

文章编号: 1001-4888(2023)04-0415-10

确定柔性驱动单元位移效率的能量占比法^{*}

阮宏波, 屈川, 仇巍, 侯振德

(天津大学 机械工程学院, 天津 300354)

摘要: 介电弹性体是一种能在电场作用下改变其自身面积和厚度的电活性柔性材料, 目前已被广泛用于制作各种结构的柔性驱动器。本文研制了一种马鞍形驱动单元, 为了使驱动单元在一定电压驱动下达到单步最大位移(或称最大运动效率), 从经典的超弹性材料能量理论出发, 提出了静电能与预拉伸应变能占比的方法, 用于确定介电弹性体薄膜的最佳预拉伸比例, 从而实现柔性驱动单元最大运动效率。基于 Gent 模型和 neo-Hookean 模型, 通过分析计算确定了能量占比与 2 个独立的预拉伸伸长比之间存在一单脊三维曲面的关系, 并进一步发现介电薄膜在 2 个伸长比之和为常数的情况下, 2 个方向的伸长比相等时, 能量占比最大。又通过对多组不同预拉伸伸长比的柔性驱动单元实验测试发现, 单元能量占比越大, 单元相对位移也越大; 单元 2 个方向伸长比的值越靠近单脊三维曲面的脊或称凸起部分, 单元相对位移越大, 反之位移则越小。经实验验证, 实验结果与计算结果的三维曲面分布趋势一致, 证实了能量占比方法的有效性。

关键词: 介电弹性体; 伸长比; 柔性驱动单元; 能量占比

中图分类号: TB381; TP242 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-122

0 引言

近年来, 随着材料和智能技术的进步, 出现了柔性驱动器新型动力系统^[1-3]。所谓柔性驱动器, 是指既能输出能量又具有柔韧性的装置^[4-6], 比如智能仿生机器人的手、足等运动部分都具有柔性性质的驱动器。柔性介电弹性材料在力电耦合激励下能产生力学响应, 属于新型功能材料^[7-8]。利用此材料制成的超弹性介电柔性驱动器具有形变大、响应快等优点^[9-10], 此外, 超弹性介电弹性体驱动器可以无需传动机构直接对外做功, 在航空航天、生物仿生、机械军工等领域具有广阔的应用前景^[11-13]。

目前国内外已经发展出多种柔性驱动器。Kofod 等^[14]设计了一种可以抓取物体的三爪驱动机构, 该驱动机构在未通电时, 三爪处于闭合状态, 当对驱动机构加电后, 介电弹性体薄膜发生变形, 三爪张开, 断开电源后三爪重新恢复闭合, 以此实现对物体的抓取。Carpi 等^[12]通过将整根硅橡胶圆柱切削成螺旋形薄片结构, 研制出了一种螺旋形硅橡胶驱动器, 在硅橡胶薄片 2 面涂覆柔性电极并通电, 驱动器可以实现直线方向上的约 5% 应变。Cao 等^[15]研发了一款仿生扑翼共振机器人, 该机器人采用双锥形驱动结构, 通过上下锥形薄膜交替运动, 带动传动轴上下运动, 进而带动传动齿轮做扑翼运动。Li 等^[6]研制了一款软体仿生机器鱼, 该机器鱼将电池和电路板等控制部件分块浇筑在凝胶中, 保证了在深海底不会被巨大的水压破坏, 还利用海水作为导电负极实现了机器鱼整体结构优化, 该仿生机器鱼依靠扑动

^{*} 收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672350)

通信作者: 仇巍(1978-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 实验固体力学。Email: qiuwei@tju.edu.cn

屈川(1988-), 男, 硕士, 工程师。主要研究领域: 实验固体力学。Email: quchuan@tju.edu.cn

两侧鱼鳍,可以在深 10900m 的马里亚纳海沟以 14cm/s 的速度自由游动。Wang 等^[16]基于一种锥形介电弹性体驱动器,实验研究了不同预拉伸和不同预紧力下驱动器的驱动位移和输出力的数量及稳定性关系,结果表明较大的预拉伸比会引起介电弹性体的明显不稳定。

超弹性介电弹性体一般为薄膜状,制作柔性驱动器时,需要对超弹性体薄膜进行预拉伸以提高驱动器性能和效率^[17-18]。预拉伸多少才能获得最好的驱动效果,是需要探讨的问题。本文从经典的超弹性材料的能量理论^[19-21]出发,提出了通过计算静电能与预拉伸应变能占比的方法,以确定介电弹性体薄膜的最佳预拉伸比例,实现柔性驱动单元的行走最大效率,并以一种马鞍形柔性驱动单元为例,通过实验证明了方法的有效性。

1 能量占比方法

1.1 介电弹性体薄膜的驱动

用超弹性介电弹性体薄膜制作的柔性驱动器,可以行走的原因是介电弹性材料在电场力的作用下会发生变形^[22-23]。在介电弹性体薄膜 2 面均匀涂覆一层柔性电极,并分别与高压电源正负极相连,通电后薄膜产生变形,表面积增大,厚度减小,变形示意图如图 1 所示,断电后薄膜变形消失恢复原状。

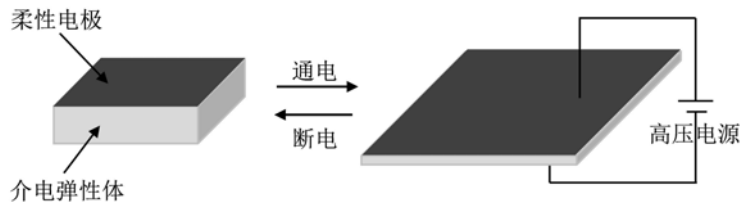


图 1 介电弹性体薄膜变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deformation of dielectric elastomer film

1.2 能量占比法的提出

基于图 1 的实验,可以发现,在薄膜平面内 2 个相互垂直方向预拉伸量的大小及比例不同都会影响薄膜的变形程度,反映在驱动器或驱动单元上就是影响行走步幅或驱动效率。为了尽可能提高驱动效率,本文提出了一种能量占比法,以探索能否作为确定驱动器最佳预拉伸大小的参考准则。大多数情况下,成形后的柔性驱动单元为三维结构,但多数薄膜仍是可展曲面,因此,本文仍以平面状态的薄膜为对象进行分析。

对于图 2 所示的超弹性介电弹性体薄膜,初始状态(未预拉伸)的尺寸分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,瞬时状态(垂直双向预拉伸后)的尺寸分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 。薄膜的 3 个预拉伸伸长比分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 :

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{L_1}, \lambda_2 = \frac{l_2}{L_2}, \lambda_3 = \frac{l_3}{L_3} \quad (1)$$

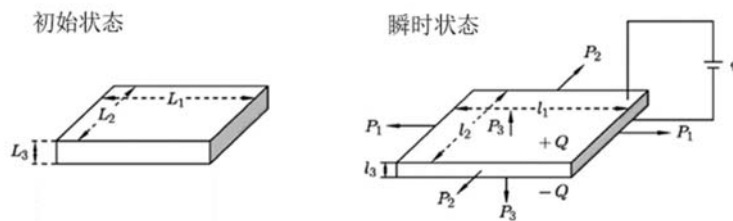


图 2 介电弹性体薄膜状态分析示意图^[20-21]

Fig. 2 Deformation state of a dielectric elastomer film^[20-21]

薄膜是不可压缩固体,故体积 V_0 保持不变,其值为

$$V_0 = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \quad (2)$$

由电场引起的应变能密度 W_p ^[20] 为

$$W_p = \frac{\epsilon E^2}{2} \quad (3)$$

式中: ϵ 为薄膜介电常数; 电场强度 $E = \frac{V_p}{l_3}$, V_p 为外加电源电压。将 E 代入式(3)可表示为

$$W_p = \frac{\epsilon V_p^2}{2\lambda_3^2 L_3^2} \quad (4)$$

薄膜预拉伸的应变能密度 W_s [20] 为

$$W_s = W_s(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (5)$$

因薄膜不可压缩, 伸长比之积 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$, 所以函数 W_s 只有 2 个独立的伸长比变量。

介电弹性体薄膜总的应变能密度 W 为预拉伸产生的应变能密度 W_s 和外加电场所产生的静电应变能密度 W_p 之和, 可表示为

$$W = W_s + W_p \quad (6)$$

薄膜总的应变能 U [20] 为

$$U = W_s(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) V_0 + \frac{\epsilon V_p^2 V_0}{2\lambda_3^2 L_3^2} \quad (7)$$

由式(7)可以求出膜内的应力及变形 [20-21], 但是尚无法直接确定外加电场与特定位移之间的关系, 尤其是所求位移与伸长比 λ_1, λ_2 之间的关系, 因此从能量角度进一步分析, 将外加电场对介电弹性体薄膜施加的静电能和薄膜预拉伸的应变能分别记为 U_1 和 U_2 , 即

$$U_1 = \frac{\epsilon V_p^2 V_0}{2\lambda_3^2 L_3^2} \quad (8)$$

$$U_2 = W_s(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) V_0 \quad (9)$$

定义 R_e 为外加电场引起的静电能 U_1 与预拉伸的应变能 U_2 的比值, $R_e = \frac{U_1}{U_2}$, 再将式(8)和式(9)分别代入 R_e 得

$$R_e = \frac{\epsilon V_p^2}{2W_s \lambda_3^2 L_3^2} \quad (10)$$

驱动单元产生的相对位移是介电薄膜在电场力的作用下发生变形引起的, 因此在薄膜的总能量 U 中, 静电能占比越大, 驱动单元的驱动效果可能越好, 即 R_e 越大, 驱动单元产生的相对位移可能越大。如果设想成立, 就可以根据薄膜内的静电能与预拉伸应变能的占比来寻求驱动单元的最优伸长比, 以使柔性驱动单元产生最大的相对位移, 实现驱动效率最大化。

2 能量占比法的分析计算

分别基于 neo-Hookean 和 Gent 典型超弹材料的能量模型按式(10)进行分析计算, 以验证能量占比法是否对不同模型都适用。

2.1 neo-Hookean 模型

neo-Hookean 模型应变能密度函数 W_{s1} [20] 为

$$W_{s1} = \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (11)$$

式中, μ 为小应力下的剪切模量。

将式(11)代入式(10), 由 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$, 得到基于 neo-Hookean 模型的能量比值 R_{e1} 为

$$R_{e1} = \frac{\epsilon V_p^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2}{\mu (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} - 3) L_3^2} \quad (12)$$

以 VHB4910 超弹性薄膜为例, 材料参数 [24] $\epsilon = 4.2 \times 8.85 \times 10^{-12}$, $\mu = 5.2 \times 10^4$ 。取 $L_3 = 10^{-3}$ m, 当外加电压 $V_p = 3$ kV 时, 以 λ_1, λ_2 作为参考坐标面(底面), 以能量占比 R_{e1} 为垂直于底面的纵坐标轴绘制关于式(12)函数的三维曲面图, 如图 3(a) 所示。

2.2 Gent 模型

Gent 模型的应变能密度函数 W_g [20] 为

$$W_g = -\frac{\mu J_{lim}}{2} \log \left[1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3}{J_{lim}} \right] \quad (13)$$

式中, J_{lim} 为与极限拉伸有关的常数。

将式(13)代入式(10), 又由 $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$, 得到基于 Gent 模型的能量比值 R_g 为

$$R_g = -\frac{\epsilon V_p^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2}{\mu J_{lim} \log \left[1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} - 3}{J_{lim}} \right]} L_3^2 \quad (14)$$

式中, $J_{lim} = 114$ [24]。在给定加载电压 $V_p = 3\text{kV}$ 下, 画出关于式(14)函数的三维曲面图, 如图 3(b)所示。

图 3(a)、(b)分别是 2 个模型的能量占比三维曲面图, 都是对称单脊曲面且形状与趋势相似, 只是比值 R_e 的大小略有不同。图 3 中单脊曲面的形状主要取决于 λ_1 、 λ_2 和 V_p , 薄膜的特征参数 ϵ 、 μ 和 J_{lim} 只会影响 R_e 的大小或脊的高低, 并不影响其形状, 而本文分析主要基于曲面形态, 因此 2 种模型所得结论必然相同, 故下文不再强调具体基于哪个模型。

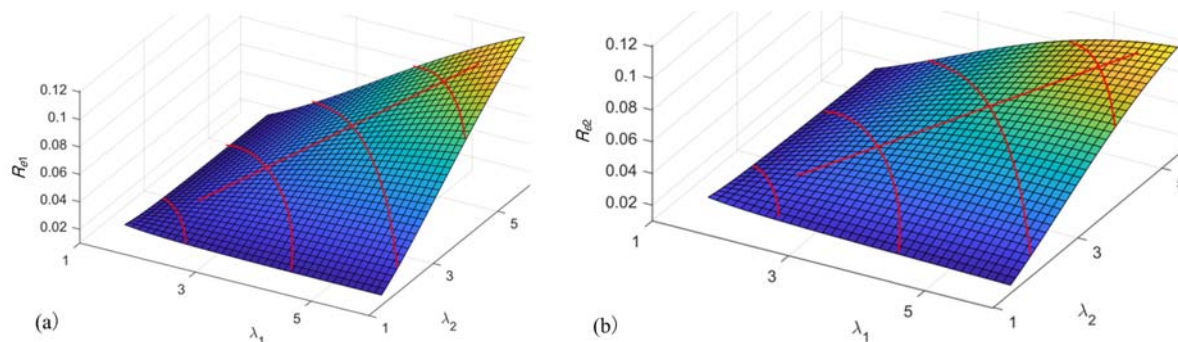


图 3 (a)能量比 R_{e1} 三维曲面图; (b) 能量比 R_{e2} 三维曲面图

Fig. 3 (a) 3D surface of R_{e1} ; (b) 3D surface of R_{e2}

由图 3(a)和(b)可以看出, 图像是关于原点到对角的对称单脊曲面, 图中的脊(粗实直线位置)逐渐上升, 同时曲面向两侧下降。为了便于分析比较伸长比 λ_1 、 λ_2 与能量比值 R_e 的相互变化关系, 取 $\lambda_1 + \lambda_2 = \text{常数}$ (常数取值分别为 4、6、8、10), 形成一系列垂直于底面且平行于 R_e 轴的平面, 这些平面与单脊曲面的交线代表了保持 $\lambda_1 + \lambda_2 = \text{常数}$ 情况下, λ_1 和 λ_2 相互变化对能量比值 R_e 的影响。如图 3(a)和(b)所示, 从每条交线(粗实曲线)可以看出, 当 $\lambda_1 = \lambda_2$ 时, 能量占比取极大值。结合式(12)或式(14)还可以看出, 式中不包括薄膜的初始长度 L_1 和 L_2 , 因此无论薄膜初始长度 L_1 和 L_2 之间的数量关系如何, 只有预拉伸伸长比 λ_1 、 λ_2 代表了膜的能量占比特性, λ_1 和 λ_2 相等且值越大, 能量占比也越大, 柔性驱动单元的位移也就有可能越大。当然, 预拉伸伸长比要在一定范围内, 不能无限增大, 否则超过机械强度极限或电击穿强度极限时, 薄膜会被破坏, 因此 R_e 的上限值还依赖于膜的强度。

3 实验测试与结果分析

能量占比法是否有效, 需由实验验证。验证方法是选取若干位于脊上的点和非脊上的点所对应的薄膜预拉伸伸长比, 制作成相应的驱动单元, 测试驱动单元在设定电压下的相对位移大小。

3.1 柔性驱动单元的制作

VHB4910 丙烯酸薄膜作为介电弹性材料, 膜厚度为 1mm, 将薄膜沿互相垂直的 2 个方向预拉伸至设定的伸长比 λ_1 、 λ_2 , 再将其黏附到聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)矩形弹性框的一侧, 框体示意如图 4(a)所示(这样做的优点是薄膜变形均匀)。根据驱动器的尺寸, 选择的框体的大小为 $10\text{cm} \times 9\text{cm}$, 厚度为 0.4mm, 空心尺寸为 $8\text{cm} \times 5\text{cm}$, 最后在空心处薄膜的两侧均匀涂覆一层碳脂作为柔性电极。由于预拉伸的作用, 薄膜的回弹使得弹性框在介电薄膜张力的作用下发生弹性屈曲, 从平面状态变成马鞍形, 如图 4(b)所示。单元通电后发生变形, 向两侧张开产生相对位移, 经初步和后续实验证明, 加载电

压后图 4(b)中两圆点之间相对位移最大。实验所测试的驱动单元的位移,就是单元两圆点之间的相对位移。

3.2 驱动单元测试

验证实验的基本内容是测试驱动单元加电后产生的相对位移。为了便于比较,分别按 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 6、7、8 和 10,共制作了 11 种不同预拉伸伸长比组合的柔性驱动单元,伸长比(λ_1, λ_2)的具体值见表 1。因为制作单元时,伸长比选取的都是整数倍,所以表 1 中没有 (λ_1, λ_2)为(3.5,3.5)的数据。

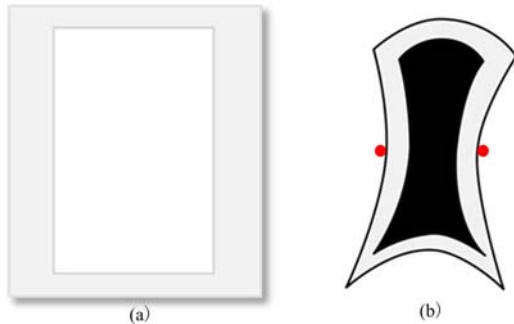


图 4 (a)弹性框;(b)柔性驱动单元示意图
Fig. 4 (a) elastic frame;(b) schematic diagram of a soft actuator unit

表 1 驱动单元的伸长比

Tab. 1 Pre-stretch ratios of the actuator units

λ_1, λ_2 之和	(λ_1, λ_2)		
6	3,3	2,4	4,2
7		2,5	5,2
8	4,4	2,6	6,2
10	5,5	4,6	6,4

实验分别对每种单元加电,测试单元相对位移,然后进行比较。如图 5(a)所示,由型号为 610D-K-CE 的高压放大器为驱动单元提供驱动电压,实验采用分级加电方式,从零开始,电压分别为 1kV、2kV、

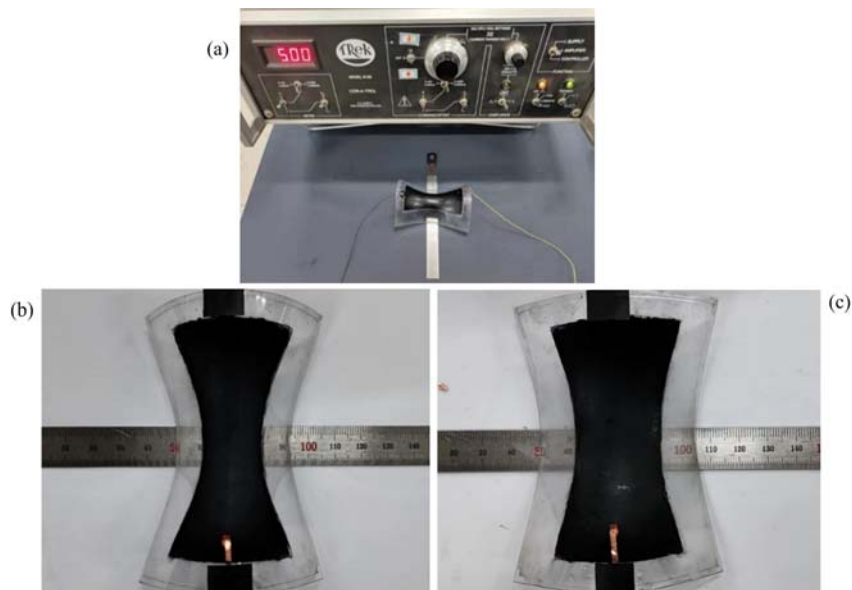


图 5 (a) 驱动单元测试系统;(b) 待测试单元;(c) 加电后产生相对位移的单元
Fig. 5 (a) test system of the actuator unit; (b) actuator unit in electric off status; (c) actuator unit in electric on status

3kV、3.5kV 和 4kV,由于加电后单元位移相对较大且可持续保持,故直接选用直尺测量单元位移。图 5(b)是加电之前的驱动单元;当加载电压后,单元在宽度方向展开,产生相对位移,如图 5(c)所示。由于所用材料具有黏弹性性质,所产生的位移随时间会有变化,为了便于比较,位移测量在加电后约 3s 读取。

3.3 实验结果分析

3.3.1 等值伸长比驱动单元的实验结果

首先分析等值伸长比驱动单元的位移与驱动电压的关系。图 6 为伸长比分别为(3,3)、(4,4)和(5,

5)的驱动单元位移在不同加载电压下的变化曲线。从图6中可以看出,单元位移随外加电压单调增加,而且在 $\lambda_1 = \lambda_2$ 的情况下,两者之和越大,相同电压下单元位移也越大,这一趋势与图3的能量占比曲面图变化趋势一致。在2kV的电压激励下,伸长比为(3,3)、(4,4)的驱动单元产生的相对位移较小,而伸长比为(5,5)的单元的相对位移已经达到了10mm左右。加载电压达到4kV时,伸长比为(3,3)、(4,4)、(5,5)的单元对应的最大相对位移分别约为25mm、27mm和34mm。虽然单元位移随着电压升高而增大,但是电压和位移并不呈线性关系,原因之一是电压的平方和能量成比例,同时还和膜的尺寸、力学性质及弹性框的物理性质有关,上述诸因素都对位移增量的变化趋势有影响。与图6中等值伸长比相对应的是非等值伸长比,即 $\lambda_1 \neq \lambda_2$,接下来分析非等值伸长比驱动单元的相对位移,并与等值伸长比单元相比较。

3.3.2 交线上非等值伸长比的单元实验结果

由于图4中驱动单元框体的尺寸在宽度 λ_2 方向(水平)短于长度 λ_1 方向(竖直),薄膜在等值伸长比下,单元屈曲形态与图4中所示一致,是在 λ_2 方向发生屈曲而形成的马鞍形态。对于非等值伸长比的单元,当 λ_1 小于 λ_2 时,单元形态依然与图4中一致,如图7中左侧(2,6)和(2,4)单元所示。但是,当 λ_1 大于 λ_2 时,由于薄膜2个方向伸长比以及弹性框在长宽方向的刚度都不同,单元屈曲方向也会发生改变。当 λ_1 是 λ_2 的2倍及以上时,比如伸长比(6,2)、(5,2)或(4,2),由于沿 λ_1 方向的回弹力明显大于 λ_2 方向,因此单元沿 λ_1 方向发生屈曲,形成了类似图7右侧所示的2个单元(6,2)和(4,2)的马鞍形态,而且,其相对位移方向会随之发生改变,加电后,单元变为在长度 λ_1 方向产生相对位移。小于2倍时,比如(6,4),仍沿 λ_2 方向的屈曲更明显。由于能量占比法是对静电能与预拉伸应变能的比较,静电能所产生的位移并不与特定的方向对应,所以无论一个单元发生沿 λ_1 还是 λ_2 方向的位移,都适用于式(12)。

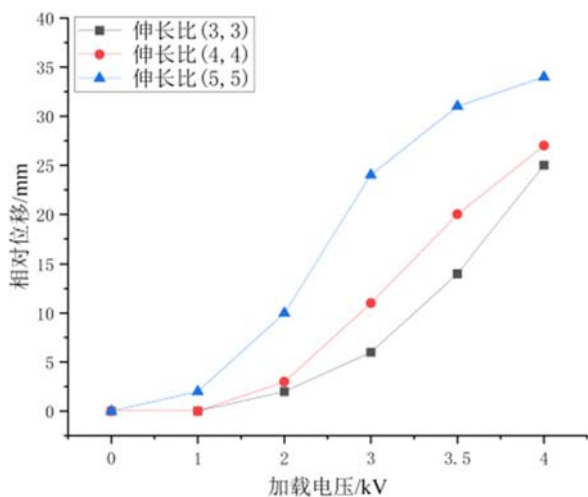


图6 等值伸长比的单元测试结果

Fig. 6 Moving steps of the units with equal stretch ratios versus voltage



图7 2种屈曲形态的驱动单元

Fig. 7 Actuator units with two buckling directions

在图3中,每一条交线上 $\lambda_1 + \lambda_2$ 都是常数,但不同交线的常数值是不同的,比较同一条交线上及不同交线之间各特定点的结果,能更充分显示能量占比方法的意义。

图8(a)为 $\lambda_1 + \lambda_2 = 10$ 时,3种驱动单元伸长比分别为(5,5)、(4,6)和(6,4)时的位移与外加电压的关系曲线。从图中可以看出,伸长比为(5,5)时,在实验的所有外加电压值下,位移都比(4,6)和(6,4)时大。伸长比为(6,4)时的位移值比(4,6)略大。加载电压小于1kV时,3种单元的位移都很小,当加载至电压2kV时,单元都有明显位移,此时伸长比为(5,5)的单元位移已达到10mm左右,但另外2组位

移仍不超过 5mm。由图 8(a)可明显看到,3 种单元相对位移增速最快的电压区间为 2kV 到 3kV,相对增量分别为 140%、260%和 275%,之后随着电压增大,3 条曲线走势基本一致。加载至 4kV 时,等值伸长比的单元位移比后 2 种高约 13%。

图 8(b)、(c)分别为 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 6 和 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 8 时与图 8(a)同类型的曲线。为了从多角度比较,每个图中各多了一条 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 7 的曲线,其伸长比分别为(5,2)和(2,5)。沿 λ_2 方向的测量位移,图中用实心点表示,沿 λ_1 方向的测量位移用空心点表示。

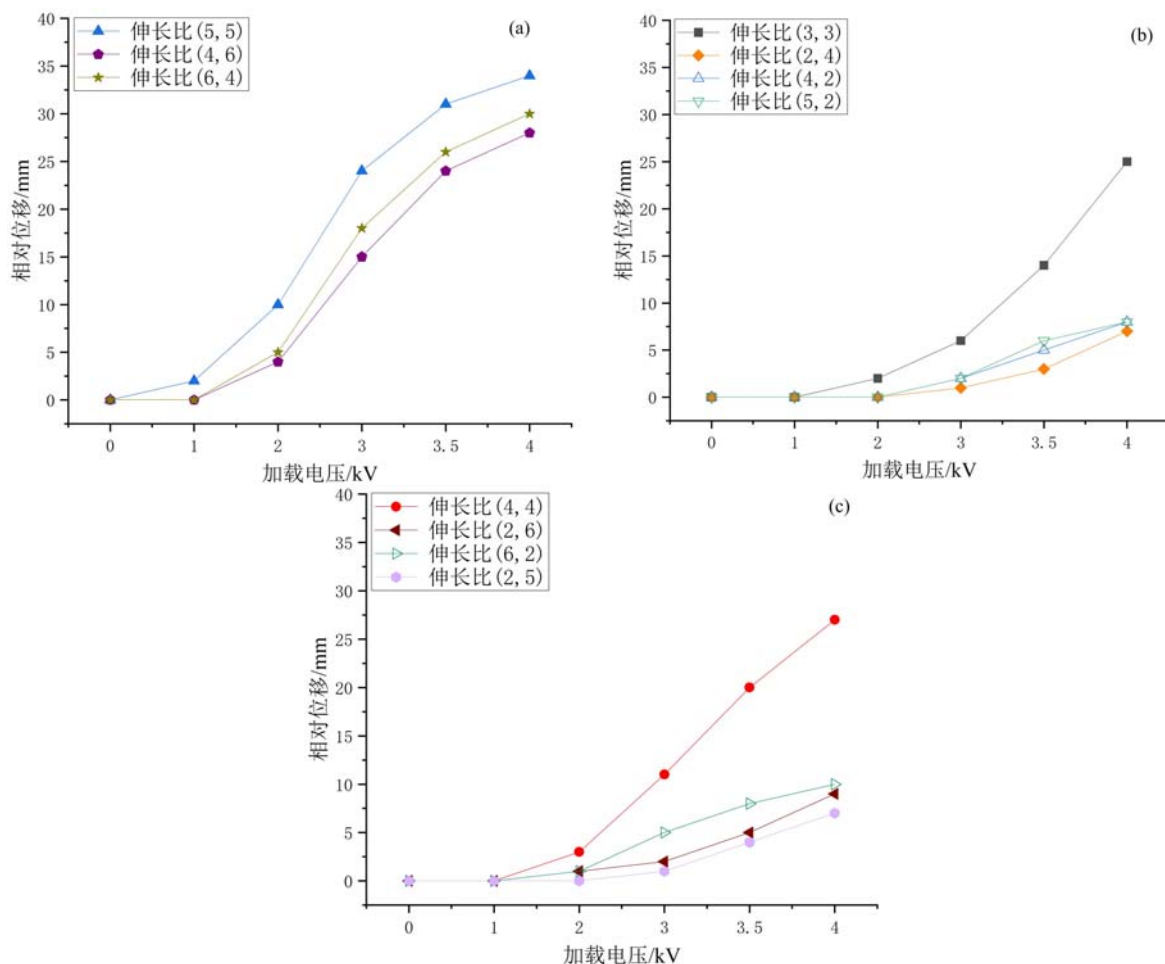


图 8 (a) $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 10 的单元相对位移;(b) $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 6 和 7 的单元相对位移;(c) $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 7 和 8 的单元相对位移

Fig. 8 (a) moving steps of the units with $\lambda_1 + \lambda_2$ of 10; (b) moving steps of the units with $\lambda_1 + \lambda_2$ of 6 and 7;

(c) moving steps of the units with $\lambda_1 + \lambda_2$ of 7 and 8

图 8(b)所示为伸长比分别为(3,3)、(2,4)、(4,2)和(5,2)的 4 种单元的相对位移随外加电压变化的 4 条曲线。由图可知,相同电压下仍然是伸长比为(3,3)的单元位移大于其他 3 种单元,而其余 3 条曲线中,尽管位移方向不一致,但位移大小相近且明显低于(3,3)的单元,其中(5,2)单元位移整体上略大于其他 2 条,这是由于其 $\lambda_1 + \lambda_2$ 大于 6 引起的。由图 8(b)可以看到,驱动电压小于 1kV 时,4 种单元的相对位移几乎为零,随着电压增大,各曲线单调上升。当电压为 2kV 时,伸长比为(3,3)的单元已产生约 2mm 的位移,而其他 3 种单元的相对位移依然接近于零。当加载到 3kV 时,等值伸长比的单元位移为 6mm 左右,4kV 时,约为 25mm,相比于 3kV 时,位移增长了约 317%。对于后 3 种单元,即使在 4kV 电压下,产生的相对位移仍不超过 8mm。

图 8(c)所示 4 条位移电压曲线分别是伸长比为(4,4)、(2,6)、(6,2)和(2,5)的 4 种单元的实验结果。前 3 种单元的 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 8,最后一种单元的 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为 7,伸长比之和小于前 3 种单元。图 8(c)中曲线规律特征与图 8(b)相似,依然是等伸长比(4,4)的单元位移远大于其余 3 种,(2,5)单元的伸长比之

和最小,其位移值也最小。(6,2)单元的位移为 λ_1 方向,其值略大于(2,6)与(2,5)单元。图中驱动电压小于1kV时,4种单元的相对位移同样约等于零。当驱动电压大于2kV后,等值伸长比的单元相对位移开始明显增长,而其他3种位移增长不明显。在3kV电压下,等值伸长比的相对位移为11mm左右,4kV时单元位移相较3kV时,位移增幅约为145%。在4kV电压下,其他3种单元产生的相对位移仍不超过10mm。

为了更形象地描述薄膜伸长比与位移的关系,在图9中给出了能量占比三维曲面图,并将所有驱动单元按伸长比(λ_1, λ_2)标注在曲面上,以便比较单元位移(实验结果)与能量比值分布(计算结果)的对应关系。

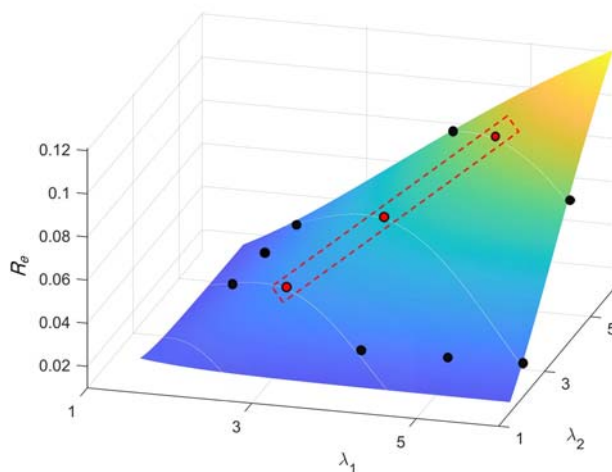


图9 实验测试的坐标点

Fig. 9 Coordinate point of experimental test

图9曲面图上4条白色曲线是 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为常数(垂直于底面且平行于 R_e 轴)的平面与曲面的交线,常数值分别为4、6、8和10。实验选取的单元伸长比之和分别为6、8和10,在和为7时也测量了2种单元,分别如图8(b)和(c)所示。

图9中,脊上3个点(虚线框内)表示 $\lambda_1 = \lambda_2$ 的3种单元在三维曲面图中的坐标点,黑色点表示 $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 的8种单元的位置。尽管图9的纵坐标表示能量比值而不是位移,但是能量占比单脊曲面图的趋势与单元的位移分布规律是一致的:第一,脊上距原点越远的点($\lambda_1 = \lambda_2$,且 λ 值越大),能量占比越大,对应的单元位移也越大,如图6所示;第二,点越接近脊,能量占比相对越大,单元的位移也越大。比如,图8(a)中的点(6,4)和(4,6)比较接近脊上的点(5,5),其位移值仅略小于点(5,5)的值;图8(b)和(c)中的点距离脊相对远,其位移值相对远小于脊上点的位移值。

等伸长比和非等伸长比单元的实验结果与计算结果一致,说明了能量占比方法的有效性。

当薄膜太薄时,预拉伸后产生的回弹力相应地减小,因此可能不足以使实验选用的弹性框屈曲,为了确认这一点,对0.5mm厚度VHB4910型号的超弹性薄膜也进行了实验,发现双向均匀预拉伸至设定伸长比后,薄膜张力确实不足以使PET弹性框发生屈曲。

本文分析主要基于伸长比 $\lambda_1 + \lambda_2$ 的增量为2时,取得了实验结果与计算结果相一致的结论,但是若减小增量,比如为1甚至0.5,实验结果与图9中单脊曲面的契合程度可能并非完全一致,原因如3.3.1所述,不仅位移测量有误差,而且边界条件因素也会影响位移的大小。若要使 $\lambda_1 + \lambda_2$ 在相对小的增量下也能得到有效的结果,就要在实验测试条件一致性方面进行改进。当然,本文实验结果已经足够支持本研究的结论了,需要进一步说明的是实验结果(图6和图8)与理论预测(图9)的计算结果一致,说明了能量占比方法是有效的。形成马鞍形驱动单元时,薄膜有回弹,薄膜的应变能转移到弹性框内,预拉伸总应变能并未减少,所以能量占比的意义并不改变。

4 结论

提出并证明了马鞍形柔性驱动单元的静电能与预拉伸应变能之比可以反映薄膜预拉伸伸长比对驱动单元位移大小的影响。能量占比函数可以绘制成以2个独立的伸长比为参考坐标面,以能量比值为纵坐标轴的单脊曲面。在 $\lambda_1 + \lambda_2$ 为常数的纵平面与曲面的交线上,明确显示出2个方向的伸长比 $\lambda_1 = \lambda_2$ 时,能量占比最大,实验证明了此时柔性驱动单元的位移也确实最大;当伸长比 $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 时,标注点越靠近脊,能量占比越大,单元相对位移也越大,反之则越小。

因不论基于本文哪种模型,能量占比的表达式关于 λ_1, λ_2 都是对称的,故虽然伸长比 λ_1, λ_2 的值不同时,单元的屈曲方向也可能不同,但是对于驱动单元2个方向的位移都是适用的。本质上能量占比表达式不依赖边界条件,文中单元所选用的框体是矩形的,相当于2个方向的边界不一致,但最终结论依然与实验结果基本一致,说明能量占比方法对于提高矩形单元的效率具有参考作用。

参考文献:

- [1] Pierre-Gilles D G, Jacques B, Freeman J D. Fragile objects: soft matter, hard science, and the thrill of discovery [J]. American Journal of Physics, 1997, 65(7):675.
- [2] 王海涛, 彭熙凤, 林本末. 软体机器人研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(2):94-106 (WANG Haitao, PENG Xifeng, LIN Benmo. Research development of soft robots[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(2):94-106 (in Chinese))
- [3] Brochu P, Pei Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2010, 31(1):10-36.
- [4] Amin H, Assal S F M, Iwata H. A new hand rehabilitation system based on the cable-driven mechanism and dielectric elastomer actuator[J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(2):357-369.
- [5] Pfeil S, Henke M, Katzer K, et al. A worm-like biomimetic crawling robot based on cylindrical dielectric elastomer actuators[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 7:1-11.
- [6] Li G R, Chen X P, Zhou F H, et al. Self-powered soft robot in the mariana trench[J]. Nature, 2021, 591(7848):66-71.
- [7] Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q B, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. Science, 2000, 287(5454):836-839.
- [8] 陈花玲, 王永泉, 盛俊杰, 等. 电活性聚合物材料及其在驱动器中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6):205-214 (CHEN Hualing, WANG Yongquan, SHENG Junjie, et al. Research of electro-active polymer and its application in actuators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6):205-214 (in Chinese))
- [9] Huang J S, Li T F, Chiang F C, et al. Giant, voltage-actuated deformation of a dielectric elastomer under dead load[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(4):41911.
- [10] La T, Lau G, Shiau L, et al. Muscle-like high-stress dielectric elastomer actuators with oil capsules[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(10):105006.
- [11] Nathaniel N G, Dimitri D D, Cai S Q, et al. Translucent soft robots driven by frameless fluid electrode dielectric elastomer actuators[J]. Science Robotics, 2018, 3(17):eaat1893.
- [12] Carpi F, Migliore A, Serra G, et al. Helical dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(6):1210-1216.
- [13] 钟林成, 王永泉, 陈花玲. 基于介电弹性软体材料的能量收集: 现状、趋势与挑战[J]. 中国科学:技术科学, 2016, 46(10):987-1004 (ZHONG Lincheng, WANG Yongquan, CHEN Hualing. Energy harvesting based on soft material of dielectric elastomers: status, trends and challenges[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2016, 46(10):987-1004 (in Chinese))
- [14] Kofod G, Wirges W, Paajanen M, et al. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(8):081916-1-081916-3.
- [15] Cao C J, Gao X, Burgess S, et al. Power optimization of a conical dielectric elastomer actuator for resonant robotic systems[J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 35:100619.

- [16] Wang H, Yang L, Zhang X N, et al. Effect of different prestretching index and preloading on actuation behaviors of dielectric elastomer actuator[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15:4064–4073.
- [17] Jiang Y J, Liu S T, Zhong M L, et al. Optimizing energy harvesting performance of cone dielectric elastomer generator based on VHB elastomer[J]. *Nano Energy*, 2020, 71:104606–104606.
- [18] Hajiesmaili E, Clarke D. Dielectric elastomer actuators[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(15):151102.
- [19] Suo Z G, Zhao X H, Greene W. A nonlinear field theory of deformable dielectrics[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(2):467–486.
- [20] Suo Z G. Theory of dielectric elastomers[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6):549–578.
- [21] Zhao X H, Suo Z G. Theory of dielectric elastomers capable of giant deformation of actuation[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(17):178302.
- [22] Suo Z G. Mechanics of stretchable electronics and soft machines[J]. *MRS Bulletin*. 2012, 37(3):218–225.
- [23] Moscardo M, Zhao X H, Suo Z G, et al. On designing dielectric elastomer actuators[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(9):93503.
- [24] Kaltseis R, Keplinger C, Adrian K S J, et al. Natural rubber for sustainable high-power electrical energy generation[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(53):27905–27913.

An energy ratio method for determining the moving efficiency of a soft actuator unit

RUAN Hongbo, QU Chuan, QIU Wei, HOU Zhende

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Dielectric elastomer is an electroactive flexible material that can be used to develop soft actuators, for it can change its area and thickness under the action of an electric field. An energy ratio method of Hyperelastic Materials is proposed in this paper in order to determine the optimized stretch ratios of the elastomer film and then design a soft actuator unit capable of moving with a maximum step. Based on Gent and neo-Hookean models, the obtained expressions of the energy ratios are single ridge 3D surface in a three-dimensional coordinate system with two mutually perpendicular pre-stretch ratios axes for positions. It is found that the maximum energy ratio is at the top ridge with the two stretch ratios being equal when the sum of the two ratios is constant. Moving steps of some soft actuator units with different pre-stretch ratios are obtained through experiments. The results show that the greater the energy ratios are the greater the moving step of the actuator unit. Not only that, the closer the pre-stretch ratios are to the ridge the greater the moving step of the actuator unit is and vice versa. The experimental results are very consistent with the energy ratio distribution characteristics of the method proposed, which demonstrates the effectiveness of the method. The energy ratio can provide design reference for high efficiency of soft dielectric elastomer actuator unit.

Keywords: dielectric elastomer; pre-stretch ratio; soft actuator unit; energy ratio