

文章编号 1004-924X(2016)08-1980-11

## 介电型电活性聚合物圆柱形驱动器的驱动效率

罗华安<sup>1</sup>, 王化明<sup>2</sup>, 朱银龙<sup>3</sup>, 左方睿<sup>2</sup>, 汪洋<sup>2</sup>

(1. 南京信息职业技术学院 机电学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

3. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:**研究了介电型电活性聚合物(DEAP)驱动器的机电能量转换机理、能量损耗和驱动效率。建立了驱动器机电能量转换模型,并通过试验测算了驱动器等效电路的模型参数,分析了电极材料等因素对DEAP相对介电常数的影响。深入研究了驱动器漏电流损耗,试验验证了漏电流对驱动器性能的影响。最后,设计了驱动器驱动试验台,完成了不同行程的准静态驱动试验,数值计算了驱动器的驱动效率。结果表明:由于等效电路电容未参与能量转换,驱动器机电转换效率分别为17.6%和25.6%。低电压、小行程驱动时,试验误差与理论分析误差不超过15%;而高电压、大行程驱动时,DEAP膜的漏电流等非线性因素使其驱动效率变化明显。该结果可为DEAP圆柱形驱动器的优化设计及合理使用提供指导。

**关键词:**介电型电活性聚合物;圆柱形驱动器;机电能量转换;驱动效率;漏电流

**中图分类号:**TH703.6;TP24 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1980

## Actuation efficiency of dielectric electroactive polymer cylindrical actuators

LUO Hua-an<sup>1</sup>, WANG Hua-ming<sup>2</sup>, ZHU Yin-long<sup>3</sup>, ZUO Fang-rui<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210023, China;

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

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

\* Corresponding author, E-mail: luohuaan@163.com

**Abstract:** This paper focuses on the electromechanical conversion mechanism, energy losses and drive efficiencies of cylindrical actuators based on Dielectric Electroactive Polymer (DEAP). A electromechanical energy conversion model was established, the parameters for the equivalent circuit model of an actuator were measured and calculated through experiments, and the influence of the some factors such as electrode materials on the relative dielectric constant of the DEAP were analyzed. The current leakage loss of the actuator was studied, and the effect of the current leakage loss on the performance

收稿日期:2016-03-10;修订日期:2016-04-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51305209);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK20130979);南京航空航天大学基本科研业务费资助项目(No. NS2014047)

of the actuator was verified through experiments. Finally, a test bench for the actuator was designed for fulfilling the quasi-static actuation experiments of different strokes, and the driving efficiency of the actuator was calculated through numerical method. The results show that the electromechanical energy conversion efficiency is about 17.6% and 25.6% because the equivalent capacitor of the circuit is not involved in energy conversion. Moreover, the discrepancy between the experiment and the theoretical analysis is less than 15% when the actuator is driven by a low voltage and a short stroke, but the efficiency will be changed obviously when it is driven by a high voltage and a large stroke owing to the nonlinear factors such as the current leakage of DEAP membrane. These analyses offer a guidance for the optimal design and correct operation of DEAP cylindrical actuators.

**Key words:** dielectric electroactive polymer; electromechanical conversion; cylindrical actuator; actuation efficiency; current leakage

## 1 引 言

介电型电活性聚合物(Dielectric Electroactive Polymer, DEAP)材料受电压激励产生变形,具有变形大、运动平滑、零噪声、能量密度高、响应速度较快等优点,在能量收集及新型传感器、驱动器应用研究方面得到广泛关注<sup>[1-4]</sup>。利用 DEAP 材料制作的驱动器在微型仿生机器人、康复训练、软体机器等领域具有潜在应用前景<sup>[5-9]</sup>,其中圆柱形驱动器结构简单,可输出较大的位移和力,成为科研人员的重点研究对象之一<sup>[7-9]</sup>。

DEAP 材料的机电能量转换能力被重点关注<sup>[10-14]</sup>。基于可变电容原理,DEAP 材料可制作发电机进行能量收集,分析 DEAP 膜失效模式可推算出所能转换的最大能量<sup>[10]</sup>,黏性损耗会对能量收集性能产生影响<sup>[11]</sup>。在国内,王化明等研究了偏置电压和拉伸位移及速度对 DEAP 发电机转换效率的影响<sup>[12]</sup>;林桂娟等通过实验装置平台对一次循环收集的电能进行测算<sup>[13]</sup>,并采用仿真及实验揭示应变与所收集能量之间的相关性<sup>[14]</sup>。相对于 DEAP 发电机,对 DEAP 驱动器机电能量转换效率的研究报道较少,Patrick 等构建线性黏弹性模型,结合 DEAP 材料的机电耦合特性,对标准条形驱动器在准静态周期激励下的能量转换效率、能量密度进行研究<sup>[15]</sup>;Bigue 等采用热力学描述驱动器机械功、能量消耗和效率问题,结合试验发现丙烯酸锥形驱动器在恒定电荷模式下实际效率极限为 26%,而硅树脂驱动器在恒电压模式时可达 18%<sup>[16]</sup>。研究人员还针对 DEAP 材料进

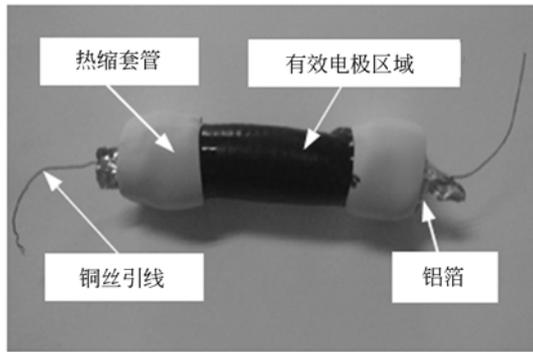
行机电能量转换时的损耗问题构造了耗散模型,用于预测其动态响应和电流泄漏特性<sup>[17]</sup>;揭示了 DEAP 发电机的两种耗散过程,讨论了频率、位移对机电能量转换效率的影响<sup>[18]</sup>。

在机电能量转换计算方面,Peirine 等<sup>[19]</sup>推导出不可压缩的电致伸缩材料的静压力公式, $p_{el} = \epsilon_0 \epsilon_r E^2$ ,该式在 DEAP 材料机电耦合计算中得到广泛应用,但研究发现其相对介电常数  $\epsilon_r$  受诸多因素影响。对本文驱动器采用的 DEAP 材料——VHB 膜(美国 3M 公司生产),一般研究表明  $\epsilon_r$  值约为 4.05~4.7<sup>[18, 20]</sup>,主要影响因素有 DEAP 材质、测试电极材料及制作方法,驱动器几何结构及 DEAP 膜预拉伸状态、松弛时间等也会对  $\epsilon_r$  的值产生影响<sup>[20-22]</sup>,需要根据实际情况加以测试和验证。分析 DEAP 驱动器机电转换效率可通过直接测量外负载、行程及相关电参数进行计算<sup>[16]</sup>。从电学角度,DEAP 驱动器可视为一个电容。实际在 DEAP 电极之间施加电场时会产生电流泄漏,漏电流模型可用一个理想电容并联一个大电阻来表示<sup>[15]</sup>。由于并联电阻阻值较大,可采用间接方法测量,但误差较大,该法一般在定性分析时采用;漏电流也可用经验公式<sup>[17-18]</sup>计算,该方法直接、方便,在试验分析中独具优势。

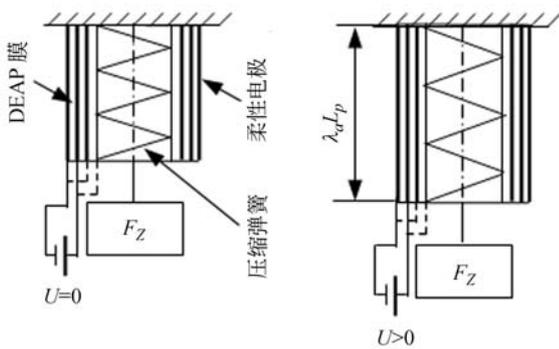
本文针对 DEAP 圆柱形驱动器驱动效率展开研究。构建了驱动器机电转换等效电路,测算了其电路参数;深入探讨了驱动器电流泄露问题,设计驱动器驱动试验台,对比分析了驱动器在不同电压激励下的机电能量转换效率,为 DEAP 圆柱形驱动器的设计及合理使用提供指导。

## 2 DEAP 圆柱形驱动器机电能量转换模型

DEAP 圆柱形驱动器<sup>[8]</sup>是由预拉伸的 DEAP 膜卷绕而成,膜表面涂有柔性电极,两端用端盖和热缩套管加以固定,如图 1(a)所示,预压缩弹簧起径向支撑并提供轴向预载荷。通过铜丝引线在柔性电极上接入、断开高压电源  $U$ ,则每层 DEAP 膜在静电压力的作用下产生轴向伸长、收缩,从而对轴向负载  $F_z$  做功。其中,  $L_p$  为驱动器有效电极长度,  $\lambda_{za}$  为轴向伸长率。



(a) 驱动器实物图  
(a) Photo of actuator



(b) 工作原理  
(b) Working principle of actuator  
图 1 圆柱形驱动器及其工作原理

Fig. 1 Cylindrical actuator and its working principle

研究 DEAP 圆柱形驱动器机电能量转换效率需首先建立其机电转换模型,结合材料特性可构造其机电转换模型,如图 2 所示,模型包括一维

机械力学模型及等效电路模型。

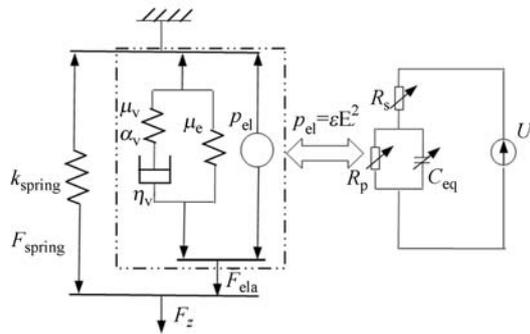
### 2.1 机械力学模型

驱动器所受的力包括弹簧回复力  $F_{spring}$ 、DEAP 膜弹性力  $F_{ela}$  及外载荷  $F_z$ ,如图 2(a)所示。

(1)  $F_{spring}$  是刚度为  $k_{spring}$  的压缩弹簧在驱动器变形过程中产生的轴向力。

(2)  $F_{ela}$  由 DEAP 膜的轴向松弛力以及静电压力构成。采用非线性弹簧和黏壶组成的黏超弹性模型可计算随时间变化的轴向弹性松弛力。经过机电耦合而成的静电压力为  $p_{el} = \epsilon E^2$ ,其中  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_r$  为 DEAP 膜的相对介电常数;  $E$  为所施加的电场强度。

(3)  $F_z$  为施加的外载荷,因为驱动器本身的质量较轻,可忽略其各构件及膜本身质量引起的惯性力。



(a) 机械力学模型 (b) 等效电路模型  
(a) Mechanical model (b) Equivalent circuit model

图 2 驱动器机电能量转换模型

Fig. 2 Electromechanical energy conversion model for the actuator

### 2.2 等效电路模型

作为介电质,DEAP 膜上涂敷电极后可视作电容。图 2(b)所示为 DEAP 驱动器等效电路模型,其参数随驱动器轴向伸长率  $\lambda_{za}$  变化,主要包括:

(1) DEAP 膜的相对介电常数  $\epsilon_r$ 。

(2) 可变等效电容  $C_{eq}$ ,其值取决于驱动器的结构及其变形。

(3) 可变并联电阻  $R_p$ ,该电阻与  $C_{eq}$  并联,用于表示其漏电流的大小。

(4) 可变串联电阻  $R_s$ ,其与  $R_p$ 、 $C_{eq}$  串联,等效代表柔性电极、电极引线及 DEAP 膜的表面电阻。

### 3 圆柱形驱动器等效电路模型参数

为提高分析精度,上述等效电路模型参数需要通过试验加以标定。

#### 3.1 DEAP 膜相对介电常数 $\epsilon_r$

一般采用测电容的方法对 DEAP 膜  $\epsilon_r$  进行间接测量。在图 3 中用玻璃纤维圆边框板固定经过(等轴)预拉伸的 DEAP 膜,再用 LCR 数字电桥(常州安柏 AT810)测量电容,数字电桥选用低频档(100 Hz),根据测量结果可计算 DEAP 膜的  $\epsilon_r$  值:

$$\epsilon_r = \frac{C_{eq} h}{A_{coat} \epsilon_0}, \quad (1)$$

式中:  $C_{eq}$  为测得的实际等效电容值;  $A_{coat}$  为电极面积;薄膜实际厚度为  $h = H/\lambda^2$ ,  $H$  为膜初始厚度(对 VHB4910,  $H = 1 \text{ mm}$ ),  $\lambda$  为其(等轴)预延伸率。

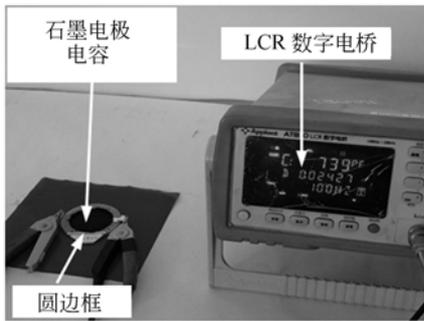


图 3 DEAP 膜介电常数测量

Fig. 3 Measurements of relative dielectric constant of DEAP membrane

将 VHB4910 膜进行预拉伸,根据(4 种)延伸率各制作样本 4 个,分别采用铝箔纸及石墨柔性电极制作电容(各 2 个)并对其电容值进行测量,按式(1)计算  $\epsilon_r$ ,结果如表 1 所示。

表 1 VHB4910 膜实测相对介电常数  $\epsilon_r$

Tab. 1 Measured relative dielectric constant  $\epsilon_r$  for VHB4910 membrane

电极材料	延伸率			
	1×1	2×2	3×3	4×4
铝箔纸电极	3.3~4.8	2.6~3.2	3.0~3.1	2.5~3.1
石墨电极	4.8~4.9	4.5~4.6	4.2~4.3	4.1

试验结果表明,由于采用刷涂方法,石墨柔性电极充分消除了电极与 DEAP 膜之间的气穴等空隙,测得的相对介电常数  $\epsilon_r$  比铝箔纸固体电极电容大,其值与文献资料较符合。

实际驱动器结构也会导致  $\epsilon_r$  的值不同<sup>[21]</sup>,为此特设计驱动器运动平台对施加不同激励电压的驱动器轴向力差  $\Delta F_z$  进行测量,从而计算  $\epsilon_r$ :

$$\Delta F_z = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 A_{tr}, \quad (2)$$

式中:  $A_{tr}$  为膜的横截面积。

根据试验结果,参照厂商技术文件中的参数值( $\epsilon_r = 3.21$ ),参考文献中结果<sup>[21]</sup>,在圆柱形驱动器的有关计算中宜取  $\epsilon_r = 3.24$ <sup>[23]</sup>。

#### 3.2 等效电容及串联电阻

圆柱形驱动器等效电容及串联电阻的测量是在自制运动平台上采用 LCR 数字电桥进行的,现场测试如图 4 所示。

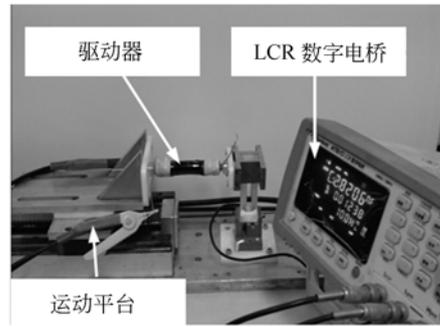


图 4 驱动器等效电路参数测量

Fig. 4 Measurements of equivalent circuit parameters of actuator

##### (1) 等效电容 $C_{eq}$

由于膜很薄,为简化计算,可参照平板电容公式来近似计算圆柱形驱动器等效电容,并根据试验结果进行修正:

$$C_{eq} = \epsilon \frac{A_{coat}^p}{H} (\lambda_1^p \lambda_2^p)^2 \lambda_{za}^2 = C_{eq}^p \lambda_{za}^2, \quad (3)$$

式中:  $A_{coat}^p$  为驱动器施加电压前电极有效覆盖部分面积,在此取涂敷电极重合部分面积;  $\lambda_1^p$ 、 $\lambda_2^p$  分别为膜的周向及轴向预延伸率;  $\lambda_{za}$  为驱动器轴向伸长率;  $C_{eq}^p$  为驱动器初始电容,在此采用实测值。

##### (2) 等效串联电阻 $R_s$

图 2 中等效串联电阻  $R_s$  包含柔性电极电阻及 DEAP 膜的表面电阻,可通过综合测量方法获得。给驱动器施加交变电压,根据测得的等效电容  $C_{eq}$  及介质损耗  $D_j$ ,再计算  $R_s$  的值,其关系式

为：

$$R_s = \frac{D_j}{2\pi f C_{eq}}, \quad (4)$$

式中： $f$  为检测电压频率。采用 LCR 数字电桥在低频、低压(120 Hz、0.3 V)下测等效电容  $C_{eq}$  及损耗  $D_j$ 。

由于驱动器实际工作行程不长，其等效串联电阻  $R_s$  随伸长率的变化可认为近似线性：

$$R_s = R_s^p + k_R (\lambda_m - 1), \quad (5)$$

式中： $R_s^p$  为初始串联电阻，按式(4)进行测算； $k_R$  为电阻系数，其值根据试验数据进行拟合计算。

### 4 圆柱形驱动器漏电流损耗

#### 4.1 DEAP 膜的漏电流模型

当在 DEAP 膜电极上施加激励电压时，在两电极之间会存在微小的漏电流。漏电流一般由电子、离子单独或同时传输形成，大小与内部所含杂质及空穴的数量有关，如图 5 所示。国外研究人员在试验中发现，电场强度影响漏电流：当电场强度小时，漏电流较小且随电场大小缓慢变化，漏电流与电场强度近似成线性关系；当电场强度超过一定值时，漏电流随电场增加而急剧增大，漏电流随电场近似呈指数规律变化<sup>[20,24]</sup>。

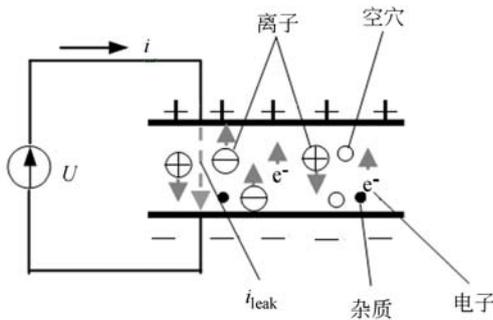


图 5 漏电流模型示意图

Fig. 5 Diagram of model for leakage current

则可将驱动器工作时的漏电流表示成如图 5 所示模型<sup>[17]</sup>，其导线上总电流可认为由三部分组成：

- (1) 电压变化产生的电容充、放电电流  $C_{eq} \dot{U}$ ；
- (2) 电容改变导致的电荷重新分配所需电流  $\dot{C}_{eq} U$ ；
- (3) 漏电流  $i_{leak}$ 。

导线上总电流  $i$  为：

$$i = C_{eq} \dot{U} + \dot{C}_{eq} U + i_{leak}, \quad (6)$$

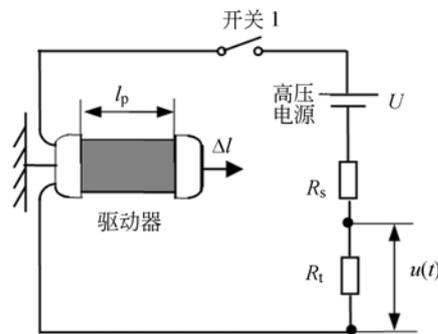
式中最后一项为漏电流，其值可根据经验公式近似计算。设单位面积上的漏电流密度为  $j_{leak}$ ，其与电场强度  $E$  存在如下关系<sup>[17-18]</sup>：

$$j_{leak} = \alpha_{C0} E \exp\left(\frac{E}{E_{B0}}\right), \quad (7)$$

式中： $\alpha_{C0}$  为低电场强度时的导电率； $E_{B0}$  为电场强度系数，与  $E$  有相同量纲。

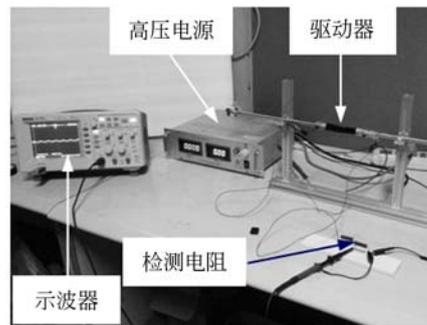
#### 4.2 驱动器漏电流试验

为使分析结果更接近实际，特对轴向静止状态下的驱动器进行漏电流测试，其原理及检测现



(a) 原理图

(a) Principle diagram of leakage current test



(b) 测试现场

(b) Photo of leakage current test

图 6 漏电流测试

Fig. 6 Leakage current test

场如图 6 所示。试验时首先对初始状态驱动器(见表 2)施加值为 0~3 200 V 的直流电压  $U$ ，间隔 200 V。通过测量检测电阻  $R_t$  (功率电阻，其值为 1 MΩ) 上的电压值即可计算流经驱动器的漏电流密度：

$$j_{leak} = \frac{i_{leak}}{A_{coat}} = \frac{U}{R_t A_{coat}}, \quad (8)$$

式中： $A_{coat}$  为电极导电面积，取上、下层膜涂敷电

极重叠面积,根据实测为  $A_{\text{coat}} \approx 13\,200\text{ mm}^2$ 。图 6 中功率电阻  $R_s = 10\text{ M}\Omega$  用作分压,起安全作用。

为方便分析,将驱动器轴向拉伸,使其有效电极长度伸长为 80 mm,再按上述方法测算漏电流密度。为防电击穿,其最高电压为 3 000 V。

图 7 所示为驱动器在初始及拉伸状态漏电流密度对照图,其漏电流测算数据是经过多次试验并剔除波动异常的试验值后取平均值获得。由于漏电流很小及测量精度等原因,两组测试数据的波动均较大。在总体趋势上,电压(电场)较低时,漏电流变化不明显;而在电压较高时,漏电流呈指数增加。

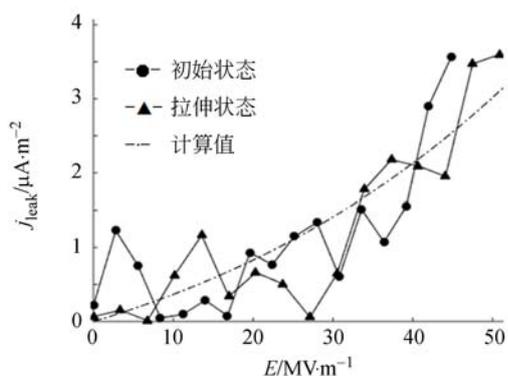


图 7 漏电流测试结果

Fig. 7 Test results of leakage current

漏电流密度则按式(7)进行计算,取  $\sigma_{c0} = 3.23 \times 10^{-14}\text{ S/m}$ ,结合实际将电场强度系数  $E_{B0}$  调整为 80 MV/m。图 7 中按经验公式计算出的漏电流变化趋势与实测结果较为吻合。

表 2 圆柱形驱动器主要参数值

Tab. 2 Main parameters of cylindrical actuators

项 目		数 值
DEAP 膜	周向预延伸率 $\lambda_p^c(-)$	4.5
	参数	轴向预延伸率 $\lambda_p^a(-)$
驱动器外形	驱动部分长度 $L_p(\text{mm})$	40/66*
	总长(mm)	80/106*
	刚度 $k_{\text{spring}}(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	0.12/0.07*
弹簧参数	外圈半径 $R_0(\text{mm})$	6/6.5*
	长度 $L_{\text{spring}}(\text{mm})$	100/128*
真空介电常数 $\epsilon_0/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$		$8.85 \times 10^{-12}$

注:带 \* 号驱动器用于漏电流试验

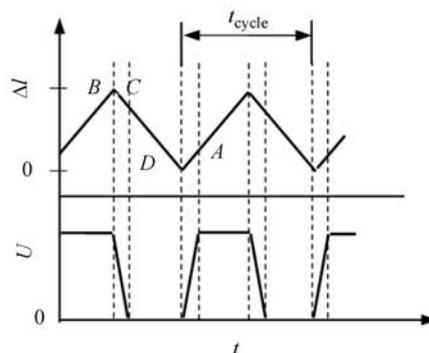
## 5 圆柱形驱动器驱动效率

圆柱形驱动器在激励电压作用下能产生轴向带载运动并做功,实现电能向机械能转换,其驱动效率可通过计算驱动器一个工作循环内机电能量转换效率来描述。

### 5.1 圆柱形驱动器能量流分析

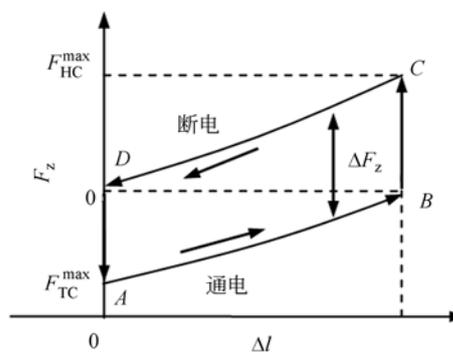
#### (1) 圆柱形驱动器工作循环

图 8 所示为典型的驱动器工作循环示意图,施加周期性的阶跃电压后驱动器通过等速往复运动实现对外负载做功。图 8(a)所示为驱动器电压-位移时序关系,  $t_{\text{cycle}}$  为周期;图 8(b)所示为其一个工作周期内的力-位移示意图。驱动器工作循环分为 4 个步骤:



(a) 电压-位移时序关系

(a) Timing sequence relationship of voltage and displacement



(b) 力-位移关系

(b) Relationship of force and displacement

图 8 圆柱形驱动器工作循环

Fig. 8 Work cycle of DEAP cylindrical actuator

1) 通电形成电场,见图 8 中点 D→A。驱动器施加激励电压形成电场,并在 DEAP 膜上产生静电压力,使驱动器在初始位置时产生最大推力  $F_{TC}^{\max}$ 。

2) 驱动器伸长,见图中点 A→B。驱动器轴向力差“推动”负载使其伸长,伸长过程中其轴向推力逐渐减小,至最大行程(B点)时轴向力重新达到平衡,其轴向推力减小为零。

3) 放电,见图中点 B→C。断开电源、短路驱动器 DEAP 膜上电极,快速释放其上电荷。这时,静电压力消失,驱动器在终点位置产生最大回程拉力  $F_{HC}^{\max}$ 。

4) 驱动器回缩,见图中点 C→D。DEAP 膜的弹性回复力大于弹簧力,驱动器“拉动”负载回缩,在 D 点达到力平衡,完成工作循环。

由图 8(b)可知,在一个工作周期内,驱动器能驱动的负载是变化的,其对负载所做的功实际上为 DEAP 膜通、断电后产生的力差  $\Delta F_z$  在工作行程上完成的机械功。

#### (2) 工作状态下的能量流

在能量转换方向上,圆柱形驱动器的输入、输出能量分别为电能和机械能。在恒电压驱动方式下,电源输出的电能  $W_{elec}$  为:

$$W_{elec} = \oint_{t_{cycle}} U i dt. \quad (9)$$

根据式(6),其电流  $i$  应包括电容改变导致的电荷重新分配所需电流  $\dot{C}_{eq} U$  及漏电流  $i_{leak}$ ,按式(3)可得理想电容变化时的总电流为:

$$i = \dot{C}_{eq} U + i_{leak} = 2UC_{eq}^p \lambda_{za} \dot{\lambda}_{za} + j_{leak} A_{coat}. \quad (10)$$

对于图 8 工作循环,在考虑漏电流时,恒压电源输出的电能包括电容上储存的电能及漏电流损耗的电能:

$$W_{elec} = \oint_{t_{cycle}} U i dt = U^2 \oint_{t_{cycle}} C_{eq}^p \lambda_{za}^2 + \oint_{t_{cycle}} U i_{leak} dt. \quad (11)$$

为减小理论分析误差,驱动器初始等效电容  $C_{eq}^p$  采用实测值。

驱动器输出的机械能为力差  $\Delta F_z$  在工作行程上做的功:

$$W_{mech} = \oint_{t_{cycle}} \Delta F_z d(\Delta l), \quad (12)$$

当驱动器在极低速度下进行上述循环时,可以忽略 DEAP 膜的黏性影响,此时(双层)膜力差  $\Delta F_z$  可认为仅由静电压力引起:

$$\Delta F_z = \epsilon E^2 A_{tr}. \quad (13)$$

高压电源输入电能中一部分被储存在等效电容中不能转化成机械能,在行程终点、驱动器回缩时需释放:

$$W_{cap} = \frac{1}{2} C_{eq}^p \lambda_{za}^2 U^2. \quad (14)$$

等效串联电阻上也会消耗部分电能

$$W_{Rs} = \oint_{t_{cycle}} i^2 R_s dt, \quad (15)$$

另外,由于驱动器在准静态条件下工作,可忽略其黏性损失  $W_{visc}$ 。根据能量守恒定律,输出能量与损耗能量之和应等于输入电能,即:

$$W_{elec} = W_{mech} + W_{leak} + W_{Rs} + W_{cap}. \quad (16)$$

定义驱动器每个工作循环中的机电转换效率  $\eta_{e-m}$  为驱动器输出的机械能  $W_{mech}$  与输入电能  $W_{elec}$  的比值:

$$\eta_{e-m} = W_{mech} / W_{elec}. \quad (17)$$

## 5.2 驱动效率试验

由于圆柱形驱动器制造时存在差异性,为提高分析精度,试验前需对其参数进行标定,测算其等效电路模型参数如表 3 所示。

表 3 驱动器等效电路参数

Tab. 3 Parameters of equivalent circuit of actuator			
项目	等效电容	等效串联电阻	电阻系数
	$C_{eq}^p$ (nF)	$R_s^p$ (kΩ)	$k_R$ (kΩ)
参数值	1.556	32.3	18.5

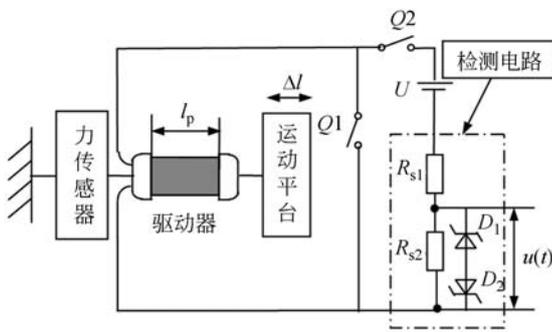
圆柱形驱动器驱动效率试验如图 9 所示,驱动器一端固定,另一端由运动平台驱动实现慢速往复运动,实现图 8 所示工作循环。图中电阻  $R_{s1}$ 、 $R_{s2}$  组成的检测电路用来检测驱动器工作过程中的电流,示波器检测  $R_{s2}$  上的电压  $u(t)$  并记录,通过简单计算即可获得电流值;稳压二极管  $D_1$ 、 $D_2$  用来限制最高电压,防止充、放电产生的高压对示波器造成损害;驱动器往复行程中的力由力传感器检测,并由电脑通过数据采集卡进行采集、存档。具体试验步骤为:

(1) 断开开关 Q1,闭合 Q2,DEAP 膜受电压作用使驱动器产生轴向推力。同时,在计算机程序控制下,运动平台以慢速(0.1 mm/s)产生轴向拉伸位移  $\Delta l$ 。在伸长过程中,推力对外负载做功。

(2) 到达行程终点后,断开开关 Q2,同时闭合 Q1,将 DEAP 膜正、负电极短接快速放电,DEAP 膜的拉力大于弹簧回复力,驱动器产生拉力。

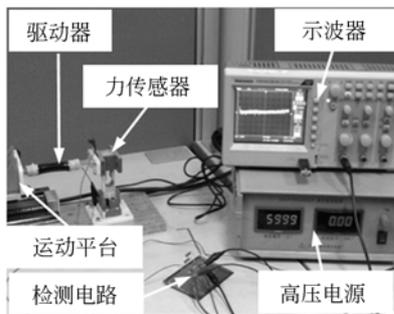
(3) 在断电状态下,驱动器“拖动”运动平台以反方向相同速度回缩至初始位置,完成一个工作循环,在回缩过程中拉力再次对外负载做功。

对驱动器(参数见表 2)进行不同电压驱动效率试验。试验前,首先根据选定的试验电压测试驱动器的实际轴向伸长,再参照此电压、位移值进行驱动效率试验,具体试验参数如表 4 所示。



(a) 原理图

(a) Principle diagram



(b) 检测现场

(b) Test site

图 9 圆柱形驱动器驱动效率测试

Fig. 9 Efficiency test for cylindrical actuator

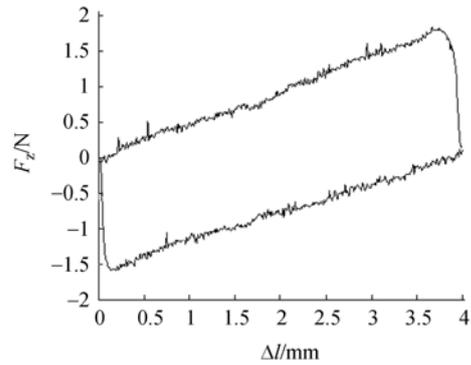
表 4 圆柱形驱动器试验参数

Tab. 4 Test parameters of cylindrical actuator

项目	速度 $v$ (mm/s)	位移 $\Delta l$ (mm)	采样频率 $f$ (Hz)	电压 $U$ (kV)
试验 1	0.1	4	10	4
试验 2	0.1	7	10	5

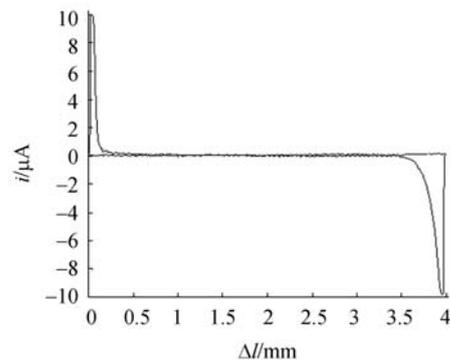
驱动器推、拉行程中检测的力及电流变化如

图 10、11 所示。在有限驱动范围内,驱动器轴向作用力  $F_z$  基本上与行程  $\Delta l$  呈线性变化,且施加电压越高,力、位移越大(见图 10(a)、11(a))。观察驱动器电流  $i$  变化情况(见图 10(b)、11(b))可知,由于在驱动推程、回程起始处存在电容充、放电过程,其驱动力变化有一过渡过程,而非突变。另外,由于  $U=5$  kV 时驱动器的实际位移略小于 7 mm,故在图 11(a)中在推行程的终点处,驱动器对运动平台呈现拉力。由于测量电路采取了安全限压措施,故在图 10(b)、11(b)中推程、回程起始处的充、放电最大电流被限制在  $10 \mu\text{A}$  左右。虽然 2 组试验推程速度相同,但在试验 2 中施加电压高、行程长,驱动器在推程中测得的电流要比试验 1 中测得的大,原因为受漏电流的影响。由于在检测电路中增加了限流电阻,故充、放电的时间比理论计算的长。另外,在推程终点、回程起点处电容增大,其放电时间比推程起点处的充电时



(a) 输出力

(a) Output force



(b) 检测电流

(b) Measured current

图 10  $U=4$  kV 时驱动试验结果

Fig. 10 Actuation experiment when  $U=4$  kV

间长得多,此部分电能储存在电容中并未参与做功,如想提高能量转换效率,可对此部分能量循环利用或进行收集、发电。

根据试验结果,可进行驱动器驱动效率计算。图 10(a)、11(a)中封闭曲线围成的面积可认为是驱动器输出的机械能,可采用数值方法计算。具体计算时取等间隔采样步长  $\Delta l_s$  与此段采样力差(回程力  $F_{HC}$  与推程力  $F_{TC}$  之差)乘积求和,当采样频率  $f$  与试验速度  $v$  确定后,则有:

$$W_{\text{mech}} = \sum \Delta F_z \times \Delta l_s = \sum (F_{HC} - F_{TC}) \times \frac{v}{f}. \quad (18)$$

而电源输出电能为图 10(b)、11(b)推程(单程)中电流  $i$  所做的电功,由采样间隔  $1/f$  与采样电流乘积求和获得:

$$W_{\text{elec}} = \sum \frac{U \times i}{f}. \quad (19)$$

$W_{\text{mech}}$ 、 $W_{\text{elec}}$  两者之比即可认为是驱动器的实际机电转换效率。根据上述分析结果可进行各能量计算,各项理论计算能量与试验结果对比如表 5 所示。分析表 5 结果,可得到如下结论:

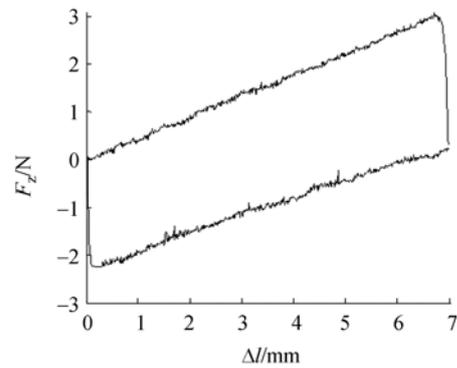
(1) 由于 DEAP 膜相对介电常数  $\epsilon_r$  进行了试验验证并修正,理论计算机械输出功与试验结果较为接近。联系在其他圆柱形驱动器中力差计算结果,说明在同样制作工艺条件下  $\epsilon_r = 3.24$  的取值合适。

(2) 等效串联电阻热损耗可忽略。虽然检测到的串联电阻阻值变化较大,但其热损耗在总输入能量中的占比较小,计算时可以忽略。

(3) 电容储存能量没转化成机械功。经计算,电容储存能量占总输入电能的 42.6% 及 46%。为快速获得大的回程拉力,驱动器电容储存能量断电后需及时释放,此部分电能可考虑循

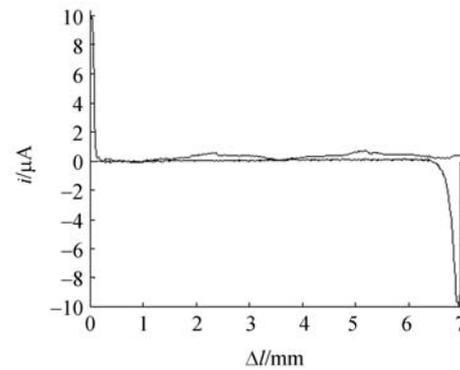
环利用。

(4) 漏电流损耗是影响驱动效率的重要因素。理论计算 2 组试验中漏电流损耗占总输入电能的比例为 8.09% 及 14.89%,由于漏电流在高电场工作条件时更明显,故在高电压、长行程应用场合,其对效率的影响不容忽视。



(a) 输出力

(a) Output force



(b) 电流

(b) Measured current

图 11  $U=5 \text{ kV}$  时驱动试验结果

Fig. 11 Actuation experiment when  $U=5 \text{ kV}$

表 5 驱动器驱动效率计算及试验结果对比

Tab. 5 Comparison of calculated and experimental actuation efficiency

项目	试验 1			试验 2		
	计算值	试验值	误差(%)	计算值	试验值	误差(%)
$W_{\text{mech}} (\text{N} \cdot \text{mm})$	5.77	6.61	14.56	16.18	17.49	8.10
$W_{\text{Rs}} (\text{mJ})$	$1.45 \times 10^{-5}$	/	/	$5.54 \times 10^{-5}$	/	/
$W_{\text{cap}} (\text{mJ})$	15.06	/	/	26.85	/	/
$W_{\text{peak}} (\text{mJ})$	2.65	/	/	9.40	/	/
$W_{\text{visc}} (\text{N} \cdot \text{mm})$	/	/	/	/	/	/
$W_{\text{elec}} (\text{mJ})$	32.78	32.81	0.09	63.14	131.95	108.98
$\eta_{\text{m}} (\%)$	17.61	20.15	14.42	25.64	13.26	-48.3

(5) 驱动器总机电效率不高。理论计算的机电效率为 17.6% 及 25.6%, 低电压驱动时的效率比高电压驱动的效率要略高。试验结果显示, 两种激励电压驱动的机电效率分别为 20.2% 及 13.3%, 导致高电压驱动试验效率低的主要原因是:

1) 根据前述漏电流试验结果可知, 在低电压驱动试验中几乎没有漏电流损耗, 而高电压驱动由于驱动时间长、电场强度高, 漏电流及其波动大。

2) 漏电流模型是根据经验公式拟合的, 由于驱动器制造的差异性, 导致其击穿电场强度的不同, 使得计算高电场工况下漏电流时存在一定误差。

3) 测量电路中的大电阻使驱动器充、放电电流减少, 其时间常数变大, 充、放电时间延长, 这会导致电能损耗增加。

4) 测量及随机误差等。

## 参考文献:

- [1] CARPI F, DE R D, KORNBLUH R, *et al.*. Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology[M]. Elsevier, 2011.
- [2] BAUER S, BAUER-GOGONEA S, GRAZ I, *et al.*. 25th anniversary article: a soft future: from robots and sensor skin to energy harvesters[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(1):149-162.
- [3] MORETTI G, FONTANA M, VERTECHY R. Parallelogram-shaped dielectric elastomer generators: Analytical model and experimental validation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(6): 740-751.
- [4] 张冬至, 童俊, 刘哲, 等. 基于电活性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2151-2158.
- ZHANG D ZH, TONG J, LIU ZH, *et al.*. Tactile sensing characteristics of electroactive polymer film based flexible devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2151-2158. (in Chinese)
- [5] SHIAN S, DIEBOLD R M, CLARKE D R. Tuna-

## 6 结 论

本文建立了圆柱形驱动器机电能量转换模型, 并对其等效电路模型参数进行测算、分析。通过试验验证了漏电流对驱动器性能的影响。虽然在激励电压(电场)较低时漏电流现象并不明显, 但在电压较高时, 漏电流较大, 用修正后经验公式计算的漏电流及其变化趋势与试验结果较吻合。驱动器准静态驱动试验分析表明, 由于等效电路电容未参与能量转换, 其驱动效率不高。理论计算的两种激励电压下驱动效率为 17.6% 及 25.6%, 实际为 20.2% 及 13.3%, 在低电压、小行程驱动时, 试验与理论分析结果吻合较好, 误差不超过 15%; 而在高电压、大行程驱动时, 漏电流会显著影响其机电转换效率, 而因测量、随机干扰等非线性误差导致效率降低的问题可作为后续研究课题。

ble lenses using transparent dielectric elastomer actuators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8669-8676.

- [6] 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 H L, WANG Y Q, SHENG J J, *et al.*. Research of electro-active polymer and its application in actuators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 205-214. (in Chinese)
- [7] PEI Q B, ROSENTHAL M, PELRINE R E, *et al.*. Multifunctional electroelastomer actuators and their application for biomimetic walking robots [C]. *Proc of SPIE Smart Structures and Materials*, 2003, 5051: 281-290.
- [8] KOVACS G, LOCHMATTER P, WISSLER M. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators[J]. *Smart Structures and Materials*, 2007, 16: 306-317.
- [9] LAU G K, LIM H T, TEO J Y, *et al.*. Lightweight mechanical amplifiers for rolled dielectric elastomer actuators and their integration with bio-inspired wing flappers [J]. *Smart Materials and*

- Structures*, 2014, 23(2): 025021.
- [10] KOH S J A, ZHAO X, SUO Z. Maximal energy that can be converted by a dielectric elastomer generator[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(26): 262902.
- [11] COLONNELLI S, SACCOMANDI G, ZURLO G. The role of material behavior in the performances of electroactive polymer energy harvesters[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2015, 53(18): 1303-1314.
- [12] WANG H, ZHU Y, WANG L, *et al.*. Experimental investigation on energy conversion for dielectric electroactive polymer generator [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(8): 885-895.
- [13] 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 基于电活性聚合物的微型发电机研究[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(11): 2409-2416.  
CHEN M, LIN G J, SONG D CH. Micro-power generator on dielectric electro active polymer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2413-2420. (in Chinese)
- [14] 林桂娟, 张欣波, 王克胜. 电活性聚合物发电机理[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(12): 3176-3182.  
LIN G J, ZHANG X B, WANG K SH. Mechanism on dielectric electroactive polymer generator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3176-3182. (in Chinese)
- [15] PATRICK L, GABOR K, SILVAIN M. Characterization of dielectric elastomer actuators based on a hyperelastic film model [J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 748-757.
- [16] BIGUE J P L, PLANTE J S. Experimental study of dielectric elastomer actuator energy conversion efficiency [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 169-177.
- [17] FOO C C, CAI S, KOH S J A, *et al.*. Model of dissipative dielectric elastomers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(3): 034102.
- [18] FOO C C, KOH S J A, KEPLINGER C, *et al.*. Performance of dissipative dielectric elastomer generators[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(9): 094107.
- [19] PELRINE R E, KORNBLUH R D, JOSEPH J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. *Sensors and Actuators*, 1998, 64: 77-85.
- [20] DI L L, SCHMIDT A, CARNELLI D A, *et al.*. Measurement of insulating and dielectric properties of acrylic elastomer membranes at high electric fields[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 024904.
- [21] WISSLER M, MAZZA E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators[J]. *Sensors and actuators A: Physical*, 2007, 138(2): 384-393.
- [22] QIANG J, CHEN H L, L B. Experimental study on the dielectric properties of polyacrylate dielectric elastomer [J]. *Smart materials and Structures*, 2012, 21(2): 025006(9pp).
- [23] 罗华安, 王化明, 游有鹏. 介电弹性体圆柱形驱动器机电耦合致动过程分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 44(6): 869-875.  
LUO H A, WANG H M, YOU Y P. Analysis of electromechanical coupling activation process of dielectric elastomer cylindrical actuator [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(6): 869-875. (in Chinese)
- [24] GISBY T A, XIE S Q, CALIUS E P, *et al.*. Leakage current as a predictor of failure in Dielectric Elastomer Actuators [C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7642(1): 764213-1-11.

## 作者简介:



罗华安(1968—),男,湖北武汉人,博士,副教授,2005年于西安科技大学获得硕士学位,2015年于南京航空航天大学获得博士学位。主要研究方向为智能材料及其应用研究。E-mail: luohuaan@163.com

## 导师简介:



王化明(1973—),男,江苏高邮人,博士,教授,2004年于南京航空航天大学获博士学位。主要研究方向为:软材料驱动与传感、弹跳机器人等。E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn