

# 紧凑型电感隔离快 Marx 发生器

刘宏伟, 谢卫平, 李洪涛, 秦卫东, 韩文辉, 卫 兵, 傅 贞

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘 要:** 为了实现脉冲功率装置小型化和实用化, 作为初级储能装置的 Marx 发生器, 采用紧凑型结构设计的直接驱动装置成为研究热点。为探索紧凑型 Marx 直接驱动负载的可行性及相关的设计方法, 设计了一台采用电感作为充电和接地器件的紧凑型气体绝缘快前沿 Marx 发生器并进行了相关实验。初步的实验结果表明, Marx 放电正常, 充电 19 kV 时, 在 26  $\Omega$  负载上可得到 145 kV 的高压脉冲输出。可看出 Marx 发生器直接驱动有其自身的优势, 需要注意的是发生器与负载的连接问题。

**关键词:** Marx 发生器; 紧凑型; 快前沿; 电感隔离; 小型化; 直接驱动

**中图分类号:** TL51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-6520(2008)07-1436-04

## Compact Inductively Isolated Fast Marx Generator

LIU Hong-wei, XIE Wei-ping, LI Hong-tao, QIN Wei-dong, HAN Wen-hui, WEI Bing, FU Zhen

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper describes work on the design and tested of an inductor isolated compact fast Marx generator. This generator is made of 10 stages and each stage has 6 paralleled high voltage ceramic capacitors potentially charged to 30kV per capacitor. An annular field aberrance switch whose triggered electrode is in the center has been designed to achieve the generator's erecting. The self-breakdown switches have a similar structure. The difference is a structure which can increase the capacitor between the electrode of the self-breakdown switch and the ground has been designed to minish the erect time. Unique features of the Compact Marx is all the switches have a common switch housing run through the center of the whole Marx. The advantage is the ultraviolet radiation that is generated by the switch can help the next switch's breakdown and the structure is simple and compact. We use gas as the insulation medium of the Marx system. All parts of the set are airproofed in a common gas house. So the charge voltage and the output voltage can be adjusted by the air pressure and kinds of insulation gas. The primary test prove that the design can achieve the objective basically. It can get 145 kV minus pulse singnal on the 26 omiga load when the capacitors are charged 19 kV and the erect inductor is only 170 nH.

**Key words:** marx generator; compact; fast risetime; inductor isolated; miniaturization; direct-driving

## 0 引 言

传统的 Marx 发生器多是作为大型脉冲功率系统的初级储能装置<sup>[1,2]</sup>, 这类 Marx 发生器一般具有体积大, 超高功率等特点, 在闪光 X 光照相、高功率微波、电磁脉冲模拟、惯性约束聚变等科学实验和军事科学领域存在重要应用, 但是传统的大型单次脉冲功率装置在实用性上受到了很大限制。随着脉冲功率技术的发展, 脉冲功率装置的小型化, 实用化及如何实现重复频率运行越来越引起重视。其中 Marx 发生器直接驱动各种负载的紧凑型 Marx 发生器设想, 在宽带微波源及射频发生器等方面的研究被广泛开展<sup>[3-12]</sup>。本文介绍一种以低感陶瓷介质电容器作为基本储能元件, 采用电感器作为充电和接地器件的 Marx 发生器的设计及电场分析。设计了带

中心引出触发极环形场畸变开关的发生器, 为了减小建立时间设计了与主电极一体的对地增容电极。采用同轴结构及电容器并联的方式降低系统电感。通过对紧凑型 Marx 发生器的初步研究, 探索小型 Marx 发生器直接驱动各类型负载的可行性。

## 1 设计思路

快 Marx 发生器的设计, 从根本上说是减小系统电感<sup>[13]</sup>即设计合理的紧凑结构以减小 Marx 各部分电感, 主要采取措施: ①每一级 6 个储能电容器并联, 并与发生器外筒形成同轴结构, 减小储能元件带来的电感; ②采用正负充电, 开关数量可减小一半, 减小开关电感; ③开关设计方面采用环形开关, 包括中心引出触发极环形场畸变开关及环形自击穿间隙, 一方面上一级开关击穿产生的紫外线可使后级间隙气体工作介质部分电离, 加速开关间隙击穿, 另一方面环形开关在过电压系数较高时可能实现多通道放电。同时设计了与主电极一体的对地增容结

**基金资助项目:** 国家高技术发展计划项目。

Project Supported by National High Technology Development Project.

构,增大对地电容以利于开关击穿;④整个发生器用同轴结构,开关与电容器紧密连接,结构紧凑,可减小电容器连接方面的电感。整个发生器用气体绝缘,使得其重量大大减轻。

## 2 结构设计

发生器整体结构见图1。发生器采用模块化的设计,储能电容采用5.6 nF/30 kV圆饼形高压陶瓷电容器,6个电容器电极分别与两个电极板螺栓连接,其中一个电极板集成了开关电极,另一个则作为接地极板,这样10个模块形成5个开关结构,正负充电,减少了开关个数,从而减小系统电感。

第一极开关为触发开关,开关间隙为10 mm,后4个自击穿开关间隙则为6、8、10、12 mm。自击穿开关和触发开关均采用环形结构,一方面便于触发极引出,有利于形成多个放电通道。另一方面前级击穿产生的紫外线可使后级间隙气体工作介质部分电离,加速开关间隙击穿。不同的是触发开关引入了中心引入的触发结构,开关结构见图2。

对于自击穿开关,理论研究表明:增大过电压倍数,可减小开关的击穿时间,加快 Marx 发生器的树立,过电压倍数取决于开关杂散电容与开关电极对地电容的大小,增大对地电容可增大过电压倍数。为了增加对地电容,主电极边缘设计了增容结构,同时外筒和芯子间的绝缘衬筒也有助于增加对地电容,图3为自击穿开关的增容结构。

充电及接地电感结构见图4,电感两端为金属端面用于固定及连接,中间绝缘支撑密绕漆包线。其中填入磁芯以增大电感,电感测量结果约为130  $\mu\text{H}$ 。电感首尾连接并与连接了电容器的电极板连接,除了用于充电和隔离外,同时也有定位及固定的作用。电感充电及隔离主要是在系统处于重复频率运行条件下具有优势<sup>[14,15]</sup>。

10级 Marx 模块由3根贯穿首尾的绝缘拉杆拉紧固定。整个芯子通过螺栓连接在底板上。

装置密封于金属圆筒内,芯子与外筒间形成同轴结构,充入  $\text{SF}_6$  和  $\text{N}_2$  混合气体绝缘。整个发生器长60 cm 直径40 cm(不包括输出端及充电和触发的外部连接结构)。整个 Marx 结构可等效为图5(只画出了6级),增容结构即为增加图中的对地电容。

## 3 参数估算及模拟

### 3.1 Marx 发生器参数估算

Marx 发生器最主要的参数是其回路电感、对地电感及储能电容。

回路电感主要来自气体开关的电感、储能电容

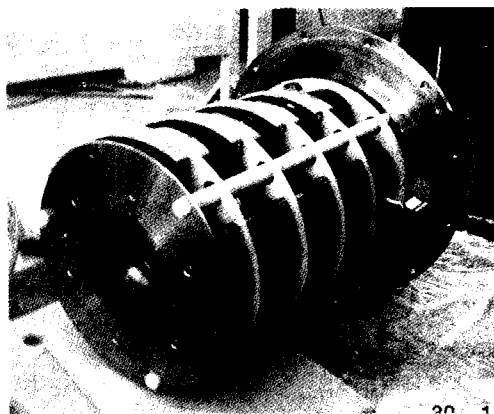


图1 Marx 发生器整体结构

Fig. 1 Whole structure of the Marx generator

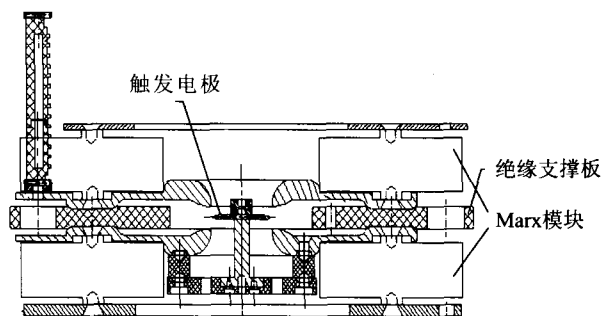


图2 开关结构

Fig. 2 Trigger switch

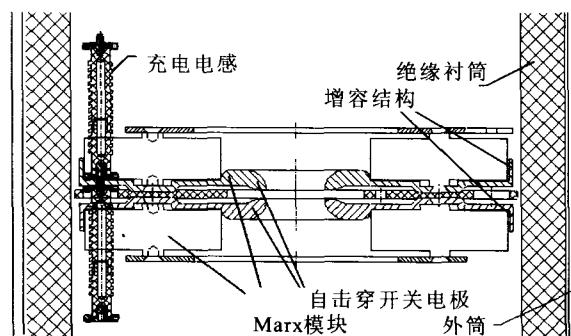


图3 增容结构

Fig. 3 Structure of the increasing capacity



图4 充电及接地电感

Fig. 4 Charging and Earth inductance

器的电感及连接电感。理论计算<sup>[16]</sup>可得到自击穿开关和触发开关电感总电感为76.4 nH。单个电容器标称电感 $\leq 40$  nH。每级6个并联,共10级,总电感为70 nH 连接电感按同轴线电感计算公式<sup>[16]</sup>

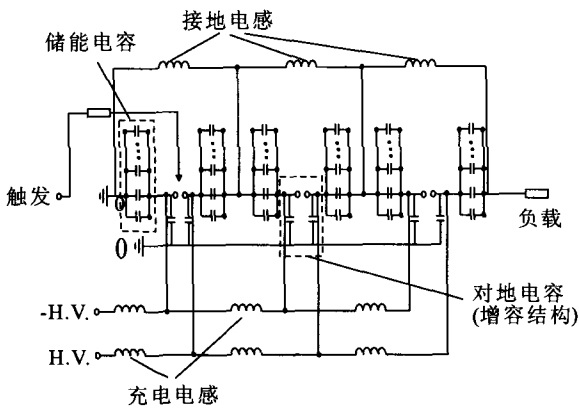


图 5 Marx 原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the Marx generator

$$L_0 = \frac{d\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$$

式中,  $\mu_0 = 0.4\pi \mu\text{H/m}$ ;  $d$  为连接部分长度;  $R$ 、 $r$  分别为其外导体内径和内导体外径, 可计算出连接电感  $L_0 = 2.5 \text{ nH}$ 。故 Marx 发生器总回路电感估算为  $148.9 \text{ nH}$ 。采用电感隔离, Marx 发生器对地隔离电感  $650 \mu\text{H}$ 。单个电容器电容为  $5600 \text{ pF}$ , Marx 总的等效储能电容为  $3.36 \text{ nF}$ 。

### 3.2 Marx 发生器电路模拟

由回路参数及电路分析, 可用图 6 模拟 Marx 发生器的工作情况。

其中,  $C_1 = 3.36 \text{ nF}$ ,  $L_1 = 148.9 \text{ nH}$ ,  $L_2 = 650 \mu\text{H}$ ,  $C_1$  电压  $300 \text{ kV}$ , 负载  $R_1 = 26 \Omega$  时。模拟电压波形见图 7。电压幅值约  $-260 \text{ kV}$ , 上升时间(按脉冲幅值的  $10\%$  到  $90\%$  所经历的时间)约为  $9 \text{ ns}$ 。

## 4 实验结果

### 4.1 短路放电实验

通过短路放电实验, 测量 Marx 发生器的回路电感及串联电阻, 与设计参数进行对比。因 Marx 输出采用的是粗电缆输出, 电感较大, 为了确定这部分电感, 分别在接入与不接入电缆情况下进行了实验。充电电压分别为  $7.0$ 、 $11.0 \text{ kV}$ , 得到的电流波形见图 8, 其中测量信号  $1 \text{ V}$  代表实际电流  $10 \text{ kA}$ , 电感计算结果见表 1, 其中回路电感  $L_m = T^2/4\pi^2 C_m$ ,  $T$  为波形中的振荡周期; 储能电容  $C_m = 3.36 \text{ nF}$ ; 串联电阻  $R_s = 2L_m \ln(I_1/I_2)/T$ ;  $I_1$ 、 $I_2$  分别为波形 1、2 峰值电流。扣除两次实验中测量引入的连接电感  $125$  及  $250 \text{ nH}$ , 得到 Marx 电感为  $161$  与  $553 \text{ nH}$ , 可见输出电缆大大影响了 Marx 的性能。Marx 无输出电缆时  $161 \text{ nH}$  的电感与理论值  $148.9 \text{ nH}$  基本相符。

### 4.2 水电阻假负载实验

实际使用的水电阻负载阻值约  $26 \Omega$ , 其自感由

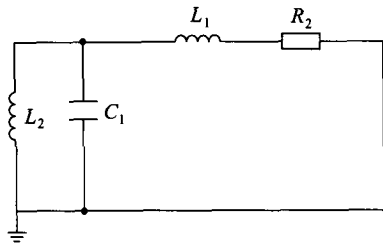


图 6 Marx 发生器模拟电路

Fig. 6 Analogous circuit of the Marx generator

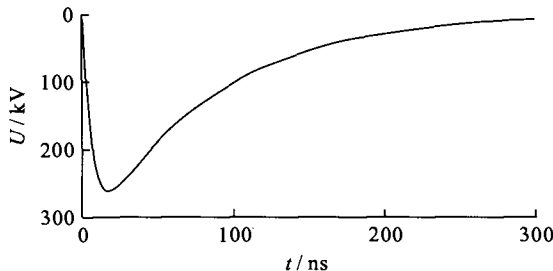


图 7 Marx 发生器模拟电压波形

Fig. 7 Simulation voltage of the Marx generator

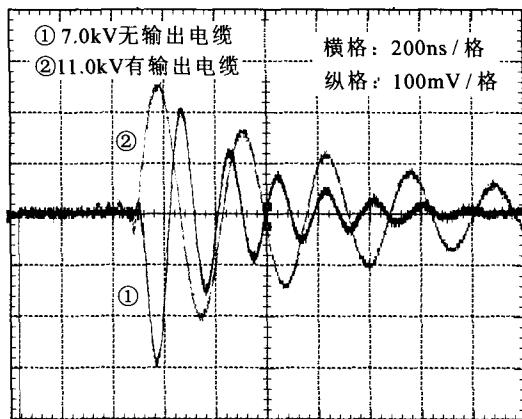


图 8 短路实验电压电流波形

Fig. 8 Voltage and current waveform of the Short-circuit test

表 1 Marx 系统电感计算

Tab. 1 Inductance computation of the Marx generator

参数	$T/\text{ns}$	电流/ $\text{kA}$	$L_m/\text{nH}$	$R_s/\Omega$
无输出电缆	196	$4.76(I_1)$ $2.84(I_2)$	286	2
有输出电缆	327.5	$5.82(I_1)$ $2.92(I_2)$	803	2.5

公式  $L = (\mu_0/2\pi)l(\ln(2l/Rc) - 1)$  给出, 式中,  $R$  为水电阻,  $c$  与圆筒内外半径有关,  $R = 8 \text{ cm}$ ,  $r = 6 \text{ cm}$ ,  $l = 35 \text{ cm}$ ,  $c = 0.92$ , 其电感  $L = 87.7 \text{ nH}$ 。考虑输出连接电感与水电阻电感电路可以得到如图 9 模拟结果, 电压幅值  $-132 \text{ kV}$ 。前沿上升时间  $t_r$  ( $10\% - 90\%$ )  $35 \text{ ns}$ , 脉宽  $\tau$  约  $120 \text{ ns}$ 。实验中系统充入  $0.16 \text{ MPa } \varphi(\text{N}_2) = 30\%$  混和气体, 充电  $19.2 \text{ kV}$  时, 得到的负载电压及电流波形见图 10。其中测量信号  $1 \text{ V}$  分别代表实际电压  $110 \text{ kV}$ 、实际电流  $10$

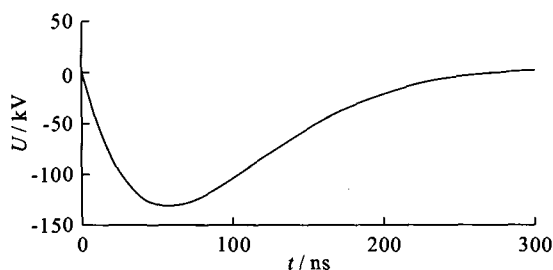


图9 模拟电压波形

Fig. 9 Simulation voltage

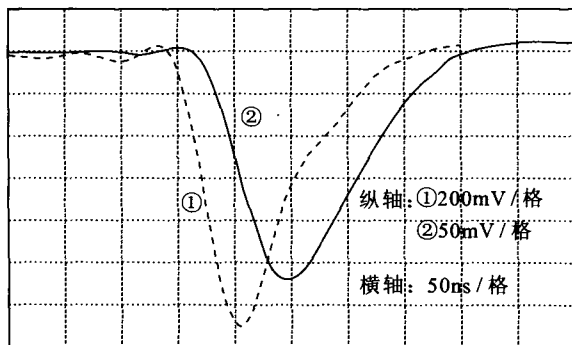


图10 负载上的电压电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveform of the load

kA。负载上电压幅值 $-145\text{ kV}$ 。 $t_r = 39\text{ ns}$ ,  $\tau \approx 100\text{ ns}$ ,与模拟结果基本相符。

## 5 结 语

采用圆饼形的瓷介质电容器,完成了紧凑型 Marx 发生器的设计。短路实验测得的 Marx 回路电感 $160\text{ nH}$ ,但因采用传统的电缆输出方式,引入了约 $390\text{ nH}$ 的电感使得发生器整体性能下降。在 $26\ \Omega$ 水电阻负载上得到了幅值 $-145\text{ kV}$ 前沿 $39\text{ ns}$ 脉宽 $80\text{ ns}$ 的高压输出。更进一步的实验包括充电电压的进一步提高,锐化电路实验及低重复频率运行实验等。

## 参 考 文 献

- [1] Martin T H. PBFA II [C]//5th IEEE International Pulsed Power Conference. [S. l.]: IEEE, 1985: 155-160.
- [2] 李玉虎. 闪光-II 马克思发生器[C]//中国高功率粒子束十年文集. 绵阳,中国:中国粒子加速器学会, 1995.
- [3] Platts D A. 10 Joule high voltage trigger micro marx [C]//3th IEEE International Pulsed Power Conference Albuquerque. New Mexico, USA: IEEE, 1981: 485-486.
- [4] Kekez M M, LoVetri J, Podgorski A S, et al. A 60 Joule 600 kV 1 ns rise-time marx system [C]//7th IEEE International Pulsed Power Conference Monterey. California, USA: IEEE, 1989: 123-127.
- [5] Graham J D, Gale D G, Sommars W E, et al. Compact 400 kV marx generator with common switch housing [C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, MD, USA:

IEEE, 1997: 1519-1523.

- [6] Calico S E, Scott M C, Clark M C. Development of a compact Marx generator for high-power microwave applications [C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1997: 1536-1541.
- [7] Goerz D, Ferriera T, Nelson D, et al. An ultra-compact Marx-type high-voltage generator [C]//13th IEEE Pulsed Power Conf. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 2001: 628-631.
- [8] Mayes J R, Carey W J, Nunnally W C, et al. The marx generator as an ultra wideband source [J]. Applied Physical Electronics L C, 2002, 3(1): 21-23.
- [9] Kekez M M. High repetition rate compact marx generator [C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas Texas, USA: IEEE, 2003: 1427-1430.
- [10] Chen Y J, Neuber A A, Mankowski J, et al. Design and optimization of a compact, repetitive, high-power microwave system [J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76 (10): 4703-4708.
- [11] 秦卫东,李洪涛,顾元朝,等. 200 kV 快脉冲 Marx 发生器 [J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 40-51.  
QIN Wei-dong, LI Hong-tao, GU Yuan-chao, et al. 200 kV fast rise time marx generator [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 40-51.
- [12] 张 军,钟辉煌,杨汉武. 高功率微波脉冲功率驱动源研究进展 [J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 45-48, 53.  
ZHANG Jun, ZHONG Hui-huang, YANG Han-wu. Developments of pulsed power technology for driving HPM sources [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 45-48, 53.
- [13] 刘锡三. 高功率脉冲技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [14] 曾大雄. 电感隔离型 Marx 发生器的研究 [J]. 核科学与工程, 1983, 3(3): 272-280.
- [15] 王新新,张 卓,肖如泉. 重复频率 MARX 发生器的充电回路 [J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 37-39, 49.  
WANG Xin-xin, ZHANG Zhuo, XIAO Ru-quan. The charging circuit of a repetitive MARX generator [J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 37-39, 49.
- [16] 卡兰塔罗夫,采伊特林(苏). 电感计算手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 1992.

刘宏伟

1982—,男

主要从事脉冲功率技术研究工作

电话:(0816)2484120

E-mail: lhw1982@tom.com



LIU Hong-wei

谢卫平

1964—,男,博士,研究员

长期从事脉冲功率技术相关研究工作

电话:(0816)2484120

E-mail: Wpxies88@126.com

李洪涛

1968—,男,博士,研究员

从事脉冲功率源技术及开关技术研究工作

电话:(0816)2484120

E-mail: Lht680526@21cn.com

XIE Wei-ping  
Ph. D., Professor

收稿日期 2007-04-17

编辑 郭守珠