

200 kV 重复频率 Marx 发生器研制^{*}

邓明海, 曹宁翔, 马成刚, 刘云涛, 贾 兴, 李洪涛

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对脉冲功率系统开关触发需求,设计了一种重复频率 Marx 发生器,介绍了其基本工作原理及其主要性能指标。发生器采用单极性充电和同轴结构设计,脉冲输出为高压电缆形式,在 75 Ω 匹配负载上获得了高于 200 kV 的脉冲输出,脉冲宽度大于 90 ns,工作模式可单次到 10 Hz 重复频率运行,脉冲上升时间小于 10 ns,系统抖动小于 20.1 ns。

关键词: Marx 发生器; 重复频率; 快前沿; 触发; 抖动

中图分类号: TM836 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.190369

Development of 200 kV repetitive Marx generator

Deng Minghai, Cao Ningxiang, Ma Chenggang, Liu Yuntao, Jia Xing, Li Hongtao

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Key Laboratory of Pulsed Power, Mianyang 621999, China)

Abstract: One Marx generator for triggering switch of pulse power system is developed. The basic principle and main parameters are specified. The coaxial structure and resistor type design are adopted. The output parameters of generator on matched load, 75 Ω , are higher than 200 kV voltage amplitude, more than 90 ns pulse width, single to 10 Hz repetition operation, less than 10 ns rising time, less than 20.1 ns time jitter.

Key words: Marx generator; repetition frequency; fast rising time; trigger; jitter

PACS: 29.25.Bx; 84.30.-r

当前,脉冲功率技术正向高频率和高功率方向发展,作为关键部件的开关对其触发装置提出了更高要求。本文所研制的触发发生器应用对象是作为大型脉冲功率源的同轴场畸变气体火花初级开关,针对一定重复频率运行需求,对触发发生器的要求主要包括重复频率、抖动、前沿等,同时需要一定的电压幅度和脉宽,保证开关可靠动作。国内外研制了多种基于 Marx 发生器技术的重复频率脉冲源,主要用于环境治理、消毒灭菌医学实验、微波负载驱动、X 光二极管驱动、高压装置触发、绝缘材料特性研究以及核电脉冲模拟等^[1-5],电压等级一般为几十 kV 到几百 kV,重复频率从单次到数十 kHz 量级,脉宽一般位于几百 ns 以内,具体指标依据应用需求场合确定。大体上,技术路线从开关出发可分为气态型与固态型,从隔离方式出发可分为电阻型和电感型,实际中国内外基本采用气体开关或固态开关结合电感充电隔离拓扑,和电阻充电隔离拓扑相比,其在充电速度和效率上具有优势,因此重复频率可以达到较高水平,但课题组分析脉冲功率源的重复频率指标后发现,通过优化设计和集成技术,在不增加系统复杂度的情况下,可将常在单次模式下工作的电阻充电隔离 Marx 方案用于重复频率运行模式,拓展了电阻充电隔离 Marx 技术的应用范围。出于充电设备电压功率等级、高压电容器制备工艺和绝缘结构设计等因素考虑,一般电容器工作电压会低于 100 kV。本文借鉴国内外有关经验,针对该类开关研制了一套 200 kV,10 Hz 重复频率 Marx 发生器。

1 工作原理

Marx 发生器是基于电容器并联充电、串联放电原理的高功率脉冲产生装置,一般采用电阻或电感充电隔离,虽然电感隔离可提高工作频率以及电路效率^[6],但是相对复杂,绝缘处理要求更高,在较低重复频率下,电阻充电隔离也可满足要求,结构也更加简单,因此本文采用电阻充电隔离方式,工作原理图见图 1。Marx 发生器共分为 8 级,充电完毕后,采用两级触发方式,位于一条直线上的开关在已导通开关产生紫外光的预电离作

^{*} 收稿日期:2018-12-19; 修订日期:2019-02-21

作者简介:邓明海(1984—),助研,主要从事脉冲功率技术及应用研究;dmh@caep.cn。

通信作者:李洪涛(1968—),研究员,主要从事脉冲功率技术及应用研究;lihongtao-ifp@caep.cn。

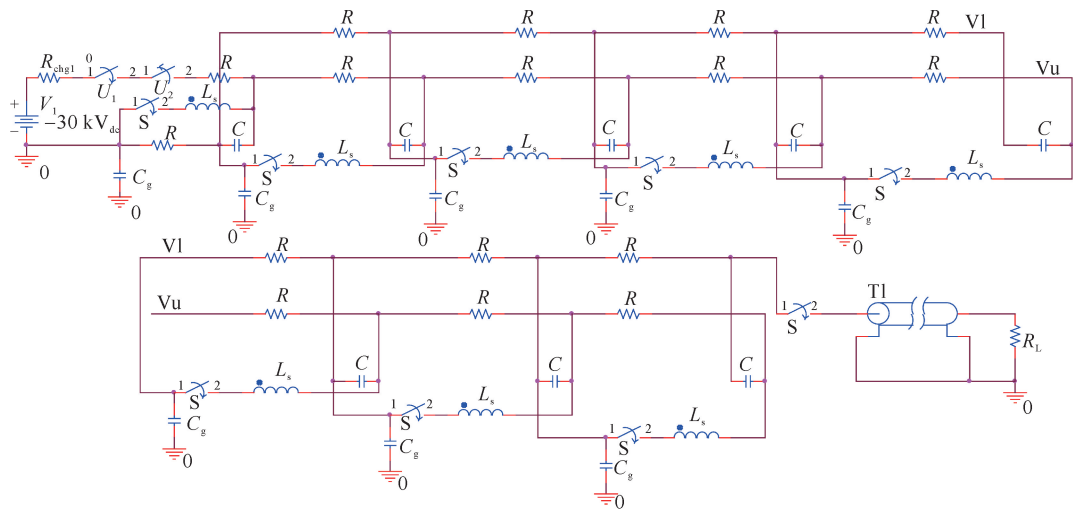


Fig. 1 Schematic of the Marx generator

图 1 Marx 发生器工作原理图

用下,使后一级开关保持雪崩式发展,Marx 发生器最终完全树立并在负载 R_L 上产生高压脉冲。

图 1 中每级由电容 C 、电感 L_s 、耦合电容 C_g 和开关构成。 C_g 为级对地耦合电容,可起到一定锐化电容作用,有助于获取更快的脉冲输出前沿。本文为了得到更快的脉冲前沿,在 Marx 发生器的末端加入了一级锐化开关。

2 主回路设计与参数分析

2.1 电路设计

Marx 发生器一共 8 级,每级充电 30 kV,结合脉宽要求,级电容为 4 个 5600 pF/50 kV 的陶瓷电容器并联。电阻型 Marx 在充电时一般三倍回路充电时间常数内达到幅值的 95%,以此确定电阻值小于 13.3 k Ω 即可。同时对于重复频率电阻型 Marx 发生器,所选保护电阻、充电与接地电阻必须考虑功率损耗。充电回路等效电路为图 2 所示。通过计算每级电阻损耗发现,靠近充电电源的电阻损耗最大,超过 500 W,而越靠近负载,电阻功耗越小,具体见图 3(a)。因此可以确定电路电阻参数,充电保护电阻 R_{chg1} 为 100 k Ω /1 kW,充电和接地电阻均为 12 k Ω /100 W,留有余量。若按照最高重复频率 10 Hz 工作,其功耗达到 800 W,此时结合所充氮气及其容积,温升估算小于 1 $^{\circ}$ C,对于腔体内气体开关以及其他元器件的稳定工作不会造成明显影响,同时实际中可以通过减少高重复频率下连续工作次数控制产生的热量。

此外,为了第一、二级击穿动作能在短时间内完成,需要有足够的过压倍数,由于是负极性充电,因此采用

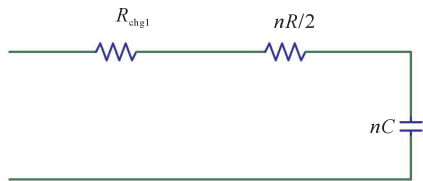


Fig. 2 Equivalent charging circuit

图 2 充电等效电路

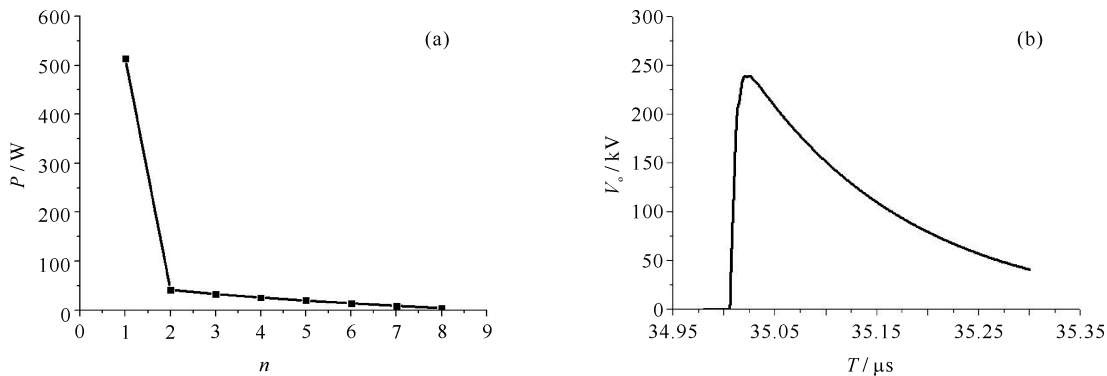


Fig. 3 Power loss of each resistor (a) and output pulse of simulation (b)

图 3 各级电阻功耗(a)与脉冲输出仿真(b)

正极性触发为宜^[6-7]。

利用电路软件进行模拟,每级电容为 22.4 nF,耦合电容取 4 pF,每级回路电感选为 40 nH,充电隔离电阻为 12 k Ω ,每级回路电阻取 0.5 Ω ,用特征阻抗为 75 Ω 的传输线代表高压同轴电缆,负载电阻与电缆阻抗匹配。

通过仿真发现,输出脉冲上升沿约为 14 ns,脉冲幅值高于 200 kV,半高宽大于 90 ns。仿真结果如图 3(b) 所示,图中时间横轴原点是开关触发前某一时刻。

2.2 火花隙熄弧

通过设计并结合电阻加工工艺解决电阻发热问题后,实现重复频率还需要保证 Marx 回路中火花隙气体开关在有限时间内可靠熄弧。通常火花隙气体开关熄弧与间隙内气体种类、气压、间隙大小、电极形状、放电能量沉积等因素相关。为避免充电电源一直给 Marx 充电可能导致火花隙开关不能熄弧,在 Marx 放电阶段充电电源与 Marx 回路断开为宜。

初始时在充电电源与 Marx 回路间加入磁开关,实验中在单次和低频率下 Marx 建立正常,而随着实验频率提高,Marx 建立出现异常频次也越来越高,通过添加磁芯与增大绕组匝数方式提高磁开关的未饱和电感值,但只是有所改善,未能彻底解决高频下的可靠连续输出问题。分析原因可能是由于磁开关在未饱和时电感值有限,并不是完全隔离,因此在 Marx 放电阶段仍有一定电流流经磁开关到达 Marx 回路,从而降低了火花隙气体开关可靠熄弧的概率,也从另一方面说明磁开关并不是理想开关,应用时需要结合应用场景考虑。最终,课题组通过在低压市电输入侧接入固态继电器让充电回路与 Marx 回路在放电阶段彻底断开,解决了充电电源注入电流对火花隙气体开关熄弧物理过程的干扰。

2.3 结构设计

为了减小结构电感和导通时延,Marx 发生器设计为紧凑型同轴结构,充氮气,耐压超过 0.5 MPa,实际工作气压为 0.38 MPa。底座为有机玻璃,起固定电阻电容模块、火花隙开关作用,其与不锈钢圆筒间还有有机玻璃圆筒,保证绝缘。图 4 为结构与主电路模块实物图。

充电与对地电阻采用玻璃釉电阻,电阻电极以及电阻电容连接都采取了匀场措施。为兼顾绝缘与装置紧凑性,电阻加工时表面均匀喷涂绝缘漆,尽量缩短电极间距离。电极采用铜材料,形状为球形,在第一与第二级开关球形电极中心掏孔置入触发探针。

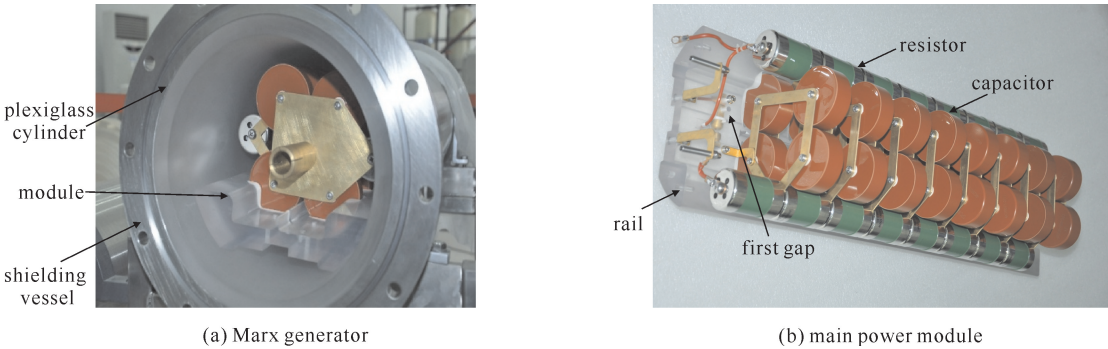


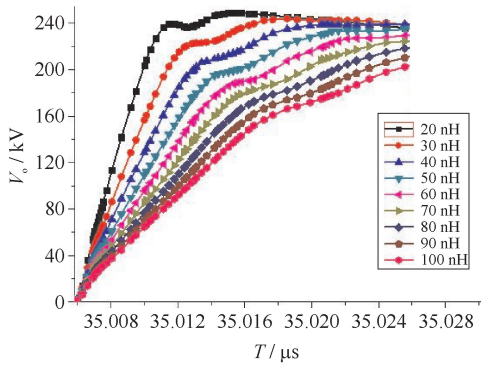
Fig. 4 Structure of Marx generator and main power module

图 4 Marx 发生器结构及主电路模块

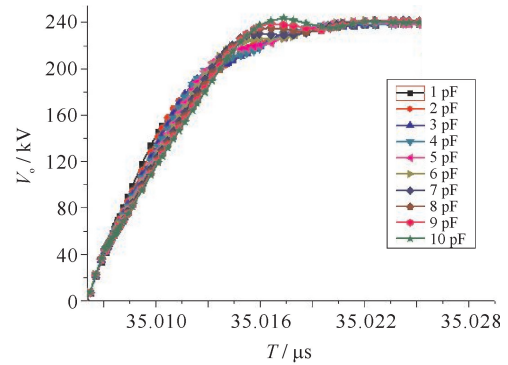
2.4 参数分析

放电回路的寄生电感影响输出上升沿,包括了电容 ESL、火花隙开关电感以及结构电感,设计中设定每级回路电感从 20 nH 增长到 100 nH,通过模拟发现,上升时间从 9 ns 增加至 30ns,因此同轴紧凑型结构设计是有必要的。

此外,对地耦合电容对输出脉冲前沿有一定的锐化作用。模拟中,从 1 pF 到 10 pF 进行对比发现,耦合电容越大,脉冲输出幅值越高,同时伴有轻微震荡过冲、前沿减缓现象,说明电路阻尼逐步减小,因此需要合理的对地耦合电容减小震荡,同时保证对输出脉冲前沿有一定的锐化作用。同轴结构下可将 Marx 等效为一段导体,每级耦合电容为导体电容的八分之一^[8],同时设计中为了更好的绝缘而在 Marx 发生器主模块和金属筒体之间增加有机玻璃恰好可以一定程度增大耦合电容的介电常数,有利于发生器总体体积的控制。



(a) loop inductor



(b) coupling capacitor

Fig. 5 Output pulse varying with (a) loop inductor and (b) coupling capacitor

图 5 回路电感(a)与耦合电容(b)对输出脉冲的影响

3 实验结果

3.1 单次输出

在测试 Marx 发生器高压脉冲输出时,电缆特征阻抗为 75Ω ,负载测试电阻为金属氧化膜电阻,阻值与高压电缆匹配,输出高压脉冲如图 6 所示。分压比为 $10000:1$,输出脉冲幅值约为 210 kV ,前沿小于 10 ns ,脉冲宽度超过 190 ns 。前沿优于模拟结果是由于电路实际工作参数比模拟参数优化所致。

3.2 重复频率输出

发生器在重复频率工作模式下,分别测试了单次到 10 Hz 间多个频率下的工作情况,每次工作 10 s ,间隔 30 s 。图 7 为 9 Hz 下的连续输出波形。

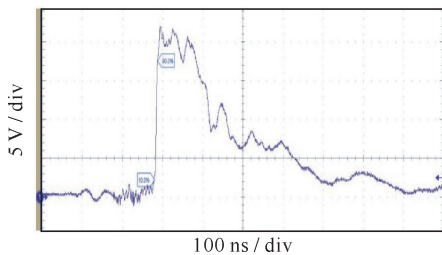
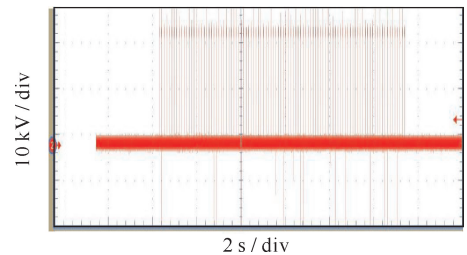


Fig. 6 Single output pulse

图 6 单次输出脉冲

Fig. 7 Output pulse of 9 Hz in 10 s 图 7 9 Hz 连续 10 s 输出

通过考核,Marx 可连续 10 次 10 Hz 下工作,间隔时间 30 s ,满足气体火花开关的触发要求。

4 结 论

本文研制了一种同轴电阻型重复频率 Marx 发生器,通过解决电阻损耗发热、火花隙熄弧等问题以及优化输出脉冲前沿,在 75Ω 匹配电阻上获得了超过 200 kV 、脉冲宽度超过 190 ns 、前沿小于 10 ns 、抖动小于 20.1 ns 的脉冲高压输出,在重复频率模式下可 10 Hz 下连续工作 10 s 。通过电路设计与实验研究相结合,验证了电阻型 Marx 发生器在重复频率运行模式下有一定的应用可行性,目前该 Marx 发生器已成功用于触发同轴场畸变气体火花开关,稳定可靠。

参考文献:

- [1] 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):41-51. (Qin Weidong, Li Hongtao, Gu Yuan-chao, et al. 200 kV fast risetime Marx generator. High Voltage Engineering, 2002, 28(11):41-51)
- [2] 李登云,邱爱慈,孙凤举,等. 100 kV 触发器输出脉冲的陡化[J]. 高电压技术,2008,34(6):1255-1259. (Li Dengyun, Qiu Aici, Sun Fengju, et al. Peaking risetime of the output pulse for 100 kV triggering generator. High Voltage Engineering, 2008,34(6):1255-1259)
- [3] 周启明,孙庚晨,罗学金,等. 100 kV 高压 ns 陡脉冲源的研制[J]. 高电压技术,2002,28(6):37-39. (Zhou Qiming, Sun Gengchen, Luo Xuejin, et al. Development of a nanosecond high voltage pulse power of 100 kV and 50Ω loading. High Voltage Engineering, 2002,28(6):37-39).
- [4] Kekez M M. A 480 Joule , $650 \text{ kV} < 3 \text{ ns}$ rise-time, 500 ns pulse width compact pulse generator[C]//IEEE Pulsed Power Conf. 1997:1389-1395.

[5] 汤俊萍,董勤晓,薄海旺,等. 300 kV/3 ns 脉冲电压源的研制[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(6):1031-1034. (Tang Junping, Dong Qinxiao, Bo Haiwang, et al. Development of 300 kV pulse source with 3 ns risetime. High Power Laser and Particle Beams, 2007,19(6):1031-1034)

[6] 王新新,张卓,肖如泉. 重复频率 Marx 的充电回路[J]. 高电压技术, 1997, 23(1):37-39. (Wang Xinxin, Zhang Zhuo, Xiao Ruquan. The charging circuit of a repetitive Marx generator. High Voltage Engineering, 1997, 23(1):37-39)

[6] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社,2006: 146-147. (Deng Jianjun. Linear induction electron accelerator. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:146-147)

[7] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 339-342. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 339-342)

[8] 布鲁姆. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张驰, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008:51-57. (Bluhm H. Pulsed power systems: Principles and applications. Jiang Weihua, Zhang Chi, Trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008:51-57)