

低抖动 Marx 发生器设计与实验^{*}

李 远, 李 劲, 刘小平, 何 辉, 王永伟, 陈德彪, 周符新

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 提出并设计了一种 Marx 发生器线路, 将电路模拟和实验验证结果与传统的 Marx 线路进行了比较, 结果表明, 所设计的线路通过保证 Marx 后级开关上的过电压幅值, 来保证开关可靠击穿并减小开关自击穿所需时间, 从而减小 Marx 发生器的抖动和增大工作范围。在此线路基础上, 设计了一种用于直线感应加速器脉冲功率系统的 Marx 发生器, 该发生器采用正负双极性直流充电, 使用低抖动的场畸变火花隙开关作为脉冲形成开关, 最大储能 16.87 kJ, 最高输出电压 450 kV, 在一定工作状态下可以达到亚纳秒级的时间抖动。

关键词: Marx 发生器; 火花隙开关; 亚纳秒抖动; 直线感应加速器; 脉冲功率系统

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.3788/HPLPB20102204.0743

Marx 发生器作为一种经典的高功率脉冲发生装置, 目前仍然有着广泛的应用。近年来各类高功率半导体器件, 如 MOSFET、IGBT、光导半导体开关等得到了迅速的发展, 但是当需要 GW 级功率的脉冲输出时, 使用气体火花隙开关的 Marx 发生器还很难被取代。与 Tesla 变压器等脉冲发生装置相比, Marx 发生器有着更高的能量传输效率, 同时 Marx 发生器还具有结构简单、成本较低的优点, 适合作为各种大型脉冲功率源的初级储能装置。如在 10 MeV LIAXF 和“神龙一号”两台大型直线感应加速器中, 使用 Marx 发生器作为初级储能装置为 Blumlein 脉冲形成线充电, 输出 200~300 kV 的 μs 级高电压脉冲, Marx 的时间抖动在十至数十 ns^[1-3]。随着直线感应加速器技术向着多脉冲方向发展, 对脉冲功率源也提出了更高的要求, 除了对单个加速脉冲的时间同步精度要求, 还对脉冲与脉冲之间的时间同步精度、加速脉冲的波形质量, 以及整个系统的可靠性和稳定性等都有了更高的要求。相应的, 作为整个脉冲功率源第一级电源的 Marx 发生器, 对其性能要求也大为提高, 需要将 Marx 的时间抖动降低 1 至 2 个数量级, 才能够达到系统的整体抖动要求^[4-6]。因此通过对 Marx 发生器的优化设计来提高其性能对于提高整个脉冲功率源的性能具有重要的意义。本文通过采用电路模拟和实验相结合的方法, 提出了新的 Marx 发生器线路, 并在此基础上设计了一台 450 kV Marx 发生器, 在实验和实际使用中取得了较为良好的效果。

1 Marx 发生器设计

由于该 Marx 发生器的负载为 6 至 7 根水介质 Blumlein 脉冲形成线。形成线输出阻抗 12 Ω , 电长度 80~120 ns 不等, 充电电压 200~300 kV。由此 Marx 设计为 6 级电容, 每级电容为 1 μF , 额定电压 75 kV, 这样当 Marx 发生器工作时, 电容充电电压为 30~50 kV, 保证了一定的可靠性。

1.1 线路设计

对于一台由多级开关构成的 Marx 发生器来说, 其整体抖动决定于各级开关的抖动, 可以表示为^[1]

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (1)$$

式中: σ 为 Marx 发生器整体时间抖动; σ_n 为第 n 个开关的时间抖动。因此, 要减小 Marx 发生器的时间抖动就需要尽量减小每一级开关的时间抖动。Marx 发生器通常只有第一级或前几级开关靠触发脉冲点火击穿火花间隙, 而后级开关则依靠自然过电压逐个击穿, 因此不仅需要减小受触发 Marx 发生器开关的抖动, 也需要减小 Marx 中过压开关的抖动。

传统的 Marx 发生器的建立, 除了和电容器充电电压, 触发电压有关以外, 主要决定于 Marx 发生器开关间隙之间杂散电容以及开关与开关之间的耦合电容等分布参数^[7]。这些分布电容的作用是在前一级开关间隙击穿的情况下保证后一级开关间隙上的电压达到足够的过电压, 从而形成过压击穿, 使 Marx 建立起来。而过电

^{*} 收稿日期: 2009-11-10; 修订日期: 2009-12-25

基金项目: 国防科技基础研究基金项目

作者简介: 李 远(1977—), 男, 硕士, 助研, 从事脉冲功率技术研究; lyncmj@gmail.com。

压越大,开关的动作时间就越小,其抖动也越小。这种仅仅依靠分布参数来使开关过电压的方法虽然能够保证在开关间隙上获得较高的过电压,但通常也会使得 Marx 发生器结构变得复杂,同时为保证足够大的耦合电容,设计上会有比较多的限制,而且 Marx 发生器的建立时间也趋于变长^[8]。为了能够简化 Marx 结构,需要设计一种不依赖于分布电容就能够获得较高过电压的线路。

图1为两种 Marx 发生器线路设计。其中 $C_1 \sim C_8$ 为储能电容, $U_1 \sim U_4$ 为开关,充电方式均为正负双极性充电。两者的主要区别在于电容器接地电阻的接地方式不一样。使用 Pspice 软件对这两种 Marx 发生器进行电路模拟,模拟中两种线路所使用的各项参数都一致。

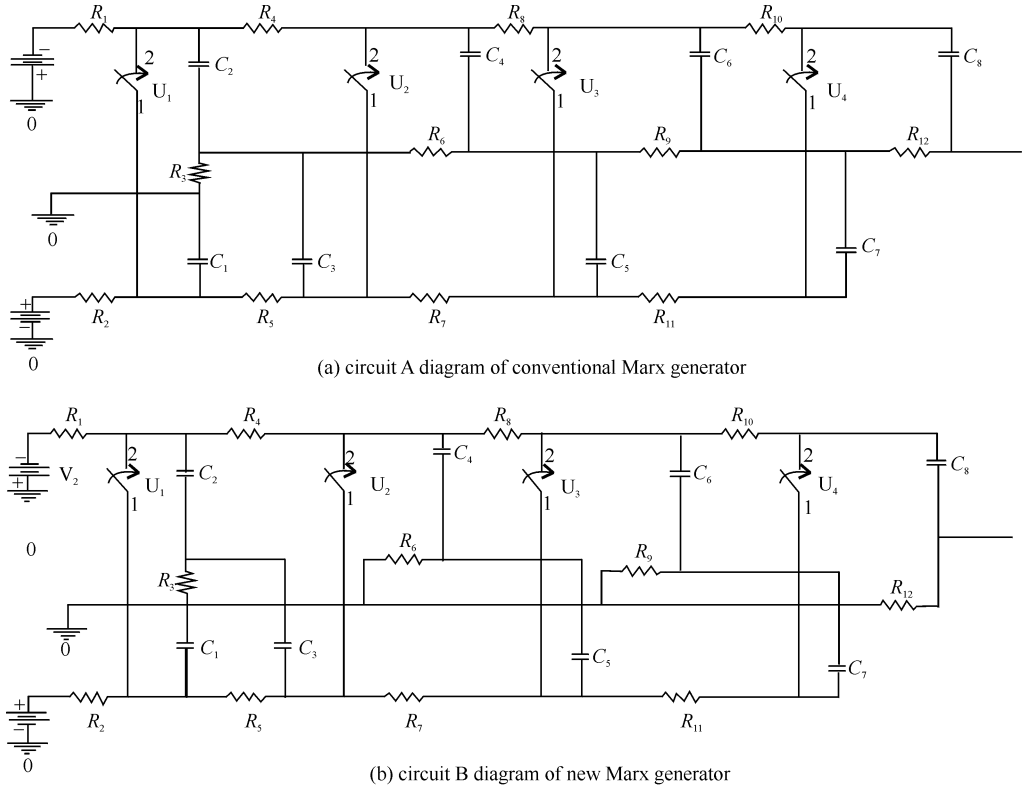


Fig. 1 Schematic circuit diagrams of two different Marx generators

图1 两种不同的 Marx 发生器线路设计

图2为线路两种线路第二、三级开关两端的电压模拟波形,在模拟时已加入相同参数的分布电容。可以看到,线路 A 中第二、三级开关一端间隙上的电压会随着前级开关的动作跳变减小,从而减小了间隙两端的相对电压差,减小的斜率与所加在线路中的分布电容有关,而线路 B 中开关间隙上电压并未发生明显的减小,这时由于接地电阻限制住了开关间隙上的电位跳变。这样在电容充相同电压,开关导通时间也相同的情况下,线路 B 上的后级开关上有比线路 A 更高的电压差,从而保证了开关上足够的过电压。

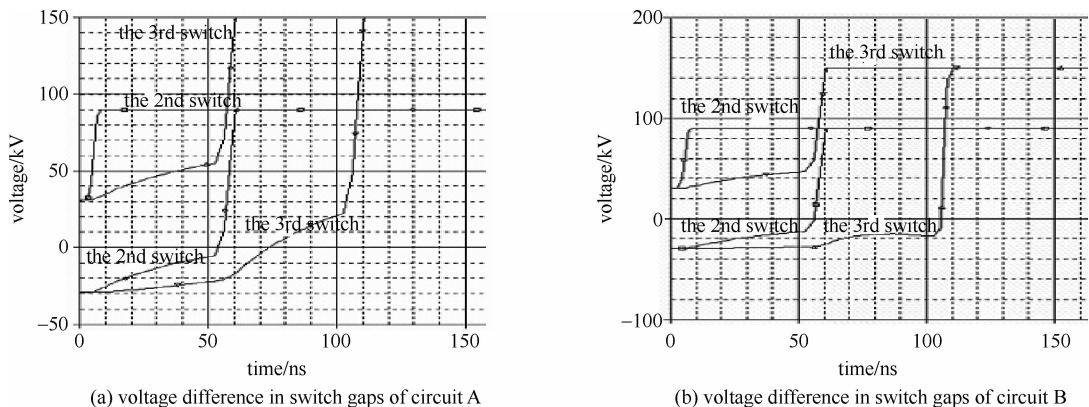


Fig. 2 Comparison of two circuits considering distributed capacitance

图2 考虑分布电容后两种线路比较

为了验证线路模拟结果,用 8 个 $0.2 \mu\text{F}$ 的电容器,4 个火花隙开关以及若干充电与接地电阻组成了实验线路,在几乎完全相同的条件下对两种线路进行了实验,测试其抖动。实验结果如图 3 所示。从测试得到的抖动曲线来看,排除实验数据误差的影响,线路 A 与 B 在高欠压比($>70\%$)的情况下,有基本相同的时间抖动,较低欠压比时,线路 B 抖动明显小于线路 A。而且随着欠压比降低,线路 B 的抖动增加较少,线路 A 抖动随欠压比降低增加很快,从工作范围来说,线路 B 也要好于线路 A。因此在所设计的 450 kV Marx 中采用如线路 B 的电路设计。

1.2 开关设计

开关是 Marx 发生器的关键部件,Marx 发生器工作性能的优劣,主要取决于开关的击穿性能和触发性能。由于设计的 Marx 发生器的工作电压和工作电流,可以低成本实现的只有气体火花隙开关^[9]。为此设计了如图 4 所示结构的气体火花隙开关。由于电容器正负充电,开关采用了对称设计,其中外壳为两个圆形尼龙材料壳通过螺钉连接而成,壳中间加入一个触发电极圆盘,外壳和触发盘之间有密封圈,共同组成一个气密性的开关壳体。外壳中心钻有圆孔,将一个金属的电极座固定在其中,并使用密封圈进行密封。电极座中心开孔保证开关内部与外部气路连通。开关电极采用黄铜材料,形状为圆形,中心开孔通绝缘气体并固定在电极座上,电极边缘与中心孔倒大弧度圆角以减弱场强。电极的放电区域为平面,电极使用平面是为了使电极间电场尽量均匀,提高开关在耐受静高压时的稳定性,避免提前自击穿^[10-11],但对加工精度和装配精度提出了很高的要求。触发电极盘边缘为一个半径 0.5 mm 的圆角。圆角的顶端刚好位于电极放电平面和边缘圆弧的过渡区域,这样既避免了触发电极对开关电极之间均匀电场的破坏,也能够保证在触发电火时有足够的电场畸变。所设计的 Marx 发生器中,由于后级开关依靠过压击穿,因此在后级开关上去掉了触发电极。开关采用 SF_6 为绝缘气体。

1.3 结构设计

Marx 发生器采用了如图 5 所示的结构,外部为一个金属箱,起屏蔽作用,并作为绝缘油的容器。油箱内有一高压变压器,可以将外部输入的 220 V 的工频市电转换为交流高压,再通过整流硅堆和水电阻对电容器充电,这样 Marx 发生器中所有涉及到高电压的部件均在金属油箱内,提高了 Marx 运行的安全性。6 个储能电容固定在一个绝缘支架上,开关和水电阻等部件通过支架固定在电容器上方,便于 Marx 的维护和检修。从油箱壁至电容器、开关等高压部件的高电位端的最高平均工作场强为 45 kV/cm (油间隙)和 15 kV/cm (沿面),由于系统可靠性的考虑,整个绝缘设计较为保守。

2 实验研究

2.1 实验线路

Marx 实验线路如图 6 所示,控制台输出工频交流电对 Marx 发生器充电,当充电电压达到后,控制台发出触发信号给点火机,点火机输出约 15 kV 高压脉冲触发一个脉冲增强器,脉冲增强器触发后输出一个幅度约 90 kV ,前沿 12 ns 的高压脉冲加在 Marx 发生器第一级开关上。脉冲增强器输出端接有一个电阻分压器,通过测试电缆与示波器相连。Marx 的输出端接有一个约 20Ω 的水电阻负载,负载上也有通过电阻分压器与示波器相连。在

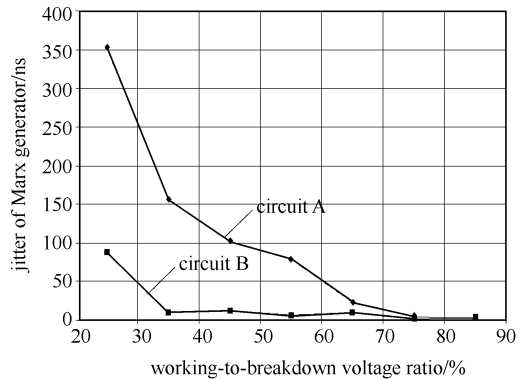


Fig. 3 Jitter of two circuits in experiments

图 3 实验测得的两种线路抖动对比

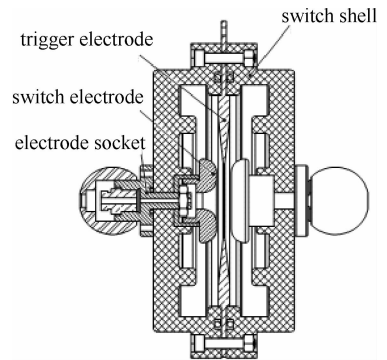


Fig. 4 Structure of spark gap switch

图 4 开关结构

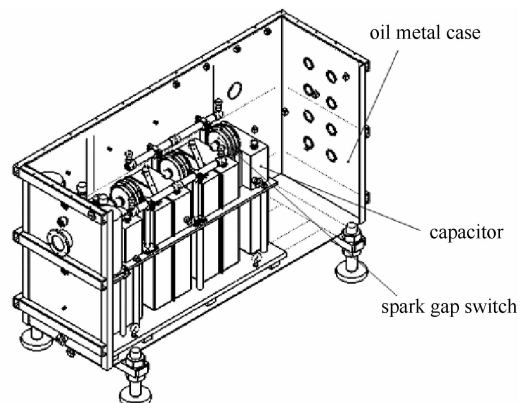


Fig. 5 Structure of Marx generator

图 5 Marx 结构

示波器上对触发脉冲电压和负载上电压脉冲进行测量,两者的时间差在减去电缆电长度后即为 Marx 发生器的建立时间,通过在同一条件下若干次重复测量就可以得到 Marx 发生器的时间抖动。图 7 为 Marx 发生器放电波形。

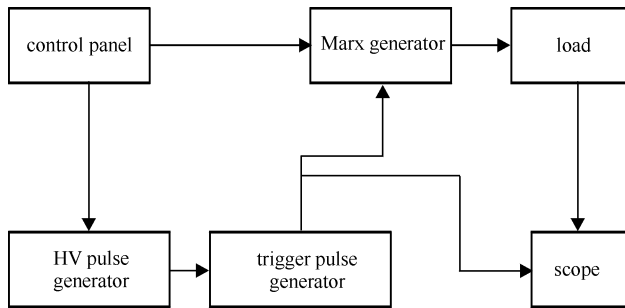


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

图 6 实验线路

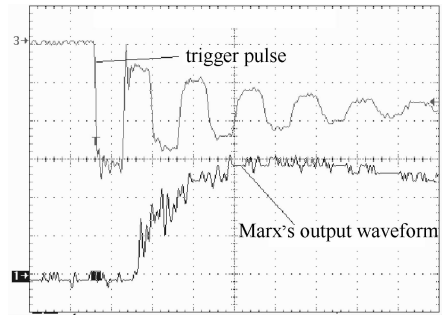


Fig. 7 Output waveform of Marx generator

图 7 Marx 输出波形

2.2 抖动测试

在 Marx 发生器经过一百余次的放电,开关得到老练,状态稳定后。此时挑选一个较为合适的开关气压作为工作气压来进行抖动的测试,测试的方法是在这个气压下,用不同的 Marx 直流充电电压作为工作点对 Marx 的建立时间进行测量,每一个工作点的测量重复次数为 15 次。对这 15 次测量结果求标准偏差就可以得到 Marx 在一个工作点的时间抖动。表 1 给出了开关使用 0.18 MPa SF₆ 绝缘气体时,Marx 发生器在几个工作点的时间抖动。在 3 个工作点上,Marx 的抖动(标准偏差)小于 1 ns,并且在 ± 55 kV 时抖动达到一个最小值 0.7 ns,但是在直流加压 ± 55 kV 时,Marx 开关出现自击穿现象,但概率较低。由于开关自击穿电压分散性较大,很难给出一个较为准确的自击穿电压,因此认为 ± 55 kV 是一个较为临界的工作点,在此工作点左右一定范围内,开关状态不够稳定,无法保证 Marx 正常工作。

表 2 给出了 Marx 发生器在开关气压为 0.12 MPa 时的几个工作点抖动。与 0.18 MPa 时情况类似,在 ± 45 kV 时,Marx 开关也出现自击穿现象。相同的是,在达到临界的工作点电压前,Marx 的抖动会明显增大而不是随电压的提高而继续减小,其他气压下也有与之类似的情况出现,呈现一定的规律性。因此在 Marx 实际使用中可以此作为 Marx 是否在稳定工作点范围内的一个判据。

表 1 0.18 MPa 时 Marx 发生器的动作时间与抖动

Table 1 Delay and jitter of Marx generator at switch pressure of 0.18 MPa

DC Charging voltage /kV	average delay/ns	jitter (absolute deviation)/ns	jitter(standard deviation)/ns
± 41	140.8	8.0	5.73
± 45	118.2	1.4	0.92
± 48	107.8	1.2	0.98
± 51	98.8	2.0	1.33
± 55	88.8	1.7	0.70

表 2 0.12 MPa 时 Marx 发生器的动作时间与抖动

Table 2 Delay and jitter of Marx generator at switch pressure of 0.12 MPa

DC charging voltage /kV	average delay/ns	jitter (absolute deviation)/ns	jitter(standard deviation)/ns
± 20	140.6	6.2	5.75
± 34	109.3	2.5	1.23
± 38	96.0	1.2	0.98
± 41	88.1	4.7	2.60
± 45	80.8	2.0	0.89

3 结 论

通过以上实验结果可以看出,该 Marx 发生器基本达到了设计的要求,可以实现数 ns 的时间抖动,在某些工作点甚至可以实现亚纳秒的时间抖动,表面保证后级开关上有足够的过电压可以有效的减小装置整体动作延时和时间抖动。同时在实验当中出现的时间抖动会在接近临界工作点时发生异常增大的现象,可以作为 Marx 发生器是否在稳定工作范围的一个判据,但此现象产生的原因还需要通过进一步的分析 and 实验来找到合理的解释。此外,作为关键部件的火花隙开关还有改进的余地,其在长时间使用中的稳定性和寿命还需进一步考验。

参考文献:

[1] 张恩官. 10 MeV LIA 脉冲功率系统设计[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994: 42-46. (Zhang Enguan. Design of pulsed power

- system of 10 MeV LIA//Proc 10 MeV LIA Conf. 1994. 42-46)
- [2] 李劲,戴光森,刘小平,等. 3.5 MV 注入器脉冲功率系统[J]. 强激光与粒子束,2005,**17**(2):263-267. (Li Jin, Dai Guangsen, Liu Xiaoping, et al. 3.5 MV pulsed power system for LIA injector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2):263-267)
- [3] 邓建军. 神龙一号直线感应加速器物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5):502-504. (Deng Jianjun. Physical design of the Dragon-I linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5):502-504)
- [4] 丁伯南. 1.5 MeV LIA 研制总结[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994:37-52(Ding Bonan. Summarization of 1.5 MeV LIA injector//Proc 10 MeV LIA Conf. 1994:37-52)
- [5] 何毅. 10 MeV LIA 脉冲功率系统研制与调试[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994:73-80. (He Yi. Design and debug of pulsed power system of 10 MeV LIA//Proc 10 MeV LIA Conf. 1994:73-80)
- [6] 章林文. 40 kJ-800 kV 高密度储能 Marx 发生器[C]//10 MeV 直线感应加速器会议文集. 1994:91-96. (Zhang Linwen. 40 kJ-800 kV Marx generator//Proc 10 MeV LIA Conf. 1994:91-96)
- [7] 刘锡山. 高功率脉冲技术[M]. 北京. 国防工业出版社,2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press. 2005)
- [8] Adler R J. Pulse power formulary[M]. Albuquerque:North Star Research Corporation,1991.
- [9] Macgregor S J, Turnbull S M, Tuema F A. A self-closing water switch for load decoupling [C]//IEEE Colloquium Pulsed Power'97. 1997: 366-371.
- [10] McGhee A J, Macgregor S J, Turnbull S M. An investigation of trigatron breakdown by two different mechanisms[C]//10th IEEE Pulsed Power Conf. 1995:775-780.
- [11] Peterkin F E, Williams P F. Physical mechanism of triggering an trigatron spark gaps[J]. *Appl Phys Lett*, 1988:11-53.

Design and experiment of 450 kV low jitter Marx generator

Li Yuan, Li Jin, Liu Xiaoping, He Hui, Wang Yongwei, Chen Debiao, Zhou Fuxin
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper describes a circuit of Marx generator, and compares it with the conventional layout by simulation and experiment. The result indicates that the designed circuit can maintain the voltage between the latter stage switches during the discharging phase of Marx generator, which makes sure the latter stage switches can breakdown reliably and further leads to a small time jitter. A Marx generator used in the linear induction accelerator has been designed and constructed based on this circuit. Its maximal energy storage is 16.87 kJ, and the maximal output voltage is 450 kV. By using low jitter spark gap switches and charged with positive and negative polarities, the Marx generator can operate with subnanosecond jitter.

Key words: Marx generator; spark gap switch; subnanosecond jitter; linear induction accelerator; pulsed power system