

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0025-05

电感储能系统驱动虚阴极振荡器数值研究*

杨汉武, 钟辉煌, 张建德

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:应用 PSpice 程序构建了一种比较符合实验实际的电感储能系统驱动反射三极管虚阴极振荡器的等效电路模型, 研究了虚阴极中的电流电压关系, 以及电爆炸丝切断开关和脉冲变压器的作用。具体介绍了电爆炸丝和虚阴极振荡器的计算模型。计算结果给出了脉冲变压器、电爆炸丝和虚阴极振荡器的参数选择对负载上获得的电压、电流的影响。

关键词:电感储能; 脉冲变压器; 电爆炸丝; 虚阴极

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A

Numerical Study of Vircator Driven by an Inductive Storage System

YANG Han-wu, ZHONG Hui-huang, ZHANG Jian-de

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: PSpice equivalent circuit is created to simulate the process of a Vircator driven by an inductive storage system. Current through and Voltage across the Vircator are investigated using the circuit. The models for electric exploding wires and vircator are established, which could be used to quickly form the simulation circuit and obtain the simulation results. Numerical results show that parameters of the pulse transformer and the electric exploding wires along with the transparency of the anode foil affects the voltage and the current of the Vircator load.

Key words: Inductive storage; pulse transformer; electric exploding wires; Vircator

1 引言

电感储能系统的优点是储能密度比电容器储能系统高得多, 特别是爆炸磁压缩装置研究的进展使得电感储能系统具有良好的应用前景。利用电感储能系统来驱动高功率微波器件以产生高功率微波是可能的^[1]。但爆磁压缩装置不能直接提供高电压、快上升前沿的脉冲, 尽管目前通过改进爆磁压缩装置的设计如使用轴向同时起爆技术和级联技术^[2]已经使得输出电压有了一定的提高。为此发展了脉冲功率调制系统, 一般是由脉冲变压器和电爆炸丝切断开关构成, 用于改善爆磁压缩装置输出的波形: 压缩脉宽和提高电压。

本文考察了一个典型的电感储能系统驱动高功率微波器件的电路, 考虑到脉冲功率调制系统的参数与所带负载有密切的关系, 这里使用反射三极管型虚阴极振荡器作为负载, 以较准确地研究整个系统的实际工作状况。通过数值模拟考察电路中脉冲变压器、电爆炸丝和虚阴极振荡器的性能, 可以得到各种参数的变化规律, 如电爆炸丝的参数(截面积、根数和长度), 脉冲变压器的参数和虚阴极振荡器参数等。希望得到一组较为优化的参数, 以指导各元件的设计和确定实验方案。文中采用电容器作为初级能源, 其优点是可以在实验室中进行实验研究, 进一步的研究中它可以被一个爆磁压缩装置所代替。

PSpice 程序是一种通用的模拟电路仿真软件^[3], 具有友好的用户界面和可靠的计算能力, 支持用户创建模块。它非常适用于本文的等效电路研究。

* 收稿日期: 2000-12-18
基金项目: 国家 863 高技术资助项目 (863-410-7)
作者简介: 杨汉武 (1974-), 男, 博士生。

2 系统等效电路

图1是电感储能系统驱动虚阴极振荡器的等效电路模型。工作过程为：初级电容器 C_1 被充电至电压 U_0 ，然后向脉冲变压器 XForm1 放电，当流过电爆炸丝 EEOS1 的电流（即变压器副边电流）达到最大值时，电爆炸丝切断。根据流过电感的电流不能突变的原理，副边将产生一个高电压脉冲，使得负载二极管（虚阴极振荡器）的击穿开关导通，从而电压施加在二极管负载 VC 上。图中 $LSP1$ 、 $LSP2$ 、 $LSP3$ 是回路各处的杂散分布电感； $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 是回路中的等效分布电阻；电容器 C_2 为回路的分布电容。

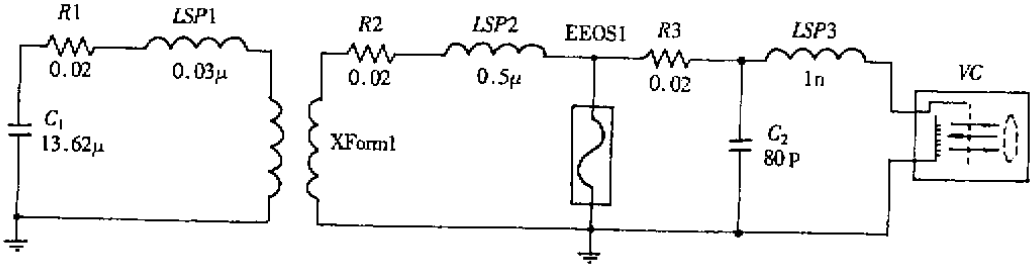


图1 电感储能系统驱动虚阴极振荡器电路示意图
Fig.1 Schematic of inductive storage driven Vircator circuit

在图1电路图中使用了三个由 PSpice 模型描述的元件：脉冲变压器 XForm1、电爆炸丝 EEOS1 和虚阴极二极管 VC。它们的模型设计尤其是后二者的设计是数值模拟中的重点，必须使用恰当模型以尽可能接近器件的实际工作情形。

3 器件模型设计

3.1 脉冲变压器

由于 PSpice 程序提供的变压器模型不具有设定原边和副边的初始电流的功能，所以需要重新设计变压器器件。这里使用了两个耦合的电感来描述脉冲变压器，定义它们之间的耦合系数 K 和每个电感的电感值 $L1$ 、 $L2$ 和初始电流参数 $I10$ 、 $I20$ 。该模型忽略了变压器的分布电容，将使计算结果比实验值理想，但由于分布电容极小，差别并不太大。

3.2 电爆炸丝

电爆炸丝切断开关的模型种类很多^[4]，本文是在比较了各种模型之后，采用了一种半经验的分段函数模型，它和实验结果吻合比较好。对于金属铜爆炸丝，电阻 R_{eb} 按如下规律变化^[5]：

$$\begin{aligned}
 R_{eb} &= \frac{l}{S} \alpha(W) \gamma(W) \\
 \frac{dW}{dt} &= \frac{I_{eb}^2 \cdot R_{eb}}{l \cdot S} \\
 \alpha(W) &= \rho_i + \beta_i (W - W_i) \\
 \begin{cases} \gamma(W) = 1; & W \leq W_s \\ \frac{d\gamma(W)}{dt} = \frac{\gamma(W) \nu(W)}{r_0}; & W > W_s \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $S = N\pi r_0^2$ 是电爆炸丝的总截面积， N 是电爆炸丝的根数， r_0 是一根电爆炸丝的半径， l 为电爆炸丝的长度， W 是电爆炸丝上沉积的能量密度， W_i 和 W_s 是经验值， ρ_i 是爆炸导体的电阻率， $\gamma(W)$ 为 W 的分段函数； ρ_i 和 β_i 是经验系数， $\gamma(W)$ 是考虑到爆炸导体膨胀的修正系数， $\nu(W)$ 是爆炸丝半径的膨胀速度。

通过在上述的变化电阻上串联一个小电感可以来模拟电爆炸丝自身的分布电感 L_{eb} （其值由实验测

定)。综上，模型的宏观输入参数是： $N, D = (2r_0), l, L_{cb}$ 。

3.3 虚阴极振荡器

从电路的观点，虚阴极振荡器是一个具有某种电流-电压特性的真空器件^[5]（这比虚阴极振荡器的粒子模拟做了许多简化，但在一定范围内仍是正确的）。对非相对论情形可以由 Child-Langmuir 定律来描述二极管的特性。如考虑到阳极等离子体的扩散而引起二极管闭合和二极管阳极箔的透过率，则二极管电流-电压关系可以用（2）式表达^[6]，

$$\begin{cases} I_d = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} I_0 \frac{S_b}{(d - v_p t)^2} \frac{1 - \kappa^2}{1 + \kappa^2} (\gamma_0^2 - 1)^{3/2} \\ \gamma_0 = 1 + \frac{eU_d}{m_0 c^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $I_0 = 17 \text{ kA}$ ， v_p 为阴阳极间的等离子体扩散速度（20 ~ 60mm/ μs ）， S_b 是阳极电子束截面积， κ 为阳极箔的透过率， d 为阴阳极间的间距。

（2）式中没有考虑二极管微波辐射的因素。如果虚阴极振荡器的辐射效率为 η ，电流 I_{dr} ：修正为：

$$I_{dr} = I_d (1 + 2\eta), \quad (3)$$

实际上， η 值一般比较低，完全可以在计算中忽略，而并不引入很大的误差。

在此模型中还需要考虑一个自击穿开关（火花隙），它在电压达到击穿阈值 V_b 后导通，使得电压脉冲加到虚阴极上。模型的宏观输入参数为：击穿电压 V_b ， κ ， S_b ， d 和 v_p 。以上数据均可以根据实验数据确定。

4 计算结果与分析

以上模型的输入参数见表 1：

表 1 数值模拟输入参数

Tab.1 Input parameters for the simulation

C_1 (μF)	U_0 (kV)	C_2 (μF)	$R1$ (Ω)	$R2$ (Ω)	$R3$ (Ω)	$LSP1$ (μH)	$LSP2$ (μH)	$LSP3$ (nH)	K	$L1$ (μH)	$L2$ (μH)
13.62	35	80	0.02	0.02	0.02	0.03	0.5	1.0	0.8	1.4	21.76
$I10$ (kA)	$I20$ (kA)	l (mm)	D (mm)	N	L_{cb} (μH)	V_b (kV)	κ	v_p (mm/ μs)	S_b (mm^2)	d (mm)	
0	0	680	0.06	16	0.5	250	0.6	45.0	8000	16	

图 2 显示的二极管电流、电压曲线即为上述参数的计算结果。电容器放电 2.46 μs 后二极管开关击穿，获得电压峰值 363.4kV，脉冲半高宽度 201ns，电流峰值 13.6kA，二极管输入功率峰值为 4.71GW，若微波辐射功率为 2%，则微波输出功率可为 100MW 量级。可见经过脉冲整形电路，负载上峰值电压可以达到初级能源电压的 10 倍。

运用程序的参数分析功能，可以研究某个参数对系统的影响。图 3 所示为脉冲变压器耦合系数 K 从 0.6 到 1 变化时对系统的影响。可以看出，提高变压器耦合系数可提高负载上所获得的电压，而提高系统性能。但耦合系数的提高正是设计工作中的难点，故需要在工程上采取折衷方案，寻找工程上的最佳值。

图 4 所示为电爆炸丝根数（10 ~ 34）对系统的影响，电爆炸丝根数（或总截面积）主要控制了电爆炸丝切断的时间，而对负载上获得的电压影响不显著。根数愈多，则需要愈长的时间才发生切断，这与文献 [3] 中所给出的结论是一致的。

图 5 所示为二极管阳极箔透过率（0.1 ~ 0.9）对二极管电流、电压的影响。在前端功率调制系统完全相同的情况下，透过率愈大则二极管阻抗愈低，导致愈低电压和愈大电流。同时这也说明了在等

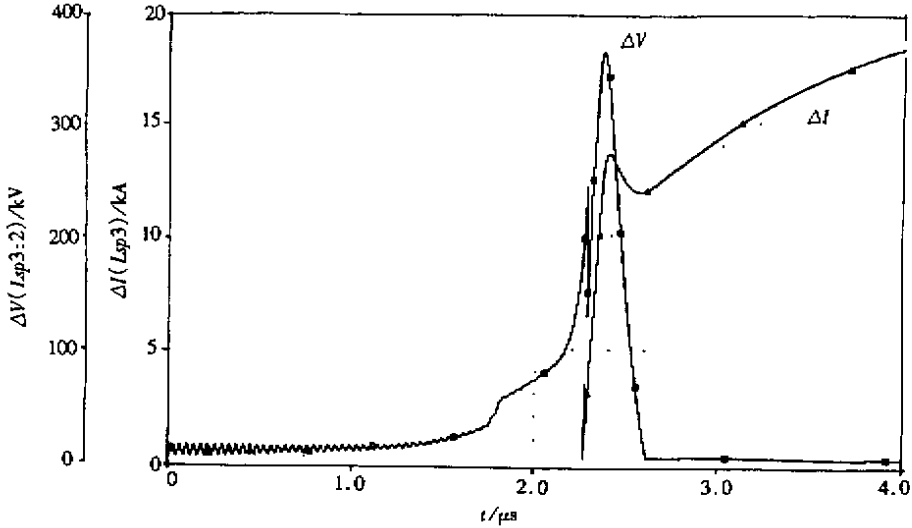


图2 虚阴极振荡器的电压电流计算结果

Fig.2 Calculated voltage and current of Vircator

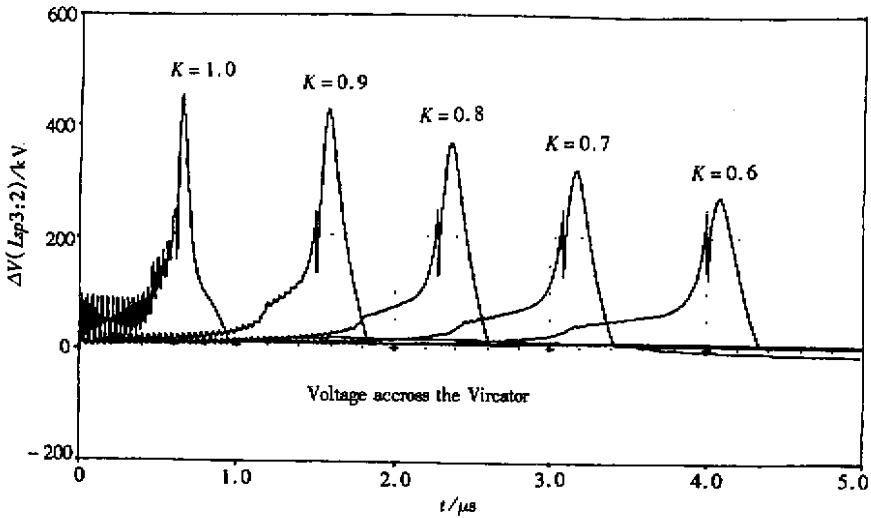


图3 脉冲变压器的耦合系数对虚阴极振荡器电压的影响

Fig.3 Transformer coupling affects the voltage across Vircator

效电路研究中考虑负载的必要性。

类似地,利用以上的等效电路模型也可以就其它参数进行分析。通过本文的等效电路模型,可以在具体实验之前得到优化的参数,以减少不必要的实验费用。

5 结论

本文的等效电路模型与实验的宏观参数一一对应,应用方便,可以快速评价电感储能系统驱动虚阴极振荡器电路的运行。计算的结果表明,脉冲变压器和电爆炸丝的参数选择均存在一个最佳值,这时负载上得到最高的功率,因此在实验设计中应遵循这一趋势,使得设计达到优化。进一步的研究可创建爆磁压缩装置的模型代入上述电路,并且与实验结果进行比较,以完善模型。

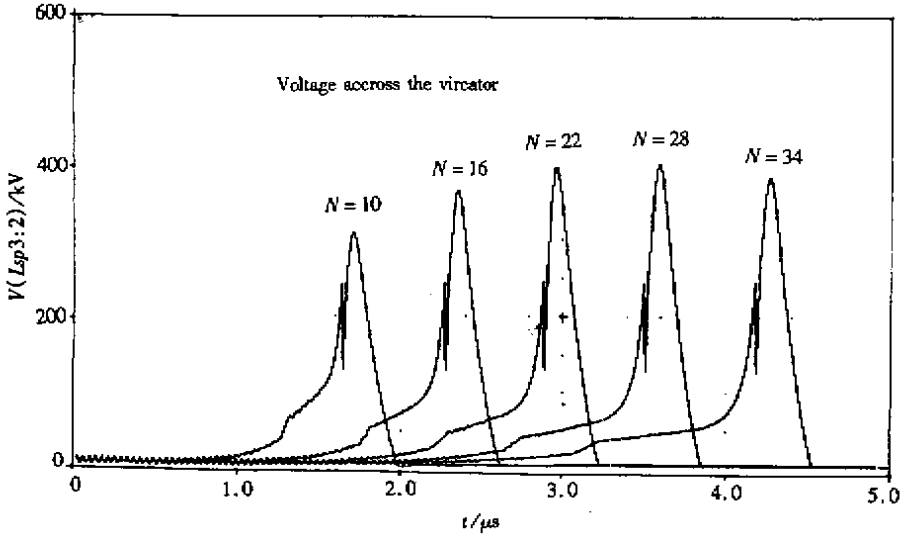


图4 电爆炸丝根数对虚阴极振荡器电压的影响
Fig.4 Number of exploding wires affects the voltage across Vircator

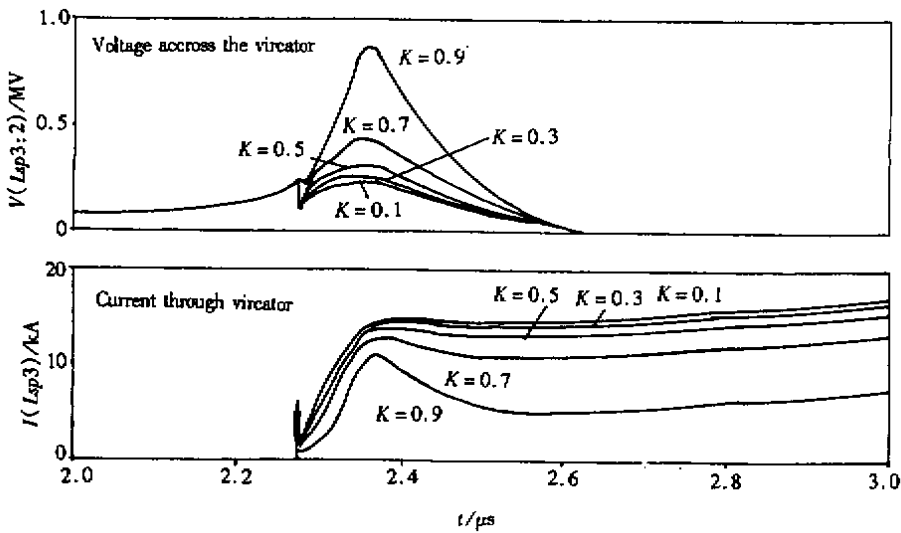


图5 阳极箔透过率对虚阴极电压、电流的影响
Fig.5 Anode foil transparency affects the voltage and current of the Vircator

参考文献：

[1] 杨汉武, 钟辉煌. 电感储能高功率微波系统的数值模拟 [J]. 国防科技大学学报 (增刊), 2000, 22 : 35 ~ 37.
 [2] 陈冬群, 李传庐, 刘永贵等. 柱锥级联形爆磁压缩发生器的实验研究 [J]. 国防科技大学学报 (增刊), 2000, 22 : 89 ~ 93.
 [3] 张玉平. 通用电路模拟技术 [M]. 机械工业出版社, 1999.
 [4] 杨汉武, 钟辉煌. PSpice 模型用于电爆炸丝的数值模拟 [J]. 国防科技大学学报 (增刊), 2000, 22 : 38 ~ 42.
 [5] V. P. Grygryev, A. G. Potashev, T. V. Koval. User's Instruction for the Use of Electric Circuit Simulation With Using the Code REFORM. (Version 2. 0) [CP]. 1997.
 [6] R. B. Miller. Intense Charged Particle Beams [M]. Plenum Press, New York. 1982 : 432.

