

文章编号: 1001-4322(2008)01-0167-04

# 陡化前沿 Marx 发生器的设计与初步实验\*

高景明, 刘永贵, 刘金亮, 杨建华, 龙霞锋

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 设计了 10 级同轴结构的陡化前沿 Marx 发生器, 实现了电容储能型脉冲功率调制系统的小型化。该系统采用 3 nF 低电感电容器作为储能电容, 采用固体电阻作为充电电阻, 通过各级短间隙气体火花开关迅速放电及级间紫外光耦合在 50  $\Omega$  负载上建立了陡化前沿的输出电压波形。在考虑开关电极分散电容、等效传输线效应及回路电感等因素基础上, 利用自击穿火花开关模型建立了等效放电电路模型, 并利用 PSpice 电路模拟软件进行了数值模拟。根据数值模拟结果设计加工了 10 级陡化前沿的 Marx 发生器实验装置, 在较低充电电压下(7 kV 与 11 kV), 得到了初步实验结果, 输出电压波形大致为方波, 相对于传统 Marx 发生器输出前沿缓慢的三角波有较大改善, 半高宽为 40~50 ns, 前沿时间为十几 ns, 幅值约为 41 kV 和 57.5 kV, 实验结果与模拟结果基本一致。

**关键词:** 脉冲功率技术; Marx 发生器; 陡化前沿; 低电感电容器; 自击穿气体火花开关

**中图分类号:** TM833 **文献标识码:** A

Marx 发生器是脉冲功率技术系统中的重要部件, 传统的 Marx 发生器输出脉冲前沿缓慢, 长期以来一直作为初级能源, 通过脉冲形成线进行脉冲压缩后, 才能驱动二极管产生强流电子束。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, 在不附加陡化开关的情况下, 对 Marx 发生器的输出脉冲前沿进行陡化成为可能。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, 已成功应用于触发高压设备、模拟电磁脉冲(EMP)以及驱动小型 X 射线管等方面<sup>[1-3]</sup>; 也可用于直接驱动伪火花放电室, 产生高亮度低发射度的强流电子束<sup>[4]</sup>; 另外在除尘、水处理及医疗等领域也有较好的应用前景<sup>[5]</sup>。如果能够将这种陡化前沿 Marx 发生器直接用于驱动二极管产生强流电子束<sup>[6]</sup>, 实现目前变压器与脉冲形成线相结合的功能, 由于采用气体绝缘, 可以省略水线的水处理系统或者油线的滤油系统, 同时还可以省略初级储能大电容, 对于装置的小型化非常有利。因此本文对陡化前沿 Marx 发生器进行了初步设计和实验研究。

## 1 工作原理及电路模拟

陡化前沿 Marx 发生器之所以能够建立脉宽为几十 ns 的快前沿高压脉冲, 首先在于使用了小电容值、低电感的电容器, 本装置采用电容值为 3 nF 的低电感高压脉冲电容器, 尺寸为  $\phi 90 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 内电感小于 30 nH; 此外, 整体结构的设计是关键, 采用同轴结构可以很大程度上减小回路电感, 这样将整个装置包括储能电容器、充电电阻、各级气体开关及引线全部封装于金属筒内, 并于充电端接地, 形成同轴结构。陡化前沿波形建立的另一个关键在于合理地利用各级开关电极对地分散电容, 使每一级开关都迅速导通, 产生强烈的紫外光以预电离下一级火花开关, 从而使放电过程保持空间一致的雪崩式发展, 最终实现陡化前沿脉冲波形的建立<sup>[6]</sup>。

针对陡化前沿 Marx 发生器的结构特点, 将其等效为分散式传输存储电路<sup>[7]</sup>, 在考虑了开关电极分散电容、等效传输线效应及回路电感等因素的基础上, 建立了 10 级等效放电电路模型, 其单级电路如图 1 所示, 其中 trigger 代表第一级触发开关,  $C$  为储能电容,  $R_{\text{charge}}$  为充电电阻,  $T$  为级间连接引线及金属外筒形成的等效偏心同轴传输线,  $L$  为单级回路的电感,  $C_s$  为开关电极

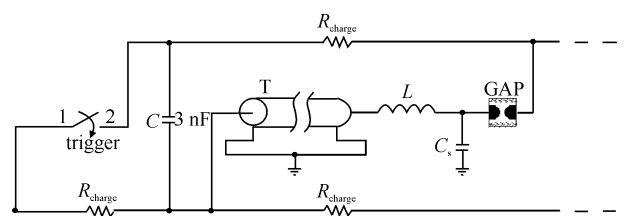


Fig. 1 Schematic of one stage circuit

图 1 单级电路示意图

\* 收稿日期: 2007-09-11; 修订日期: 2007-12-18

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。

对地分散电容, GAP 为文献[8]给出的自击穿开关模型, 用来模拟开关的实际耐压情况和导通过程。在具体进行电路模拟之前, 我们首先在不考虑  $R_{\text{charge}}$  和  $T$  影响情况下, 分析电极对地分散电容  $C_s$  的作用。在理想情况下, 各级开关顺序导通, 这样分析第一级单元回路时, 近似地将后面各级看作阻性负载, 那么由于  $C_s$  的存在, 触发开关 trigger 闭合后, 开关 GAP 导通前的电压为  $C$  对  $C_s$  的充电电压  $V_{cs}$ , 可以求解为

$$V_{cs} = V_0 \frac{C}{C + C_s} [1 - \cos(\omega t)] \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为储能电容  $C$  的充电电压;  $\omega^2 = (1/C + 1/C_s)/L$ , 当  $C_s$  较小时, 可以简化为  $\omega^2 = 1/LC_s$ , 这样式(1)简化为

$$V_{cs} = V_0 [1 - \cos(\omega t)] \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 如果  $C_s$  取值合适, 能够使开关前端电压迅速上升至击穿电压, 并且可以将此电压保持一段时间, 从而减小开关的击穿时延, 有利于火花开关的闭合。如果  $C_s$  太大, 开关前端电压上升较慢, 而  $C_s$  太小则会使高压保持时间过短, 两种情况均不利于火花开关的迅速导通。后面各级开关电极的对地分散电容也具有相似的作用, 在一定程度上充当了陡化电容的角色。

设置  $C = 3 \text{ nF}$ ,  $R_{\text{charge}} = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $L = 63 \text{ nH}$ , 负载电阻  $R_{\text{load}} = 50 \text{ }\Omega$ , 负载电阻的电感与电容分别为  $L_{\text{load}} = 150 \text{ nH}$  和  $C_{\text{load}} = 150 \text{ pF}$ 。如果开关工作在空气中, 各级自击穿气体开关的耐压约为  $V_b = 9.8 \text{ kV}$ , 此时对充电电压为  $7 \text{ kV}$  的情况进行了计算, 首先不计入  $C_s$  与  $T$ , 得到如图 2 所示的模拟结果, 其输出电压是一个标准的  $RLC$  振荡波形。加入分散电容  $C_s = 3.05 \text{ pF}$  与等效偏心同轴线, 其电长度  $T_D = 200 \text{ ps}$ , 阻抗  $Z_T = 90 \text{ }\Omega$ , 计算得到如图 3(a)所示的模拟结果, 波形有所改善, 类似方波, 电压幅值约为  $37 \text{ kV}$ , 电压利用效率为  $53\%$ ; 如果使开关工作在  $0.2 \text{ MPa}$  氮气中, 开关的耐压提高至  $V_b = 17.2 \text{ kV}$ , 此时对充电电压为  $11 \text{ kV}$  的情况进行了计算, 得到如图 3(b)所示的结果, 电压幅值约为  $57 \text{ kV}$ , 利用效率为  $51.8\%$ 。

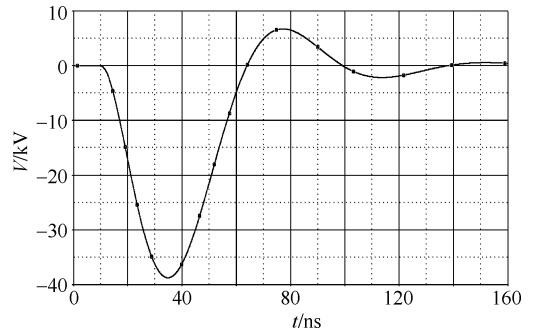


Fig. 2 Simulated result of model without stray parameter when charged to  $7 \text{ kV}$

图 2 不计入分散参数时充电电压为  $7 \text{ kV}$  的模拟结果

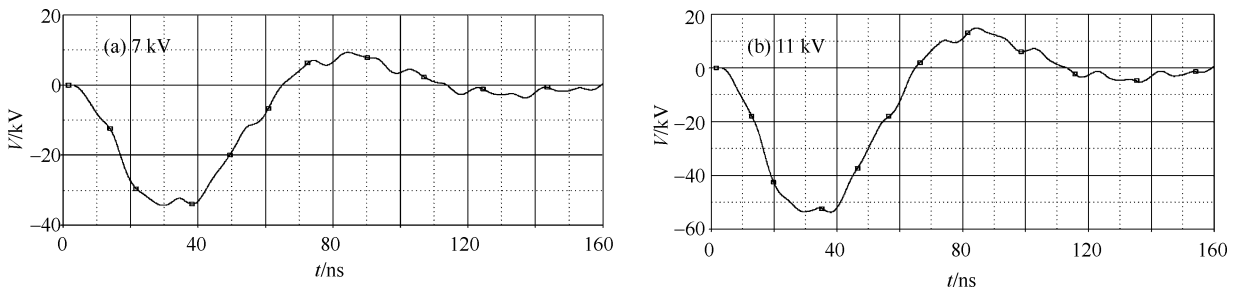


Fig. 3 Simulated results of model with stray parameter when charged to  $7 \text{ kV}$  and  $11 \text{ kV}$

图 3 计入分散参数时充电电压为  $7 \text{ kV}$  和  $11 \text{ kV}$  的模拟结果

由以上模拟结果可以看出, 电极对地分散电容与传输线效应对波形有较大的改善作用。两种不同充电电压情况下的输出电压波形趋势大体一致, 波形的半高脉宽为  $40 \sim 50 \text{ ns}$ , 前沿时间十几  $\text{ns}$ ,  $11 \text{ kV}$  充电电压时相对于  $7 \text{ kV}$  充电电压时的输出电压波形有所改善, 电压利用效率稍有下降。

## 2 结构设计

依据电路模拟结果, 我们尝试设计了 10 级陡化前沿 Marx 发生器, 如图 4 所示, 高分子绝缘板右端为发生器主体, 尺寸为  $\phi 220 \text{ mm} \times 1600 \text{ mm}$ , 左端为负载与测量部分。

内部结构如图 5 所示, 初级开关为三电极触发开关, 后面各级均为自击穿气体开关, 储能电容器与各级火花开关由绝缘支撑体隔开, 在绝缘体下方各级火花开关安放在同一条光路上, 以利于各级间的紫外光耦合, 并靠近金属外筒内壁从而形成电极对地分散电容, 开关采用球型黄铜电极, 直径为  $26 \text{ mm}$ , 间隙为  $2.6 \text{ mm}$ 。

在初步实验中,采用水电阻作为假负载,利用 RLC 仪测定在 1 MHz 时其电阻值约为  $50 \Omega$ ,电感约为  $150 \text{ nH}$ ,分散电容约为  $150 \text{ pF}$ 。为能够准确测量快前沿脉冲信号,我们将水电阻放置于贴有电容分压薄膜的金属负载筒内,选择具有较快响应时间的电容分压器<sup>[9]</sup>与法拉第筒测量输出的脉冲电压与电流波形,经定标薄膜型电容分压器在空气与变压器油中的分压比分别约为 2 300 和 5 000;法拉第筒的灵敏度约为  $56 \text{ A/V}$ 。

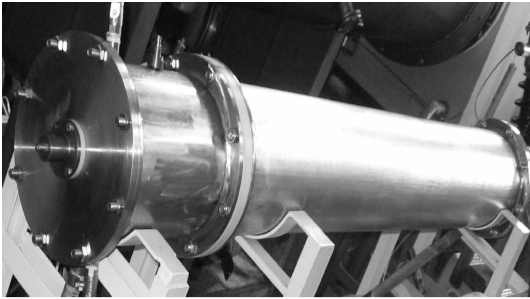


Fig. 4 10-stage wave erection Marx generator

图 4 10 级陡化前沿 Marx 发生器实物图片

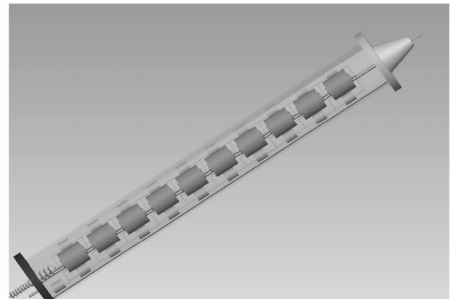


Fig. 5 Structure of 10-stage wave erection Marx generator

图 5 10 级陡化前沿 Marx 发生器结构示意图

### 3 实验结果与分析

当发生器内部充以  $0.1 \text{ MPa}$  氮气时,首先对发生器进行了开路实验,此时负载筒内为空气介质,对各级储能电容充电  $6 \text{ kV}$ ,经触发各级逐次导通,得到输出电压波形如图 6 所示,其幅值为  $60 \text{ kV}$ ,与充电电压的 10 倍相一致,可见发生器各级电压可以顺序叠加起来。

将负载连接后,充电  $7 \text{ kV}$ ,在负载筒为空气介质时测得如图 7(a)所示的输出电压与电流波形,波形前端的振荡可能是由于测量线没有屏蔽所致,电压幅值约为  $41 \text{ kV}$ ,模拟计算的幅值如图 3 给出,约为  $37 \text{ kV}$ ,实测脉冲半高宽为  $40 \sim 50 \text{ ns}$ ,计算值也为  $40 \sim 50 \text{ ns}$ ,实测的前沿时间与模拟计算的均为十几 ns,计算结果与实验结果基本一致。

将发生器金属筒内充以  $0.2 \text{ MPa}$  氮气,充电电压提高至  $11 \text{ kV}$ ,在负载筒内灌入变压器油,测得输出电压波形如图 7(b)所示,这里为更清晰地观察电压波形,没有将电流波形纳入。实测电压幅值为  $57.5 \text{ kV}$ ,计算幅值约为  $57 \text{ kV}$ ,实测与计算的脉冲半高宽相对充电  $7 \text{ kV}$  时基本没有变化,前沿时间稍有减小,但波形的计算结果与实测结果均较充电  $7 \text{ kV}$  时有所改善,方波的趋势体现得更加明显,说明这种发生器结构所形成的开关电极对地分散电容及等效传输线效对方波的形成起到了较好的作用,将图 6 与图 7(a)对比,可以发现随着充电电压的提高,输出电压波形有一定的改进。

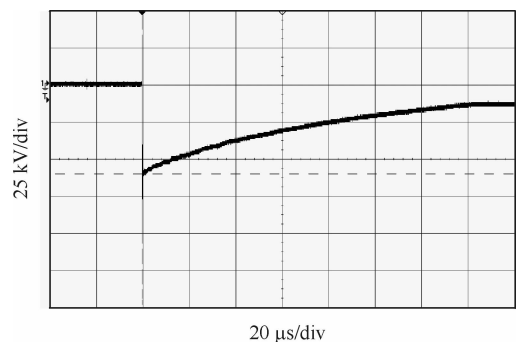


Fig. 6 Output voltage waveform of open circuit with 6 kV charged

图 6 充电电压为  $6 \text{ kV}$  的开路实验波形

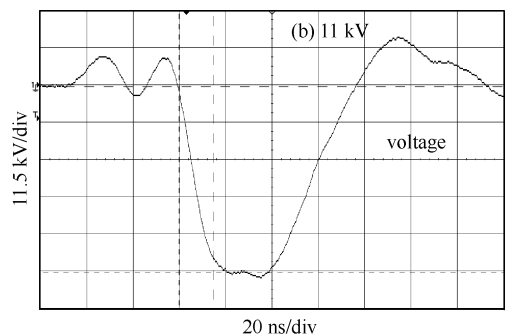
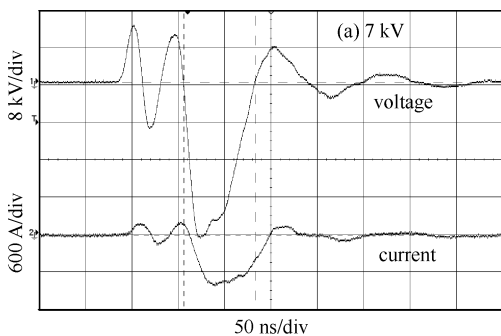


Fig. 7 Experimental results with voltage charged to  $7 \text{ kV}$  and  $11 \text{ kV}$

图 7 充电电压为  $7 \text{ kV}$  和  $11 \text{ kV}$  的实验结果

### 4 结论

本文设计并制作了 10 级陡化前沿 Marx 发生器,进行了初步实验研究,当充电电压为  $7 \text{ kV}$  与  $11 \text{ kV}$  时,

在 50  $\Omega$  水电阻负载上得到了脉冲宽度约为 40~50 ns、前沿时间为十几 ns、幅值分别为 41 kV 与 57.5 kV、近似方波的高压脉冲,实验结果初步说明了发生器结构中开关电极对地分散电容与等效传输线效应对陡化前沿的波形建立起到了关键作用。利用 PSpice 软件建立了与实际结构相对应的电路模型,模拟计算结果与实验结果基本一致。下一步工作计划提高充电电压,考察较高充电电压下波形的建立情况,并改善假负载形式,争取将发生器输出电压的前沿时间缩短至几 ns,输出电压达 200 kV 以上,然后展开相关的应用研究。

### 参考文献:

- [1] Platts D A. 10 Joule high voltage trigger micro Marx[C]//3th IEEE Pulse Power Conference. 1981: 485-486.
- [2] Kekez M M, LoVetri J, Podgorski A S, et al. A 60 Joule, 600 kV, 1 ns rise-time Marx system[C]//7th IEEE Pulsed Power Conference. 1989: 123-127.
- [3] Beverly III R E, Campbell R N. Triggering techniques for a compact Marx generator[J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, **65**(1): 259-260.
- [4] 于金辉,王明常,杨斥,等. Marx 直接驱动虚火花放电实验[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2): 238-240. (Yu J H, Wang M C, Yang C, et al. Experiment of pseudospark discharge driven by Marx generator directly. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2):238-240)
- [5] 史保壮,顾温国,张文元,等. 置于压缩气体中的高压陡波发生器[J]. *高压电器*, 1997, (5): 19-22. (Shi B Z, Gu W G, Zhang W Y, et al. A compact HV nanosecond impulse generator placed in high pressure gas. *High Voltage Apparatus*, 1997, (5): 19-22)
- [6] Mayes J R. A compact Marx generator for the generation of high power microwaves[C]//High Power Microwave Conference. 2001.
- [7] Kekez M M, Liu J. A 60 Joule, 600 kV, 500 ps risetime, 60 ns pulse width Marx generator [J]. *Meas Sci Technol*, 1994, **5**: 1389-1395.
- [8] 杨汉武. 爆炸磁压缩发生器及其脉冲功率调制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2002. (Yang H W. Research on explosively driven flux compression generators and related power conditioning circuit. Changsha: National University of Defense Technology, 2002)
- [9] 高景明,刘永贵,杨建华. 几种高压电容分压器响应时间的分析[C]//中国电机工程学会高压专业委员会高压新技术学组 2006 年学术年会论文集, 2006: 13-16. (Gao J M, Liu Y G, Yang J H. Response time analysis of several kinds of capacitive dividers for high-voltage pulse measurement//Proceeding of 2006 Annual Meeting of New Technology Group Affiliated to High Voltage Committee of China Association of Electrical Engineering. 2006: 13-16)

## Design and preliminary experimental results of wave erection Marx generator

GAO Jing-ming, LIU Yong-gui, LIU Jin-liang, YANG Jian-hua, LONG Xia-feng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China )

**Abstract:** A 10-stage wave erection Marx generator with coaxial structure is designed, which realizes the miniaturization of pulse power modulator with capacitance energy storage. Low-inductance capacitors of 3 nF are chosen as energy storage capacitors, and solid resistors are utilized as charging resistors. By means of rapid discharge of each short gas spark gap and ultraviolet coupling between stages, wave erection can be realized on the output load. Under the consideration of stray capacitance of electrodes to ground, equivalent eccentric transmission line effect and circuit inductance, equivalent circuit model is constructed for PSpice software to simulate the operation process. Under low charging voltage of 7 kV and 11 kV, preliminary experimental results are achieved. The output voltage waveforms are close to square wave, which are much improved compared to the traditional Marx generators' triangle wave form with large rise time. For both situations of 7 kV and 11 kV charged, the full width half maximum of output voltage is 40~50 ns, and the rise time is more than 10 ns, while the amplitudes are 41 kV and 57.5 kV, respectively. Experimental results and calculated results agree basically.

**Key words:** Pulsed power technology; Marx generator; Wave erection; Low-inductance capacitor; Self breakdown gas spark gap