



·高功率脉冲电源技术及应用·

具有快前沿的固态 Marx 电源的研究*

李东升¹, 李 孜¹, 王永刚¹, 姜 松¹, 饶俊峰²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 纳秒脉冲电场消融要求在 100 Ω 负载上产生数千伏的纳秒脉冲, 加快脉冲前沿有利于获得更窄的纳秒脉冲。提出了一种具有快速前沿的固态 Marx 发生器, 在每级电路中插入一个电感, 并且让放电管和充电管同时导通数十纳秒, 等放电管完全开通后, 关断充电管, 对负载进行放电, 以消除放电管和放电回路杂散电感对脉冲前沿的限制, 获得具有快前沿的高压脉冲。搭建了 32 级 Marx 样机, 实验中通过调节直通时间, 在 100 Ω 的低阻负载上获得了电压上升沿 35 ns、脉宽 800 ns、电流 186 A 的高压脉冲。对比并分析了充电管和放电管直通时间对上升沿的影响, 发现直通时间越长, 脉冲电流的前沿越快。输出端的峰值电流最大可达 186 A。表明该脉冲电压源可以有效地提高电流的输出, 提高系统带载能力。该方案相比于传统的改进方法, 提高了系统抗干扰能力的同时, 也减少了所使用开关管的数量, 降低了脉冲电源的成本。

关键词: 全固态 Marx 发生器; 大电流; 方波脉冲; 上升沿

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230197

Research on solid state Marx power supply with fast front

Li Dongsheng¹, Li Zi¹, Wang Yonggang¹, Jiang Song¹, Rao Junfeng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 230026, China;

2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

Abstract: Nanosecond pulse electric field ablation requires the generation of thousands of volts of nanosecond pulses on a 100 Ω load, and accelerating the pulse front is beneficial for obtaining narrower nanosecond pulses. This article proposes a solid-state Marx generator with a fast front, which inserts an inductor into each stage of the circuit and allows the discharge tube and charging tube to conduct simultaneously for tens of nanoseconds. After the discharge tube is fully opened, the charging tube is turned off to discharge the load, eliminating the limitation of stray inductance on the pulse front by the discharge tube and discharge circuit, and obtaining a high-voltage pulse with a fast front. A 32 level Marx prototype was built, and in the experiment, a high-voltage pulse with a voltage rise of 35 ns, a pulse width of 800 ns, and a current of 186 A was obtained on a low resistance load of 100 Ω by adjusting the through time. We compared and analyzed the effect of the direct time between the charging tube and the discharge tube on the rising edge, and found that the longer the direct time, the faster the front of the pulse current. The maximum peak current at the output end can reach 186 A. This indicates that the pulse voltage source can effectively increase the current output and improve the system's load capacity. Compared with traditional improvement methods, this scheme not only improves the system's anti-interference ability, but also reduces the number of switches used and reduces the cost of pulse power supply.

Key words: all solid-state Marx generator, high current, square wave pulse, rising edge

随着脉冲功率技术的发展, 半导体开关被广泛应用于脉冲功率发生器中, 它们可以将能量在微秒、甚至是纳秒时间内瞬间释放到负载上, 并得到输出脉冲功率。Marx 发生器的主要思想是将多个电容并联储能对电源充电, 然后利用开关技术将其串联放电, 最终在负载上产生高压脉冲输出^[1]。采用半导体开关的固态 Marx 发生器^[2-5]

* 收稿日期: 2023-06-28; 修订日期: 2023-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12205192); 国家重点研发计划项目 (2019YFC0119102)

联系方式: 李东升, 1125503759@qq.com。

通信作者: 饶俊峰, raojf@sibet.ac.cn。

因其电压、脉宽、频率和幅值等参数都连续可调,且能量利用率更高,因此被广泛用于环保医食和化学工业应用等领域,例如臭氧的产生^[6]、材料性质的改变^[7-8]、处理生物细胞^[9]、有机废弃污泥的处置^[10]、低温等离子体的产生^[11]等应用上。近年来,固态的 Marx 发生器在激光雷达侦测系统^[12]、肿瘤消融^[13]等应用的研究很多,其中纳秒电场组织消融技术成为了国内外的研究热点。相比于微秒脉冲电场消融技术,纳秒脉冲肿瘤消融技术的持续时间很短,所以产生的热效应基本可以忽略不计,只存在电场效应对肿瘤消融起作用,从而避免了“热沉”效应^[14-15];使用纳秒脉冲肿瘤消融技术可以有效降低肌肉收缩和麻醉药物的副作用等^[16]。在肿瘤等组织消融的应用中,典型的肿瘤负载均体现出较低阻特性,其电阻值通常在数十欧姆到数百欧姆范围。这意味着施加数千伏的纳秒脉冲电压时,其放电脉冲电流可高达数百安培^[17]。此外,研究发现,具有快速前沿的脉冲有利于提供更宽的脉冲平顶和脉冲电场,并且在细胞上产生更高的跨膜电压和更多的穿孔效果。因此,有必要研发具有快前沿和百安培脉冲电流的高压脉冲电源^[18]。国内外若干机构已经在此领域开展了初步研究,中国工程物理研究院的伍有成等人实验设计的铁电陶瓷作为储能元件,采用平面冲击波发生器使铁电陶瓷发生极化反应,释放电荷,产生电流,其电源在 $80\ \Omega$ 的负载时获得的电压为 $4\ \text{kV}$,脉冲电流最大值约为 $47\ \text{A}$,脉宽 $3.9\ \mu\text{s}$,上升沿 $210\ \text{ns}$ ^[19]。上海理工大学的洪凌峰等人设计了共用一组充电管的多路 Marx 发生器并联,可以在重频 $100\ \text{Hz}$ 时,最大可以输出电压上升沿 $272\ \text{ns}$,脉宽 $2\ \mu\text{s}$,电压 $10\ \text{kV}$,并联 $30\ \Omega$ 的阻性负载,最大峰值电流可达 $300\ \text{A}$ ^[20]。现有的功率半导体开关开通大电流的时候,无法满足快前沿的要求,而前沿缓慢导致最小脉宽受限,也会影响应用的效果。为得到具有快速前沿的纳秒电流脉冲,本文提出了一种每级带一个空心电感的固态 Marx 电路,通过使充电管和放电管先形成短时间直通,等放电管的电流上升到较高时再断开充电管,对负载放电,从而削弱放电管直接开通大电流时开关速度的限制。本文首先介绍了快前沿的固态 Marx 电源的工作原理,并对采用的驱动和控制方案分析和验证,最后总结和分析了控制方案的差别与优劣。

1 快前沿的固态 Marx 电源

本文在半桥结构的固态 Marx 发生器的基础上,通过控制充电和放电开关管的信号实现短时间直通,实现快速的上升沿的亚微秒高压大电流脉冲,采用高通流能力的半导体开关作为放电开关,并在每级电路中增加电感抑制直通电流的快速增长,避免开关被短路击穿,并稳定输出具有快前沿的大电流脉冲。

1.1 快前沿的固态 Marx 电源的主电路

图 1 是快前沿的固态 Marx 电源的电路拓扑,每一级都由一个主电容、两个开关管、一个二极管和一个电感组成。充电过程中,所有充电开关 S_{ci} 导通,各级电容级级并联充电,从而获得更高的输出电压幅值;放电过程中,各级电容被放电开关串联起来,对负载输出高压脉冲;直通过程,电感可以抑制直通的电流的大小。下面将具体展开介绍。

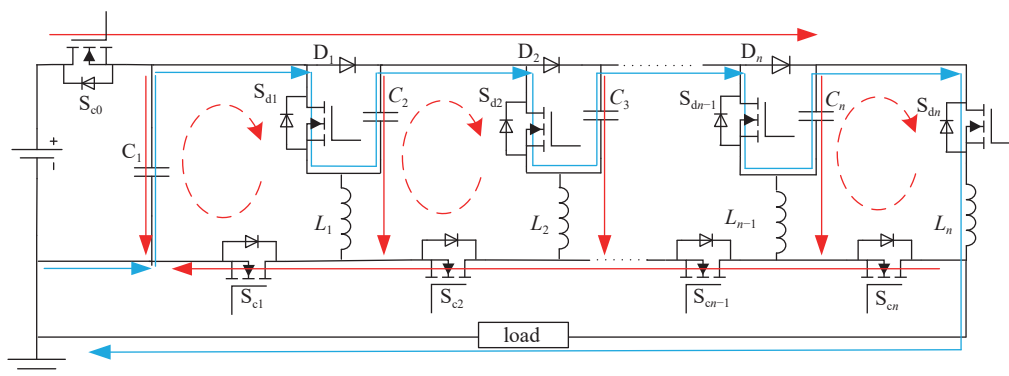


Fig. 1 Main circuit of the proposed solid-state Marx generator with fast leading edges

图 1 快前沿的固态 Marx 电源的主电路图

1.2 主电路的工作过程

1.2.1 充电过程

当控制充电的信号到达时,充电管 $S_{c0}—S_{cn}$ 导通,直流电源经二极管 $D_1—D_n$ 对主电容 $C_1—C_n$ 进行并联充电。充电回路如图 1 红色箭头所示,由于在放电过程中,电感 L_n 中会储存部分能量,电感和直流源共同对电容进行充电,以此类推,导致后面电容上的电压逐级抬升。为避免在重频状态下导致电容充电的 Boost 升压效果,刻意加大

充放电管的死区时间并减少了起放电管的脉宽时间,使得充电之前电感中的电流衰减到零。图 1 所示的电路结构中,设直流源的电压为 U_c ,则第 n 级的电容充电电压 U_{cn} 为

$$U_{cn+1} = U_{cn} \left(1 + \frac{t_c^2 f U_{cn}}{2L_n I_{T,av}} \right) \quad (1)$$

式中: U_{cn} 为第 n 级电容电压 ($n \geq 2$) 直流充电源的输入电压, t_c 为脉冲宽度, f 为开关频率, $I_{T,av}$ 为负载平均电, L_n 为电感值^[21]。

1.2.2 直通过程

当控制放电的信号到达时,放电管 $S_{d1}—S_{dn}$ 导通,但此时充电管 $S_{c1}—S_{cn}$ 并未关断,如图 1 红色虚线所示形成级内直通回路。以第一个红色虚线为例,以电容 C_1 、放电管 S_{d1} 、电感 L_1 以及充电管 S_{c1} 形成第一级的直通回路。在此过程中,允许通过开关和电感在回路中释放电流,电感中的电流逐渐升高,并伴随着电容的能量转移,后续级数的导通过程与上述相同。在直通过程中,各级电容电压加在电感两端,充电管和放电管上的压降可以忽略,故负载上电压也接近为零。随着电感电流的升高,放电管在直通过程中就已经进入完全导通状态,当充电开关关断时,各级电容经过放电开关串联起来对负载放电,负载上的前沿时间比正常放电的硬开通过程要更为迅速,所以负载输出端电压的上升沿可以实现快前沿的效果,由于直通电流较大,存在对放电管损坏的可能,需要精确控制直通时间,电感对回路电流也起到抑制作用,从而避免元器件的损坏。

1.2.3 放电过程

当控制充电的关断信号到达时,充电管 $S_{c0}—S_{cn}$ 关断,放电管 $S_{d1}—S_{dn}$ 仍保持开通,经充电过程后,忽略二极管的压降,则每一级储能电容上的电压与直流电源电压相等,每级的电容,放电管串联放电通路,如图 1 蓝线所示流经负载,从而输出高压大电流的脉冲。最终得到的电流为

$$I = \frac{nV_{DC}}{R_{load}} \quad (2)$$

放电过程结束后,直通时回路中电感上存储的电能通过充电管的体二极管回馈到电容。

2 驱动电路控制方案

在驱动电路中,采用串心磁环同步驱动隔离的方案^[21]对多级开关进行同步驱动,具体结构如图 2 所示, MOSFET 的门级信号由 FPGA 产生,通过控制半桥电路产生正、负脉冲,经过变压器和副边集成驱动电路来控制开关管的开通和关断。在一次侧电流相同的情况下,确保了二次侧驱动脉冲的同步性。该方案采用 1 匝同轴线作为驱动变压器的原边绕组,且同轴线带屏蔽层并外层接地,能起到较好的屏蔽抗干扰作用,副边采用绕制的多匝绝缘导线,对半导体开关能起到升压驱动的效果^[22]。这种驱动方法相比于传统的光纤驱动或变压器驱动,不仅降低了系统的损耗和成本,更提高了系统的电磁兼容性能,还避免了传统驱动芯片对副边信号需要每级单独隔离供电的要求。

下面对驱动电路的原理展开具体介绍。以放电管的同步驱动为例,当开通信号 turn-on 到达时,开关管 $S_{1,2}$ 导通,形成以 $D_{1,1}$ 、 C_{q1} 、 $S_{1,2}$ 的通路,如红色箭头所示,通路给电容 C_{q1} 充电至正压高电平,并触发开关管 Q_1 开通。在 turn-on 和 turn-off 的死区时间内, C_{q1} 中的电荷无处泄放而维持在高电平, Q_1 将一直开通,处于自维持导通阶段。当关断信号 turn-off 到达时,开关管 $S_{1,1}$ 开通,形成以 $D_{1,2}$ 、 C_{q1} 、 $S_{1,1}$ 的通路,如蓝色箭头所示,通路给 C_{q1} 充电至负压低电平,并触发开关管 Q_1 关断。关断信号结束后, Q_1 将一直关断,处于自维持关断阶段。当下一个开通信号 turn-on 到达时,再次开通,依次循环。

开关管的的门极信号由 FPGA 产生,控制半桥电路产生正、负脉冲,经过带绝缘线的同轴线和副边集成驱动电路来控制开关管的开通和关断。正常的驱动信号时序如图 3(a) 所示,所形成的充放电回路如图 1 中红色实线和蓝色实线所示,本文采用图 3(b) 所示的时序,充、放电管的驱动信号由 FPGA 进行控制和调节,其中 T_s 为充电管和放

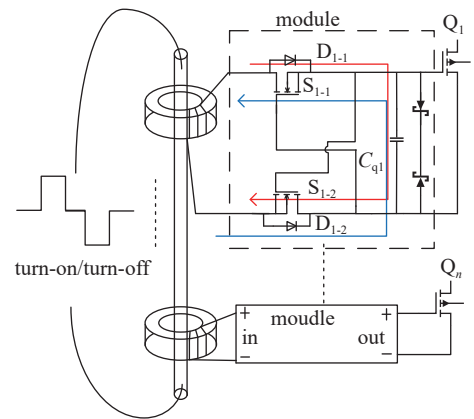


Fig. 2 Structure diagram of drive circuit

图 2 串心磁环同步驱动原理图

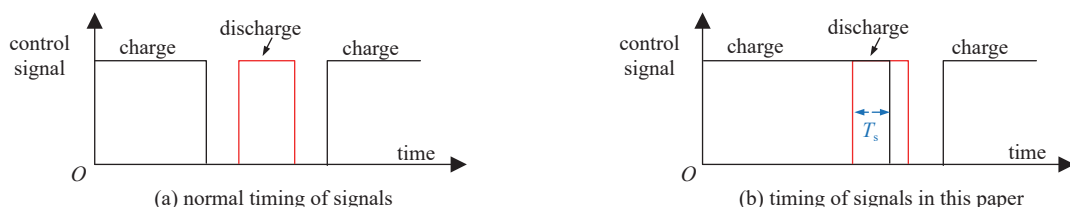


Fig. 3 Gate level driving signal and phase relationship

图 3 门级的驱动信号时序图

电管的直通时间, 充电管信号与放电管直通几十纳秒, 在回路中增加电感, 可以消除开关速度对前沿的影响和抑制直通时的回路电流, 很大程度上也加快脉冲前沿。

3 仿真实验

为了验证本文所提出的快前沿的固态 Marx 电源的电路的可行性, 在 PSPICE 仿真软件中建立四级仿真电路图, 如图 4 所示。每级充电电压为 500 V, 充放电管的直通时间 (T_s) 调节范围为 40~100 ns, 调节驱动电压从 0 V 至 15 V, 电感 (L_s) 可调范围为 1~100 μH , 负载选用 100 Ω 的阻性负载。

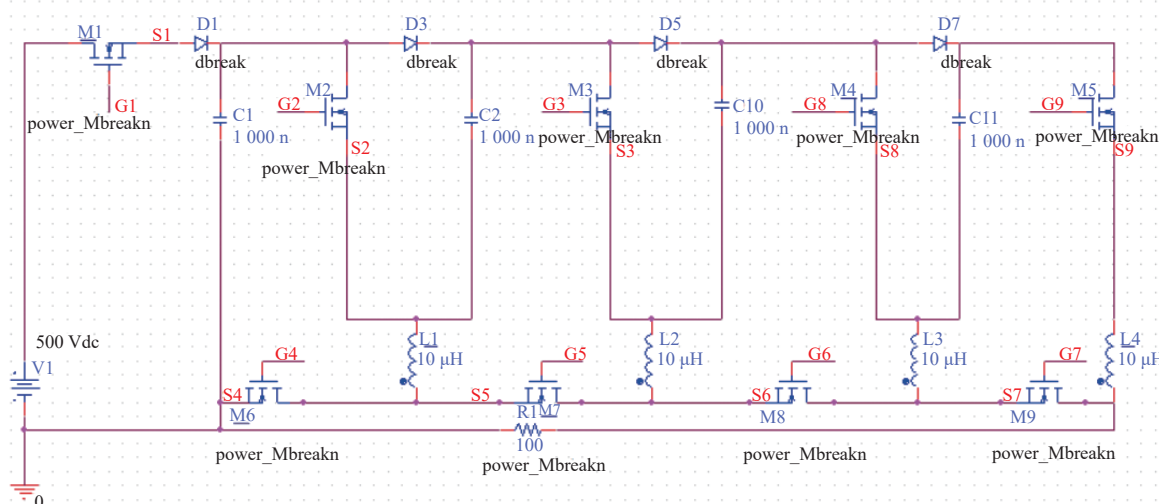


Fig. 4 Schematic diagram of circuit simulation

图 4 仿真原理图

图 5 为仿真的电路输出电压为 2 kV 脉冲边沿变化的结果, 从图中我们明显可以看出, 通过改变控制信号让放电管未直通与直通时, 上升沿有明显差异, 直通时间越长, 前沿越快。当设置直通时间为 100 ns 时, 上升沿从没有直通时的 447 ns 缩短到 223 ns。

图 6(a) 是直通时间 $T_s=100$ ns 时, 回路中电感支路中 (C_1 、 M_2 、 L_1 、 M_6 形成的通路) 中的电流。我们可以看出, 由于电路中存在 RLC, 会产生震荡, 当电感 $L_s=1$ μH 时, 电流正向幅值为 200 A, 幅值过大; 当电感 $L_s=5$ μH 时, 会产生正向幅值为 130 A 的正向电流; 当电感 $L_s=50$ μH , 正向电流过小, 仅为 25 A, 远没有达到所需的放电电流大小; 当 $L_s=100$ μH 时, 电流的正向幅值偏低且反应速度很慢。综上所述, 最终选择电感 $L_s=10$ μH 作为实验的参数。

图 6(b) 是选用相同电感 $L_s=10$ μH 时, 调整直通时间在回路中电感支路电流仿真波形, 随着直通时间 T_s 的增加, 直通时回路中电流不断增大, 电感中积蓄的能量也会变得越大, 在直通时间为 100 ns 时, 电流最大值为 57 A。

仿真验证了使用直通方案可以加快输出电压的上升沿, 利用串联电感方案可以有效地抑制回路直通电流, 同时也表

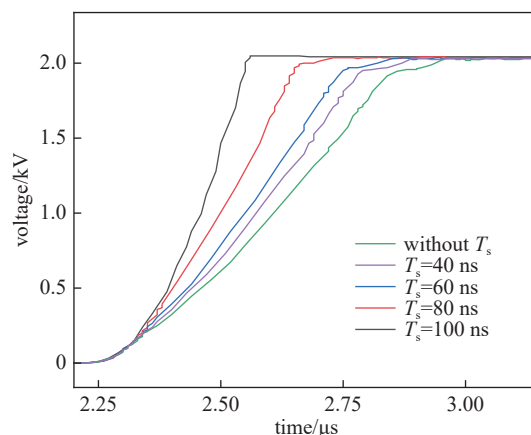


Fig. 5 Simulation results of output voltage rising edge

图 5 输出电压上升沿仿真结果

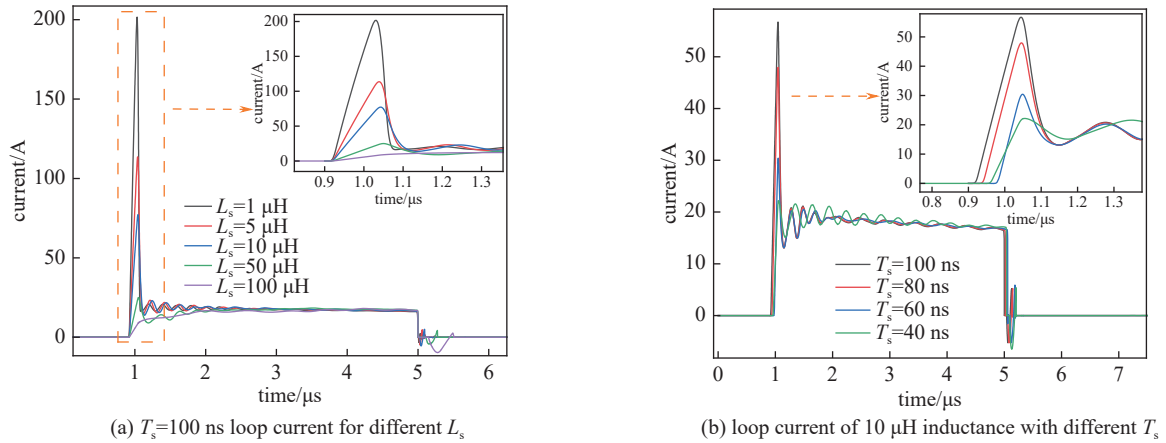


Fig. 6 Comparison of current simulation in a direct circuit with different time intervals

图 6 直通不同时间电路内的电流仿真对比图

明了该方案可用于脉冲边沿调节。

4 实验结果与分析

本文搭建了 32 级具有快前沿的固态 Marx 发生器样机。图 7 为本文所提出的快前沿的固态 Marx 电源搭建的实验平台, 主要包括一个半桥电路, 一块信号板, 直流充电电源采用汉晟普源公司的可调直流电压源, 可提供高达 1 kV 的电压。低压探头采用 Tektronix 公司的 TPP0201, 高压探头采用 P6015A (Tektronix, USA), 示波器采用了 TEK 公司的 DPO2014 (Tektronix, USA), 采样精度 1 GHz, 电流环采用 Pearson Electronics 的 Model101。

主电路实验结构采用 Wolfspeed 公司的 C2M0080120D 作为主电路的充电管, 其额定电压为 1.2 kV, 脉冲漏极电流为 80 A。主回路的放电管采用 Cree 公司的 C3M0040120K 作为主电路的放电管, 其额定电压为 1.2 kV, 脉冲漏极电流为 100 A。二极管均采用 IXYS 公司耐压为 1.2 kV 的 DSEP12-12A, 每级主电容均为 1 个耐压 1 kV、容量为 1 μF 的陶瓷电容。

实验负载采用 100 Ω 的低感电阻。为了保证电源稳定运行以及实验的安全, 设定直流源输入的充电电压不超过 550 V。图 8 是空载时的输出电压波形, 其最大峰值电压可达 15.53 kV, 脉宽 800 ns, 且上升沿最低可达 35 ns, 其脉冲电流高达 150 A。实验中的输出的电压, 脉宽和上升沿都是连续可调的。图 9 为重频 1 kHz、电压为 15 kV 时的波形。

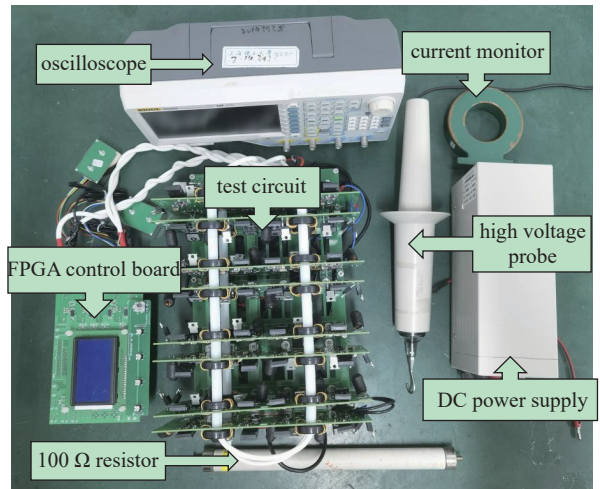


Fig. 7 Photo of the test system

图 7 测试电路实物图

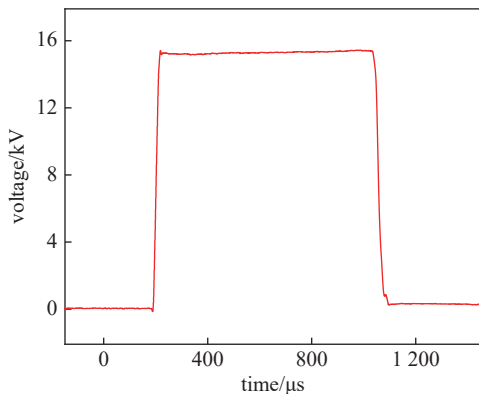


Fig. 8 Voltage waveform with open circuit

图 8 空载输出电压波形

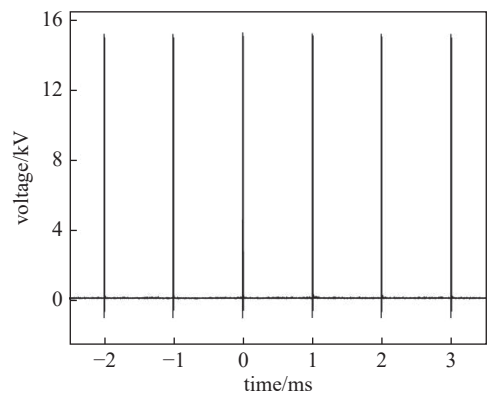


Fig. 9 Voltage waveform with 1 kHz repetition rate

图 9 重复频率 1 kHz 时的电压波形

通过控制 FPGA 改变充放电管的直通时间 40~100 ns, 观察其对输出电压上升沿的影响, 输出脉冲前沿波形如图 10 所示。在不同的直通时间下, 电压输出都为 15 kV, 规定电压上升阶段的 10%~90% 为上升沿的时间, 可以看出未直通时的上升沿为 180 ns, 当改变直通时间为 40 ns 时, 输出电压的上升沿为 120 ns, 其变化量为 60 ns, 在其直通时间改变为 60 ns 时, 输出电压的上升沿为 95 ns, 其变化量减小, 为 25 ns。直通时间为 80 ns 和 100 ns 时, 上升沿分别为 40 ns 和 35 ns, 其变化量相比于直通 100 到 80 ns 和 80 到 60 ns 效果并无明显变化。通过以上的分析, 为避免直通过程中回路电流过大, 保证电源的可靠性, 最终选择 80 ns 作为直通时间。

图 11 为电压源带了 100 Ω 的大功率阻性负载时输出的电流波形, 其峰值电流可达 186 A, 由于占空比仅为 0.000 08, Boost 效应几乎可以忽略不计, 输出电压几乎等于充电电压乘以级数。图 12 为直流源输出 500 V 时, 频率为 100 Hz, 在直通 80 ns 时重频状态下的不同支路的电容上电压输出的实验结果图。可以看到刚开始直通时电容上的电压在回路里形成通路, 导致电压快速下降, 直通结束后电容上的电压有所抬升, 充放电管的关断信号到来时, 电容电压缓慢上升, 也说明了通过降低占空比, 电路的 Boost 现象并不明显, 同时对电路起到了很好的保护作用。

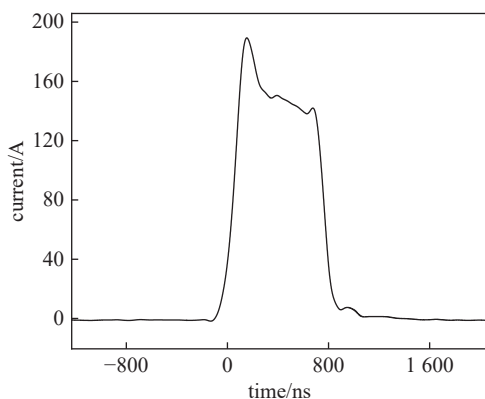


Fig. 11 Output current on resistive load

图 11 阻性负载上的输出电流

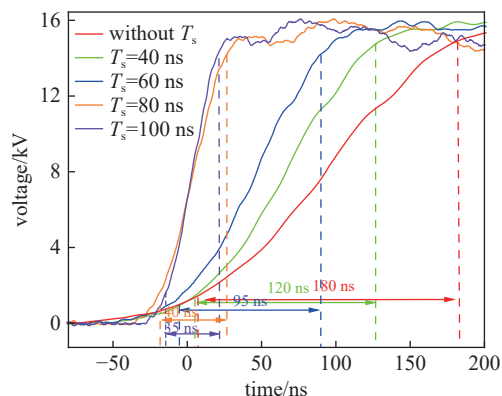


Fig. 10 Experimental results of the influence of different straight-through time on rising edge

图 10 不同直通时间对上升沿的影响实验结果

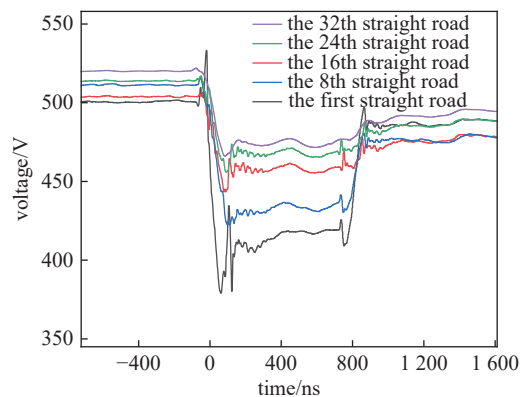


Fig. 12 Capacitor voltage for different Marx branches

图 12 不同 Marx 支路的电容电压

5 结论

本文设计并测试了一款具有快前沿的固态 Marx 电源, 在 100 Ω 的电阻负载下可以产生 100 Hz、电压 15 kV、上升沿 35 ns、脉宽 800 ns、电流最高可达 186 A 的高压脉冲。实验表明, 通过控制 FPGA 的信号, 实现充放电管信号的短时间直通, 可以将同等参数下输出电压脉冲的上升时间从 180 ns 有效缩短到 35 ns, 并且避免了电感所带来的 Boost 升压效应, 并最终产生快前沿的大电流窄脉冲。对于肿瘤消融具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 理查斯·L·卡斯尔. 采用固态开关的高压脉冲电源: 101124714A[P]. 2008-02-13. (Richards S L. High voltage pulsed power supply using solid state switches: 101124714A[P]. 2008-02-13)
- [2] Redondo L M, Silva J F. Repetitive high-voltage solid-state Marx modulator design for various load conditions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(8): 1632-1637.
- [3] Liu Kefu, Qiu Jian, Wu Yifan, et al. An all solid-state pulsed power generator based on Marx generator[C]//Proceedings of 16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007: 720-723.
- [4] 刘克富. 固态 Marx 发生器研究进展[J]. 高压技术, 2015, 41(6): 1781-1787. (Liu Kefu. Research progress in solid-state Marx generators[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1781-1787)
- [5] 江伟华. 基于固态器件的高重频脉冲功率技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(3): 561-564. (Jiang Weihua. High repetition-rate pulsed power generation using solid-state switches[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 561-564)

- [6] Wei Linsheng, Yuan Dingkun, Zhang Yafang, et al. Experimental and theoretical study of ozone generation in pulsed positive dielectric barrier discharge[J]. *Vacuum*, 2014, 104: 61-64.
- [7] 曹鹤飞, 孙永卫, 原青云, 等. 航天器背面接地介质材料等离子体充电研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 103204. (Cao Hefei, Sun Yongwei, Yuan Qingyun, et al. Research on surface charging of back grounded dielectric material of spacecraft[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 103204)
- [8] 方兴东, 关志成, 王黎明, 等. 高压脉冲放电在水处理中的应用及发展[J]. *高电压技术*, 2000, 26(1): 29-31. (Fang Xingdong, Guan Zhicheng, Wang Liming, et al. Research on treatment of wastewater by high voltage pulse discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(1): 29-31)
- [9] Redondo L M, Kandratsyev A, Barnes M J. Marx generator prototype for kicker magnets based on SiC MOSFETs[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3334-3339.
- [10] Wang Yifan, Liu Kefu, Qiu Jian, et al. A stage-stage paralleled topology of all-solid-state Marx generator for high current[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(10): 4488-4494.
- [11] 吕潇宇. 微波辐照煤焦低温等离子体的形成机理[D]. 太原: 太原理工大学, 2022. (Lv Xiaoyu. The Formation mechanism of low-temperature plasma of coal char irradiated by microwave[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022)
- [12] 吴启翔, 陈永刚, 龚立娇, 等. 纳秒脉冲电场肿瘤消融关键技术研究综述[J]. *中国医疗设备*, 2023, 38(5): 36-43. (Wu Qixiang, Chen Yonggang, Gong Lijiao, et al. Review of key techniques for nanosecond pulsed electric field of tumor ablation[J]. *China Medical Devices*, 2023, 38(5): 36-43)
- [13] 马振宏. 纳秒脉冲电场肿瘤消融实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. (Ma Zhenhong. Experimental study on tumor ablation using nanosecond pulsed electric field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020)
- [14] Yang W, Wu Y H, Yin Dong, et al. Differential sensitivities of malignant and normal skin cells to nanosecond pulsed electric fields[J]. *Technology in Cancer Research & Treatment*, 2011, 10(3): 281-286.
- [15] Chen Xinhua, Kolb J F, Swanson R J, et al. Apoptosis initiation and angiogenesis inhibition: melanoma targets for nanosecond pulsed electric fields[J]. *Pigment Cell & Melanoma Research*, 2010, 23(4): 554-563.
- [16] Joshi R P, Schoenbach K H. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses[J]. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*, 2010, 38(3): 255-304.
- [17] 伍友成, 刘高旻, 戴文峰, 等. 轻小型高电压大电流脉冲电源研制[J]. *高电压技术*, 2018, 44(9): 3016-3021. (Wu Youcheng, Liu Gaomin, Dai Wenfeng, et al. Design of small-size high voltage and large current pulsed power source[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 3016-3021)
- [18] Chen Jie, Zhang Ruobing, Xiao Jianfu, et al. Influence of pulse rise time on the inactivation of staphylococcus aureus by pulsed electric fields[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(8): 1935-1941.
- [19] 饶俊峰, 洪凌峰, 郭龙跃, 等. 多路 Marx 并联高压脉冲电源研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 055001. (Rao Junfeng, Hong Lingfeng, Guo Longyue, et al. Investigation of high voltage pulse generators with Marx generators in parallel[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 055001)
- [20] Dos Santos K P, Neto T R F, Cruz C M T. Voltage impulse generator using boost converter array applied in electrical grounding systems[C]//Proceedings of the IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). 2015: 1-5.
- [21] Zhou Ziwei, Li Zi, Rao Junfeng, et al. A high-performance drive circuit for all solid-state Marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(11): 2779-2784.
- [22] Barnes M J, Wait G D, Figley C B. A FET based frequency and duty factor agile 6 kV pulse generator[C]//Proceedings of the 21st International Power Modulator Symposium Conference. 1994: 97-100.