



·高电压及脉冲功率技术·

紧凑型全固态高重复频率 LC-Marx 脉冲发生器*

庄龙宇, 杨均翔, 须貝太一, 江伟华

(长冈技术科学大学 极限能量密度工学研究中心, 新潟县 长冈市 940-2137)

摘 要: 通过理论、模拟和实验对提出的全固态 LC-Marx 发生器进行研究。整个系统由一个 MOSFET 开关和多个由一个磁芯制成的磁开关控制, 该脉冲发生器直径为 140 mm, 高为 17 mm, 且随着级数的增加尺寸和重量基本不变。运用谐振充电可以使电容充到源电压的 1.82 倍, 五级 LC-Marx 发生器用 950 V 直流电压充电时, 在 500 Ω 电阻上得到峰值电压为 10.9 kV、半高宽为 400 ns、上升时间为 85 ns、效率为 30.43% 的高压脉冲。输出电压的上升前沿可以根据实际应用的要求, 通过减小电容量缩短。该脉冲发生器在频率低于 30 kHz 下, 可以持续稳定地运行。该 LC-Marx 脉冲发生器在气体放电中将具有较好的应用效果。

关键词: LC-Marx; 脉冲发生器; 磁开关; MOSFET; 谐振充电; 全固态; 高频率; 大气放电
中图分类号: TM836 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210114

Compact all-solid-state high frequency LC-Marx generator based on magnetic switch

Zhuang Longyu, Yang Junxiang, Sugai Taichi, Jiang Weihua

(Extreme Energy-Density Research Institute, Nagaoka University of Technology, Niigata 940-2188, Japan)

Abstract: An all-solid-state LC-Marx generator based on magnetic switch has been proposed and analyzed by theory, simulation and experiment. This system is controlled by 1 MOSFET and magnetic switches that are made by 1 magnetic core. It has dimensions of 130 mm (diameter) and 60 mm (height), which almost not change with the stage increase. The capacitors could be charged to 1.82 times source voltage according to the principle of resonant charging. Five-stage LC-Marx generator could obtain a peak output voltage of 10.9 kV with rise time of 80 ns when the source voltage of 950 V is applied, and the energy efficiency is 30.43% on 500 Ω . The generator has been tested under 30 kHz that could work steadily. It could output higher voltage when used for atmospheric discharge.

Key words: LC-Marx; pulsed power generator; magnetic switch; MOSFET; resonant charging; all-solid-state; high frequency; atmospheric discharge

近年来脉冲功率发生器在工业、国防和医疗等方面的应用要求向着固态紧凑化、高重频长寿命稳定运行和模块化等方向发展^[1-4]。Marx 发生器是一种应用较广和较成熟的脉冲调制方式之一^[5-7]。为了满足不同应用情况下的要求, 研究人员提出了很多 Marx 发生器的拓扑结构^[8-10]。由于 LC-Marx 发生器所需要的开关数仅为 Marx 发生器的一半就可以实现 Marx 发起的功能, 而且开关的电感位于放电回路之外。所以, 法国的 Rainer Bischoff 设计了基于耦合变压器的 LC 反转发生器^[11-12]; 美国的 T.G.Engel 等也对基于耦合变压器的高电压 LC 矢量反转型脉冲发生器进行了理论和模拟分析^[13]; 中国国防科技大学的樊旭亮等对基于可饱和变压器型 LC-Marx 发生器进行了研究^[14-15]。现阶段的 LC-Marx 发生器能够很好地输出稳定的高电压且结构紧凑, 应用的开关较少, 但是工作频率较低且随着级数的增加体积和重量也会随之增加。所以, 本文基于 LC-Marx 的工作原理, 设计了一个基于磁开关的全固态、结构紧凑、体积小(体积和重量不会随着级数的增加而增加)且能够在高重频率下工作的发生器。

1 理论分析和数值模拟

图 1 显示了基于磁开关的 LC-Marx 发生器的电路图。这个电路的操作过程如下所述。首先, 电容器 C_0 由高压直流电压源 V_0 充到电压 U_0 ; 然后控制开关 S 导通, 由于初级电容器 C_0 的电容量远远大于主要储能电容器

* 收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-05-22
作者简介: 庄龙宇(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲功率技术的研究。

$C_1 \sim C_n$ 的电容量总和, 所以理论上电容器 $C_1 \sim C_n$ 可以由初级电容器 C_0 充到 $2U_0$; 在电容器 $C_1 \sim C_n$ 被充到 $2U_0$ 时, 磁开关 ($MS_1 \sim MS_n$) 正好达到饱和开始导通, 奇数电容器通过磁开关的饱和电感发生振荡放电, 电容器的电压极性开始反转; 同时负载 R 上的电压开始增加, 当奇数电容器完成极性反转时, 负载 R 上的电压达到峰值, 所以输出电压的上升时间主要由奇数电容器的反转时间决定; 最后, 奇数电容器完成电压极性反转后, 磁开关断开, 所有的储能电容器 $C_1 \sim C_n$ 串联向负载 R 放电。

本文参考大气放电应用要求, 来确定脉冲发生器的参数^[8]。输出峰值电压高于 10 kV, 脉冲宽度为 200 ns 到 400 ns, 负载为变阻抗, 其导通电阻约为 500 Ω 。所以五级 LC-Marx 发生器应用 500 Ω 电阻为负载, 结合公式(1)电容器串联向电阻放电的时间常数和想要的输出脉宽, 储能电容器的电容选用 4.7 nF。

$$t = R \frac{C}{2n} \quad (1)$$

电压叠加和效率对于脉冲发生器也非常重要, 为了阻断在电容对电阻放电时的漏电流而导致电压和效率降低, 所以电容的放电时间要远小于充电时间。电容器串联向电阻放电的时间常数可由公式(1)得到, 所以隔离电感应满足

$$\frac{1}{2} \pi \sqrt{LC} \gg R \frac{C}{2n} \quad (2)$$

式中: C 是主要储能电容器的电容量 (4.7 nF); n 是发生器的级数; R 是负载的电阻值为 500 Ω ; L 是隔离电感。

由于随着隔离电感的增大, 磁开关需要更大的伏秒积和非饱和电感以确保主要的储能电容能被充到期望的电压, 从而使磁开关的体积或匝数也会增加, 所以隔离电感不是越大越好。参考以前的研究经验, 反转时间比放电时间大一个量级就可以起到很好的隔离效果。所以根据公式(2), 应用电感量为 60 μH 的电感进行隔离。

电路图 1 中的谐振充电过程可以用图 2 的电容器谐振充电电路图表示, 以便分析磁开关非饱和电感对主要储能电容充电的影响。

图 2 中, C_0 是初级电容器, C_1 的电容量是奇数电容器和偶数电容器的电容量之和, L_0 是隔离电感, L_s 表示磁开关的非饱和电感。根据谐振充电原理, C_0 的电容量需要远远大于 C_1 的电容量。图 2 电路充电过程中, C_1 的电压方程为

$$u_{C_1}(t) = \frac{L_s}{L_s + L_0} U_0 (1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

式中: $\omega = \sqrt{\frac{L_0 C_0 + L_s C_0 - L_s C_1}{L_s L_0 C_0 C_1}}$ 。

从公式(3)可知, 电容器的电压随着非饱和电感的增加而增加。当发生器中磁开关非饱和电感为隔离电感的 9 倍时, 主要储能电容可以被充到约 1.82 U_0 。所以, 根据已知的隔离电感量, 可知磁开关的非饱和电感量应大于 540 μH 。

根据公式(3)得到的结论和公式(4), 应用图 1 中的电路测得单位截面积单位匝数磁开关的电感量。结合充电电压以及公式(4)和公式(5), 磁开关用外径为 130 mm、内径为 86 mm、厚度为 13 mm 的磁芯绕 6 匝制成。

$$L = \frac{k \mu_0 \mu_s N^2 s}{l} \quad (4)$$

$$NA \Delta B = \int_{t_1}^{t_2} u_{C_1}(t) dt \quad (5)$$

式中: N 是磁开关匝数; A 是磁芯截面积。通过实验以及公式(6)得到磁开关的饱和电感 L_M 约为 138 nH, 奇数电容器 C_1 的反转时间 t_r 为 80 ns。

$$t_r = \pi \sqrt{L_M C_1} \quad (6)$$

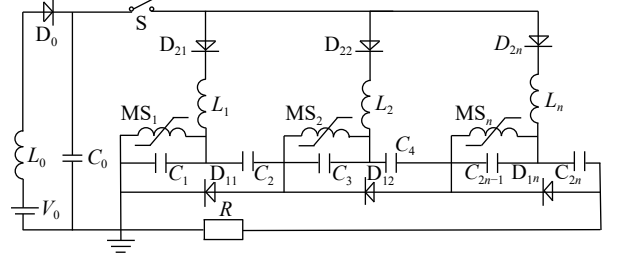


Fig. 1 Circuit diagram of the proposed LC-Marx generator based on magnetic switches

图 1 基于磁开关的 LC-Marx 发生器电路原理图

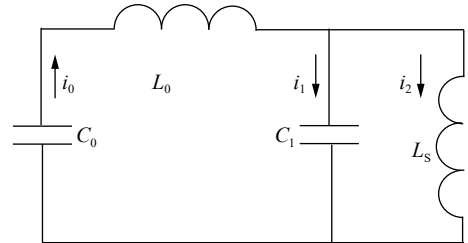


Fig. 2 Resonant charging circuit of capacitor

图 2 电容器谐振充电电路

通过模拟分析五级 LC-Marx 发生器,验证所确定的参数和工作原理。模拟电路如图 1 所示。充电电压为 950 V,所有的储能电容器的电容量是 4.7 nF,初级电容器 C_0 的电容量是 28.2 μF ,隔离电感的电感量为 60 μH ,负载为 300 Ω 的电阻。磁开关根据上述分析的参数设定。

基于磁开关的三级 LC-Marx 发生器输出电压的模拟结果如图 3 所示。首先,奇数的电容器充到 1.73 kV 和偶数的电容器充到 -1.73 kV;此时磁开关正好达到饱和,奇数电容器 C_1, C_3, C_5 的极性通过磁开关的饱和和电感开始反转;同时,电阻负载上的电压开始增加,并在奇数电容器极性反转完成时达到峰值电压 -14.4 kV,且反转时间为 80 ns。当电阻达到峰值电压时,奇数电容器上的电压为 1.5 kV 和偶数电容器上的电压为 1.38 kV,脉冲的半高宽为 250 ns 以及输出电压的上升时间为 80 ns(由 0 V 到峰值电压)。模拟结果更直观的展示了 LC-Marx 发生器的工作原理和过程,模拟结果与理论分析基本一致。

根据理论分析和模拟结果,说明了所设计的 LC-Marx 发生器能够按照要求工作并输出所需要的高电压脉冲。输出电压的上升时间主要由奇数电容的反转时间决定,所以磁开关的参数不仅影响输出的峰值电压,也影响其上升沿。

2 实验结果

2.1 工作原理

基于磁开关的 LC-Marx 发生器进行实验研究,分析验证脉冲发生器的实用性和工作原理。电路原理图和实物分别如图 1 和图 4 所示。

图 4 所示脉冲发生器放电部分和磁开关结构,其直径为 140 mm,高为 17 mm。脉冲发生器由一个 MOSFET 开关、一个初级电容器和一个磁芯、每一级两个主要储能电容器和一个隔离电感构成。初级电容器 C_0 的电容量为 28.2 μF ,主要储能电容器 $C_1 \sim C_{10}$ 的电容量都为 4.7 nF,电容的型号为 B472K,且额定电压为 2 kV。三个型号为 UF5408 的二极管为偶数电容充电,最大直流阻断电压为 1 kV。

磁开关的磁芯的制造商是四川力源电子有限公司(Sichuan Liyuan Electronics)。磁芯的尺寸为外径 130 mm,内径 86 mm,厚度 13 mm。磁芯用一个 3.0 A 的外部电流源通过一匝导线穿过磁芯内径进行磁通复位。根据理论和模拟分析,磁开关由导线在 1 个磁芯上绕 6 匝制成。

控制开关 S 仅仅承受电源电压,因为在储能电容器向负载放电的过程中控制开关一直处于导通状态。应用谐振充电的原理,储能电容理论上可以充到控制开关额定电压的两倍,而且控制开关的导通和关断速度不影响输出电压的上升时间。控制开关可以根据应用中的充电电压以及工作频率选择。本研究中脉冲发生器需要高频运行,选用 MOSFET 作为控制开关,其通过光纤元件和 DC-DC 转换器与地进行隔离。MOSFET 开关 S 的主要器件如表 1 所示。

在实验中,电压是由高压探头 Tektronix P5100 测得,电流用 PEM CWT/6B Mini 测量得到。电压和电流波形用示波器 LeCroy WaveJet 记录。

通过一级 LC-Marx 脉冲发生器分析其工作过程和校核参数。实验电路图如图 1 所示,充电电压为 950 V,电阻为 100 Ω 。主要储能电容完成放电之前,控制开关 S 在放完电之前一直处于导通状态。实验的工作原理和已经阐述的模拟工作原理相同。

实验结果如图 5 所示,由实验结果可知主要储能电容器能够充到 1.73 kV 或 -1.73 kV,奇数电容器反转时间为

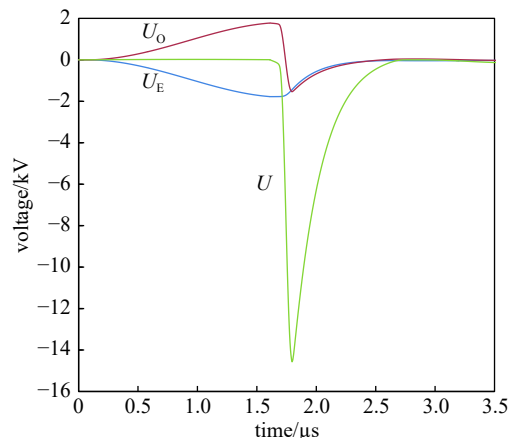


Fig. 3 Simulated odd number capacitors' voltage (U_O), (U) even number capacitors' voltage (U_E) and output voltage of 5-stage LC-Marx generator

图 3 五级 LC-Marx 发生器奇数电容电压、偶数电容电压以及负载电压



Fig. 4 Photograph of the produced five-stage LC-Marx generator

图 4 基于磁开关的五级 LC-Marx 发生器实物图

表 1 开关及其驱动的主要器件

Table 1 Major components of the switch and the driver

component	manufacturer	model	specifications
power MOSFET	IXYS	DE475-102N21A	1000 V 140 A
driver chip	IXYS	IXRFD630	8~30 A, 30 A
optical modules	Hitachi	DS9300, DR9300	DC~50 Mb/s 5 V(in)/15 V(out)
isolated DC-DC converters	Murata	NMJ0515SAC, NMJ0515SAC	5 V(in)/5 V(out) 1 W isolation volt: 5 kV

85 ns, 电阻上的峰值电压为-2.45 kV 且上升时间为 85 ns(10%~90%), 脉冲的半高宽为 400 ns。实验结果与图 3 的模拟结果基本一致。根据理论分析和实验结果, 输出脉冲的上升时间主要由奇数电容的反转时间决定。所以根据公式(6)可知, 可以根据实际应用适当减小主要储能电容的容量或饱和电感能够有效缩短输出脉冲的上升沿。例如, 当减少电容量时, 由于放电时间缩短, 因此, 可以使用较小的隔离电感(隔离电感也是充电限流电感)。较小的充电限流电感和较小的电容使充电时间缩短, 使磁开关所需要的伏秒积减小。这样可以减小磁开关磁芯的体积或磁开关匝数, 使磁开关的饱和电感减小。所以, 减小电容量的同时也可以减小磁开关的饱和电感, 可以有效缩短输出脉冲的上升时间。

2.2 电压叠加

图 6 显示了在充电电压为 950 V 时, 一级到五级 LC-Marx 脉冲发生器分别在 100, 200, 300, 400, 500 Ω 电阻上的电压波形。每一级 LC-Marx 脉冲发生器可以提升约 2.18 kV, 五级 LC-Marx 发生器输出的峰值电压为-10.9 kV, 输出脉冲的半高宽为 400 ns, 上升时间为 85 ns(10%~90%)。输出电压随着级数增加近乎成倍增加, 通过增加级数可以很好地提高输出电压和功率。基于磁开关的 LC-Marx 发生器可以按照设计要求工作并获得所需要的输出脉冲。但是与模拟结果进行比较, 可以看出实验中的输出电压较低。这是由于电容器所带的电感和回路中的电感使其反转时间增加, 从而导致了电容器的电压在反转时的压降增大。

初级电容器 C_0 的容量远远大于主要储能电容器电容量之和, 所以初级电容器 C_0 的电压基本保持在 950 V, 结合主要储能电容器充电时的电流, 通过计算得到初级电容输出能量为 23.43 mJ/pulse。根据图 5 主要储能电容器 $C_1 \sim C_6$ 的峰值电压, 可以计算出每个主要储能电容器储存能量为 6.66 mJ/pulse。所以, 由初级电容器 C_0 到储能电容器 $C_1 \sim C_6$ 的效率为 56.84%。根据图 6 的输出电压波形和电阻, 可以计算一级到五级的电阻消耗的能量分别 9.08, 17.57, 24.29, 30.17, 35.65 mJ/pulse, 从而可以计算出由储能电容到电阻的放电效率分别为 68.15%, 65.95%, 60.79%, 56.66%, 53.53% 和整个系统的效率分别为 38.74%, 37.49%, 34.55%, 32.19%, 30.43%。

从初级电容到储能电容损失的能量主要沉积在磁芯中和隔离电感内。从储能电容到电阻的能量损失主要通过放电时通过隔离电感的漏电流导致。随着级数的增加脉冲发生器的功率略微有些降低, 这是由于电容在向电阻放电时, 通过隔离电感的损失的能量有所增加。

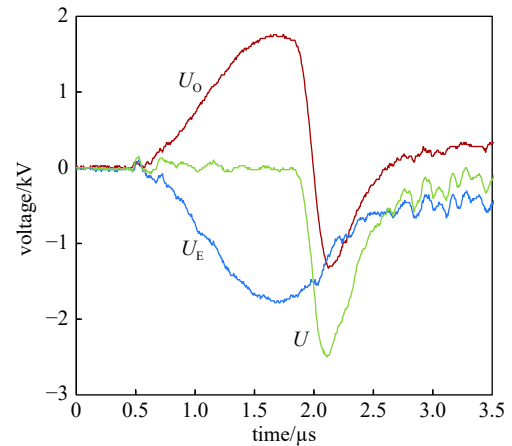


Fig. 5 Odd number capacitors' voltage, even number capacitors' voltage and output voltage of experiment

图 5 奇数电容电压、偶数电容电压以及负载电压

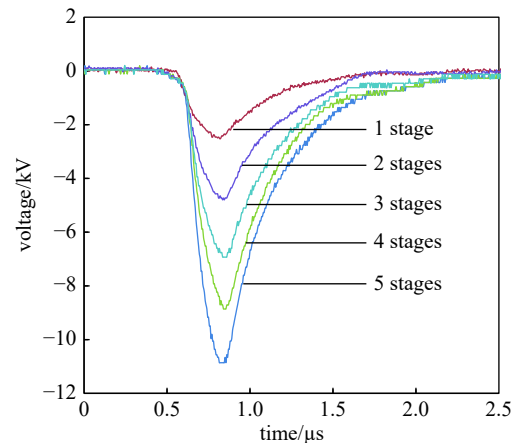


Fig. 6 Output voltage of 1~5 stage LC-Marx generator at 950 V charging voltage

图 6 一级到五级 LC-Marx 发生器输出的电压波形

由于该脉冲发生器控制元件是高频半导体开关 MOSFET 和磁开关,且磁开关附加复位电流使其可以快速复位,所以该脉冲发生器可以在高频条件下运行。图 7 显示了五级 LC-Marx 脉冲发生器在频率为 30 kHz 测试下的输出电压波形。实验结果可以看出该脉冲发生器在频率为 30 kHz 时,仍可以稳定运行,输出电压的偏差在 350 V 以内。

2.3 大气放电

为了检验该 LC-Marx 脉冲发生器实际应用中的效果,应用脉冲发生器驱动导线和同轴圆筒之间进行大气条件下气体放电。图 8 显示了大气条件下气体放电时的放电负载结构^[16]。放电管由铜导线和同轴圆筒构成,铜线直径为 1 mm,距离圆筒内壁 10 mm,且气体放电在大气压强和空气中进行,并联电阻阻值为 2.5 k Ω 。

图 9 显示了在图 8 负载中进行大气条件下气体放电时,负载上的电压和电流波形,其中蓝色实线为电压波形以及红色虚线为电流波形。输出的峰值电压为 13.20 kV,放电时间约为 230 ns,且上升时间为 85 ns。图 9 中气体放电的输出电压与图 7 中纯电阻负载的电压比较可知,大气压条件下气体放电具有较小的脉宽和较高的峰值电压(高出约 2.3 kV)。同时,由图 9 的电压和电流波形及气体放电的研究可知,气体放电的初始阻抗较大,放电时的阻抗较小。初始的大阻抗可以很好地阻断偶数电容在奇数电容反转时的压降,放电时的小阻抗使储能电容能够快速完成放电,减少了能量损耗。所以本文设计的脉冲发生器应用于这种先大后小的变阻抗负载具有一定的优势,例如气体放电,废气处理和灭菌等。

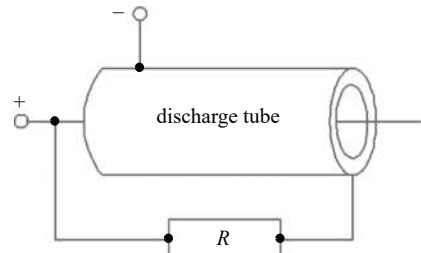


Fig. 8 Configuration of discharge load

图 8 大气条件下气体放电负载结构

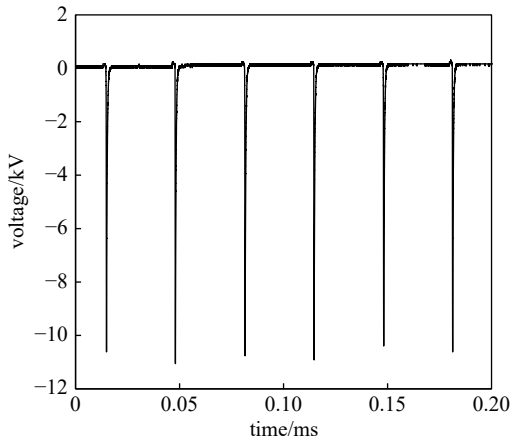


Fig. 7 Output voltage of 5-stage LC-Marx generator under 30 kHz

图 7 五级 LC-Marx 发生器在 30 kHz 时输出的电压波形

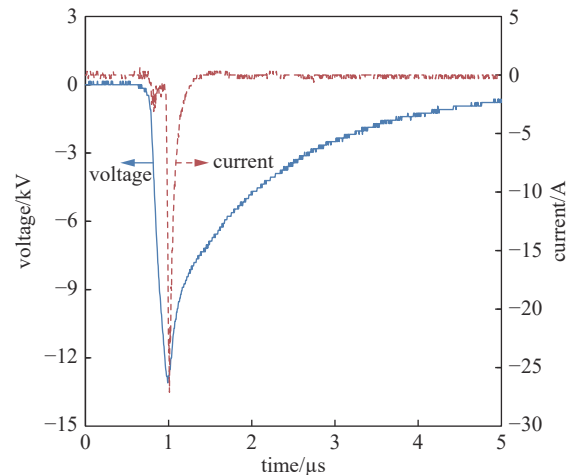


Fig. 9 Voltage and current for the discharge load shown in Fig. 8

图 9 大气条件下放电下的电压波形和电流波形

3 结论

本文提出并研究了一个紧凑型全固态的高压脉冲发生器。通过理论分析,模拟结果以及实验应用可以得到以下结论:(1)该脉冲发生器结构紧凑体积较小,而且随着级数的增加可以很好的实现电压叠加,而且不需要增加控制开关的数量和磁芯体积。(2)通过实验测试,该脉冲发生器在低于 30 kHz 下可以稳定运行,并通过验证实验说明了其应用在废气和废水处理等容性负载方面具有较好的应用前景。但是,脉冲上升时间在有些应用情况下有待进一步缩短,解决方法为通过减小主要储能电容的电容量或应用更符合磁开关要求的磁芯。最后,磁开关是影响整个脉冲发生器体积和输出结果的重要影响因素。同时,应尽量选择具有较大磁感应强度变化量、较大非饱和磁导率和较小饱和磁导率的磁芯来制作磁开关。该脉冲发生器在窄脉宽高频率快前沿的高电压脉冲应用方面将具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (1)概述[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 10-15. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and

- its applications: (i) Introduction[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 10-15)
- [2] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025002)
- [3] Nunnally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(4): 1262-1267.
- [4] Mankowski J, Kristiansen M. A review of short pulse generator technology[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(1): 102-108.
- [5] Chen Rong, Yang Jianhua, Cheng Xinbing, et al. Developing a solid-state quasi-square pulse Marx generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 064707.
- [6] Achour Y, Starzyński J, Lasica A. New Marx generator architecture with a controllable output based on IGBTs[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(12): 3271-3278.
- [7] 马成刚, 李玺钦, 李亚维, 等. 150 kV快前沿低抖动Marx发生器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 045001. (Ma Chenggang, Li Xiqin, Li Yawei, et al. Development of 150 kV fast risetime low jitter Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 045001)
- [8] 饶俊峰, 李恩成, 王永刚, 等. 自触发驱动的全固态Marx发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 025001. (Rao Junfeng, Li Encheng, Wang Yonggang, et al. Self-triggering all-solid-state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 025001)
- [9] Ren Xiaojing, Sugai T, Tokuchi A, et al. Solid-state Marx generator circuit based on inductive energy storage[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021: 1-6.
- [10] Ma Jianhao, Yu Liang, Sun Wenjie, et al. Investigation and evaluation of solid-state Marx pulse generator based on 3-D busbar[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(5): 1597-1604.
- [11] Bischoff R. An alternative circuitry for a transformer-coupled LC inversion generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(10): 3424-3428.
- [12] Bischoff R, Brommer V, Stoll M, et al. Fast semiconductor switching modules for transformer-coupled LC inversion generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(10): 2618-2622.
- [13] Engel T G, Kaplicki C, Nunnally W C. High-voltage pulse production using transformer-coupled LC vector inversion generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1377-1381.
- [14] Fan Xuliang, Liu Jinliang. A compact, all solid-state LC high voltage generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 064703.
- [15] Fan Xuliang, Liu Jinliang. An LC generator based on accurate synchronization controlling of multisecondary windings saturable pulse transformer[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(1): 149-153.
- [16] Jiang Weihua, Sugiyama H, Tokuchi A. Pulsed power generation by solid-state LTD[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3603-3608.