

基于 Neo - Hooken 的介电弹性体单轴拉伸发电特性研究

曹建波 葛彩军 鄂世举 刘爱飞 金丽丽 江孝琪

(浙江师范大学工学院, 金华 321000)

摘要: 为研究介电弹性体发电机(DEG)在单轴拉伸下的发电特性,结合 Neo - Hooken 模型建立了 DEG 在单轴拉伸下的机电耦合数学模型,运用 Matlab/Simulink 软件建立了 DEG 的单轴发电仿真模型,对 DEG 的发电过程及拉伸力、拉伸率、初始电压与电势差之间的关系进行了仿真研究,通过搭建 DEG 发电测试试验台,进行了试验研究并与仿真结果进行对比。仿真和试验结果表明在单轴拉伸收缩发电过程中,DEG 两端电压先降后升;在初始拉伸时和即将拉伸至最大时电压有两个突变点;电势差随着初始电压、拉伸力的增加而近似线性增加。

关键词: 介电弹性体发电机; 单轴拉伸; 发电机理; 机电耦合模型

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0389-06

Power Generating Characteristics of Uniaxial Tensile for DEG Based on Neo - Hooken Model

Cao Jianbo Ge Caijun E Shiju Liu Aifei Jin Lili Jiang Xiaoqi

(College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, China)

Abstract: To study the power generation characteristics of elastomer under uniaxial tensile situation, the mathematical model of dielectric elastomers under uniaxial tensile was established based on Neo - Hooken model, and the corresponding simulation model was set up in Matlab/Simulink environment. The relationships among applied force, stretch rate, initial voltage, and power generation were studied by using the simulation model; the results were compared to the experimental results, and a good agreement was found. Both simulation and experiment results showed that the generating capacity of dielectric elastomer in the power generation process was increased as the applied force, stretch rate, and initial voltage increased. Simulation results were compared with test results, and the main reason was analyzed that the experimental results were lower than the simulation ones: internal resistance of DEG, systemic obstruction, voltage loss of electronic components, measurement error and so on. The experimental results and research conclusions provide a way for later period job of DEG generator, and this study provides the basis for a further study of the power generation by dielectric elastomers, which has good practical value.

Key words: dielectric elastomer generator; uniaxial tensile; power generation mechanism; electromechanical coupling model

引言

介电弹性体发电机(Dielectric elastomer generator, DEG)是一种基于可变电容原理的新型微

发电机^[1],其三层式构造的中间层为介电弹性体材料(DE)。作为一种新型智能材料,DE具有超大变形、高理论比能量密度、高效率、超短反应时间及高疲劳寿命等特点^[2-4]。众多研究表明,DE既是一种

收稿日期: 2015-06-23 修回日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377146、51407162)和浙江省自然科学基金项目(LQ13E050009)

作者简介: 曹建波(1980—),男,副教授,主要从事新型功能材料发电技术研究,E-mail: caojianbo2008@163.com

通信作者: 鄂世举(1970—),男,教授,主要从事新型功能材料发电技术、节能技术研究,E-mail: esx_2001@zjnu.cn

良好的仿生驱动材料^[5-7],也可逆向应用于发电领域,可以用来构造形式多样、成本低廉的新型发电机,在可再生能源发电及微机电系统等领域将具有广阔的应用前景^[8-11]。国内外学者对 DEG 发电特性展开了相关研究^[1,12-14],但大多只给出了 DEG 的单轴、双轴拉伸力学模型,未与电学模型相结合,且推导过程较为简略,未对所得模型进行试验验证。

为掌握 DEG 的机械性能,通常要求其应变能密度函数 W 。目前有多种模型被用来描述应变能密度函数 W ,如 Neo-Hookean 模型、Yeoh 模型、Ogden 模型和 Mooney-Rivlin 模型等^[15]。相比之下,Neo-Hookean 模型可以简单有效地描述聚合物橡胶的应力应变关系^[10],该模型认为聚合物橡胶与液体类似^[16-18],且聚合物橡胶的弹性行为不受变形的影响。

本文利用 Neo-Hookean 模型建立 DEG 在单轴拉伸下的机电耦合数学模型,利用 Matlab/Simulink 仿真工具,研究 DEG 的发电机理,并对拉伸力、拉伸率、初始电压等影响因素进行定量分析,同时通过试验研究验证仿真模型。

1 单轴拉伸分析与数学建模

1.1 力学模型

DEG 单轴拉伸,即在一个方向上施加拉伸作用力,使 DEG 中的高分子链沿一个方向进行取向排列,如图 1 所示。

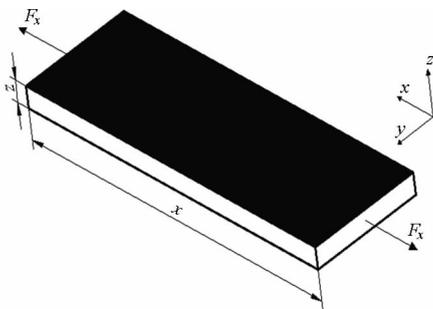


图 1 单轴拉伸示意图

Fig. 1 Schematic of uniaxial stretching

在 x 方向对 DEG 施加力后,DEG 就会被拉伸。设 DEG 的初始尺寸为 x_0, y_0, z_0 ,单轴拉伸后尺寸为 x, y, z ,定义 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为 x, y, z 方向上的拉伸率,则有

$$\begin{cases} \lambda_x = \frac{x}{x_0} \\ \lambda_y = \frac{y}{y_0} \\ \lambda_z = \frac{z}{z_0} \end{cases} \quad (1)$$

本文认为 DEG 在拉伸过程中体积保持恒定,则

有

$$\begin{cases} x_0 y_0 z_0 = xyz \\ \lambda_x \lambda_y \lambda_z = 1 \end{cases} \quad (2)$$

由于 y 方向变形较难分析,根据体积恒定,有

$$\lambda_y = \frac{1}{\lambda_x \lambda_z} \quad (3)$$

所以,DEG 在单轴拉伸后的实际尺寸可以表示为

$$\begin{cases} x = x \\ y = x_0 y_0 z_0 x^{-1} z^{-1} \\ z = z \end{cases} \quad (4)$$

根据 Neo-Hookean 模型,应变能函数可以表示成

$$W = \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (5)$$

其中

$$\mu = Y/3$$

式中 W ——应变能 μ ——材料剪切模量

Y ——弹性模量

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——弹性体 3 个方向上的相对拉伸变形率

x 方向上的应变能可表示为

$$W = \frac{\mu}{2} \left(\lambda_x^2 + \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} + \lambda_z^2 - 3 \right) \quad (6)$$

对于一个完全不可压缩的材料,其主应力 σ_i 由应变能相对拉伸比率 λ_i 求导给出,即

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad (7)$$

式中 σ_i —— i 方向的应力

p ——静水压力,取决于动力学的边界条件

这里 p 取值为 0,所以有

$$\sigma_x = \mu \left(\lambda_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} \right) \quad (8)$$

对 DEG 沿 x 轴进行受力分析,根据牛顿第二定律可得

$$F_x - F_f - yz\sigma_x = ma \quad (9)$$

式中 F_x —— x 方向上施加的外界拉力

F_f ——DEG 所受阻力

m ——DEG 质量 a ——加速度

根据公式(4)和公式(9)可得

$$F_x - d_v \dot{x} - \frac{\mu x_0 y_0 z_0}{x} \left(\lambda_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} \right) = m \ddot{x} \quad (10)$$

式中 d_v ——阻尼系数

运用类似方法, z 方向的应力可表示为

$$\sigma_z = \mu \left(\lambda_z^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} \right) \quad (11)$$

在 z 方向上运用牛顿第二定律可得



图4 DEG 试验材料

Fig. 4 Experimental materials of DEG

根据 DEG 的发电原理,建立了 DEG 发电机的试验装置。如图 5 所示,试验装置主要包括 4 部分:①初始电压模块,采用精密高压直流电源,提供稳定的直流高压输出。②试验材料模块。③测试模块,主要由拉力传感器、虚拟仪器试验测试平台、电容测试仪、电流表等组成,采集试验过程中的各项参数。④驱动模块,主要部件为电动伺服缸,可将电动伺服缸产生的直线推力转换为 DEG 试验材料两端的拉力。

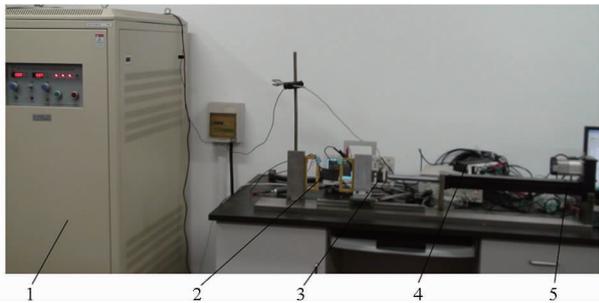


图5 试验平台

Fig. 5 Test platform

1. 精密高压直流电源(10 kV)
2. DEG 试验材料
3. 拉力传感器
4. 虚拟仪器试验测试平台(美国 NI)
5. 伺服缸

2.3 发电机验证

为通过 DEG 的发电过程测试其发电机理,在 2 000 V 的初始电压作用下,对 DEG 两端电压与其拉伸率之间的关系进行了仿真和试验研究,具体结果如图 6 所示。从图中可以看出,在拉力的作用下 DEG 被拉长(拉伸率增加),DEG 两端电压逐渐降低,这个过程即为 DEG 的充电过程;当电动伺服缸回程时,DEG 拉伸率减小,DEG 两端电压逐渐升高,即为发电过程。由此可见,在拉伸和收缩过程中存在电压高于初始电压的现象,验证了弹性体的发电机理。本文仿真结果与试验结果基本一致,验证了仿真模型的正确性。

为了进一步验证仿真模型的正确性,本文对比实际试验环境,在 2 000 V 初始电压,变力 $F_x = 24.1569t^3 - 20.2967t^2 + 38.0413t - 0.5924$ (t 为时间,变力的大小与实际试验拉伸力接近)作用下,得 DEG 两端电压与时间的关系如图 7 所示。

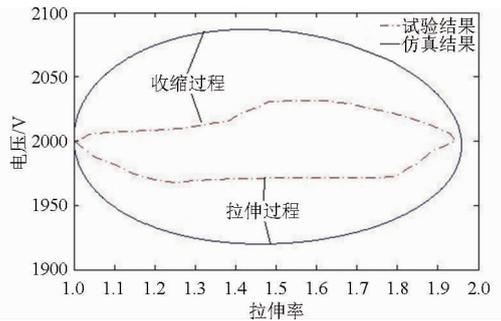
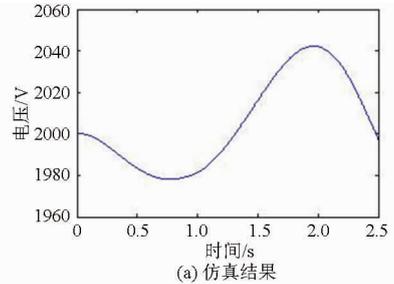
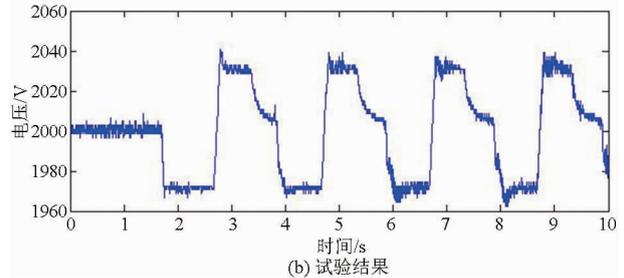


图6 电压与拉伸率关系曲线

Fig. 6 Relationship between voltage and stretching rate



(a) 仿真结果



(b) 试验结果

图7 电压与时间关系曲线

Fig. 7 Relationship between voltage and time

从图 7 可以看出,仿真与试验结果中的电压变化曲线趋势一致,幅值相近。整个拉伸过程中,DEG 两端电压先降后升,与 DEG 的发电规律一致。分析试验曲线,在变力作用下,电压会在刚开始拉伸时和即将拉伸至最大时出现两个突变点,分析原因是伺服缸驱动 DEG 在这两时刻运动方向发生突变,由于外界机械力方向改变导致弹性体内部静电场改变,从而使弹性体外部电压发生突变。突变的存在将影响 DEG 的使用,后续将会对此进行更为深入的研究。

2.4 拉伸力与电势差关系

根据已建立的单轴拉伸机电耦合数学模型,运用 Matlab/Simulink 软件得出了拉伸力与 DEG 两端电势差之间的关系,如图 8 所示。这里所述的电势差定义为 DEG 拉伸收缩过程中其两端达到的最高电压与初始状态两端电压之差。由图 8 可知,在一定的初始电压下,电势差与拉伸力两者近似成线性关系,随着拉伸力的增加,电势差逐步增加,且在相同拉力情况下,初始电压越高,电势差越大。另外,通过对比发现,初始电压不同,电势差与拉伸力的关系曲线斜率也不同:随着初始电压的增大,斜率在增

大。因此,为了得到更大的电势差,应该在条件允许的情况下尽可能地提高初始电压。

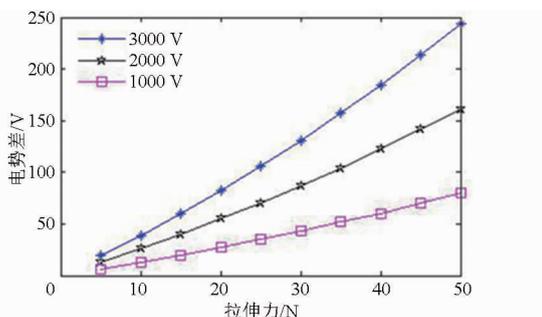


图 8 拉伸力与电势差关系曲线

Fig. 8 Relationship between stretching force and voltage difference

2.5 初始电压与电势差关系

根据 DEG 的发电机理可知其电势差受初始电压的影响。图 9 中初始电压与 DEG 电势差的关系表明,随着初始电压的逐步增加,其电势差亦同步增加。观察仿真结果和试验结果图,初始电压与电势差近似成线性关系,但仿真结果的线性度较高且斜

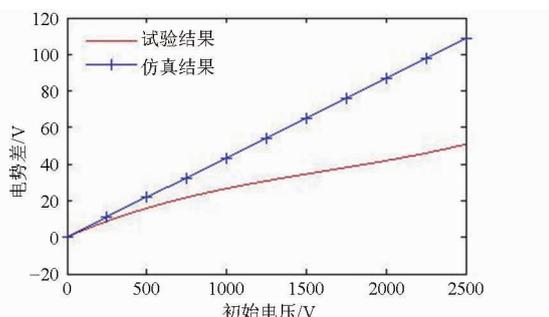


图 9 初始电压与电势差关系曲线

Fig. 9 Relationship between initial voltage and voltage difference

率较大。结合仿真假设与试验条件,导致试验结果低于仿真结果的原因有:①DEG 内阻影响,仿真中主要考虑了介电弹性外围电路的电阻,忽略了其自身内阻,而实际试验中,DEG 存在内阻,关于内阻的影响,后续将进一步研究。②整个系统的阻力,仿真中系统的阻尼系数 d_v 设置为 0,而实际试验中,系统在一定程度上受到阻力作用的影响,阻力的影响后续将深入研究。③除电阻外其他电子元器件电压损耗,仿真中主要考虑了介电弹性外围电路的电阻,忽略了二极管、探头等器件的电压损耗。④测量误差等。

3 结束语

以 Neo-Hookeen 模型为基础,建立了 DEG 在单轴拉伸下的机电耦合数学模型,通过 Matlab/Simulink 软件建立了 DEG 的单轴发电仿真模型,并对 DEG 的发电过程及拉伸力、拉伸率、初始电压与电势差之间的关系进行了仿真研究,同时通过试验研究验证了仿真模型的正确性。仿真和试验结果表明在单轴拉伸收缩发电过程中,DEG 两端电压先降后升,并在试验中发现刚开始拉伸时和即将拉伸至最大时电压有两个突变点,突变的存在将影响 DEG 的使用,后续将会对此进行更为深入的研究;电势差随着初始电压、拉伸力的增加而增加,且近似成线性关系,这为后续介电弹性体发电效率的计算及改善提高等方面的研究提供了理论依据。对比仿真结果与试验结果,分析导致试验结果低于仿真结果的主要原因有:DEG 内阻、系统阻力、电子元器件电压损耗、测量误差等。后续将对此加以深入研究。

参 考 文 献

- 1 PELRINE R, KORNBLUH R, ECKERLE J, et al. Dielectric elastomers; generator mode fundamentals and applications [C] // Proceedings of SPIE 4329, 2001: 148 - 156.
- 2 CURTIS M, IHLEFELD, QU Z H. A dielectric electroactive polymer generator-actuator model; modeling, identification and dynamic simulation [C] // Proceedings of SPIE 6927, 2008: 1 - 11.
- 3 LYON I, LGEF, VILLEURBANNE, et al. Electrostrictive polymers for mechanical energy harvesting [J]. Journal of Polymer Science, 2012, 50(8): 523 - 535.
- 4 CHIBA S, WAKI M, KOMBLUH R, et al. Extending applications of dielectric elastomer artificial muscle [C] // Proceedings of SPIE 6524, 2007: 652424. 1 - 652424. 5.
- 5 JEAN-MISTRAL C, BASROUR S, CHAILLOUT J J. Comparison of electroactive polymers for energy scavenging applications [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(8): 1 - 14.
- 6 朱银龙, 张鑫焱, 王华明, 等. 介电型电活性聚合物驱动转动关节控制技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 333 - 338.
- 7 ZHU Y L, ZHANG X Y, WANG H M, et al. Research on actuation control of dielectric electroactive polymer rotary joint [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 333 - 338. (in Chinese)
- 8 朱银龙, 王华明. 介电型电活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.
- 9 ZHU Y L, WANG H M. Electromechanical characteristic of dielectric electroactive polymer actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 301 - 306. (in Chinese)
- 10 BENSLIMANE M, MICHAEL J, TRYSON, et al. Scalable design of DEAP for energy harvesting utilizing polypower [C] //

- Proceedings of SPIE 7976, 2011: 1 - 10.
- 9 ANTON S R, SODANO H A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003 - 2006) [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(3): 1 - 21.
 - 10 WISSLER M, MAZZA E. Modeling of a prestrained circular actuator made of dielectric elastomer [J]. *Sensor and Actuator A*, 2005, 120(1): 184 - 192.
 - 11 桂凤利, 刘世清, 李陆化, 等. 纵-径耦合型超声功率合成振动系统的研究[J]. *浙江师范大学学报:自然科学版*, 2015, 38(1): 52 - 57.
GUI F L, LIU S Q, LI L H, et al. Longitudinal-radial coupling research of synthetic power ultrasonic vibration system [J]. *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences*, 2015, 38(1): 52 - 57. (in Chinese)
 - 12 林桂娟, 宋德朝, 陈明, 等. 电活性聚合物的力学性能及发电应用[J]. *同济大学学报*, 2011, 39(6): 909 - 910.
LIN G J, SONG D C, CHEN M, et al. Mechanical property and power generation application research on dielectric electro active polymer [J]. *Journal of Tongji University*, 2011, 39(6): 909 - 910. (in Chinese)
 - 13 WISSLER M, MAZZA E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(6): 1396 - 1402.
 - 14 朱银龙, 王华明, 周宏平. 介电型电活性聚合物能量收集方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 362 - 367.
ZHU Y L, WANG H M, ZHOU H P. Energy harvesting of dielectric electroactive polymer transducer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 362 - 367. (in Chinese)
 - 15 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): 2415 - 2416.
CHEN M, LIN G J, SONG D C. Micro-power generator on dielectric electroactive polymer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2415 - 2416. (in Chinese)
 - 16 PIERRE C, GUYOMAR D, GUIFFARD B, et al. Modeling and experimentation on an electrostrictive polymer composite for energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(4): 774 - 784.
 - 17 E S J, CAO J B. Research on strain characteristic and power generation mechanism of electroactive acrylic elastomer [J]. *Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2011, 36(3): 267 - 278.
 - 18 FEDERICO C, GABRIELE F, CARLO G. Enabling variable-stiffness hand rehabilitation orthoses with dielectric elastomer transducers [J]. *Medical Engineering and Physics*, 2014, 36(2): 205 - 211.

(上接第 178 页)

- 25 胡湘韩, 阚瑞清. 喷射泵技术及其应用[M]. 哈尔滨:黑龙江科技出版社, 1990.
- 26 杨燕勤, 安志强, 经树栋. 喷射器流场的数值模拟研究 [J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2006, 32(2): 1 - 4.
- 27 孙殿雨, 颜廷俊. 喷射泵气蚀现象试验分析[J]. *石油机械*, 1997, 25(8): 1 - 4.
SUN Dianyu, YAN Tingjun. Test of cavitation of jet pump [J]. *Petroleum Machinery*, 1997, 25(8): 1 - 4. (in Chinese)
- 28 江勇, 陈娟, 任亚龙, 等. 海底管道挖沟机射流泵参数确定方法[J]. *油气储运*, 2013, 32(5): 504 - 507.
- 29 朱玲, 田秀华, 王同建. 固定源烟气颗粒物稀释采样器的设计及应用[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(6): 51 - 54.
- 30 张学敏, 张永亮, 姚宗路, 等. 不同进料方式燃烧器对生物质燃料颗粒物排放特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 200 - 207.
ZHANG Xuemin, ZHANG Yongliang, YAO Zonglu, et al. Effect of burner with different feeding modes on emission characteristics of biomass molding fuel particle [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(12): 200 - 207. (in Chinese)
- 31 姚宗路, 吴同杰, 赵立欣, 等. 生物质成型燃料燃烧挥发性有机物排放特性试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 235 - 240.
YAO Zonglu, WU Tongjie, ZHAO Lixin, et al. Emission characteristic of VOCs form biomass molding fuel combustion [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 235 - 240. (in Chinese)