

文章编号 1004-924X(2010)11-2413-08

电活性聚合物微型发电机

陈 明¹, 林桂娟², 宋德朝²

(1. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要:通过实验分析了电活性聚合物在静电场中将机械能转换为电能的内部机理, 研究了电活性聚合物发电原理, 定量分析了电活性聚合物产生的电能。运用非线性连续介质力学理论, 分析了 Yeoh 模型、Mooney-Rivlin 模型和 Ogden 模型的不同应变能函数, 建立了电活性聚合物变形特性的数学模型。讨论了电活性聚合物在不同状态下的力学特性, 构建了能量收集方程及运动学方程。最后, 基于电活性聚合物发电原理, 采用丹佛斯生产的电活性聚合物材料建立了风力发电机实验装置平台。实验结果表明: 电活性聚合物在 10% 应变状态下, 充电电压为 1 200 V 时, 一次循环收集的电能为 13.7 mJ。这些实验为电活性聚合物致动器、传感器和微型发电机的研究奠定了理论基础。

关键词:电活性聚合物; 微型发电机; Mooney-Rivlin 模型; 应变能函数

中图分类号: TM38 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20101811. 2413

Micro-power generator on dielectric electro active polymer

CHEN Ming¹, LIN Gui-juan², SONG De-chao²

(1. *Sino-German College of Applied Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

2. *College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: According to the experimental analysis on the energy transformation of Dielectric Electro Active Polymers (DEAPs) from mechanical energies to electric powers in a static-electric field, its mechanism of electric power generation was studied. The electric energies generated from DEAP were quantitatively researched, then a mathematical model on the DEAP's deformation property was established by using the strain energy function theory from the Yeoh model, Mooney-Rivlin model and Ogden model. Furthermore, the mechanical characteristics of DEAPs were discussed in different deformations, and the scavenged energy equation and motion equation were deduced. Finally, on the basis of the power generation mechanism of DEAPs, the prototype of a micro-wind-powered generator adopting the DEAP materials from Danfoss was developed. Experimental results show that the scavenging energy is 13.7 mJ in one cycle when the DEAP is in a strain of 10% and an applying voltage of 1 200 V. These experiments lay the theoretic foundation for actuators, sensors and micro-generators of DEAPs.

收稿日期: 2010-03-17; 修订日期: 2010-05-07.

基金项目: 科技部重大专项资助项目 (No. 2009ZX04014-103)

Key words: Dielectric Electro Active Polymer(DEAP); micro-power generator; Mooney-Rivlin model; strain energy function

1 引言

电活性聚合物(Dielectric Electro Active Polymer, DEAP)也是介电弹性体(Dielectric Elastomer, DE),是一种智能材料,因其独特的电性能和机械性能而崭露锋芒。20世纪90年代初,基于电活性聚合物材料的人工肌肉^[1]驱动器得到快速发展。与传统的压电材料相比,这种聚合物材料具有更大的应变能力,且重量轻、驱动效率高、抗振性能好,是最具有发展潜力的仿生材料之一。近几年,在电活性聚合物设计、合成和加工方面的研究都有了很大的进展。美国斯坦福研究院采用3M公司生产的聚丙烯酸橡胶VHB2910和VHB2905制造了预应变的致动器。丹麦的丹佛斯利用软硅树脂和银粉柔性电极制造了非预拉伸单层薄膜致动器,其厚度是微米级的。电活性聚合物在直流电作用下会产生大幅度的应变(如聚丙烯酸橡胶,其线性应变可达380%^[2],且能量输出也很高),且反应速度快(微秒级),变形率大(与压电陶瓷等传统的电致伸缩材料相比),这些特点使得这类材料成为微型机械中致动器^[3-5]及传感器^[6-7]的基础材料,并且得到了广泛的应用,但其在发电^[8-10]方面的研究与应用尚处于起步阶段。

利用电活性聚合物收集风能、波浪能等绿色能源发电,开发新型可再生、低廉、环境友好、清洁能源,可以促进世界能源可持续发展战略。最近,挪威科学技术大学^[11]和国内同济大学^[12]开始了电活性聚合物发电的研究。本文采用不同的模型研究推导了电活性聚合物作为发电智能材料的力学性能,分析了其将机械能向电能转化过程的电能收集方程,构建了电活性聚合物发电过程的运动学方程及理论数学模型,为电活性聚合物微型发电机的实际应用提供了理论参考。

2 电活性聚合物力学性能研究

电活性聚合物属于大变形超弹性材料,本文根据连续介质力学理论及本构理论研究其力学性

能模型时做出如下假设:

(1)超弹性假设。如果材料的单位质量存在一种应变能函数 W ,它是均匀无应力自然状态的应变张量的解析函数,若 W 的时间变化率等于应力的功率,则材料称为超弹性材料^[13];超弹性材料的机械性能由应变能函数 W 来描述。应变能函数 W 存在很多函数形式。对于电活性聚合物这种非线性材料,可以采用Yeoh模型、Mooney-Rivlin模型和Ogden模型加以描述。

(2)各向同性假设,即材料为各向同性的。

(3)不可压缩性假设,即变形前后材料体积不变。

2.1 应变能函数

超弹性材料的机械性能由应变能函数 W 来描述,应变能函数 W 存在很多函数形式。对于电活性聚合物这种非线性材料,可采用Yeoh模型、Mooney-Rivlin模型和Ogden模型^[14]加以描述。应变能函数都是关于应变张量的函数:

$$W = (I_1, I_2, I_3), \quad (1)$$

I_1, I_2, I_3 是右Cauchy-Green应变张量的第一、第二、第三应变不变量。如果三个主伸长比用 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 表示,那么对于不可压缩的超弹性材料($I_3 = 1$),则:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \\ I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Yeoh模型的应变能函数 W 为:

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

其中 C_{10}, C_{20}, C_{30} 为材料参数。

Mooney-Rivlin模型的应变能函数 W 为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3), \quad (4)$$

其中 C_{10}, C_{01} 为材料参数。

Ogden模型的应变能函数 W 为:

$$W = \sum_{r=0}^N \frac{\mu_r}{\alpha_r} (\lambda_1^{\alpha_r} + \lambda_2^{\alpha_r} + \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (0 < N \leq 3), \quad (5)$$

式中 α_r, μ_r 为超弹性材料的力学模型常数。

根据超弹性理论,其主应力 σ_i 可以通过上述应变能函数对主变形率求导获得,即:

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p = \lambda_i \frac{\partial W \partial I_i}{\partial I_i \partial \lambda_i} - p, \quad (6)$$

其中 p 为静水压力,根据动力学边界条件确定。

在众多的橡胶超弹性材料本构模型中,高次应变能函数的实用价值很小,这是因为类橡胶材料的重现性不足,无法对大量参数进行精确估计。Ogden 模型通常可对大应变水平的求解提供最好的近似,应变水平可达 700%,较高阶的参数可得到更精确的解,但是这样也可能在拟合材料力学模型常数时导致数值计算困难,而要求在用户感兴趣的变形范围内有足够的实验数据。Yeoh 模型为高价模型且涉及的参数很多。考虑到简单和实用,Mooney-Rivlin 模型在有限元方法中应用最广泛,它假定应变能密度是主应变常量的一次项函数,较好地描述了橡胶类不可压缩超弹性体材料在大变形下的力学特性,尽管它不精确,但较高阶的 Mooney-Rivlin 模型对于大应变的求解,可得到较好的近似。所以本文采用 Mooney-Rivlin 模型进行电话性聚合物单轴拉伸和双轴拉伸的力学性能分析。

2.2 单轴拉伸

单轴拉伸时(在此沿着轴 1 方向拉伸),轴 2、轴 3 方向的应力为 0($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$)。设主伸长率为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 \\ \lambda_2 = \lambda_3 = 1/\sqrt{\lambda} \end{cases} \quad (7)$$

根据 Mooney-Rivlin 模型,由式(2)、(4)、(7)得应力为:

$$\sigma_1 = 2C_{10}(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + 2C_{01}(\lambda - \lambda^{-2}), \quad (8)$$

2.3 双轴向拉伸

在方向 1,2 上进行均匀拉伸($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$),方向 3 上的应力为 0($\sigma_3 = 0$)。

$$\lambda_3 = \lambda_1^{-2} = \lambda^{-2} \quad (9)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \lambda_3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3}, \quad (10)$$

根据 Mooney-Rivlin 模型可得:

$$\sigma_1 = 2C_{10}(\lambda^2 - \lambda^{-4}) + 2C_{01}(\lambda^4 - \lambda^{-2}). \quad (11)$$

3 电话性聚合物发电的研究

由于电话性聚合物是一种压电材料,具有正

逆压电效应特性:即在施加电场时产生伸缩变形,而在施加压力时会产生电压,不仅能实现电能向机械能的转换,还能通过大变形实现机械能向电能的转换,如图 1 所示。当电话性聚合物两端所加电压产生的电场力小于其弹性恢复应力极限时,产生逆压电效应。电话性聚合物发电是利用逆压电效应把机械能转换成电能。

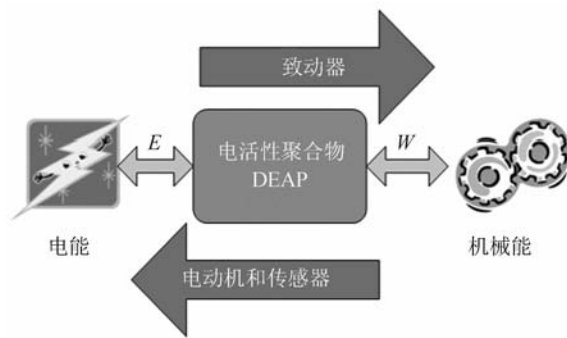


图 1 电话性聚合物能量转换图

Fig. 1 Energy transformation for DEAP

3.1 电话性聚合物发电基本工作原理

电话性聚合物在直流电作用下会产生大幅度的应变,沿电力线的方向收缩,同时沿垂直于电力线的方向膨胀(见图 2),称其为麦克斯韦应力^[15]现象。在电话性聚合物上下表面涂敷柔性电极。由于电话性聚合物组成的平板电容产生变形时,电容发生改变,所以可把上下表面沉积柔性电极的电话性聚合物看成可变平板电容器。其电容为:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}, \quad (12)$$

沿电力线方向的应力(σ_m)为:

$$\sigma_m = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{U}{d}\right)^2, \quad (13)$$

其中: ϵ_0 为真空介电常数($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/M$), ϵ_r 为绝缘常数, E 为电场强度, U 为施加电压, d 为电力线方向的材料厚度, A 为柔性电极表面面积。由于电话性聚合物的不可压缩性,其中 P 为电话性聚合物的体积,故 $P = Ad$,代入式(12)得:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A^2}{P}, \quad (14)$$

而:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{QP}{\epsilon_0 \epsilon_r A^2}, \quad (15)$$

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad (16)$$

其中 Q 为电容所带电量, 可见, 在 $Q, P, \epsilon_0, \epsilon_r$ 保持不变的情况下, 上下两面电极加上低电压并处于伸展状态时, 如果加载外力 (机械力) 作用下产生面积 A 减小, 厚度 d 增大的变形时, 则电极之间的电压 U 升高, 这意味着外力所做的功转化为电能。其中上式 (15)、(16) 为电容器两端电压及电能计算公式。

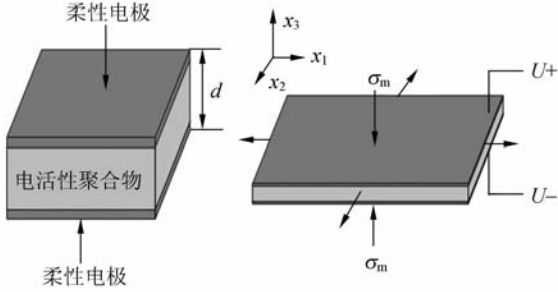


图 2 电活性聚合物薄膜的麦克斯韦应力现象
Fig. 2 Maxwell stress for DEAP

3.2 发电过程动力学模型

电活性聚合物发电机收集周边的风能、波浪能、人体运动能等, 不断把机械能转化成电能, 产生的大量电能储存在蓄电池或是电容中。电活性聚合物发电的循环过程如图 3 所示: 拉伸-充电-放松-放电, 4 个过程不断地循环进行, 就可以产生大量的电能。从图 3 可看出, 电活性聚合物在状态 1 (其电容及电压为 C_1, U_1) 已经进行了 3 个方向的预拉伸, 状态 1 到状态 2 (其电容及电压为 C_2, U_2) 只是进行了 2 个方向的预拉伸, 即在方向 x_1, x_2 上拉伸了, 但在方向 x_3 上却是压缩了, 从而使外力做功转换成弹性能储存在电活性聚合物中; 状态 2 到状态 3 需要施加高压静电场去激活上下表面柔性电极的电荷, 这与压电陶瓷发电有本质区别。此时, 电活性聚合物在厚度方向 x_3 收缩, 同时沿着面积 A 方向进行了扩展, 直到电活性聚合物中的麦克斯韦应力和弹性应力达到平衡; 状态 3 到状态 4 就是机械能向电能转化过程, 当撤销加载在电活性聚合物上的外力时, 电活性聚合物在厚度 x_3 方向伸展, 而同时沿着面积 A 方向进行了压缩, 使原来储存的机械弹性能转化为电能。从微观角度说, 由于电活性聚合物薄膜厚度 (沿 x_3 方向) 的增加致使了正负电荷距离拉大, 同时因为电活性聚合物薄膜面积的压缩, 从而

使相同电荷 (正电荷或是负电荷) 距离缩小, 这些变化都致使电活性聚合物两端的电压和储存的电能急剧提高。根据式 (14) 可得, 电容器从状态 3 到状态 4 时, 电容器的厚度增大, 电极表面面积 A 变小, 电容就变小, 根据式 (15) 可知电容器两端的电压升高了, 此过程为逆压电效应。而根据式 (16), 可以计算出电活性聚合物通过变形, 将机械能转换成多少电能^[16-17]。4 个过程的能量转换过程如图 3 所示。

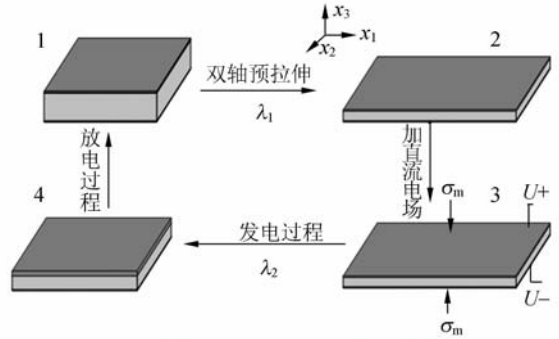


图 3 电活性聚合物发电过程原理图
Fig. 3 Basic mechanism of DEAP generator mode

根据电容器电能计算公式 (16), 得出从状态 3 到状态 4 的发电过程所产生的电能为:

$$\Delta E = \frac{1}{2}(C_4U_4^2 - C_3U_3^2) = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{C_4} - \frac{1}{C_3} \right) \quad (17)$$

其中 C_3, U_3 为状态 3 下电容器的电容及电压; C_4, U_4 为状态 4 下电容器的电容及电压, 而式 (17) 是在恒电荷状态下收集的能量。结合式 (14)、(15)、(16) 及 (17) 就可以计算出转化出的电能大小。

假定在整个过程是恒电荷收集电能过程, 则由前面推导的公式可得出在状态 3 下垂直轴 x_3 上应力为:

$$\sigma_3 = -\epsilon_0\epsilon_r E_3^2 - \frac{mg}{A} = -\epsilon_0\epsilon_r \left(\frac{U_3}{x_{33}} \right)^2 - \frac{mg}{x_{13}x_{23}} \quad (18)$$

如果只有双轴向均匀拉伸, 运用 Mooney-Rivlin 模型得其在 x_1 方向状态 3 的运动方程^[18] 为:

$$m x_{11} \frac{\partial \lambda^2}{\partial t^2} = -\frac{2}{\lambda} x_{21} x_{31} [C_{10} (\lambda^2 - \lambda^{-4}) + C_{01} (\lambda^4 - \lambda^{-2})] + \frac{1}{\lambda} x_{21} x_{31} \epsilon_0 \epsilon_r E_3^2 + \frac{x_{31}}{x_{11} \lambda^3} mg \quad (19)$$

其中 x_{11}, x_{21}, x_{31} 分别为轴 1, 2, 3 三个方向的初始长度, 如图 3 所示。其中下标第一个变量表示轴 1, 2, 3 三个方向, 第二个变量代表状态 1, 2, 3, 4。比如 x_{11} 就是代表方向 x_1 在状态 1 下的长度。 m 为薄膜的质量, g 为重力加速度。

根据图 3, 假定在 x_3 方向上施加的电场电压保持恒定, 测试出不同状态下电活性聚合物的形变及其电容值和受力情况, 结合式 (14), (15), (16) 就可计算出电活性聚合物薄膜电容器从状态 1 到状态 4 一次循环过程所产生的电能。

4 实验平台

根据所介绍的电活性聚合物的发电原理, 采用丹佛斯生产的电活性聚合物材料, 建立了电活性聚合物风力发电机实验装置。如图 4 所示, 实验装置主要由 4 大部分组成: (1) 电活性聚合物能量转换装置; (2) 收集风能的机械装置, 实验装置中采用一般的风扇叶片; (3) 机械结构转换装置, 该部分利用一对滚珠轴承和曲柄连杆机构, 把风扇的旋转运动转换成电活性聚合物的垂直往复运动, 如图 4 所示; (4) 电路部分: 其中一部分电路为电活性聚合物提供高压激励直流电压, 另一部分为电活性聚合物所产生电能的储能电路或耗能电路。

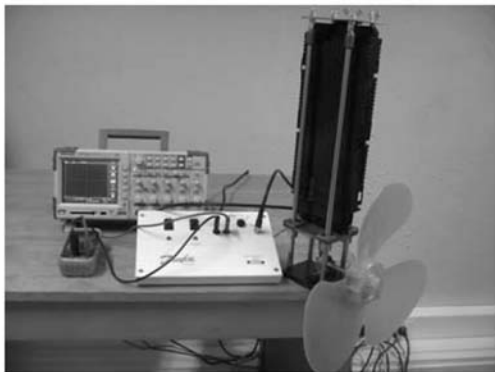


图 4 风力发电实验装置

Fig. 4 Experimental equipment of wind generator

4.1 电活性聚合物薄膜

实验采用丹麦丹佛斯生产的 DEAP 薄膜, 如图 5 所示, 软硅树脂的厚度约为 $H=25\sim30\ \mu\text{m}$, 柔性电极银粉的厚度大概为 $h=80\ \text{nm}$ 。该膜采用 Wacker^[3]生产的 Elastocil RT 625 材料作为软硅弹性体, 结合智能柔性电极技术, 把金属电极嵌入到软硅弹性体的波纹表面, 但其另外一面为平基层。波纹层的主要作用是在加载电压时会产生柔性方向的延伸, 如图 5 所示, 其中的银柔性电极是通过物理气相沉淀法沉积在软硅弹性体的波纹表面的。如图 6 所示, 由两层 DEAP 薄膜按照平底表面叠在一起, 组成实验所用的多层薄膜的电活性聚合物。

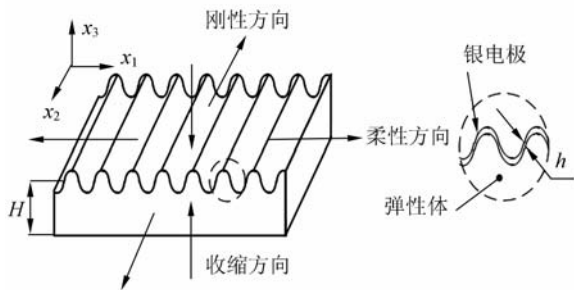


图 5 银电极的电活性聚合物的波形表面

Fig. 5 Corrugated surface of elastomer with silver electrodes

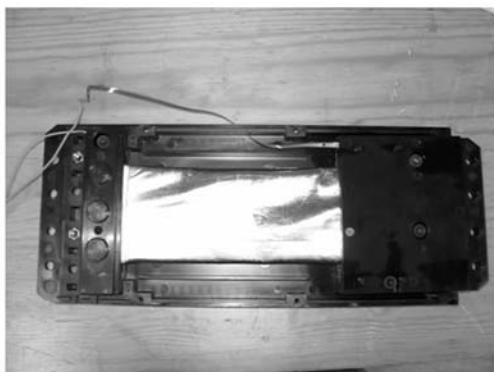


图 6 多层 DEAP 薄膜叠加图

Fig. 6 Schematic of several laminated DEAP films

4.2 实验装置中的机械结构

在本实验装置中, 机械结构包括两大部分: 一是收集风能的机械装置, 实验装置中采用风扇, 如图 7 所示; 二是机械结构转换装置, 该部分利用一对滚珠轴承、曲柄连杆机构, 把风扇的旋转运动转换成电活性聚合物的垂直往复运动。如图 7 所

示,风扇的转轴与一对滚珠轴承相连,然后通过曲柄连杆结构将旋转运动转换成电活性聚合物的垂直往复运动。

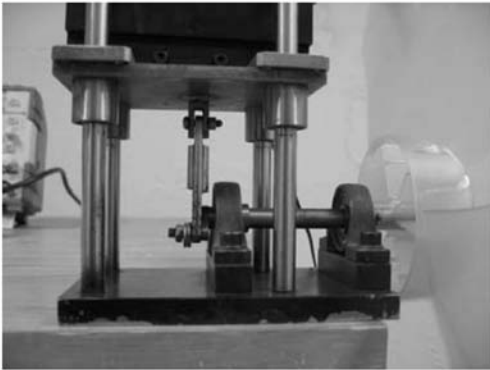


图 7 风能收集装置图

Fig. 7 Wind absorber mechanism

4.3 电路原理图

本实验装置利用电源模块直接将 220 V 的交流电转换成 12 V 的直流电源,然后通过转换模块将 12 V 的低压直流电源转换成 0~2 500 V 的直流电源;另一部分用来监测电活性聚合物两端电压的变化(如图 8),并且通过高压二极管将供电电源与电活性聚合物产生的电源隔离。为了更好地展示电活性聚合物发电原理,通过两个电阻分压测量电活性聚合物上的电压变化,实验装置中采用示波器监测 R_2 上的电压。

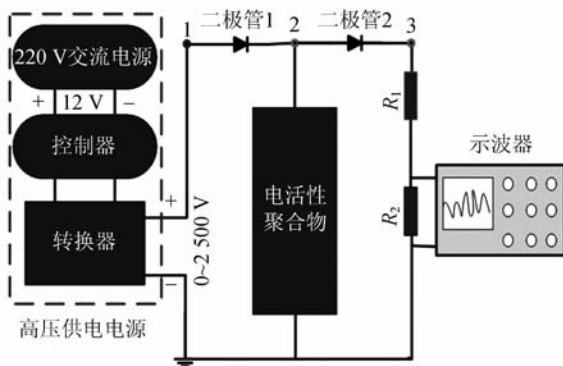


图 8 电路原理图

Fig. 8 Circuit diagram of generator

4.4 实验结果分析

利用实验装置进行了大量的实验研究。首先接通 220 V 的交流电源,高压输出部分调整到 1 200 V,通过示波器看电活性聚合物在 10% 应变状态下两端所产生的电压波形(见图 9、图 10)。

为了方便实验数据的获取,直接采用空气压缩气作为风能的来源。从实验装置可以看出,通过一对滚珠轴承和曲柄连杆结构,把风扇在风力带动下所产生的旋转运动转换成电活性聚合物的垂直往复运动。图 9 显示的是高压直流电压上面叠加交流电压。电活性聚合物上面的电压呈现交流电往复形式,其中最低电压为高压供电电源的电压,谷峰电压为电活性聚合物运动所产生的电压值,升高大约 200 多伏,其中的交流部分为电活性聚合物运动所产生的电压。从图 9 中还可以看出波形的谷峰和谷底电压基本相等,那是由于高压充电部分一直为 1 200 V,而电活性聚合物的运动是匀速往复运动。

图 10 为单次循环运动的波形图。由于电活性聚合物发电过程中需要高压电源的激活,如果不附加激活电压,所产生的交流电压信号会不断衰减直至为零。而目前设计的电路中,没有把产生的电能储存起来作为电活性聚合物的供电电源,所以实验中交流电源一直处于供电状态。

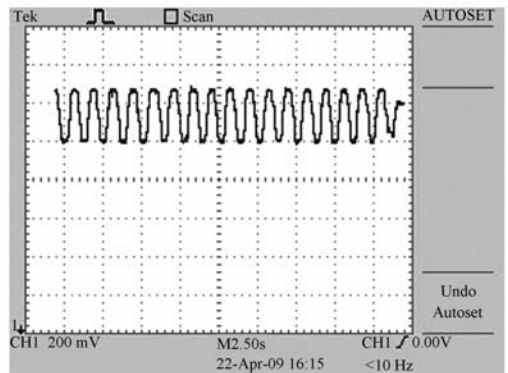


图 9 电活性聚合物两端的输出电压

Fig. 9 Output voltage of DEAP

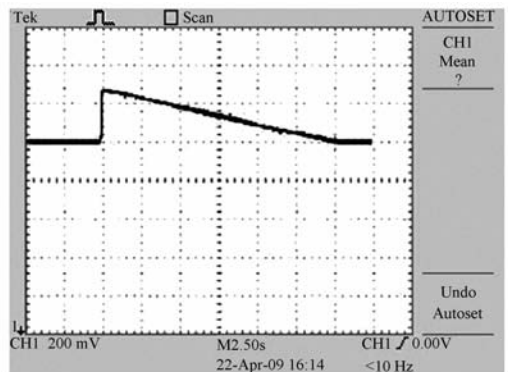


图 10 单次循环输出电压图

Fig. 10 Output voltage in single cycle

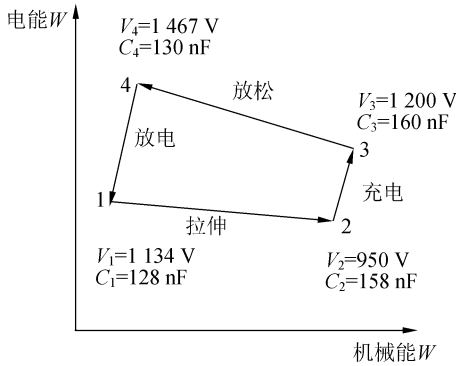


图 11 电活性聚合物发电过程能量循环图

Fig. 11 Energy harvesting cycle of DEAP power generation

由图 10 所示不完全放电的过程中,电活性聚合物在 10% 应变状态下,在充电过程中施加 1 200 V 电压,一个循环过程中,测得各点的电压及电容值如图 11 所示,利用公式(16),可计算出一次循环过程中,由于电活性聚合物机械形变所转换的电能为:

$$\Delta E = (E_4 - E_1) - (E_3 - E_2) = 13.7 \text{ mJ} . \quad (20)$$

参考文献:

- [1] CHIBA S, WAKI M, KOMBLUH R, *et al.*. Extending applications of dielectric elastomer artificial muscle[J]. *SPIE*, 2007, 6524: 652424-1-652424-5.
- [2] GOULBOURNE N C, MOCKENSTURM E M, FRECKER M I. Electro-elastomers; large deformation analysis of silicone membranes [J]. *Int. J. Solids Struct.* 2007, 44(9): 2609-2626.
- [3] TRYSON M, KIIL H E, BENSLIMANE M. Powerful tubular core free dielectric electroactive polymer (DEAP) 'PUSH' actuator [J]. *SPIE*, 2009, 7287: 72871F-1-72871F-11.
- [4] KWANGMOK J, KWANG J K, HYOUK R R C. A self-sensing dielectric elastomer actuator [J]. *Sensor and Actuators A*, 2008, 143(2): 343-351.
- [5] SARBAN R, OUBAEK J, Kristjánssdóttir G. R, *et al.*. Hysteresis modelling of a core-free EAP tubular actuator [J]. *SPIE*, 2009, 7287: 728717-1-728717-9.
- [6] PLANTE J S. *Dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics* [D]. Massachusetts (USA): Massachusetts Institute of Technology, 2006.

5 结 论

运用非线性连续介质力学理论,分析了 Yeoh 模型、Mooney-Rivlin 模型和 Ogden 模型不同应变能函数,主要采用 Mooney-Rivlin 模型,推导出了电活性聚合物在不同形变状态下的力学性能公式。在理论及实验的基础上研究在电场加载的情况下,电活性聚合物发电过程的基本原理,构建了电能收集方程及运动方程。采用丹佛斯生产的电活性聚合物材料,搭建了电活性聚合物风力发电机实验平台,进行了大量的试验研究与分析。实验结果证明:电活性聚合物在 10% 应变状态下,在充电过程中施加 1 200 V 电压,一个循环过程中,由于电活性聚合物机械形变,所转换的电能为 13.7 mJ。这充分验证了电活性聚合物发电的原理。同时本文为后续研究电活性聚合物致动器、传感器元件及微型发电机的设计提供了参考。

- [7] PLANTE J S, DUBOWSKY S. On the nature of dielectric elastomer actuators and its implications for their design [J]. *SPIE*, 2006, 6168: 1J1-1J11.
- [8] JEAN-MISTRAL C, BASOUR S, CHAILLOUT J J. Dielectric polymer: scavenging energy from human motion [J]. *SPIE*, 2008, 6927: 692716-1-692716-10.
- [9] CHIBA S, MAKI M, KOMBLUH R, *et al.*. Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles [J]. *SPIE*, 2008, 6927: 692715-1-692715-9.
- [10] ISKANDARANI Y H. Modeling and experimental verification of a dielectric polymer energy scavenging cycle [J]. *SPIE*, 2009, 7287: 72871Y-1-72871Y-12.
- [11] WANG K S. Introduction to the renewable energy-generating power from electroactive polymer (EAP) [R]. F4192, *SINTEF Report*, 2008.
- [12] LIN G J, CHEN M. Research of micro-power generator based on the dielectric electro active polymer [C]. 2009 *International Conference on Energy and Environment Technology (ICEET09)*. Guilin, China, *IEEE Computer Society Press*, 2009:

782-786.

- [13] 张汝青, 詹先义. 非线性有限元分析[M]. 重庆大学出版社, 1990.
ZHANG R Q, ZHAN X Y. *Non-linear Finite Element Analysis* [M]. Chongqing: Chongqing University press, 1990. (in chinese)
- [14] WISSLER M, MAZZA E. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 120: 184-192.
- [15] GOULBOURNE N C, SON S, FOX J W. Self-sensing McKibben actuators using dielectric elastomer sensors [J]. *SPIE*, 2007, 6524: 6524-1-6524-14.
- [16] ISKANDARANI Y H, MOSE C. Mechanical energy harvesting of dielectric electrical activated

polymers (DEAP's) [R]. *Bachelor of Engineering in Mechatronics-Final Project Report, University of Southern Denmark*, 2008.

- [17] CHIBA S, PELRINE R, KOMBLUH R, et al.. Power generation using electroactive polymer artificial muscle (EPAM) [C]. *Yoseph Bar-Cohen. Proc. Conference of the Japan Institute of Energy, Tokyo*, 2006; 297-298.
- [18] JEAN-MISTRAL C, BASOUR S, CHAILLOUT J J, et al.. A complete study of electroactive polymers for energy scavenging; modeling and experiments [C]. *EDA publishing, DTIP, Stresa, Italy*, 2007; 301-305.
- [19] KIIL H E, BENSLIMANE M. Scalable industrial manufacturing of DEAP [J]. *SPIE*, 2009, 7287: 72870R-1-72870R-10.

作者简介:



陈明(1964—),男,上海人,博士,教授,硕士生导师,1990年、2006年于同济大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 CIMS, 机械设计制造及其自动化技术等方面的研究。E-mail: chen.ming@tongji.edu.cn



林桂娟(1978—),女,江西萍乡人,博士研究生,讲师,2001年于南方冶金学院获得学士学位,2004年于江西理工大学获得硕士学位,主要从事微机电系统及控制技术、智能控制、机械设计制造及其自动化技术等方面的研究。E-mail: forestlgj@126.com

导师简介:



宋德朝(1947—),男,上海人,教授,博士生导师,1970年7月毕业于同济大学机电系,主要从事工程机械及关键件的研究和开发。E-mail: songdechao@mail.tongji.edu.cn