

文章编号 1004-924X(2014)08-2151-08

基于电活性聚合物薄膜柔性器件的 触觉传感特性

张冬至*, 童俊, 刘哲, 夏伯锴

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:针对电活性聚合物(EAP)薄膜制造柔性智能器件的发展要求,分析了电活性聚合物薄膜的正/逆力-电特性及发电机理,采用静电诱导自组装技术在电活性聚合物表面制备了碳纳米管薄膜电极,然后构建了柔性传感器件。实验研究了EAP柔性器件的手指关节弯曲姿态及脚踏运动触觉的传感特性。扫描电子显微(SEM)形貌观察表明:碳纳米管薄膜呈网状结构且质地致密均匀。基于EAP柔性器件的手指弯曲姿态实验结果表明:在手指弯曲度为 $15\sim 90^\circ$ 时,输出电压峰值为 $1.2\sim 3.7$ V,展示了输出电压峰值与手指弯曲度之间的高线性度,线性相关系数为0.9951。此外,采用EAP薄膜器件对踏步触觉进行了实验测试,其输出电压峰值在1 V左右,而且具有响应快、可重复性好等优势。本文的研究为电活性聚合物薄膜型电子皮肤及触觉传感器的发展提供了理论基础和实验依据。

关键词:电活性聚合物薄膜;柔性器件;碳纳米管;手指弯曲姿态;触觉传感

中图分类号:TP212.1;TB381 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2151

Tactile sensing characteristics of electroactive polymer film based flexible devices

ZHANG Dong-zhi*, TONG Jun, LIU Zhe, XIA Bo-kai

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum
(East China), Qingdao 266580, China)

* Corresponding author, E-mail: dzzhang@upc.edu.cn

Abstract: According to the development requirements of Electroactive Polymer (EAP)-based flexible and intelligent devices, the positive/inversive electro-mechanical properties of an EAP film and its electric power generation were proposed. A carbon nanotube-based flexible film electrode was fabricated on the EAP surface by using electrostatic-induced self-assembly technology, then a flexible sensing device was manufactured. The sensing characteristics for EAP under finger-bending gesture and a pedal touch test were investigated. The morphological observation by a scanning electron microscopy shows the carbon nanotube film to be high strength, dense and random network structures. The measurement of finger-bending gesture illustrates that the output voltage peak is in the range of $1.2\sim 3.7$ V under finger-bending angle of $15\sim 90^\circ$, and also indicates the high linearity between output

收稿日期:2013-11-20;修订日期:2014-01-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51205414);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(No. BS2012DX044);青岛市科技发展计划资助项目(No. 13-1-4-179-jch);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 12CX04065A, No. 13CX06143A).

voltage peak and finger-bending angle with linear correlation coefficient of 0.9951. Furthermore, experimental result of EAP film device under the pedal touch shows that the output voltage peak is about 1 V with advantages of swift response and good repeatability. This work can provide the theoretic foundation and experimental supports for EAP-based electronic skin and tactile sensors.

Key words: electroactive polymer film; flexible device; carbon nanotube; finger-bending gesture; tactile sensing

1 引言

电活性聚合物 (Electro-Active Polymer, EAP) 是一种新型高分子智能材料, 因其独特的电学及机械性能使其在智能驱动与传感、能量存储、生物医疗等领域的应用需求日益增加。在外场作用下, 电活性聚合物能够产生机械能与电能之间的相互转换, 即正/逆压电效应。在 EAP 表面施加压力作用时, 因其电偶极矩压缩而在其表面上产生电荷极化, 可用于制作压电传感器和能量收集器等。反之, EAP 在施加电场作用下产生弯曲、收缩、膨胀等形变并产生力学响应, 可用于实现压电执行器和谐振器等。该类材料具有卓越的柔韧性, 并具有较高的机电转换效率, 易于成形且不易疲劳损坏, 从而可以取代传统材料大量应用于柔性驱动装置^[1-3]、微机电系统 (MEMS)^[4-5]、仿生肌肤等领域^[6-7]。以高分子聚合物为主要结构材料, 不仅重量轻、能耗低, 生物兼容性优于半导体材料, 且加工不需使用半导体加工设备, 制造成本较低, 是未来新一代柔性传感器、驱动器发展的一个重要方向^[8-9]。近几年, 基于电活性聚合物的传感器、发电装置及驱动器的研究有了长足的进步, 在实验室展示了电活性聚合物智能器件的潜在应用。如澳大利亚 Alici G 等利用 EAP 薄膜制作的机械传感器, 并测量了薄膜电压和电流的低频响应^[10], 韩国 Kim G H 基于 EAP 复合物材料研制的触觉传感器, 可应用于生物医学领域^[11], 美国斯坦福研究院研发的波浪发电装置^[12]和足底发电机^[13], 德国 Claire Jean-Mistral 等研制的膝关节能量收集装置^[14], 国内西安交通大学庞宣明等^[15]采用 EAP 材料制作微泵致动器应用于微流体系统, 同济大学宋德朝等开展了 EAP 微型发电机的研究^[16-18]。

基于电活性聚合物材料的诸多优越性能, 在多功能和微纳智能器件开发等领域具有重要的研

究价值, 是目前国内外十分活跃的研究领域。然而, 在柔性薄膜传感器、发电装置及驱动器等方面的研究尚处于起步阶段。随着小型化及可穿戴、可折叠柔性电子器件概念的提出, 在智能材料 EAP 上下表面制备柔性电极作为传感元件, 尤其适用于可穿戴织物、环境监测和人体运动监测等。自日本科学家 S. Iijima 发现碳纳米管 (CNTs) 以来, 因其具有 $1\ 000\sim 10\ 000\ \text{s/cm}$ 的高电导系数, 载流子容量达 $109\ \text{Acm}^{-2}$, 拉伸强度在 60 GPa 以上而成为制备柔性电极薄膜的理想材料^[19-21]。本文采用电活性聚合物材料中的一种铁电高分子聚合物——聚偏氟乙烯为基体, 提出静电诱导自组装方法, 在其表面制备碳纳米管薄膜电极, 对电极薄膜制备及其性能进行表征, 并构造柔性薄膜传感器件, 用于对人体运动特性的检测。基于手指关节运动姿态及脚踏触觉特性的实验测试, 充分表明该传感器件的有效性和新颖性, 柔韧耐用易于制作, 工作稳定可靠, 取得了较好的实验结果, 对于推动电活性聚合物在人工皮肤及触觉传感器领域的产业化应用具有重要意义。

2 EAP 薄膜特性及传感机理

电活性聚合物是一类在外场 (如外电场、压力等) 激励下能够产生显著机械形变或电信号的智能材料。图 1 所示为 EAP 聚合体的正逆力-电特性原理, 展示了 EAP 具备的发电和电致活性功能。设处于自由状态的聚合体极化方向如图 1 (a) 所示, 当聚合体受平行极化方向的压缩作用时, 聚合体将产生压缩形变, 体内的正负束缚电荷之间的距离变小, 极化强度也变小, 吸附在电极上的部分自由电荷被释放, 产生与极化电压极性相同的电压, 如图 1 (b) 所示; 反之, 当聚合体受平行极化方向的拉伸作用时, 聚合体将产生伸长形变, 体内的正负束缚电荷之间的距离变大, 极化强度也变大, 电极上将吸附更多的自由电荷, 产生与极

化电压极性相反的电压,如图 1(c)所示。这种由机械形变效应转变为电效应,体现了聚合体的发电性能。当聚合体受到与极化电压同极性的电场作用时,聚合体极化强度增大,体内正负束缚电荷之间距离增大,即聚合体沿平行极化方向发生伸长形变,如图 1(d)所示;当聚合体受到与极化电压反极性电场作用时,聚合体极化强度减弱,体内正负束缚电荷之间距离减小,即聚合体沿平行极化方向发生缩短形变,如图 1(e)所示。这种由电场效应转变为力学效应,体现了聚合体的电致活性。

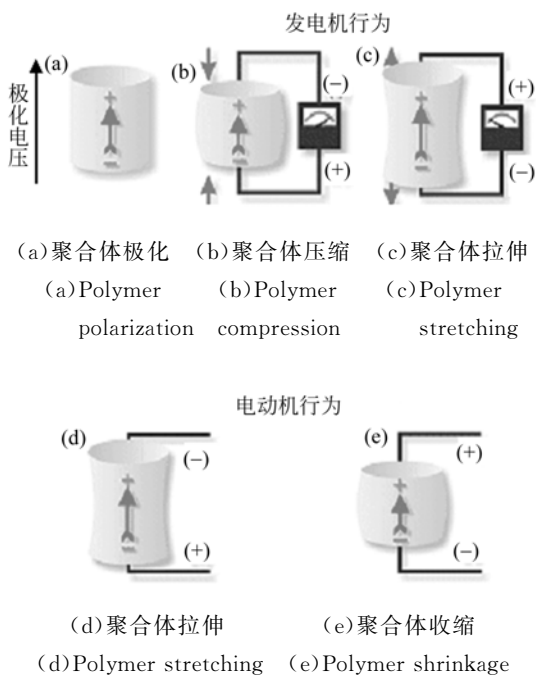


图 1 EAP 聚合体的正逆力-电特性示意图

Fig. 1 Sketch of positive/inverse force-electricity characteristics for EAP

电活性聚合物薄膜由 EAP 膜型芯层材料与均匀覆盖在其上下表面的电极共同构成,其发电机理等同于可变电容发电。由电活性聚合物薄膜组成的平板电容在外力作用下产生形变时,电容发生改变,可把上下表面沉积柔性电极的电活性聚合物等效为可变平板电容器,其电容为^[16]:

$$C_{EAP} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{h}, \quad (1)$$

其中: A 为柔性电极表面积, $\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$ 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; h 为电力线方向的材料厚度。由于电活性聚合物具有不可压缩性,设其体积为 P ,将 $P = Ah$ 带入上式,得:

$$C_{EAP} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A^2}{P}. \quad (2)$$

采用第一类压电方程描述 EAP 薄膜电荷输出量与应变的关系, EAP 作为传感元件时,没有外加电场作用下,压电方程可表述为:

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (i=1\sim 3, j=1\sim 6), \quad (3)$$

其中: D_i 为面电荷密度矩阵, d_{ij} 为 EAP 薄膜压电系数, T_j 为薄膜应力, $i=1\sim 3$ 为极化方向, $j=1\sim 6$ 表示受力方向。设 EAP 介质初始贮能为 0, 其电荷输出是它所有方向的应变在极化方向上作用的响应,考虑 EAP 器件的泄漏电荷,其电荷输出的动态方程为:

$$Q(t) = \sum d_{ij} \sigma_j A - \int_0^t \frac{Q(t)}{RC} dt, \quad (4)$$

式中: σ_j 为薄膜承受的应力, R 和 C 分别为电路等效电阻和电容。在作为传感元件时,考虑到 EAP 薄膜在厚度方向上的尺寸远远小于另外两个方向上的尺寸,其厚度方向受压力 $F = \sigma A$ 作用,在面积方向伸展,则有:

$$Q(t) = d_{33} F e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (5)$$

式中: d_{33} 为纵向压电系数 (C/N), F 为薄膜承受的外力 (N), σ 为薄膜承受的应力 (N/m²)。当有压力作用于 EAP 薄膜时,产生的电荷量会先达到一个峰值,之后按时间常数 $\tau = RC$ 指数规律衰减,这是由放大电路的泄露造成的。

EAP 薄膜作为传感元件,可视为电荷发生器,设置前置电荷放大器,将高阻抗信号输入转化为低阻抗信号输出,以便于后级仪器的检测,其电路设计如图 2 所示。EAP 薄膜与电容 C_0 并联通过由运算放大器构成的电压跟随器,将微弱的电荷信号转换为电压信号,由数据采集仪(安捷伦 34970A)采集后经过 RS232 总线输入到计算机中。运算放大器的输入阻抗在 $10 \text{ G}\Omega$ 左右,可以与 EAP 的薄膜的阻抗匹配,达到高阻抗输入变为低阻抗输出的目的,并且可以提高测量回路的放电时间常数,减少电荷的放电回路泄漏,提高检测精度。

EAP 薄膜在受力作用下经由前置放大器测得的电压信号^[22]:

$$U_{out} = \frac{Q}{C_0 + C_{EAP}}, \quad (6)$$

其中: Q 为 EAP 薄膜产生的电荷量, C_{EAP} 是电活性聚合物薄膜的等效电容, C_0 为与 EAP 薄膜并

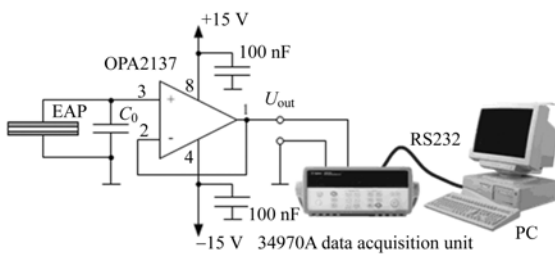


图 2 测量电路的设计

Fig. 2 Design of measuring circuit

联的匹配电容。由此可见,电荷放大器的输出电压和电荷量成正比,而电荷量峰值与作用在 EAP 上的压力成正比。因此,电路输出的电压峰值与作用在 EAP 上的力的大小成正比关系。

3 电极制备与表征

采用静电自组装碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)薄膜的方法制备柔性电极,不依赖特定的设备且工艺简单、方法灵活、易于操作。采用美国精量公司生产的 EAP 材料中的铁电高分子聚合物——聚偏氟乙烯为基体,采用逐层自组装工艺制备碳纳米管薄膜柔性电极,其制备工艺如图 3 所示。所用碳纳米管由化学气相沉积法制备,纯度大于 90%。将 CNTs 浸泡在浓硫酸和浓

硝酸按体积比 3 : 1 配制的混合浓酸中 110 °C 加热、140~150 r/min 搅拌 1 h;再将溶液用去离子水稀释,经 0.22 μm 微孔过滤膜过滤至 pH5。然后置于超声波振荡器中分散 1 h,最后离心处理 15 min 除杂质,取上清液集分装备用。聚电解质溶液分别为聚阳离子电解质 PDDA 和聚阴离子电解质 PSS 溶液,购自 Sigma-Aldrich 公司,浓度分别为质量分数 1.5% 和 0.3%,并辅之以 0.5 M NaCl,可提高离子强度和聚合离子的自组装吸附。将 EAP 基体浸泡于 50 °C 6 M NaOH 溶液中 20 min,使得衬底材料带有负电羟基(-OH)官能团,并采用去离子水冲洗,氮气吹干。首先逐层自组装沉积[PDDA(10 min) + PSS(10 min)]₂ 作为前置层,其中 PDDA 和 PSS 溶液各组装 10 min,重复操作 2 个循环,旨在加强 EAP 基体表面电荷,有利于后续有效薄膜组装。然后,在 EAP 基体上采用自组装方法制备有效薄膜[(PDDA(10 min) + CNTs(15 min))]₅,在溶液中交替进行,EAP 基体双面组装。相邻单层之间均采用去离子水冲洗,氮气吹干,旨在去除衬底表面组装不够稳定的聚电解质和碳纳米管,加强单层之间的相互结合性。EAP 薄膜柔性器件结构如图 4 所示,制备的碳纳米管薄膜厚度约为 30~40 nm,电导率约为 5 000 μS/cm。

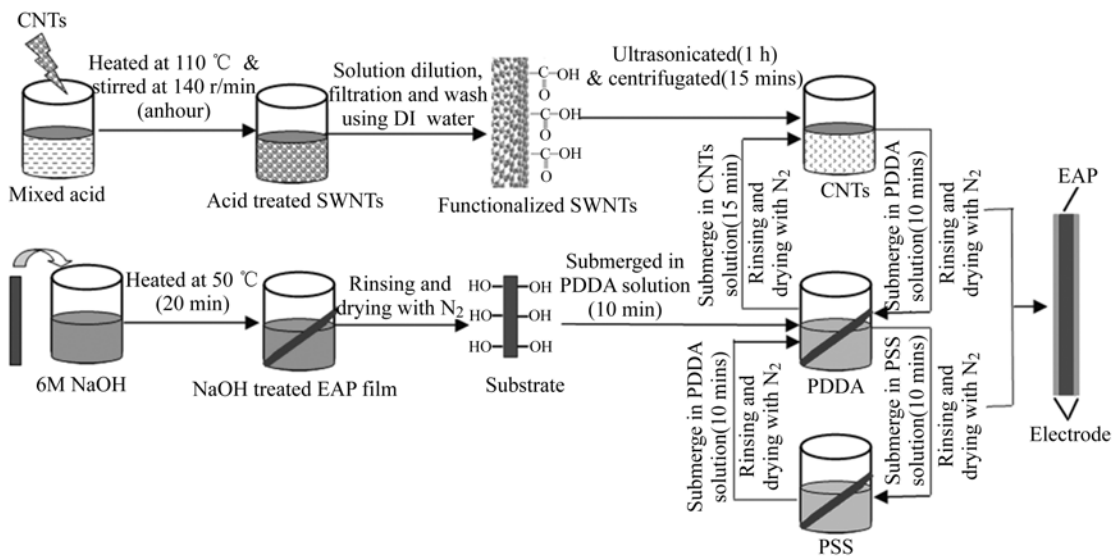


图 3 碳纳米管薄膜柔性电极制备工艺

Fig. 3 Fabrication process of carbon nanotube film as flexible electrodes

采用静电诱导自组装方法制备碳纳米管薄膜(PDDA/CNTs)。试样,采用溅射镀膜仪对试样表面进行溅金处理后,用冷场发射扫描式电子显微镜(FE-SEM S4800)观察成膜表面微观形貌。SEM 电子束探针和试样表面之间施加电压为 5 kV,放大倍数为 20 000,获得 SEM 形貌观察结果如图 5 所示,其中图像刻度条为 2 μm。表征结果表明,碳纳米管在自组装多层薄膜中以碳纳米管束的形式均匀分布,并在聚合物基质中形成致密结构、强结合力、高纯度的随机碳纳米管网络。

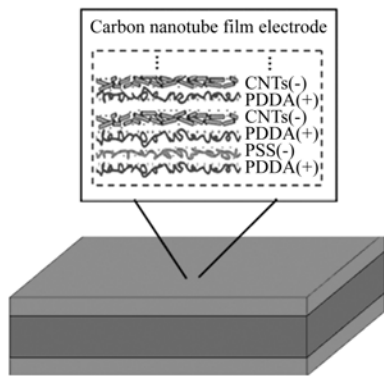


图 4 EAP 薄膜柔性器件结构示意图

Fig. 4 Structure sketch of EAP film-based flexible device

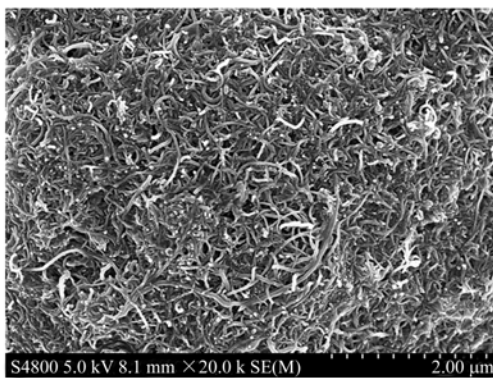


图 5 碳纳米管薄膜的 SEM 微观形貌

Fig. 5 SEM of carbon nanotube film

4 实验结果与分析

用铁电高分子聚合物——聚偏氟乙烯为基体被覆碳纳米管薄膜电极制作 EAP 柔性薄膜器件,其结构尺寸为 30 mm×12 mm×28 μm,相对介电常数 $\epsilon_r=12$,表面积与厚度比为 12.86,测得电容值为 1.37 nF。经前置电荷放大器后由数据采集仪采集压电信号,并输入到计算机,采集频率为

10 Hz。EAP 柔性薄膜器件在压力作用下其上下电极表面上产生极化电荷,经由前置放大器测得其典型电压曲线如图 6 所示。输出电压和产生的电荷量成正比,会先达到一个峰值,之后因经测量电路致使电荷泄露而衰减。

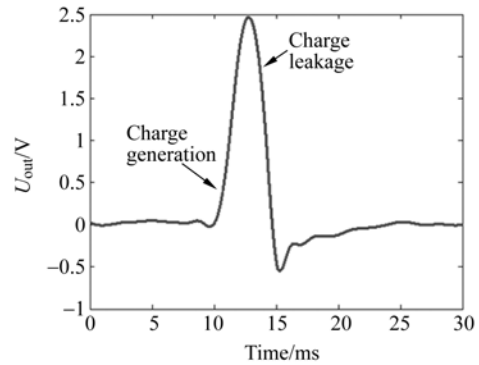
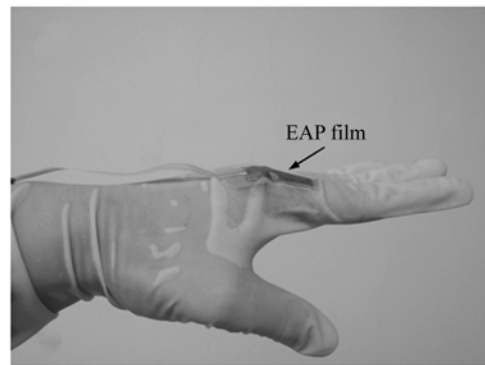


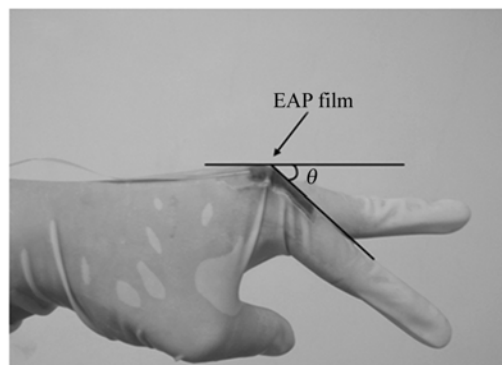
图 6 EAP 柔性薄膜器件的典型电压曲线

Fig. 6 Typical voltage curve of EAP flexible film device



(a) 手指水平示意图

(a) Level finger



(b) 手指弯曲示意图,弯曲角度为 θ

(b) Bending finger with bending angle θ

图 7 手指弯曲度检测示意图

Fig. 7 Illustration of finger-bending test

为了检测手指弯曲姿态,将 EAP 薄膜器件平整贴附在橡胶手套的掌指关节处,当手指完全伸直保持水平时,EAP 薄膜不受外力作用,不会发生形变,从而输出电压为 0。当手指向下弯曲时,定义手指方向与水平方向的角度为手指弯曲度 θ ,检测示意图如图 7 所示。EAP 薄膜在应力作用下发生弯曲形变,电极表面产生电荷,此时检测到输出电压。通过检测 EAP 薄膜器件在不同的手指弯曲姿态下的电信号,得出 EAP 薄膜器件输出电压 U_{out} 与手指弯曲度 θ 的关系,图 8 展示了在不同的手指弯曲角度 ($\theta=15, 30, 45, 60, 75$ 和 90°) 条件下的电压-时间响应曲线。随着手指弯曲度的增加,EAP 薄膜产生的输出电压峰值越高,在弯曲角度为 15° 时,输出电压峰值在 1.2 V 左右,而在弯曲角度为 90° 时,输出电压峰值达 3.7 V。而且,EAP 薄膜输出电压的脉冲响应波形为非常窄的尖峰,响应时间为毫秒级,表明 EAP 薄膜对手指弯曲过程的快速响应特性。为测试该器件的可重复性,对手指弯曲角度在 $45, 60, 75$ 和 90° 姿态下的实验分别进行 5 次循环重复测试,获得的电压-时间曲线如图 9 所示,展示了良好的可重复性。

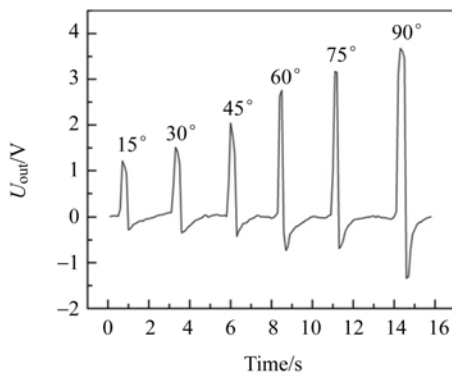


图 8 不同弯曲角度下 EAP 薄膜的输出电压-时间曲线

Fig. 8 Curves of output voltage-time for EAP film under different bending angles

EAP 薄膜的输出电压峰值与手指弯曲度的对应关系如图 10 所示,可以发现 EAP 薄膜输出电压峰值与手指弯曲度有很明显的线性关系。采用最小二乘法对实验数据进行拟合,满足线性关系 $f(x) = 0.034x + 0.59$, 相关系数为 $R^2 = 0.9951$ 。该模型能较好地诠释 EAP 薄膜输出电

压峰值与手指弯曲度的对应关系,表明 EAP 薄膜对手指弯曲姿态检测具有较高的线性度。

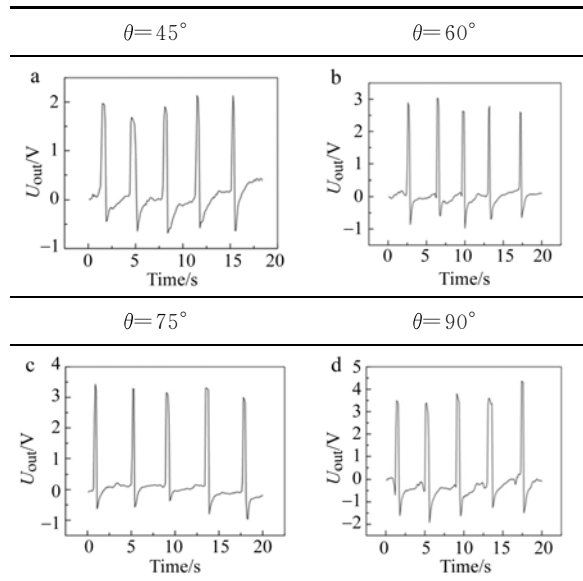


图 9 EAP 薄膜的重复实验电压-时间曲线

Fig. 9 Curves of output voltage-time for EAP film in repeated experiment

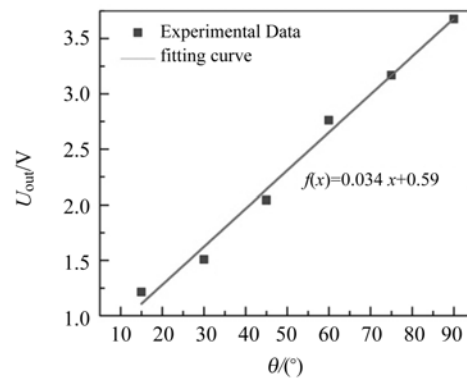


图 10 EAP 薄膜电压峰值与手指弯曲角度的关系

Fig. 10 Relation between voltage peak of EAP film and finger-bending angle

此外,人体踏步动作及足底压力监测可以揭示人体步态的运动特征,对于步态矫正、健康监测或康复运动具有重要意义。EAP 薄膜器件具有柔韧性好、厚度薄、测力大、过载能力强等优势,亦适合足底力传感器的特殊应用场合和使用环境。采用 EAP 薄膜器件对踏步触觉进行实验测试,如图 11 所示,将 EAP 薄膜器件置于足底正下方,当进行踏步动作时,EAP 薄膜器件由于受到来自足底的正压力作用,上下电极表面聚集异性电荷,从

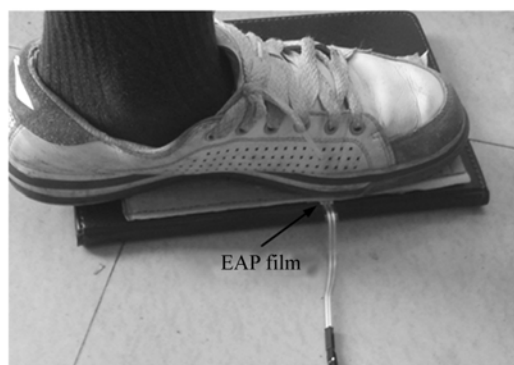


图 11 EAP 薄膜的脚踏触觉实验示意图

Fig. 11 Experimental sketch of EAP film under pedal touch

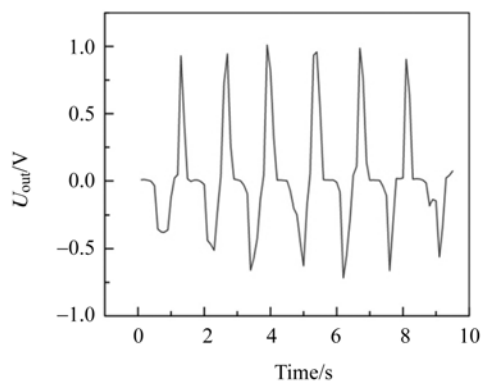


图 12 EAP 薄膜在脚踏触觉下的电压-时间关系

Fig. 12 Curves of output voltage-time for EAP film under pedal touch

参考文献:

- [1] JUNG K, KIM K J, CHOI H R. A self-sensing dielectric elastomer actuator [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2008, 143(2): 343-351.
- [2] TANAKA Y, FUJIKAWA T, KAZOE Y, et al.. An active valve incorporated into a microchip using a high strain electroactive polymer [J]. *Sens. Actuators A: Phys. B: Chem.*, 2013, 184: 163-169.
- [3] KOVACS G, DÜRING L. Contractive tension force stack actuator based on soft dielectric EAP [C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, San Diego, 7287: 72870A1-15.
- [4] 夏冬梅, 庞宣明, 陈晓南, 等. 电致动聚合物驱动的无阀微泵的设计与制作 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(7): 92-95.
- XIA D M, PANG X M, CHEN X N, et al.. Design and fabrication for valveless micropump driven by dielectric elastomer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(7): 92-95. (in Chinese)
- [5] 张冬至, 崔天宏. 电活性聚合物薄膜柔性结构的动态特性分析与实验 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2728-2736.
- ZHANG D ZH, CUI T H. Dynamic characteristic analysis and experiments of flexible structure based on electroactive polymer film [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2728-2736. (in Chinese)
- [6] BROCHU P, PEI Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles [J]. *Macromol. Rapid Commun.*, 2010, 31(1): 10-36.
- [7] CHIBA S, WAKI M, SAWA T, et al.. Electroactive polymer artificial muscle operable in ultra-high hydrostatic pressure environment [J]. *IEEE Sensors J.*, 2011, 11(1): 3-4.
- [8] RATHOD V T, MAHAPATRA D R, JAIN A, et

而产生输出电压。图 12 为 EAP 薄膜器件在周期性踏步动作下的电压-时间响应曲线,因薄膜器件置于足底受到鞋底支撑,其形变量相对较小,输出电压峰值可达 1 V,而且重复性很好,表明 EAP 薄膜器件具有作为计步传感器、足底压力测量或足底踩踏发电机的巨大潜力。

5 结 论

本文分析了电活性聚合物薄膜的正/逆力-电特性及发电机理,采用静电诱导自组方法在电活性聚合物基体表面制备碳纳米管薄膜电极构建柔性传感器件,实验研究了 EAP 柔性器件的手指关节弯曲姿态及脚踏触觉的传感特性。手指弯曲姿态的实验结果表明:在手指弯曲度为 $15 \sim 90^\circ$ 时,输出电压峰值为 1.2~3.7 V,展示了输出电压峰值与手指弯曲度之间的高线性度,满足关系 $f(x) = 0.034x + 0.59$,相关系数为 $R^2 = 0.9951$ 。此外,采用 EAP 薄膜器件对踏步触觉进行实验测试,输出电压峰值在 1 V 左右,而且具有快速响应、良好的可重复性等优势。本文为 EAP 薄膜电极提供了一种低成本、简单方便、易于操作的制备方法,实验结果表明 EAP 薄膜用于制作人工皮肤及触觉传感器具有良好的应用前景。

- al. . Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2010, 163(1):164-171.
- [9] BENSLIMANE M Y, KIIL H-E, TRYSON M J. Dielectric electro-active polymer push actuators: performance and challenges [J]. *Polym. Int.*, 2010, 59(3):415-421.
- [10] ALICI G, SPINKS G M, MADDEN J D W, *et al.*. An investigation into behaviour of electroactive polymers as mechanical sensors[C]. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2007, Zurich, 4412452.
- [11] KIM G H. Electroactive polymer composites as a tactile sensor for biomedical application ceramics X-ray diffraction chemical synthesis mechanical properties electron microscopy [J]. *Macromol. Res.*, 2004, 12(6): 564-572.
- [12] CHIBA S, MAKI M, KOMBLUH R, *et al.*. Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles [C]. *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego*, 2008, 6927: 6927151-9.
- [13] FEIRINE R, KORNBLUH R, ECKERLE J, *et al.*. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications [C]. *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego*, 2001, 4329:148-156.
- [14] JEAN-MISTRAL C, BASOUR S, CHAILLOUT J J. Dielectric polymer: scavenging energy from human motion [C]. *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego*, 2008, 6927:6927-692716.
- [15] 景素芳, 庞宣明, 陈晓南. 电致动聚合物致动器的动态响应研究[J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(11): 47-50.
- JING S F, PANG X M, CHEN X N. Investigation for dynamic response of electroactive polymer actuator [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(11):47-50. (in Chinese)
- [16] 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 电活性聚合物微型发电机 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(11): 2413-2420.
- CHEN M, LIN G J, SONG D CH. Micro-power generator on dielectric electro active polymer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2413-2420. (in Chinese)
- [17] 林桂娟, 宋德朝, 陈明, 等. 电活性聚合物的力学性能及发电应用 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 908-913.
- LIN G J, SONG D CH, CHEN M, *et al.*. Mechanical property and power generation application research on dielectric electro active polymer [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(6): 908-913. (in Chinese)
- [18] 林桂娟, 刘刚, 宋德朝. 电活性聚合物发电基本原理及应用研究 [J]. *压电与声光*, 2011, 33(5): 796-803.
- LIN G J, LIU G, SONG D CH. Power generation mechanism and application on the dielectric electro active polymer [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2011, 33(5): 796-803. (in Chinese)
- [19] IJIMA S. Helical microtubules of graphitic carbon [J]. *Nature*, 1991, 354(6348): 56-58.
- [20] AVOURIS P, CHEN Z, PEREBEINOS V. Carbon-based electronics [J]. *Nat. Nanotech.*, 2007, 2:605-615.
- [21] BAUGHMAN R H, ZAKHIDOV A A, HEER W A de. Carbon nanotubes-the route toward applications [J]. *Science*, 2002, 279: 787-792.
- [22] SHIRINOV A V, SCHOMBURG W K. Pressure sensor from a PVDF film [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2008, 142(1): 48-55.

作者简介:



张冬至(1981—),男,山东聊城人,博士,讲师,2004年于山东理工大学获学士学位,2007年于中国石油大学(华东)获硕士学位,2011年于华南理工大学获博士学位,2009~2011年美国明尼苏达大学访问学者,主要从事动态测试技术与仪器、微机电系统(MEMS)与微纳传感器等研究。E-mail: dzzhang@upc.edu.cn



童俊(1989—),男,安徽宣城人,硕士研究生,2011年于中国矿业大学获学士学位,主要从事测试计量技术及仪器、功能薄膜传感器等研究。E-mail: tongjunsw@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)