

电活性聚合物的力学性能及发电应用

林桂娟^{1,2}, 宋德朝¹, 陈 明³, 王克胜⁴

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 厦门理工学院 机械工程系, 厦门 361024;
3. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092; 4. 挪威科学技术大学 生产和质量工程系, 挪威 特隆赫姆, N-7491)

摘要: 依据电活性聚合物机械能向电能的转换机理, 研究电活性聚合物发电原理. 采用 Mooney-Rivlin 模型建立了电活性聚合物变形特性的数学模型, 分析了材料在不同状态下的力学特性. 并分析了电活性聚合物在静电场中的受力情况, 能量收集方程及运动学方程. 采用丹佛斯生产的电活性聚合物材料, 构建电活性聚合物风力发电机实验平台; 通过大量的实验研究, 分析实验数据和现象, 结果证实了电活性聚合物发电的原理.

关键词: 电活性聚合物; Mooney-Rivlin 模型; 能量收集; 风力发电机

中图分类号: TB 381

文献标识码: A

Mechanical Property and Power Generation Application Research on Dielectric Electro Active Polymer

LIN Guijuan^{1,2}, SONG Dechao¹, CHEN Ming³, WANG Kesheng⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. Sino-German College of Applied Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim Norway, N-7491)

Abstract: According to the energy transformation of the dielectric electro active polymer (DEAP) from mechanical energy to electric power, the electric power generation mechanism is studied on the DEAP. The mathematical model for simulating the deformation of dielectric elastomer is set up on the basis of the Mooney-Rivlin model, and the dynamic characteristic of the material is discussed under different working conditions. Meanwhile, DEAP is analyzed in the static-electric field on the forces, scavenged energy equation

and motion equation. With the Danfoss DEAP material, the prototype is set up for harvesting energy from the wind. Quantitative experiments and research as well as detailed analysis show that the DEAP can generate the electric energy harvesting from the environmental sources.

Key words: dielectric electro active polymer; Mooney-Rivlin model; energy harvesting; wind generator

1 引言

电活性聚合物 (dielectric electro active polymer, DEAP) 也是介电弹性体 (dielectric elastomer, DE), 是一类膜状的绝缘塑料 (如软硅树脂, 聚丙烯酸橡胶等), 能实现电能向机械能的转换, 也能通过其大变形实现机械能向电能的转换, 如图 1 所示. 图中, E 为电场强度, W 为应变能. 电活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)), 图中, V_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为 i 状态下电压, C_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为 i 状态下电容. 这种现象称为麦克斯韦应力. 其变形率大于压电陶瓷等传统的电致伸缩材料, 使得这类材料作为微型机械中电致动器 (actuators) 基础材料得到广泛的应用. 反过来, 在外力撤销后, 其储存的弹性能转换成电能, 作为传感器或发电机的制作材料. 如图 2 所示, 沿电力线方向的应力 (σ_m) 为

$$\sigma_m = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{U}{d} \right)^2 \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$); ϵ_r

收稿日期: 2010-03-02

第一作者: 林桂娟 (1978—), 女, 工学博士, 主要研究方向为工程机械及其关键技术, 微机电系统及控制技术. E-mail: forestlgj@126.com

通讯作者: 宋德朝 (1947—), 男, 教授. 主要研究方向为工程机械及其关键技术. E-mail: songdechao@tongji.edu.cn

为相对介电常数; E 为电场强度; U 为电场中施加的电压; d 为电力线方向的材料厚度。

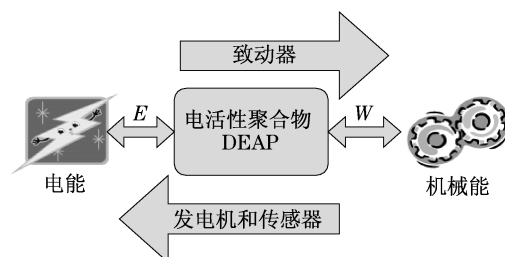


图1 电话性聚合物能量转换图

Fig.1 Energy transformation for DEAP

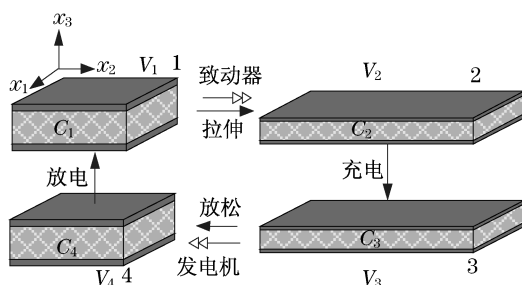


Fig.2 Strain for DEAP membrane device

利用电话性聚合物的机械能向电能的转换功能,把图2所示看成是一个可变平板电容器,其电容为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

式中, A 为柔性电极表面面积. 由于电话性聚合材料变形幅度大(例如: 软硅树脂的应变可以达到 20%~30%, 而聚丙烯酸橡胶甚至可以提供更大的应变和能量输出, 其线性应变达 380%^[1]之多)、反应速度快(微秒级), 使得它们具备了作为制作电致动器(actuators)^[2] 或者反过来制作传感器^[3] 及发电机^[4-6] (sensors and generators) 的基础材料的可能性, 又由于此类材料具有柔软性, 因而甚至被视为将来制造人造肌肉的理想材料。

最近, 挪威科学技术大学采用丹佛斯生产的电话性聚合物材料, 利用波浪能进行发电的研究, 并进行了相关的实验研究与分析^[7-8]; 国内同济大学也开始了电话性聚合物发电的研究^[9-10]。

本文采用 Mooney-Rivlin 模型研究推导了电话性聚合物作为发电智能材料的力学性能公式; 并分析了其机械能向电能转化过程中电能收集方程, 及电话性聚合物的运动学方程; 利用丹佛斯生产的电话性聚合物材料, 构建电话性聚合物发电机实验平

台; 在实验装置中进行了大量的实验研究, 实验数据充分说明了电话性聚合物发电的原理。

2 电话性聚合物力学性能建模的理论基础

由于电话性聚合物属于大变形超弹性材料, 根据连续介质力学理论对其力学性能模型研究做出如下假设:

(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; 超弹性材料的机械性能由应变能密度函数 W 来描述. 应变能密度函数 W 存在很多函数形式. 对于电话性聚合物这种非线性材料, 本文用 Mooney-Rivlin 模型加以描述。

(2) 各向同性假设, 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密度函数 W 来描述. 应变能密度函数 W 存在很多函数形式. 如 Yeoh 模型、Mooney-Rivlin 模型和 Ogden 模型等. 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, 因为类橡胶材料的重现性是不足够的, 不允许精确地对大量参数进行估计. Ogden 模型通常对大应变水平的求解提供最好的近似, 可应用的应变水平可达到 700%, 较高阶的参数可提供更精确的解, 但是这样也可能在拟合材料力学模型常数时引起数值计算困难, 而且它要求在用户感兴趣的变形范围内要有足够的参数. 而 Yeoh 模型是高价模型且涉及的参数多. 考虑到简单和实用, 应用最广泛的应变能函数应该首选 Mooney-Rivlin 模型, 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. 而且本文中采用的电话性聚合物的变形是小于 35% 的. 故本文采用 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. 其应变能函数都是关于应变张量的函数: $W = (I_1, I_2, I_3)$ 。

目前, 得到广泛承认并在工程中大量应用的主要是广义 Mooney-Rivlin 应变能函数表达式:

$$W = \sum_{i=0}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

式中: C_{ij} 是与材料有关的系数; 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. 且对不可压缩的超弹性材料($I_3 = 1$)则:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \\ I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Rivlin 和 Saunders 已经通过一系列实验, 发现 $\partial W / \partial I_1$ 近乎常数, 而 $\partial W / \partial I_2$ 随 I_2 增加而减少, 故提出 Mooney-Rivlin 模型的应变能函数 W 的一般形式如下:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

式中, C_{10} 和 C_{01} 为材料参数.

根据超弹性理论, 其主应力 σ_i 通过式(5)应变能函数对主变形率求导获得, 即:

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

式中, p 为 Lagrange 乘子, 也为静水压力, 根据动力学边界条件确定.

2.2 单轴拉伸

单轴拉伸时(在此沿着轴 1 方向拉伸, 如图 2 所示为 x_1 方向), 对于 $I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 不可压缩的前提下, 轴 2 (x_2 方向), 轴 3 方向 (x_3 方向) 的应力为零 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$). 设主伸长比为

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

Mooney-Rivlin 模型中, 由式(4)~式(7)得应力为

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2C_{10}(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + 2C_{01}(\lambda - \lambda^{-2}) \\ \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 双轴向拉伸

方向 1 (x_1 方向)、2 (x_2 方向) 上进行均匀拉伸 ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$), 方向 3 上的应力为零 ($\sigma_3 = 0$). 由材料的不可压缩性 $I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 得 Mooney-Rivlin 模型中

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

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 2(C_{10} + \lambda^2 C_{01})(\lambda^2 - \lambda^{-4}) \quad (10)$$

3 电活性聚合物的发电原理

由于电活性聚合物组成的平板电容产生变形时, 如图 3 所示, 其电容发生改变, 所以把上下表面沉积柔性电极的电活性聚合物看成可变电容器. 从

图 3 可看出电活性聚合物首先从状态 0 到状态 1 进行了 3 个方向的预拉伸; 状态 1 到状态 2 只是进行了两个方向的预拉伸, 即从方向 x_1, x_2 拉伸了, 但方向 x_3 却压缩了, 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 一定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, 原来储存在其中的机械弹性能就转换成电能了. 从微观角度说, 由于电活性聚合物薄膜厚度(即方向 x_3)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(2)可得, 电容器从状态 3 到状态 4 时, 电容器的厚度 x_3 变厚, 电极表面面积 A 变小, 电容就变小. 根据式(11), 可以计算出电活性聚合物通过变形, 从机械能转换成电能^[9-11]的多少.

$$E = \frac{1}{2}(C_4 U_4^2 - C_3 U_3^2) \quad (11)$$

式中: C_3, U_3 分别为状态 3 下电容器的电容及电压; C_4, U_4 分别为状态 4 下电容器的电容及电压. 结合式(2)及(11)就可计算出转化出的电能大小.

假定在此过程中, 薄膜两端的电压不变, 也即是恒压收集电能的过程, 则由前面推导的公式可得出在垂直轴 x_3 上的应力为

$$\sigma_3 = -\epsilon_0 \epsilon_r E^2 - \frac{mg}{x_{13} x_{23}} \quad (12)$$

式中: m 为薄膜的质量; g 为重力加速度.

如果只有双轴向拉伸, 运用 Mooney-Rivlin 模型, 得其在轴 1 方向 (x_1) 的运动方程^[12]为

$$m x_{10} \frac{\partial \lambda^2}{\partial^2 t} = \frac{1}{\lambda} x_{20} x_{30} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 + \frac{x_{30}}{\lambda^3 x_{10}} mg - \frac{2}{\lambda} x_{20} x_{30} (\lambda^2 - \lambda^{-4}) (C_{10} + \lambda^2 C_{01}) \quad (13)$$

式中, x_{10}, x_{20}, x_{30} 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 0, 1, 2, 3, 4. 比如 x_{10} 就是代表轴 1 方向 x_1 在状态 0 下的长度.

在图 3 情况下, 假定在 x_3 方向上施加的电场保

持恒定的电压,结合式(2),(11),(13)就可以计算出电话性聚合物薄膜电容器从状态3到状态4过程收集的电能。

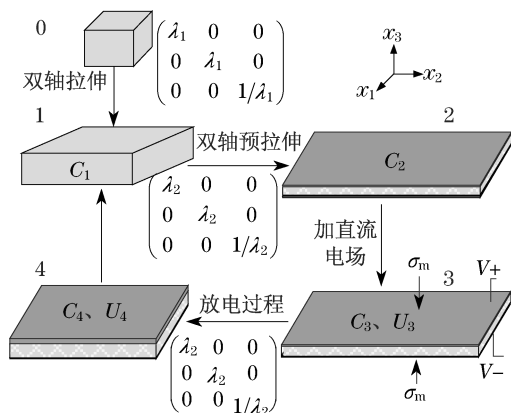


图3 电话性聚合物发电原理

Fig.3 Basic mechanism of DEAP generator mode

4 实验平台

根据前面介绍的电话性聚合物发电原理,在此采用丹佛斯生产的 DEAP 材料,建立了电话性聚合物发电机实验装置平台.如图4所示,实验装置主要由4大部分组成:①电话性聚合物 DEAP 能量转换装置;②收集风能的机械装置,实验装置中用的是风帽;③机械结构转换装置,该部分利用一对伞齿轮、一对直齿轮及偏心轮轴,把风帽的垂直旋转运动转换成电话性聚合物的往复水平运动,如图4所示;④电路部分:其中一部分电路为电话性聚合物提供高压激励直流电压,另一部分为电话性聚合物所产生的电能的储能电路。

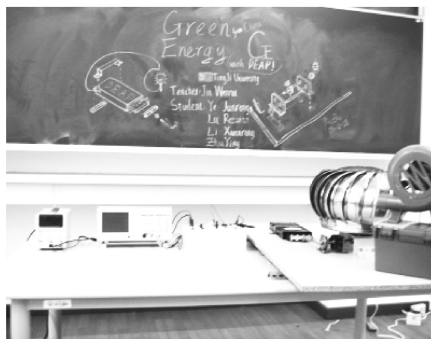


图4 风力发电实验装置

Fig.4 Experimental equipments of wind generator

4.1 DEAP 薄膜

近几年来,人们在不断探索研究制造人工肌肉的理想材料,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生产了非预拉伸的单层薄膜致动器,而且其厚度是微米级的,如图5所示,软硅树脂的厚度约为 $H = 25 \sim 30 \mu\text{m}$,柔性电极银粉的厚度大概为 $h = 80 \text{ nm}$.丹佛斯采用 Wacker^[13]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.波纹层主要是在加载电压时使其产生如图5所示柔性方向的延伸.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.如图6所示,由图5所示的两层薄膜按照平基层叠在一起,组成图6所示的多层薄膜的电话性聚合物.丹佛斯利用上面背靠背的 DEAP 薄膜制造了非预拉伸的 PolyPower core-free InLactor 致动器^[2].

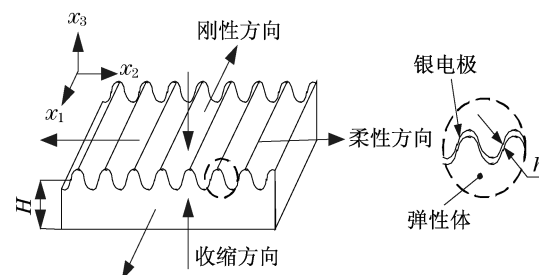


图5 银电极的电话性聚合物的波形表面

Fig.5 Elastomer with silver electrodes following the corrugated surface

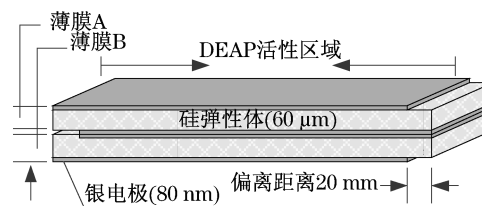


图6 多层 DEAP 薄膜叠加图

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,实验装置中用的是风帽,如图7所示,它可以在风力较小的情况下,从不同方向来的风都能让其运转起来;二是机械结构转换装置,该部分利用一对伞齿轮、一对直齿轮及偏心轮轴,把风帽的垂直旋转运动转换成电话性聚合物的往复水平运动.如图7所示,风帽的转轴通过一对伞齿轮将垂直方向的旋转运动转换成水平方向的旋转运动,然

后通过一对减速齿轮,降低旋转速度,再通过偏心轴将旋转运动转换成电活性聚合物的水平往复运动.

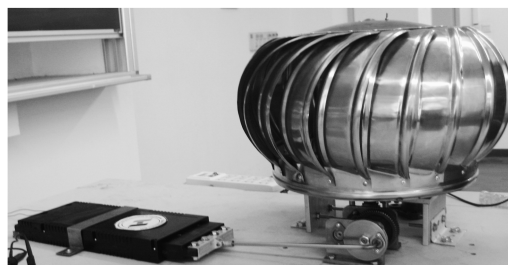


图 7 风能收集装置图

Fig.7 Wind absorber mechanism

4.3 电路原理图

本实验装置中,直接利用电源模块将 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;另一部分用来储存电活性聚合物产生的电能,从图 8 中可知,储能电路采用了电容,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,通过交流发光二极管的点亮来显示电活性聚合物所产生的电能.

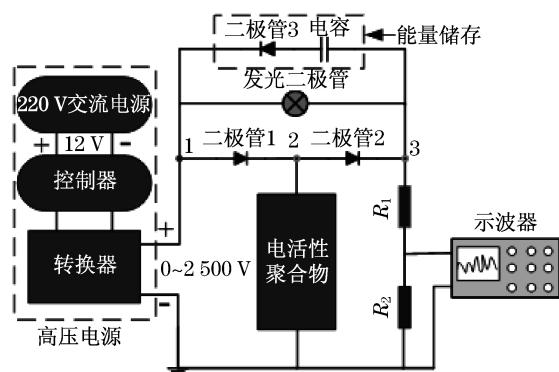


图 8 电路原理图

Fig.8 Generator schematic circuit diagram

4.4 实验结果分析

利用实验装置,进行大量的实验研究.首先将 220 V 的交流电源一直接通,通过示波器看电活性聚合物两端所产生的电压波形(见图 9)及发光二极管的状态.从实验装置可以看出,风帽在风力的带动下把所产生的旋转运动通过一对伞齿轮和一对减速齿轮,再通过偏心轴将旋转运动转换成电活性聚合物的水平往复运动.从实验数据图 9 可看出,其中显示的为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,大概升高 75 V(由于图 8 中电阻 R_1 与电阻 R_2 的比值为 1 000 : 1),其中的交流部分为电活性聚合物运动所产生的电压.从图中可以看出波形在同样的位置产生了锯齿,那是由于电活性聚合物的运动不是匀速往复运动.同时发光二极管在电活性聚合物运动过程中不断地闪烁.只要 220 V 的交流电源不断供应,其波形图和发光二极管的闪烁状态就不变.

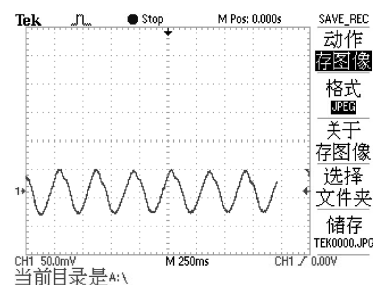


图 9 实验数据图 1

Fig.9 Experimental data 1

为了充分说明电活性聚发电原理,另一实验图是在 220 V 的交流电源瞬间通电后断开,示波器上显示的电压波形图,如图 10 所示,电压波形不是一下就衰减,而是在电活性聚合物运动一段时间后慢慢衰减的,在此过程由于电活性聚合物产生的电能储存在电容器中,这些电能既要用作电活性聚合物的高压激活电源,又有一部分被发光二极管和电路中电阻和二极管消耗,在实验的过程中观察到发光二极管也是不断地闪烁并慢慢变弱直到最后不亮.由此可见电活性聚合物在往返运动的过程中,不断把外界风能转换成电能给实验电路供电.实验结果充分地说明了,电活性聚合物能通过外界的机械运动带动,从而把机械能转换成电能.如果在实验装置中,测量好电路中初始输入的电能,并计算出电活性聚合物在运动过程中,电路所消耗的电能,就能把其运动过程中产生的电能具体地计算出来.

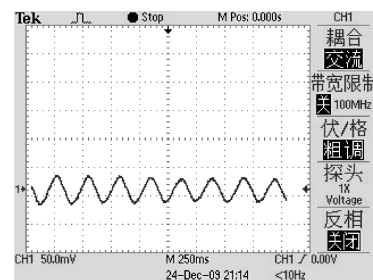


图 10 实验数据 2

Fig.10 Experimental data 2

5 结束语

利用连续介质力学理论,采用 Mooney-Rivlin 模型,推导出了电话化聚合物(DEAP)的力学性能公式.分析了在电场加载的情况下,电话化聚合物的数学分析模型、电能收集方程及运动方程.依据这些原理,采用丹佛斯生产的电话性聚合物材料,构建电话性聚合物发电机实验平台,详细说明了试验装置平台的各个关键部分.利用这个实验装置进行了大量的实验,对实验数据进行研究分析,实验结果充分证实了电话性聚合物发电的原理.由于目前实验装置中使用的电话性聚合物的量较少,所以产生的电能也较少,在实验过程中只是通过发光二极管显示电话性聚合物所产生的电能.在今后的工作中,增加电话性聚合物的使用量,同时优化其中的机械结构,设计能耗低的储能电路,在风能或海洋能充足地区建立电话性聚合物发电装置,为工业发电提供巨大的应用前景,将为世界的能源带来巨大革新.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Han-Erik Kiil, Mohamed Benslimane. Scalable industrial manufacturing of DEAP [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2009, 7287: 72870R-1 - 72870R-10.
- [3] Plante J S, Dubowsky S. On the nature of dielectric elastomer actuators and its implications for their design [C]//Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2006, 6168: 1J1 - 1J11.
- [4] Jean-Mistral C, Basour S, Chaillout J J. Dielectric polymer: scavenging energy from human motion [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2008, 6927: 692701 - 692706.
- [5] Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2008, 6927: 692705-1 - 692715-9.
- [6] Iskandarani Y H, Jones R W, Villumsen E. Modeling and experimental verification of a dielectric polymer energy scavenging cycle [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2009, 7287: 72871Y-1 - 72871Y-12.
- [7] LIN Guijuan, WANG Kesheng, CHEN Ming, et al. Ocean wave-powered generator based on dielectric electro active polymer [C]// ISOPE - 2010 - The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: OPEC, 2010: 20 - 26.
- [8] WANG Kesheng. Introduction to the renewable energy-generating power from electroactive polymer [R]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Department of Production and Quality Engineering, 2008.
- [9] LIN Guijuan, CHEN Ming. Research of micro-power generator based on the dielectric electro active polymer [C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology (ICEET09). Guilin: IEEE Computer Society Press, 2009: 20 - 26.
- [10] 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 基于电话性聚合物的微型发电机研究 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2409.
CHEN Ming, LIN Guijuan, SONG Dechao. Micro-power generator on dielectric electro active polymer [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2409.
- [11] Iskandarani Y H, Mose C. Mechanical energy harvesting of dielectric electrical activated polymers (DEAP's) [R]. Sonderborg: University of Southern Denmark. Mads Clausen Institute, 2008.
- [12] Jean-Mistral C, Basrour S, Chaillout J J, et al. A complete study of electroactive polymers for energy scavenging: modeling and experiments [M]. Stresa: EDA Publishing, 2007.
- [13] Michael Tryson, Han-Erik Kiil, Mohamed Benslimane. Powerful tubular core free dielectric electroactive polymer (DEAP) 'PUSH' actuator [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proc of the SPIE. [S. l.]: SPIE, 2009, 7287: 72871F-1 - 72871F-11.