

文章编号: 1001-4322(2009)01-0157-04

陡化前沿 Marx 发生器的重频运行研究*

高景明, 刘永贵, 刘金亮, 杨建华, 梁波

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 将 10 级陡化前沿 Marx 发生器由电阻隔离型改造成为电感隔离型, 以便对其开展重频特性研究。通过恒压源充电的单次实验发现, 发生器在氮气(N_2)中工作时, 两种隔离方式的输出脉冲波形基本一致, 然而在六氟化硫(SF_6)气体中工作时, 电感隔离型相对于电阻隔离型的输出脉冲前沿较慢; 对其原因做出了初步分析。在利用恒流充电装置充电的重频实验过程中, 通过采用提高充电电流的方法, 解决了发生器恒流充电时的充电脉动问题, 进而开展了重复频率运行实验研究。实验结果表明, 在不对开关进行吹气的情况下, 当充电 30 kV 时, 发生器可以在 8.2 Hz 的重频下稳定工作, 输出脉冲的重叠一致性比较好, 输出电压约为 150 kV, 电流约为 1.8 kA, 脉冲前沿为十几 ns。

关键词: 重复频率; 陡化前沿; Marx 发生器; 电感隔离

中图分类号: TM833 **文献标志码:** A

装置的小型化与重复频率运行是脉冲功率技术发展的两个重要方向, 早有权威专家认为发展重复频率运行可能是高功率脉冲技术的第四个重大技术突破口^[1]。俄罗斯学者研制的 SINUS 系列对脉冲功率技术这两方面的发展做出了巨大的贡献^[2], 然而类似 SINUS 的系统的造价是比较高的; 近些年, 随着电容器与开关技术的发展, 一类被称为陡化前沿 Marx 发生器(Wave Erection Marx Generator)的小型脉冲功率系统, 鉴于结构紧凑、性能可靠及制作成本低廉等优点, 在国外得到了较好的发展^[3-5]; 国内对传统的 Marx 发生器虽然已经有相当多的研究^[6-8], 但是对这种陡化前沿的 Marx 发生器报道却很少。本研究小组关于陡化前沿 Marx 发生器的初步实验研究^[9]以及成功驱动强流场发射二极管的实验研究^[10]已经体现出它在装置小型化方面的优势, 因为陡化前沿 Marx 发生器中采用的是气体绝缘, 这样就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, 同时由于自身进行储能还可以省去初级储能系统的大电容。如果将陡化前沿 Marx 发生器发展为重频运行, 则可以进一步拓宽其应用前景。本文在前期工作的基础上, 将发生器由原来的电阻隔离型改造成为电感隔离型, 并利用恒流充电平台进行了重频运行实验。实验结果表明, 在不对开关吹气的情况下, 当充电 30 kV 时, 该发生器可在 8.2 Hz 重复频率下稳定运行, 电压电流波形在 82 Ω 水电阻负载上的重叠一致性很好, 输出电压幅值约为 150 kV, 电流约为 1.8 kA, 脉冲前沿为十几 ns。

1 实验装置

1.1 充电系统与触发系统

相对于电阻隔离, 电感隔离方式可以使 Marx 发生器的充电时间大大缩短, 从而更适合在较高重复频率下运行, 此外, 电感元件的发热量小, 可以使发生器长期连续工作而不会出现元件过热而烧毁的情况, 因此, 在重频运行实验中有必要用充电电感代替充电电阻作为隔离元件。

重复频率充电电源一般有两种形式, 即恒压充电方式与恒流充电方式。文献[6-7]采用如图 1 所示的直流恒压源充电方式, 使装置工作于爆发式连续工作模式, 取得了较好的效果。其中 r_0 是充电匹配电阻, S 是充电火花开关, G_1, G_2, \dots, G_n 以及 G_1 是放电火花开关, G_1 与 G_2 为外部触发开关, L_0 是隔离电感, 最后一级的隔离电感为 $L_0/2$, C_0 是各级储能电容, R_1 是

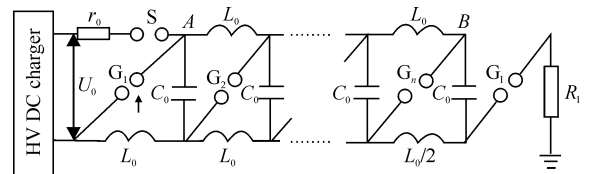


Fig. 1 Inductively isolated Marx generator charged by high voltage DC charging device

图 1 利用直流高压电源充电的电感隔离型 Marx 发生器充电回路

* 收稿日期: 2008-09-11; 修订日期: 2008-11-25

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。

负载电阻。然而这种充电方式也存在着不足之处。由于采用脉冲充电方式,充电时将会在 G_1 与 G_2 的触发极和所对应的主电极之间造成局部过电压,因此,为了避免 G_1 与 G_2 误击穿,必须将其间隙调大。这样会在一定程度上使装置的同步性能变差,对于我们的单级触发结构而言,这种充电方式可能会给同步性能带来更严重的影响。基于以上考虑,我们采用了 $L-C$ 式的恒流充电方式,充电回路如图 2 所示。与图 1 对比,图 2 中没有充电匹配电阻 r_0 和充电火花开关 S ,而是代之以功耗很小的充电保护电路,这样更加有利于提高充电效率和充电速度。假设充电电流恒定为 I_0 ,那么理想情况下的充电时间为 $T_c = nC_0V_0/I_0$,其中 n 为电容器个数, V_0 为充电电压。如果以 100 mA 的电流充电到 30 kV,我们的装置只需 9 ms 就可以完成充电。实验中采用的触发系统与充电系统是相互独立的,其输出电压为几十 kV 至 100 kV 可调,工作频率为 1~10 Hz 可调。

1.2 电感隔离型陡化前沿 Marx 发生器

电感隔离型陡化前沿 Marx 发生器的内部结构如图 3 所示,详细描述见文献[9-10],其中变化之处只在于用隔离电感替换了隔离电阻。自制的高压隔离电感实物如图 4 所示,利用高压绝缘线在空心尼龙棒上(内部可加磁芯)密绕而成,高压绝缘线的额定电压为 50 kV,充分满足绝缘要求,其大体尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$,未加磁芯时电感约为 $38 \mu\text{H}$,加入铁氧体磁芯后,电感增大为 $200 \mu\text{H}$ 。实验证明,隔离电感越大越有利于提高发生器的同步性能^[6],然而其值过大时可能会导致充电启动时开关的误击穿,我们在实验中检验 $200 \mu\text{H}$ 的隔离电感值适合陡化前沿 Marx 发生器的实际操作。

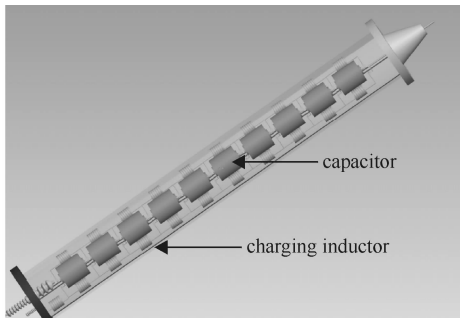


Fig. 3 Schematic of inductively isolated 10-stage wave erection Marx generator

图 3 电感隔离型 10 级陡化前沿 Marx 发生器内部结构示意图

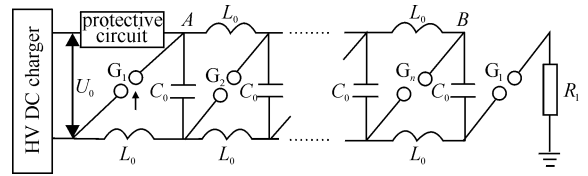


Fig. 2 Inductively isolated Marx generator charged by constant current charging device

图 2 利用恒流源充电的电感隔离型 Marx 发生器充电回路

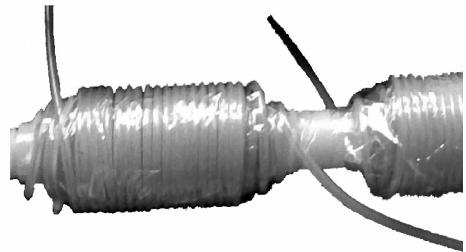


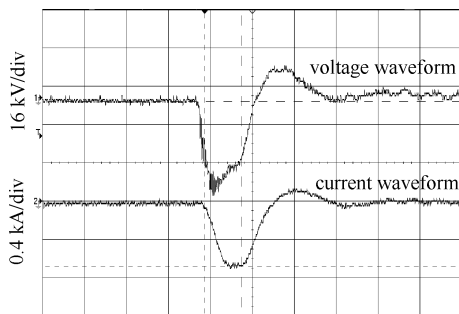
Fig. 4 Photo of high voltage inductors for isolation

图 4 高压充电电感实物图

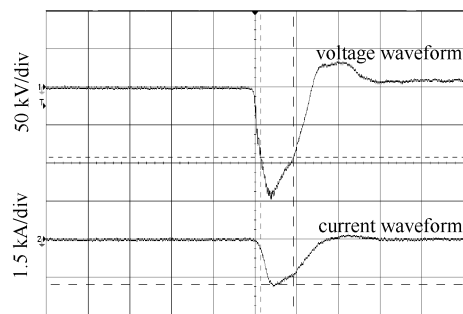
2 实验结果与分析

2.1 单次实验结果与分析

电感隔离的 10 级陡化 Marx 发生器安装完成后,首先利用工频整流直流电源进行了单次实验。在 N_2 和 SF_6 气体中分别进行了低电压和高电压情况下的放电实验,得到如图 5 所示的实验结果(两个实验的负载阻抗



(a) discharging in N_2 with a 12 kV charging voltage



(b) discharging in SF_6 with a 30 kV charging voltage

Fig. 5 Results of single shot experiment powered by constant voltage charging device

图 5 利用恒压源充电的单次实验结果

不同： N_2 实验时为 60Ω ； SF_6 实验时为 82Ω ），对应实际测得的峰值电压分别约为 40 kV 和 140 kV 。相对于原来的电阻隔离情况，可以看出 N_2 中的放电波形基本没有变化，电压脉冲仍然保持着比较快的前沿，为几个 ns；而 SF_6 中的放电波形则有很大的差距，不仅电压脉冲的前沿变慢（为十几 ns），电流脉冲的平顶也消失了。初步分析认为，可能是 N_2 中的气体火花开关的闭合速度比较快，这样电感隔离的效果相对比较明显，所以能够得到较快前沿的高压脉冲波形，不过这其中的原因比较复杂，尚需进一步的研究。然而，在我们的装置中，高电压实验时必须使用 SF_6 ，否则就要以高压的代价来实现绝缘的目的，可能会超出所选用储能电容器的使用条件（如果使用高性能的陶瓷脉冲电容器，就不会受高压的影响，这是以后我们需要改进的地方），所以，下面的重频运行实验均是在 0.2 MPa 的 SF_6 气体中开展的。

2.2 重频实验结果与分析

充电 30 kV 时，首先进行 1 Hz 的实验，发现产生多个脉冲时波形不稳定，一组典型的实验结果如图 6 所示。可以观察到主要有两种趋势的波形，一组为快前沿的，另一组为慢前沿的。这种现象的可能解释是：主电容的容量较小，在充电完成后，通过隔离元件的漏电比较快，而充电补充不够及时，产生了充电脉动现象^[1]，所以在充电电压比较高时触发脉冲到来，开关可以顺序导通，产生快前沿的脉冲信号，而恰好当充电电压比较低时触发脉冲到来，则开关导通顺序受到影响，很可能是第一个开关触发后，不是第二个顺序导通，而是过电压波传输到最后一个开关时发生全反射，迫使最后一个开关导通，产生一种逆序导通的现象，从而产生了一组慢前沿的脉冲信号。

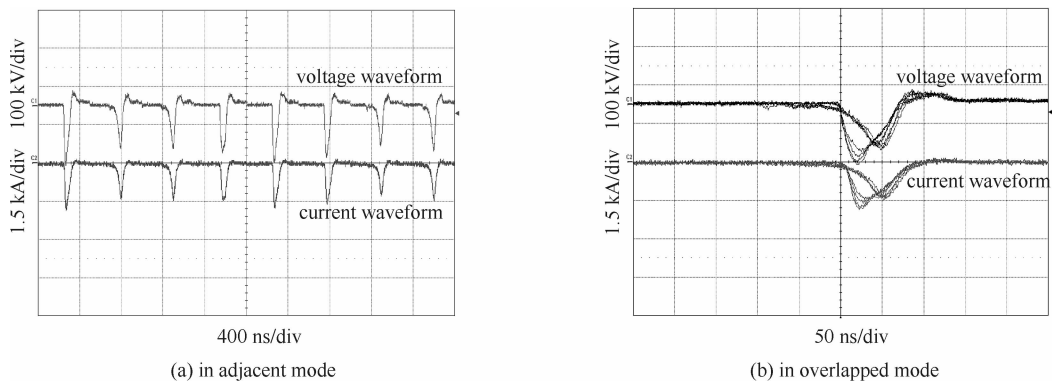


Fig. 6 Results of 1 Hz repetitive experiment powered by constant current charging device with low charging current

图 6 利用恒流源充电 1 Hz 时低充电电流的重复频率实验结果

从上面的实验现象中可以看出，要使发生器能稳定地重频运行，必须减小充电脉动。我们通过提高充电电流，解决了这个问题。当充电电流足够大时，储能电容器上漏掉的电荷可以得到及时的补充，这样充电脉动就减小了很多，基本可以满足我们的实验要求。在不对开关吹气的情况下，分别进行了 $2.3, 4.2, 5.8$ 和 8.2 Hz 的重频运行实验。 8.2 Hz 运行时的一组实验结果如图 7 所示，输出电压约为 150 kV ，电流约为 1.8 kA ，脉冲前沿时间为十几 ns，多个脉冲波形的重叠性比较好，说明内部气体火花开关的绝缘恢复良好，发生器重频工作稳定。

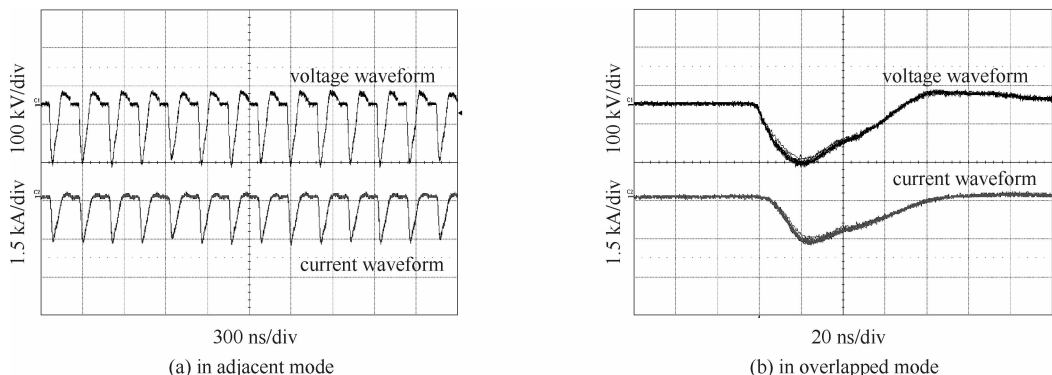


Fig. 7 Results of 8.2 Hz repetitive experiment powered by constant current charging device with high charging current

图 7 利用恒流源充电 8.2 Hz 时大充电电流的重复频率实验结果

3 结 论

成功地将 10 级陡化前沿 Marx 发生器由电阻隔离型改造成为电感隔离型,进而利用恒流充电装置对其开展了重频运行实验研究。实验结果表明,在不对开关进行吹气的情况下,当充电 30 kV 时,发生器在 8.2 Hz 的重频下稳定工作,输出脉冲的重叠一致性比较好,输出电压约为 150 kV,电流约为 1.8 kA,脉冲前沿约为十几 ns。陡化前沿 Marx 发生器的重复频率运行,可为重频强流电子束加速器的小型化探索一条经济可靠的技术路线。当然,就该设备现有情况还有不少需要改进的地方,如降低发生器内部阻抗,进一步提高输出电压幅值,改善开关同步性能等。此外,为了能够进行高效率的重频充电,应该设计更合适的充电触发方式,减小初级电源的能耗,并实现充电触发一体化的智能控制。

参考文献:

- [1] 王淦昌. 序言[C]//中国高功率粒子束十年文集,1995。(Wang Ganchang. Preface//The Decade Selected Works of High Pulsed Power in China. 1995)
- [2] 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.
- [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] 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. 2002:236-239.
- [5] 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. 2005:1302-1305.
- [6] 曾大雄, 郭忠华, 平家彪. 电感隔离型 Marx 发生器的研究[J]. 核科学与工程, 1983, **3**(3): 272-281。(Zeng Daxiong, Guo Zhonghua, Ping Jiabiao. Investigation of a reactor-isolating-type Marx generator. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1983, **3**(3): 272-281)
- [7] 王新新, 张卓, 肖如泉. 重复频率 Marx 发生器[J]. 电工技术学报, 1997, **12**(6): 59-62。(Wang Xinxin, Zhang Zhuo, Xiao Ruquan. Repetitive Marx generator. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1997, **12**(6): 59-62)
- [8] 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 Weidong, Li Hongtao, Gu Yuan-chao, et al. 200 kV fast rise time Marx generator. *High Voltage Engineering*, 2002, **28**(11): 40, 51)
- [9] 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 Jingming, Liu Yonggui, Liu Jinliang, et al. Design and preliminary experimental results of the wave erection Marx generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 167-170)
- [10] 高景明, 刘永贵, 荀涛, 等. 陡化前沿 Marx 发生器的阻抗特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(12): 2105-2108。(Gao Jingming, Liu Yonggui, Xun Tao, et al. Experimental research on the impedance characteristic of a wave erection Marx generator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 2105-2108)
- [11] 秦松林. 冲击电压发生器的恒流充电[J]. 高压电器, 1997, **33**(2): 28-31。(Qin Songlin. Constant-current charging for impulse voltage generator. *High Voltage Apparatus*, 1997, **33**(2): 28-31)

Investigation on repetitive operation of wave erection Marx generator

Gao Jingming, Liu Yonggui, Liu Jinliang, Yang Jianhua, Liang Bo

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

Abstract: A 10-stage wave erection Marx generator was modified from resistively isolated configuration to inductively isolated configuration for the investigation on its repetitive operation characteristics. Through a single shot experiment powered by a constant voltage charging device, it is found that when discharging in N_2 , the generator has the same output waveforms for both isolation configurations; but when discharging in SF_6 , it has a faster rise time for the resistively isolated configuration than that for the inductively isolated configuration, and the reason for this phenomenon was analyzed preliminarily. By enhancing the charging current, the pulsant problem for repetitive charging with constant current charging device was solved, and then, repetitive operation experiments were carried out. The experimental results show that with a 30 kV charging voltage, the wave erection Marx generator can operate stably at 8.2 Hz repetition rate without blowing off the internal spark gaps, producing an output pulse of 150 kV, 1.8 kA and rise time less than 20 ns.

Key words: repetitive rate; wave erection; Marx generator; inductively isolated