

介电型电活性聚合物能量收集方法研究\*

朱银龙<sup>1</sup> 王化明<sup>2</sup> 周宏平<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 介电型电活性聚合物(DEAP)作为一种新型智能材料,与风力、水力相结合,可作为一种新的能量收集方法。研究 DEAP 能量收集的可行性,讨论了 DEAP 的发电机理和工作过程。根据换能器工作状态的形变过程,利用弹性大变形理论建立了 DEAP 换能器的数学模型,通过对模型的求解计算出换能器推程、回程的力-位移曲线。据此,得出 DEAP 换能单元工作过程输入的机械能、发电量和相应能量转换效率。提出了一种多换能器集成使用以提高系统发电效率的方法。理论分析和试验数据表明:初始电压和拉伸位移是影响发电量、能量转换效率的关键因素。随着多换能单元的应用,系统的总效率可提高到 28% 以上。同时,外界输入扭矩的数值波动越来越小。

**关键词:** 介电型电活性聚合物 换能器 发电特性 能量转换

**中图分类号:** TP21; TB381      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0362-06

Energy Harvesting of Dielectric Electroactive Polymer Transducer

Zhu Yinlong<sup>1</sup> Wang Huaming<sup>2</sup> Zhou Hongping<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

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

**Abstract:** As a category of electroactive polymers, dielectric electroactive polymer (DEAP) has been referred to as “artificial muscles” owing to their excellent overall performances including large deformation, high energy density and high speed of response. As a new smart material, dielectric electroactive polymer can be used as a new energy harvesting method to transform mechanical energy into electrical energy when being combined with wind power and water power. The energy harvesting mechanisms and working cycles of dielectric electroactive polymer generator were investigated. Based on the analysis of energy conversion cycle, circular energy conversion unit was implemented to conduct analysis and experiment. The mathematic model of cone dielectric electroactive polymer generator was developed. With the proposed model, the force-strokes of dielectric electroactive polymer generator in the stretching process and retracting process were determined. Analytical results indicate the generated energy and efficiency increase as the bias voltage and displacement increase in a certain range of bias voltage, while over high electrical field reduces electrical energy and efficiency due to charge leakage. Both analytical results and experimental data illustrate that the stretch displacement and bias voltage are the main factors contribute to electrical energy generation and the efficiency. With the application of multiple transducers, the overall efficiency of the proposed system could increase to above 28%. At the same time, the numerical waves of input torsions become smaller. This paper could provide a strong support for design of dielectric electroactive polymer transducer.

**Key words:** Dielectric electroactive polymer Transducer Characteristics of electric power generation Energy conversion

收稿日期: 2015-05-18 修回日期: 2015-07-10

\* 国家自然科学基金资助项目(51305209)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20130979、BK2011735)、中国博士后科学基金资助项目(2013M541678)和江苏省博士后科学基金资助项目(1302052C)

作者简介: 朱银龙,讲师,博士后,主要从事电活性聚合物换能器研究,E-mail: zhuyinlong@nuaa.edu.cn

通讯作者: 王化明,教授,主要从事机器人控制研究,E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

引言

近年来,压电陶瓷、介电型电话性聚合物(DEAP)等智能材料已被广泛应用于能量收集<sup>[1-5]</sup>。压电陶瓷发电对周围环境要求较高,激振频率一般在共振点频率附近。DEAP材料发电本质上是电容式,利用材料变形前后的电容改变,将机械能转换为电能。相比压电陶瓷,DEAP材料对机构工作速度要求较低<sup>[6]</sup>。研究表明,丙烯酸类电话性聚合物材料发电能量密度为0.4 J/g<sup>[7]</sup>,远高于压电陶瓷(PZN-PT约为0.1 J/g)。国外一些研究机构与学者对DEAP发电的可行性做了较多的前期研究。斯坦福研究院(Stanford Research Institute)研究了鞋跟式发电机、水轮式发电试验样机、波浪能发电机等<sup>[7-9]</sup>。McKay等通过电话性聚合物发电仿真得到薄膜变形与其电容之间的关系,设计了用于DEAP薄膜发电过程的自充电电路<sup>[10-11]</sup>。Brochu等<sup>[12]</sup>研究表明,提高DEAP薄膜材料的介电常数可以提高发电量、降低初始电压;提高薄膜材料刚度则可以提高机电转换效率发电效率。国内高校针对DEAP的研究相对较少,且主要集中在材料力学性能与失效特性方面。

本文分析DEAP的发电机理、工作过程、能量转换关系;建立换能器模型,计算得到换能单元在断电拉伸和通电返回过程中的力-位移曲线和相应位置的电容值,进而求出一个工作循环过程DEAP换能单元的发电量、输入的机械功和机电能量转换效率。

1 DEAP 发电原理与能量转换过程

DEAP是一种超弹性绝缘材料,其工作过程相当于一可变电容<sup>[13-15]</sup>。如图1所示,DEAP薄膜材料被拉伸时其面积变大、厚度变小,薄膜电容值变大。在薄膜上充电,撤销外部拉力,弹性回复力使薄膜恢复初始形状。此过程中,薄膜两侧同性电荷之间距离减小,异性电荷之间距离增加,薄膜的电容值变小。返回过程中薄膜上的电压和存储电能也会相应地增加,实现将拉伸时输入的机械能转换为电能增加量。

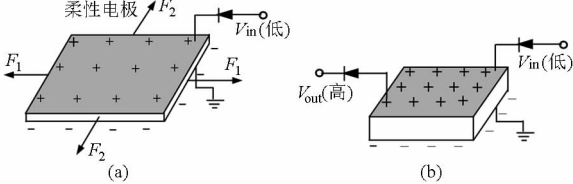


图1 DEAP发电原理

Fig. 1 Electric power generation principle of DEAP

(a) 拉伸(低电压充电) (b) 收缩(产生高电压)

DEAP发电过程分为4个步骤<sup>[14]</sup>:①外力拉伸薄膜,将机械能转换为弹性势能。②对DEAP薄膜两侧充电。③撤销外部拉力,DEAP薄膜恢复初始状态,此过程薄膜内部弹性回复力克服静电压力做功,弹性势能转换为电能。④将获得的电能储存在电池中,使薄膜恢复初始状态继续发电。

图2为换能单元具体结构,薄膜等轴拉伸然后固定在内外边框上。换能单元外框固定,拉伸内框形成一锥形结构。图3中,曲线 $f_s(z)$ 为推程力-位移曲线, $f_r(z)$ 为回程的力-位移曲线。DEAP换能器初始电容用 $C_0$ 表示, $A$ 点、 $D$ 点位置对应电容为 $C_A$ 、 $C_D$ ,相应电压为 $U_A$ 、 $U_D$ 。撤去外力后换能单元返回过程中,弹性回复力逐渐减小,作用在薄膜上的静电压力使得换能单元无法回到初始点 $O$ 点,只能退回到 $D$ 点。

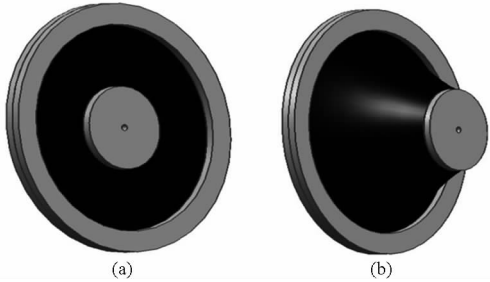


图2 DEAP换能单元结构示意图

Fig. 2 Structure illustration of DEAP unit

(a) 初始状态 (b) 变形状态

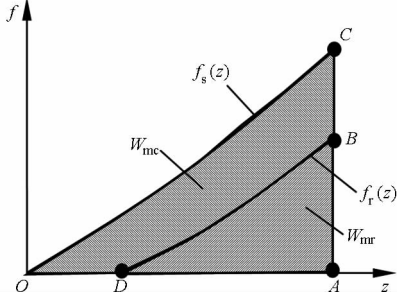


图3 DEAP换能单元能量转换关系

Fig. 3 Energy conversion curves of DEAP

曲线 $f_s(z)$ 与 $z$ 轴间围成的面积 $W_m$ 表示拉伸过程输入换能单元的总机械能,为

$$W_m = \int_0^A f_s(z) dz \tag{1}$$

曲线 $f_s(z)$ 和 $f_r(z)$ 之间的面积 $W_{mc}$ 表示转换为电能的机械能,即

$$W_{mc} = \int_0^A f_s(z) dz - \int_D^A f_r(z) dz \tag{2}$$

曲线 $f_r(z)$ 和 $z$ 轴之间的面积 $W_{mr}$ 表示弹性回复力使换能单元恢复到 $D$ 点消耗的机械功,可表示为

$$W_{mr} = \int_D^A f_r(z) dz \tag{3}$$

在薄膜上输入的初始电能 $E_{ie}$ 表示为

$$E_{ie}=0.5C_AU_A^2 \tag{4}$$

回到  $D$  点后换能单元薄膜储存电能为

$$E_{oe}=0.5C_DU_D^2 \tag{5}$$

一个循环的发电量  $\Delta W_e$  表示为

$$\Delta W_e=E_{oe}-E_{ie}=0.5C_AU_A^2(C_A/C_D-1) \tag{6}$$

DEAP 换能单元的实际效率可表示为

$$\eta_e=\Delta W_e/W_{mc}\times 100\% \tag{7}$$

DEAP 换能单元的能量转换总效率为发电量  $\Delta W_e$  与输入的总机械能  $W_m$  之比,可表示为

$$\eta=\Delta W_e/(W_{mc}+W_{mr})\times 100\% \tag{8}$$

2 DEAP 换能单元数学模型

换能单元变形前后是轴对称回转体,图 4 表示变形后一半截面形状。薄膜初始坐标系用  $(R, A, Z)$  表示,当前坐标系表示为  $(r, \alpha, z)$ 。几何方程表示为

$$\begin{cases} \lambda_1=dr/(dR\cos\alpha) \\ \lambda_2=r/R \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} r_1=dr/(d\alpha\cos\alpha) \\ r_2=r/\sin\alpha \end{cases} \tag{10}$$

式中  $\lambda_1、\lambda_2$ ——经向和纬向延伸率  
 $r_1、r_2$ ——曲线  $s$  径向和轴向的曲率半径  
 $\alpha$ ——曲线  $s$  上  $p$  点处法线方向与  $z$  轴夹角

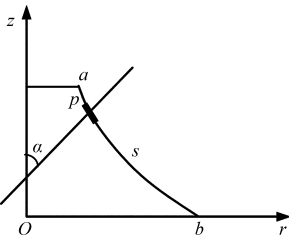


图 4 DEAP 换能单元截面形状(1/2)

Fig. 4 Cross section of DEAP

利用薄膜无矩理论,其平衡方程表示为

$$\begin{cases} 2C_{10}(\lambda_1^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2})+4C_{20}(\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}-3)\cdot \\ (\lambda_1^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2})+6C_{30}(\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2}-3)^2\cdot \\ (\lambda_1^2-\lambda_1^{-2}\lambda_2^{-2})-\varepsilon_r\varepsilon_0\lambda_1^2\lambda_2^2(U/h_0)^2= \\ F\lambda_1/(2\pi h_0R\sin\alpha) \\ dr/dR=\lambda_1\cos\alpha \\ d\alpha/dR=-\sigma_2\lambda_1\sin\alpha/(\sigma_1\lambda_2R) \\ dz/dR=\lambda_1\sin\alpha \end{cases} \tag{11}$$

式中  $C_{10}、C_{20}、C_{30}$ ——Yeoh 形应变能材料参数  
 $\varepsilon_r$ ——相对介电常数  $\varepsilon_0$ ——绝对介电常数  
 $h_0$ ——薄膜初始厚度  $F$ ——集中力  
 $\sigma_1$ ——经向真实应力  $U$ ——电压  
 $\sigma_2$ ——纬向真实应力

边界条件为

$$\begin{cases} r(A)=a \\ r(B)=b \\ z(B)=0 \end{cases} \tag{12}$$

换能器的电容可表示为

$$C=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0}{h_0}\int_0^z\lambda_1\lambda_22\pi r\sqrt{1+(dr/dz)^2}dz \tag{13}$$

3 数值计算结果与试验分析

利用打靶法编写程序求解式(11)~(13)构成的微分代数方程组,可得到换能单元的力-位移曲线、电容、换能单元产生的电能、机电转换效率。理论分析时取 DEAP 换能单元薄膜初始厚度为 1 mm,内外直径分别为 35 mm、80 mm,薄膜预拉伸率为 400%。

图 5 为换能器工作时的力-位移曲线,易见激励电压的增加会使力曲线向下移动。造成这一现象的原因是激励电压的不断增大所产生的静电力逐渐增大,进而降低 DEAP 薄膜内部张力的缘故。

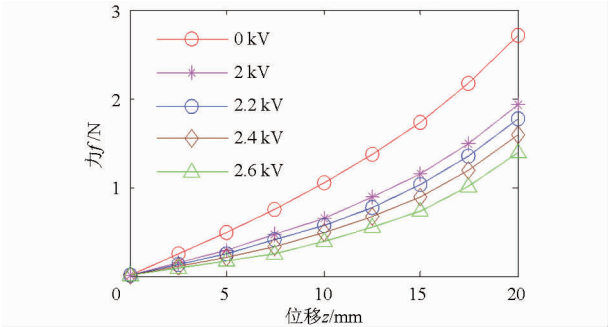


图 5 换能单元力-位移曲线

Fig. 5 Relationship between force and displacement of DEAP

图 6 所示为不同拉伸位移时初始电压与转换为电能的机械能的关系,可见,初始电压和拉伸位移越大,输入的机械功越大,与图 3 所示的能量转换关系相符合。

图 7 表示初始电压与发电量的关系,可见初始

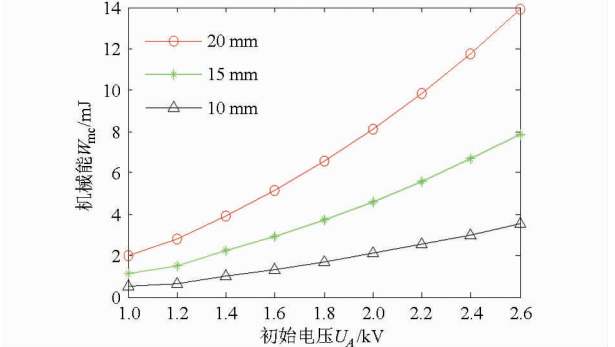


图 6 初始电压-机械能曲线

Fig. 6 Relationship between bias voltage and mechanical energy

电压和 DEAP 初始拉伸位移两者对增加发电量起关键作用。

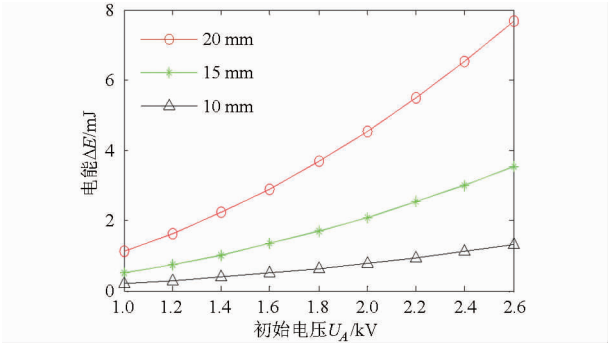


图 7 初始电压-电能曲线

Fig. 7 Relationship between bias voltage and electrical energy

如图 8 所示,初始拉伸位移增加,机电转换效率也相应增加。DEAP 拉伸 20 mm 时,效率可达到 58%。初始电压为 1.2 kV 时效率略高,其它电压点效率基本相同。图 9 表示机电能量转换总效率与初始电压的关系,总效率与图 8 的转换效率相比较低,这是由于 DEAP 单元回缩过程机械能没有被利用。

试验所用装置如图 10 所示<sup>[15]</sup>,包括 DEAP 换能单元、高压电源 (DW - P103 - 1ACD8 型,天津东文)、运动控制平台 (M415. PD 型, PI)、高压探头

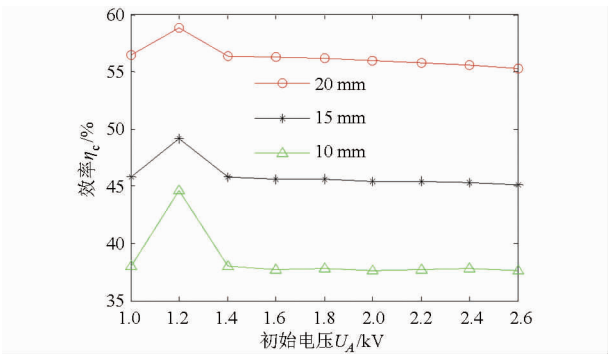


图 8 机电转换效率-初始电压曲线

Fig. 8 Relationship between efficiency and bias voltage

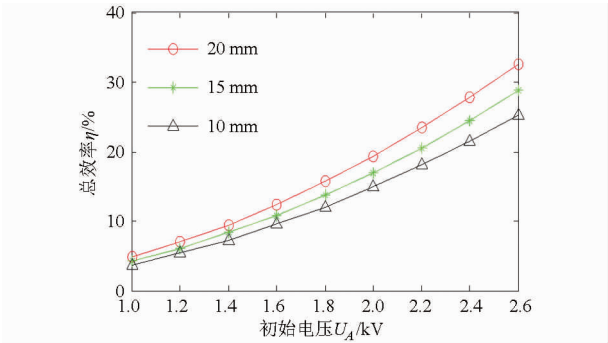


图 9 DEAP 换能单元总效率曲线

Fig. 9 Total efficiency curves of DEAP

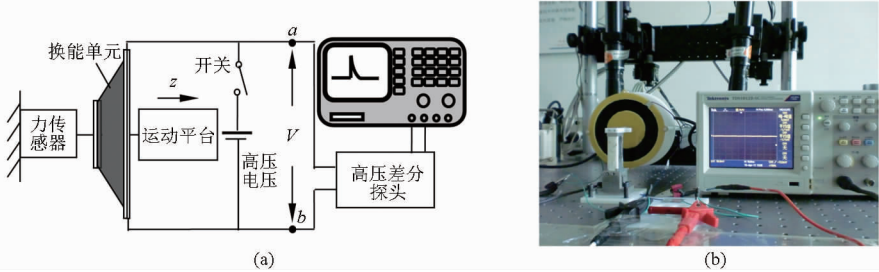


图 10 试验装置

Fig. 10 Photos of experimental apparatus

(a) 原理图 (b) 现场图

(DP - 20K 型, Pintech)、力传感器 (BK - 5D 型, Sensor701 公司)、示波器 (TDS1012 型, Tektronix)、LCR 电桥 (AT810 型, Applent) 等。运动平台牵引换能单元匀速运动,利用力传感器测出力-位移曲线。

试验测出的力-位移曲线与理论分析数据吻合,计算的能量转换效率与理论分析结果一致。

4 多换能单元能量转换

由于换能单元在回程时  $W_{mr}$  这一部分能量并没有被完全有效地利用,单个 DEAP 换能单元的机电能量转换效率不是很高,为此考虑采用图 11 所示的反向连接方式<sup>[15]</sup>。

图 12 所示为双换能单元工作过程示意图,从 A 点到 B 点运动时,图 11 右侧中的回复力对左侧单元

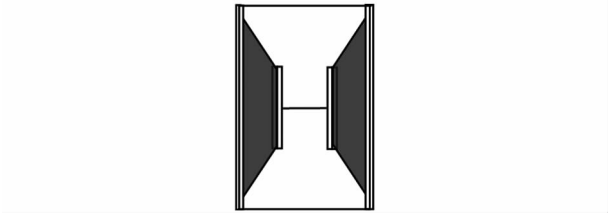


图 11 双单元连接方式

Fig. 11 Connecting manner of double transducers

做功,不需要外界输入机械功;同样,换能单元退回过程中(D 点到 E 点),左侧单元对右侧单元做功也不需要外部输入机械功。一个工作循环中,外界输入的总机械能可表示为

$$W_m = W_s + W_r = \int_{z_1}^{z_3} f_s(z) dz + \int_0^{z_2} |f_r(z)| dz \quad (14)$$

增加的电能为

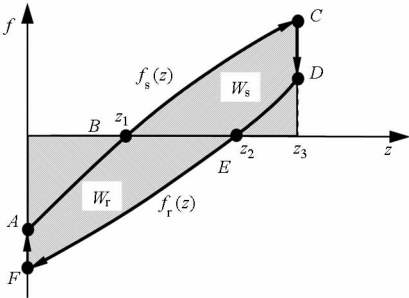


图 12 双换能单元力-位移曲线

Fig. 12 Force - displacement curves of double transducers

$$\Delta E = \Delta E_s + \Delta E_r =$$

$$0.5 C_{12} V_{12}^2 - 0.5 C_{11} V_{11}^2 + 0.5 C_{22} V_{22}^2 - 0.5 C_{21} V_{21}^2 \tag{15}$$

机电能量转换总效率为

$$\eta = \Delta E / W_m \times 100\% \tag{16}$$

图 13 为初始激励电压(200、1 800、2 400 V)与双单元换能器力-位移曲线的关系,可见随着电压的增加,推程和回程曲线之间的面积也在增加。图 14 为机电转换总效率曲线,双单元反向连接时,薄膜中的弹性回复力被充分利用,系统的机电转换总效率显著提高。

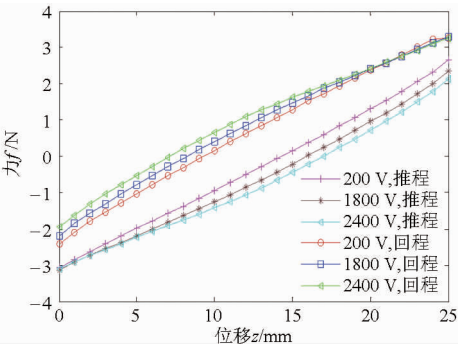


图 13 不同初始激励电压下双换能单元力-位移曲线

Fig. 13 Force - displacement curves of double transducers under different voltages

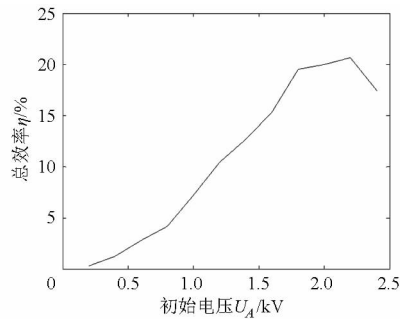


图 14 双换能单元总效率曲线

Fig. 14 Total efficiency curve of double transducers

两个单元反向连接时存在 180°相差,图 12 中  $\int_0^{z_1} |f_s(z)| dz + \int_{z_3}^{z_2} f_r(z) dz$  这一部分机械能依然没有利用,为此考虑增加单元的数目。多单元换能器工作时,部分单元处于拉伸状态,另一部分为收缩状

态,可将收缩单元上的弹性回复力用于拉伸其它单元提高机械能的利用效率。可以采用多曲柄滑块机构来调节各 DEAP 换能单元之间相差,采用机械装置将自然界中风能、水流、海洋波浪能等能源转换为旋转运动来驱动换能器产生形变进行能量收集。

如图 15 所示,曲柄旋转 360°完成一个工作循环,取第  $i$  个换能单元进行分析,单元的轴向位移为

$$z = r' + l - \sqrt{l^2 - (r' \sin \theta)^2} - r' \cos \theta \tag{17}$$

式中  $r'$ ——曲柄长度  $l$ ——连杆长度

利用虚功原理推导曲柄上扭矩为

$$T_i = F_i r' \left( \frac{r' \sin \theta_i \cos \theta_i}{\sqrt{l^2 - (r' \sin \theta_i)^2}} + \sin \theta_i \right) \tag{18}$$

( $i = 1, 2, \dots, n$ )

式中  $F_i$ ——第  $i$  个换能单元上的拉力

$n$ ——单元数目  $\theta$ ——曲柄与  $z$  轴夹角

$\theta$  小于 180°时,  $F_i$  取  $f_s(z)$  曲线数值,反之取  $f_r(z)$ 。

则所有曲柄滑块机构的扭矩表示为

$$T_t = \sum_{i=1}^n T_i \tag{19}$$

利用式(18)、(19)计算出 DEAP 换能单元数目与对应的扭矩关系如图 16 所示。1 个单元的换能器,扭矩在 0°到 180°之间为正值,即换能单元处于曲柄滑块机构对其施加拉力的状态,扭矩负值表示单元中的弹性回复力对外界做功,这些能量没有利用,此时能量收集系统的总效率约为 14%。

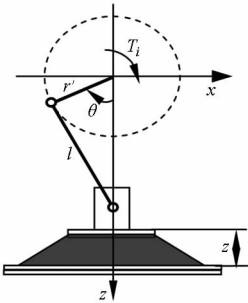


图 15 能量采集系统扭矩分析示意图

Fig. 15 Torsion analysis of energy harvesting system

当双换能单元反向连接时相差为 180°,一个收缩状态的单元中的弹性回复力可以拉伸另一单元,此时机械能利用效率更高,系统总效率可提高到 20%。从图 16b 可以看出,此时曲柄连杆系统的输入扭矩在 0 到 240°时仍然为负值。当单元数目大于 2 以后,扭矩数值全部为正,此时系统的总效率可提高到 28% 以上。同时,随着单元数目的增加,扭矩的数值波动越来越小。

5 结论

(1)初始电压、拉伸位移是影响发电量、能量转

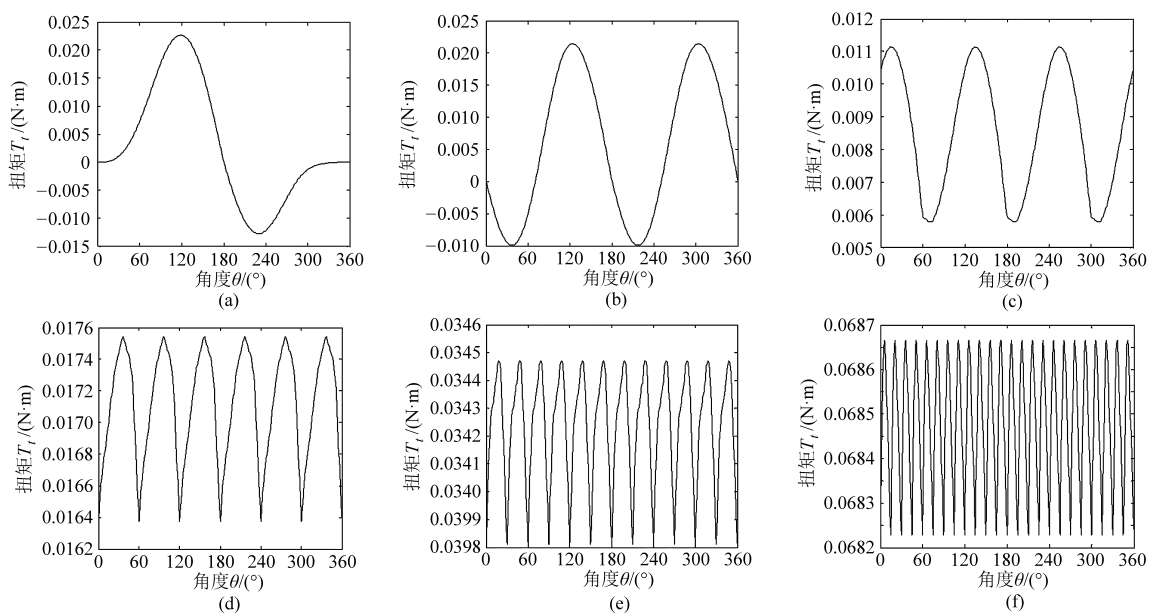


图 16 多单元换能器输入扭矩曲线

Fig. 16 Torsion curves of multiple transducers

(a) 1 个 (b) 2 个 (c) 3 个 (d) 6 个 (e) 12 个 (f) 24 个

换效率的主要因素。

(2)使用一个工作循环中两个换能单元的力-位移曲线合成双单元换能器的力-位移曲线。试验表明,合成的双单元换能器力-位移曲线与试验测得的力-位移曲线基本吻合。

(3)设计了多单元换能器的工作方法,提高换能单元数目可以有效利用各换能单元的回程力,从而提高整个 DEAP 换能系统的机电转换效率,同时提高曲柄滑块工作时曲柄输入力矩的平滑度。

参 考 文 献

1 Sawin J L. Mainstreaming renewable energy in the 21st century [C]. Worldwatch Paper 169, 2004: 1-73.

2 Bar-Cohen Y, Zhang Q. Electroactive polymer actuators and sensors [C]. MRS Bulletin, 2008, 33: 173-181.

3 Vinogradov A M. Accomplishments and future trends in the field of electroactive polymers [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proceedings of SPIE 6927M, 2008: 1-11.

4 Galhardi M A, Guilherme T H, Junior V L. A review of power harvesting on mechanical vibration using piezoelectric materials and applications [C]//The 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2008: 1-9.

5 Brochu P, Pei Q B. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2010, 31: 10-36.

6 罗华安,王化明,游有鹏. 介电弹性体圆柱形驱动器静态特性分析[J]. 农业机械学报, 2012,43(9): 202-208.

Luo Huan, Wang Huaming, You Youpeng. Static characteristic of dielectric elastomer cylindrical actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9): 202-208. (in Chinese)

7 Pelrine R, Kornbluh R, Eckerle J, et al. Dielectric elastomer: generator mode fundamentals and applications [C]//Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proceedings of SPIE 4329, 2001: 148-156.

8 Prahlad H, Kornbluh R, Pelrine R, et al. Polymer power dielectric elastomers and their applications in distributed actuation and power generation [C]//Proceedings of ISSS 2005 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, 2005: SA-13.

9 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. In novative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles[C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proceedings of SPIE 6927M, 2008: 15-1-15-9.

10 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. An integrated, self-priming dielectric elastomer generator [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(6):062911.

11 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. Self-priming dielectric elastomer generators [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(5): 055025.

12 Brochu P, Li H F, Niu X F, et al. Factors influencing the performance of dielectric elastomer energy harvesters [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) Proceedings of SPIE 76422J,2010: 1-12.

13 Czech B, Kessel R V, Bauer P, et al. Energy harvesting using dielectric elastomers [C]//14th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2010: S4-18-S4-23.

14 Graf C, Maas J. Evaluation and optimization of energy harvesting cycles using dielectric elastomers [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proceedings of SPIE 79760H, 2011: 1-12.

15 朱银龙,王化明. 介电型电话性聚合物驱动器机电耦合特性[J]. 农业机械学报,2013,44(12):301-306.

Zhu Yinlong, Wang Huaming. Electromechanical characteristic of dielectric electroactive polymer actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):301-306. (in Chinese)