

介电弹性体材料致动器的非线性动态行为研究*

盛俊杰^{1†} 李树勇¹ 张玉庆¹ 陈花铃^{2,3}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621900) (2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

(3. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 介电弹性体材料(Dielectric Elastomer, 简称 DE), 是制造柔性智能致动器最有潜力的电活性聚合物(Electroactive polymer, 缩写 EAP) 材料之一, 可在电压驱动下产生大幅度的厚度与面积变形, 最大面积应变高达 1600%。由于 DE 材料的固有阻尼特性, 从而使其变形具有时间依赖性, 因此动态变形中, 其能量转换、宏观变形等特性也必然受到阻尼的影响。借助热力学自由能理论, 考虑 DE 材料致动器面内动态变形过程中的惯性和阻尼力, 构建平面 DE 材料致动器的非线性动力学模型。研究了交变电荷下 DE 系统的非线性动态特性, 包括其幅频曲线、位移响应和相平面图。研究表明, 存在阻尼的时候, DE 系统的振动会随着时间的增加出现锁频现象, 最后变成一种具有恒定振幅的振动。相平面图和 Poincaré 映射图研究表明, 考虑阻尼后 DE 系统的稳态相平面图是一条闭合的曲线, 其 Poincaré 映射点集是有限的, 代表其产生周期性运动。研究成果为 DE 材料致动器在各种动态驱动器或传感器中的应用提供理论依据。

关键词 介电弹性体材料, 动态, 阻尼, 相平面, Poincaré 映射

DOI: 10.6052/1672-6553-2016-049

引言

介电弹性材料(Dielectric Elastomer, 简称 DE) 是一种新型的智能电活性聚合物(Electroactive Polymer, 简称 EAP)。相比于其他 EAP 材料, DE 材料独有的特点是变形大, 最大面积应变高达 1600%^[1], 且弹性模量低, 机电耦合效率高, 工作温度范围宽和频率范围广(0.1 ~ 20KHz)。DE 致动器指的是在 DE 材料上下表面涂有柔性电极的三明治结构, 在电极上施加电压后, DE 材料上产生的 Maxwell 电场力和电致伸缩电应力的共同作用挤压材料, 结果使其面积增大, 厚度减小, 并逐渐成为近几年国内外的研究热点之一^[2-4]。近年来, 研究学者设计出很多种基于 DE 材料的致动器和换能器结构, 并尝试将 DE 应用于智能机器人^[5]、机电系统^[6]、扬声器^[7]和能量回收^[8-9]等领域。

在理论建模研究中, 最具代表性的研究当属 Harvard 大学的 Suo^[10] 小组, 他们基于热力学的自由能理论, 构建了一套非线性本构方程, 从而能够

从理论角度分析 DE 材料的力电耦合过程以及失稳产生的临界条件。由于该理论物理意义明确, 扩展性好, 在国内外得到了广泛的应用和推广, 基于该理论的研究也层出不穷, 如: UT Austin 大学的 Huang^[11] 研究了力电耦合下的相变问题; Harvard 大学的 Bertoldi^[12] 研究了多层 DE 材料中的不稳定性的传播问题; 新加坡 A - star 研究中心的 Koh^[13] 等人研究了预拉伸下的稳定性机理问题; 奥地利 Johannes Kepler 大学的 Bauer^[14] 等人研究了变形失稳的能量转换效率问题; 哈尔滨工业大学的刘立武^[15] 应用两个材料常数的 Mooney - Rivlin 弹性应变能函数, 分析了介电弹性体稳定性行为, 盛俊杰^[16] 在自由能模型基础上研究了温度对介电弹性体材料力电耦合变形的影响等。

在工程实际应用中, 对 DE 材料施加的载荷常常是周期性的电压或者应力, 如微泵结构、各种运动驱动器、能量循环收集器等等^[4]。然而现有研究对 DE 材料在交变载荷下的动力学变形行为以及力电耦合特性尚没有得到足够的重视。近两年来,

2016-05-17 收到第 1 稿, 2016-06-18 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(11402246)、中国工程物理研究院重点学科项目“计算固体力学”资助

† 通讯作者 E-mail: scu2005sjj@163.com

学者们才开始对 DE 材料动态特性进行研究. 哈佛大学的 Zhu 从热动力学出发, 通过扰动方法分别研究了 DE 气球^[17]的非线性振动特性; 兰州大学的 Yong 等人^[18]建立了一套 DE 动态分析模型, 研究了厚球壳的稳定性; 浙江大学的 Li^[19]研究了纯剪切共振器的机电耦合性能及其动态性能; Federal University of Goiás 的 Soares 等^[20]利用打靶法对预拉伸后的超弹性平面薄膜的动态方程进行了求解, 并与有限元求解方法进行了对比; 最近 TU Darmstadt 的 Xu^[21]利用朗格朗日方程得到了平面 DE 的动态运动方程, 并研究了动态载荷下的位移响应和稳定性, 但是没有考虑预应力的影响; 西安交通大学的 Li^[22]研究了 DE 材料共振器在纯剪切工作模式下的动态性能; 西安交通大学的 zhang^[23]利用欧拉拉格朗日方法研究了三种外力边界条件下 DE 致动器的动态性能.

研究发现阻尼是 DE 材料的固有特性^[24], 可以用来减振. 最近两年虽然一些研究机构开始关注 DE 材料的动态性能, 但是却忽略了阻尼等的影响, 几乎没有学者研究经典的 DE 材料平面变形的振动特性, 不能全面反映 DE 材料的动态机电耦合特征. 由于平面致动结构是 DE 致动器的最常用结构, 通过热力学自由能理论, 在考虑 DE 材料致动器面内动态变形过程中的惯性力和阻尼力的基础上, 构建平面 DE 材料致动器的非线性动力学模型. 基于所建立的模型, 研究了交变载荷下 DE 系统的非线性动态特性.

1 DE 致动器的动态运动方程

在静力学问题的研究中, DE 材料的变形与时间无关, 问题相对简单; 在动力学问题研究中, DE 材料的运动将会随时间的变化而变化, 由于需要考虑其惯性力及阻尼力的作用, 且由于 DE 材料的变形是典型的力电耦合作用下的变形, 属于典型的非线性问题.

通过自由能方法^[17,19]来建立 DE 材料致动器的面内振动模型能够为 DE 材料面内应用提供理论指导. 本文主要研究的是如图 1 所示的 DE 材料致动器的面内变形动态性能, 认为 DE 材料是一种理想的电介质, 其变形 $\lambda_1 = l_1/L_1$, $\lambda_2 = l_2/L_2$ 和 $\lambda_3 = l_3/L_3$ 是时间的函数.

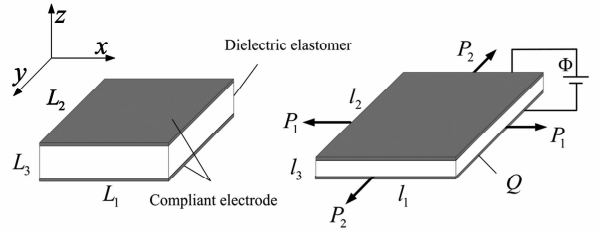


图 1 平面 DE 致动器的振动示意图

Fig. 1 Vibration schematics of an in-plane dielectric elastomer actuator

由于研究的是在平衡位置附近的小幅振动特性, 忽略变形及温度对极化率的影响. 这种理想的 DE 材料的介电性能与聚合物熔融体一样, 其真实电位移 D 和真实电场强度 E 的关系可以表示为 $D = \epsilon E$ (ϵ 是 DE 材料的介电常数, 典型代表值为 $\epsilon = 4 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ ^[10,25]), 那么可以得到 DE 致动器的电荷量和电压的关系为:

$$Q = \Phi \frac{\epsilon L_1 L_2}{L_3} \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (1)$$

在时间 t 时刻, 当有少量的电荷流过 DE 材料的两侧电极的时候, 电压做功为 $\Phi \delta Q$, 当 DE 的尺寸发生微小的 $\delta \lambda_1$ 和 $\delta \lambda_2$ 变化时, 外力做的功分别为 $P_1 L_1 \delta \lambda_1$ 和 $P_2 L_2 \delta \lambda_2$. 此时, x 和 y 方向上微小单元的惯性力分别为 $\rho L_2 L_3 x^2 (d^2 \lambda_1 / dt^2)$ 和 $\rho L_1 L_3 y^2 (d^2 \lambda_2 / dt^2)$ ^[19], 阻尼力分别为 $c_x d \lambda_1 / dt$ 和 $c_y d \lambda_2 / dt$. 分别对微小单元上 $\delta \lambda_1 dx$ 和 $\delta \lambda_2 dy$ 的惯性力和阻尼力在 x 和 y 方向进行积分, 可求得惯性力和阻尼力所做的功. 在任意热力学系统中, 自由能的改变量等于外力、电压、惯性力和阻尼力所做功的总和, 即:

$$\begin{aligned} L_1 L_2 L_3 \delta W = & \Phi \delta Q + P_1 L_1 \delta \lambda_1 + P_2 L_2 \delta \lambda_2 - \\ & \frac{L_1^3 \rho L_2 L_3}{3} \frac{d^2 \lambda_1}{dt^2} \delta \lambda_1 - \frac{L_2^3 \rho L_1 L_3}{3} \frac{d^2 \lambda_2}{dt^2} \delta \lambda_2 - \\ & \frac{1}{2} c L_1^2 \delta \lambda_1 \frac{d \lambda_1}{dt} - \frac{1}{2} c L_2^2 \delta \lambda_2 \frac{d \lambda_2}{dt} \quad (2) \end{aligned}$$

DE 致动器的自由能包括弹性应变能和静电能. 应变能仍用 Gent 模型描述^[26], 那么 DE 的自由能为:

$$W = -\frac{\mu J_m}{2} \ln \left(1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} - 3}{J_m} \right) + \frac{\epsilon}{2} \left(\frac{\Phi}{L_3} \right)^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (3)$$

式中 J_m 为 DE 材料的变形极限, $J_m = 100$ ^[26-28]; μ

是 DE 材料的剪切模量, $\mu = 1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ [10,25].

假设 DE 材料致动器的初始尺寸相等 $L_1 = L_2 = L$, 由于我们主要研究的是等双轴的变形, 令 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, $P_1/(L_2L_3) = P_2/(L_1L_3) = s$, 对式(1) ~ (3) 求解进行化简后就得到了 DE 材料致动器的非线性动力学方程:

$$\frac{d^2\lambda}{dT^2} + g(\lambda, s, \Phi) + \tilde{c} \frac{d\lambda}{dT} = 0 \quad (4)$$

公式(4)的表达中, 我们定义了两个无量纲的物理量, 即: 无量纲时间 $T = t/(L\sqrt{\rho/3\mu})$ 和无量纲阻尼 $\tilde{c} = c/(2\mu L_3 L\sqrt{\rho/3\mu})$. 其中 $g(\lambda, s, \Phi)$ 是应变 λ 、应力 s 和电压 Φ 的函数.

$$g(\lambda, s, \Phi) = \frac{\lambda - \lambda^{-5}}{1 - (2\lambda^2 + \lambda^{-4} - 3)/J_m} - \frac{s}{\mu} - \frac{\varepsilon}{\mu} \left(\frac{\Phi}{L_3} \right)^2 \lambda^3 \quad (5)$$

公式(4)和(5)构成了 DE 致动器的动态方程, 代表着 DE 致动器的应变 $\lambda(t)$ 和时间 T 的关系. 可以看出, 应力 s 、电压 Φ 和阻尼 \tilde{c} 会直接对 DE 致动器的动态性能产生影响, 下面将利用此处建立的 DE 致动器的动态方程来分析其动态特性.

2 考虑阻尼时致动器的动态特性

以正弦电压作为激励电压, 即

$$\Phi(t) = \Phi_{dc} + \Phi_{ac} \sin(\Omega t) \quad (6)$$

式中 Φ_{dc} 为直流电压, 单位: V; Φ_{ac} 为交流电压幅值, 单位: V; Ω 为正弦电压的频率, 单位: rad/s.

把公式(6)代入方程(4)中, 化简后得到

$$\frac{d^2\lambda}{dT^2} + \frac{\lambda - \lambda^{-5}}{1 - (2\lambda^2 + \lambda^{-4} - 3)/J_m} - \frac{s}{\mu} - \frac{\varepsilon\Phi_{dc}^2}{\mu L_3^2} \left(1 + \frac{\Phi_{ac}}{\Phi_{dc}} \sin(\tilde{\Omega} T) \right)^2 \lambda^3 + \tilde{c} \frac{d\lambda}{dT} = 0 \quad (7)$$

在公式(7)中, 我们定义 $\tilde{\Omega} = \Omega L\sqrt{\rho/3\mu}$ 为无量纲的电压频率. 因此, 我们得到了 DE 致动器在正弦交变电压载荷下的动力学运动方程. 如果给出具体的初始条件: λ 和 $d\lambda/dt$, 就可以得到 DE 致动器具体的动态特性. 当给定预应力 $s/\mu = 0.5$ 和静电电压 $\varepsilon\Phi_{dc}^2/(\mu L_3^2) = 0.1$ 的时候, 结合公式(5) $g(\lambda_{ep}, s, \Phi) = 0$, 可以求出 DE 致动器在这种参数条件下所能达到的平衡变形 $\lambda_{ep} = 1.149$; 当预应力 $s/\mu = 0.5$ 和静电电压 $\varepsilon\Phi_{dc}^2/(\mu L_3^2) = 0.05$ 时, DE 致动器的平衡变形 $\lambda_{ep} = 1.125$; 当应力 $s/\mu = 1$ 和静电电压 $\varepsilon\Phi_{dc}^2/(\mu L_3^2) = 0.1$ 时, 平衡变形为 $\lambda_{ep} = 1.34$. 假设

在 $t = 0$ 的时候, DE 致动器来不及发生振动, 即 $d\lambda/dt = 0$. 下面我们采取 ode 求解算法进行数值分析, 用这些具体的参数作为初始值来分析 DE 材料致动器的动态特性.

作为粘弹性材料, 阻尼是 DE 本身固有的一种特性 [24], 下面主要研究阻尼对 DE 致动器动态特性的影响. 图 2 为 $s/\mu = 1$, $\varepsilon\Phi_{dc}^2/(\mu L_3^2) = 0.1$, $\Phi_{ac}/\Phi_{dc} = 0.1$ 时, 利用公式(7)获得的三种无量纲阻尼 $\tilde{c} = 0, 0.05$ 和 0.1 时 DE 致动器的幅频曲线: 阻尼 $\tilde{c} = 0$ 时, 共振频率为 1.58, 最大振幅为 0.86; $\tilde{c} = 0.05$ 时, 共振频率为 1.62, 最大振幅为 0.44; $\tilde{c} = 0.1$ 时, 共振频率为 1.64, 最大振幅为 0.20. 也就是说, 随着阻尼的增大, DE 致动器非线性系统的共振频率增大, 最大振幅减小.

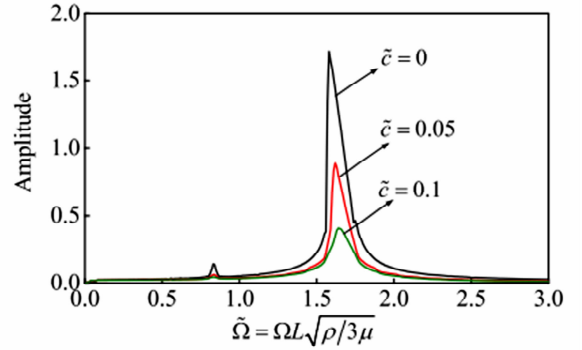


图2 阻尼对 DE 致动器幅频特性的影响

Fig. 2 Effect of different damping on amplitude-frequency characteristic for DE actuator

图 3 为系统的无量纲阻尼为 0.05 时, DE 致动器系统在三种激励频率下的振动曲线. 图 3(a) 为 $\tilde{\Omega} = 1.62$ 时的共振响应, 图 3(b) 为 $\tilde{\Omega} = 3.24$ 时 (固有频率的 2 倍) 的振动响应, 图 3(c) 为 $\tilde{\Omega} = 0.81$ 时 (固有频率的 0.5 倍) 的振动响应. 可见, 当系统存在阻尼的时候, DE 致动器的振动很快就会达到一个恒定振幅的状态, 出现锁频现象, 这三种响应几乎都在 $T = 150$ 以后就可以稳定振动.

虽然有阻尼的时候, DE 致动器系统的非线性振动包含着阻尼引起的衰减振动, 但由于在其振动的过程中一直存在的外加交变电压的机电耦合效果, 其中电能和变形能会抵消振动过程中的能量耗散, 随着时间的增加, 其最后会达到一个恒定振幅的振动状态. 如图 3 中的变形响应曲线所示, 这种非线性振动出现了锁频现象, 表明承受着周期性的阻尼振动, 这和相关文献报道类似 [21-23].

图4给出了阻尼为0.05时,DE系统响应的相平面图(a、b、c)和Poincaré映射图(d、e、f).图4(a)是激励频率为1.62时的相平面图,此时稳态的相平面图上形成闭合的曲线,代表着周期性的运动^[29],这同样反映在其Poincaré映射图4(d)上,其

点集是有限的,存在着周期吸引子.频率为3.24和0.82的时候,也出现了类似的情况.表明此条件下DE致动器在固有频率、2倍固有频率和二分之一固有频率下的振动均是周期振动.

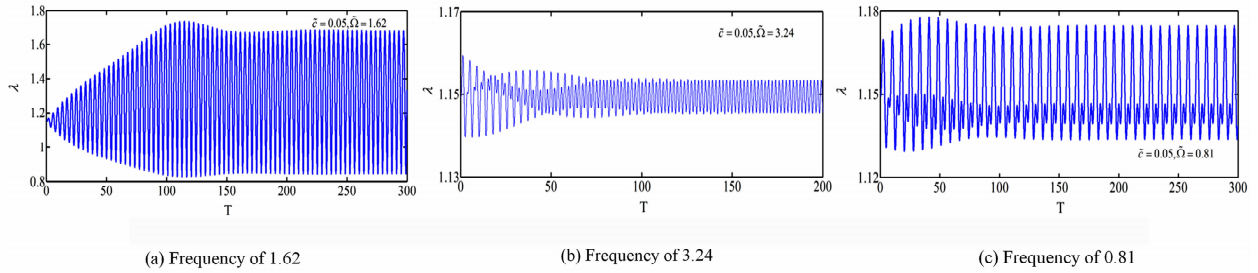


图3 阻尼为0.05时DE致动器在三种激励频率下的振动响应

Fig. 3 Vibration response of DE actuator system for three excitation frequencies with a dimensionless damping effect of 0.05

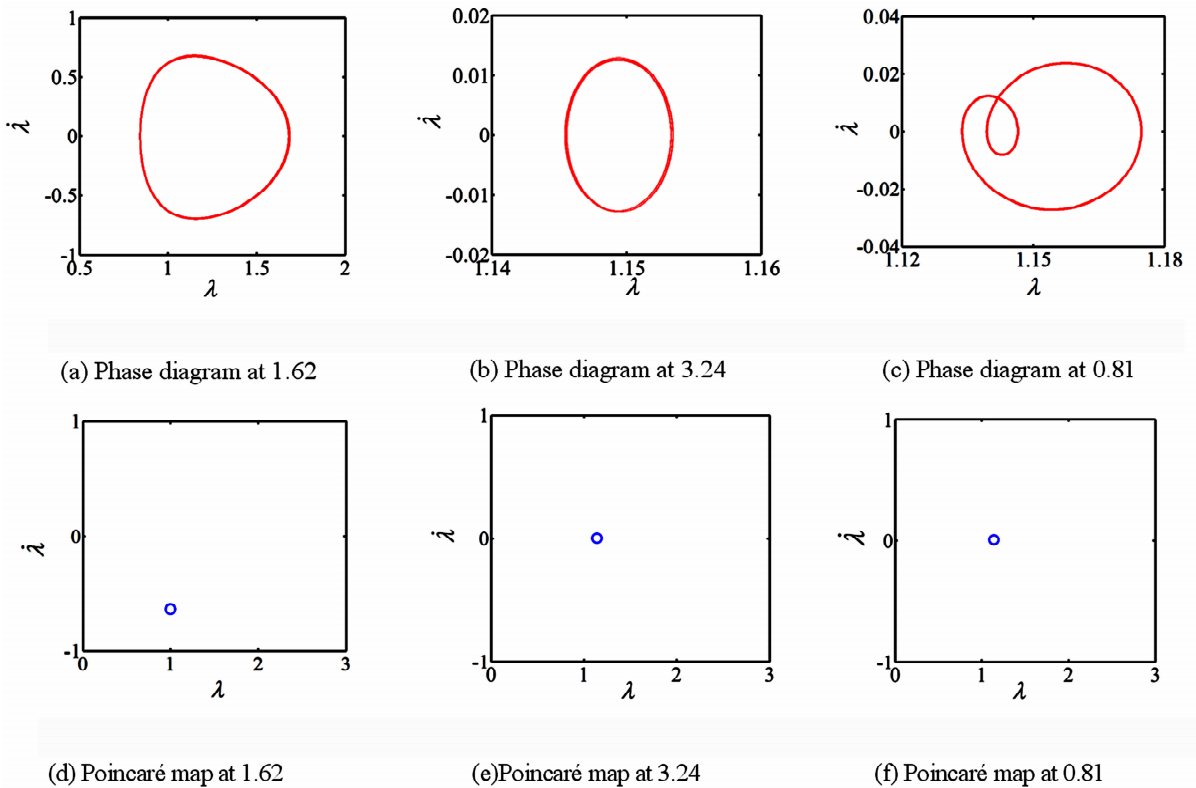


图4 阻尼为0.05时DE致动器的相平面图和Poincaré映射图

Fig. 4 Phase diagrams and poincaré of DE actuator system with a dimensionless damping effect of 0.05

3 结论

通过热动力学方程,考虑了惯性力和阻尼力的共同作用,建立了DE致动器非线性机电耦合系统的动态行为方程.研究发现,存在阻尼的时候,DE系统的振动会随着时间的增加出现锁频现象,最后变成一种具有恒定振幅的振动.这是因为尽管存在

着阻尼的耗能作用,但是由于DE致动器的振动是由外加交变电场产生的Maxwell应力引起的,静电能和变形能补偿了阻尼的能耗,这种机电耦合效果最后使得DE系统变成具有恒定振幅的振动.相平面图和Poincaré映射图研究表明,考虑阻尼后DE系统的稳态相平面图是一条闭合的曲线,其Poincaré映射点集是有限的,代表其产生周期性运

动.

通过对平面运动 DE 致动器系统非线性动态力电耦合性能的研究,可以预测 DE 材料在动态载荷下的非线性动态变形规律,能为 DE 材料在各种动态驱动器或传感器中的应用提供理论依据.

参 考 文 献

- 1 Keplinger C, Li T, Baumgartner R, et al. Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation. *Soft Matter*, 2011, 8(2): 285 ~ 288
- 2 Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q, Joseph J. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science*, 2000, 287(5454): 836 ~ 839
- 3 Carpi F, Rossi D. D, Kornbluh R, Pelrine R, Sommer-Lasen P. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. Amsterdam: Elsevier Press, 2008
- 4 Brochu P, Pei Q. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscle. *Macromolecular Rapid Communication*, 2010, 31(1): 10 ~ 36
- 5 Pei Q, Rosenthal M, Stanford S, Prahlad H and Pelrin R. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(5): N86
- 6 Kovacs G, Düring L, Michel S, and Terrasi G. Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 155(2): 299 ~ 307.
- 7 Keplinger C, Sun J Y, Foo C C, Rothemund P, Whitesides G M, and Suo Z. Stretchable, Transparent, Ionic Conductors. *Science*, 2013, 341(6149): 984 ~ 987.
- 8 Huang J, Shian S, Suo Z. and Clarke D R. Maximizing the energy density of dielectric elastomer generators using equi-biaxial loading. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(40): 5056 ~ 5061
- 9 陈宝鸿,周进雄. 离子导体驱动的介电弹性体软机器研究进展. *固体力学学报*, 2015, 36(6): 481 ~ 492 (Chen B H, Zhou J X. Dielectric elastomers based soft machines actuated by ionic conductors: progress and perspectives. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36(6): 481 ~ 492 (in Chinese))
- 10 Suo Z. Theory of dielectric elastomer. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 23(6): 549 ~ 578
- 11 Huang R, Suo Z G. Electromechanical phase transition of dielectric elastomer. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2012, 468(2140): 1014 ~ 1040
- 12 Bertoldi K, Gei M. Instability in multilayered soft dielectrics. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2011, 59(1): 18 ~ 42
- 13 Koh SJA, Li T F, Zhou J X, et al. Mechanisms of large actuation strain in dielectric elastomer. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, 2011, 49(7): 504 ~ 515
- 14 Kaltseis R, Keplinger C, Baumgartner R, et al. Method for measuring energy generation and efficiency of dielectric elastomer generators. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 162904.
- 15 盛俊杰,张玉庆,李树勇,刘磊,陈花玲. 温度对介电弹性体材料力电耦合变形的影响. *固体力学学报*, 2015, 36(2): 129 ~ 136 (Sheng J J, Zhang Y Q, Li S Y, Liu L, Chen H L. Effect of temperature on the electromechanical deformation of dielectric elastomer. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36(2): 129 ~ 136 (in Chinese))
- 16 刘立武,孙寿华,刘彦菊,冷劲松. 具有线性介电常数的 Ogden 型介电弹性体的本构关系和机电稳定性. *固体力学学报*, 2010, 31(2): 181 ~ 192 (Liu L W, Sun S H, Liu Y J, Leng J S. Constitutive relation electromechanical stability analysis of Ogden type dielectric elastomer with linear permittivity. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(2): 181 ~ 192 (in Chinese))
- 17 Zhu J, Cai S, Suo Z. Nonlinear oscillation of a dielectric elastomer balloon. *Polymer International*, 2010, 59(3): 378 ~ 383
- 18 Yong H, He X, Zhou Y. Dynamics of a thick-walled dielectric elastomer spherical shell. *International Journal of Engineering Science*, 2011, 49(8): 792 ~ 800
- 19 Li T, Qu S, Yang W. Electromechanical and dynamic analyses of tunable dielectric elastomer resonator. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(26): 3754 ~ 3761
- 20 Soares R M, Goncalves P B. Nonlinear vibrations and instabilities of a stretched hyperelastic annular membrane. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(3-4): 514 ~ 526
- 21 Xu B, Mueller R, Theis A, Klassen M, Gross D. Dynamic analysis of dielectric elastomer actuators. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 112903
- 22 Li B, Zhang J, Liu L, Chen H, Jia S, and Li D. Model-

- ing of dielectric elastomer as electromechanical resonator. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(12):124509
- 23 Zhang J S, Tang L L, Li B, Wang Y J, Chen H L. Modeling of the dynamic characteristic of viscoelastic dielectric elastomer actuators subject to different conditions of mechanical load. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8):084902
- 24 Wolf K, Röglin T, Haase F, Finnberg T, Steinhoff B. An electroactive polymer based concept for vibration reduction via adaptive supports. *Proc SPIE*, 2008, 6927:69271F
- 25 Zhao X, Suo Z. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6):061921-061921-3
- 26 Sheng J, Chen H, Li B, Wang Y. Nonlinear dynamic characteristics of a dielectric elastomer membrane undergoing in-plane deformation. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(4):045010
- 27 Foo C C, Cai S, Koh S J A, et al. Model of dissipative dielectric elastomers. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(3):034102-13
- 28 Sheng J, Chen H, Li B. Effect of temperature on the stability of dielectric elastomers. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2011, 44(36):365406-365414
- 29 闻邦椿, 李以农, 徐培民. 工程非线性振动. 北京: 科学出版社, 2007 (Wen B C, Li Y N, Xu P M. Nonlinear Engineering Vibration. Beijing: Publication of Science Press, 2007 (in Chinese))

NONLINEAR DYNAMIC PERFORMANCE OF A DIELECTRIC ELASTOMER ACTUATOR*

Sheng Junjie^{1†} Li Shuyong¹ Zhang Yuqing¹ Chen Hualing^{2,3}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Dielectric elastomers (DE) are one of the most potential electro-active polymer (EAP) used as high-performance actuators. A DE subjected to a voltage can generate large thickness and area expansion with a maximum area strain of 1600%. As DE has natural damping properties and its deformation is then dependent to time, its dynamic performance, energy conversion and large deformation are definitely influenced by damping. A free energy model is developed to study the dynamic characteristics of a dielectric elastomer actuator undergoing in-plane deformation subjected to the combined loadings of a mechanical press and an electric field. The numerical results including the oscillation, phase diagrams and Poincaré maps are presented to show the influence of the damping on the nonlinear dynamic characteristics of the dielectric elastomer. The numerical results indicate that the damping effect could cause the dynamic responses to constant vibration and decrease the amplitude. The phase paths are all presented in closed regions and the points of Poincaré map are finite, indicating that the DE system experiences a nonlinear periodic oscillation, and the dynamic oscillation of the DE system is stable. These conclusions provide the basis for the exploration of high-performance dielectric elastomers under dynamic mechanical and electrical loads.

Key words dielectric elastomer, dynamic, damping, phase diagram, Poincaré map

Received 17 May 2016, revised 18 June 2016.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11402246) and the Key Subject "Computational Solid Mechanics" of the China Academy of Engineering Physics

† Corresponding author E-mail: scu2005sjj@163.com