

文章编号: 2095-4980(2014)01-0089-05

同轴结构快 Marx 发生器设计及实验

甘延青^{a,b}, 宋法伦^{a,b}, 卓婷婷^{a,b}, 张 勇^{a,b}, 秦 风^{a,b}, 龚海涛^{a,b}, 金 晓^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 设计了一种紧凑型同轴结构快前沿 Marx 发生器, 该发生器采用 3.3 nF 陶瓷电容器作为储能电容, 用螺旋形空芯电感作为充电电感, 通过各级气体火花开关迅速放电在负载上产生电压脉冲。为使整个 Marx 发生器结构紧凑, 将电容器、气体开关、充电及隔离电感设计为同轴一体化结构, 并放置在一个密封的金属圆筒内, 通过充氮气和六氟化硫的混合气体来绝缘。采用理论及电路模拟的方法, 分析了开关导通状态、分布电容、回路电感等因素对输出波形的影响。Marx 发生器的基本运行参数为: 十二级 Marx 发生器在负载 50 Ω 时输出电压 150 kV, 开路电压达 240 kV, 负载输出波形脉冲宽度 25 ns, 上升时间约 10 ns, 脉冲功率源能量为 7.9 J。

关键词: 脉冲功率技术; Marx 发生器; 同轴结构; 小型化设计

中图分类号: TN98; TM833

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0089

Design and experimental research on a coaxial configuration Marx generator

GAN Yan-qing^{a,b}, SONG Fa-lun^{a,b}, ZHUO Ting-ting^{a,b}, ZHANG Yong^{a,b}, QIN Feng^{a,b}, GONG Hai-tao^{a,b}, JIN Xiao^{a,b}

(a. Institute of Applied Electronics; b. Laboratory for High Power Microwave Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A compact, coaxial configuration and fast-rising time Marx generator is designed, which uses a 3.3 nF ceramic capacitor as energy storage capacitor, a spiral-shaped air core inductor as a charging inductor, and generates voltage pulses by a quick gas discharge on the loads. The Marx is fitted into a tube with 14.5 cm diameter and a total length of 47.7 cm. The capacitors, charging inductors and spark gas switches are insulated with mixed gas of Sulfur hexafluoride(SF₆) and Nitrogen(N₂). By theoretical and circuit simulation, the influences of switch conduction states, distributed capacitance, loop inductance and stray capacitance on the output waveforms are discussed. The voltage output waveform on the load(50 Ω) of Marx generator is analyzed using the PSPICE, which shows that the output voltage is 150 kV, the open circuit voltage is up to 240 kV, the pulse width of load output waveform is about 25 ns with 10 ns rise-time, and energy of pulsed power source is 7.9 J. A lumped circuit description of the Marx that well matches the experimental results is also given.

Key words: pulsed power; Marx generator; coaxial configuration; compact

在脉冲功率技术中, Marx 发生器被广泛应用于各种高压脉冲的产生。紧凑型 Marx 发生器, 包括用于高阻抗负载的快前沿 Marx 发生器和用于低阻抗 Z 箍缩负载的快 Marx 发生器, 两者都要考虑减小储能电容器电感和开关电感, 以及采用紧凑结构减小电容和开关之间的连接电感。关于快前沿 Marx 发生器的研究, 国内外都有开展。国外紧凑型 Marx 发生器的研究以美国 APELC 公司最具典型, 其在紧凑型 Marx 发生器的研究方面处于国际领先地位, 他们研制了各种不同类型的 Marx 发生器^[1-3], 脉冲能量从 mJ 到 kJ, 峰值电压从几 kV 到几十 kV。他们的目标是致力于研究便携式的 Marx 发生器。美国德克萨斯大学研制了一种陡化前沿的 Marx 发生器, 用于驱动虚阴极振荡器^[4]。国内国防科技大学高景明等人开展了紧凑型快前沿 Marx 发生器的研究^[5], 其研制的 Marx 发生器脉冲宽度 40 ns, 脉冲前沿 15 ns, 输出电压约 50 kV。某研究院等人也开展了快前沿 Marx 发生器技术研究^[6], 在有锐化条件下, 负载电阻 175 Ω 时得到了上升时间 2 ns、幅值 70 kV 的负脉冲信号。本文将从结构设计、模拟分析与实验电路等方面给出同轴结构快 Marx 的研究结果。

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2013-03-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划)

1 基本电路

Marx 发生器采用电感作为充电和隔离的器件, LC 型 Marx 发生器的充电时间很短, 有利于重复频率运行。LC 型 Marx 发生器的电路原理图如图 1 所示。电感隔离型 Marx 发生器可以用直流充电电源进行充电, 采用电感作为充电和隔离元件, 发生器相当于一个 n 级 L-C 链式电路。其充电时间为: $T_c = 2n\sqrt{2L_0C_0}$ 。其中, n 为 Marx 发生器的级数, L_0 为 Marx 发生器单级充电电感值, C_0 为 Marx 发生器单级电容值。

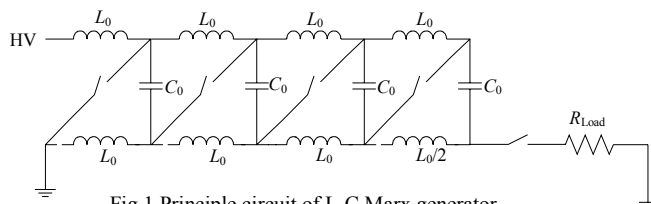


Fig.1 Principle circuit of L-C Marx generator
图 1 L-C 型 marx 发生器电路原理图

2 直流高压充电电源

为实现小型化 Marx 发生器的设计, 减轻系统的重量, 初级充电电源采用电池组供电技术, 无需外接电源。整个电源采用以下的方法实现: 要产生几十 kV 的高电压, 常用办法是采用变压器升压或者采用倍压电路进行升压, 由于体积的限制, 确定采用倍压升压的方式实现, 即需要把 24 V 电压逆变为交流电压。

在把 24 V 电压逆变转换为交流电压的方式中, 采用开关电源中使用的实现方式, 其中有单晶体管变换器、推挽晶体管变换器和用可控硅或者 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)实现的逆变器几种方式。因电源所需功率约为 100 W, 单晶体管变换器所能实现的功率较小, 而采用可控硅和 IGBT 实现的逆变器虽然功率大, 但体积也大。随着半导体技术的发展, 用双晶体管也能实现几百瓦的功率, 所以最后选定他激式的推挽变换器。电路图如图 2 所示。

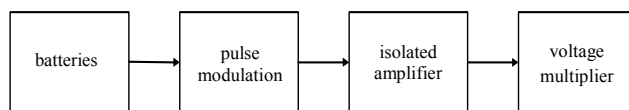


Fig.2 Circuit of the power source
图 2 电源电路示意图

工作原理为: 当接入 24 V 的直流电压时, 由脉宽调制芯片 SG1525 产生正负脉冲, 经过光耦隔离后, 再经过三极管 3DK10 放大, 输出的脉冲驱动高频大功率三极管 3DF80G 轮流导通, 在变压器初级绕组产生交替变化的方波电压, 再经变压器耦合到次级绕组后倍压, 产生直流高压输出到负载电路。该电源最大输出电压为 30 kV。

3 Marx 发生器结构设计

一般的 Marx 发生器, 采用电阻作为放电隔离器件, 而采用电感隔离的 Marx 发生器充电时间很短, 有利于重复频率运行。快上升前沿 Marx 发生器的设计, 从根本上说就是要减小放电回路的电感。采用同轴结构, 将 Marx 发生器紧凑型化设计, 可以减小电容器的连接电感, 具体结构如图 3 所示。

发生器采用模块化设计, 储能电容采用 3 300 pF/30 kV 圆饼型高压陶瓷电容器。电容器其中 1 个电极与集成了开关的电极板连接; 另 1 个作为接地电极。第 1 级为触发模块, 其他级为自触发模块, 如图 4 所示。

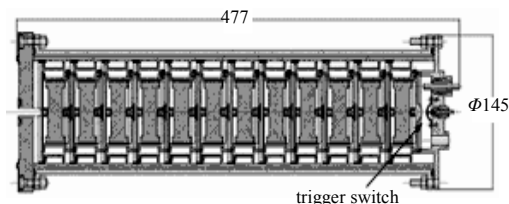


Fig.3 Structure of the Marx generator
图 3 Marx 发生器结构

4 参数计算

一般情况下, 简化的电路模型模拟 Marx 发生器放电情况, 可以得到 Marx 输出电压幅值、脉冲上升时间以及脉宽等相关信息。根据回路电感 L 和回路 C 取值不同, 负载上的电压波形也不同, L 越小, 峰值电压值越高。 L 一定时, 加大电容值也可以提高电压值, 但总储能增加。因此, 需要对 Marx 发生器的回路电感、回路电容进行相对精确的估计, 才能得到接近实际的模拟结果。

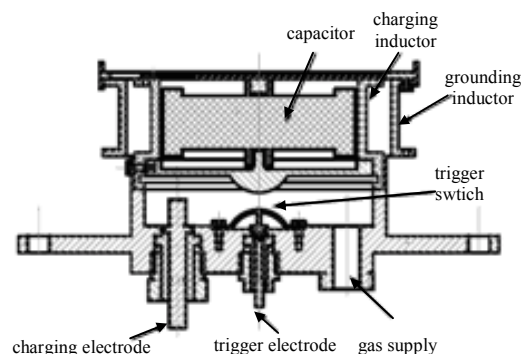


Fig.4 Structure of trigger module
图 4 触发模块结构

4.1 放电回路电感

Marx 发生器最主要的参数是放电回路电感,从 Marx 发生器的结构来看,放电回路电感主要包括开关电感、电容器的内感以及连线电感。开关电感包括通道电感和电极自身电感。火花通道电感估算公式为^[7]:

$$L_{\text{channel}} \approx 14d \quad (1)$$

式中 d 为间隙距离,单位 cm。开关间隙设计为 0.3 cm,火花通道电感约为 4.2 nH。电极自身电感经计算约为 1 nH。12 个开关电感总计约为 63 nH。单个电容器内感值约为 20 nH,12 级电容内感共计 $12 \times 20 \text{ nH} = 240 \text{ nH}$ 。连线电感约为 100 nH。Marx 发生器回路总电感值约 403 nH。

4.2 寄生电容

寄生电容主要包括开关电容和旁路对地电容。开关电容为开关正电极对负电极产生的电容,正负电极近似为圆盘型,圆盘半径为 34.5 mm,根据公式 $C = \epsilon S / d$ 计算,每一级电容值约为 8 pF。旁路对地电容主要由侧面金属板(正、负电极侧面)对地电极产生,结构为同轴结构,根据同轴结构电容的计算公式,可获得每一级旁路对地电容值约为 15 pF。

4.3 隔离电感

隔离电感的选取与负载有关,对于大的负载需要选取大的电感。电感结构如图 5 所示。充电电感 L_{charging} 直径为 63 mm,长 20 mm,采用 1.2 mm 的漆包线绕制,约 18 匝,计算电感值约为 18 μH ;对地电感 $L_{\text{grounding}}$ 直径为 73 mm,长 16 mm,采用 1.2 mm 的漆包线绕制,约 14 匝,电感值约为 14 μH 。

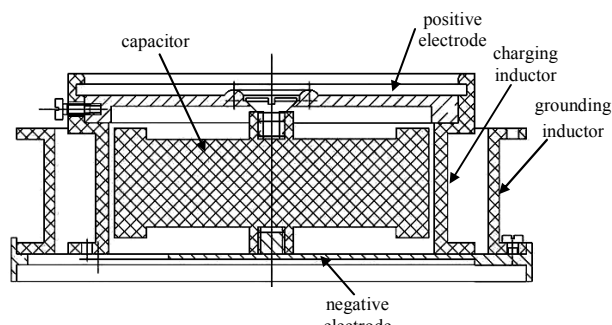


Fig.5 Structure of self-triggering module
图 5 自触发单元模块

4.4 脉冲上升时间

火花间隙开关放入氮气气体中,在开关同时导通的理想状态下,50 Ω 负载电阻 R_L 上获得脉冲上升时间为:

$$T_r = 21pd^2/4\alpha U_0^2 + 2.2L_m/R_L \quad (2)$$

式中: p 为气压值,单位 MPa; d 为开关间距,单位 cm; U_0 为开关两端加载电压; L_m 为放电回路总电感; α 为气体常数,氮气约为 0.8。在 0.25 Mpa 的条件下,开关间距 0.3 cm,开关两端加载电压 20 kV,回路电感为 403 nH,负载电阻 50 Ω ,计算可得脉冲上升沿约 15 ns。

5 Pspice 电路模拟结果

5.1 Marx 发生器中波的建立过程

Marx 发生器波的传播从第 1 级开关开始,第 1 级开关为触发开关。从第 2 级开始开关为过电压自触发开关,对于自触发开关,增大过压倍数可以减小开关的击穿时间,加快 Marx 发生器波形的建立,而过电压倍数取决于杂散电容与开关电极对地电容的大小,增大对地电容可以增加过压倍数。为了增加对地电容,主电极边缘设计了增容结构。

Marx 发生器波的建立过程中,当第 1 个开关闭合后,对地寄生电容能够维持下一级开关两端的电压,随着电压朝着负载传播,加载在开关两端的电压也随之增大,开关过电压倍数增大,使得开关更容易自触发。由上一节的计算可知,旁路对地电容为 15 pF,开关极间电容为 8 pF。为简化电路,只给出前 6 级波的建立过程。为便于理解波在开关之间的建立过程,假定第 1 级开关导通后,以后每一级开关较前一级开关延迟 10 ns 导通,第 2 级至第 5 级开关每一级开关中波的建立过程如图 6 所示。假定开关两端加载电压为 20 kV,由图 6 可以看出,在第 1 级开关导通后,第 2 级开关保持在 20 kV,第 1 个开关导通的瞬间内,第 1 个电容器左端电位由零变为 -20 kV,因而实际加在第 2 个开关两端的电压为 $20 \text{ kV} - (-20 \text{ kV}) = 40 \text{ kV}$ 。开关两端电压表示为 $V = V_0(1 + 2nC_g / (2C_g + C_s))$ 。其中, V_0 为电容充电电压, C_g 为对地寄生电容, C_s 为开

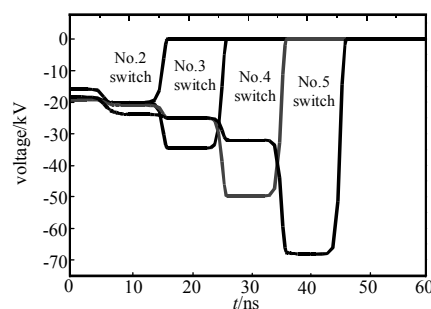


Fig.6 Voltage waveform on the switch
图 6 开关两端电压波形

关电容, n 为第 n 级开关。假定开关自击穿电压为 25 kV, 那么第 2 级开关的过压倍数为 1.6; 第 3 级开关的过电压倍数为 2.18。以后每级开关两端的过压倍数逐渐增加, 有利于开关的快速导通。

5.2 简化电路模拟结果

根据 Marx 发生器电路参数, 利用 PSpice 电路模拟软件对电路放电情况进行模拟。不考虑寄生电容和寄生电感的影响, 即为简化电路。图 7 给出了负载阻抗为 $50\ \Omega$ 的输出结果, 从图中可以看出, 上升时间(10%–90%)为 10 ns, 脉宽约 25 ns。充电电压 20 kV, 输出电压 150 kV, 输出效率为 $150\text{ kV}/240\text{ kV} \times 100\% = 62.5\%$ 。如果 Marx 发生器对阻容性负载放电, 那么电压输出效率会增大。

5.3 考虑寄生参数的影响

Marx 发生器各个部分之间存在很多的寄生电容和寄生电感, 其实际情况远比简化模型复杂。Marx 发生器是一个串联放电的过程, 其放电建立过程是一个开关逐级击穿的过程, 上面的模拟结果只能大概得出发生器的输出电压幅度, 上升时间等结果。考虑整个 Marx 发生器的结构, 可以采取等效电路的方法对整个电路进行模拟, 从而更加接近真实结果。根据第 4 节对寄生电容的分析, 对 12 级 Marx 发生器的等效电路进行模拟, 开关电容为 8 pF, 对地电容为 15 pF。负载阻抗为 $50\ \Omega$ 时负载输出波形见图 8。考虑寄生电感电容的影响后, 波形变差, 波形建立过程存在扰动。

6 实验结果

在理论分析的基础上, 完成了 12 级 Marx 发生器的研制并进行了实验研究。采用恒流电源充电, 充电电压 20 kV, 触发电压 20 kV。电压波形采用电容分压器进行测量, 负载阻抗 $50\ \Omega$, 输出电压波形如图 9 所示, 脉冲宽度 30 ns, 上升时间 10 ns。

7 结论

本文介绍了一种同轴结构紧凑型 Marx 发生器, 详细叙述了 Marx 发生器的设计结构, 对 Marx 发生器的各种参数进行了分析, 对 Marx 发生器波的建立过程进行分析, 着重强调了过压系数的影响。采用模拟软件对简化电路及考虑寄生进行了仿真分析, 实验结果与理论分析结果基本一致。该系统已经成功应用于直接驱动宽带天线技术^[8]。

参考文献:

- [1] Mayes J R, Carey W J, Nunnally W C, et al. The Marx generator as an ultra wideband source[C]// The 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Austin, TX: [s.n.], 2001.
- [2] Mayes J R, Carey W J. The direct generation of high power microwaves with compact Marx generators[C]// 14th International Conference on High-Power Particle Beams. Albuquerque, NM, USA: [s.n.], 2002: 299–302.
- [3] Mayes J R, Lara M B, Mayes M G, et al. An enhanced MV Marx generator for RF and flash X-ray systems[C]// 15th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA: [s.n.], 2005: 1302–1305.
- [4] Chen Y J, Neuber A A, Mankowski J, et al. Design and optimization of a compact, repetitive, high-power microwave system[EB/OL]. [2012–12–18]. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2093768>.

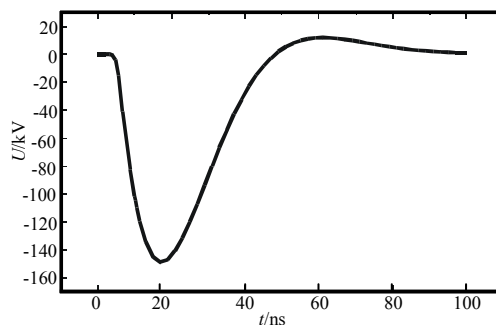


Fig.7 Output waveform

图 7 输出波形

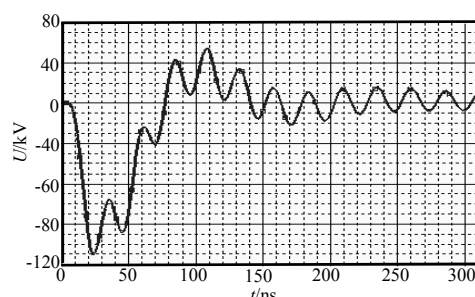


Fig.8 Output voltage waveform on the load

图 8 负载输出波形

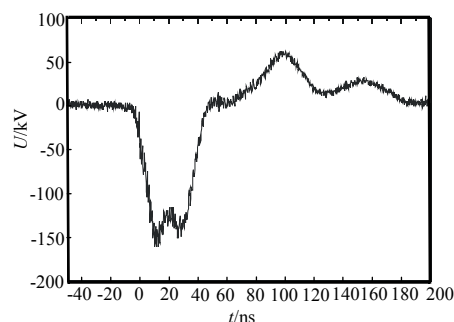


Fig.9 Output voltage waveform on the load

图 9 负载输出波形