

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.014

介电弹性体发电机机电转换的非线性方法研究*

刘爱飞¹, 鄂世举^{2*}, 曹建波², 金丽丽¹, 葛彩军², 江孝琪¹

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321000)

摘要:针对介电弹性体(DEG)研究中存在的“效率”瓶颈问题,对DEG机电能量转换方法进行了研究,提出了一种非线性DEG机电能量转换方法,并通过分析其基本机理,建立了非线性方法的理论模型和Matlab/Simulink仿真模型,对负载电阻值及翻转品质因子对机电转换效率的影响进行仿真。通过优化材料、机械传动结构、电路各元件参数配置及开关通断时间,提高了翻转品质因子 Q ,减少了电容电感串联形成电压翻转而造成的能量损失,进一步提高了机电效率。研究结果表明,通过对标准机电转换方法和非线性机电转换方法的比较,由于非线性转换环节的作用,使DEG两端电压的振幅大幅度提升,沿电压轴方向扩展了能量环,从而使DEG机电转换效率提高2.5倍;该研究结果对DEG的深入研究具有重要的意义。

关键词:介电弹性体发电机;机电转换;发电效率;非线性方法

中图分类号:TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0191-06

Research on nonlinear approach for electromechanical conversion of dielectric elastomer generator

LIU Ai-fei¹, E Shi-ju², CAO Jian-bo², JIN Li-li¹, GE Cai-jun², JIANG Xiao-qi¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, China)

Abstract: Aiming at efficiency bottleneck problem in dielectric elastomer generator (DEG) research, electromechanical energy conversion method was studied. A new nonlinear method of electromechanical energy conversion was presented. After the analysis of basic mechanism, the theoretical model and Matlab/simulink simulation model of the nonlinear method was established to study the influence of load resistance value and quality factor on electromechanical conversion efficiency. By optimizing the materials, mechanical transmission structure, circuit component parameters configuration and switch-off time, the quality factor Q was improved, the energy loss caused by voltage inversion was reduced, and the electromechanical efficiency was improved further. The experimental results show that nonlinear method can make the DEG electromechanical conversion efficiency 2.5 times higher than that of standard conversion method. Due to the effect of nonlinear conversion, voltage amplitude of DEG enhanced significantly, extending the energy cycle along voltage axis direction. The research results have great significance for in-depth study of DEG.

Key words: dielectric elastomer generators (DEG); electromechanical transformation; generating efficiency; nonlinear method

0 引 言

近年来,国内外针对基于压电、电磁等原理的微发

电机展开了积极的研究。在微发电机方向研究中,我国已经取得了一系列显著的研究成果,尤其针对压电材料发电领域的研究。然而在大应变、低频能量源的

收稿日期:2015-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377146,51407162);浙江省自然科学基金资助项目(LQ13E050009)

作者简介:刘爱飞(1990-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事新型功能材料应用方面的研究。E-mail: 466090648@qq.com

通信联系人:鄂世举,男,教授,硕士生导师。E-mail: eshiju@163.com

发电场合,例如风能、波浪能,压电材料并不是一个好选择。经过长时间使用,压电材料会产生材料老化、退极化,机电耦合效率降低以及材料本身脆性等问题,这些问题限制了它在实际生活中的应用^[1]。

介电弹性体发电机(DEG)是一种基于介电弹性体材料(DE)的新型微发电机,通过利用其可变电容特性,可将外部输入的机械能转换为电能,从而进行发电^[2]。与压电等其他微发电形式相比,DEG具有以下突出特点^[3-5]:①高的理论能量密度(1.5 J/g)及耦合效率(90%)。②具有大变形(目前的临界值达600%)、柔顺耐冲击特性。③由于它的柔顺性,可与能量源直接耦合。④适应于较宽范围的能量源之幅值、速率或频率,特别是可在半静态、低频及频率变化较大的场合高效工作。DEG之所以适合诸如潮汐等发电场合,是因为DEG所产生的电能与其变形的幅值有关,而与变形的速度无关。作为一种新型的微发电形式,DEG的综合性能与其他发电形式相比极具优势^[6-11]。

笔者研究的是一种基于电感的同步开关能量转换方法。最初由A. BADEL等人对压电陶瓷材料提出非线性方法以提高能量收集效率。DEG连接有外部高压偏置电源时,随拉伸量变化输出电压较偏置电压上下震动,类似于压电陶瓷材料。因此,该非线性方法同样适用于DEG电能收集优化。该方法基于将电容电感串联构成一个高频振荡器,通过同步开关控制震荡时间实现DEG电压翻转。由于插入电压翻转这一环节,打破DEG电压随拉伸量呈线性变化的关系,该方法又被称为非线性机械能电能转化方法。

本研究针对介电弹性体(DEG)研究存在的“效率”瓶颈问题,对DEG机电能量转换方法进行研究,提出一种非线性DEG机电能量转换方法。仿真显示在外部机械能输入相同的情况下非线性方法可以使DEG电能转换量提高2.5倍。

1 DEG理论模型

1.1 DEG拉伸模型

DEG拉伸模型如图1所示,本研究在DEG上沿X轴方向施加力 F_x ,形成沿X轴方向排列的DEG高分子链,从而拉伸DEG模型。

经过拉伸后,DEG的长度、宽度、厚度分别沿X轴、Y轴、Z轴方向发生改变,设DEG原始结构尺寸为 x_0, y_0, z_0 ,经X轴方向拉伸后尺寸为 x, y, z ,则其拉伸比率分别为 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$,如下所示:

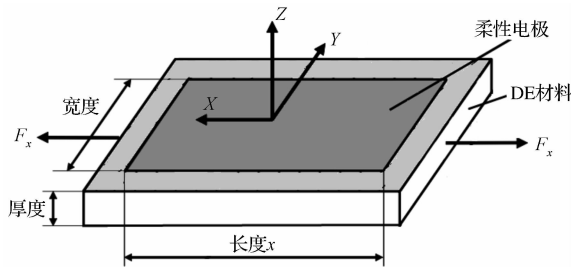


图1 DEG拉伸模型

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

假设DEG体积恒定,根据Neo-Hookeen模型描述DEG单轴的弹性性能,假定材料是均匀的、无塑性、各向同性,则DEG沿X轴方向拉伸的应变能 W 为:

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

式中: μ —材料剪切模量,且 $Y = 3\mu$, Y —杨氏模量。

由于DE的不可压缩性,则X轴方向上的应力 σ_x 可由拉伸比率 λ_i 给出:

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

DEG在x轴方向上,主要受到的力有 F 拉力、电场力、弹性阻力、机械阻力,根据牛顿第二定律有:

$$F_x - d_v \dot{x} - \frac{\mu x_0 y_0 z_0}{x} \left(\lambda_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} \right) - \alpha V = m \ddot{x} \quad (4)$$

1.2 DEG能量模型

本研究分别对公式(4)各项乘以速度并对时间积分,得到DEG发电系统的能量平衡方程:

$$\int F \dot{x} dt = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \int d_v \dot{x}^2 dt + \int \frac{\mu x_0 y_0 z_0}{x} \left(\lambda_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_z^2} \right) \dot{x} dt + \int \alpha V \dot{x} dt \quad (5)$$

由此可知,输入的机械能分别转换成DEG系统动能、机械损耗、弹性势能以及电能,其中电能可分为DEG内部电容存储的能量和传递到负载的能量:

$$E_{\text{transfer}} = \int \alpha V \dot{x} dt = \frac{1}{2} C_0 V^2 + \int VI dt \quad (6)$$

式中:等式左边第一项—存储在DEG内部的电能,第二项—代表传递到负载的电能。

转换的电能等于DEG两端电压 V 与拉伸量 x 对时间的导数的积在一定时间内的积分。因此外界机械能对DEG做功,在拉伸量相同的情况下,通过提高DEG两端电压值,可提高电能转换量,继而提高机电转换效率。

DE外接高压偏置电源,其两端电压值 V 以偏置电压 V_{bias} 为基准上、下振荡。流过DE的电流 I 及其两端

电压 V 和沿 X 轴方向的伸长量有关:

$$I = \alpha \dot{x} - C_0 \dot{V} \quad (7)$$

式中: C_0 —DE 的夹持电容。

由上式可知,DE 材料的电流、电压与位移之间的关系类似于压电材料。而 V 围绕偏置电压 V_{bias} 变化,需修正后才可采用非线性能量收集方法优化 DE 能量收集。

2 DEG 机械能电能转换理论

本研究分析了 DEG 标准方法和非线性方法的能量转换理论,建立了 DEG 产生的电能与系统各个元件参数及负载之间的理论模型,并涉及的能量均指平均能量。假设理想状态,输入外部机械能使 DEG 沿 X 轴方向的拉伸量 x 呈正弦规律变化。

2.1 标准机械能电能转换方法

DEG 标准能量转换电路如图 2 所示。DEG 两端并联有纯电阻负载 R_L , C_L 与滤波电容 R_r 并联,该电路建模更接近实际。假定 $R_L C_r$ 时间常数 τ 远大于 DEG 机械拉伸周期,忽略 RC 电路响应,那么认定 R_L 两端电压 V 呈连续变化。电阻 R_b 和二极管 D 起保护作用,防止 DEG 击穿时,高压偏置电源 V_{bias} 被短路。

从 DEG 流出的电流 I 流经负载 R_L ,根据欧姆定理可按下式表示:

$$I = \alpha \dot{x} - C_0 \dot{V} = \frac{V}{R_L} \quad (8)$$

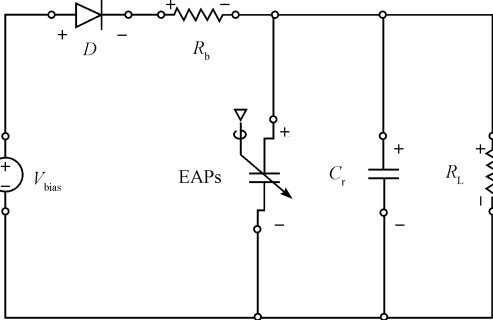


图2 DEG 标准能量转换电路

本研究对式(8)进行拉普拉斯变换,等式两边同时乘以拉普拉斯积分。在频域内,DEG 两端电压 $V(j\omega)$ 与 x 方向的拉伸量 $X(j\omega)$ 的关系可以表示为:

$$V(j\omega) = \frac{\alpha R_L}{1 + jR_L C_0 \omega} j\omega X(j\omega) \quad (9)$$

式中: ω —角频率。

对式(4)进行同样的变化,可以得到力和拉伸量在频域内的表示:

$$F(j\omega) = \left(j\omega m + \frac{1}{j\omega} \frac{\mu x_0 y_0 z_0}{x} \left(\lambda_x^2 - \frac{1}{\lambda_x^2 \lambda_y^2} \right) + d_v + \frac{\alpha^2 R_L}{jR_L C_0 \omega + 1} \right) j\omega X(j\omega) = \left(G + \frac{\alpha^2 R_L}{jR_L C_0 \omega + 1} \right) j\omega X(j\omega) \quad (10)$$

通过式(9)可推导 DEG 收集到的能量与拉伸量的关系:

$$P = \frac{V(j\omega) V^*(j\omega)}{2R_L} = \frac{R_L \alpha^2}{1 + (R_L C_0 \omega)^2} \frac{\omega^2 X_m^2}{2} \quad (11)$$

式中: X_m —拉伸量的幅值。

通过分析收集到的电能与伸长量的关系,存在一个最优负载电阻值 $R_{L,\text{opt}}$ 使表达式中分母值最小,从而收集功率达到最大值 P_{MAX} 。这个特点与压电材料在能量收集中的应用相似^[12],最大收集功率 $P_{L,\text{opt}}$ 可以表示为:

$$P_{\text{MAX}} = \frac{\alpha^2 \omega X_m^2}{4C_0} \quad (12)$$

2.2 非线性机械能电能转换方法

2.2.1 非线性方法工作机理及过程

机电转换的非线性能量收集方法是一项基于电感的同步开关技术,形成电感与 DEG 并联。非线性环节由一个电感和一个开关并联而成,DEG 非线性能量转换电路如图 3 所示。在发电循环的大部分时间里,开关 S_1 处于断开状态,当 DEG 拉伸量到达极值时,即输出电压达到最大值或最小值时,开关 S_1 闭合,DEG 与电感并联导通,形成一个震荡回路。通过开关 S_1 闭合控制震荡时间,使 DEG 两端电压翻转,即保持电压绝对值不变改变电压方向,非线性能量转换 DEG 输出电压如图 4 所示。开关闭合的时间与半个震荡周期相等,则:

$$t_{\text{on}} = \frac{1}{2} T = \pi \sqrt{LC} \quad (13)$$

式中: L —电感值大小。电感 L 越小,开关闭合时间越短。

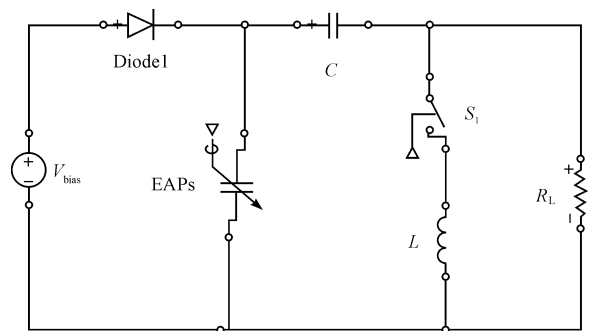


图3 DEG 非线性能量转换电路

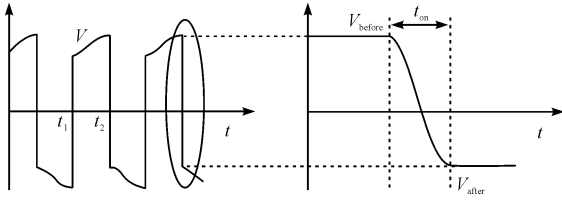


图 4 非线性能量转换 DEG 输出电压

当开关断开时,DEG 两端电压与 X 方向拉伸量呈比例变化,即线性变化。如图 4 所示,当开关闭合,电感与电容导通形成振荡回路,通过振荡打断 DEG 两端电压与拉伸量 x 的比例变化,使电压翻转,形成一个非线性环节。由于增加一个非线性环节,该机电能转换方法又被称为非线性能量转换方法。

由于一部分储存在电容中的电能,在机电能转换过程中损失,电压随拉伸量变化的相位差,以及电压信号高频率突变造成的高频辐射^[14],致使电压翻转在实际运用中并不理想。因此,本研究引入品质因子 Q 来定义电压翻转的好坏程度。由于焦耳效应和高频率能量辐射,虽然一部分电能转换成热能,但是通过非线性方法能够显著提高输出电压和转换的电能。

本研究引入非线性环节对 DEG 两端电压带来两点变化。首先,除电压翻转瞬间,电压一直处于升高状态。非线性处理后,原先电压正向减小的过程经翻转后转换成负向增大。其次,电压与速度的正负号保持一致。 $E_{\text{transferred}}$ 如下式所示:

$$E_{\text{transferred}} = \int \alpha V \dot{x} dt \quad (14)$$

由式(14)可得:当电压与速度的正负号保持一致时,DEG 的转换能量提高。基于这两点,可以完成对机电转换过程进行优化。

2.2.2 非线性方法理论模型

如图 3 所示,电阻负载 R_L 与 DEG、电感并联。除了电压翻转瞬间,DEG 两端电压 V 与拉伸量 x 的关系满足微分方程(8)。假定 X 方向的拉伸量保持余弦规律变化,则微分方程(8)可通过边界条件求解,即 0 时刻和 $T/2$ 时刻电压关系及拉伸量变化关系。两次电压翻转间电压可表示为:

$$V(t) = \frac{\alpha x_m}{C} \frac{(RC\omega)^2}{1 + (RC\omega)^2} \left(\frac{1 + e^{\frac{\pi}{2Q}}}{e^{\frac{\pi}{2Q}} + e^{\frac{\pi}{RC\omega}}} \right) e^{\frac{t}{RC}} - \frac{\alpha x_m}{C} \frac{RC\omega}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \cos\left(\omega t + \arctan\left(\frac{1}{RC\omega}\right)\right) \quad (15)$$

半个发电循环周期即 $t_1 \sim t_2$ 时刻内,DEG 产生的电荷量是流经 DEG 的电流在 $t_1 \sim t_2$ 时刻内的积分。流

过负载 R_L 的电流等于 DEG 产生的电流与电感存储的电流 I_L 之和。则负载消耗的电荷 Q_R 是 $t_1 \sim t_2$ 时刻内流过 DEG 和电感 L 的电流积分和:

$$Q_R = \int_{t_1}^{t_2} I dt + \int_{t_1}^{t_2} I_L dt = \frac{V}{R} \frac{T}{2} \quad (16)$$

由于开关控制,除了在翻转瞬间即刚过 t_1 时刻的瞬间,其他时间几乎没有流过电感的电流。流过电感 L 的电流可以表示为:

$$\int_{t_1}^{t_2} I_L dt = C \int_{t_1}^{t_1+t_2} dV = CV(1 + e^{\frac{\pi}{2Q}}) \quad (17)$$

合并式(8,16,17),可以得到通过非线性方法作用后,DEG 两端电压与拉伸量幅值 x_m 的关系:

$$V = \frac{2R\alpha}{RC(1 - e^{\frac{\pi}{2Q}})\omega + \pi} \omega X_m \quad (18)$$

分析非线性机电转换系统的能量平衡。在半个发电周期内, X 方向的拉伸力为系统注入机械能分别转换成机械能损失、非线性转换过程中的损失以及电能:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} F_x \dot{x} dt = C \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{x} dt + \frac{1}{2} CV^2 (1 - e^{\frac{\pi}{2Q}}) + \frac{V^2}{R} \frac{T}{2} \quad (19)$$

根据公式(18)DEG 的两端电压计算公式,则转换功率可以表示为:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{4R\alpha^2}{(RC(1 - e^{\frac{\pi}{2Q}})\omega + \pi)^2} \omega^2 X_m^2 \quad (20)$$

与传统电能收集系统相同,非线性系统同样存在一个最优负载电阻值 $R_{L,\text{opt}}$ 使收集功率达到最大值 P_{MAX} 。最大收集功率 P_{MAX} 可以表示成:

$$P_{\text{MAX}} = \frac{\alpha^2 \omega}{\pi^2 C (1 - e^{\frac{\pi}{2Q}})} x_m^2 \quad (21)$$

观察式(21)可以发现品质因子 Q 对最大收集功率 P_{MAX} 存在一定影响。如果品质因子 Q 远远大于 $\pi/2$,则该非线性系统最大收集功率 P_{MAX} 可以优化为:

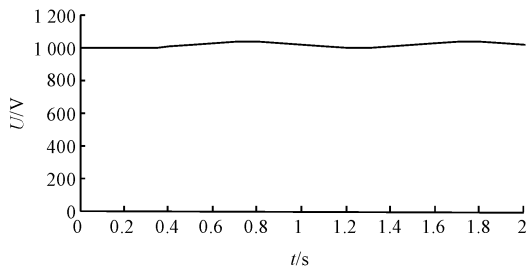
$$P_{\text{MAX}} = \frac{\alpha^2 Q}{\pi^2 C \omega} x_m^2 \quad (22)$$

3 仿真研究

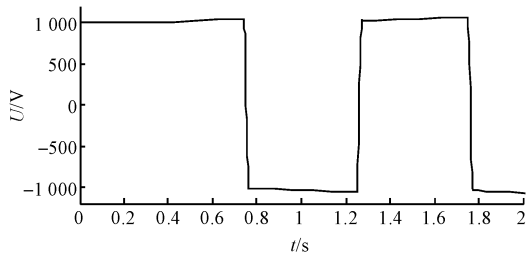
本研究通过 Matlab/Simulink 建模仿真,对比非线性能量转换方法与标准能量转换方法得到的电能转换效率,在两种方法下比较 DEG 系统的输出电压波形、最优负载电阻值时的输出功率以及从机械能中转换的电能。特别指出仿真中,每个发电循环 DEG 拉伸量设置相等,即每个发电循环的外部机械能输入相等。在外部机械能输入相等的情况下,比较两种方法电能转换量,即是比较机电转换效率。

3.1 输出电压对比仿真研究

本研究根据图2、图3所示标准能量转换电路和非线性能量转电路,利用 Matlab/Simulink 建立等效电路仿真模型。笔者设置偏置电压为 1 kV,发电频率为 1 Hz。外部高压偏置电源为 DEG 充电至 1 kV,充电时间为 0.4 s。在非线性和非线性模式下,在输出电压第一次达到最大电压时,即 0.75 s 时,启动开关控制器,开始非线性能量转换。



(a) 标准能量转换



(b) 非线性能量转换

图5 DEG 输出电压波形

DEG 系统的仿真输出电压波形如图 5 所示。对比图 5 中两种能量转换方法的输出电压波形,可以观察到非线性方法可以使输出电压达到极值时翻转。除电压翻转瞬间,电压一直处于升高状态,原先电压正向减小的过程经翻转后转换成电压负向增大。

3.2 输出功率对比仿真研究

式(11),式(20) 分别是标准模式和非线性模式下,电能转换功率 P 关于负载电阻 R_L 的关系方程。本研究参照文献中预备实验的实验数据,利用 MARLAB 仿真得到二者关系图如图 6 所示。图 6 展现了转换的电能随负载电阻的变化趋势。从图 6 中可以观察到,两种模式分别存在一个最优负载电阻值使电能转换功率 P 达到最大值;同时清晰表现非线性机电转换模式下机电转换功率 P 显著提高。在分别取最优负载电阻值的情况下,非线性模式的电能转换功率约是标准模式下的 3.5 倍。这表明非线性方法可显著地提高 DEG 电能输出功率,在外部输入机械能相同的前提下,可提高 DEG 机电转换效率。

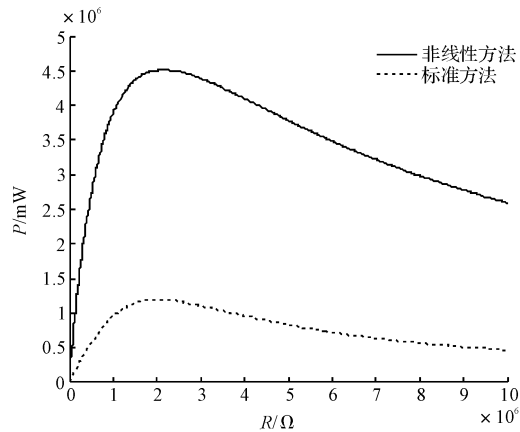


图6 输出功率与负载电阻的关系

3.3 转换电能对比仿真研究

根据 DEG 发电系统的能量平衡方程(5) 分析,外部注入到 DEG 系统内部的机械能分别被转换成 DEG 系统动能、机械能损失、弹性势能以及电能。其中,转换为电能等于 DEG 两端电压 V 与拉伸量 x 对时间的导数的积在一定时间内的积分。本研究在分别使用最优负载电阻值情况下,根据式(11,20),以 αV 为纵坐标,以拉伸量 x 为横坐标,分别做出一个发电周期内,DEG 使用标准方法和非线性方法转换的电能如图 7 所示。在一个周期内,转换的电能可以被定义为图 7 中四边形面积 A :

$$E_{\text{conversion}} = A = \int_0^T \alpha V \dot{x} dt = \int_{-x}^x \alpha V dx \quad (23)$$

四边形面积可以称为一个周期能量环。相比较于标准模式下能量环,非线性能量转换模式下的能量环面积扩大 3.5 倍。图 7 从能量的角度验证了相较于原有的电能转换电路,非线性方法显著地提高了机电转换效率。

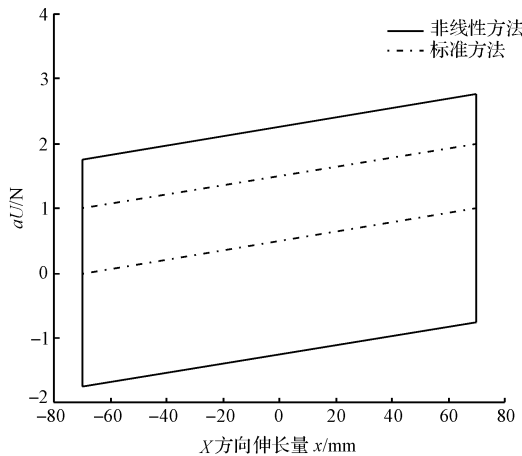


图7 转换电能

仿真结果显示,使用非线性方法电能转换环的面积明显大于标准方法的转换环面积,表明非线性模式下电能转换量明显提升。非线性转换环节的作用,使

DEG 两端电压的振幅大幅度提升,沿电压轴方向扩展了能量环,从而大幅度提高了 DEG 从机械能中转换的电能。相比较于标准电能转换模式,虽然从机械能中转换出的电能大幅提高,但是在开关闭合的瞬间,部分电能由于电容、电感串联形成电压翻转而损失。

3.4 品质因子仿真研究

式(15)反映翻转品质因子 Q 对翻转后 DEG 两端电压的影响。参照文献中预备实验的实验数据,在本研究的仿真中品质因子设置为 2.6。根据式(20),在电阻负载取最优负载阻值的情况下,翻转品质因子 Q 与电能转换功率 P 的关系如图 8 所示。电能转换功率 P 随品质因子的提高而提高。在实际试验中,本研究通过选择合适的 DEG 材料、设计合理的机械传动结构、精确控制开关导通闭合以及电路中各个元件参数的合理配置,都能提高翻转品质因子 Q 从而提高电能转换功率。

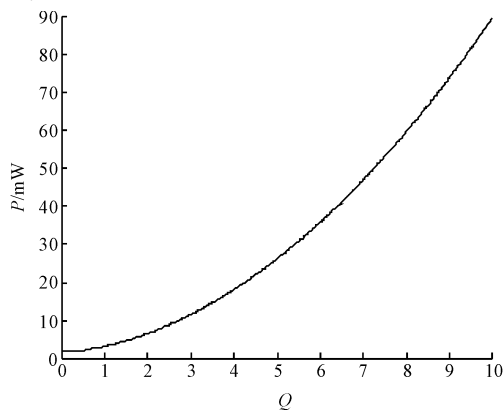


图 8 品质因子与输出功率的关系

4 结束语

本研究分析了 DEG 非线性机电能转换方法的机理和工作过程,通过 Matlab/Simulink 进行了理论模型仿真和电路仿真,分析了该非线性机电转换方法的工作过程,研究了负载电阻值及翻转品质因子对机电转换效率的影响。研究表明,相较于标准能量转换方法,非线性方法可使 DEG 电能转换量提高 2.5 倍,非线性转换使 DEG 两端电压的振幅大幅提升,沿电压轴方向扩展了能量环,能够充分发挥 DEG 的发电性能,提高机电转换效率。

该研究结论为以后进一步的研究奠定了基础,对于未来 DEG 的实物制作及实验研究也具有重要的指导作用。

参考文献 (References):

- [1] POULLIKKAS A. Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2007, 11(1): 30-56.
- [2] PELRINE R, KORNBLUH R, ECKERLE J, et al. Dielectric Elastomers; Generator Mode Fundamentals and Applications [C] // *Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD): smart structures and materials 2001*. San Diego: [s. n.], 2001: 148-156.
- [3] PAUL B, NIU Xiao-fan, PEI Qi-bing. Acrylic Interpenetrating Polymer Network Dielectric Elastomers for Energy Harvesting [C] // *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*. San Diego: [s. n.], 2011: 49-56.
- [4] IHLEFELD C M, QU Zhi-hua, A Dielectric Electroactive Polymer Generator-Actuator Model: Modeling, Identification, and Dynamic Simulation [C] // *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*, Proc. of SPIE. San Diego: [s. n.]. 2008: 1-11.
- [5] MICKAEL L, WANG Liu-qing, CLAUDE R, et al. Lumped model of bending electrostrictive transducers for energy harvesting[J]. **Journal of Applied Physics**. 2014, 116(12): 106-124.
- [6] JEAN-MISTRAL C, BASROUR S, CHAILLOUT J. Comparison of electroactive polymers for energy scavenging applications [J]. **Smart Materials and Structures**, 2010, 19(8): 1-14.
- [7] BENSLIMANE M, MICHAEL J, OUBAK T, et al. Scalable Design of DEAP for energy harvesting utilizing PolyPower [C] // *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. San Diego: [s. n.], 2011: 1-10.
- [8] ANTON S R, SODANO H A. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials [J]. **Smart Mater Struct**, 2007, 16(3): 1-21.
- [9] 刘怀民,王湘江. 三层结构导电聚合物驱动器动态特性及其建模研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(6): 783-787.
- [10] 欧阳杰,胡意立. 新型电致活化材料—介电弹性体的驱动特性研究[J]. *机电工程*, 2011, 28(10): 1203-1205.
- [11] 马丹萍,李勇,梁勤欧. 无线遥控智能小车的运动模拟及轨迹绘制[J]. *浙江师范大学学报:自然科学版*, 2015, 38(1): 116-120.
- [12] BADEL A, LAGACHE M, GUYOMAR D. Finite element and simple lumped modeling for flexural nonlinear semi-passive damping [J]. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2007, 18(7): 727-742.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

刘爱飞,鄂世举,曹建波,等. 介电弹性体发电机机电转换的非线性方法研究[J]. *机电工程*, 2016, 33(2): 191-196.

LIU Ai-fei, E Shi-ju, CAO Jian-bo, et al. Research on nonlinear approach for electromechanical conversion of dielectric elastomer generator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(2): 191-196.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>