.55(位置6)。这说明此压电阵列风速辨识系统可以辨识外界环境

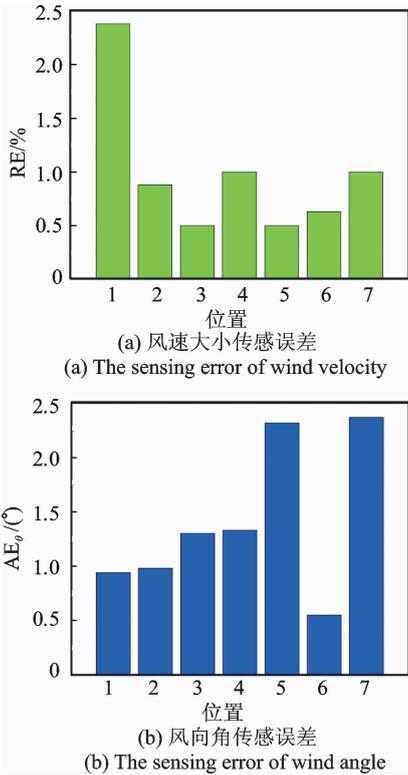


图7 8 m/s 风速下系统的风速传感误差

Fig. 7 The system sensing error of wind velocity at 8 m/s

的风速大小与方向,风速大小精度控制在3%以内,风向角精度控制在3°以内。

以 $\theta = 20^\circ, v = 8 \text{ m/s}$ 时为例,由数据信号处理方法可知,系统的风速传感误差随采样时间变化的关系曲线如图8所示。可以看出,在采样时间大于1s后,系统的风速大小和风向角传感误差都趋于稳定,且分别控制在2%和2°以内。这说明系统的传感性能稳定,时间为1s,满足一般环境下流场感知的应用需求。

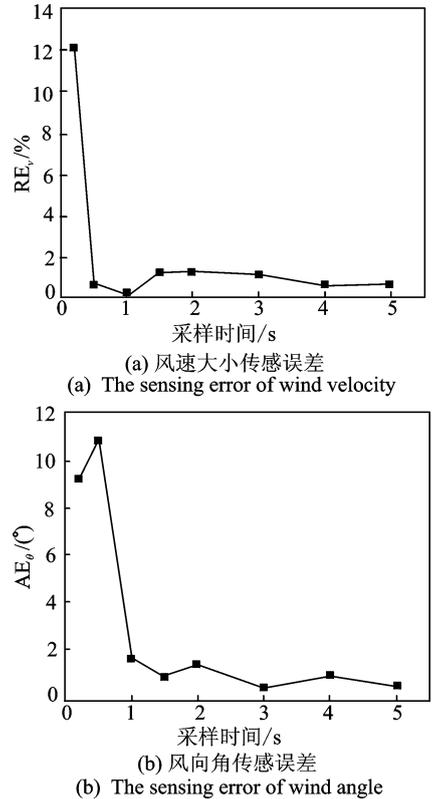


图8 在 $\theta = 20^\circ, v = 8 \text{ m/s}$ 时不同采样时间下系统的风速传感误差

Fig. 8 The sensing error of wind speed under different sampling time at $\theta = 20^\circ, v = 8 \text{ m/s}$

4 结束语

针对飞行器头部模型,提出了一种基于压电双晶片的风速辨识压电集成部件,可实现飞行器外部环境的风速辨识,包括其大小与方向。实验结果表明,此压电集成部件的传感精度在3%(风速大小)和3°(风向角)以内,风速最小误差可达0.5%,风向角最小误差可达0.55°。同时,采样时间大于1s后,系统的风速大小和风向角感知精度可分别控制在3%和3°以内。笔者初步探明了在不同风速大小和方向下感应电压的变化规律,获得了辨识风速的

测量方法,且压电集成部件对飞行器的空气动力学特性影响很小,为研发飞行器传感系统的集成方法奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Park S, Kim S, Kim S, et al. A flow direction sensor fabricated using MEMS technology and its simple inter-face circuit[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, 91(1-3): 347-352.
- [2] Kim S, Nam T, Park S. Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 4(2-3): 312-318.
- [3] Wang Y H, Lee C Y, Chiang C M. A MEMS-based air flow sensor with a free-standing micro-cantilever structure [J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2007, 7(10): 2389-2401.
- [4] Liu Chang. Micromachined biomimetic artificial hair-cell sensors[J]. *Bioinspir Biomim*, 2007, 2(4): S162-S169.
- [5] Dagamseh A M K, Bruinink C M, Droogendijk H, et al. Engineering of biomimetic hair-flow sensor arrays dedicated to high-resolution flow field measurements [C]// *IEEE Sensors 2010 Conference*. Hawaii, USA: IEEE, 2010:2251-2254.
- [6] Marinov A S, Bekov E, Valchev V C. PVDF based wind direction and speed sensor for weather assessment relevant to renewable energy generation [C] // *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Novi Sad, Serbia: EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, 2012; DS1d.4-1-DS1d.4-4.
- [7] Bian Y, Liu R, Huang X, et al. Design and fabrication of a metal core PVDF fiber for an air flow sensor [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(10): 105001.
- [8] 费海平,朱荣,周兆英.微型热式流速传感器及其在微型飞行器翼表流场测量中的应用[J].*传感技术学报*, 2007, 20(5): 1134-1138.
Fei Haiping, Zhu Rong, Zhou Zhaoying. Micro-hot wire/film anemometer and its application in measuring the flow field on the wing of MAVs[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(5): 1134-1138. (in Chinese)
- [9] 刘旭东,朱荣,续立军,等.集成于微型飞行器机翼上的流场传感器测量系统研究[J].*传感技术学报*, 2009, 22(7): 950-954.
Liu Xudong, Zhu Rong, Xu Lijun, et al. Research on flow sensor system integrated with wing of micro air vehicle[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(7): 950-954. (in Chinese)
- [10] 张传忠.压电材料的发展及应用[J].*压电与声光*, 1993, 15(3): 64-70.
Zhang Chuansong. Development of piezoelectric materials and their application [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 1993, 15(3): 64-70. (in Chinese)
- [11] 谢冰,陈昌鑫,郑宾.基于LabVIEW的数据采集与信号处理系统设计[J].*现代电子技术*, 2011, 34(14): 173-175.
Xie Bing, Cheng Changxin, Zheng Bin. Design of data acquisition and signal processing system based on LabVIEW[J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(14): 173-175. (in Chinese)
- [12] 田浩,段丽君.基于LabVIEW的多功能数字滤波器设计[J].*电子测量技术*, 2011, 34(3): 66-70.
Tian Hao, Duan Lijun. Design of multifunctional digital filter based on LabVIEW[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, 34(3): 66-70. (in Chinese)
- [13] 陈政清.工程结构的风致振动、稳定与控制[M].北京:科学出版社,2013:30-31.
- [14] 龚俊杰,许颖颖,阮志林,等.双晶悬臂梁压电发电装置发电能力的仿真[J].*振动、测试与诊断*, 2014, 34(4): 658-663.
Gong Junjie, Xu Yingying, Ruan Zhilin, et al. Simulation on generating capacity for energy harvesting device with piezoelectric bimorph cantilever[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(4): 658-663. (in Chinese)
- [15] 都强,杭柏林.最小二乘法在多传感器测量标定中的应用[J].*传感技术学报*, 2005, 18(2): 244-246.
Du Qiang, Hang Bailin. Application of least squares in multisensor measure specifying[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(2): 244-246. (in Chinese)
- [16] 贾小勇,徐传胜,白欣.最小二乘法的创立及其思想方法[J].*西北大学学报*, 2006, 36(3): 507-511.
Jia Xiaoyong, Xu Chuansheng, Bai Xin. The invention and way of thinking on least squares [J]. *Journal of Northwest University*, 2006, 36(3): 507-511. (in Chinese)



第一作者简介:姚新科,男,1992年6月生,硕士生。主要研究方向为压电传感器件的设计、流场感知及多物理场耦合仿真分析。

E-mail: yaoxinke123@foxmail.com

通信作者简介:彭瀚旻,男,1984年4月生,讲师。主要研究方向为压电换能器理论分析、设计及应用。

E-mail: penghm@nuaa.edu.cn

