



·脉冲功率技术·

小型化电感隔离型 Marx 发生器的研制*

焦 毅¹, 姜 松¹, 王永刚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: 随着脉冲功率技术的发展, 纳秒脉冲电场被逐渐应用到等离子体水处理、不可逆电穿孔肿瘤消融等技术中。为了满足纳秒脉冲的应用需求, 电源需要输出十几 kV 高压, 拥有纳秒窄脉宽和快速的上升沿, 同时尽量减小电源体积, 降低成本。该纳秒脉冲电源采用电感隔离型 Marx 发生器结构, 电路可以实现模块化叠加, 电感隔离可以减少开关数量, 抬升充电电压, 以获得更高的电压输出。所设计的驱动电路仅需一路控制信号和一个直流供电模块, 经功率放大和磁隔离后可同时控制所有放电管, 该驱动电路结构简单、成本低、体积小, 耐压水平高。所设计的 24 级电源样机, 在 50 kΩ 阻性负载上, 可输出 0~14 kV 电压, 频率 0.5~1 kHz, 脉宽 500 ns。该电源主电路的长宽高尺寸仅为 23 cm×10 cm×12 cm。

关键词: Marx 发生器; 脉冲电源; 脉冲功率; 电感隔离

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220291

Development of miniaturized inductor-isolated Marx generator

Jiao Yi¹, Jiang Song¹, Wang Yonggang¹, Rao Junfeng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

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

Abstract: With the development of pulsed power technology, nanosecond pulsed electric field has been gradually applied to plasma water treatment, irreversible electroporation for tumor ablation and other technologies. To meet the application requirements of nanosecond pulses, the power supply is required to output high voltage exceeding 10 kV, with narrow nanosecond pulse width and fast rising edge. At the same time, it is required to reduce the size and the cost. The nanosecond pulse power supply is an inductor-isolated Marx generator, whose circuit can realize modular superposition. Inductive isolation can reduce the number of switches and raise the charging voltage to obtain a higher voltage output. The driving circuit has only one control signal and one DC power supply module, which can control all discharge tubes at the same time after power amplification and magnetic isolation. The driving circuit has the advantages of simple structure, low cost, small volume and high voltage resistance. The power supply has 24 stages. Under the condition of 50 kΩ resistive load, high voltage pulses with 500 ns pulse width, amplitude of 0–14 kV and adjustable frequency of 0.5–1 kHz are generated. The size of the main circuit is only 23 cm×10 cm×12 cm.

Key words: Marx generator, pulsed power supply, pulsed power, inductive isolation

在半导体技术飞速发展和广泛的应用需求背景下, 全固态脉冲功率发生器成为了脉冲电源研究的热点, 并逐渐运用于工业、生物医疗、环保、等离子体研究^[1-2]。不同的应用背景对脉冲的幅值、脉宽、频率等提出了不同的需求, 而许多实验研究表明, 不同参数的脉冲电场可引起不同的生物电效应。不可逆电穿孔肿瘤消融技术, 是利用微秒或纳秒级的高压脉冲电场使肿瘤细胞发生不可逆电穿孔, 使细胞产生程序性凋亡。与微秒级脉冲电场相比, 纳秒脉冲电场作用时间更短, 需要更高的场强, 优势在于不会引起热效应, 并且可以抑制组织和细胞的化学反应^[3]。治疗所需的纳秒脉冲电源需要可靠性好, 体积小, 输出脉宽窄, 输出电压高, 上升沿迅速^[4-6], 这对驱动电路和电路

* 收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2023-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0119102); 上海市青年科技英才扬帆计划项目 (20YF1431100); 上海理工大学-上海交通大学医学院医工交叉重点支持项目 (2021005)

联系方式: 焦 毅, 15705183580@163.com。

通信作者: 饶俊峰, raojunfeng1985@163.com。

拓扑结构提出了更多的要求。Andras Kuthi 等设计了两种应用于生物和医疗领域的基于二极管开路开关的纳秒高压脉冲发生器,包括 LC 谐振电荷级、磁脉冲压缩级和二极管开路开关级三部分组成,可以分别产生 4.5 kV、20 ns 和 7.5 kV、5 ns 的脉冲^[7],但是输出电压较低。Masahiro Akiyama 等设计了一款由 FPGA 控制的高性能脉冲功率发生器,采用磁脉冲压缩技术,结合 FPGA 控制,脉冲间隔和输出功率灵活可调,结构紧凑,输出电压可达 30 kV,半高宽为 50 ns,适用于生物实验,但是波形没有平顶^[8]。姚陈果等人设计了一款用于体内细胞凋亡研究的全固态纳秒脉冲发生器,采用 Marx 电路结构,光纤驱动,电源模块隔离,该发生器在直流输入电压为 1 kV 的情况下,可产生电压幅值-8 kV、脉宽 200~1000 ns、重复频率 1~1000 Hz 的脉冲。但是该电源需要大量的光纤头,成本较高,体积偏大^[9]。嵇保健等人设计了一种基于紧凑型、高重复频率的纳秒级固态 Marx 发生器,该脉冲电源以 IGBT 作为开关管,并使用多输出磁环变压器为 IGBT 提供驱动信号,可获得幅值 10 kV、最小脉宽 400 ns 的高压脉冲。但是该电源的多路输出驱动方案结构较复杂,体积偏大^[10]。为了获得更高的纳秒脉冲输出,提高电源性能,并减小电源尺寸,本文的纳秒脉冲发生器采用更为紧凑的电感隔离型 Marx 结构,驱动部分进行优化,结构更为简洁,充放电也由 FPGA 一体化控制,在保证电源稳定可靠运行的前提下,从主电路结构、驱动电路结构和充放电控制三个方面减小电源尺寸。

1 主回路拓扑结构

1.1 电感隔离型 Marx 主电路

本文的正极性电感隔离型 Marx 主电路如图 1 所示,每一级都由一个主电容、一个电感、一个二极管和一个放电管组成。放电时,电感起级间隔离和储能作用;充电时,电感释放能量会抬升电容的充电电压,从而获得更高的输出电压幅值^[11]。

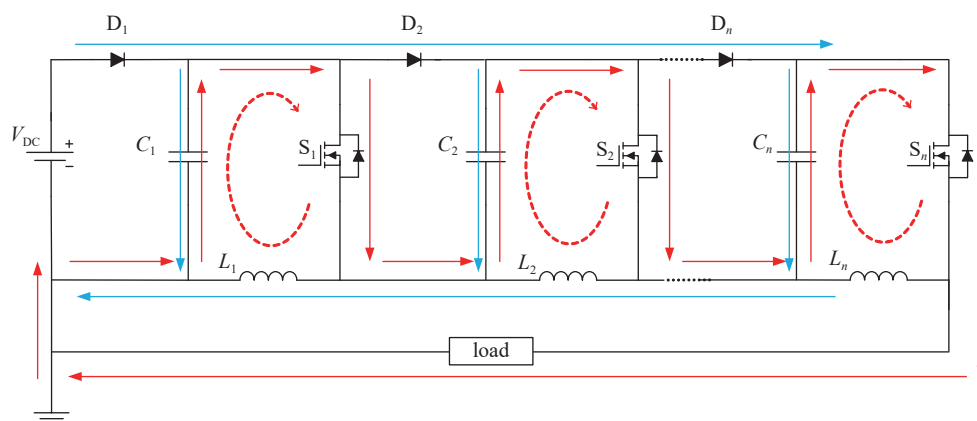


Fig. 1 Main circuit of the inductor-isolated Marx generator

图 1 电感隔离型 Marx 主电路图

1.2 主电路的工作过程

1.2.1 充电过程

充电回路如图 1 中蓝色箭头所示,直流充电源经过二极管和电感对主电容 C_1 、 C_2 、 C_3 ... C_n 进行并联充电。此时放电管 S_1 、 S_2 ... S_n 处于关断状态。因为在放电过程中,电感起隔离作用,并且会储存一定的能量,储存的能量会结合充电源一起给主电容充电,导致电容上的电压抬升。越往后的电容充电电流越大,充电速度越快,充电时间越短,电压抬升越高。由于固态 Marx 纳秒脉冲发生器占空比很小,为了避免 Boost 升压导致电容充电电压在重频状态下持续抬升,电路工作在电流断续模式。图 1 所示结构中,第一级充电电压 U_{C_1} 仍为充电电压 U_0 ,后续每一级主电容的充电电压为^[12]

$$U_{C_n} = U_0 \left(1 + \frac{t_c}{t_0} \right)^n \quad (1)$$

式中: U_{C_n} 为第 n 级电容电压 ($n \geq 2$), U_0 为直流充电源的输入电压, t_c 为脉冲宽度, t_0 为电感能量释放时间。由于 t_0 时间未知,电容电压公式^[12]

$$U_{C_{n+1}} = U_{C_n} \left(1 + \frac{t_c^2 f U_{C_n}}{2 L_n I_{T_{av}}} \right) \quad (2)$$

式中： $U_{C_{n+1}}$ 为第 $n+1$ 级电容电压 ($n \geq 1$)， f 为开关频率， $I_{T_{av}}$ 为负载平均电流， L_n 为电感值。

1.2.2 放电过程

放电过程如图 1 中红色实线箭头所示，放电管 S_1 、 $S_2 \cdots S_n$ 开通，主电容串联并开始对负载放电，产生高压脉冲。在放电过程中，如图 1 中红色虚线箭头所示，电容同时会通过放电管给电感充电，电感起隔离储能作用，与相邻电容 C 、放电管 S 形成 LC 回路。由于充电过程中的 Boost 升压情况，放电时输出电压会高于 nU_0 。

1.3 参数设计及元器件选型

放电管选择 CREE 公司的 C2M0080120D 型号 MOSFET，具有几十纳秒的快速上升沿和下降沿、1200 V 的耐压和 80 A 的最大脉冲电流，可以满足电源对放电管的需要。主电容的容值会影响电源充放电的时间和输出电压的降落情况，耐压也需要考虑充电电压和电路结构。主电容的取值需要满足^[10]

$$C_{1 \cdots n} \geq \frac{\tau_a \times U_{out}}{\Delta U \times R_{load}} \quad (3)$$

式中： τ_a 是最大脉冲宽度， U_{out} 是输出电压， ΔU 是电压允许的压降， R_{load} 是负载阻值。在 τ_a 为 500 ns、负载为 50 k Ω 的高阻抗负载条件下，主电容可以选用耐压 1200 V、电容值 200 nF 的陶瓷电容。由于电路工作在电流断续模式，若电感过大，重频情况下电感电流将会连续，电容的充电电压将会持续抬升，损坏元器件；若电感过小，放电时感抗低，将无法起到很好的隔离作用。电感的取值需要满足^[13]

$$L_{1 \cdots n} \leq \frac{\tau_b}{2} R_{load} (1 - D)^2 \quad (4)$$

式中： τ_b 是最小脉冲宽度， R_{load} 是负载阻值， D 为 Boost 电路中的占空比。在 τ_b 为 500 ns，脉冲周期为 1 ms 至 2 ms、占空比为 0.05% 至 0.025%、负载为 50 k Ω 的条件下，隔离电感可以选用 1 mH 的工字电感。二极管选用 1 kV 耐压的快恢复二极管 FR157。

2 驱动电路设计

放电管的驱动信号由 FPGA 产生，一路控制信号通过一根高频抗干扰传输线传到一块电路板上，两块电路板可以串联成 24 级 Marx 电路，只需要两路相同的控制信号和两根传输线。信号传输简洁可靠，模块化电路结构简单。

驱动电路的设计如图 2 所示。为了提高信号驱动能力，选用了 IXDN614 功率放大芯片，该芯片可以提供最大 14 A 的峰值电流，电压上升和下降时间小于 30 ns，满足驱动需求。选用 24 V 开关电源给芯片稳定供电。到达每块板上的驱动信号先经过第一列的一个 IXDN614 芯片进行功率放大，输出信号再通过一根母线将信号对称分为六路，尽可能保证信号同步，提供给第二列的六个 IXDN614，并进一步提高驱动能力。第二列的每一个 IXDN614 驱动芯片输出信号再对称分为两路，传递给两个隔离磁芯的原边，通过磁隔离驱动副边对应的两个放电管，从而实

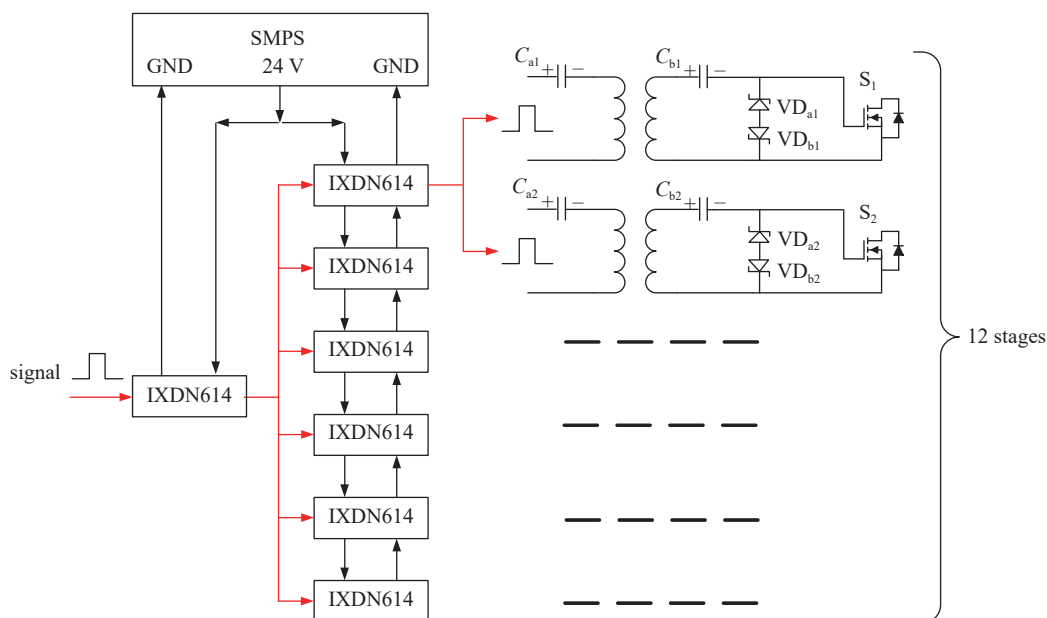


Fig. 2 Design of driving circuit

图 2 驱动电路设计图

现一路信号驱动 12 个放电管。该驱动方案的低压侧可以采用 24 V 开关电源给所有驱动芯片供电,且所有芯片共地,简化了驱动电路结构,减少信号线数目,减小电源尺寸,降低电源成本,磁隔离驱动也提高了电源耐压。实验结果表明,驱动回路结构紧凑,信号同步性也能满足电源需求。

经过实验,隔离磁芯选用 PC40 铁氧体磁芯。原、副边绕相同匝数的线圈,匝数过多会减缓驱动上升沿,匝数低则驱动电压掉落严重,波形发生畸变,抗干扰性也变差。最终实验确定匝数为 6:6^[14]。原边的电容 C_a 能够防止 IXDN614 的输出与地短接,电容取值偏小会使驱动波形在低电平位置产生较大的 LC 振荡,降低抗干扰能力,电容太大会减弱驱动能力。实验选择 100 nF 贴片电容。磁隔离驱动可以采用隔直电容来保证磁芯复位。磁芯副边连接放电管的栅极和源极,栅极串隔直电容 C_b ,栅极和源极之间并联了一组正向 15 V 和反向 9 V 的稳压管^[15]。通过 PSpice 仿真搭建驱动部分的电路原理图如图 3 所示。

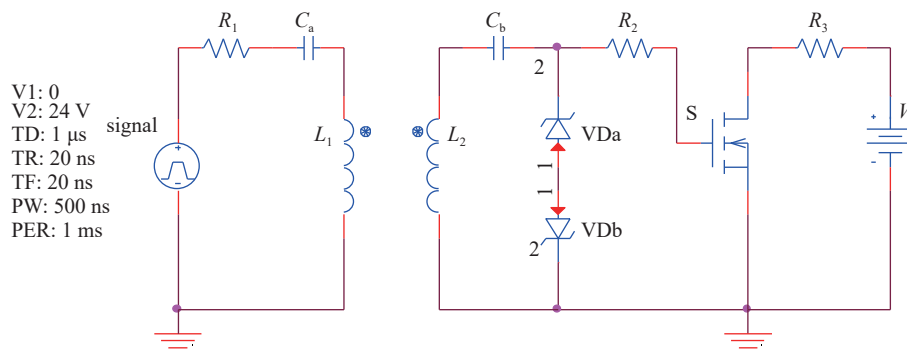


Fig. 3 Simulation schematic diagram of driving circuit

图 3 驱动电路的仿真原理图

本文驱动信号的脉宽设置为 500 ns,磁芯副边感应到 24 V 方波电压脉冲变化,给隔直电容 C_b 充电。当驱动信号为高电平时,驱动电压稳压在正 15 V,当驱动信号为低电平时,电容 C_b 释放存储的能量,放电管的栅极、源极会有一个 9 V 的负压偏置,以保证放电管可靠关断,提高驱动电路抗干扰性。如果副边隔直电容过小,电容存储电荷的能力弱,反压时驱动波形会有较严重的畸变,隔直电容过大,会减缓驱动波形的上升沿。实验选择 1 μ F 贴片电容。获得放电管栅极、源极之间电压仿真波形如图 4 所示,可以保证开关的正常通断。

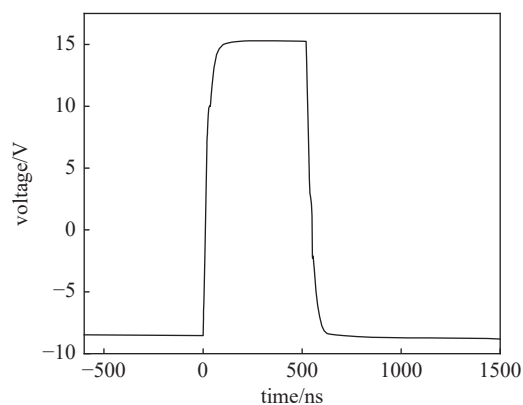


Fig. 4 Simulation waveform of gate driving voltage

图 4 门极驱动电压仿真波形

3 仿真及实验结果分析

3.1 仿真分析

本电路结构中,在同样的控制脉宽下,输出的脉宽会随着负载的不同而变化,下文所指的脉宽是指脉冲顶部的宽度。运用 PSpice 搭建了五级电路仿真,充电电压 400 V,脉宽 500 ns,电感 1 mH,开关频率 10 kHz。充放电期间电感电流的稳态仿真波形如图 5 所示。表明 Boost 电路的电流工作在断续模式,越往后级的电感电流变化幅度越大,充电速度越快,给对应充电电容提供的能量就越高,放电速度也越快。充电结束后电感电流会有一定频率的振荡,直至慢慢消除,这是 LC 回路与电路中的阻尼导致的。充放电期间电容电压的稳态仿真波形如图 6 所示。当仿真进入稳态后,各级电容的充电电压趋于稳定。放电瞬间开关导通,电容电压会有一个下降,但由于负载阻抗高,且放电脉宽只有 500 ns,电容电压小幅下降后又会恢复到其稳态值,五级电容充电电压分别为 400、440、498、594 和 795 V,输出电压为 2.7 kV。改变开关频率可以得到不同的输出电压,结果如表 1 所示,开关频率越高,输出电压越高,Boost 升压效果越明显。

3.2 实验结果分析

实验使用的直流充电源为东文高压直流电源模块,最高输出为电压 600 V,具有体积小、输出稳定、易于调节等优势。输出控制方式选用电压外控调节,电源充电电压设置完成后,由 FPGA 输出持续的相应占空比的 PWM 控

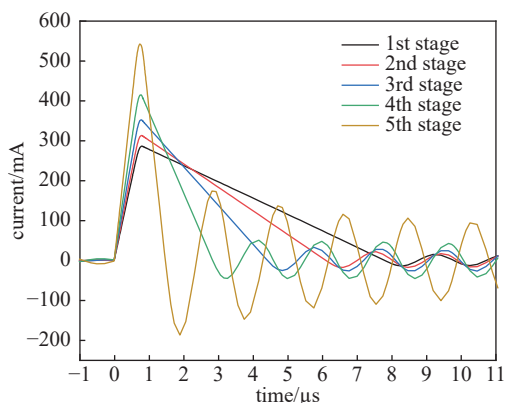


Fig. 5 Simulation waveform of inductor current

图 5 电感电流的仿真波形

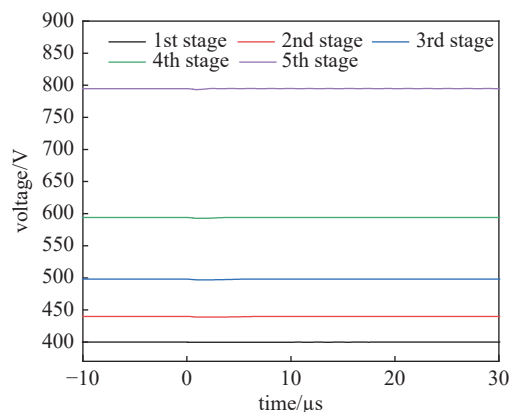


Fig. 6 Simulation waveform of capacitor voltage

图 6 电容电压的仿真波形

制信号, 经过 GP8101S 芯片整流成 0~5 V 范围内相对应的电压, 从而实现对高压模块输出电压的外控调节, 给脉冲电源的主电容充电。这种充电方式可以在控制面板上精确设置充电电压, 实现了电源充放电控制一体化, 并大大减小了电源的体积^[16]。电源单块板主电路的实物图如图 7 所示, 长宽仅为 23 cm×10 cm, 两块板 24 级电路首尾相连叠加的高度为 12 cm。

表 1 不同频率下的输出电压

Table 1 Simulated output voltage at different frequencies

No.	frequency/kHz	output voltage/kV
1	0.1	2.0
2	0.5	2.2
3	1	2.3
4	5	2.6
5	10	2.7

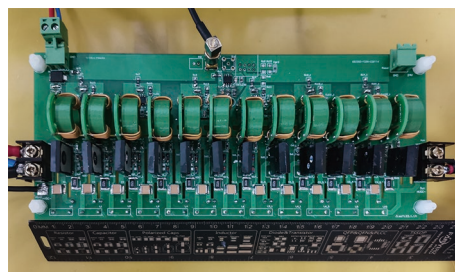


Fig. 7 Photo of power supply

图 7 电源实物图

实验负载选用 50 kΩ 高压大功率无感电阻。为了电源安全稳定运行, 设定充电电压不超过 550 V。图 8 为放电最高重复频率 1 kHz、幅值 14 kV、脉宽为 500 ns 的脉冲输出波形。此时的充电电压为 515 V, 最后一级电容电压为 1100 V, 主电容耐压满足要求, 电路输出电压抬升到了 14 kV, 电源可以稳定运行。图 9 为 10 kV、12 kV 和 14 kV 的输出电压波形。10 kV 脉冲的上升沿约 40 ns, 12 kV 脉冲的上升沿约 70 ns, 14 kV 脉冲的上升沿约 100 ns, 电源的输出电压 0~14 kV 可调, 且上升沿均低于 100 ns。由于负载电阻大, 与分布电容组成的 RC 时间常数大, 脉冲的下降沿缓慢, 大约 1500 ns。隔离电感与负载构成了串联回路, 电感上存储的能量会引起下降沿尾端的振荡。

根据主电路的工作过程分析, 隔离电感的 Boost 升压效果使主电容的充电电压逐级抬升, 并且各级电容保持充电电压恒定, 最后一级充电电压最高, 其值不得超过所选电容的耐压值。在充电电源输入电压为几百伏的情况下, 传

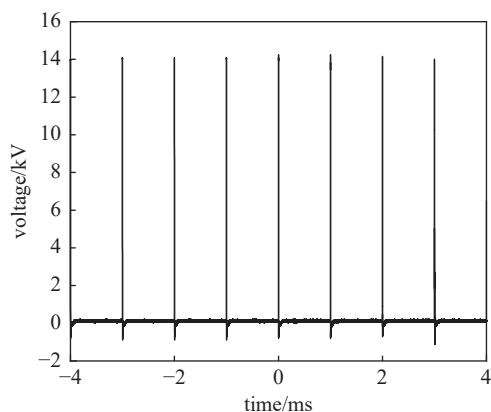


Fig. 8 Voltage waveform of 14 kV pulses at the frequency of 1 kHz

图 8 输出电压 14 kV 重复频率 1 kHz 的电压波形

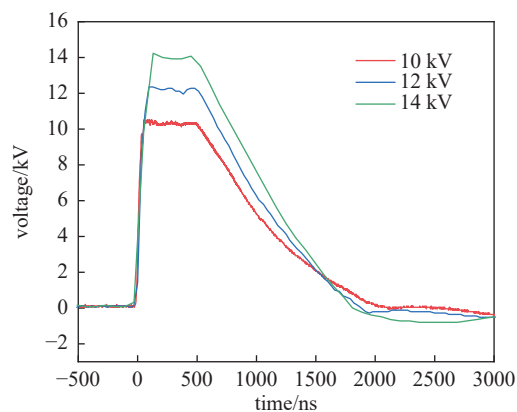


Fig. 9 Waveforms of different output voltages

图 9 不同输出电压的波形

统 Marx 电路通过电容电压叠加可以获得很高的输出电压, 而 Boost 结构的进一步升压又可以明显提高电源的输出电压。本文 24 级电路实验中, 当频率为 1 kHz 时, 电源的输入电压与实际输出电压如表 2 所示。当输入电压为 515 V 时, 输出电压可以达到 14 kV。

4 结 论

本文设计了一种磁隔离驱动的小型化电感隔离型 Marx 发生器, 在电阻负载下可以产生频率 0.5~1 kHz 可调、电压 0~14 kV、脉宽 500 ns 的高压纳秒脉冲。电感隔离型 Marx 可以拾升充电电压, 从而获得更高的电压输出, 同时电感抑制每级内部短路。该电路仅需一路信号就可以驱动 12 个放电管, 磁隔离驱动提高电源耐压, 充电源选用小体积的高压直流电源模块进行电压外控调节充电。该方案使得电源整体结构更紧凑, 主电路的长宽高尺寸仅为 23 cm×10 cm×12 cm。电源不足在于输出脉冲下降沿缓慢, 尾部会有振荡, 且每一级的元器件工作电压不同。

参 考 文 献:

- [1] 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: 030201. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (VI) Typical applications[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 030201)
- [2] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (7)主要技术问题和未来发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 010201. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (VII) Major challenges and future trends[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 010201)
- [3] 姚陈果, 米彦, 李成祥, 等. 纳秒级陡脉冲电场诱导癌细胞凋亡的实验及作用机理研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2008, 27(5): 739-744. (Yao Chenguo, Mi Yan, Li Chengxiang, et al. The effects of nanosecond pulsed electric field on apoptosis of human ovarian carcinoma cell line SKOV3 and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 27(5): 739-744)
- [4] 何天帅, 谭焜, 孙倩倩, 等. 不可逆电穿孔肿瘤消融器械发展现状[J]. *中国医疗器械杂志*, 2021, 45(6): 655-661. (He Tianshuai, Tan Kun, Sun Qianqian, et al. Development status of irreversible electric perforated tumor ablation device[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2021, 45(6): 655-661)
- [5] Beebe S J, Schoenbach K H. Nanosecond pulsed electric fields: a new stimulus to activate intracellular signaling[J]. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2005, 4(2005): 297-300.
- [6] Yao Chenguo, Hu Xiaoqian, Mi Yan, et al. Window effect of pulsed electric field on biological cells[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(5): 1259-1266.
- [7] Tang Tao, Wang Fei, Kuthi A, et al. Diode opening switch based nanosecond high voltage pulse generators for biological and medical applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(4): 878-883.
- [8] Akiyama M, Sakugawa T, Hosseini S H R, et al. High-performance pulsed-power generator controlled by FPGA[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2588-2592.
- [9] Yao Chenguo, Zhang Ximing, Guo Fei, et al. FPGA-controlled all-solid-state nanosecond pulse generator for biological applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2366-2372.
- [10] 嵇保健, 王若冰, 洪峰, 等. 基于Marx电路的纳秒级高压脉冲电源设计[J]. *高电压技术*, 2016, 42(12): 3758-3762. (Ji Baojian, Wang Ruobing, Hong Feng, et al. Design of nanosecond high-voltage pulsed power source based on Marx generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(12): 3758-3762)
- [11] Baek J W, Ryu M H, Yoo D W. High voltage pulse generator using boost converter array[C]//IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002: 395-399.
- [12] 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]//2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). 2015: 1-5.
- [13] Baek J W, Yoo D W, Rim G H, et al. Solid state Marx generator using series-connected IGBTs[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(4): 1198-1204.
- [14] 李盈. 软磁材料高频磁化特性和损耗特性分析[J]. *机电信息*, 2019(8): 60-61. (Li Ying. Analysis of high frequency magnetization and loss characteristics of soft magnetic materials[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2019(8): 60-61)
- [15] 饶俊峰, 宋子鸣, 王永刚, 等. 基于磁隔离驱动的亚微秒高压脉冲电源[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 115002. (Rao Junfeng, Song Ziming, Wang Yonggang, et al. Sub-microsecond high voltage pulse power supply based on magnetic isolated driving[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 115002)
- [16] 刘金涛. 便携式脉冲发生器可靠性技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 9-18. (Liu Jintao. Research on reliability technology of portable pulse generator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 9-18)

表 2 电压输出结果

No.	input voltage/V	output voltage/kV
1	120	4
2	250	8
3	320	10
4	400	12
5	515	14