

基于负刚度预载荷机构的锥形介电型 EAP 驱动器研究

朱银龙¹, 王化明^{1,2,*}, 赵东标¹, 栾云广¹

1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016

2. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

摘要: 为了便于对介电型 EAP 驱动器进行优化设计, 针对介电型 EAP 驱动器进行建模是极其重要的。结合弹性大变形理论及 Maxwell 应力建立介电型 EAP 材料的机电耦合模型, 分析一种可以提高驱动器性能的负刚度预载荷机构, 在此基础上建立基于负刚度预载荷机构的锥形介电型 EAP 驱动器模型。通过对微分代数方程组的求解, 分析预载荷机构对驱动器驱动性能的影响, 得出特定尺寸的锥形驱动器在不同驱动电压下的电压-位移曲线以及驱动器薄膜中的主延伸率、主应力分布情况, 同时给出了锥形驱动器的力-位移曲线。最后将试验结果与理论分析进行比较, 给出了导致偏差的原因。结果表明, 本文建立的模型可以为锥形介电型 EAP 驱动器的设计应用提供参考依据。

关键词: 负刚度; 介电型 EAP; 预载荷机构; 驱动器; 机电耦合

中图分类号: V214; TP24; TB34 **文献标识码:** A

介电型 EAP 作为电活性聚合物材料的一种, 以其大变形、高能量密度、高效率、高响应速度等优点^[1]在仿生机器人^[2]、流体器件^[3]、医疗康复训练^[4]、光学器件^[5]等场合有着潜在的应用前景。

介电型 EAP 驱动器由两边涂有柔性电极、具有一定形状的介电型 EAP 薄膜和预载荷机构组成。施加电压后, 静电力使得弹性体薄膜在平面上方向上延展, 厚度变薄。这种变形机制使得介电型 EAP 驱动器可输出力和位移, 对外做功。特定形状和尺寸的驱动器性能由 EAP 膜和预载荷机构的性质共同决定。常见的预载荷机构^[6]主要有恒预载荷、弹簧预载荷(正刚度)、负刚度预载荷机构。本文采用的是一种具有负刚度特性的双滑块预载

荷机构^[7], 该机构可显著增加驱动器的输出位移。

由于介电型 EAP 材料的非线性本构关系以及机电耦合特性, 对驱动器进行精确建模比较复杂。目前描述介电型 EAP 材料在电激励情况下的应力应变关系主要有两种方法: 一种是利用热力学能量守恒的观点将薄膜材料的应变能与电场密度联系起来组成整个系统的应变能方程, 利用虚功原理推导电激励下的本构关系, 如 Suo 等^[8]提出的非线性介电变形场理论; 另一种是在连续介质力学框架内将整体柯西应力表示为机械应力与 Maxwell 应力的和, 如 Goulbourne 等^[9]提出的基于 Toupin^[10]的电活性聚合物力电模型。尽管这两种方法的阐述不一样, 但两者之间是可以相互推导的。

收稿日期: 2010-12-08; 退修日期: 2011-02-28; 录用日期: 2011-03-25; 网络出版时间: 2011-04-12 15:41:57

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110412.1541.009.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110412.1541.009

基金项目: 国家自然科学基金(50975139); 机器人学国家重点实验室开放基金(RLO200912)

* 通讯作者. Tel.: 025-84892503 E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

引用格式: 朱银龙, 王化明, 赵东标, 等. 基于负刚度预载荷机构的锥形介电型 EAP 驱动器研究[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1746-1754. Zhu Yinlong, Wang Huaming, Zhao Dongbiao, et al. Research of conically-shaped dielectric electroactive polymer actuators based on negative stiffness preload mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1746-1754.

锥形结构超弹性膜的变形分析可以追溯到 Tezduyar 等^[11]关于圆环形超弹性膜受集中力载荷的变形分析,得到了 Mooney-Rivlin 应变能函数参数对薄膜变形的影响,但没有涉及到预拉伸和电激励。He 等^[12]提出的基于 Suo 等^[8]的介电变形场理论分析了锥形膜结构在电激励下受恒力集中载荷的变形情况,但文中没有考虑预载荷机构对驱动器性能的影响。

为了提高锥形驱动器的输出位移,本文采用一种双滑块形式的负刚度预载荷机构,结合 EAP 材料的机电耦合本构方程建立了锥形介电型 EAP 驱动器的模型,利用数值解法得出驱动器在不同激励电压下的输出位移及薄膜中的应力应变分布情况,分析了预载荷机构对驱动器性能的影响。最后将理论分析结果与试验结果进行比较,并对导致偏差的原因进行了分析。

1 介电型 EAP 材料的机电耦合模型

应用 Yeoh 形式的应变能方程来描述材料的大变形弹性行为(超弹性行为),Prony 级数来描述材料的黏弹性行为(准线性黏弹性)。对介电型 EAP 材料作如下假设:①材料是不可压缩的;②材料是各向同性的。

1.1 材料的超弹性行为及黏性行为

连续介质力学中应用应变能方程来描述材料的超弹性行为。Yeoh 形式的应变能方程可由左柯西-格林应变张量的第一主不变量 I_1 表示为^[13]

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

式中: C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 为材料参数;第一主不变量 I_1 可以表示成主延伸率 λ_i ($i=1,2,3$) 的函数:

$$I_1 = \sum \lambda_i^2 \quad (2)$$

对于不可压缩材料,柯西应力 σ_i 可以由应变能方程关于 λ_i 的偏导数表示为

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad (3)$$

式中:静水压力 p 由边界条件决定。

随着时间的推移,介电型 EAP 材料中的应力不断衰减,因此就不能忽略材料的黏性行为。利用准线性黏弹性模型来描述介电型 EAP 材料与

时间相关的力学特性,即将应变能方程中的材料参数表示成时间 t 的函数,时间函数中的参数称为 Prony^[14]级数

$$C_{ij}(t) = C_{ij}^0 \left\{ 1 - \sum_{k=1}^N g_k [1 - \exp(-t/t_k)] \right\} \quad (4)$$

式中: C_{ij}^0 表示材料的瞬时弹性行为; g_k 和 t_k 描述应力松弛特性。

1.2 介电型 EAP 材料机电耦合行为

在介电型 EAP 两面施加电压后,静电压力(Maxwell 应力)使得薄膜变薄。此时薄膜中存在预拉伸应力以及静电场导致的 Maxwell 应力,材料的整体应力可以假设为弹性应力 σ_E 与 Maxwell 应力 σ_M 的和^[9]:

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_E \quad (5)$$

Maxwell 应力与电场强度成正比,对于初始厚度为 h_0 的薄膜,施加电压 U 时的 Maxwell 应力可以表示为^[10]

$$\sigma_M = \pm \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{2(\lambda_3 h_0)^2} \quad (6)$$

式中: ϵ_r 、 ϵ_0 和 U 分别为相对介电常数、真空介电常数和施加的电压。

由于薄膜厚度足够小,厚度方向的应力与另外两个主方向的应力相比可以忽略,可以认为薄膜法向应力为零,这样就可以消除静水压力。由式(3)、式(5)和式(6)可以得到平面方向的两个主应力,表示为

$$\sigma_1 = 2C_{10}F_1 + 4C_{20}E_1F_1 + 6C_{30}E_1^2F_1 - (U/h_0)^2 \epsilon_r \epsilon_0 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (7)$$

$$\sigma_2 = 2C_{10}N_1 + 4C_{20}M_1N_1 + 6C_{30}M_1^2N_1 - (U/h_0)^2 \epsilon_r \epsilon_0 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} E_1 = \lambda_1^3 + \lambda_1 \lambda_2^2 + \lambda_1^{-1} \lambda_2^{-2} - 3 \\ F_1 = \lambda_1^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} \\ M_1 = \lambda_2^3 + \lambda_2 \lambda_1^2 + \lambda_2^{-1} \lambda_1^{-2} - 3 \\ N_1 = \lambda_2^2 - \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} \end{cases}$$

2 预载荷机构分析

介电型 EAP 驱动器是利用其在通、断电时的刚度改变并与预载荷相平衡的原理工作的^[6],主

要有负刚度预载荷、正刚度预载荷和恒预载荷 3 种预载荷机构。在驱动器结构尺寸确定的情况下,相对于正刚度和恒定预载荷机构,负刚度预载荷机构^[7]可以使驱动器产生更大的位移输出。

图 1 为一种负刚度预载荷机构的示意图,图 1(a)为弹性元件、两根连杆和 3 个滑块组成的半菱形机构,可等效为两个双滑块机构,如图 1(b)所示。

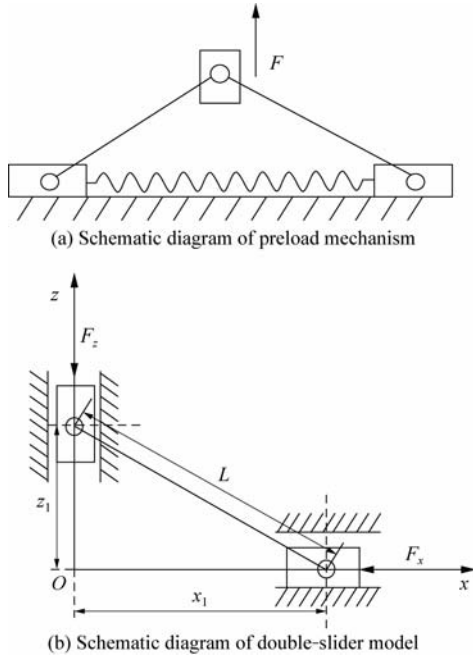


图 1 负刚度预载荷机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of negative stiffness preload mechanism

建立如图 1(b)所示的坐标系,通过虚功原理得到竖直方向的等效预载荷 F_z 为

$$F_z = k(2x_1 - x_0) \frac{\sqrt{L^2 - x_1^2}}{x_1} = k(2z_1 - \frac{x_0 z_1}{\sqrt{L^2 - z_1^2}}) \quad (9)$$

式中: k 为弹性元件的刚度; x_0 为弹性元件的初始长度; L 为连杆长度; z_1 为竖直滑块的垂直位置。半菱形预载荷机构输出的等效预载荷为

$$F = 2F_z \quad (10)$$

将式(10)对 x_1 求导得:

$$\frac{dF}{dx_1} = 2k \frac{x_0 L^2 - 2x_1^3}{x_1^2 \sqrt{L^2 - x_1^2}} \quad (11)$$

由式(11)知, $x_1 > \sqrt[3]{x_0 L^2 / 2}$, $dF/dx_1 < 0$, 即随着驱动器位移增加,虽然弹性元件的变形减小,但是竖直方向的等效载荷却在增加。为使预载荷避开零点,预载荷机构与驱动器安装时需要在 z 方向设置初始位移(即偏置位移) z_0 , 其中 z_0 的大小可以根据实际需要选取。

3 锥体驱动器建模

将两层 VHB4910 薄膜材料等轴拉伸 λ_0 倍后,四周用内径为 b 的圆环固定,薄膜中心固定半径为 a 的圆盘。将预载荷机构两端分别安装在圆盘和外部圆环上,环形薄膜的两边涂上柔性电极,就构成一个锥形介电型 EAP 驱动器(如图 2 所示)。施加电压之前,驱动器内部圆盘处于初始平衡位置 z_a 。在薄膜上施加电压 U 后,圆盘移动到第 2 个平衡位置 z_b , 两个平衡位置之间的距离为驱动器的输出位移。

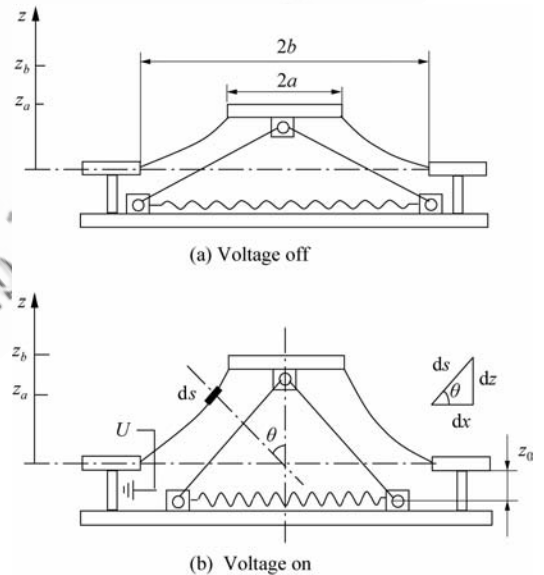


图 2 锥形驱动器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conically-shaped actuator

环形薄膜预拉伸之前的内外径尺寸定义为 a_0 、 b_0 , 初始厚度为 h_0 , 预拉伸后分别为 a 、 b 、 h 。变形前的参考构型坐标系为 $OX\Phi Z$, 当前构型用坐标系 $Ox\phi z$ 表示。取初始构型中一质点 P , 径向坐标为 $(0, X)$, 其邻近微元 dX , 在当前构型中质点 P 的坐标为 $(x(X), \phi(X), z(X))$, 微元 dX 变为 ds , P 点的法线与 z 轴夹角为 $\theta(X)$ 。从图 2

(b)可以看出 ds 、 dx 、 dz 存在如下关系:

$$\begin{cases} (ds)^2 = (dx)^2 + (dz)^2 \\ dx = ds \cos \theta \\ dz = ds \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

对于类似锥形的轴对称回转体,载荷和约束是绕回转轴对称的,其内力及位移也是轴对称的,因此取纬线和经线方向为两个主方向。纬向延伸率 $\lambda_2 = x/X$,经向延伸率 $\lambda_1 = ds/dX = dx/(dX \cdot \cos \theta)$,如图 2 所示,锥体驱动器的平衡方程为

$$T_1 k_1 + T_2 k_2 = 0 \quad (13)$$

$$k_2 T_1 = F/(2\pi x^2) \quad (14)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为经向和纬向的内力; k_1 、 k_2 分别为薄膜中面的两个主曲率。

$$\begin{cases} k_1 = \left(\frac{d\theta}{dX} / \frac{dx}{dX} \right) \cos \theta \\ k_2 = (\sin \theta) / x \end{cases} \quad (15)$$

两个主方向的内力可以表示为

$$\begin{cases} T_1 = \lambda_3 h_0 \sigma_1 \\ T_2 = \lambda_3 h_0 \sigma_2 \end{cases} \quad (16)$$

将式(10)、式(15)和式(16)代入式(13)和式(14)得:

$$\frac{d\theta}{dX} = - \frac{T_2 \lambda_1 \sin \theta}{T_1 \lambda_2 X} \quad (17)$$

$$\pi X h_0 \sigma_1 \sin \theta = k \lambda_1 \left(2z_1 - \frac{x_0 z_1}{\sqrt{L^2 - z_1^2}} \right) \quad (18)$$

同时垂直方向位移 z 的微分为

$$dz = \lambda_1 \sin \theta dX \quad (19)$$

式中:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 2C_{10}(\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}) + 4C_{20} \cdot \\ & (\lambda_1^3 + \lambda_1\lambda_2^2 + \lambda_1^{-1}\lambda_2^{-2} - 3) \cdot \\ & (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}) + 6C_{30} \cdot \\ & (\lambda_1^3 + \lambda_1\lambda_2^2 + \lambda_1^{-1}\lambda_2^{-2} - 3)^2 \cdot \\ & (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}) - (U/h_0)^2 \epsilon_r \epsilon_0 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \end{aligned} \quad (20)$$

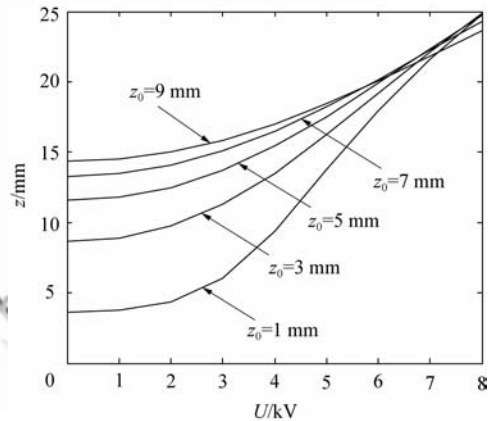
式(17)~式(19)构成微分代数方程组,边界条件为: $A \leq X \leq B, x(A) = a, x(B) = b, z(B) = 0$ 。

4 理论分析

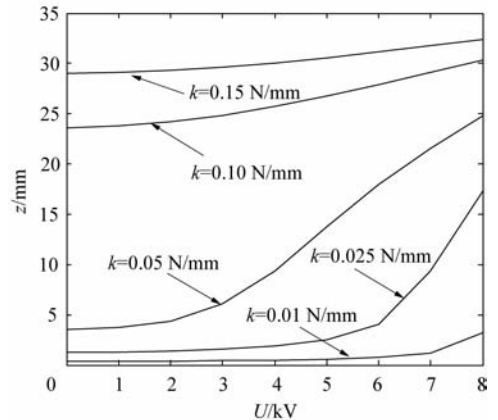
如第 2 节所述,预载荷机构对驱动器的性能影响很大。对于给定连杆长度、弹性元件初始长度的预载荷机构,弹性元件刚度、偏置位移决定了

锥形驱动器的输出特性。选取驱动器尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$,根据驱动器的结构尺寸,选取预载荷机构的连杆长度 $L = 40 \text{ mm}$,弹性元件初始长度 $x_0 = 30 \text{ mm}$ 。求解式(17)~式(19)构成的微分代数方程组,可以得到锥形驱动器在不同预载荷 F 、电压 U 下的输出位移、薄膜中的应力应变分布及驱动器的力输出曲线。同时还可以得出锥形驱动器通电前后的力-位移曲线以及工作推程、回程的输出力。

图 3(a)为不同电压下,预载荷机构的弹性元件刚度恒定($k = 0.05 \text{ N/mm}$),偏置位移 z_0 改变时驱动器位移曲线。可以看出,随着 z_0 的增加,通电前驱动器的初始位移也相应地增加,但驱动器的输出位移(通电前后位移差)逐渐减小。图 3(b)为偏置位移恒定($z_0 = 1 \text{ mm}$),弹性元件刚度改变时的驱动器输出位移曲线。可以看出,随



(a) z_0 changes while k keeps constant



(b) k changes while z_0 keeps constant

图 3 预载荷机构与驱动器输出位移关系

Fig. 3 Relationship between preload mechanism and displacement of actuator

着 k 的增加,驱动器的初始位移递增,但驱动器的输出位移却是先递增后递减的。选取适当的 z_0 和 k 可以提高驱动器的输出位移,下面的分析选取 $z_0=1\text{ mm}$, $k=0.05\text{ N/mm}$ 的预载荷机构。

根据第 3 节建立的驱动器模型计算得出锥形驱动器通电前后的力-位移曲线以及不同偏置位移的预载荷力-位移曲线,如图 4 所示。图中 f 为驱动器的输出力。

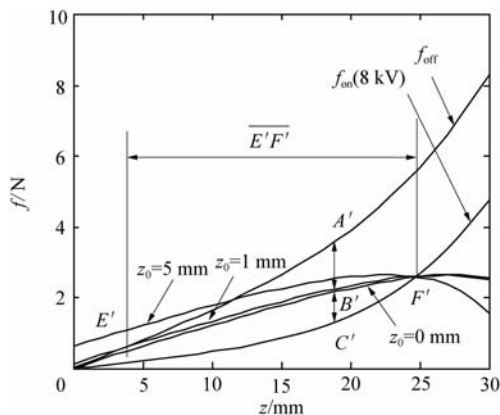


图 4 驱动器力-位移曲线及预载荷曲线

Fig. 4 Relationship between force-displacement curves of actuator and preload mechanism

从图 4 可以看出,不同的预载荷刚度曲线都与通电前后的锥形驱动器刚度曲线有两个交点 E' 、 F' ,这两个交点之间的水平距离 $\overline{E'F'}$ 就是驱动器的输出位移。预载荷曲线与通电曲线 f_{on} 之间的力差 $\overline{B'C'}$ 为驱动器的推程输出力,断电曲线 f_{off} 与预载荷曲线之间的力差 $\overline{A'B'}$ 为驱动器回程输出力。随着 z_0 的增加,预载荷曲线向上移动,接近而远离 f_{on} ,此时 $\overline{E'F'}$ 减小表示驱动器的输出位移减小,同时驱动器的推程力 $\overline{B'C'}$ 增大回程力 $\overline{A'B'}$ 减小。根据预载荷曲线与 f_{on} 、 f_{off} 曲线之间的关系,图 4 可以作为锥形驱动器设计的参考依据。

根据第 3 节设计的预载荷机构,计算出锥形驱动器在不同激励电压下的位置以及介电型 EAP 薄膜中的延伸率分布、柯西应力分布如图 5~图 7 所示。从图 5 可知,随着电压的增加,驱动器输出位移逐渐增大。驱动电压越大,驱动器薄膜的截面形状越接近于锥形。图中 r 为驱动器薄膜的半径。

图 6 为驱动器薄膜截面从内径到外径上各点的延伸率分布。随着驱动电压的增加,两个主方向的延伸率都是增加的。经向延伸率从内径到外

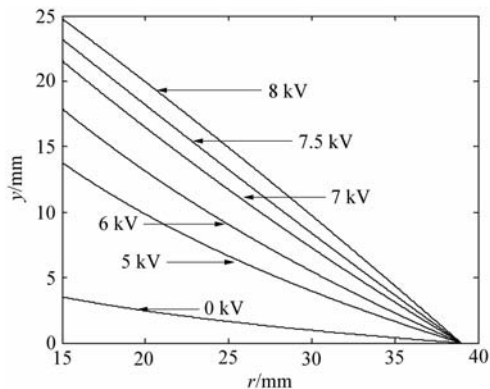
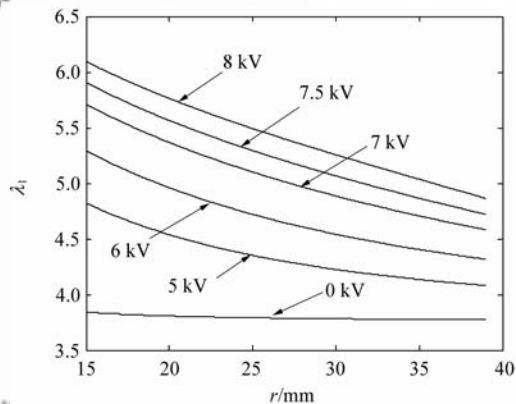
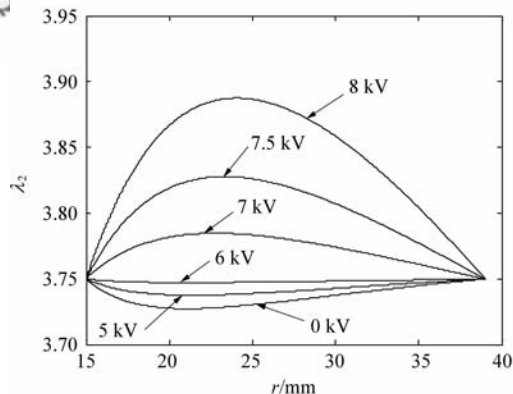


图 5 不同电压下驱动器内部圆盘位置

Fig. 5 Position of inner frame of actuator under different voltages



(a) Distribution of longitudinal stretch ratio in membrane



(b) Distribution of latitudinal stretch ratio in membrane

图 6 驱动器薄膜内主延伸率分布

Fig. 6 Distribution of principal stretch ratio in membrane of actuator

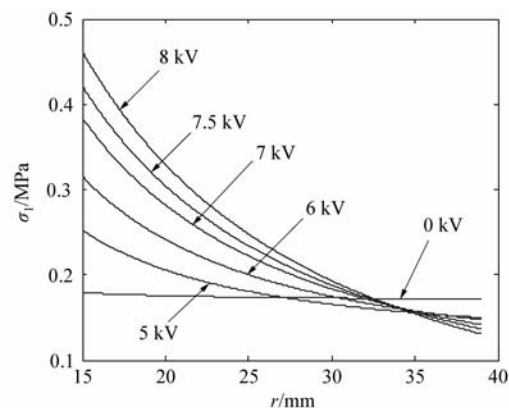
径处递减,这是因为靠近内径处的变形最大;纬向延伸率在驱动器的内外径处是相等的,这是由于薄膜双向拉伸后内外径处是固定的,而当驱动电

压较小内外径处的纬向延伸率最大,驱动电压较大时,内外径处的延伸率最小。

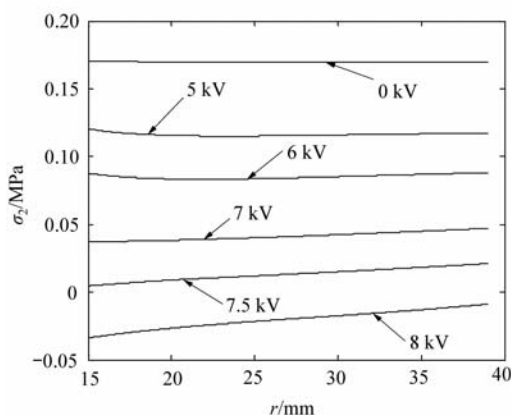
图 7 为锥形驱动器两个主方向的主应力分布状况。从图中可以看出,随着驱动电压的增加经向柯西应力增大,从驱动器内径到外径处应力逐渐减小的,为拉应力。而纬向主应力随驱动电压的增加而减小,当驱动电压足够大时,纬向上应力变为负值,为压应力。当薄膜一个方向受拉伸,另一方向受压缩的时候,容易发生起皱现象。在试验中,施加电压为 8 kV 时,驱动器薄膜内圈附近起皱,为了保证驱动器的安全工作,最大施加电压为 7.5 kV。

双向拉伸 $375\% \times 375\%$ 以后固定在框架上。驱动器内外框架尺寸分别为 30 mm 和 78 mm。选取橡皮条为弹性元件,为简化分析,认为橡皮条的刚度系数是恒定的,利用试验平台测得弹性元件的力-位移曲线,进行参数拟合得到弹性元件刚度系数约为 0.045 N/mm。碳纤维片放在驱动器内圈上用来指示标尺刻度。由于介电型 EAP 材料的黏性影响,输出位移刻度在驱动器稳定后(大约 5 s)读出。

如图 8 所示,通电前,在负刚度预载荷的作用下,锥形驱动器达到平衡位置,标尺读数为 94 mm,此时初始位移比较小(约为 4 mm),施加电压 7.5 kV 以后,驱动器继续运动,到达第 2 个平衡位置 114 mm 刻度处,通电前后的输出位移为 20 mm。



(a) Distribution of longitudinal stress in membrane



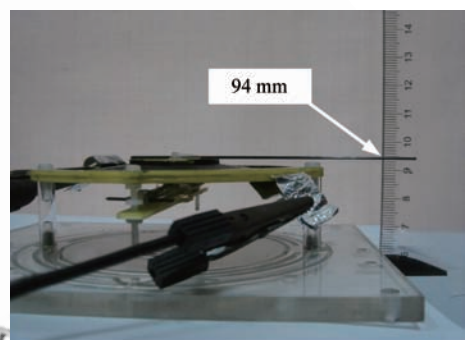
(b) Distribution of latitudinal stress in membrane

图 7 驱动器薄膜内柯西主应力分布

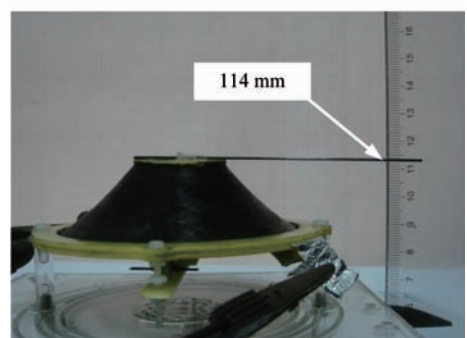
Fig. 7 Distribution of principal stress in membrane of actuator

5 试验验证

采用两层 1 mm 厚的 VHB4910 薄膜叠加,



(a) Voltage off



(b) Voltage on

图 8 驱动器位移输出试验

Fig. 8 Displacement output experiment of actuator

图 9 为在试验平台上测得的锥形驱动器通电前后的力-位移曲线。可以看出推程和回程的最大输出力分别为 0.46 N 和 2.16 N,由于该驱动器的拉力远大于推力,因此该驱动器比较适合采用拉力作为驱动力的间歇驱动场合。

利用第3节建立的模型分析得到相同参数的驱动器在通电前后的位移分别为 3.5 mm 和 22.1 mm。同时得到通电 7.5 kV 时和断电后驱动器的理论力-位移曲线,如图 10 所示,驱动器的推程和回程的理论输出力分别为 0.68 N 和 2.30 N。

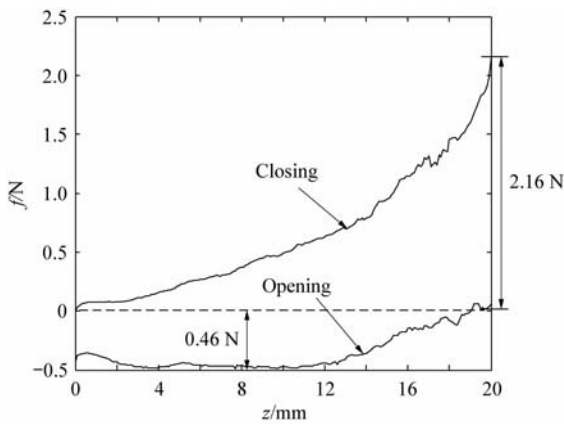


图9 驱动器力输出试验曲线

Fig. 9 Experimental force-displacement curves of actuator

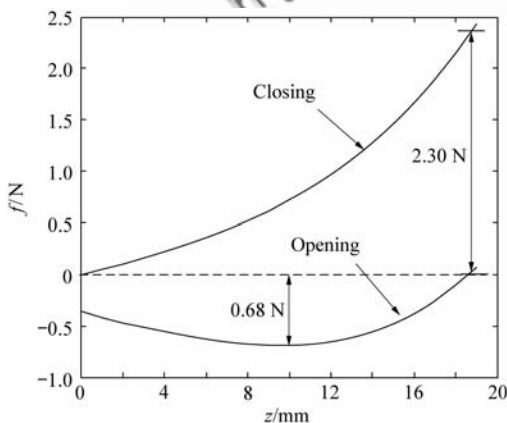


图10 驱动器理论力输出曲线

Fig. 10 Theoretical force-displacement curves of actuator

比较图9和图10可以发现,驱动器的理论输出位移为 $22.1 - 3.5 = 18.6$ mm,比试验得到的 20 mm 位移偏小。驱动器的理论输出力则比试验测得值偏大。存在偏差的原因主要是由以下因素决定的:

(1) 采用的介电型 EAP 材料参数影响分析结果;

(2) 文献[15]和文献[16]认为介电常数随着拉伸率改变,本文采用的介电常数是恒定的;

(3) 为了简化分析,认为预载荷弹性元件的刚度是恒定的;

(4) 介电型 EAP 薄膜材料自身的黏弹性以及柔性电极的涂抹都会影响试验结果。

6 结论

(1) 预载荷机构尺寸确定时,弹性元件的参数影响驱动器的输出位移,适当的弹性元件的刚度 k 和较小的偏置位移 z_0 。可产生较大的输出位移。

(2) 预载荷机构和驱动器薄膜的性质一起决定了整个驱动器的输出性能,根据通断电前后的驱动器力-位移曲线和预载荷机构力-位移曲线,可以确定驱动器的输出位移及输出力。

(3) 一定尺寸的驱动器,激励电压太大会导致驱动器薄膜起皱,进而可能发生击穿;电压太小则不能获得较大的输出位移及输出力,因此必须合理地选择激励电压。

(4) 理论分析与试验结果存在一定的偏差,在以后的工作中将进一步提高模型的精确度。

本文分析了各参数对驱动器输出特性的影响,研究结果可以为介电型 EAP 驱动器的设计提供参考依据,通过选择适当的驱动器结构尺寸参数及预载荷机构参数可以获得预期的输出力及输出位移要求。

参 考 文 献

- [1] Yoseph B C. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles—reality, potential and challenges [M]. Bellingham: SPIE Press, 2004.
- [2] Dubowsky S, Lagnemma K, Liberatore S, et al. A concept mission: microbots for large-scale planetary surface and subsurface exploration [C]// AIP Conference Proceedings. 2006: 1449-1458.
- [3] Jhong Y Y, Huang C M, Hsieh C C, et al. Improvement of viscoelastic effects of dielectric elastomer actuator and its application for valve devices [C]// Proceedings of SPIE. 2007, 6524: 65241Y. 1-65241Y. 9.
- [4] Goulbourne N C, Frecker M I, Mockensturm E, et al. Electro-elastic modeling of a dielectric elastomer diaphragm for a prosthetic blood pump [C]// Proceedings of

- SPIE. 2004, 5385: 122-133.
- [5] Aschwanden M, Beck M, Stemmer A, et al. Diffractive transmission grating tuned by dielectric elastomer actuator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(14): 1090-1092.
- [6] 王化明,朱剑英,叶克贝,等. 介电弹性体线性驱动器研究 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 291-296.
Wang Huaming, Zhu Jianying, Ye Kebei, et al. Research on linear dielectric elastomer actuator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (7): 291-296. (in Chinese)
- [7] Luan Y G, Wang H M, Zhu Y L. Design and implementation of cone dielectric elastomer actuator with double-slider mechanism [J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(Supplement 1): S212-S217.
- [8] Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008, 56(2): 467-486.
- [9] Goulbourne N C, Mockensturm E M, Frecker M J. Electro-elastomers; large deformation analysis of silicone membranes [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(9): 2609-2626.
- [10] Toupin R A. The elastic dielectric [J]. Journal of Rational Mechanics and Analysis, 1956(5): 850-915.
- [11] Tezduyar T E, Wheeler L T, Graux L. Finite deformation of a circular elastic membrane containing a concentric rigid inclusion [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1987, 22(1): 61-72.
- [12] He T H, Zhao X H, Suo Z G. Dielectric elastomer membranes undergoing inhomogeneous deformation [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(8): 083522-083528.
- [13] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates [J]. Rubber Chemistry & Technology, 1990, 63(5): 792-805.
- [14] Fung Y C. Biomechanics: mechanical properties of living tissues [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1993: 277-278.
- [15] Kofod G, Kornbluh R, Pelrine R, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2003, 14 (12): 787-793.
- [16] Liu Y J, Liu L W, Yu K, et al. An investigation on electromechanical stability of dielectric elastomers undergoing large deformation [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 095040-095048.

作者简介:

朱银龙(1981—) 男,博士研究生。主要研究方向:介电型 EAP 换能器、机器人。

E-mail: zhuyinlong@nuaa.edu.cn

王化明(1973—) 男,博士,副教授。主要研究方向:介电型 EAP 换能器、微操作、机器人。

Tel: 025-84892503

E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

赵东标(1963—) 男,博士,教授。主要研究方向:数控技术、机器人技术。

E-mail: zdbme@nuaa.edu.cn

梁云广(1983—) 男,博士研究生。主要研究方向:弹跳机器人。

E-mail: luanyunguang@163.com

Research of Conically-shaped Dielectric Electroactive Polymer Actuators Based on Negative Stiffness Preload Mechanism

ZHU Yinlong¹, WANG Huaming^{1, 2, *}, ZHAO Dongbiao¹, LUAN Yunguang¹

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

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: Modeling a dielectric electroactive polymer (EAP) actuator is crucial for the design and optimization of actuators. By combining the large deformation elastic theory of membranes and Maxwell stress, this paper builds a model that describes the electromechanical coupling of dielectric EAP materials. A negative stiffness preload mechanism is analyzed which can significantly improve the actuation characteristics of an EAP actuator, and a model of a conically-shaped dielectric EAP actuator with negative stiffness preload mechanism is founded. By computing the nonlinear ordinary differential algebraic equations, the main factors that contribute to the performance of the conically-shaped dielectric EAP actuator are analyzed. The voltage-displacement curves and principal stretch ratio and the distribution of principal stress in the membrane under different voltages are obtained. At the same time, the force-displacement curve of the EAP actuator with voltage on or off is also derived. Finally, factors contributing to the deviation between theoretical analysis and experimental results are listed. The results show that the proposed model can guide the design and application of conically-shaped dielectric EAP actuators.

Key words: negative stiffness; dielectric EAP; preload mechanism; actuator; electromechanical coupling

Received: 2010-12-08; **Revised:** 2011-02-28; **Accepted:** 2011-03-25; **Published online:** 2011-04-12 15:41:57

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110412.1541.009.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110412.1541.009

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (50975139); Foundation of State Key Laboratory of Robotics (RLO200912)

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84892503 E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn