

文章编号 1004-924X(2018)07-1708-11

## 纯剪切模式介电弹性体发电机发电特性

鄂世举, 金建华, 曹建波\*, 蔡建程, 夏文俊

(浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:**为研究介电弹性体发电机的发电特性,基于 COMSOL 有限元软件建立了在纯剪切拉伸方式下的介电弹性体发电机有限元仿真机电耦合模型。该模型基于 Yeoh 超弹性材料本构,同时耦合发电机膜内静电力,根据可变电容理论对发电机电容变化及发电效果进行研究。设计了可 Y 向预拉伸的纯剪切拉伸装置,并在不同预拉伸条件下对发电机薄膜样本进行了拉伸实验,分析了其电容变化及发电效果。对比了仿真数据与实验结果,仿真模型的电容变化与实验测得的电容变化情况基本吻合,仿真模型一个周期内的输出电压变化与实验测得的电压变化基本吻合。实验及仿真结果表明,在相同的拉伸条件下,Y 向预拉伸增大了初始电容及电容变化速率,且当 Y 向预拉伸  $\lambda=1$  时的上升电压为 83 V,而  $\lambda=2$  时的上升电压达到 252 V,改善了发电性能。本文提出的介电弹性体发电机新的研究方法为发电机样机设计提供了新的思路。

**关键词:**有限元建模;纯剪切;Y 向预拉伸;机电特性

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182607.1708

## Power generation characteristics of dielectric elastomer generator under pure shear mode

E Shi-ju, JIN Jian-hua, CAO Jian-bo\*, CAI Jian-cheng, XIA Wen-jun

(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

\* Corresponding author, E-mail: caojianbo2008@163.com

**Abstract:** In order to study the power generation characteristics of a Dielectric Elastomer Generator (DEG), a Finite Element (FE) model of the DEG under pure shear mode was established in the COMSOL Multiphysics commercial package. The model was based on the Yeoh constitutive relation of hyperelastic materials, coupled with the electrostatic force inside the generator membrane. The capacitance variation of the generator and the effect of power generation were studied. A pure shear tension apparatus was designed such that the DEG can be pre-stretched in the Y direction. Experiments to study the DEG performance under different pre-stretching conditions were carried out, and the capacitance change and power generating effect were obtained. The simulation data and the experimental results were compared and good agreement was found, therefore proving that the FE model is reliable. This study shows that, under the same tensile conditions, pre-stretching in the Y direction increases the initial capacitance and the capacitance changing rate of the DEG membrane.

收稿日期:2017-08-21;修订日期:2017-10-09.

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(No. LY17E070001);浙江省基础公益研究项目工业项目资助(No. LGG18E070005);国家自然科学基金资助项目(No. 51377146, No. 51407162)

Hence, when the DEG was pre-stretched at  $\lambda=1$ , its rising voltage was 83 V, while at  $\lambda=2$ , its rising voltage was 252 V, thereby improving the power generation performance. The new research method of DEGs presented in this paper provides a new idea for the design of a generator prototype.

**Key words:** finite element modeling; pure shear; pre-stretching in Y direction; electromechanical characteristics

## 1 引言

电活性聚合物(Electroactive Polymer, EAP)是一种新型的功能性材料,可广泛应用于驱动器、传感器和发电领域<sup>[1-4]</sup>。介电弹性体(Dielectric Elastomer, DE)是EAP材料中最具代表性的一类,包括聚丙烯酸酯、硅橡胶及天然橡胶等,具有变形大、质量轻、能量密度高及柔顺性好等特点。从原理上,介电弹性体发电机(Dielectric Elastomer Generator, DEG)是一种具有“三明治”式三层结构的可变电容器,上、下两层是柔性电极,中间是介电弹性体。在施加偏置电压时,通过拉伸、收缩介电弹性体将施加的机械能转化为电能<sup>[5-6]</sup>。DEG的能量密度比其他传统发电机(压电、电磁发电机)至少高了一个数量级,并且机电转换效率在理论上高达80~90%,展现了DEG在发电领域广阔的前景<sup>[7]</sup>,可应用于人体的生物能,如鞋跟发电机、膝盖能量收集器,风能、海洋能发电等场合<sup>[8]</sup>。

利用有限元方法及相关软件,建立多种类型的仿真模型,是研究DEG性能的主要理论手段<sup>[9-10]</sup>,但有限元编程的复杂性大大增加了仿真研究的难度。COMSOL有限元软件可避免其他有限元软件复杂的编程工作,且在多物理场耦合方面功能强大。如Deodhar等<sup>[11]</sup>基于COMSOL软件对圆锥形介电弹性体驱动器进行了机电耦合特性的仿真,并将DE的超弹性和电极考虑其中。至今为止,针对DEG发电方面的有限元仿真研究仍较少。

形变方式对DEG的发电效果有着显著地影响<sup>[12]</sup>。薄膜型DEG的形变方式可分为平面内变形和平面外变形。平面内变形包括单轴拉伸、纯剪切拉伸、等双轴拉伸和菱形形变等<sup>[13-14]</sup>。平面外变形是对薄膜施加平面外的载荷使其造成平面

外的形变如圆锥型、球型等<sup>[15-17]</sup>。在对DEG的实验研究中,大多以平面内变形作为形变方式,其中单轴拉伸、纯剪切拉伸、等双轴拉伸方式最为典型。等双轴拉伸方式虽然能使DEG的形变量显著提高,进而提升发电量,但是在实际实验及应用中,等双轴拉伸方式的实现较为困难,其拉伸装置也较为复杂<sup>[18-19]</sup>。单轴拉伸方式最为简单,但发电效果较差。

预拉伸是指在施加研究载荷之前对薄膜进行的不同程度拉伸,以提升薄膜性能<sup>[20-21]</sup>。预拉伸的研究集中于介电弹性体驱动器(Dielectric Elastomer Actuator, DEA)方面,而对DEG方面的研究较少。

综合考虑DEG的形变及预拉伸对其性能的影响,本文在纯剪切模式下,在COMSOL有限元软件环境中建立了基于Yeoh超弹性材料本构的有限元模型,搭建实验平台并拟合获得了Yeoh超弹性材料参数,继而对DEG的力学特性和电学特性进行了研究。

## 2 理论模型

形变方式和预拉伸方式如图1所示,单轴拉伸方式是一端固定一端施加载荷,纯剪切拉伸方式是在单轴拉伸的基础上,两侧边施加辊支撑约束(限制Y轴方向位移),而等双轴拉伸方式是一端固定,其余三边施加相等的载荷。预拉伸主要有3种方式:图1(b)是仅X向预拉伸,预拉伸方向与之后的研究载荷方向一致,一般用于单轴拉伸方式;图1(c)是仅Y向预拉伸,预拉伸方向与之后的研究载荷方向垂直,一般用于纯剪切拉伸方式;图1(d)是X向和Y向共同的双向预拉伸,一般用于等双轴拉伸。本文主要针对第2种,对Y向预拉伸进行研究。

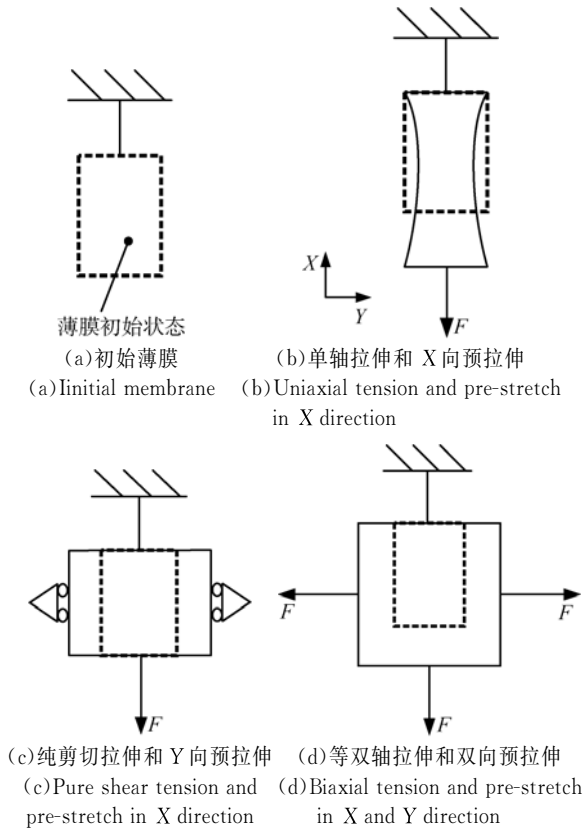


图 1 单轴、双轴、纯剪切拉伸及 3 种预拉伸形式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of uniaxial, biaxial, pure shear tension and three ways of pre-stretch

基于 DEG 的发电过程及机理, DEG 的模型是一种综合考虑其力学特性和电学特性的机电耦合模型。为简化模型,假定 DE 为理想弹性体,有以下几个假设<sup>[22]</sup>:不可压缩性;介电常数恒定;DE 为超弹性材料且不考虑粘弹性行为;各项同性。

### 2.1 DEG 力学模型

DE 是一种超弹性材料,而对于超弹性材料,材料中的能量(功)仅仅取决于变形的初始状态和最终状态,并独立于变形(载荷)路径,因而应变能函数是描述超弹性材料应力-应变本构关系的有效方式<sup>[23]</sup>。

超弹性本构模型包括 Neo-Hookean、Gent、Ogden 以及 Yeoh 等模型。这些超弹性本构模型由应变能密度  $W_S$  来定义,是左柯西应变张量不变量  $I_1, I_2, I_3$  的函数:  $W_S = W(I_1, I_2, I_3)$ 。上述超弹性模型中, Yeoh 计算量小,能准确地描述超弹性材料在大形变下的状态<sup>[24]</sup>,因而本文选用 Yeoh 对 DEG 进行建模。基于材料的不可压缩

性假设,其应变能密度  $W_S$  为:

$$W_S = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3, \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (2)$$

其中:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  是各方向的主拉伸率,  $C_{10}, C_{20}, C_{30}$  为材料参数,一般由实验数据拟合获得。

根据弹性力学理论,对于超弹性材料,其柯西主应力  $\delta_i$  由应变能对拉伸率  $\lambda_i$  求导给出:

$$\delta_i = \lambda_i \frac{\partial W_S}{\partial \lambda_i} - p \quad (i=1, 2, 3), \quad (3)$$

其中  $p$  是静水压力,由动力学边界条件给出。

依据纯剪切拉伸方式,则动力学边界条件以及各主拉伸率关系如下:

$$\delta_1 = \delta, \delta_2 \neq 0, \delta_3 = 0, \quad (4)$$

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = \lambda^{-1}. \quad (5)$$

根据推导得出,在纯剪切模式下基于 Yeoh 模型的 1 方向主应力:

$$\delta_1 = 2(\lambda^2 - \lambda^{-2}) [C_{10} + 2C_{20}(\lambda^2 + \lambda^{-2} - 2) + 3C_{30}(\lambda^2 + \lambda^{-2} - 2)^2]. \quad (6)$$

定义  $T$  为名义应力,在纯剪切模式下有名义应力与真实应力的关系:  $\delta_1 = \lambda T_1$ , 则:

$$T_1 = 2(\lambda - \lambda^{-3}) [C_{10} + 2C_{20}(\lambda^2 + \lambda^{-2} - 2) + 3C_{30}(\lambda^2 + \lambda^{-2} - 2)^2]. \quad (7)$$

下文中利用公式(7)来拟合实验测得的数据,从而获得 Yeoh 本构模型参数  $C_{10}, C_{20}, C_{30}$ 。

### 2.2 DEG 电学模型

基于可变电容原理建立 DEG 的电学模型。类比平行板电容器有:

$$Q = CU, C = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d}, \quad (8)$$

其中:  $Q$  是 DEG 两端电荷,  $C$  是可变电容,  $A$  是薄膜面积,  $d$  是薄膜厚度。  $\epsilon$  是相对介电常数,定为常数 4.7,  $\epsilon_0$  是真空介电常数,其值为  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m。

由式(8)可知,在相对介电常数恒定时,电容  $C$  仅与薄膜的面积和厚度有关。当薄膜拉伸时,面积变大,厚度减小,则  $C$  变大,相反当薄膜收缩时  $C$  减小。因而在拉伸过程中,电容  $C$  随着时间的变化而变化,是时间  $t$  的函数,可用  $C(t)$  来表示。

DEG 两端电压的变化源于电容的变化,而电容的变化源于外力引起薄膜几何形状(面积、厚度)的变化。即当外界施加的力改变时,便可造成 DEG 两端输出电压的变化。其中,电容作为机械

能到电能的中间环节,将 DEG 的力场与电场进行耦合。

如图 2 所示是经典 DEG 升压电路,由电源、二极管、电阻、DEG 模型组成。其中电源  $U_0$  作为偏置电压,其值为 1 000 V,  $u$  是 DEG 两端电压,  $i$  是电流,  $R$  是串联电阻,其值为 200 M $\Omega$ ,二极管的作用是当 DEG 两端电压  $u \geq U_0$  时,DEG 两端电荷不会返回到偏置电源。

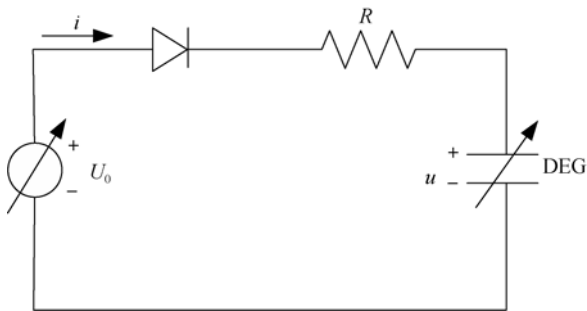


图 2 经典 DEG 升压电路

Fig. 2 Classic DEG energy harvesting circuit

因而当薄膜拉伸时,电源给 DEG 充电,电荷积聚在薄膜上下两面电极区域。当薄膜收缩时,二极管反向截止,DEG 两端的电荷  $Q$  保持不变,  $C$  减小的同时,电压  $u$  增大,从而达到升压发电的效果。电压变化的微分方程由下式表示:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = u \frac{dC}{dt} + C \frac{du}{dt}, \quad (9)$$

$$i = dQ/dt. \quad (10)$$

根据基尔霍夫电压定律,由图 2 电路得:

$$U_0 = iR + u. \quad (11)$$

综上,式(8)~(11)组成了 DEG 的电学模型。

### 3 仿真模型

根据上述理论模型,在 COMSOL Multiphysics 有限元环境中进行仿真研究。COMSOL 有限元软件以其强大的多物理场耦合特性而著称。利用软件中的预置模块:结构力学模块、AC/DC(静电)模块以及常微分和微分代数方程模块对 DEG 的机电耦合特性进行仿真。其中,结构力学模块用来定义 DEG 的超弹性本构、DEG 的力学边界约束、以及其在机电载荷下的形变;静电模块用来施加电学边界条件如偏置电压、表征 DEG 的电容、DEG 两端电压等电学特性。常微分和微分代数方程模块用来仿真拉伸收缩过程中 DEG 的发电效果,即输出电压的变化。

电效果,即输出电压的变化。

#### 3.1 几何模型及边界条件

定义 DEG 的几何模型尺寸的长和宽分别为 120 mm 和 80 mm,厚度为 0.5 mm,其中上、下表面各有一个的矩形暗色区域表征柔性电极,长和宽分别为 70 mm 和 50 mm,如图 3 所示。其中的中间矩形区域为 DEG 有效工作区域,用于施加偏置电压。因柔性电极对薄膜的力学影响较小,故本文不考虑电极的影响。

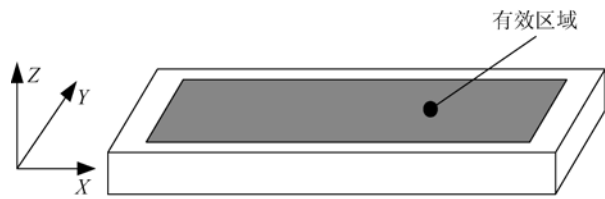


图 3 DEG 几何模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric model of DEG

模型在 X、Y、Z 3 个方向上都有约束或者变形,因而无法简化为 2D 模型。因模型两边对称,可简化求解,减少计算量。简化模型的俯视图及相关边界条件如图 4 所示。机械边界条件:模型的左端为固定约束,右端施加力载荷或者位移载荷,上下两边为辊支撑(限制 Y 轴位移)。静电边界条件:模型中间矩形区域的上、下表面施加电压(电荷)载荷,上表面施加正电压,下表面接地。

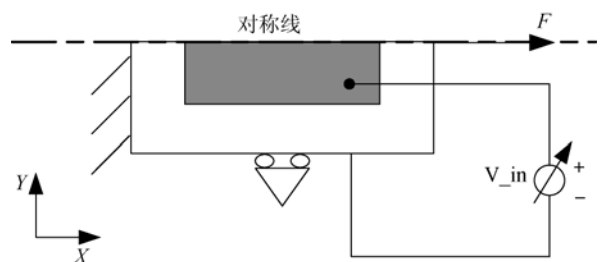


图 4 DEG 边界条件与约束示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DEG boundary conditions and constraints

#### 3.2 超弹性材料的赋予及 DEG 的 Maxwell 静电力的施加

在 COMSOL 优化模块中,基于式(7)并运用最小二乘法对拉力值进行非线性拟合,从而获得 Yeoh 超弹性本构模型参数  $C_{10}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{30}$ , 如表 1 所示。其中,在小变形的情况下,  $C_{10}$  代表初始剪

切模量;第 2 个系数  $C_{20}$  为负,在中等变形时可反映材料的软化现象;第 3 个系数  $C_{30}$  为正,在大变形的情况下又可描述材料的硬化现象<sup>[25]</sup>。

表 1 Yeoh 模型参数

Tab.1 Yeoh model parameters (MPa)

模型	参数		
Yeoh/MPa	$C_{10}$	$C_{20}$	$C_{30}$
	0.025 6	-6.84e-4	57.21e-6

COMSOL 的固体力学模块中有预置的超弹性材料本构模型,在选中的对应空间域直接输入 Yeoh 超弹性本构模型参数,从而赋予该域超弹性材料特性。

当 DEG 两端施加偏置电压时,膜内产生静电力,即 Maxwell 静电应力,其应力大小为<sup>[26]</sup>:

$$\sigma_M = -\epsilon\epsilon_0 E^2 = -\epsilon\epsilon_0 \frac{U^2}{d}, \quad (12)$$

其中: $\epsilon_0$  是真空介电常数, $\epsilon$  是相对介电常数, $U$  是偏置电压, $d$  是薄膜厚度。

在 COMSOL 仿真环境中,根据式(12)建立变量  $\sigma_M$ ,并将该变量  $\sigma_M$  作为机械载荷的形式施加于薄膜上下表面的有效区域,从而完成静电应力的施加,耦合于 DEG 仿真中<sup>[27]</sup>。

将上述应力  $\sigma_M$  在有效区域面积  $\pi$  内积分可得到静电力  $F_M$ ,有:

$$F = \iint_{\pi} \delta_M d.s. \quad (13)$$

### 3.3 网格划分

DEG 模型的大形变求解对网格要求比较高,若划分网格较粗使得计算无法收敛,若划分网格太细则会造成计算成本的提高。因而需找到较合适的网格密度和划分方案。仿真试验知:模型的固定端周围网格要求高,需细分。为避免对整个模型网格细分导致计算成本的提高,将模型划分成 4 个网格等级,如图 5 所示,越靠近固定端,网格越细。

为获得较合适的网格密度,对不同网格划分程度下的模型进行求解,对比范式等效应力,结果如表 2 所示。

由表 2 可知在求解自由度数为 22 827 时的网格划分是较合适的,与自由度增大到 70 449 时的应力相差较小,可在网格数较小的情况下,依然保证一定的准确度。因此,依据该网格划分进行后续的求解研究。

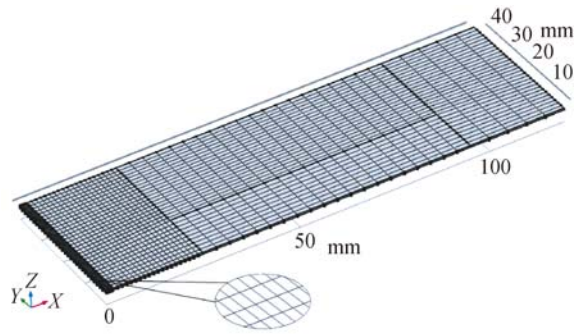


图 5 网格划分

Fig. 5 Finite element mesh

表 2 不同网格划分程度的应力值

Tab. 2 Stress value of different degree of meshes

求解自由度	20 635	22 827	28 307	70 449
应力/(N · m <sup>-2</sup> )	203 790	207 771	207 669	207 663

### 3.4 DEG 仿真过程

根据 DEG 的发电循环过程,主要有两次求解,有以下 COMSOL 机电仿真过程:

(1)添加固体力学模块和静电模块,对 Y 向预拉伸率  $\lambda$  分别为 1、1.5、2 的 DEG 进行几何建模,添加边界条件约束,同时施加静电力  $F_M$ ,施加位移载荷,稳态求解得到各个拉伸距离下的电容  $C$ ;

(2)利用 Origin 软件将仿真得到的电容进行非线性拟合,得到函数  $C(t)$ ;

(3)添加常微分和微分代数方程模块,将式(8)至(11)以及拟合出的函数  $C(t)$  输入到该模块进行微分方程建模,从而仿真 DEG 的发电效果。

DEG 机电仿真流程如图 6 所示。

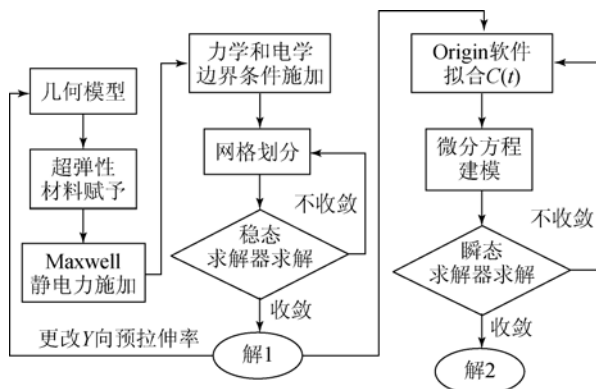


图 6 DEG 机电仿真流程图

Fig. 6 Flow chart of DEG electromechanical simulation

## 4 实验

根据上述仿真搭建实验平台。本文以 3M 公司的 VHB 4905 薄膜作为基质,将型号为 SD-001 的导电油脂涂覆于薄膜的上下两端作为电极,从而完成 DEG 样品的制备。设计了一种剪刀叉结构的纯剪切拉伸装置,可以进行 Y 向预拉伸。

实验内容包括力学和电学实验两部分:

(1)力学实验过程:使用力传感器和无纸记录仪测量并记录下薄膜在纯剪切拉伸方式下随拉伸距离变化所受到的拉力值。为消除薄膜的粘弹性影响,拉伸力数据须在极低的拉伸速率条件下采集,拉伸速率  $\dot{\lambda}=0.015\ 625\ \text{s}^{-1}$ [28]。由于采集过程中存在误差,采集过程及采集的数据需经过处理,方法如下:上述的纯剪切拉伸实验是在水平面上进行,拉伸装置的自身重量和摩擦力以及测力传感器的误差等都会使测量数据产生误差,影响数据采集的精度。为消除测量误差,选用尺寸相同的单层和双层膜作为试样进行多次拉伸实验来分析,并通过误差抵消原则获得最终数据。即将双层膜采集的数据  $D_1$  与单层膜采集的数据  $D_2$  相减,得到最终数据  $D$ ,从而消除误差的影响,提高测量精度。

(2)电学实验过程:使用型号是 HG2817E 的 LCR 数字电桥对 DEG 样品在纯剪切拉伸时的电容进行测量。拉伸距离分别利用光栅尺和光栅尺读数头进行测量和显示。在拉伸过程中使用摄像机进行拍摄,将电容值和拉伸距离的数据进行记录,便于后续的处理研究。将 DEG 样本进行 Y 向预拉伸( $\lambda=1, 1.5, 2$ ),重复测量。

升压效果实验是 DEG 产生电能的重要标志。将上述实验样本接入经典 DEG 升压电路中,施加 1 000 V 的偏置电压,接入高压探头,在拉伸距离为 150 mm,拉伸速率为 75 mm/s 下进行纯剪切拉伸升压实验,使用 Agilent DSO-X 2004A 型示波器读取电压值。将 DEG 进行 Y 向预拉伸( $\lambda=1, 1.5, 2$ ),重复测量。实验平台如图 7 所示。

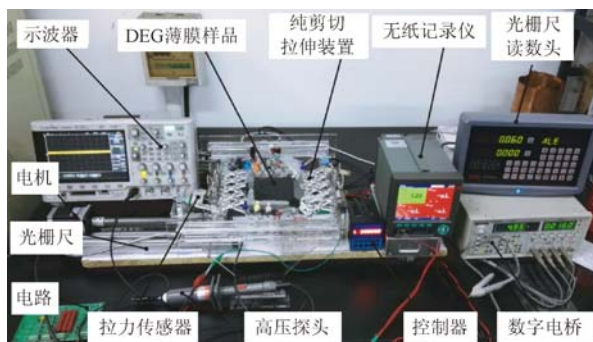


图 7 实验平台

Fig. 7 Experimental platform

## 5 仿真与实验结果

根据仿真和实验,对比研究仿真与实验结果,包括力学特性和电学特性两方面。

### 5.1 力学特性

实验数据处理后的拉力值随拉伸距离的关系如图 8 所示。由图可知,在实验测试中,拉伸的拉力与收缩时的拉力不重合,收缩时拉力有滞后性,体现了 DE 的粘弹性。将上述本构模型参数输入到 COMSOL 力学模块,得到的拉力值随拉伸距离关系如图 8 所示,仿真值和实验值基本吻合。

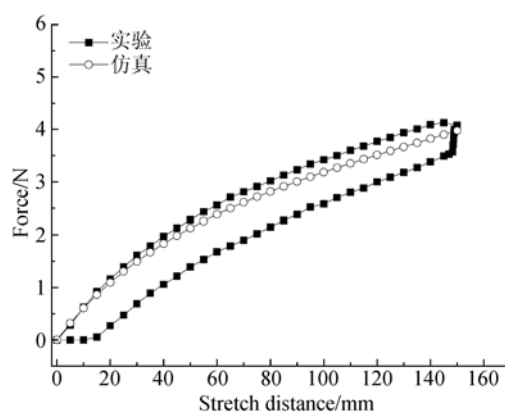


图 8 拉力与拉伸距离关系

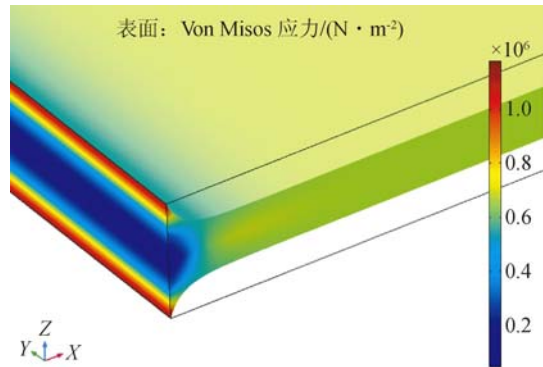
Fig. 8 Relation between force and stretch distance

Maxwell 静电力在实验中难以测出,可利用式(12)(13)在 COMSOL 软件中仿真得出。通过仿真求解薄膜的形变,进而根据公式求解静电力。在 1 000 V 恒定偏置电压下,  $F_M$  随拉伸距离的变化如图 9 所示。由图可知,当拉伸距离为 150 mm

时,静电力只有 1.6 N。将静电力施加于薄膜两侧有效区域,通过仿真分析,求解出该作用力对薄膜形变影响很小,因而对电容影响较小。而 DEG 的发电原理在于可变电容,故得出当电压较低,形变倍率较小时,静电力对 DEG 影响较小。

在 DEG 建模过程中,将  $F_M$  作为力学边界施加于薄膜两边有效区域来耦合静电力。

简化后模型可经过三维镜像得到整个薄膜模型图。图 10 是在 DEG 拉伸至 150 mm 时的范式等效应力云图。由图 10(a)可以看出 DEG 各个部分所受的应力大小相同,体现了材料的各项同性。图 10(b)为薄膜固定约束端的应力分布放大图。可以发现薄膜拉伸时厚度均匀变化,固定约束端的上下边界处产生应力集中现象,其应力最大。



(b)固定端范式等效应力放大云图

(b) Von mises stress cloud diagrams of fixed end

图 10 DEG 范式等效应力云图

Fig. 10 Von mises stress cloud diagrams of DEG

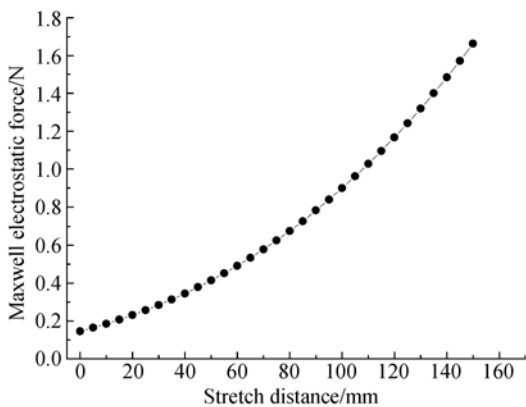


图 9 Maxwell 静电力与拉伸距离关系

Fig. 9 Graph of relation between Maxwell electrostatic force and stretch distance

### 5.2 电学特性

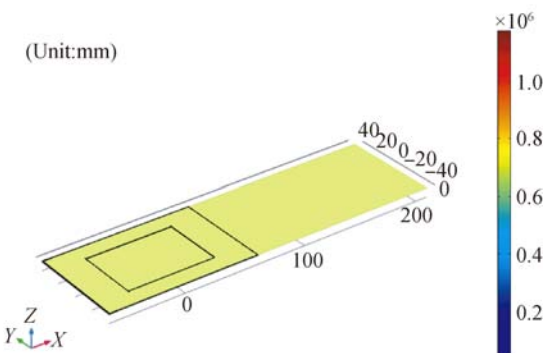
DEG 两端电压的变化源于电容的变化,最终源于几何形状(面积和厚度)的改变。当外界施加的力改变时,便可造成输出电压的变化,即通过电容将 DEG 电场与力场进行耦合。

图 11 是在 Y 向预拉伸  $\lambda=1, 1.5, 2$  时的电容仿真与实验数据对比,仿真与实验基本吻合。由图可知,当  $\lambda=1$  时,仿真与实验数据吻合程度高,而  $\lambda=1.5, 2$  时,仿真与实验数据基本吻合,但随拉伸距离的增大,实验与仿真数据差距变大。分析原因有以下 3 方面:实际实验条件下,薄膜的几何变形与理想的纯剪切变形存在一定差异;仿真时是设定相对介电常数  $\epsilon$  不随薄膜形变而变化,而实际  $\epsilon$  随薄膜的拉伸逐渐变小,具体数据如表 3 所示;当薄膜在大变形情况下,初始涂覆的电极产生不均匀变化,甚至出现缝隙,导致电容增长速率变缓,造成误差。

表 3 预拉伸率与介电常数的关系<sup>[29]</sup>

Tab. 3 Relationship between pre-stretching rate and dielectric constant

预拉伸率	1×1	2×2	3×3	4×4
介电常数	4.68	3.71	3.34	2.62



(a)DEG 拉伸 150 mm 时范式等效应力云图

(a) Stress cloud diagrams of DEG Stretched at 150 mm

Y 向预拉伸可使 DEG 初始电容显著增大,且随拉伸距离的变化速率也增加。其中,电容变化

速率可由电容对拉伸距离求导得出,推导有:

$$C'_Y = \lambda^2 C' (\lambda \geq 1), \quad (14)$$

其中:  $C'_Y$  是预拉伸之后的电容变化速率,  $C'$  是未预拉伸的电容变化速率,两者是  $\lambda^2$  倍的关系。

Y 向预拉伸使得初始电容和电容的变化速率增大,提高了薄膜存储电荷的能力,改善了 DEG 的发电性能。

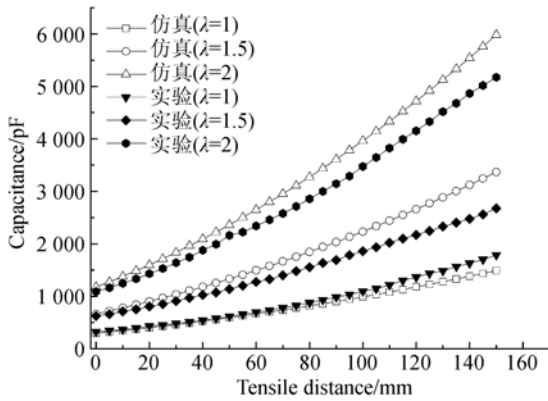


图 11 电容与拉伸距离的关系

Fig. 11 Diagrams of relationship between capacitance and tensile distance

利用 Origin 软件对  $\lambda=1$  时的仿真电容数据进行非线性拟合,得到  $\lambda=1$  时的电容随时间变化的函数:

$$C(t) = 17.02 + \left[ \frac{6\,543.21}{4(t-2)^2 + 4.80} \right]. \quad (15)$$

电容拟合图如图 12 所示。拟合曲线除尖端外,其余部分拟合较好。

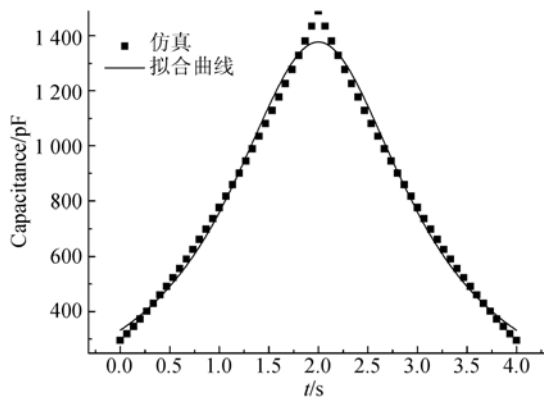


图 12 电容拟合图

Fig. 12 Capacitance fitting diagram

将拟合得到的函数  $C(t)$  和所构建的电学模型输入到 COMSOL 的常微分和微分代数方程模块进行微分方程建模,得到  $\lambda=1$  时的一个周期 DEG 两端的电压变化情况,如图 13 所示。

在纯剪切模式下,Y 向预拉伸分别为  $\lambda=1$ 、1.5、2 时,偏置电压为 1 000 V,拉伸距离为 150 mm,拉伸速度为 75 mm/s 的实验条件下对薄膜进行的拉伸收缩,得到一个周期 DEG 两端电压变化情况,如图 13 所示。

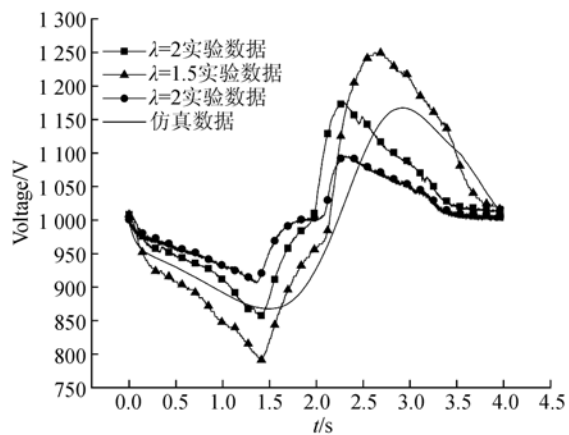


图 13 一个周期内电压变化仿真实验对比图

Fig. 13 Simulation and experimental compared diagram of voltage variation in one cycle

对比实验与仿真的电压变化数据,两者变化趋势相同,数据基本吻合。拉伸时电压先下降后上升,原因是初始拉伸阶段电荷补充的速率小于电容的变化。而到 1.5 s 左右时电荷补充速率大于电容变化,从而将 DEG 两端电压逐渐恢复到初始电压。当薄膜收缩时,电压迅速上升,到某一高值之后,电荷迅速被消耗,电压恢复到初始位置。对比  $\lambda=1$  时的一个周期 DEG 两端的电压变化情况,仿真的升压效果较好,原因在于实验研究时 DEG 两端的电极电阻大,电荷损耗高,且存在粘弹性损耗。对比前期研究<sup>[30]</sup>可得,本文采用的纯剪切模式比单轴拉伸发电效果好。由图 13 可得,当 Y 向预拉伸  $\lambda=1$  时的上升电压为 83 V,而  $\lambda=2$  时的上升电压达到 252 V,从而使 DEG 获得更高的电压,改善其发电性能。

## 6 结 论

本文利用 COMSOL 有限元软件对 DEG 进行了机电耦合建模和仿真,并结合实验平台研究了其纯剪切模式下的力学特性和电学特性,得出以下结论:

力学实验数据与仿真得到的数据基本吻合,随着拉伸距离的增大,拉力的增长趋势变缓,符合 DE 材料的软化特性,验证了所拟合的 Yeoh 超弹性本构模型参数的准确性。通过建立 Maxwell 静电应力  $\sigma_M$ ,仿真了在 1 000 V 恒定偏置电压和纯剪切模式下的 Maxwell 静电力,得出当拉伸距离为 150 mm 时,静电力只有 1.6 N。因而当电压较低,形变倍率较小时,静电力对 DEG 影响较小。对比仿真和实验的电容变化,Y 向预拉伸  $\lambda=1$  时吻合度较高,而  $\lambda=1.5, 2$  时,随预拉伸距离的增大,实验与仿真数据的差距变大。分析得

出以下 3 方面原因:实际实验条件下,薄膜的几何变形与理想的纯剪切变形存在一定差异。仿真时是设定相对介电常数  $\epsilon$  不随薄膜形变而变化,而实际  $\epsilon$  随薄膜的拉伸逐渐变小。当薄膜在大变形情况下,初始涂覆的电极产生不均匀问题,甚至出现缝隙,导致电容增长速率变缓,造成误差。Y 向预拉伸可使得 DEG 初始电容变大的同时,电容的变化速率也增大。初始电容的增大提高了薄膜上电荷的存储能力,而电容变化速率增大可提高 DEG 的发电性能,升压实验验证了这一点:当 Y 向预拉伸  $\lambda=1$  时的上升电压为 83 V,而  $\lambda=2$  时的上升电压达到 252 V,因而预拉伸率  $\lambda$  越大时,DEG 的升压效果越明显,得出 Y 向预拉伸可改善 DEG 发电性能的结果。

本文在 COMSOL 有限元环境下对 DEG 进行了机电耦合仿真,并简化了编程工作的复杂性,为发电机样机设计提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 罗华安,王化明,朱银龙,等. 介电型电活性聚合物圆柱形驱动器的驱动效率[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1980-1990.  
LUO H A, HUANG H M, ZHU Y L, *et al.*. Actuation efficiency of dielectric electroactive polymer cylindrical actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1980-1990. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 陈明,林桂娟,宋德朝. 电活性聚合物微型发电机[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2413-2420.  
CHEN M, LIN G J, SONG D CH. Micro-power generator on dielectric electroactive polymer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2413-2420. (in Chinese)
- [4] 林桂娟,张欣波,王克胜. 电活性聚合物发电机机理[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): 3176-2182. (in Chinese)
- [5] CHU B, ZHOU X, REN K, *et al.*. A dielectric polymer with high electric energy density and fast discharge speed [J]. *Science*, 2006, 313(5785): 334-6.
- [6] KORNBLUH D, PELRINE R, PRAHLAD H, *et al.*. Dielectric elastomers: stretching the capabilities of energy harvesting [J]. *Mrs Bulletin*, 2012, 37(3): 246-253.
- [7] KORNBLUH D, PEI Q. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2001, 4329: 148-156.
- [8] KORNBLUH D, PELRINE R, PRAHLAD H, *et al.*. From boots to buoys: promises and challenges of dielectric elastomer energy harvesting [J]. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 2011, 7976(10): 67-93.
- [9] SUO Z G. Theory of dielectric elastomers [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 549-578.
- [10] QU S X, SUO Z G. A finite element method for dielectric elastomer transducers [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(5): 459-466.
- [11] DEODHAR A, YORK A, HODGINS M, *et al.*. Fi-

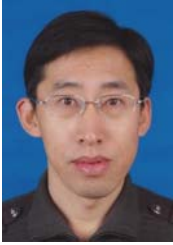
- nite element modeling of electromechanical behavior of a dielectric electroactive polymer actuator [J]. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 2011, 7978(3): 80-86.
- [12] HUANG J, SHIAN S, SUO Z, *et al.*. Maximizing the energy density of dielectric elastomer generators using equi-biaxial loading [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(40): 5056-5061.
- [13] WANG Y, ZHOU J X, WU X H, *et al.*. Energy diagrams of dielectric elastomer generators under different types of deformation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(6): 066103.
- [14] MORETTI G, FONTANA M, VERTECHY R. Modeling and control of lozenge-shaped dielectric elastomer generators [C]. *ASME 2013 Conference on Smart Materials*. Snowbird, U. S. A: Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2013, V001T03A039.
- [15] LEE H, BASULI U, LYU M, *et al.*. Fabrication and performance of a donut-shaped generator based on dielectric elastomer [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(7): 2113-2124.
- [16] BORTOT E, GEI M. Harvesting energy with load-driven dielectric elastomer annular membranes deforming out-of-plane [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, 5: 62-73.
- [17] KALTSEIS R, KEPLINGER C, BAUMGARTNER R, *et al.*. Method for measuring energy generation and efficiency of dielectric elastomer generators [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 162904.1-162904.3.
- [18] FONTANA M, MORETTI G, LENZO B, *et al.*. Loading system mechanism for dielectric elastomer generators with equi-biaxial state of deformation [J]. *SPIE*, 2014, 9056: 90561F-90561F.
- [19] SHIAN S, SUO Z. Dielectric elastomer generator with equi-biaxial mechanical loading for energy harvesting [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8687(1): 86870Q.
- [20] LIANG J, BETTS A, KENNEDY D, *et al.*. Investigation into the electromechanical properties of dielectric elastomers subjected to pre-stressing [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2015, 49: 754-760.
- [21] 施江吉,孙文杰,马梓淇,等. 预拉伸对介电弹性体复合材料介电性能和驱动性能的影响研究[J]. *绝缘材料*, 2016(9): 66-71.
- SHI J J, SUN W J, MA X Q, *et al.*. Influence of pre-stretch on dielectric property and actuating properties of dielectric elastomer composite [J]. *Insulating Material*, 2016(9): 66-71. (in Chinese)
- [22] WISSLER M, MAZZA E. Modeling of a pre-stretched circular actuator made of dielectric elastomers [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2005, 120(1): 184-192.
- [23] 罗华安,王化明,游有鹏. 超弹性膜的等轴拉伸试验方法及仿真[J]. *华南理工大学学报*, 2011, 39(4): 56-61.
- LUO H A, WANG H M, YOU Y P. Equi-biaxial tensile test method and Simulation of hyperelastic membrane [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(4): 56-61. (in Chinese)
- [24] YEOH H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates [J]. *Rubber chemistry and technology*, 1990, 63(5): 792-805.
- [25] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. *橡胶工业*, 2014, 61(8): 453-457.
- YAN SH, WANG W. Determination of material parameters in hyperelastic constitutive model of rubber [J]. *Rubber Industry*, 2014, 61(8): 453-457. (in Chinese)
- [26] PELRINE E, KORNBLUH D, JOSEPH P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1998, 64(64): 77-85.
- [27] DEODHAR A, YORK A, HODGINS M, *et al.*. Finite element modeling of electromechanical behavior of a dielectric electroactive polymer actuator [J]. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*, 2011, 7978(3): 80-86.
- [28] LUO H A, WANG H M, YOU Y P, *et al.*. Characterization of hyperelastic dielectric elastomer based on biaxial tensile bench [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97-101: 884-888.
- [29] WISSLER M, MAZZA E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2007, 138(2): 384-393.
- [30] 曹建波,葛彩军,鄂世举,等. 基于 Neo-Hookeen

的介电弹性体单轴拉伸发电特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 389-394.

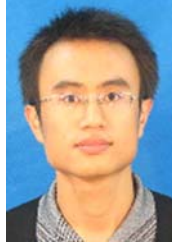
CAO J B, GE C J, E SH J, *et al.*. Power generating

characteristics of uniaxial tensile for DEG based on neo-hooken model[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 389-394. (in Chinese)

作者简介:



鄂世举(1970—),男,吉林长春人,博士,教授,硕士生导师,1994年、2000年、2003年于吉林工业大学机械系分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事新型功能材料应用技术及机电装备技术的研究。E-mail: 276828373@qq.com



曹建波(1980—),男,山东潍坊人,博士,副教授,硕士生导师,2008年于西安交通大学机械工程学院获得博士学位,主要从事介电弹性体发电技术和机电系统节能技术的研究。E-mail: caojianbo2008@163.com