

文章编号: 1001-4322(2008)12-2105-04

# 陡化前沿 Marx 发生器的阻抗特性\*

高景明, 刘永贵, 荀 涛, 刘金亮, 杨建华

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 利用 50 kV 无感电容器与固体电阻制作了 10 级陡化前沿 Marx 发生器, 实现了电容储能型脉冲功率调制系统的小型化。使用不同阻值的水电阻负载研究了发生器的阻抗特性, 并进一步制作了金属膜电阻负载进行实验, 测定 90  $\Omega$  负载可以使发生器处于临界阻尼放电状态, 从而确定发生器的内部阻抗约为 45  $\Omega$ 。当充电电压为 40 kV 时, 在金属膜电阻负载上得到了幅值约为 210 kV, 脉宽约为 40 ns, 前沿约为 5 ns 的快前沿高压脉冲。利用此发生器成功地驱动了强流二极管, 当二极管阴阳极间距为 15 mm 时, 在 30 kV 充电情况下, 其输出电压约为 154 kV, 束流约为 1 kA。

**关键词:** 脉冲功率源; 陡化前沿; Marx 发生器; 阻抗特性; 强流二极管

**中图分类号:** TM833 **文献标志码:** A

装置的小型化是脉冲功率技术发展的重要方向之一, 俄罗斯学者研制的 Tesla 变压器使窄脉冲加速器装置的小型化取得了非常大的进展<sup>[1-2]</sup>; 传统的 Marx 发生器, 作为脉冲功率技术领域的重要部件, 由于输出脉冲前沿缓慢, 必须经过脉冲形成线等部件将电压脉冲的前沿陡化和脉宽压缩后才能驱动强流二极管, 这为加速器系统的小型化带来一定的困难。目前随着电容器与开关技术的发展, 通过合理设计总体结构及分散参数, 使 Marx 发生器输出脉冲的前沿陡化成为可能, 而且这种陡化前沿的 Marx 发生器具有结构紧凑、性能可靠及制作成本低廉等优点, 已成功应用于驱动宽带天线、产生闪光 X 射线以及模拟电磁脉冲 (EMP) 等方面<sup>[3-5]</sup>。将其用于驱动二极管产生强流电子束则可以实现变压器与脉冲形成线相结合的功能, 由于采用气体绝缘, 省去了水介质传输线的水处理系统或者油介质传输线的滤油系统, 同时还可以省去初级储能系统的大电容。由此看来, 陡化前沿的 Marx 发生器的研究对于加速器系统装置的小型化非常有利, 是一条值得探索的技术路线。因此, 我们尝试设计并制作了 10 级陡化前沿 Marx 发生器, 文献<sup>[6]</sup>给出了电路仿真模型与初步实验结果, 本文对其阻抗特性开展了进一步的实验研究, 确定了发生器的内部阻抗, 并利用它成功地驱动了强流电子束二极管。

## 1 装置描述

Marx 发生器的基本原理是利用对其电容器组进行并联充电后再串联放电以获得高电压脉冲输出。一个传统 Marx 的单元回路通常是由储能电容器、火花开关及充电电阻组成, 这些特征在陡化前沿 Marx 发生器中也是相同的, 不同的是陡化前沿 Marx 发生器采用了同轴结构, 从而大大地减小了回路的电感, 有利于陡化前沿波形的建立; 另外, 它合理地利用了开关电极与金属外壳之间形成的对地分散电容, 使每一级开关导通前都具有较大的过电压, 从而使整个放电过程速度加快, 最终实现陡化前沿波形的建立。我们设计的陡化前沿 Marx 发生器实验装置如图 1 所示, 具体参数见表 1。

表 1 10 级陡化前沿 Marx 发生器的性能

Table 1 Specification of 10-stage wave erection Marx generator

charging(DC) voltage/kV	number of stages	capacitance of each capacitor/nF	diameter of electrode/mm	gap distance of spark gap/mm
0~40	10	3	26	2.6
resistance of charging resistor/k $\Omega$	output voltage on matched load/kV	pulse duration /ns	rise time /ns	dimension
50	0~200	$\approx$ 40	$\approx$ 5	$\phi$ 276 mm $\times$ 1 600 mm

储能电容器采用的是国产 3 nF 高压无感电容器, 其额定耐压为 50 kV, 通流可以达到 10 kA, 内部电感小

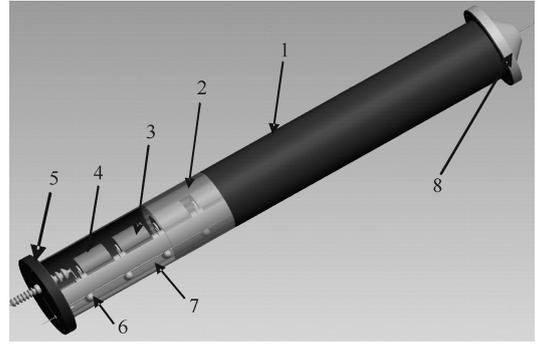
\* 收稿日期: 2008-04-14; 修订日期: 2008-09-08

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 高景明 (1981—), 男, 博士生, 从事脉冲功率技术研究; megod818@163.com。

于 30 nH, 尺寸为  $\phi 90 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 与同等容值的固态电容器相比体积大些, 这虽然在一定程度上影响了装置的进一步小型化, 然而其通流能力是一般固态电容器不能比的。装置中共采用了 11 组火花开关, 间隙为 2.6 mm, 除第一组外, 其它各组均为黄铜材料, 第一组为触发开关, 由于触发过程中电极烧蚀较为严重, 这一组电极采用不锈钢制作, 触发极由充电底板引入。火花开关与电容器通过绝缘支撑体隔开, 开关位于下方靠近金属外壳, 以便形成较大的对地分散电容。

实验过程中采用外部直流电源对装置充电。充电电阻采用 50 k $\Omega$ 、额定功率为 80 W 的固体电阻。充电电阻除了限定充电电流大小以外, 还有一个重要作用是为电容器能量的意外释放提供负载, 从而保护电容器。为安全起见, 以上所有元件都固定在绝缘支撑体上的相应位置, 绝缘支撑体套装于有机玻璃筒内以实现与金属外壳之间的电绝缘和气密封, 实验中有有机玻璃筒内充满绝缘气体, 通过调节气压来实现不同幅值的高压脉冲输出。



1. metal shell; 2. perspex sheet; 3. charging resistor;  
4. capacitor; 5. charging plate; 6. electrode;  
7. insulating supporter; 8. output plate

Fig. 1 Structure of 10-stage wave erection Marx generator

图 1 10 级陡化前沿 Marx 发生器的结构示意图

## 2 实验结果与分析

早期实验在氮气中得到了初步的低压实验结果; 本文实验中为提高输出电压脉冲的幅值, 在有机玻璃筒体内充以 0.25 MPa 的  $\text{SF}_6$  气体。高压脉冲的测量是通过电容分压器实现的, 分压器薄膜电容贴于安装有水电阻负载的金属筒内壁, 它提取的信号再通过二级电阻分压后送至 Agilent 数字示波器进行观察; 电流波形通过法拉第筒进行采集。

### 2.1 Marx 发生器阻抗的测定

由于发生器内部结构的复杂性, 其特性阻抗很难从理论上进行准确计算, 所以我们通过实验手段来研究发生器的内部阻抗。方法是通过改变水电阻负载的阻值, 观察发生器输出电流波形的变化, 当电流波形无过零时, 说明发生器为临界阻尼放电状态, 其内部阻抗为负载阻抗的一半, 这样就可以大概确定发生器的内部阻抗。图 2 给出了 30 kV 充电情况下不同阻值水电阻负载上的电压波形与电流波形, 可以看到当负载阻抗约为 100  $\Omega$  时, 发生器输出电压和电流波形基本无过零现象, 从而确定发生器的内部阻抗约为 50  $\Omega$  或略低些(水电阻的阻值在高频应用情况下可能比实际测量值略小)。

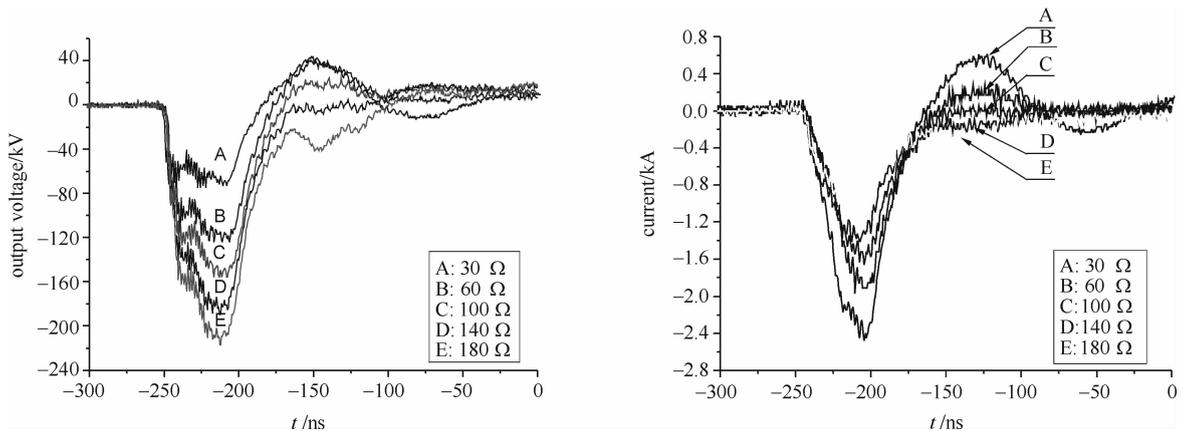


Fig. 2 Experimental results on the water load of different resistance with 30 kV charged

图 2 充电 30 kV 时不同阻抗水电阻负载的实验结果

提高充电电压至 36 kV, 放电结果如图 3 所示, 电压波形的变化趋势同上, 但是电流波形相对于 30 kV 充电时有不小的改善, 平顶部分很明显, 但反映的阻抗信息基本与上面一致。

### 2.2 金属膜电阻负载的实验结果

考虑到水电阻本身的分散参数对测量可能会有一定的影响, 因此我们结合上面的水电阻负载实验结果, 制作了阻值为 90  $\Omega$  的金属膜电阻负载, 应用于发生器的临界阻尼放电情况, 将金属膜电阻分为 7 层固定于圆锥

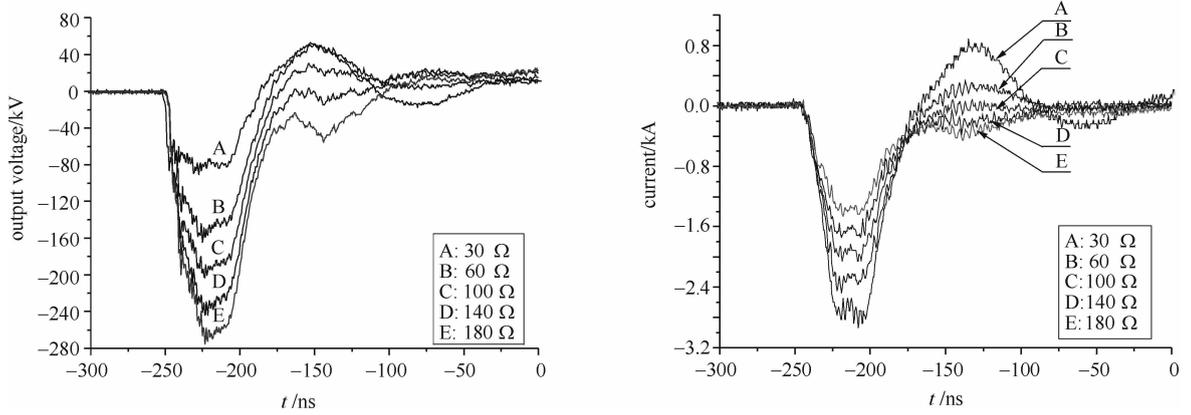
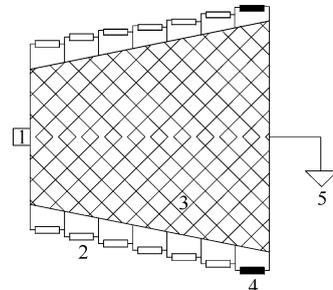


Fig. 3 Experimental results on the water load of different resistance with 36 kV charged

图 3 充电 36 kV 时不同阻抗水电阻负载的实验结果

型的绝缘支撑体上,如图 4 所示,最后一级为采样电阻 (0.088 Ω),这种圆锥型的结构有利于消除负载端引起的信号反射。

利用该负载得到的电压电流波形如图 5 所示,为方便观察只取了波形的主体部分,可以看出电压波形相对于水电阻负载时略有改善,波形寄生的振荡可能是测量线有部分屏蔽不好所致,其半高宽约为 40 ns,前沿约为 5 ns,当充电 40 kV 时,幅值达到了 210 kV;电流电压波形均无过零现象,从而进一步确定发生器的内部阻抗为 45 Ω。



1. input post; 2. single resistor; 3. insulating holder; 4. sampling resistor; 5. ground end

Fig. 4 Structure of the metal film resistor load

图 4 金属膜电阻结构示意图

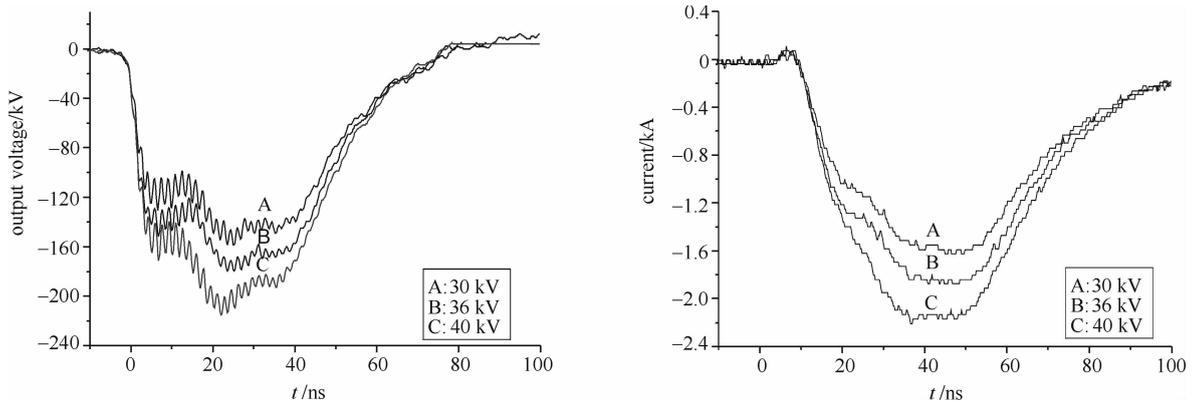


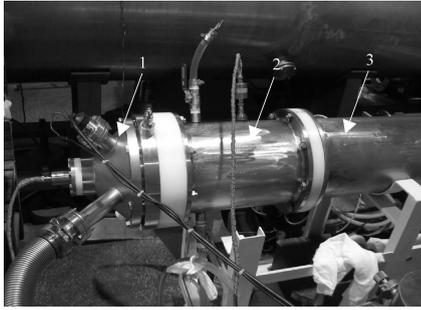
Fig. 5 Experimental results on the metal film resistor load for different charging voltages

图 5 不同充电电压下金属膜电阻负载的实验结果

### 2.3 驱动强流二极管

在以上线性负载实验的基础上,我们利用该发生器来驱动强流电子束二极管,实验装置如图 6 所示。其中通过一个过渡段将发生器与二极管连接起来,二极管采用 φ54 mm 的针状阴极,阴阳极间距为 15 mm,真空度为 0.02 Pa。在发生器充电 30 kV 时得到二极管输出电压电流的实验结果如图 7 所示,二极管电压约为 154 kV,束流约为 1 kA,这样计算的二极管阻抗约为 154 Ω。对比图 5 的电压测量结果,发现在输出电压相同的情况下,二极管的测量阻抗相对于线性负载的阻值要高,这可能是由于测量电流的法拉第筒没有完全收集阴极发射的电子所致。

陡化前沿 Marx 发生器在强流电子束二极管方面的成功应用,为加速器的小型化探索了一条经济可靠的技术路线,但其中还有不少地方需要改进,比如降低内部阻抗、提高输出电压幅值等将是进一步的发展方向,此外,实现重复频率运行可以使其具备更广阔的应用前景。



1. field-emission diode; 2. transition section; 3. marx generator

Fig. 6 Photo of complete system

图 6 强流二极管实验系统装置图

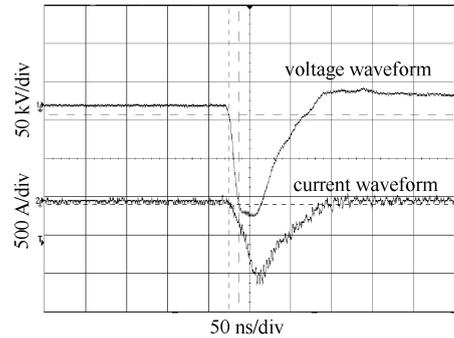


Fig. 7 Experimental results of field-emission diode

图 7 二极管实验结果

### 3 结 论

设计并制作了 10 级陡化前沿 Marx 发生器, 利用不同阻值的水电阻负载及进一步制作的金属膜电阻负载对其内部特性阻抗进行了实验研究, 大致确定其内部阻抗为  $45 \Omega$ 。当充电电压为 40 kV 时, 在金属膜电阻负载上, 建立了幅值约为 210 kV, 脉宽为 40 ns, 前沿约为 5 ns 的快前沿高压脉冲。利用此发生器成功地驱动了强流电子束二极管, 为强流电子束加速器的小型化探索了一条经济可靠的技术路线。

### 参考文献:

- [1] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, **21**: 197-209.
- [2] Korovin S D, Rostov V V. High-current nanosecond pulse-periodic electron accelerators utilizing a tesla transformer[J]. *Russian Physics Journal*, 2006, **39**(2): 1177-1185.
- [3] Mayes J R, Carey W J, Nunnally W C, et al. The Marx generator as an ultra wideband source[C]//13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001: 1665-1668.
- [4] Beverly III R E, Campbell R N. Triggering techniques for a compact Marx generator[J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, **65**(1): 259-260.
- [5] Mayes J R, Carey W J. The generation of high electric field strength RF energy using Marx generators[C]//Conference Record for the 25th International Power Modulator Symposium. 2002.
- [6] 高景明, 刘永贵, 刘金亮, 等. 陡化前沿 Marx 发生器的设计与初步实验[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 167-170. (Gao J M, Liu Y G, Liu J L, et al. Design and preliminary experimental results of the wave erection Marx generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 167-170)

## Impedance characteristic of wave erection Marx generator

GAO Jing-ming, LIU Yong-gui, XUN Tao, LIU Jin-liang, YANG Jian-hua

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A 10-stage wave erection Marx generator is designed and set up by using 50 kV non-inductive capacitors and solid resistors, which realizes the miniaturization of pulse power modulator with capacitance energy storage. The impedance characteristic of the generator is experimentally studied by utilizing water resistor loads with different resistance, and further estimated to be about  $45 \Omega$  by utilizing a metal film resistor load of  $90 \Omega$  which makes the discharging circuit critically damped. For 40 kV charge, an output high voltage pulse with amplitude of about 210 kV, full width half maximum (FWHM) of about 40 ns, and rise time of 5 ns is obtained on the metal film resistor load. This voltage pulse generator is applied to drive a field-emission diode successfully. For a cathode-anode gap of 15 mm with 30 kV charged, the diode output voltage is about 154 kV, and the electron beam current is 1 kA.

**Key words:** pulsed power source; wave erection; marx generator; impedance characteristic; field-emission diode