

The Application of Modelica and PSPICE Software in the Simulation of the Micro Seismic Power Generator

Zuzhi Zhang¹, Chuan Gong²

¹Shunyi District Yang Zhen First Middle School, Beijing

²The School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing

Email: winder2000@126.com

Received: Jun. 8th, 2012; revised: Jul. 16th, 2012; accepted: Jul. 26th, 2012

Abstract: This paper conducted a modeling and simulation of the output characteristics of the micro-vibration generator by the Modelica language. To verify the rationality of the simulation results, the author also made a comparison with the PSPICE software based on the equivalent circuit method. The simulation results showed that the characteristic of the voltage curves from these methods is consistent and the amplitudes are similar. The differences of the amplitude mainly come from the diversity of the simulation process. The Modelica language directly transfers the circle equations into the mathematical equations to simulation while the PSPICE software carries out the simulation from the circuit state.

Keywords: Micro Seismic Power Generator; Modelica; PSPICE Software; Equivalent Circuit Method

Modelica 语言及 PSPICE 软件在微型振动发电机的仿真研究中的应用

张祖志¹, 龚川²

¹北京市顺义区杨镇一中, 北京

²南京师范大学物理科学与技术学院, 南京

Email: winder2000@126.com

收稿日期: 2012 年 6 月 8 日; 修回日期: 2012 年 7 月 16 日; 录用日期: 2012 年 7 月 26 日

摘要: 本文利用 Modelica 语言, 对微型振动发电机的输出特性进行了建模和仿真研究。为验证仿真结果, 基于等效电路法, 在 PSPICE 软件中建立了微型发电机模型并进行仿真分析, 最后对 Modelica 语言直接建模仿真的结果和等效电路法的结果进行对比和分析。仿真结果分析表明, 两种方法的电压曲线的特征是一致的, 幅度接近, 差异主要来源于两者的仿真过程不同, Modelica 语言是直接将电路方程处理为数学方程求解, 而 PSPICE 软件是从电路状态出发进行仿真。

关键词: 微型振动发电机; Modelica 语言; PSPICE 软件; 等效电路法

1. 引言

振动机械能是环境里应用最为广泛的能源之一, 振动式发电机通过拾振装置将外部的振动机械能转换成电能, 可以应用于各种存在微振动的环境中。由于该技术不需要消耗任何燃料或物质, 并且理论上说可以为各种低功耗电子器件提供取之不尽的能量, 因

此引起了广泛的关注。近年来科学工作者开展了对基于将外界环境振动能转换为电能的微型发电机探索研究^[1,2]。

微型振动发电机电路一般包含电路部分和机械部分, 两者之间存在复杂的机电耦合。目前大部分仿真模型是建立在含静电电容的电路基础上。Sterken 等

人^[3]利用等效电路方法来表示电路部分和机械部分,在此基础上对系统参数进行了优化。Cottone F.等人^[4]对振动发电机的非线性特性进行了详细的分析,并得出了理论公式,Tvedt 等人^[5]分别对微型振动发电机电路分别建立了线性和非线性模型,并在 PSPICE 软件中进行了仿真分析。S. Boisseau 等人^[6]利用有限元方法(FEM)详细的分析了振动过程中对电极与驻极体之间的电容值变化情况,在考虑电容边缘效应的基础上,给出了一个非线性电容的经验表达式,以此为基础分析的微型振动发电机电路的电路性能和参数优化。

Modelica 语言是为解决多领域物理系统的统一建模与协同仿真陈述式仿真建模语言。该语言的出现为多领域物理系统的仿真带来了革命性的改变,由于其灵活性和易用性,不强求开发人员必须具备专业的软件程序设计知识或微分代数方程求解知识等特点,一出现便受到开发人员的极大欢迎。目前应用 Modelica 语言对微型振动式发电机系统进行仿真研究的报道还很少,本文利用 Modelica 语言对极板纵向振动式微型发电机系统进行建模研究。为验证仿真结果,本文基于等效电路法,在 PSPICE 软件中建立了极板纵向振动式微型发电机模型并进行仿真分析,最后对两种仿真方法的结果进行对比和分析。

2. 仿真平台介绍

2.1. Modelica 仿真软件平台

Modelica 语言^[7]是为解决多领域物理系统的统一建模与协同仿真,在归纳多种建模语言的基础上,于 1997 年提出的一种基于方程的陈述式仿真建模语言。它通过描述组件的规则、模拟组件的行为、基于物理系统的直观构造来建立数学模型。Modelica 语言采用数学方程描述不同领域子系统的物理规律和现象,根据物理系统的拓扑结构,基于语言内在的组件连接机制实现模型构成和多领域集成,模型最终由一组由常微分方程、代数方程联立构成的微分代数方程(Differential-Algebraic Equations, DAE)方程组来描述,并通过求解微分代数方程组实现仿真运行。Modelica 语言可以为任何能够用微分方程或代数方程描述的问题实现建模与仿真。

Modelica 语言编程的最大特点是使用非因果的等式语句,大大降低了建模的难度。Modelica 组件之间

用连接彼此建立耦合关系,经过编译器的词法分析、语法分析、语义分析,形成一组原始的 DAE 方程组,方程组中的等式根据物理定律生成,属于不同的组件的变量放在等式的两边,这种陈述式表达的优点是实现的细节以及算法的选取对开发人员是透明的,不强求开发人员必须具备专业的软件程序设计知识或微分代数方程求解知识,很便于进行使用。

Modelica 建模软件依赖于 Modelica 语言规范。目前已开发的商用 Modelica 支持平台主要有 Dymola、MathModelica 等软件。MathModelica 由瑞典 Linköping 大学 PELAB 实验室设计开发一套基于 Modelica 语言的建模软件,它支持系统顶层的建模,并有大量的重用模型库,特点是程序编辑窗口和仿真窗口没有集成在一起,使用时要在不同的窗口间反复切换。本文文的 Modelica 语言仿真就是在 MathModelica 仿真平台中进行的。

2.2. PSPICE 电路仿真软件

PSPICE 软件是典型的电路仿真设计软件,是 MicroSim 公司 80 年代中期推出的基于 PC 机的通用电路模拟分析软件。现在的很多分析软件都是以 PSPICE 为内核、经过历年来多次改版,以其强大的功能和高度的集成性而成为个人电脑上最受欢迎的电路仿真软件。

商品化的 PSPICE 软件包主要由 5 部分组成:电路原理图输入模块 Schematics、模拟仿真模块 PSPICEAD、激励源编辑模块 Stimulus Editor、输出结果绘图模块 Probe 以及模型参数提取模块。PSPICE 支持用户通过电路原理图和电路描述网单文件 2 种方式输入所要仿真的电路。用户在 Schematics 中调用元器件符号库绘制电路原理图后,它自动将电路图转换为网单文件,以提供给仿真工具进行仿真。用户文本输入的网单文件需要满足 PSPICE 仿真程序语言的语法规则,该方式没有原理图方式直观,但在设置参数等方面比绘制电路原理图要更加灵活,并且不受元器件库的限制。仿真模块 PSPICE AD 是 PSPICE 的核心,它对电路进行模拟分析,运算出结果并自动生成输出文件和数据文件。

PSPICE 软件具有集成性高、仿真功能强大、具有模拟和数字仿真能力等特点,非常适合复杂电路的

性能分析。

3. 极板纵向振动式微型振动式发电机系统模型

下图 1 为纵向振动式微型振动式发电机的典型结构，其中上下两种材料的金属电极构成振动发电机，金属电极构成平板电容结构，其中固定极板直接与支撑结构连接，而可动极板与质量块连接，且质量块与支撑结构连接，形成弹簧加质量块的模型。质量块和悬臂梁组成了质量弹性系统，阻尼来源于运动过程中空气对物体的阻力或弹簧内部微小塑性变形等因素。当外界的振动信号源作用于发电机时，可动电极随着振动源而发生受迫振动，使得固定极板与可动极板的距离发生改变，从而使得两极板之间的电容发生改变。根据功函数原理，不同金属两极板接触存在一个稳定的电压，由于极板之间通过外部导线连接，等同与两个极板直接接触。当极板间电容发生改变时，极板间电量 $Q(t)$ 同时发生改变，其表达式为 $Q(t) = VC(t)$ ，式中 V 为由功函数产生的电压， $C(t)$ 为随时间变化电容，从而导致极板间产生电流 $i(t) = dQ(t)/dt$ 。这样实现了将振动信号转化成电流信号，即将振动能量转换成电能。

可变电容的方程式为 $C(t) = \frac{\epsilon A}{g - z(t)}$ ，式中 $C(t)$

为随时间变化的可变电容的电容值， ϵ 为极板之间的介电常数， A 为极板正对面积， g 为两极板之间的距离， $z(t)$ 为由于外界振动源而产生相应的位移。充满电荷的电极的移动，使可变电容的电容值发生改

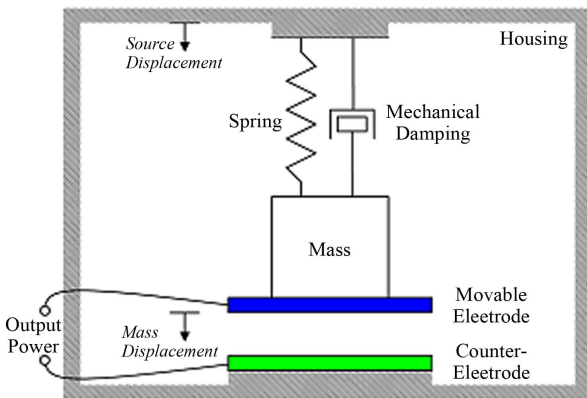


Figure 1. The electrostatic generating device utilized the work function difference of two kinds of metal constitutes
图 1. 利用不同的两种金属功函数差构成的静电发电装置

变，由于 $Q(t) = VC(t)$ ，从而使极板间电容储存的电荷量发生改变，导致电荷发生移动，并产生电流驱动外部的负载 RL ，实现了振动能量的采集过程。

发电系统的电路等效图为图 2，其电路方程为

$$i(t) = \dot{q}(t) = \frac{V_R}{R_L} = \frac{V_B - V_C}{R_L} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e \cdot R_L} \frac{q(t)}{C(t) \cdot R_L},$$

其中 R_L 为外接负载电阻， V_B 为代表固有电势而引入的固定电源， V_C 为可变电容 $C(t)$ 两端的电压。最后，系统总的振动方程为

$$\dot{q}(t) = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e \cdot R_L} - \frac{(g - z(t)) \cdot q(t)}{\epsilon \cdot A \cdot R_L} \quad (1)$$

$$\dot{z}(t) = v(t) \quad (2)$$

$$m \cdot \ddot{z} + b_m \cdot \dot{z} + k \cdot z + F_{el}(t) = f_m \quad (3)$$

$$F_{el}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{q(t)^2}{m \cdot \epsilon \cdot A} \quad (4)$$

$$f_m = -m \cdot \ddot{y} \quad (5)$$

其中静电力也可以表示为

$$F_{el}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon \cdot A \cdot v(t)^2}{(g + z(t))^2}.$$

系统的瞬时输出功率为 $P(t)$ ，

$$P(t) = i(t)^2 \cdot R_L = \frac{(\phi_1 - \phi_2)^2}{e^2 \cdot R_L} - \frac{2 \cdot (\phi_1 - \phi_2) \cdot (g - z(t)) \cdot q(t)}{\epsilon \cdot A \cdot R} + \frac{(g - z(t))^2 \cdot q(t)^2}{\epsilon^2 \cdot A^2 \cdot R_L}$$

根据文献[8]，各参数取值见附表 2。

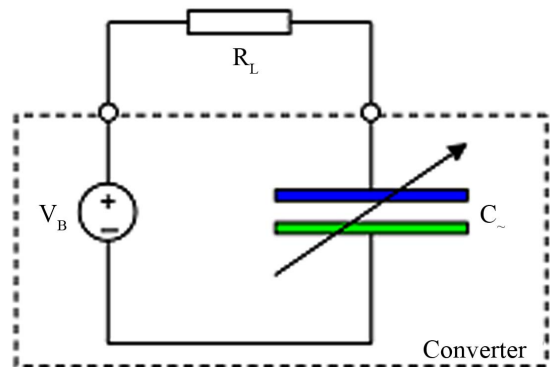


Figure 2. The equivalent circuit of the power generation system
图 2. 发电系统的电路等效图

4. 理论模型的 Modelica 语言仿真研究

4.1. 零振动情况下的仿真模拟及验证

外界振动为零情况下, $f_m = 0$, 平板电容在接通瞬间会受一个恒定静电力作用, 恒定静电力来自与平板电容在接通瞬间的电势差, 可动极板在恒力和回复力作用下发生振动, 最后停止在一个位移处, 此时速度为零。振动方程如下, 达到平衡的时间与系统阻尼系数有关。

$$k \cdot z(t) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon \cdot A \cdot v(t)^2}{(g + z(t))^2} = 0$$

平板电容在接通瞬间的电势差 $v(t) = V_b$, 代入参数计算, 求得 $z(t) = -2.2559 \times 10^{-8} \text{ m}$ 。

利用 MODELECA 编程, 程序见文章附录 1。

在 MODELECA 平台中进行仿真, 无振动情况下可动极板位移和速度瞬态特性曲线为下图 3、4。

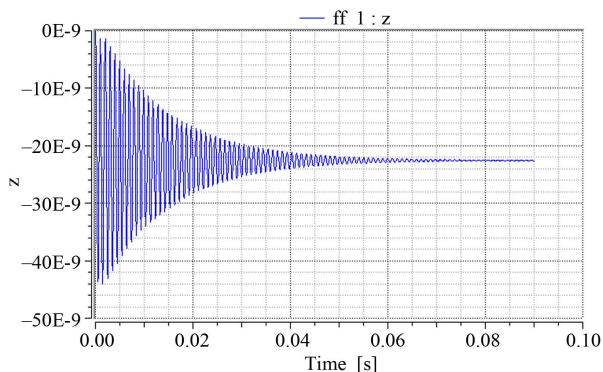


Figure 3. The moving plate displacement transient curve under the zero vibrations

图 3. 零振动情况可动极板位移瞬态曲线

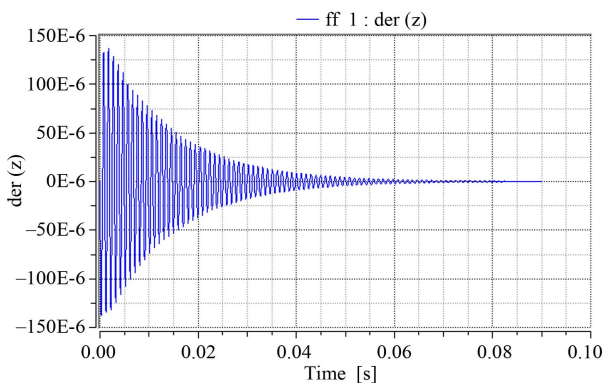


Figure 4. The moving plate speed transient curve under the zero vibrations

图 4. 零振动情况下可动极板速度瞬态特性曲线

从零振动情况下可动极板位移瞬态特性曲线图可以看出, 可动极板先从零值开始震荡, 逐渐到达稳定值, 稳定时位移值约为 22.56 nm, 与理论计算值是一致的。同时, 可动极板速度从零值开始震荡, 稳定时值为零, 和分析是一致的。

4.2. 外界周期性振动情况下仿真模拟及验证

由文献[8]知当外界有周期性振动时, 可动极板受到一个大小为 $111\text{E-}6 \text{ N}$, 频率为 1000 HZ 的周期力作用。在 MODELECA 平台中进行仿真, 周期振动情况下可动极板位移和速度瞬态特性曲线为下图 5、6。

从可动极板位移和速度瞬态特性曲线可以看出, 可动极板先从零值开始震荡, 稳定后波形为周期振动, 位移幅度约为 $2.759\text{E-}6 \text{ m}$, 速度幅度约为 0.0176 m/s 。

外接电阻两端的输出电压曲线为下图 7。

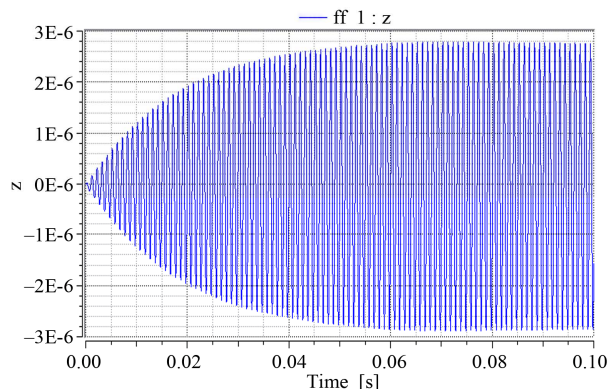


Figure 5. The moving plate displacement transient curve under the periodic vibrations

图 5. 周期振动情况下可动极板位移瞬态特性曲线

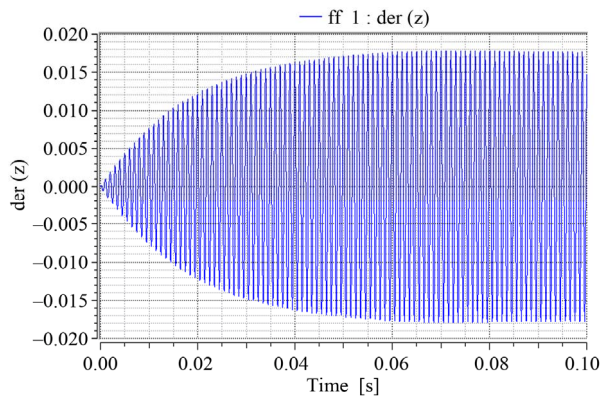


Figure 6. The moving plate speed transient curve under the periodic vibrations

图 6. 周期振动情况下可动极板速度瞬态特性曲线

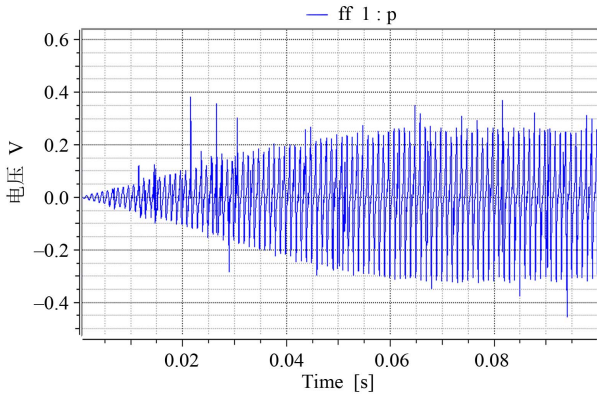


Figure 7. The output voltage curve of the external resistance under the periodic vibrations
图 7. 周期振动情况下外接电阻两端的输出电压曲线

从外接电阻两端的输出电压曲线可以看出，输出电压先从零值开始震荡，逐渐稳定在一个特定值，稳定时电压幅度约为 257 mV。

5. 理论模型的等效电路模型仿真研究

5.1. 等效电路的模型

整个电路的等效电路如图 8，其中 R_L 为外接负载电阻， V_B 为代表由固有电势而引入的固定电源， $C(t)$ 为可动电极与固定电极构成的非线性可变电容。

1) 机电耦合

非线性可变电容部分是整个电路的关键部分，这部分实现了机械能向电能的转换，故先对非线性可变电容部分做受力分析^[9]。如图 9。

可变电容的静电能 W_e 可表示为：

$$W_e = \frac{q_t^2}{2C(x_t)} = \frac{q_t^2(d+x_t)}{2\varepsilon_0 A}, \quad d \text{ 为初始状态时可动电极}$$

与固定电极的间距， x_t 为微振条件下可动电极对于对固定电极的位移， A 为可动电极对于对固定电极的正对面积，微振情况下，有 $C(x_t) = \frac{\varepsilon_0 A}{(d+x_t)}$ 为电容值，

其中 d 为初始条件下可动电极与固定电极间距； x_t 为可动电极与固定电极间距变化量。

由能量关系^[10]有：

$$\begin{aligned} dW_e &= v_t dq_t + F_{el} dx_t \\ &= \left(\frac{\partial W_e}{\partial q_t} \right)_{x_t = \text{const}} dq_t + \left(\frac{\partial W_e}{\partial x_t} \right)_{q_t = \text{const}} dx_t, \end{aligned}$$

v_t 为可动电极与固定电极的电压值， F_{el} 为可动电极与

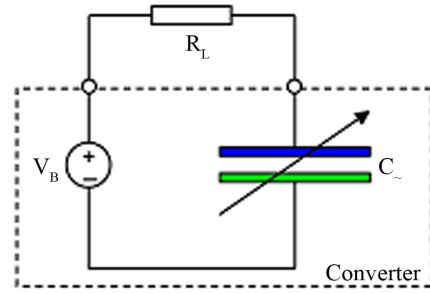


Figure 8. The equivalent circuit of the power generation system
图 8. 发电系统的电路等效图

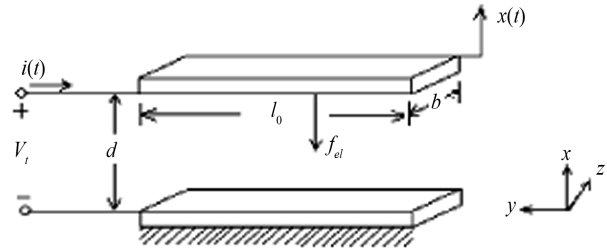


Figure 9. The stress analysis of the variable capacitor
图 9. 可变电容的受力分析

固定电极间的静电力，则有：

$$\begin{aligned} v_t &= \left(\frac{\partial W_e}{\partial q_t} \right)_{x_t = \text{const}} = \frac{q_t(d+x_t)}{\varepsilon_0 A}, \\ F_{el} &= \left(\frac{\partial W_e}{\partial x_t} \right)_{q_t = \text{const}} = \frac{q_t^2}{2\varepsilon_0 A}, \end{aligned}$$

静电力 F_{el} 也可表示为电压 v_t 的函数：

$$F_{el} = \frac{\varepsilon_0 A v_t^2}{(d+x_t)^2}.$$

由能量关系有：

$$\begin{aligned} v_t &= \left(\frac{\partial W_e}{\partial q_t} \right)_{x_t = \text{const}} = \frac{q_t(d+x_t)}{\varepsilon_0 A}, \\ F_{el} &= \left(\frac{\partial W_e}{\partial x_t} \right)_{q_t = \text{const}} = \frac{q_t^2}{2\varepsilon_0 A} \end{aligned}$$

2) 等效电路模型

非线性可变电容的作用是将输入的间距变化量 x_t 转化为交流电信号 v_t 输出，如果将间距变化量 x_t 类比为电压 $u(t)$ 的积分量，则可变电容的作用等价与一个二端口网络利用 PSPICE 中多项式受控源^[11]，通过类比来建立等效电路，其中速度类比为电压，力类比为电流，得到的等效电路如图 10。

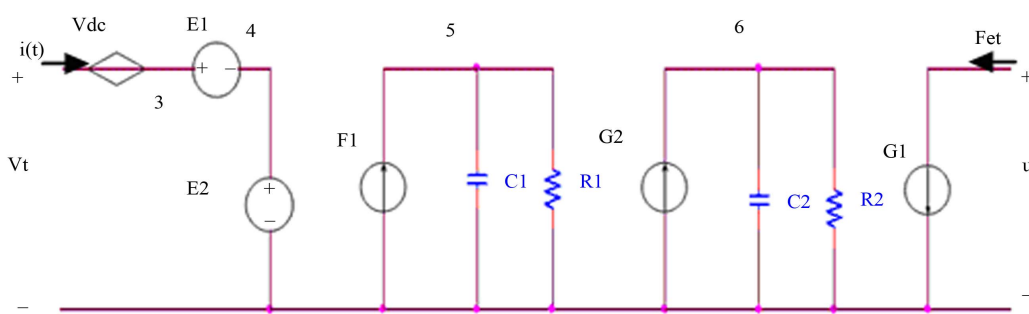


Figure 10. The equivalent circuit of the variable capacitor
图 10. 可变电容的等效电路图

其中电压源 E_1 的电压值表示 $\frac{q_t d}{\epsilon_0 A}$ ，电压源 E_2 的电压值表示 $\frac{q_t x_t}{\epsilon_0 A}$ ，总输出电压 $V_t = E_1 + E_2 = \frac{q_t d}{\epsilon_0 A} + \frac{q_t x_t}{\epsilon_0 A}$ 表示可动电极与固定电极间的电压值。通过电流源 G_1 的电流值为 $I = \frac{q_t^2}{2\epsilon_0 A}$ ，表示可动电极与固定电极间的静电力。

下面对机械系统部分做等效电路分析。在图 11 中，根据电路基尔霍夫定律有：

$C \frac{dv(t)}{dt} + \frac{1}{R} v(t) + \frac{1}{L} \int v(t) dt + f_m = i(t)$ ，通过 $F-I$ 类比，将电压 $v(t)$ 类比为速度 $\dot{x}(t)$ ，电流 $i(t)$ 类比为静电力 f_{el} ，电流源 f_m 类比为外力 f_m ，可得到如下的等效电路(见图 12)。

根据电路基尔霍夫定律有 $m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + f_m = f_{el}$ ，即为牛顿第二定律形式。其中质量 m ，空气阻尼系数的倒数 $1/c$ ，回复力系数的倒数 $1/k$ 分别类比为电容 C 、电阻 R 、电感 L 。

系统总的等效电路示意图为图 13。

5.2. 等效电路的 PSPICE 仿真与验证

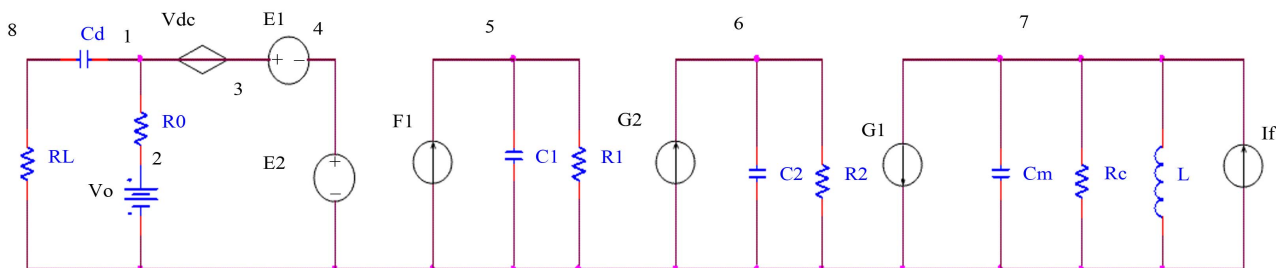


Figure 13. The equivalent circuit of total system
图 13. 系统总的等效电路示意图

5.2.1. 零振动情况下的仿真模拟及验证

将以上电路利用 PSPICE 软件进行仿真，零振动情况下电流源 f_m 的幅值为 0，此时可动极板位移和速度瞬态特性曲线为图 14、15。

从可动极板位移和速度瞬态特性曲线可以看出，可动极板位移和速度都是先从零值开始震荡，逐渐到达稳定值，稳定时位移值约为 22.39 nm，速度值约为 0。振荡曲线和理论分析及 Modelica 仿真结果符合很好。

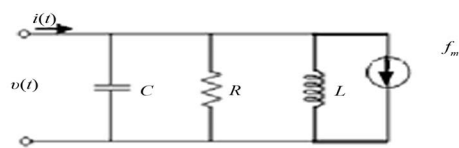


Figure 11. The RLC parallel circuit
图 11. RLC 并联电路

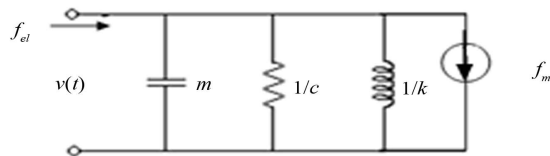


Figure 12. The RLC parallel circuit with electromechanical analogy
图 12. 机电类比的 RLC 并联电路

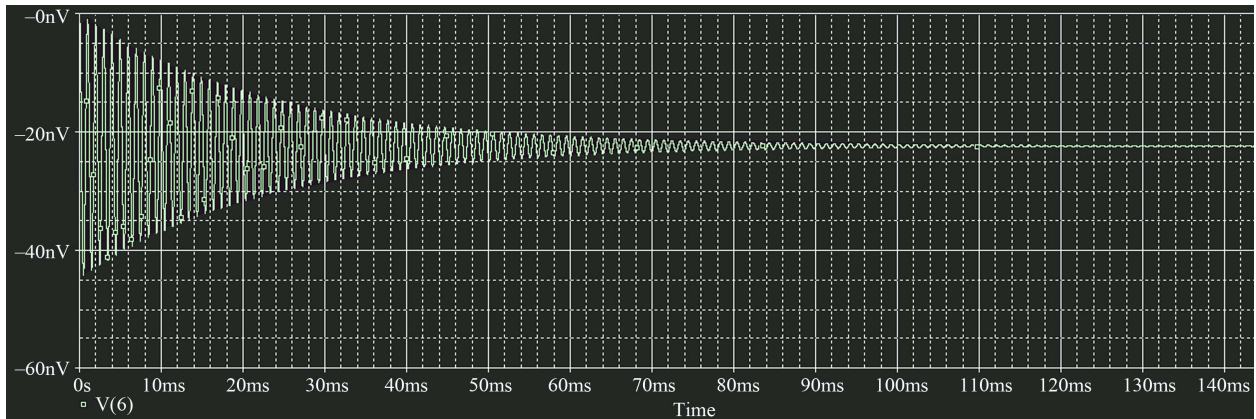


Figure 14. The moving plate speed transient curve under the zero vibrations
图 14. 零振动情况下可动极板速度瞬态特性曲线

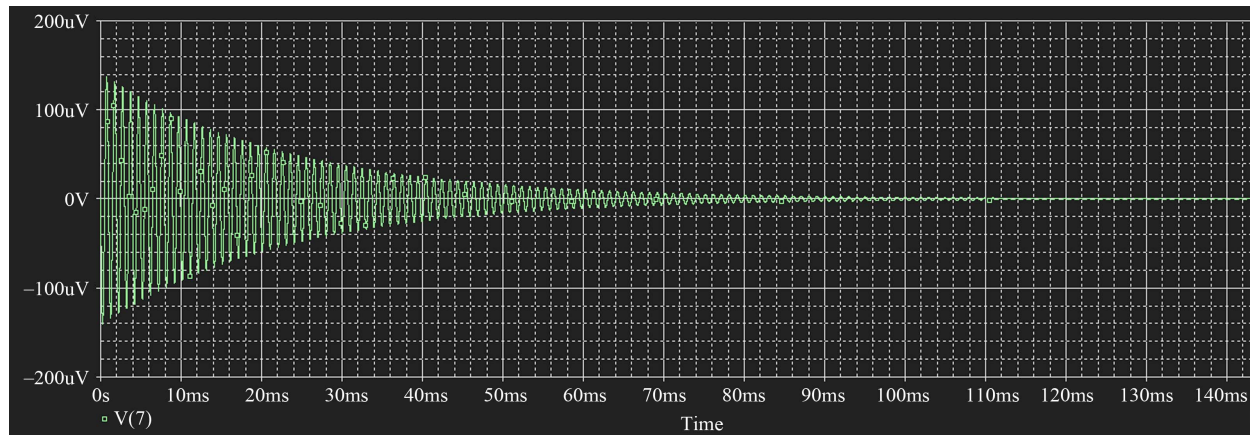


Figure 15. The moving plate displacement transient curve under the zero vibrations
图 15. 零振动情况下可动极板位移瞬态特性曲线

5.2.2. 外界周期性振动情况下仿真模拟及验证

当外界有大小为 0.312 mm、周期为 1000 HZ 振动时，等价与在电路右端设置一个幅度为 111 UV，频率为 1000 HZ 的电流源。在 PSPICE 软件中对电路进行仿真，其可动极板位移和速度瞬态特性曲线为图 16、17。

从可动极板位移和速度瞬态特性曲线可以看出，可动极板也是先从零值开始震荡，稳定后波形为周期振动，位移幅度约为 $2.7025E-6$ m，速度幅度约为 0.0172 m/s，与 Modelica 仿真结果符合很好。外接电阻两端的输出电压曲线为图 18。

从外接电阻两端的输出电压曲线可以看出，输出电压先从零值开始震荡，逐渐稳定在一个特定值，稳定时电压幅度约为 210.3 mV。与 Modelica 仿真结果比较，电压曲线的特征是一致的，电压幅度也很接近，表明设计的等效电路可以有效的模拟原始电路的电

学特性。同时，从输出电压曲线可以看出，Modelica 仿真结果有一些突起值，而 PSPICE 下输出电压曲线较平滑整齐，这是由于两者采用了不同的算法进行仿真计算所导致的。Modelica 语言采用数学方程描述系统现象，通过求解微分代数方程系统实现仿真运行，是一种直接处理的方法；PSPICE 程序采用改进节点法列出电路方程，用变步步长的隐式积分法进行仿真分析，是一种逐步逼近的方法。同时，Modelica 平台仿真基于的是电路方程，电路理论模型的精确程度也一定程度上也会影响求解结果。

6. 结论

根据驻极体电路与直流偏压电容电路等效的思想，构造了驻极体电路的等效电路拓扑结构图，并利用 PSPICE 对电路进行了模拟仿真，其结果与利用 Modelica 平台的仿真结果比较可知：

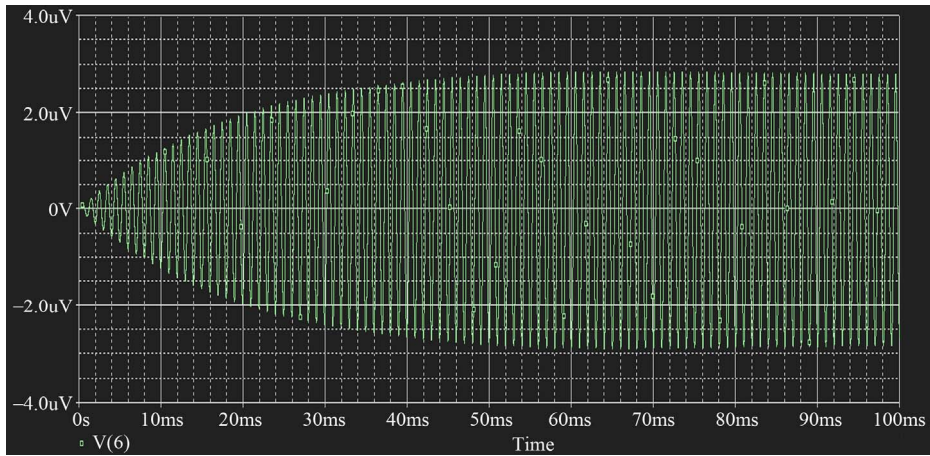


Figure 16. The moving plate displacement transient curve under the periodic vibrations
图 16. 周期性振动情况下极板位移瞬态特性曲线

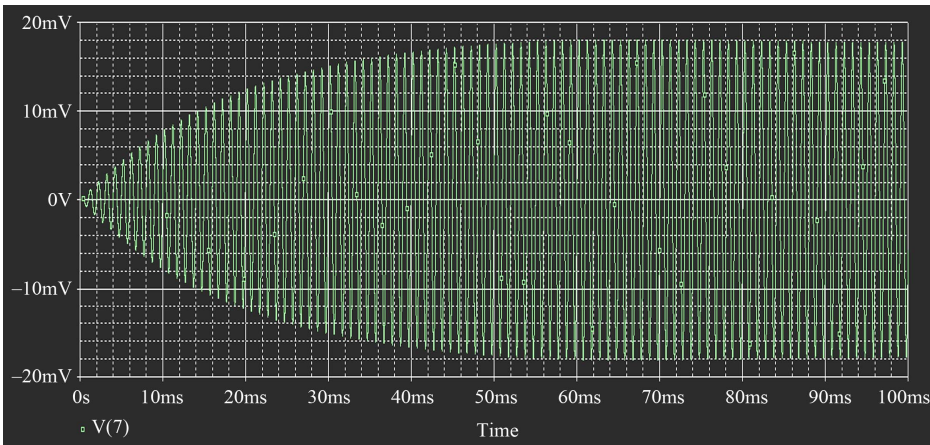
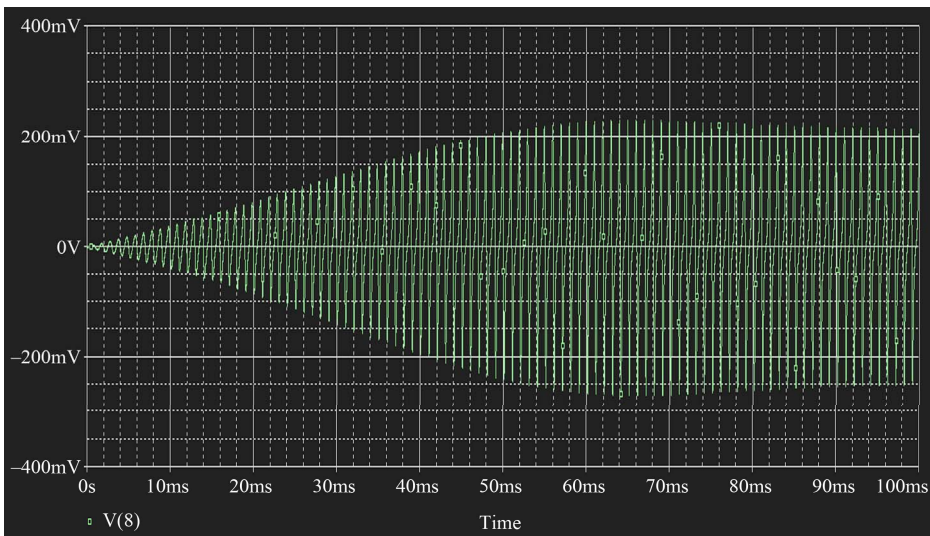


Figure 17. The moving plate speed transient curve under the periodic vibrations
图 17. 周期性振动情况下极板速度瞬态特性曲线



周期振动情况下的输出电压 V

Figure 18. The output voltage curve of the external resistance under the periodic vibrations
图 18. 周期性振动情况下外接电阻两端的输出电压曲线

零振动情况下, 可动极板位移和速度瞬态特性曲线先从零值开始震荡, 逐渐到达稳定值, 稳定时位移值约为 22.39 nm 和 22.56 nm, 速度值都为 0。理论分析的结果稳定时位移值约为 22.56 nm, 速度值为 0。两种软件的仿真结果符合很好。

周期振动情况下, 可动极板也是先从零值开始震荡, 稳定后位移与速度为波形为周期曲线, 位移幅度约为 $2.7025E-6$ m, 速度幅度约为 0.0172 m/s, Modelica 仿真结果中位移幅度约为 $2.759E-6$ m, 速度幅度约为 0.0176 m/s。外接电阻两端的输出电压曲线从零值开始震荡, 逐渐稳定在一个特定值, 稳定时电压幅度约为 210.3 mV, Modelica 仿真结果为 257 mV, 电压曲线的特征是一致的, 电压幅度也很接近, 表明通过 MODELICA 语言建立的模型进行仿真的方法, 在一定程度上模拟原始电路的电学特性。电压幅度的差异, 主要是由于 Modelica 平台是直接将电路方程处理为数学方程求解, 和 PSPICE 软件从电路状态出发进行仿真的思路不同, 故在最后的稳定的输出幅值上有一定差异。同时, Modelica 平台仿真基于的是电路方程, 电路理论模型的精确程度也一定程度上也会影响求解结果。本文的下一步将进一步分析电路的耦合特性和理论模型, 在更准确的电路模型基础上利用 Modelica 平台进行仿真研究。

参考文献 (References)

- [1] R. Guillemet, P. Basset. Design optimization of an out-of-plane gap-closing electrostatic Vibration Energy Harvester (VEH) with a limitation on the output voltage. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2012, 71(1): 39-47.
- [2] C. P. Le, E. Halvorsen. MEMS electrostatic energy harvesters with end-stop effects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(7): Article ID: 074013.
- [3] T. Sterken, G. Altena, P. Fiorini and R. Puers. Characterisation of an electrostatic vibration harvester. *Dans Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOE*, Stresa, 2007: 297-300.
- [4] F. Cottone, H. Vocca and L. Gammaitoni. Nonlinear energy harvesting. *Physical Review Letters*, 2009, 102(8): Article ID: 080601.
- [5] L. G. W. Tvedt, L.-C. J. Blystad and E. Halvorsen. Simulation of an electrostatic energy harvester at large amplitude narrow and wide band vibrations. *Dans Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOE*, Nice, 2008: in press.
- [6] S. Boisseau, G. Despesse and A. Sylvestre. Optimization of an electret-based energy harvester. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(7): 1-10.
- [7] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 127-135.
- [8] 郭海波. 基于 Modelica 语言的反作用飞轮多领域建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2011, 3: 598-602.
- [9] H. A. C. Tilmans. Equivalent circuit representation of electro-mechanical transducers: I. Lumped-parameter systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1996, 6(1): 157-176.
- [10] 李晓雷, 俞德孚, 孙迎春. 机械振动基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [11] U. Bartsch, C. Sander, M. Blattmann, J. Gaspar and O. Paul. Influence of parasitic capacitances on the power output of electret-based energy harvesting generators. *Power MEMS*, 2009: 332-335.

附录 1. 纵向振动发电机等效电路的 Modelica 模拟原程序

```

model lengthways
  parameter Real Rl=110000.0;
  parameter Real v1=2.27;
  parameter Real g=4e-06;
  parameter Real e=8.85e-12;
  parameter Real A=3.6e-05;
  parameter Real m=5.67e-05;
  parameter Real b=0.00494;
  parameter Real k=2300;
  Real q;
  Real C;
  Real i;
  Real x;
  Real z(start=0);
  Real v2;
  Real f2;
equation
  i=der(q);
  f2=0;
  C=e*A/(g + z);
  i=v1/Rl - q/(C*Rl);
  x=der(z);
  m*der(x) + b*der(z) + k*z + 0.5*q*der(e*A)=f2;
  v2=i*Rl;
end lengthways.

```

纵向振动发电机等效电路的 Modelica 模拟

*外接负载电阻 R_L *

平板电容在接通瞬间的电势差

两极板之间的距离

真空绝对介电常数

极板正对面积

可动极板的质量

系统阻尼系数

系统回复力系数

外界振动的惯性力

外界零振动情况

*振动方程 $m \cdot \ddot{z} + b_m \cdot \dot{z} + k \cdot z + F_{el}(t) = f_m$ *

附录 2. 对电极横向运动电路的元件参数

模拟参数名称	取值	单位
极板正对面积 A	36.00	mm^2
A1 的功函数 ϕ_1	4.08	ev
Pt 的功函数 ϕ_2	6.35	ev
系统阻尼系数 b_m	4.94	g/s
系统回复力系数 k	2300	kg / s^2
相对电容率 (空气) ϵ	1.00	
外界振动的频率 f	1K	Hz
外界振动的振幅 Y	0.312	mm
可动极板的质量 m	5.67E-2	g
两极板之间的距离 g	4	μm
外接负载电阻 R_L	110	$k\Omega$