

三自由度介电型 EAP 软材料位置传感器研究

陈峰洪¹, 王化明¹, 李鹭扬², 汪 洋¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225000)

摘要:基于介电型电活性聚合物(EAP)变形时的电容值变化原理,设计并实现一种三自由度软材料位置传感器,其内框可沿平面和法向移动,分别用于检测平面和法向位移。建立该传感器的几何模型,推导出其电容值变化和内框位移的关系。采用差分法测试该传感器的电容值变化,分析了面对面两个传感单元的电容值差和内框的平面位移、单个传感单元的电容值和内框的法向位移之间的关系,测试得到其平面和法向位移灵敏度分别为66.69 pF/mm、0.47 pF/mm²,与理论分析结果较吻合。该位置传感器的理论与测试分析结果验证了介电型 EAP 应用于位置传感器中的可行性。

关键词:介电型电活性聚合物(EAP);位置;传感器;几何模型;差分测量

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A

Research on Three-Degree-of-Freedom Dielectric Electroactive Polymer Soft Position Sensor

CHEN Fenghong¹, WANG Huaming¹, LI Luyang², WANG Yang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aero. & Astro., Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

Abstract: Based on capacitance change principle of dielectric electroactive polymer (EAP), a 3-DOF soft position sensor is designed and implemented. The inner frame of the sensor can translate in in-plane and out-of-plane directions, which are used to measure the plane and normal displacement respectively. A geometrical model of the proposed sensor is developed and the relationship between the capacitance of the sensor and the displacement of the inner frame are deduced. A differential approach is used to measure the variation of the capacitance of the sensor, and the relationship between the capacitance difference of two opposite sensing cells and the in-plane displacement of the inner frame as well as the relationship between the capacitance of single cell and the out-of-plane displacement of the inner frame are analyzed. The measured in-plane and out-of-plane displacement sensitivity are of 66.69 pF/mm and 0.47 pF/mm² respectively, which agree well with the analytical results. The theoretical and experimental analyses verify the feasibility of the application of dielectric EAP to the position sensors.

Key words: dielectric EAP; position; sensors; geometrical model; differential measurement

0 引言

近年来,研究发现介电型弹性体(DE)在驱动和传感等方面有广泛的应用前景^[1-2]。在驱动方面,DE驱动器在人造肌肉、集成气体阀门和触觉设备^[1-2]等方面展现出良好的应用前景。在传感方面,DE可用于监测人体运动^[3]、健康^[4]和血压^[5],提高汽车座椅舒适性,测量人体对座椅的压力分布^[6]、对

平板电脑、智能手机触摸屏的触觉反馈等。利用压阻效应^[7]或者压容效应^[8]制作而成的人造皮肤证明在单一的软体装置中可实现多自由度的触觉反馈。一种典型的DE传感器结构类似三明治^[9],中间层是薄膜,上、下层是电极,当薄膜受到外力变形时会引起电容变化,建立电容-变形关系就可测得变形量。利用这种原理还可以建立电容-位移关系实现

收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305209);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130979);江苏省“六大人才高峰”基金资助项目(2014-ZBZZ-004);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfj20150516)

作者简介:陈峰洪(1991-),男,浙江人,硕士生,主要从事软材料传感的研究。通信作者:王化明(1973-),男,教授,博士,主要从事介电型EAP驱动与传感技术的研究。E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn.

位移测量,可用于磁共振成像(MRI)导杆位置检测^[10]。其缺点是当变形量不大,电容值变化不明显,因此需要设计提高其灵敏度的结构。

针对多自由度的软测量要求,基于介电型电活性聚合物(EAP)(DE的一种)应变大、柔性好和质量小^[11]等优点,设计了一种软材料位置传感器,其结构简单,可实现三自由度位置测量。对传感器进行几何分析,建立电容值变化和位移的关系,并进行测试分析。通过理论数值分析和试验结果相对比,验证模型的合理性及介电型EAP应用于传感器中的可行性。

1 传感器的工作原理和结构设计

1.1 工作原理

介电型EAP本质上是一种超弹性绝缘膜材料,在其上、下表面涂上可随动的柔性电极层,这样介电型EAP可等效成一个平行板可变电容。上、下两层电极相当于可变电容的两个极板,EAP薄膜相当于该可变电容的电介质。根据平行板电容公式,其电容值为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{t} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空中绝对介电常数; ϵ_r 为EAP薄膜的相对介电常数; A 为电极的面积; t 为EAP薄膜的厚度。当EAP薄膜受到外力变形时,其 A 和 t 都会发生变化,则其电容值也会变化。因此,根据电容值的变化可推算出EAP膜的变形,利用此原理可设计位置传感器。

1.2 结构设计

图1为传感器结构。传感器主要由内、外框和涂有柔性电极的介电型EAP薄膜组成,其中外框固定,内框带着EAP薄膜移动。薄膜等分为4个梯形区域,在其上、下表面分别涂上柔性电极形成4个梯形传感单元A、B、C和D。当内框分别沿 x 轴或 y 轴产生位移时,面对面的两个单元A和C或单元B和D的电容值会发生变化,因此可采用差分测试法分别得到沿 x 轴或 y 轴的位移,以消除测试误

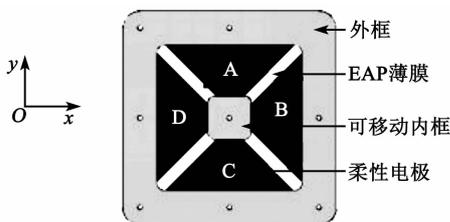


图1 传感器的结构

差。由于结构的对称性,可测试任一个单元的电容值获得沿 z 轴的位移。

2 传感器分析及参数确定

2.1 单个传感单元的几何建模分析

为获得结构参数对传感器的性能影响,对传感单元进行几何建模分析。取任意一个梯形传感单元分析(这里取单元C),如图2所示。该单元电容值 C 与其几何形状和EAP薄膜的参数有关,由式(1)可得

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(b_1 + b_2)h}{2t} \quad (2)$$

式中: h 为梯形的高; b_1 为上底长; b_2 为下底长。

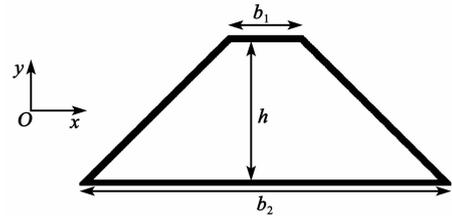


图2 梯形电极的几何变量

上、下底分别固定在刚性的内、外框上,因此保持不变。梯形单元 C 的面积只与 h 有关,而 h 变化只与内框沿 y 轴位移有关。EAP薄膜是一种超弹性材料,其体积模量很大,因此可认为其不可压缩,即体积不变。当薄膜被拉伸,其厚度变小,面积变大。因此, C 可表示为

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{b_1 + b_2}{2h_0 t_0} h^2 \quad (3)$$

式中: h_0 为单元 C 的初始高度; t_0 为EAP薄膜的初始厚度。在传感单元确定后,则 $k = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{b_1 + b_2}{2h_0 t_0}$ 为常数。由式(3)可知, C 与 h 的平方成正比,如图3(a)所示。当内框沿 x 轴平移,引起单元 C 的形状变化如图3(b)所示。由图可见,剪切变形不会引起该单元的面积变化,故该单元电容不会发生变化。

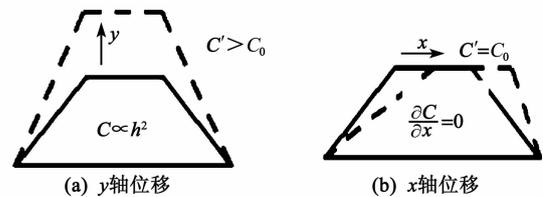


图3 电容随内框位移变化

2.2 xOy 平面内自由度分析

根据差分测试法分析面对面单元A和C的电容值差,如图4所示(B、D分析类似)。每个单元高

度 h_i 可由其初始高度 h_0 和内框沿 y 轴平移距离 y 表示。

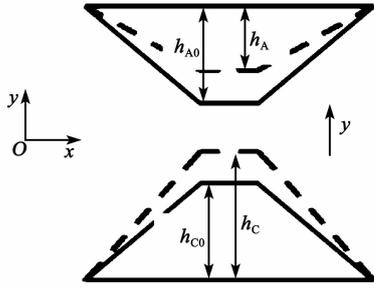


图4 用于差分测量的面对面两个单元

$$h_A = h_{A0} + y \quad (4)$$

$$h_C = h_{C0} - y \quad (5)$$

式中: h_A 为单元 A 的高度; h_C 为单元 C 的高度; h_{A0} 为单元 A 的初始高度; h_{C0} 为单元 C 的初始高度。两个单元电容值差 ΔC 可表示为

$$\Delta C = C_A - C_C = 2(k_A + k_C)y + (k_A - k_C)y^2 + \Delta C_0 \quad (6)$$

式中: $\Delta C_0 = (C_{A0} - C_{C0})$ 为 A、C 单元初始电容值差; k_A 为单元 A 的系数; k_C 为单元 C 的系数。假设这两个单元的结构参数相同, 那么 $k_A = k_C = k$; $h_{A0} = h_{C0} = h_0$, 则其 ΔC 为

$$\Delta C = \frac{2(b_1 + b_2)\epsilon_r\epsilon_0}{t_0}y \quad (7)$$

由式(7)可看出, 当面对面两个单元参数相同时, 其电容值差与内框沿 y 轴位移成线性关系。此外, 为了减小式(6)中非线性项 $(k_A - k_C)y^2$ 的影响, 4 个单元的系数 k_i 要尽可能接近。由于 4 片电极是涂在同一片预拉伸的 EAP 薄膜上, 因此, ϵ_r 和 t_0 都相同, 要使 k_i 接近, 尽可能地使 4 个单元的 b_1 、 b_2 和 h_0 接近。

为了进一步分析制作过程中 b_1 、 b_2 和 h_0 对 ΔC 的影响, 记 $b = (b_1 + b_2)/2$, 式(6)对 y 求偏微分可得差分单元的灵敏度为

$$\frac{\partial \Delta C}{\partial y} = \frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{t_0} \left[b_A + b_C + \left(\frac{b_A}{h_{A0}} - \frac{b_C}{h_{C0}} \right) y \right] \quad (8)$$

式(8)表明, 若要尽可能减小非线性影响, 在制作过程中应尽可能减小 b/h_0 的值。要增大灵敏度, 应尽可能提高 b 和 ϵ_r , 降低 t_0 。

2.3 沿 z 轴自由度分析

当内框沿 z 轴平移时, 4 个传感单元都被等量地拉伸, 由于结构对称, 任取其中一个单元分析(这里取单元 C)。薄膜实际变形如图 5(a)所示, 为了方

便求解变形后单元 C 的面积, 认为梯形薄膜变形后仍是梯形。图 5(b)为近似分析的外形。下面分析梯形单元 C 的电容值 C 和内框沿 z 轴位移 z 的关系。

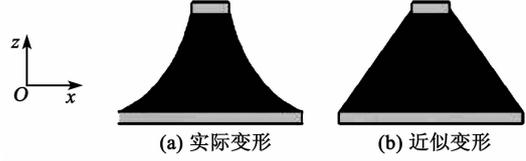


图5 薄膜变形

$$h = \sqrt{h_0^2 + z^2} \quad (9)$$

将式(9)代入式(3)可得

$$C = \epsilon_r\epsilon_0 \frac{b_1 + b_2}{2h_0t_0}z^2 + C_{C0} \quad (10)$$

式中 C_{C0} 为梯形单元 C 的初始电容值。

由式(10)可看出, C 与位移 z^2 成正比。单元 C 的电容值 C 的灵敏度可由式(10)对位移 z 的偏微分求出, 即

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{(b_1 + b_2)\epsilon_r\epsilon_0}{h_0t_0}z \quad (11)$$

由式(11)可知, 该传感器的灵敏度和内框沿 z 轴位移有关。要提高灵敏度, 应尽可能提高 ϵ_r 、 b_1 和 b_2 , 降低 t_0 及 h_0 。

2.4 连带运动分析

对于单个传感单元, 其连带运动主要包括绕 x 、 y 和 z 轴旋转。

当内框绕 x 、 y 轴旋转, 由于结构对称, 可任取一种分析(这里取绕 x 轴分析, 如图 6 所示)。4 个梯形单元都被等量地拉伸, 梯形高度变化:

$$\Delta h = \sqrt{\left(h + \frac{c_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{c_i}{2}\right)^2} - 2\left(h + \frac{c_i}{2}\right)\frac{c_i}{2}\cos\theta - h \quad (12)$$

从式(12)可看出, 要降低绕 x 、 y 轴旋转运动的影响, 梯形单元的初始高度 h_0 要尽可能大, 内框边长 c_i 要尽量小。

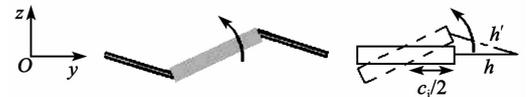


图6 内框绕 x 轴旋转

由于内框绕 z 轴小幅度旋转, 单元的面积几乎保持不变, 故其电容值几乎不变。与绕 x 、 y 轴旋转类似, 增大梯形单元 h_0 和减小 c_i 有利于降低绕 z 轴运动的影响。

综上连带运动分析,为了尽可能降低连带运动对试验影响,梯形电极单元 h_0 应尽可能大, c_1 尽可能小。

2.5 几何参数确定

通过以上的分析可得到电极单元的几何参数确定原则:

1) 尽可能提高薄膜的 ϵ_r 、单元的下底长 b_2 和外框边长 c_0 ,降低膜的初始厚度 t_0 。

2) 单元的 h_0 确定需要综合考虑连带运动、灵敏度、线性度、薄膜所允许拉伸率和内框移动的范围等方面。

3) 单元的上底长 b_1 和 c_1 较小,同时考虑线性度、灵敏度和连带运动等方面。

本试验以 3M 公司生产的 VHB4910、预拉伸率为 4×4 的单层膜作为传感单元的制作材料。设 $c_1 = 25 \text{ mm}$, $c_0 = 75 \text{ mm}$ 。传感器的最终几何参数如表 1 所示。 $\epsilon_r = 3.21^{[12]}$, 并认为在拉伸过程中保持不变。理论计算可得:每个单元的初始电容值 C_0 都为 613 pF ,每个差分单元的灵敏度都是 81.8 pF/mm (见表 2),单个传感单元沿 z 轴平移灵敏度是 0.681 pF/mm^2 (见表 3)。

表 1 传感器的几何参数

b_1/mm	b_2/mm	h_0/mm	t_0/mm	c_1/mm	c_0/mm
15	75	30	0.06	25	85

表 2 在 xOy 平面理论结果

单元对	$\omega/(\text{pF/mm})$	$\mu/(\text{pF/mm})$	η/pF
AC	0	-81.8	0
BD	-81.8	0	0

表 3 沿 z 轴标定结果及理论结果

单元	标定值 $\alpha/(\text{pF/mm}^2)$	理论值 $\alpha/(\text{pF/mm}^2)$	标定值 ζ/pF	理论值 ζ/pF
A	0.471	0.681	561	613
B	0.479	0.681	594	613
C	0.462	0.681	588	613
D	0.468	0.681	559	613

3 传感器实现及测试分析

3.1 传感器的制作

传感器样机如图 7 所示。首先将预拉伸的 EAP 薄膜分别固定在外框和内框上,然后将由碳

粉、硅油和正庚烷混合配比而成的柔性电极均匀地涂抹在薄膜的两面。

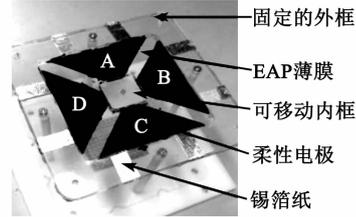


图 7 传感器样机

3.2 在 xOy 平面内平移测试分析

图 8 为测量传感器内框位移的装置。该装置利用圆孔网格夹具把内框锁定在平面上某一位置来模拟该传感器的具体位置。为使弹性膜能充分舒张,内框锁定一定时间后再用 LCR 数字电桥先后测量各传感单元的电容值。

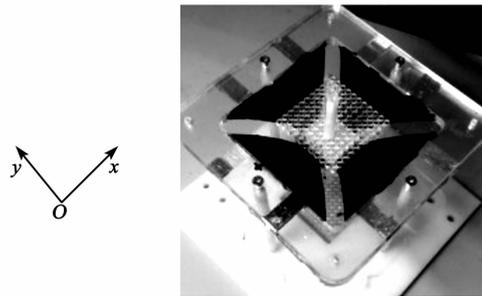


图 8 用于内框位置固定的网格夹具

图 9 为单元 A、C 的 ΔC 与内框沿 x 、 y 轴位移的关系图。图 10 是其二维投影的结果。由图 10 可见, ΔC 与内框沿 y 轴的位移 y 成线性关系,与沿 x 轴的位移 x 无关,这与式(7)较吻合。

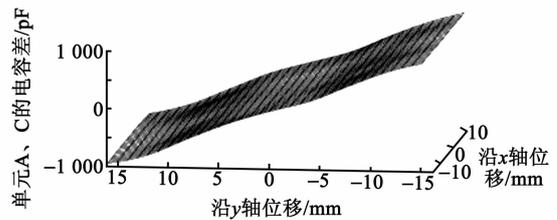


图 9 单元 A、C 的电容差和内框位移的关系

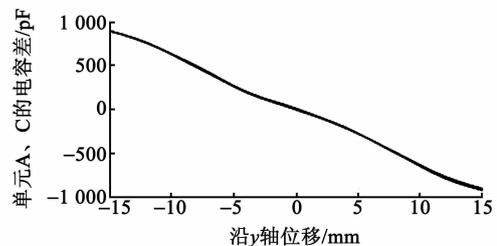


图 10 单元 A、C 的电容差和内框沿 y 轴位移的关系

由图 10 可看出,曲线在 $y = 12 \text{ mm}$ 和 $y = -12 \text{ mm}$ 时有一个突变,这是因为内框在平面内移动时位移过大导致 EAP 薄膜起皱(见图 11),从而电极单元实际面积无法缩小。

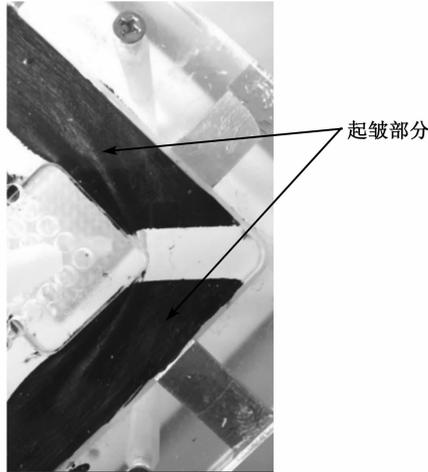


图 11 EAP 薄膜起皱

利用最小二乘法拟合平面上内有效点来标定一对差分电极单元(这里去除内框沿坐标轴位移大于 12 mm 的点),即

$$\Delta C(x, y) = \omega x + \mu y + \eta \quad (13)$$

得到表 4 所示的标定结果。对比理论计算结果(见表 2)可看出, BD 差分单元的 ω 和 AC 差分单元的 μ 与理论计算的结果非常接近。BD 的 μ 和 AC 的 ω 几乎为 0, 接近理论值, 结果不为 0 的原因可能是在测试过程中网格夹具与传感单元内框未完全对齐导致内框和夹具产生微小的错位和相对转动。若两个差分单元分别和对应的坐标轴严格对齐, 利用 AC 差分单元测量沿 y 轴位移, BD 差分单元测量沿 x 轴位移, 从而可测出内框在平面内的位移。

表 4 在 xOy 平面标定结果

单元对	$\omega / (\text{pF}/\text{mm})$	$\mu / (\text{pF}/\text{mm})$	η / pF
AC	-1.10	-65.14	-27
BD	-68.25	1.50	35

3.3 沿 z 轴平移测试分析

图 12 为测试沿 z 轴平移的装置。通过螺杆旋转带动传感单元内框沿 z 轴平移, 螺杆和网格夹具之间用螺纹连接, 每次移动指定距离后螺杆自锁从而使内框固定。图 13 为电极单元 C 的电容值 C 与内框沿 z 轴位移 z 之间的函数关系图。由图可看出, C 与沿 z 轴位移 z 大致成二次函数, 这与之前的

理论数据较吻合。

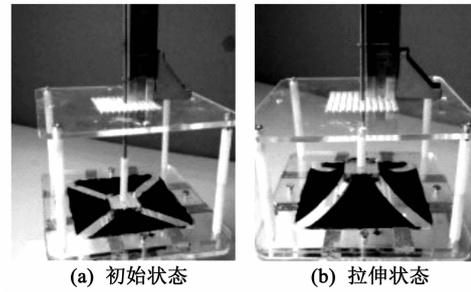


图 12 沿 z 轴位移测试装置

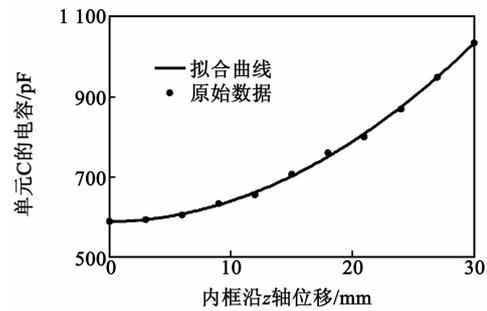


图 13 单元 C 的 C 和内框沿 z 轴位移的函数关系
同样, 利用最小二乘法来拟合标定

$$C(z) = \alpha z^2 + \zeta \quad (14)$$

所得标定结果及理论结果如表 3 所示。

3.4 电容理论值与实际值误差分析

由式(1)可知, 电容值与电极有效正对面积 A 和薄膜厚度 t 有关。误差产生的原因如下:

- 1) EAP 薄膜厚度 t 无法达到均匀变化。
- 2) EAP 薄膜上的 4 个传感单元理论上无法完全一致, 从而产生初始电容差。此外, 在涂抹过程中, 薄膜上、下两片电极并非严格对齐, 导致其电极有效正对面积减小。
- 3) EAP 薄膜上每个传感单元的电极覆盖率无法达到理论上的 100%。实际情况下, 由于 EAP 薄膜上、下表面的电极不能完全随着 EAP 薄膜的变形而变形, 电极间会出现裂纹, 导致其有效正对面积 A 低于理论值, 且随着薄膜变形的增大, 对 A 的影响会越大。因此, 实测的电容值会比理论值偏小, 并随着变形的增加, 两者之间的误差会逐渐增大。

4) 在变形过程中, EAP 薄膜各处变形不均匀, 靠近内框的位置变形大, 远离内框的位置变形小, 故单元变形后不是严格的梯形。此外, 薄膜相对介电常数会随着薄膜变形而变化。

4 结束语

设计了一种由介电型 EAP 薄膜制作而成的三自由度软材料位置传感器,能用于测试平面内位移和法向位移。针对该传感器建立其几何模型,研究其变形规律和设计参数对其灵敏度、线性度和误差等参数的影响,并采用差分测试法测试平面内的平移运动。综合考虑灵敏度、线性度和连带运动等方面要求,设计传感器的相关参数。在此基础上制作了由 4 个梯形传感单元组成的传感器样机并测试其性能。通过测试标定结果显示该传感器在 x 、 y 和 z 轴灵敏度分别为 68.25 pF/mm、65.14 pF/mm 和 0.47 pF/mm²。试验结果验证了模型的合理性。

此外,通过优化几何参数、改变电极涂抹形状、使用多层电极等方式可提高传感器的灵敏度和精度,这表明介电型 EAP 在多自由度位置传感方面有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] BROCHU P, PEI Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2010, 31(1):10-36.
- [2] MCKAY T G, O'BRIEN B M, CALIUS E P, et al. Soft generators using dielectric elastomers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(14):142903-142903-3.
- [3] PELRINE R E, KORNBLUH R D, PEI Q, et al. Electroactive polymer sensors; US, 6809462 B2[P]. 2004-10-26.
- [4] LAFLAMME S, KOLLOSCH M, CONNOR J J, et al. Soft capacitive sensor for structural health monitoring of large-scale systems[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2012, 19(1):70-81.
- [5] ISKANDARANI Y, KARIMI H R. Sensing capabilities based on dielectric electro active polymers-feasibility and potential state-of-the-art application[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2012, 12(8):2616-2624.
- [6] TAN H Z, SLIVOVSKY L, PENTLAND A. A sensing chair using pressure distribution sensors [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001, 6(3):261-268.
- [7] PARK Y L, CHEN B R, WOOD R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2012, 12(8):2711-2718.
- [8] ULMEN J, CUTKOSKY M. A robust, low-cost and low-noise artificial skin for human-friendly robots [C]//S. l. : IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010:4836-4841.
- [9] CARPI F, ROSSI D D, KOMBLUH R, et al. Dielectric elastomers as electromechanical transducers[M]. Oxford:Elsevier, 2008:3-13.
- [10] GIRARD A, BIGUE J P L, O'BRIEN B M, et al. Soft two-degree-of-freedom dielectric elastomer position sensor exhibiting linear behavior [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1):105-114.
- [11] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. *Science*, 2000, 287(5454):836-839.
- [12] 袁同燕. 介电型 EAP 发电特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [9] ZHOU X S, ZHAO C, HOU R, et al. Sputtered ZnO film on aluminium foils for flexible ultrasonic transducers[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7):1991-1998.
- [10] MASTRONARDI V M, GUIDO F, AMATO M, et al. Piezoelectric ultrasonic transducer based on flexible AlN [J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 121:59-63.
- [11] SHIH J L, WU K T, JEN C K, et al. Applications of flexible ultrasonic transducer array for defect detection at 150 °C [J]. *Sensors*, 2013, 13(1):975-983.
- [12] 利萨·格迪斯. *Mems 材料与工艺手册*[M]. 黄庆安, 译. 南京:东南大学出版社, 2014.
- [13] SINGH J, ZHANG X L, HUI K S, et al. Structural and optical characterization of high-quality ZnO thin films deposited by reactive RF magnetron sputtering [J]. *Materials Research Bulletin*, 2013, 48(5):2010-2010.
- [14] CEBULLA R, WENDT R, ELLMER K. Al-doped zinc oxide films deposited by simultaneous rf and dc excitation of a magnetron plasma: Relationships between plasma parameters and structural and electrical film properties[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(2):1087-1095.
- [15] 王然龙, 阮海波. 柔性 ZnO 基透明导电薄膜的研究进展 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2015(5):33-40. WANG Ranlong, RUAN Haibo. Progress of ZnO-based transparent conductive films deposited on flexible substrate[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2015(5):33-40.

(上接第 854 页)