

# 一种新型的高功率微波脉冲功率源研究

廖旭, 任学藻, 周自刚, 李正红

(西南科技大学理学院 四川 绵阳 621010)

**【摘要】**从微波器件角度提出一种新型脉冲功率源, 采用脉冲空心变压器技术路线, 通过特殊设计, 使初级线圈不仅为次级线圈提供变化磁通, 也产生脉冲高压, 脉冲高压对脉冲形成线充电, 然后产生微波器件需要的电子束, 同时初级线圈也可以为微波器件提供相应较强的引导磁场, 从而实现脉冲功率源同时为微波器件提供电子束和相应的引导磁场。该新型脉冲功率源可以在一定工作范围内较好地提高脉冲功率源的利用效率, 尤其是在小型化结构方面更为明显。

**关键词** 脉冲空心变压器; 高功率微波; 形成线; Tesla变压器

中图分类号 TN61

文献标识码 A

## Investigation of a Novel Pulse Power Supply for High Power Microwave

LIAO Xu, REN Xue-zao, ZHOU Zi-gang, LI Zheng-hong

(Science College, Southwestern University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621021)

**Abstract** An air core pulse transformer is specially designed to provide the high power electron beam and required magnetic field for the high power microwave device simultaneously. First, the primary coils produce the changing magnet field after the primary capacitor discharges. Then a high voltage pulse is induced in the secondary coils to charge the Pulse Form Line (PFL). The magnetic field produced by the primary coils can keep a very high value when the voltage on PFL reaches the required value (not the highest value). Finally, the main switch is triggered when the required value of the voltage on PFL is reached. So the power supply can provides the electron beam and the required guiding magnet field for microwave device simultaneously when it is properly designed.

**Key words** air core pulse transformer; high power microwave; form line; Tesla transforme

高功率微波利用脉冲功率提供脉冲高压<sup>[1]</sup>, 产生驱动微波管的电子束。在微波管中, 束波转换效率同电子束引导磁场的关系密切<sup>[2]</sup>。通常, 引导磁场是外加的, 而且可以是超导磁铁<sup>[3]</sup>, 缺点是整个设备的体积大、重量大、运行成本高、效率低<sup>[4]</sup>。目前大多数脉冲功率源采用变压器技术, 在变压器磁芯中的磁场较强, 不仅可以产生脉冲高压, 还可以为微波器件提供引导磁场。如采用脉冲空心变压器技术路线, 通过特殊设计, 初级线圈不仅为次级线圈提供变化磁通产生需要的高压脉冲, 同时也为微波器件提供相应的引导磁场, 这样的技术路线可以在一定工作范围(如脉冲功率电压较低的情况)内提高脉冲功率源的利用效率, 尤其是在小型化结构方面<sup>[5-9]</sup>更是如此。

### 1 电路分析(双共振电路)

脉冲空心变压器技术线路如图1所示。初级线圈

不仅为次级线圈提供产生变化磁通需要的高压脉冲, 同时初级线圈磁场可以作为微波器件的引导磁场, 其过程为:

初级能源系统的电容对初级线圈放电, 产生一个变化的磁场, 同时在次级线圈也感应出一个脉冲高压对脉冲形成线充电, 当对脉冲形成的线充电电压达到一定值时, 在初级线圈中的磁场仍处于较高的水平, 启动触发开关, 形成线阴极放电产生电子束, 初级线圈能为电子束通过微波器件提供一个较强的引导磁场。



图1 结构示意图(外壳接地)

收稿日期: 2007-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10347009)

作者简介: 廖旭(1961-), 男, 副教授, 主要从事电磁场及微波理论方面的研究。

脉冲空心变压器主要是对脉冲形成线充电,由于初级线圈中有很强的电流流过,因而也产生很强的磁场。忽略电路中的电阻和漏感,只考虑互感时,脉冲空心变压器的等效电路如图2所示。其中M为互感;L<sub>1</sub>为初级线圈电感;L<sub>2</sub>为次级线圈电感;C<sub>1</sub>为初级回路电容;C<sub>2</sub>为次级回路电容(即脉冲形成线分布电容)<sup>[3]</sup>。

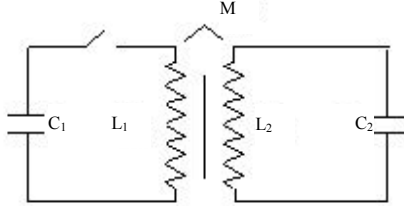


图2 脉冲空心变压器等效电路示意图

脉冲空心变压器电路方程为:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt = V_0 \quad (1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt = 0 \quad (2)$$

令  $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ ,  $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ ,  $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$  (耦合系数)。对于双共振电路,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ , 则初级、次级圈中充放电电压、电流分别为:

$$V_1(t) = \frac{V_0}{2} \left( \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t + \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right) \quad (3)$$

$$V_2(t) = \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \left( \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t - \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right) =$$

$$\frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \left( \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t - \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right) \quad (4)$$

$$i_1(t) = \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \left( \frac{1}{\sqrt{1-k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t + \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right) \quad (5)$$

$$i_2(t) = \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_2}} \left( \frac{1}{\sqrt{1-k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t - \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right) \quad (6)$$

初级和次级线圈充放电电压和电流随时间的变化曲线(k=0.9时)分别如图3和图4所示。曲线a为初级线圈充电电压(电流)随时间的变化曲线;曲线b为次级线圈充电电压(电流)随时间的变化曲线(图中  $t_0 = 1/\omega_0$ )。

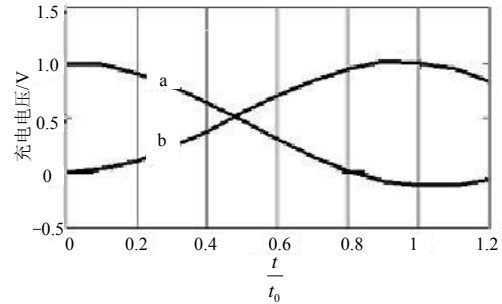


图3 初级和次级线圈充放电电压随时间的变化曲线(k=0.9)

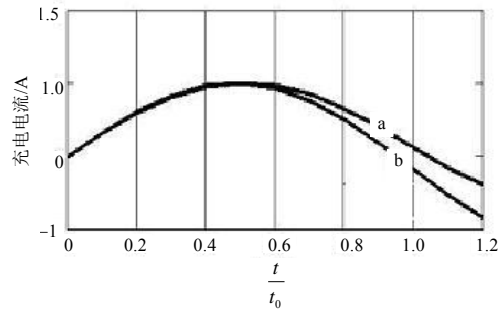


图4 初级和次级线圈充放电电流随时间的变化曲线(k=0.9)

## 2 初级线圈和次级线圈设计

设初级、次级线圈均为螺旋管结构的线圈,初级由n个单元组成,每个单元的电容为C<sub>0</sub>,线圈匝数为m,电感为L<sub>0</sub>,则:

$$\begin{cases} C_1 = nC_0 \\ L_1 = \frac{1}{n} L_0 \end{cases} \quad (7)$$

初级每个单元的电流为:

$$i(t) = \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} f(k, t) \quad (8)$$

式中

$$f(k, t) = \left( \frac{1}{\sqrt{1-k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t + \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sin \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right)$$

由于次级线圈中的电流远小于初级线圈,则初级线圈中的磁场强度主要决定于初级线圈中的电流,即:

$$B(t) = \mu_0 i(t) \frac{mn}{l} = \mu_0 \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} f(k, t) \frac{mn}{l} \quad (9)$$

式中 l 为初级线圈总长度。

当k=0.9时, f(k, t) 的最大值为3.4, 取n个单元的线圈总匝数mn=2 000 匝,线圈长度l=1 m,有:

$$\frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} = 300$$

则初级线圈中的磁场强度为2.5 T。当 $V_0 = 3$  kV时,

$$\sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 5。$$

本文取 $n=40$ ,  $m=50$ , 初级线圈内径 $a=2.5$  cm,

则:  $L_0 = \mu_0 \pi a^2 \frac{m^2 n}{l} = 2.5 \times 10^{-4}$  H,  $C_0 = 1.0 \times 10^{-5}$  F,

得初级电容总储能为1.8 kJ。

次级只有一个线圈, 内径为 $b$ , 线圈匝数为 $N$ , 线圈总长度为 $l$ , 则次级电感为:

$$L_2 = \mu_0 \pi b^2 \frac{N^2}{l}$$

次级充电电压为:

$$V_2(t) = \frac{V_0 Nb}{2 ma} g(k, t) \quad (10)$$

式中  $g(k, t) = \left( \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} t - \cos \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} t \right)$ 。当 $k=0.9$ 时,  $g(k, t)$ 的最大值为1.75。取 $b = 3$  cm,  $N = 8000$ 匝, 得 $V_2(t)$ 最大值为500 kV, 则:  $L_2 = 0.23$  H,  $C_2 = 1.0 \times 10^{-8}$  F, 当 $V_2(t)$ 为最大值时, 脉冲形成线的储能为1.25 kJ。

### 3 工作点

图5是初级线圈磁场和次级线圈充电电压随时间的变化曲线( $k=0.9$ ), 曲线a为次级线圈充电电压随时间的变化曲线; 曲线b为磁场随时间的变化曲线。

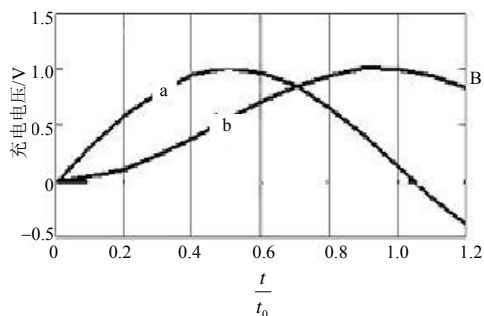


图5 初级线圈磁场和次级线圈充电电压随时间的变化曲线( $k=0.9$ )

由图5可以看出, 磁场和次级充电电压不能同时达到最高值, 对 $k=0.9$ , 当 $t = t_0$  ( $t_0 = \sqrt{L_1 C_1}$ )时, 磁场达到最大值。当工作点取在 $t = 0.72 t_0$ 时, 充电电压达到其最高值的84%, 而磁场为最高值的80%, 既能保证效率, 又能提供较强的引导磁场, 如表1所示。

表1 磁场和充电电压随时间的变化( $k=0.9$ )

$t/t_0$	0.50	0.72	0.82	0.90	0.97
$B/B_{\max}$	1.00	0.80	0.6	0.40	0.20
$V/V_{\max}$	0.54	0.84	0.96	1.00	1.00

$t = 0.72 t_0$ 时, 引导磁场为2 T, 脉冲形成线的电压为400 kV, 储能为0.8 kJ。将脉冲形成线的阻抗设计为40  $\Omega$ , 二极管匹配输出时, 阻抗为40  $\Omega$ , 则电子束参数为400 kV、10 kA, 电子束功率4.0 GW。取微波管效率为30%, 则输出微波为1.2 GW。

### 4 讨论

本文章研究的脉冲功率源是从微波器件角度提出的一种新型结构<sup>[10]</sup>, 尽管在原理上与Tesla变压器(又叫空气芯脉冲变压器)基本相同, 但在结构上与通常的Tesla变压器不同, 可以在一定工作范围内较好地提高脉冲功率源的利用效率, 尤其是在小型化结构方面更为明显。进一步的研究将考虑使用磁性材料作为磁芯和外壳来提高耦合系数。

#### 参考文献

- [1] 李正红, 胡克松, 肖效光. 高压直流连续波光阴极注入器中电子束流发射度研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15: 509-512.
- [2] 王淦昌. 高功率粒子束及其应用[J]. 中国高功率粒子束十年文集, 1995, 1(4): 1-22.
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社 2005: 437-444.
- [4] 李正红, 胡克松, 张红. 利用场耦合理论研究微波谐振腔[J]. 强激光与粒子束, 2002, 13: 99-102.
- [5] 李正红, 孟凡宝, 常安碧. 利用场耦合理论研究开放微波谐振腔[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3627-3631.
- [6] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- [7] 李正红, 孟凡宝, 胡克松. 任意时间分布电子束同单间隙微波腔的非线性自洽过程研究[J]. 物理学报, 2004, 53(11): 1564-1571.
- [8] 李正红, 胡克松, 黎明, 等. 光阴极RF腔注入器[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 366.
- [9] 金晓, 许州, 周传明. 超导腔束管耦合度研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(4): 517.
- [10] 李正红, 黄华, 孟凡宝. 两腔高功率微波振荡器研究[J]. 物理学报, 2005, 54(4): 3627-3683.

编辑 熊思亮