

文章编号: 2095-4980(2017)02-0323-05

低抖动 Marx 型触发源系统设计与实验

李 飞^{a,b}, 宋法伦^{a,b}, 甘延青^{a,b}, 金 晓^{a,b}, 朱明冬^{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: 设计了一套具有低输出抖动的小型 Marx 型触发源系统。将充电、触发电源等进行了整体集成, 结合高储能密度的四端型薄膜电容器设计, 实现了系统的紧凑化, 体积仅 0.20 m³。将场畸变气体开关电极设计为环形轨道状, 采用平面触发方式, 以利于开关的低抖动输出和稳定工作。该系统输出电压、工作频率分别在 10~90 kV, 1~30 Hz 范围内独立可调。以 30 Hz 重复频率工作 300 次, 输出抖动的最大偏差(极差)仅为 13.0 ns。相比 30 Hz、30 次结果, 工作时间延长了 9 倍, 输出抖动极差仅增加了 38%, 表现出极低的输出抖动和高的稳定性, 是一种理想的高压触发源系统。

关键词: Marx 发生器; 输出抖动; 紧凑型; 重复频率

中图分类号: TN782; TM832

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0323

Design and test on Marx trigger source with low output jitter

LI Fei^{a,b}, SONG Falun^{a,b}, GAN Yanqing^{a,b}, JIN Xiao^{a,b}, ZHU Mingdong^{a,b}

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

Abstract: A compact trigger source with low output jitter is designed based on Marx-circuit. The volume of the system is reduced to 0.20 m³ by integration of the charging power supply and triggering power supply, as well as the introduction of a four-terminal film capacitor with high energy density. The annular orbit-shaped electrode and the planar-triggering designs are employed to lower the output jitter and improve working stability of the field distortion spark-gap switch. The impulse voltage and working frequency can be adjusted in the range of 10~90 kV and 1~30 Hz, respectively. The maximum deviation of the output jitter is as low as 13.0 ns when the system runs 300 times at 30 Hz, which means there is only a 38% of growth for the output jitter when the working time increases by nine times. The trigger source is an ideal high-voltage trigger system, which shows low output jitter and high reliability.

Keywords: Marx generator; output jitter; compact design; rep-rate

自 20 世纪 60 年代以来, 随着核爆模拟、粒子束惯性约束核聚变、电磁脉冲技术、等离子体技术等蓬勃发展, 脉冲功率技术得到了长足的发展和进步^[1-3]。目前, 基于脉冲功率技术的发展新要求, 以及面向工业和民用领域的应用需求, 发展小型轻量化、可重复频率工作、可靠性高的脉冲功率源系统成为当务之急。

脉冲功率源是将有限的能量进行时间和空间尺度的压缩, 从而产生较高输出功率的一种装置, Marx 发生器则是实现能量压缩的最常用技术手段^[4-5]。高功率 Marx 发生器的级数一般可达数十级, 为了获得稳定的导通特性和输出波形, 一般以触发方式使多个开关在同一时刻导通。本文设计了一种具有低输出抖动、稳定可靠的 Marx 型触发源系统, 系统体积仅为 0.20 m³, 输出电压和工作频率分别在 10~90 kV、1~30 Hz 范围内连续可调。该系统以 30 Hz 重复频率工作 30 次的输出抖动的最大偏差(极差)约为 9.4 ns。当系统工作次数提升 9 倍至 300 次时, 输出抖动极差仅增大了 38%, 且 300 次输出波形基本一致, 表现出极低的输出抖动和高的稳定性, 是一种理想的高压触发源系统。

收稿日期: 2015-12-21; 修回日期: 2016-03-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划); 高功率微波技术重点实验室基金资助项目(HPM2015-01)

1 Marx 型触发源系统设计与工作原理

1.1 Marx 型触发源系统结构设计

Marx 型触发源系统由初级电源分系统、控制分系统、Marx 发生器等 3 部分组成，结构如图 1 所示。为了实现全系统的小型化设计，将充电电源、触发电源、充电保护装置等集成为初级电源分系统，体积小约 0.12 m³，可同时完成 Marx 发生器的充电、触发等操作。控制分系统通过光信号完成对初级电源分系统的全部控制操作，不受高压放电产生的电磁干扰影响，可靠性高；Marx 发生器的设计结合了高效的直接倍压方式和高储能密度的薄膜电容器，尺寸为 500 mm×400 mm×350 mm，体积仅 0.07 m³，具有较高的空间利用率。Marx 发生器整体浸入变压器油中以实现可靠绝缘，外形结构如图 2 所示。

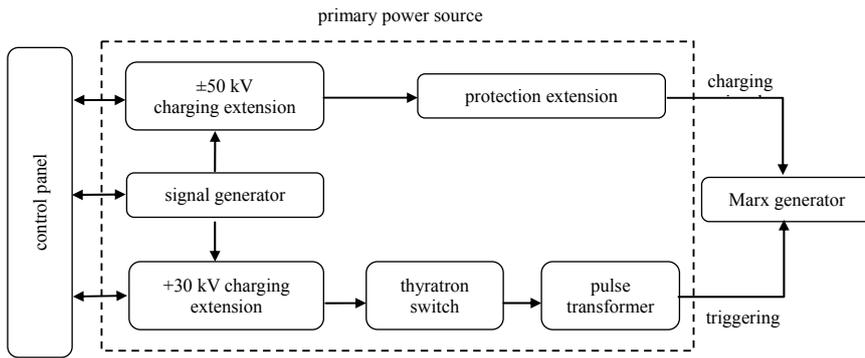


Fig.1 Constitution of Marx trigger source
图 1 Marx 型触发源系统组成框图

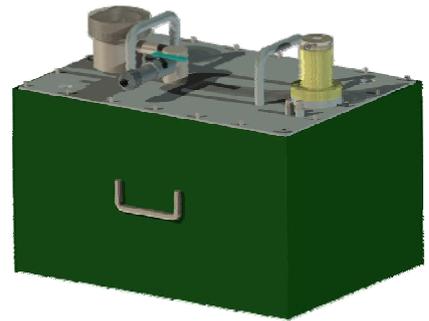


Fig.2 Picture of the Marx generator
图 2 Marx 发生器设计图

1.2 Marx 型触发源系统工作原理

如图 1 所示，Marx 型触发源系统工作流程为：控制分系统指令脉冲信号源产生电脉冲信号，启动±50 kV 充电分机工作，充电分机经过充电保护单元向 Marx 发生器中的高压电容器并联充电。当充电电压达到设定值后，控制分系统指令脉冲信号源启动+30 kV 充电分机工作，使闸流管开关组合导通输出电脉冲，经过脉冲变压器升压后，作为触发脉冲使 Marx 发生器中的气体开关导通，高压电容器串联放电，从而实现电压叠加输出。

Marx 发生器通过并联充电、串联放电原理实现倍压输出，其电路原理如图 3 所示。充电时各级开关 S 处于开路状态，系统通过各级电感 L 构成充电回路，将各级电容 C 充电至 V。充电结束后，开关 S 闭合导通，各级电容串联放电，建立起幅值为 nV 的高压。本文中 Marx 发生器设计为 2 级(n=2)。

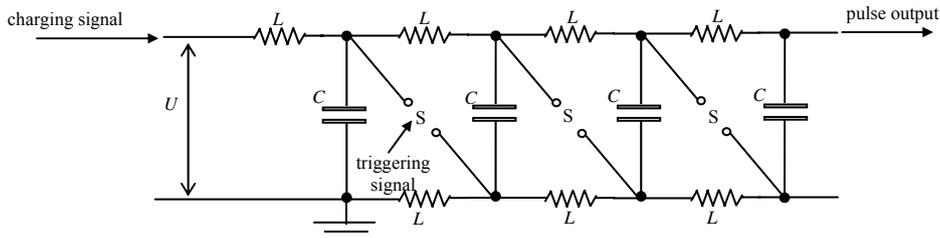


Fig.3 Schematic of Marx generator
图 3 Marx 发生器工作原理示意图

1.3 Marx 发生器结构设计及优化

1.3.1 总体结构设计

Marx 发生器主要由高压电容器 C、开关 S、负载电阻 R 等部分组成，设计原则为充分利用空间，尽量降低回路电感。为此，Marx 发生器内部的电容、开关之间全部使用宽铜片进行连接，铜片长度均不超过 4 cm，以尽量减小回路连接电感；采用全电感隔离型工作方式，具有充电时间短、效率高等优点，有利于重复运行。

1.3.2 电容器设计

为实现小型化设计，研制了双极平板式薄膜电容器，通过提高其储能密度，减小了电容器体积。将电容器设计为四端结构，充电和放电回路分别位于电容器两端，通过将高压部分进行空间隔离，降低了系统绝缘要求。电容器设计耐压 120 kV，电容值约 22.5 nF，等效电感小于 20 nH。

1.3.3 开关设计

开关是 Marx 发生器实现能量转移和倍压输出的核心器件，其导通特性直接影响发生器的输出性能。开关设计应尽量减小其固有的结构电感和放电过程中形成的通道电感，并提高其稳定性。选择技术成熟度高的三电极气体火花间隙开关，开关结构如图 4 所示。通过环形放电电极设计可减小开关结构电感，并在放电过程中形成多通道放电，减小开关导通电感；采用平面触发方式，可在降低开关输出抖动的同时提高其稳定性。

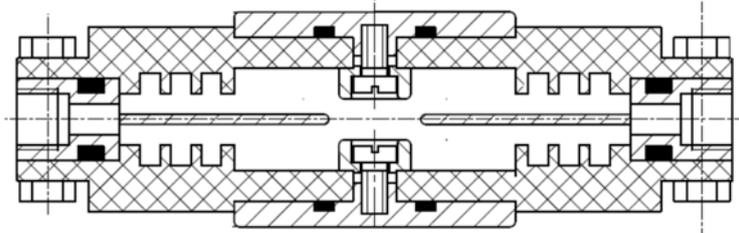


Fig.4 Structure of the triggered gas gap switch
图 4 触发式气体开关结构图

开关厚度 42 mm，电极间距 8 mm，工作电压 100 kV(开关腔内充 SF₆ 气体)，重复频率可达 50 Hz，输出抖动极差小于 10 ns，导通时间约为几十 ns。开关电感主要由通道电感和结构电感等组成，通道电感值可由如下经验公式估算^[6]：

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

式中 d 为开关间隙距离。本文中的开关间隙设计为 0.8 cm，通道电感约为 11.2 nH。开关的结构电感可根据圆截面空心直导线电感计算公式进行估算^[7]，本文开关结构电感估算为 4 nH，故开关总电感约为 15.2 nH。由 Rompe 和 Weizel 等的经验公式，计算得到开关的火花隙电阻约为 0.25 Ω^[8]。

2 Pspice 电路模拟分析

使用 Pspice 软件模拟分析了该 Marx 型触发源系统的输出特性，模拟电路如图 5(a)所示。其中， L_{C1}, L_{C2} 分别为电容 C_1 和 C_2 的等效电感， L_{Sg} 为开关 S_g 电感， L_1, L_2, L_3 分别为回路连接电感， L_{out} 为输出端电感， L_{gr} 为负载 R 的接地电感。考虑到该 Marx 型触发源系统可被用作高功率脉冲功率源的前级触发系统，两者通过一段高压电缆连接。为了得到更为准确的输出后者的脉冲波形，在仿真时考虑了这段高压电缆的影响，其电感经过测量约为 700 nH。具体模拟参数为：电容 22.5 nF，回路总电感约 845 nH(其中开关电感 15.2 nH，电容器等效电感 40 nH，回路连接电感约 40 nH，输出端电感 700 nH，负载接地电感约 50 nH)。图 5(b)为模拟得到的输出波形，与典型的 Marx 发生器的输出波形基本一致，输出脉宽约 210 ns。

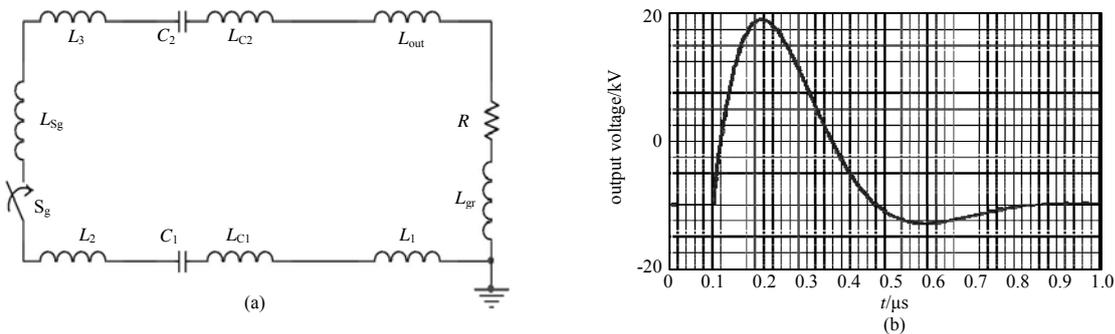


Fig.5 Simplified Marx circuit (a), simulated output waveform (b)
图 5 Marx 发生器模拟电路图(a), 输出波形(b)

3 Marx 型触发源系统输出特性验证

实现 Marx 型触发源系统的低抖动、稳定输出，既是其作为高功率脉冲功率源的前级触发源的基本要求，同时还可降低多级高功率 Marx 型脉冲功率源的输出抖动提供思路，因为实现其基本输出单元——级数低至 2 级的 Marx 发生器系统的低抖动、稳定输出，是实现更多级 Marx 发生器低抖动输出的基础^[9]。以氢闸流管的输出信号作为触发脉冲，测试了所设计的 Marx 型触发源的输出特性。

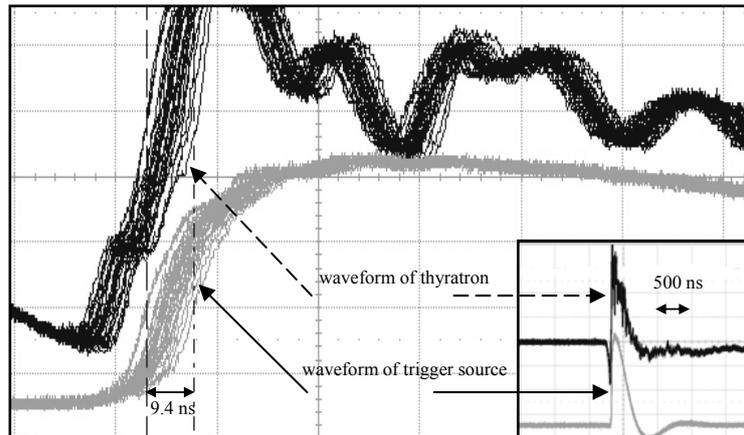


Fig.6 Detail view of the output waveform of the trigger source and thyatron with 30 Hz rep-rate for 30 times. The inset in lower right is the overall view of the waveform

图 6 触发源和闸流管以 30 Hz 频率工作 30 次的输出波形局部放大图, 右下角插图图为输出波形的全貌

图 6 和图 7 分别给出了相同工作条件下, Marx 发生器以 30 Hz 的重复频率, 连续工作 30 次(1 s)和 300 次(10 s)的脉冲电压波形。由 30 次输出波形的叠加图(图 6 中右下角插图)可见, Marx 发生器的 30 次输出波形高度重合, 输出较为稳定。平均脉冲宽度约为 215 ns, 波形曲线与图 5 中的拟合结果基本一致。受实际电路中开关上的能量损失、回路中接触电阻等的影响, 输出效率会略有降低。图 6 给出了波形上升部分的细节图, 经过测量, 30 次输出波形的抖动极差(最大偏差)为 9.4 ns, 抖动在经过 Marx 发生器传递后, 基本未放大。

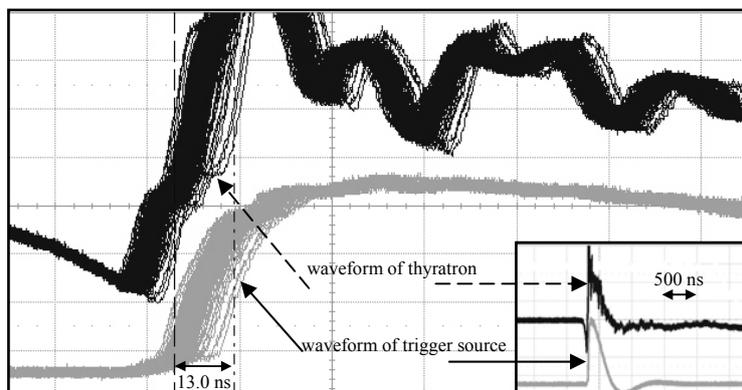


Fig.7 Detail view of the output waveform of the trigger source and thyatron with 30Hz rep-rate for 300 times. The inset in lower right is the overall view of the waveform

图 7 触发源和闸流管以 30 Hz 频率工作 300 次的输出波形局部放大图, 右下角插图图为输出波形的全貌

为了验证系统在重频模式下长时间工作的稳定性和可靠性, 将系统工作时间增加 10 倍至 300 次, 测试了其输出特性。如图 7 中的右下角插图所示, 300 次输出波形基本重合, 输出较为稳定。由图 7 所示的波形上升部分的细节图可见, 300 次输出的抖动极差(最大偏差)仅为 13.0 ns。相比 30 次的输出特性, 虽然工作时间显著增加了 9 倍, 其输出抖动极差仅增加了 38%, 说明该 Marx 型触发源系统具有较低的输出抖动和高的可靠性。值得指出的是, 系统输出抖动仍然主要受前级氢闸流管输出抖动影响。

可见, 所设计的 2 级 Marx 型触发源系统具有高的输出稳定性和低的输出抖动特性, 其输出电压和能量是氢闸流管的数倍, 但输出抖动与氢闸流管相当, 是一种理想的高压触发源。其低抖动特性来源于气体开关的稳定输出, 这与气体开关的环形轨道式电极设计和平面触发模式有关。虽然其低抖动输出特性亦与所设计的 Marx 发生器中的开关数量较少有关, 随着开关数量增多, 输出抖动必然会增大。但作为其基本组成单元, 级数低至 2 级的 Marx 发生器系统的低抖动、稳定输出特性的实现, 是实现更多级 Marx 发生器系统低抖动输出的基础, 具有重要参考价值。

4 结论

本文设计了一种具有低输出抖动、结构紧凑的 Marx 型触发源系统,介绍了系统的组成、结构设计和工作原理。根据理论和经验公式,对 Marx 发生器中气体开关的结构电感和导通电感、系统连接回路电感等参数进行了估算。采用 Pspice 电路对 Marx 发生器的建立过程进行了模拟分析,并对其输出特性进行了实验验证:系统在 30 Hz 重频工作模式下,连续工作 30 次的输出抖动极差仅为 9.4 ns。即使连续工作次数延长 10 倍至 300 次,其输出抖动极差仅增加了 38%,约为 13.0 ns,表现出很低的输出抖动和高的稳定性。该 Marx 型触发源是一种理想的前级触发系统,并对实现多级 Marx 型脉冲功率源的低抖动输出具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 王莹. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010. (WANG Ying. Science and Technology on Pulsed Power[M]. Beijing:Beihang University Press, 2010.)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (LIU Xisan. High Power Pulse Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.)
- [3] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用:(6)代表性的应用[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(3):030201-1-030201-9. (JIANG Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: typical applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(3):030201-1-030201-9.)
- [4] BUCHENAUER C J. Optimizing compact Marx generator networks[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010,38(10): 2771-2784.
- [5] ARANTCHOUK L,POINT G,BRELET Y,et al. Compact 180-kV Marx generator triggered in atmospheric air by femtosecond laser filaments[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(10):103506-1-103506-4.
- [6] 甘延青,宋法伦,卓婷婷,等. 同轴结构快 Marx 发生器设计及实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):89-92. (GAN Yanqing,SONG Falun,ZHUO Tingting,et al. Design and experimental research on a coaxial configuration Marx generator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):89-92.)
- [7] 卡兰塔罗夫. 电感计算手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1992. (КАЛАНТАРОВ. Inductor Calculation Manual[M]. Beijing:China Machine Press, 1992.)
- [8] 秦风,宋法伦,甘延青,等. 模块化低阻抗紧凑型 Marx 发生器[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):907-911. (QIN Feng, SONG Falun,GAN Yanqing,et al. Compact low-impedance Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4):907-911.)
- [9] 刘金亮,樊旭亮,白国强,等. 紧凑型 Marx 发生器高功率微波源研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(4):757-764. (LIU Jinliang,FAN Xuliang,BAI Guoqiang,et al. Progress of based on compact Marx generators high power microwave source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(4):757-764.)

作者简介:



李 飞(1987-), 男, 陕西省宝鸡市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率脉冲功率源系统.email:shanxilifei@163.com.

宋法伦(1977-), 男, 山东省临沂市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波驱动源及器件.

甘延青(1970-), 男, 四川省绵阳市人, 工程师, 主要研究方向为高功率 Marx 型脉冲功率驱动源系统.

朱明冬(1989-), 男, 四川省乐山市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为绝缘材料的表面改性.

金 晓(1969-), 男, 兰州市人, 研究员, 主要研究方向为高功率脉冲功率驱动源、微波器件及其效应机理.