

弯曲型介电型电活性聚合物驱动器的建模研究

黄青云¹, 王化明¹, 朱银龙², 杨位东¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:介电型电活性聚合物(DEAP)由于其大应变、高效率及高能量密度等优点,在仿生机器人领域具有广泛的应用前景。该文设计制作了一种可实现弯曲变形的DEAP驱动器,根据弹性大变形理论建立驱动器的机电耦合模型,通过微分方程组的迭代求解获得激励电压与输出角度、侧向输出力之间的关系。试验结果表明,在5 kV电压下,该驱动器可产生最大75°的弯曲角度,最大侧向输出力达到0.7 N。试验结果与理论结果较吻合,验证了驱动器设计与分析的有效性。以该驱动器为驱动单元,构建了一种仿生爬行机器人,初步试验表明了该类型驱动应用于仿生机器人的可行性,可为仿生机器人摆动驱动提供一种新的实现方法。

关键词:介电型电活性聚合物;弯曲型驱动器;机电耦合模型

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A

Study on the Modelling of the Bending Dielectric Electroactive Polymer Actuator

HUANG Qingyun¹, WANG Huaming¹, ZHU Yinlong², YANG Weidong¹

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

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The dielectric electroactive polymers (DEAP) have shown great promise in the field of biomimetic robotics due to their outstanding abilities such as large deformation, high efficiency and energy density. A bending DEAP actuator was designed and implemented. According to the theory of large elastic deformation, an electromechanical coupling model of the actuator was established in this paper. By solving the differential equations, the relationship between the bending angle and lateral force have been obtained. The experimental results show that the actuator can bend with an angle of 75° and the maximum lateral force reaches to 0.7 N at 5 kV. The predictions of the actuator behavior agree well with the experimental results. Based on this actuator, a crawling robot was developed and preliminary experiment has proved the feasibility of the actuation in biomimetic robots. This work presents a novel actuation technology for the bionic robot.

Key words: dielectric electroactive polymer; bending actuator; electromechanical coupling model

0 引言

仿生机器人是当前机器人与仿生学领域研究的热点之一,如在自然灾害和各种突发事件引起的倒塌废墟中协助进行搜救工作的仿生搜救机器人。目前应用于仿生机器人的驱动方式有电磁电机、形状记忆合金、压电驱动器等,这些驱动方式自身特点的一些不足^[1-2]限制了其在复杂非结构化环境下的应用。介电型电活性聚合物(DEAP)是近年来出现的一种电场激活型电活性聚合物,在电压激励下材料发生变形对外做功。与其他智能材料相比具有较好的综合性能^[3],即大应变(最大380%)、高能量密度

(3.4 J/g)、高效率(60%~90%)等,在应变、驱动力、能量密度、效率及速度等方面最接近自然肌肉^[4]。DEAP的柔性使其对复杂环境具有较强的适应性,在仿生机器人领域具有广阔的应用前景。

DEAP驱动器结构形式有平面形、锥形、圆柱形、菱形及叠堆式等^[5-6]。圆柱形驱动器由DEAP薄膜卷绕而成,结构紧凑,输出力较大。电压激励下,圆柱形驱动器可实现直线、弯曲等多自由度运动,类似于生物肌肉束,可模拟自然界中生物,如蛇、章鱼臂等运动。DEAP薄膜具有较强的机电耦合特性,其建模问题本质上是一个多场耦合问题。为简

收稿日期:2015-05-05

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, BK2011735);中国博士后科学基金资助项目(2013M541678)

作者简介:黄青云(1992-),男,江西人,硕士生,主要从事介电型EAP驱动器的研究。通信作者:王化明(1973-),男,教授,博士,主要从事介电型EAP驱动器及其在仿生机器人中的应用研究。E-mail: hmwang@nuaa.com。

化建模,一般将其作为不可压缩超弹性材料,在连续介质力学框架内将材料整体真实应力表示为机械应力与 Maxwell 应力之和^[7]。分析圆柱形 DEAP 驱动器的几何关系,给出圆柱形驱动器在弯曲变形时的平衡方程。通过求解微分方程组,得到输入激励电压与驱动器弯曲角度及侧向输出力之间的关系,通过试验进行验证,为该类型驱动器的优化与应用提供理论基础。

1 DEAP 驱动器的设计与制作

弯曲型驱动器本质上是将线性圆柱形驱动器的电极分为左、右对称两部分,如图 1 所示。图 1(b)为 DEAP 薄膜预拉伸后涂抹的中间层梳齿状电极, L 为薄膜电极的长度, D 为驱动器直径。图 1(c)中,将涂有电极的 DEAP 薄膜卷绕到弹簧上,可形成如图 1(a)所示的横截面的圆柱形驱动器,其参数如表 1 所示。DEAP 驱动器左侧电极通电时,该侧薄膜中轴向拉应力减小,在右侧膜轴向拉应力作用下左侧薄膜伸长,右侧薄膜缩短,驱动器产生向右弯曲变形;反之,则向左弯曲。

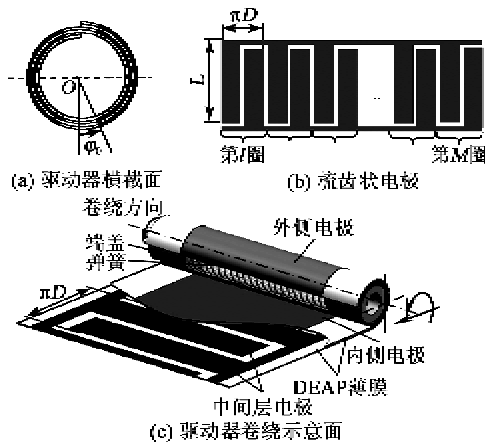


图 1 弯曲驱动器制作过程示意图

表 1 驱动器参数

弹簧中径 D_m / mm	弹簧簧丝直径 D_w / mm	弹簧圈数
12	1	34.5
弹簧自由长度 l_0 / mm	弹簧预压缩量 / mm	预拉伸率 $\lambda_{10} \times \lambda_{20}$
100	40	300% × 500%
薄膜无电极部分中心角 $2\varphi_0$ / rad	DEAP 薄膜卷绕圈数 M	
$\pi/5$	14	

2 驱动器建模

2.1 DEAP 本构方程

DEAP 是一种超弹性材料,采用 Yeoh 形式^[8]

的应变能方程结合 Maxwell 应力,电压激励下的 DEAP 薄膜 3 个主方向的柯西应力 $\sigma_i (i=1,2,3)$ 为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}) [C_{10} + 2C_{20}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} - 3) + 3C_{30}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} - 3)^2] - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{(\lambda_3 t_0)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = 2(\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}) [C_{10} + 2C_{20}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} - 3) + 3C_{30}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} - 3)^2] - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{(\lambda_3 t_0)^2} \quad (2)$$

式中: C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 为 Yeoh 形式应变能方程材料参数; $\lambda_i (i=1,2)$ 为主方向拉伸率; ϵ_r , ϵ_0 为相对介电常数和真空介电常数; U 为激励电压; t_0 为薄膜初始厚度。本文利用等轴拉伸试验^[9],测试 DEAP 的本构参数。图 2 为拉伸试验中,实际应力与拉伸率的关系曲线及其拟合曲线,拟合得到 DEAP 的 Yeoh 模型参数如表 2 所示。

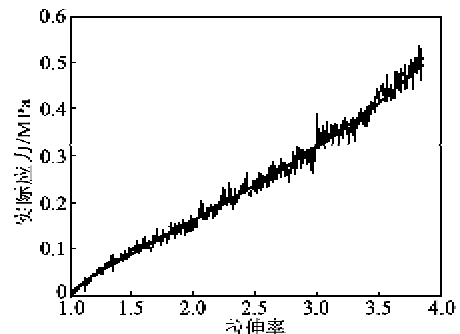


图 2 实际应力-拉伸率曲线及拟合曲线

表 2 Yeoh 模型拟合参数

C_{10} / Pa	C_{20} / Pa	C_{30} / Pa
22 213	-219	3

2.2 DEAP 驱动器几何方程

为简化分析假设:

- 1) 弹簧等效为一个圆形截面梁,且截面尺寸不随轴线长度变化而变化。
- 2) 驱动器弯曲时轴线各处的曲率相等。
- 3) 端盖处 DEAP 薄膜的轴向运动受限,而周向运动不受限制。
- 4) 涂电极区域与不涂电极区域的周向交界位置不变,即 φ_0 不变。

图 3 为驱动器构型及受力分析示意图。图 3(a)

为驱动器通电前整体结构示意图,中间为压缩弹簧,外侧卷绕 n 层薄膜。图 3(b)为驱动器第 i 层膜周向电极分布示意图, $r^{(i)}$ 为其半径。图 3(c)为驱动器通电弯曲后形状示意图,取过驱动器曲率中心两个夹角为 $d\theta$ 的平面所构成的环形微元(见图 3(d)),然后取该环形微元单层膜上夹角为 $d\varphi$ 的矩形微元,图 3(e)为该矩形微元的应力分析图。

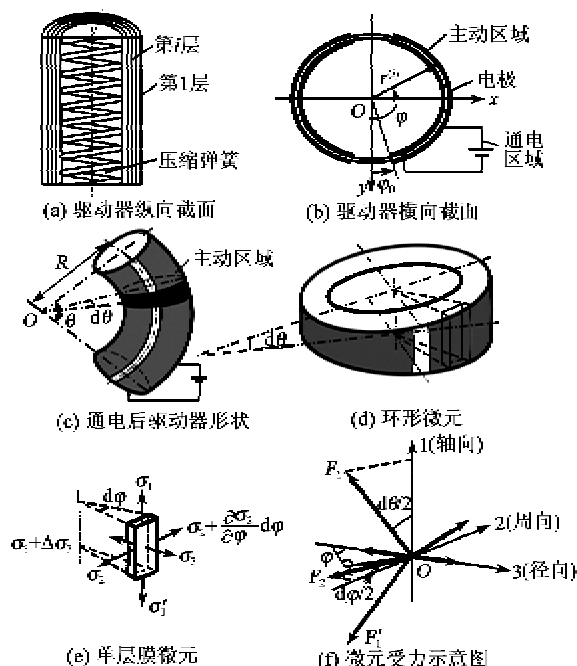


图 3 驱动器构型及受力分析

DEAP 驱动器轴向、周向和法向拉伸率为

$$\lambda_1 = \frac{l}{l_0} = \frac{(R+r\sin\varphi)\theta}{l_0} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = r/r_0 \quad (4)$$

$$\lambda_3 = 1/(\lambda_1\lambda_2) \quad (5)$$

式中: R 为曲率半径; l_0 为轴向薄膜初始长度; l 为通电后的长度; r 为驱动器薄膜半径; r_0 为驱动器通电前薄膜初始半径; θ 为弯曲角。

2.3 DEAP 驱动器平衡方程

微元所受内力分解到 3 个主方向上,即

轴向力:

$$F_1 = \sigma_1 t r d\varphi \quad (6)$$

$$F'_1 = (\sigma_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varphi} d\varphi) t r d\varphi \quad (7)$$

周向力:

$$F_2 = \sigma_2 t (R+r\sin\varphi) d\theta \quad (8)$$

$$F'_2 = (\sigma_2 + \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varphi} d\varphi) t [R+r\sin(\varphi+d\varphi)] d\theta \quad (9)$$

法向力:

$$F_3 = \sigma_3 r d\varphi (R+r\sin\varphi) d\theta \quad (10)$$

$$F'_3 = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) (r-t) d\varphi [R+(r-t)\sin\varphi] d\theta \quad (11)$$

式中 t 为薄膜厚度。

当驱动器处于静态平衡时,薄膜微元在 3 个主方向的合力为 0,可得 3 个平衡方程,即 $F_i - F'_i = 0$ ($i=1,2,3$)。将式(6)~(11)代入其中,可得薄膜微元在径向应力平衡方程为

$$\sigma_3 = \sigma'_3 \quad (12)$$

周向受力平衡方程为

$$\frac{d[\sigma_2]}{d\theta} = \frac{\sigma_1 t r \cos\varphi d\varphi}{l_0 t_0} = \frac{\sigma_1 r \cos\varphi d\varphi}{(R+r\sin\varphi) \lambda_2 \theta} \quad (13)$$

径向受力平衡方程为

$$\Delta\sigma_3 = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1) t \sin\varphi}{R+r\sin\varphi} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_2) t}{r} \quad (14)$$

2.4 DEAP 驱动器边界条件

自由状态下,DEAP 膜与压缩弹簧的轴向力平衡和弯矩平衡,可得

$$\int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^n \sigma_1^{(i)} t^{(i)} r^{(i)} d\varphi + k(\theta R - H_0) = 0 \quad (15)$$

$$\int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^n \sigma_1^{(i)} t^{(i)} (r^{(i)})^2 \sin\varphi d\varphi + B/R = 0 \quad (16)$$

式中: H_0 为弹簧的初始长度; k 、 B 分别为弹簧的线性刚度和弯曲刚度。DEAP 膜在每一层、每一个圆周角度受到静电力的影响和形变状态不全相同,因此, σ_1 是层数 i 和圆周角度 φ 的函数。

2.5 输出力计算

DEAP 驱动器施加电压后,将产生弯曲变形,并可在弯曲过程中产生侧向力驱动负载。图 4 为驱动器右侧通电弯曲过程中的输出力与输出角度。侧向输出力用径向分量表示,系统的弯矩平衡方程为

$$F_r = \left[\sum_{i=1}^n \int_0^{2\pi} \sigma_1^{(i)} t^{(i)} (r^{(i)})^2 \sin\varphi d\varphi + B/R \right] / (R\sin\theta) \quad (17)$$

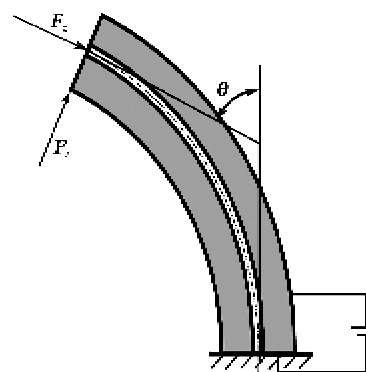


图 4 驱动器的输出力与弯曲角度

假定驱动器在轴向处于自由状态,即 $F_z=0$,此时轴向力平衡方程不变。若 $F_z=0$,则式(17)与式(15)相同,即可求驱动器自由状态下的弯曲角度。

3 分析与测试结果

图5为驱动器输出力与输出角度测试实验实物图。测试装置由步进电机和力传感器等组成。通过步进电机带动驱动器转到指定角度位置,由力传感器测出该角度下的侧向输出力。

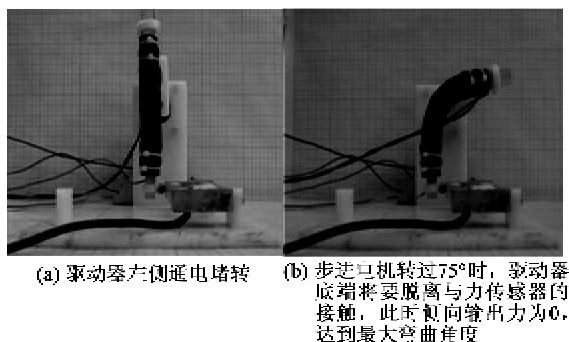


图5 侧向输出力与输出角度测试实验图

图6为驱动器通电(电压为5 kV)时,理论与测试侧向输出力曲线及断电时侧向回复力曲线。由图可知,通电瞬间的驱动器侧向输出力最大;随着弯曲角度的增大,侧向输出力逐渐减小直至为0,此时的弯曲角度达到最大值。断电后,驱动器要恢复原有形状,产生侧向回复力,当驱动器恢复到初始位置时,回复力为0。通过方程求解,得到在5 kV下最大侧向输出力为0.52 N,弯曲角度为67°。实验测得,在该电压下最大侧向输出力为0.7 N,弯曲角度为75°。理论值与试验值基本一致,相对误差较小。

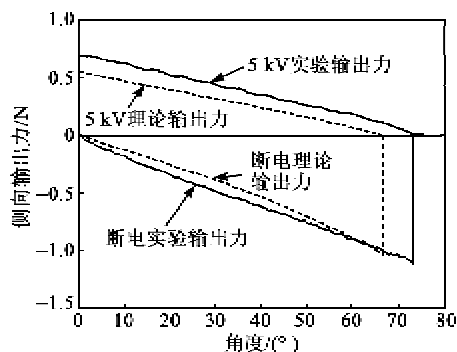


图6 驱动器输出力与输出角度的关系曲线

图7为驱动器输出角度随电压的变化曲线。当电压增大时,主动区域DEAP膜的轴向应力减小,驱动器单侧继续伸长,弯曲角度增大。由图可知,理论值与实验值均随着激励电压的增大而增大,实验值略大于理论值。

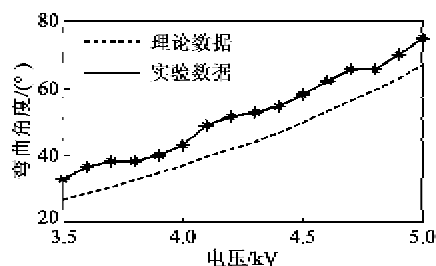


图7 输出角度随激励电压的变化曲线

图8为驱动器通电0°堵转时,堵转力随电压变化的曲线。堵转力随电压的增大而增大,实验值大于理论值,4.5 kV时两者误差最大为32%。

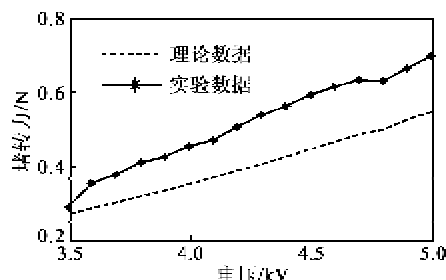


图8 堵转力随激励电压的变化曲线

模型的简化导致理论值与实验值存在误差。模型假定通电区域与非通电区域的周向交界位置不变,但实际上驱动单元在弯曲变形时,该交界位置会向不通电区域偏移,通电区域变大,导致弯曲角度以及侧向输出力较理论值偏大。

4 DEAP驱动爬行机器人

基于DEAP驱动器,设计制作了一种爬行机器人。该机器人由一个弯曲驱动器及两对单向轮构成(见图9),其长约为12 cm,轮距5 cm。图9为机器人在通电电压4.5 kV、频率0.5 Hz条件下运动,其平均速度达到12 mm/s。

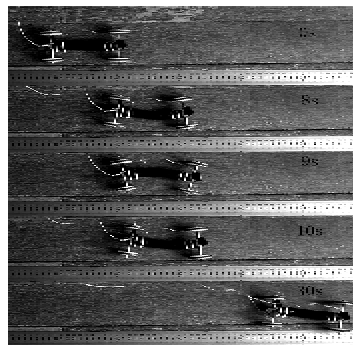


图9 仿生爬行机器人运动实验

由于单向轮只能单向转动,其向前运动为滚动摩擦,向后为滑动摩擦,因此,在滑动静摩擦力足够的条件下机器人将向前运动。驱动器一侧通电时弯

曲,一对对角轮前进,另一对对角轮与地面接触点基本保持不动;另一侧通电时则相反,一个周期结束后机器人向前产生一定的位移。通过控制驱动器两侧的通、断电,实现机器人的摆动前进。

5 结束语

针对现有仿生机器人驱动方式的不足,设计制作了一种由 DEAP 薄膜卷绕而成的弯曲型驱动器,能产生较大的弯曲角度。针对该驱动器,建立了基于弹性大变形理论的机电耦合模型,分析了给定电压下的弯曲角度与堵转力,以及在不同角度下的侧向输出力,理论值与实验值较吻合。基于 DEAP 驱动器,设计了一种爬行机器人,该机器人能以 11 mm/s 的速度爬行前进,验证了 DEAP 驱动器应用于仿生机器人的可行性。

DEAP 驱动器在仿生机器人方面有广泛的应用前景,设计一种驱动力大,稳定性高及便于控制的驱动器已成为驱动器研究的关键。同时,建立一种基于材料粘弹性的 DEAP 驱动器动力学模型,是精确控制其运动的关键。

参考文献:

- [1] DOTSON Z S. Material selection for the actuator design for a biomimetic rolling robot conducive to miniaturization[D]. Rochester, USA: Rochester Institute of Technology, 2009.
 - [2] NGUYEN Q S, HEO S, PARK H C, et al. Performance evaluation of an improved fish robot actuated by piezoceramic actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(3): 1-8.
 - [3] BROCHU P, PEI Q B. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2010, 31(1): 10-36.
 - [4] DEEPAK T, CHRISTOPHER D R, WILLIAM M K, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2008, 5(3): 99-117.
 - [5] ANDERSON I A, GIBSY T A, MCKAY T G, et al. Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(4): 041101.
 - [6] KOVACS G, LOCHMATTER P, WISSLER M. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): S306-S317.
 - [7] GOULBOURNE N C. A mathematical model for cylindrical, fiber reinforced electro-pneumatic actuators[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(5): 1043-1052.
 - [8] YEOH O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1990, 63(5): 792-805.
 - [9] SASSO M, PALMIERI G, CHIAPPINI G, et al. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods[J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(8): 995-1004.
-
- (上接第 18 页)
- [2] UENO T, HIGUCHI T. High sensitive and heat-resistant magnetic sensor using magnetostrictive/piezoelectric laminate composite[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2005, 41(10): 3670-3672.
 - [3] TATARENKO A S, GHEEVARUGHESE V, SRINIVASAN G. Magnetolectric microwave bandpass filter [J]. *Electronics Letters*, 2006(9): 540-541.
 - [4] 朱俊, 周玉棠, 张鹰, 等. NFO/PZT 复合磁电薄膜生长制备及性能的研究[J]. *压电与声光*, 2009, 31(4): 559-561.
 - [5] ZHU Jun, ZHOU Yutang, ZHANG Ying, et al. Study on the fabrication and properties of NFO/PZT magnetoelectric composite films[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, 31(4): 559-561.
 - [5] KOTOVAA N, PODGORNAYA Y. Effect of lanthanum doping on leakage currents of Sol-Gel PZT thin films [J]. *Ferroelectrics*, 2014, 465(1): 54-59.
 - [6] NGUYENA M D, TRINHA T Q. Effect of dopants on ferroelectric and piezoelectric properties of lead zirconate titanate thin films on Si substrates[J]. *Ceramics International*, 2013, 40(1): 1013-1018.