

介电弹性体卷形换能器设计与参数优化

曹建波 任钰雪 鄂世举 夏文俊 张海艇 朱喜林

(浙江师范大学工学院, 金华 321004)

摘要: 为研究介电弹性体(DE)换能器在纯剪切拉伸模式下的发电特性,利用弹簧制作了具有预拉伸特性的DE卷形换能器,并结合Neo-Hookean模型建立了DE卷形换能器在纯剪切拉伸模式下的机电耦合数学模型,运用Matlab/Simulink软件建立了DE卷形换能器的纯剪切发电仿真模型,对DE卷形换能器的发电特性及不同弹簧系数对其发电特性的影响进行了仿真。对DE卷形换能器进行了实验,并与仿真结果对比。仿真与实验结果表明,DE卷形换能器发电特性优于一般拉伸模式换能器;在相同的拉伸条件及初始电压下,在预拉伸限制范围内,弹簧弹性系数越大其发电特性越好。

关键词: 介电弹性体; 卷形换能器; 纯剪切; 弹簧; 机电耦合模型

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0412-08

Design and Parameter Optimization of Dielectric Elastomer Roll Transducer

CAO Jianbo REN Yuxue E Shiju XIA Wenjun ZHANG Haiting ZHU Xilin

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

Abstract: Dielectric elastomer (DE) are a kind of novel smart materials that exhibit change in size or shape when stimulated by an electric field, based on Maxwell's effect. To study the power generation characteristics of dielectric elastomer transducer in pure shear tensile, dielectric elastomer roll transducer with prestretch properties was made by spring and the electromechanical coupling mode of dielectric elastomer transducer in pure shear tensile was established based on the Neo-Hookean model, and the corresponding simulation model was set up in Matlab/Simulink environment. The simulation research of the power generation characteristics of dielectric elastomer transducer and the influence of different spring coefficients on its generation characteristics were carried out. The experimental research was done by making dielectric elastomer roll transducer, and compared with the simulation results. The simulation and test results showed that the power characteristics of dielectric elastomer roll transducer were higher than those of the general tensile mode transducer. Under the same condition of tensile mode, initial voltage and the prestretch limitations, the power characteristic was increased with the increase of elastic coefficient. The above results about dielectric elastomer roll transducer provided theoretical reference for applications of dielectric elastomer generators in the field of vibration energy harvesting in the future.

Key words: dielectric elastomer; roll transducer; pure shear; spring; electromechanical coupling mode

0 引言

介电弹性体(Dielectric elastomer, DE)是一种具有电活性的弹性体材料,能够在电场作用下改变形状,将电能转换为机械能;同样,它的逆过程也可以

用于发电,将机械能转换为电能。早在20世纪90年代,很多国内外学者对其变形特性展开了研究,其中美国斯坦福大学是最早对介电弹性体材料进行研究的机构,PELRINE等^[1]研制出应变超过100%的介电弹性体材料,在Science上公布之后,引起了驱

收稿日期: 2017-09-17 修回日期: 2018-02-16

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17E070001)、浙江省基础公益研究工业项目(LGG18E070005)、国家自然科学基金项目(51377146, 51407162)和国家级大学生创新创业训练计划项目(201610345028)

作者简介: 曹建波(1980—),男,副教授,博士,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,博士,主要从事新型功能材料驱动及发电技术、节能技术研究, E-mail: 276828373@qq.com

动领域学者的关注^[2-5]。DE 作为一种弹性体材料,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^[6-8],很多研究学者认为可将 DE 材料应用于可再生能源发电及微机电系统等领域。目前在发电领域,介电弹性体发电机(Dielectric elastomer generator, DEG)的能量回收效率是无法与一些技术成熟的发电机^[9-13]相比的,但是基于它的特点,它能够应用于海洋能、人体能等特殊能量回收,是一种具有广阔发展前途的能量回收技术^[14-18]。

本文设计 DE 卷形换能器,并利用 Neo-Hookeen 模型建立 DE 卷形换能器的机电耦合模型^[19],基于 Matlab/Simulink 研究 DE 卷形换能器的发电特性,以及 DE 卷形换能器的参数优化(弹簧弹性系数的选择),并通过实验得出 DE 卷形换能器的最优参数和其发电特性。

1 DE 卷形换能器特点及制备

1.1 DE 卷形换能器特点

DE 卷形换能器对比普通单轴拉伸 DE 换能器有 2 个明显特点:①纯剪切模式的拉伸方式。②自身即可实现预拉伸。

DE 换能器的发电原理基于可变电容原理,主要过程为^[20]:在发电单元的工作过程中,需要给其提供一个外力拉伸。在弹性体发电单元上下表面加电压,电极加载电荷。当外力拉伸 DE 膜时,面积增大,由于体积不变,DE 膜厚度变小,电容增大,两端电压减少;移除外力后,由于 DE 材料内部的弹性应力,使得 DE 材料恢复到之前的状态,面积减小,厚度变大,电容减小,两端电压增大,施加的外力机械能转换为电能。其中的外力拉伸模式主要有单轴拉伸、双轴拉伸以及纯剪切。

单轴拉伸,即只在一个方向上施加作用力,如图 1a 所示,只有 X 轴方向受到拉力。

双轴拉伸,即 DE 膜在两个不同的方向进行互相垂直的拉伸,如图 1b 所示,DE 膜在 X 轴与 Y 轴方向上受到拉力。

纯剪切^[21],按照纯剪切定义,弹性体在变形过程中主应变的方向不随变形的递进而转动,而其它拉伸形式中,主应变方向会随着变形的递进而转动。这种变形模式如图 1c 所示,约束弹性体的 X 轴方向变形后,在 Y 轴方向施加拉力,实现纯剪切模式的拉伸。

依据纯剪切拉伸模式的定义,DE 卷形换能器的径向方向由固定块固定 DE 发电单元,限制 DE 发电单元的径向变形,在轴向方向施加压力实现变形。

因此,DE 卷形换能器具有纯剪切拉伸模式这一特点。另外,DE 卷形换能器另一特点就是能够实现自身预拉伸。DE 卷形换能器的发电单元是 DE 膜结合弹簧一起制作的,弹簧会将 DE 膜拉伸到一定长度,实现 DE 膜的预拉伸。

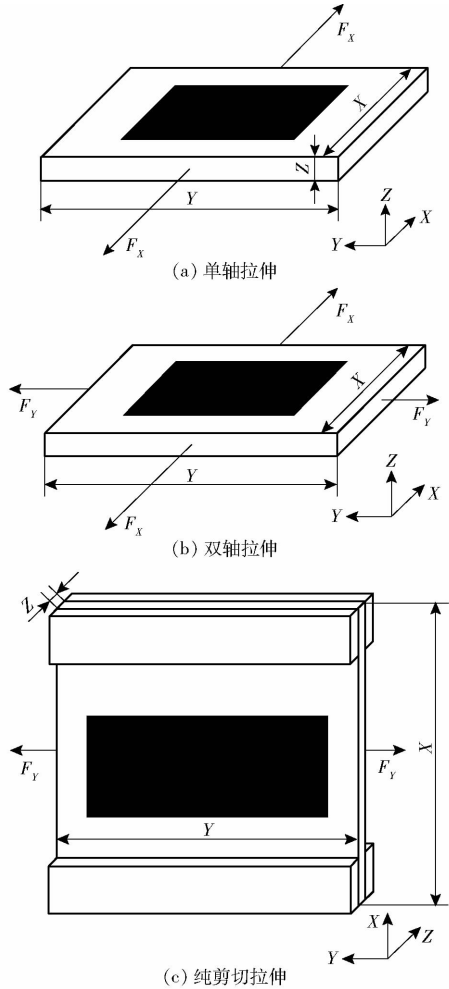


图 1 3 种拉伸方式

Fig. 1 Three kinds of stretching methods

1.2 DE 卷形换能器设计

DE 卷形换能器的 DE 膜采用 3M 公司的 VHB4910 丙烯酸膜,丙烯酸膜是 DE 膜材料的一种。电极材料使用导电膏 DS-001。设计的 DE 卷形换能器机械结构如图 2 所示,使用电动推杆实现 DE 膜的拉伸,其具体实现方式为:将 2 个固定块通过导杆并固定在弹簧上,将 DE 膜固定在固定块上,其中一端的固定块与滑块相连,实现拉伸。DE 膜黏在固定块上,在拉伸时,DE 膜的径向无形变,由此构成纯剪切模式。电动推杆通过连接杆与滑块相连,使用电动推杆实现 DE 膜的拉伸与收缩。

2 DE 卷形换能器建模

2.1 力学模型

首先,建立 DE 卷形换能器的力学模型,图 3 为

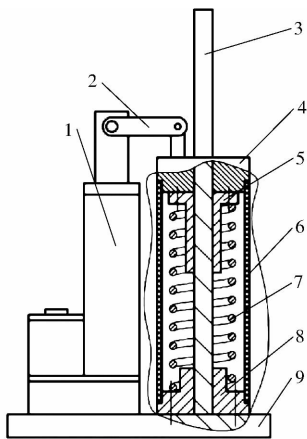


图 2 DE 卷形换能器模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of DE roll transducer model
1. 电动推杆 2. 连接杆 3. 导杆 4. 滑块 5. 直线轴承 6. DE 膜 7. 弹簧 8. 固定块 9. 底座

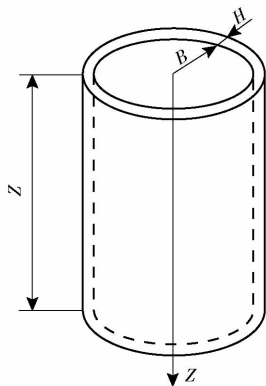


图 3 DE 卷形换能器发电单元示意图

Fig.3 Schematic diagram of generating unit of DE roll transducer

DE 卷形换能器的发电单元示意图,在 Z 轴方向施加拉力 F_z 。

假设 DE 膜体积不变;DE 膜上涂覆的电极材料是连续均匀的,厚度为零,不会增加 DE 膜的厚度;DE 膜变形后的半径为 B ,长度为 Z ,厚度为 H ;DE 卷形换能器发电单元初始长度为 z_0 ,固定膜的固定块半径为 r_i ,膜的初始厚度为 h ; λ_B 、 λ_H 、 λ_Z 分别表示 DE 膜在径向、厚度、轴向的拉伸率。则有

$$\begin{cases} B = \lambda_B r_i \\ H = \lambda_H h \\ Z = \lambda_Z z_0 \end{cases} \quad (1)$$

如图 2 所示,DE 膜是固定在固定块上的,因此其在径向方向是没有拉伸变形的,即 $\lambda_B = 1$,根据之前假设的 DE 膜体积不变,则有 $\lambda_H \lambda_Z = 1$,即

$$\lambda_H = \frac{H}{h} = \lambda_Z^{-1} \quad (2)$$

Neo - Hooken 模型是一种描述超弹性体的应力应变关系的理论模型,其应变能函数为

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

其中 $\mu = Y/3$
式中 W ——应变能
 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ——介电弹性体 3 个方向上的相对拉伸变形
 μ ——剪切模量 Y ——弹性模量
 Z 方向上的应变能可表示为

$$W = \frac{\mu}{2} (\lambda_Z^2 + \lambda_Z^{-2} - 2) \quad (4)$$

由于 DE 膜为不可压缩材料(体积不变),其主应力 σ'_i 可表示为

$$\sigma'_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad (5)$$

式中 p ——静水压力,主要由动力学边界条件决定
在 Z 轴方向上的主应力可表示为

$$\sigma'_Z = \lambda_Z \frac{\partial W}{\partial \lambda_Z} = \mu (\lambda_Z^2 - \lambda_Z^{-2}) \quad (6)$$

弹簧与 DE 膜相连可以等效为 2 个弹簧和 1 个阻尼器,其等效模型如图 4 所示。根据牛顿第二定律对 Z 轴方向进行受力分析,得

$$F_z - d_v \dot{Z} - \frac{2\pi r_i h z_0}{Z} \mu \frac{\lambda_Z^4 - 1}{\lambda_Z^2} - (k_1 + k_2)(Z - z_0) = m \ddot{Z} \quad (7)$$

式中 k_1 ——弹簧的弹性系数
 k_2 ——DE 膜等效的弹性系数
 d_v ——等效的阻尼系数

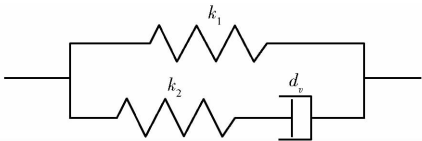


图 4 DE 卷形换能器等效模型

Fig.4 Equivalent model of DE roll transducer

2.2 电学模型

外围电路主要由 DE 卷形换能器、高压偏置电源、负载、储能器件、开关二极管构成,如图 5 所示。图中,DEG 为 DE 卷形换能器的发电单元,由可变电容表示; U_0 为外部加的高压偏置电源,为 DEG 提供偏置电压; C_s 为储能电容; D1、D2 为开关二极管,目的是限定电流方向,避免回流; R_1 、 R_2 为负载。

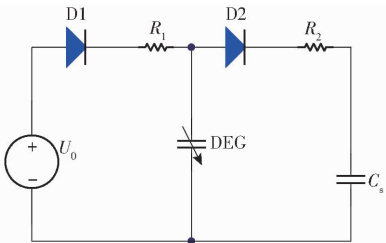


图 5 DE 卷形换能器外围电路

Fig.5 Peripheral circuit of DE roll transducer

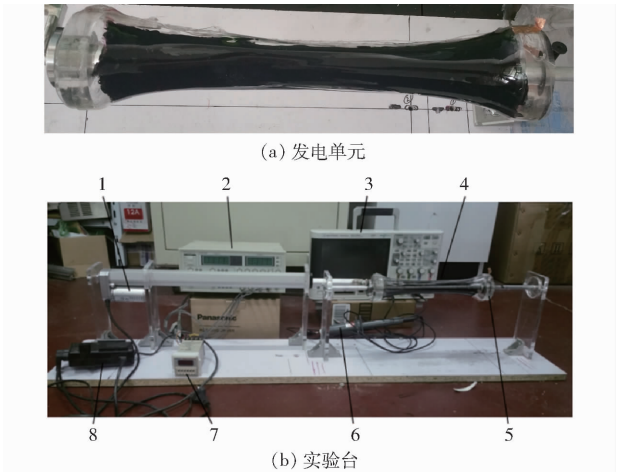


图 7 DE 卷形换能器实验装置

Fig. 7 Experimental device of DE roll transducer

1. 推杆电动机 2. 电容测试仪 3. 示波器 4. DE 发电单元
5. 固定块 6. 高压探头 7. 电动机控制器 8. 电动机电源

3.3 DE 卷形换能器发电机理验证及参数优化

(1)DE 卷形换能器发电机理验证

根据 2.3 节建立的 DE 卷形换能器机电耦合模型及参数进行仿真,其仿真结果如下:

图 8 为电压随拉伸率的变化曲线,在拉力的作用下 DE 卷形换能器被拉长(拉伸率增加),DE 卷形换能器发电单元两端电压逐渐降低,这个过程为 DE 卷形换能器的充电过程;当推杆电动机回程时,DE 卷形换能器拉伸率减小,DE 卷形换能器发电单元两端电压逐渐升高,即为发电过程。在拉伸与收缩的过程中,DE 卷形换能器发电单元两端电压存在高于初始电压的现象,验证了其发电机理。

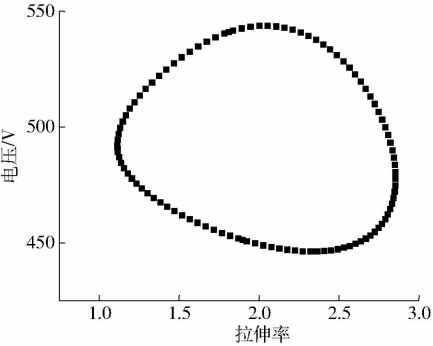


图 8 电压与拉伸率的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between voltage and tensile rate

图 9a 为仿真时电压随时间的变化曲线,图 9b 为实验中 DE 卷形换能器(弹簧 $k_1 = 586\text{ N/m}$) 的电压随时间的变化曲线,通过对比可以看出其变化趋势是基本一致的。实验曲线的幅值小于仿真曲线的原因:①仿真中忽略了机械损耗、电极内阻损耗、电子元器件损耗等损耗问题。②测量误差。实验曲线与仿真曲线电压变化频率主要是依据拉力的变化周期,由于现实中推杆电动机的拉伸收缩与仿真中拉

力的周期不同,因此仿真图与实验图的电压变化频率不同。

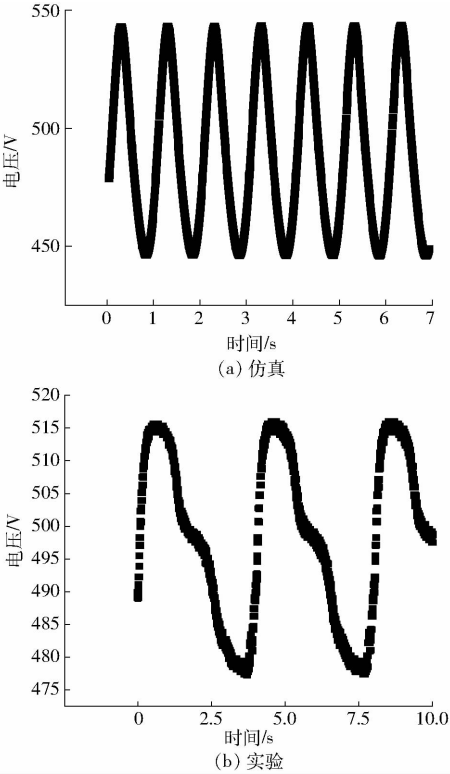


图 9 电压与时间关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between voltage and time

(2)DE 卷形换能器的参数优化

弹簧的弹性系数是影响 DE 卷形换能器发电性能的一个重要因素。能够依靠自身实现 DE 膜的预拉伸是 DE 卷形换能器的一个显著优势,但是如果弹簧的刚度过小,不能够实现 DE 膜的预拉伸,那么 DE 卷形换能器中的弹簧就失去了意义,因此,弹簧弹性系数的选择对于 DE 卷形换能器优化十分重要。

弹簧弹性系数 k 的选取,与弹簧的制作材料、线径、外径、有效圈数有关,如图 10 所示,其计算公式为

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N}$$

(19)

其中

$$D = D_1 - 2d$$

式中 D_1 ——弹簧外径

G ——弹簧材料的剪切模量

d ——弹簧线径 D ——弹簧中径

N ——弹簧有效圈数

弹簧的材料为钢,其剪切模量 $G = 8 \times 10^4\text{ MPa}$ 。

本文选取了不同型号的弹簧进行实验,其型号选择如表 1 所示。

利用不同 k 的弹簧分别制作了 DE 卷形换能器的发电单元,其具体参数如表 2 所示。弹簧初试长

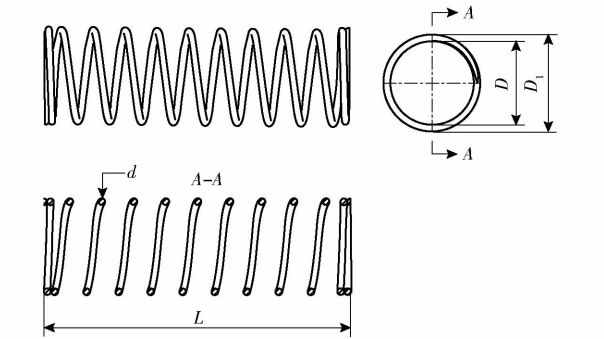


图 10 弹簧模型
Fig. 10 Spring model

表 1 弹簧参数
Tab.1 Spring parameters

线径 d/mm	外径 D_1/mm	有效圈数 N	弹性系数 $k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
1.2	25	28	64.157
	19	34	133.328
	16	43	191.708
1.6	25	26	243.297
	22	29	340.101
	19	37	449.063
	16	47	664.894
1.8	28	24	301.099
	25	26	411.979
	21	34	586.089
	17	44	991.569

度为 30 cm,压缩后可达到的最小长度为 6 cm,DE 膜的初始长度为 15 cm。利用 DE 卷形换能器进行实验时,其压缩发电行程设置为 12 cm,电压升高值的实验结果如表 2 所示,在测量过程中,发现 DE 卷形换能器的电容与上升电压都是随着预拉伸长度的增加而增加,即随着弹簧的弹性系数 k 的增大而增大。当 k 取值为 64.16、133.33、191.71 N/m 时,DE 卷形换能器的初试长度不够被压缩 12 cm,因此其不满足实验测量要求,未做测量。

表 2 DE 卷形换能器发电单元参数

Tab.2 Parameters of generating unit of DE roll transducer

弹性系数 $k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	DE 膜预拉伸长度/ cm	电容/ pF	电压升高值/ V (压缩行程为 12 cm)
64.16	0	604.5	
133.33	0.8	716	
191.71	3.2	900	
243.30	4.7	780	14.6
301.10	5.4	814	15.7
340.10	6.6	948.8	17.2
411.98	7.3	1 070	17.5
449.06	7.6	1 145	17.7
586.09	8.2	1 270	18.6
664.89	10.2	1 400	19.2
991.57	111.2	1 520	19.7

弹性系数 k 与预拉伸长度的关系如图 11 所示。DE 膜预拉伸长度不同,即改变了 DE 卷形换能器发电单元的初始长度 z_0 , z_0 的取值范围在 0.15 ~ 0.27 m 之间,在此范围内对 z_0 与 k 值进行拟合,如图 12 所示,得出拟合函数为: $k = 68\,126z_0^2 - 20\,853z_0 + 1\,699.6$,其决定系数 $R^2 = 0.963$ 。

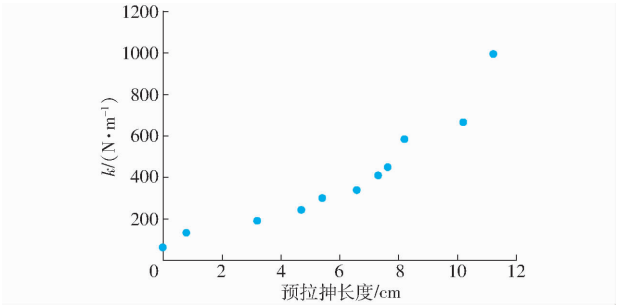


图 11 预拉伸长度与 k 关系
Fig. 11 Relationship between prestretch length and k

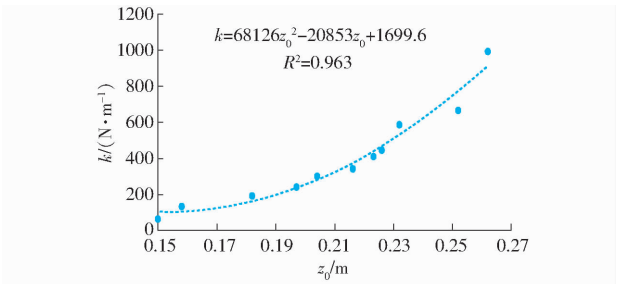


图 12 z_0 与 k 的关系曲线
Fig. 12 Relationship curve between z_0 and k

将 k 值与 z_0 的拟合函数代入仿真模型中,得到 k 与 DE 卷形换能器发电单元两端电压的关系,如图 13 所示,图 13a 是仿真得出的关系曲线,电压随弹性系数 k 的增加而增加,一直到弹簧的弹性系数 $k = 1\,575.04\text{ N/m}$ 时,弹簧可将 DE 卷形换能器的发电单元弹起到 30 cm (与弹簧长度一致),当 $k > 1\,575.04\text{ N/m}$ 时,DE 卷形换能器的初始长度不再改变,但是压缩发电过程所需的外力会增大,因此,DE 卷形换能器在 $k = 1\,575.04\text{ N/m}$ 时达到最佳发电性能。图 13b 为实验得出的关系曲线,与仿真曲线的趋势一致,即 DE 卷形换能器的发电性能随着弹簧弹性系数的增加而增加,分析仿真与实验关系曲线在最高点时趋势的变化,主要是由于在实验过程中,弹簧在实际的实验过程中,实验台所能驱动的最大刚度的弹簧其弹性系数 $k = 991.57\text{ N/m}$,因此,在实际实验过程中并没有达到仿真中的最佳 k 值,依据现有的实验条件,DE 卷形换能器的弹性系数 k 的较优选择为 991.57 N/m。

3.4 DE 卷形换能器性能测试

性能测试实验是将 DE 卷形换能器与单轴拉伸的 DE 膜升高电压进行对比。单轴拉伸实验中使用

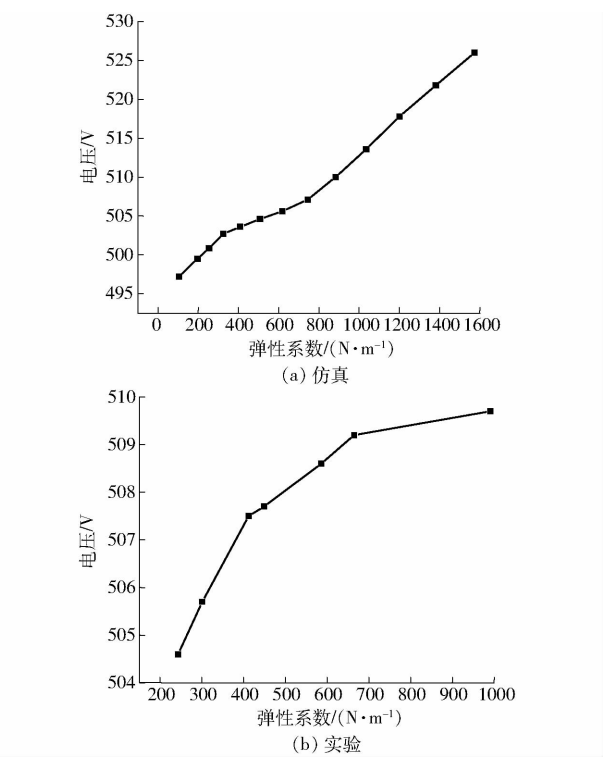


图 13 DE 电压与弹性系数关系曲线
Fig. 13 Relationship curve between DE voltage and elastic coefficient

的 DE 膜其类型、尺寸以及柔性电极材料都与 DE 卷形换能器相同,实验中测得其电容为 531.2 pF,DE 发电单元两端电压上升幅度为 11.3 V。将其与弹簧弹性系数为 991.57 N/m 的 DE 卷形换能器进行

对比,结果如图 14 所示,DE 卷形换能器的发电特性优于单轴拉伸时的发电特性。

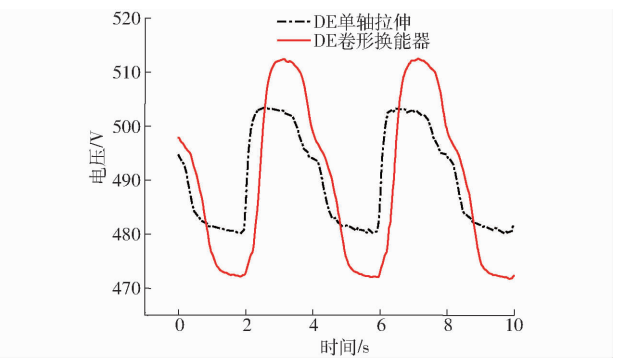


图 14 DE 单轴拉伸与 DE 卷形换能器发电性能对比
Fig. 14 Comparison of generation performance of DE uniaxial tension and DE roll transducer

4 结论

(1) DE 卷形换能器自身具有预拉伸功能以及纯剪切的拉伸模式,使其发电性能远大于一般单轴拉伸模式的 DEG,在同等实验条件下,DE 卷形换能器的电容有 1.52 nF,端电压达到 19.7 V,而单轴拉伸模式的 DEG 其发电单元的电容仅为 531.2 pF,端电压则为 11.3 V。

(2) DE 卷形换能器仿真分析中,进行参数优化后发现 DE 卷形换能器弹簧弹性系数的最佳选择为 1 575.04 N/m,但实验过程中,由于受实验装置的限制,弹性系数为 991.57 N/m 时最优。

参 考 文 献

1 PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. Science, 2000, 287(5454): 836–839.

2 POTZ M, ARTUSI M, SOLEIMANI M, et al. Rolling dielectric elastomer actuator with bulged cylindrical shape [J]. Smart Materials & Structures, 2010, 19(12): 127001.

3 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研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 333–338. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150747&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.047.

ZHU Y L, ZHANG X Y, WANG H M, et al. Research on actuation control of dielectric electroactive polymer rotary joint [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 333–338. (in Chinese)

4 GODABA H, LI J, WANG Y, et al. A soft jellyfish robot driven by a dielectric elastomer actuator [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2016, 1(2): 624–631.

5 LU Z, SHRESTHA M, LAU G K. Electrically tunable and broader-band sound absorption by using micro-perforated dielectric elastomer actuator [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(18): e1501595–5242.

6 CURTIS M, IHLEFELD, QU Z H. A dielectric electroactive polymer generator-actuator model: modeling, identification and dynamic simulation [C]// Proceedings of SPIE, 2008, 6927: 1–11.

7 CHIBA S, WAKI M, KOMBLUH R, et al. Extending applications of dielectric elastomer artificial muscle [C]// Proceedings of SPIE, 2007, 6524: 652424.1–652424.5.

8 LALLART M, COTTINET P J, GUYOMAR D, et al. Electrostrictive polymers for mechanical energy harvesting[J]. SPIE, 2004, 5385(5): 523–535.

9 KANG G, KIM K S, KIM S. Analysis of the efficiency of a dielectric elastomer generator for energy harvesting [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(4): 692715.

10 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.
- 11 ZHOU J, JIANG L, KHAYAT R E. Investigation on the performance of a viscoelastic dielectric elastomer membrane generator [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(15): 2983 – 2992.
- 12 BINH P C, NAM D N C, AHN K K. Design and modeling of an innovative wave energy converter using dielectric electro-active polymers generator [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2015, 16(8): 1833 – 1843.
- 13 WANG H, WANG C, YUAN T. On the energy conversion and efficiency of a dielectric electroactive polymer generator [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 071101.
- 14 GOUDAR V, REN Z, BROCHU P, et al. Optimizing the output of a human-powered energy harvesting eystem with miniaturization and integrated control[J]. *Sensors Journal IEEE*, 2014, 14(7): 2084 – 2091.
- 15 VERTECHY R, FONTANA M, PAPINI G P R, et al. In-tank tests of a dielectric elastomer generator for wave energy harvesting [C]// *Proceedings of SPIE*, 2014,9056: 90561G1 – 90561G11.
- 16 JEANMISTRAL C, VUCONG T, SYLYESTRE A. Energy scavenging strain absorber; application to kinetic dielectric elastomer generator [C]// *Proceedings of SPIE*, 2014,9056: 90561H1 – 90561H8.
- 17 KORNBLUH R 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.
- 18 CHIBA S, WAKI M, WADA T, et al. Consistent ocean wave energy harvesting using electroactive polymer (dielectric elastomer) artificial muscle generators [J]. *Applied Energy*, 2013, 104(2): 497 – 502.
- 19 曹建波, 葛彩军, 鄂世举, 等. 基于 Neo – Hooken 的介电弹性体单轴拉伸发电特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 389 – 394. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160355&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.055.
- CAO Jianbo, GE Caijun, E Shiju, et al. Power generating characteristics of uniaxial tensile for DEG based on Neo – Hooken model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):389 – 394. (in Chinese)
- 20 鄂世举, 朱喜林, 高春甫. 介电弹性体发电的基本原理及在分布式发电中的应用[J]. *现代制造工程*, 2009, 23(9):141 – 145.
- E Shiju, ZHU Xilin, GAO Chunfu. The basicmechanism of dielectric elastomer generator and its application in distributed power generation [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2009, 23(9): 141 – 145. (in Chinese)
- 21 李博. 介电弹性材料驱动器的力电耦合机理及稳定性研究[D]. 西安:西安交通大学, 2012.
- LI Bo. Electromechanical coupling and stability in dielectric elastomer actuator[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012. (in Chinese)