



·高功率微波与强电磁脉冲·

基于 PFN-Marx 技术的紧凑型重频脉冲功率源*

伍友成, 冯传均, 付佳斌, 戴文峰, 曹龙博

(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 621900)

摘 要: 针对低磁场相对论磁控管高功率微波器件实验驱动需求, 对基于脉冲形成网络 (PFN) 储能的高功率脉冲产生技术进行了研究。为了使其结构紧凑且具有较好的输出脉冲波形, 设计了半环形 PFN 脉冲形成单元, 两个半环形带状 PFN 与一体化开关、绝缘盘组成圆环形高压脉冲产生模块。PFN 脉冲形成单元由 13 个陶瓷电容与半环形金属电极板构成, 多个高压脉冲产生模块同轴层叠, 所有开关导通后各模块 PFN 串联放电, 产生快前沿高功率方波脉冲, 再通过对触发开关和充电电源的同步控制实现重频工作。采用电磁仿真软件对 PFN 物理结构进行优化设计, 研制的高压脉冲产生模块充电 51 kV 在负载 8.5 Ω 上输出电压峰值 49.6 kV、脉冲半高宽 108 ns、脉冲前沿 14 ns、平顶 (90%~90%) 74 ns, 具有较好的方波特性; 11 个高压脉冲产生模块层叠集成为 1 个 22 级紧凑 PFN-Marx 装置, 在充电 51 kV 的条件下, 84 Ω 负载上获得峰值 516 kV 的高电压脉冲输出, 半高宽 104 ns、平顶 63 ns、脉冲前沿 11 ns, 实现了 20 Hz 连续 15 s 重频稳定工作, 输出波形完全一致。

关键词: 脉冲形成网络; Marx 发生器; 脉冲功率; 重复频率; 紧凑

中图分类号: TM833

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230354

A compact PFN-Marx repetitive pulsed power source

Wu Youcheng, Feng Chuanjun, Fu Jiabin, Dai Wenfeng, Cao Longbo

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: A compact repetitive pulse power source is developed as an experimental platform for high power relativistic magnetron with low magnetic field. To obtain better output pulse waveform with a compact structure, the pulsed power source designed based on PFN-Marx technology has a coaxial structure. A circular pulse forming net (PFN) is devised out with the impedance of 4 Ω , working voltage of 50 kV, and electrical length of 53 ns, consisting of 13 ceramic capacitors with the capacitance of 1nF. Two PFN devices in series by a gas switch and an insulation plate form a circular high-voltage pulse generation module. Multiple pulse generation modules are coaxial and stacked in a metal cylinder. Inductive isolation is used between the modules. After all switches are turned on, all modules are discharged in series to generate a fast rising-time high-power square wave pulse. Moreover, repetitive operation is achieved through synchronous control of the trigger switch and charging power supply. In experiments the 22-stage PFN-Marx pulsed power source developed was charged to 51 kV, and a high-voltage square wave pulse of 516 kV was obtained on a load of 84 Ω , with pulse width (FWHM) of 104 ns, flat top of 63 ns and rising-time of 11 ns. This power source can operate stably at a repetition rate of 20 Hz for 15 s.

Key words: pulse forming net, Marx generator, pulsed power, repetitive, compact

高效率相对论磁控管是高功率微波技术方向近年来的研究热点^[1-4], 其工作电压一般为数百 kV、二极管束流峰值几 kA 至十千 kA, 驱动脉冲宽度数十 ns 至百 ns。针对相对论磁控管实验需求, 且为了便于转运和运行维护, 需要研制具有快前沿的紧凑型脉冲功率源作为实验平台。当前紧凑型脉冲功率源主要有紧凑 Marx 发生器^[5-8]、准方波 Marx 发生器^[9]、PFN-Marx 功率源^[10-13]、电感储能脉冲功率源^[14-15]、爆炸脉冲功率源^[16]等, 其中紧凑 Marx 发生器^[7]在 18 Ω 负载上实现了输出功率 33 GW、脉冲前沿约 50 ns、重频 5 Hz; 准方波 Marx 发生器^[9]采用不同参数的电容器并联组合作为放电单元, 在 15 Ω 负载上实现输出功率 20 GW、脉冲前沿 32 ns、半高宽 120 ns、平顶约 50 ns; 单级

* 收稿日期: 2023-10-16; 修订日期: 2024-03-25

基金项目: 国家高技术发展计划项目

联系方式: 伍友成, wuyoch@sina.com。

PFN由3个云母电容(6 nF/50 kV)组成的PFN-Marx发生器^[13]在50 Ω负载上实现30 Hz重频5 GW输出、脉冲前沿28 ns、半高宽90 ns、平顶约30 ns;采用电爆炸断路开关的电感储能脉冲功率源^[15]在约12 Ω负载上实现了输出功率45 GW、脉冲前沿约45 ns,其功率密度最高,但每次放电后需要更换电爆炸断路开关,只能单脉冲工作。以上紧凑型脉冲功率源中,PFN-Marx采用脉冲形成网络(PFN)作为储能和脉冲形成单元,理论上容易产生具有快前沿的方波脉冲,但实验中输出脉冲通常具有较大的纹波系数,或脉冲平顶占比较小,又或者结构较复杂难以实现紧凑化。为了解决PFN-Marx装置实际工作中出现的以上问题,对PFN脉冲产生技术进行了研究,设计了一套基于半环形带状PFN结构的同轴型紧凑PFN-Marx脉冲功率源,具有快前沿、宽平顶的方波脉冲特性,且采用模块化设计,易于实现紧凑化。该功率源实验最大输出电压大于500 kV、电流大于6 kA、脉冲半高宽约100 ns、脉冲前沿约10 ns、平顶(90%~90%)大于60 ns,可重频20 Hz连续工作15 s稳定工作。

1 理论设计与仿真

1.1 总体设计思路

根据某相对论磁控管实验需求,最高输出电压不低于500 kV、电流不低于6 kA,其等效工作阻抗约83 Ω,其脉冲驱动源应具有高阻抗特性。为了获得较快的脉冲前沿和方波脉冲输出,采用PFN作为高压快脉冲产生单元,利用Marx发生器脉冲升压原理产生高功率电脉冲,结合恒流谐振大功率高压直流充电技术^[17],通过紧凑化设计减小体积尺寸,实现脉冲驱动源紧凑化和连续重频工作。

1.2 PFN-Marx物理设计

本文提出陶瓷电容器与半环形金属电极板构成带状PFN结构的脉冲形成单元,两个半环形带状PFN与一体化开关、绝缘盘组成圆环形高压脉冲产生模块,开关位于该模块内部,带状PFN通过开关串联放电,多个模块级联使用时可以直接层叠,不会因为开关的存在而增加装置的轴向长度。

考虑设计余量,带状PFN工作电压50 kV、阻抗4.0 Ω,则22级PFN-Marx建立电压大于1 MV,总阻抗88 Ω。PFN电长度设计为53 ns,其输出脉冲半高宽大于100 ns。采用13个容量1 nF、耐压100 kV的陶瓷电容与两块半环形金属条构成一个带状PFN,放电开关电极头集成在一体化设计的金属电极板一端,充电采用电感隔离,以便重频工作。为了实现6 kA以上的纳秒脉冲输出,陶瓷电容应耐受重频20 Hz、工作电压50 kV、工作电流6 kA以上脉冲电流,同时具备较小的等效串联电阻,以获得较高的输出效率。圆环形高压脉冲产生模块结构设计如图1(a)所示,模块内两个PFN脉冲形成单元上下金属电极板充电极性相反,每个模块仅有1个放电开关。

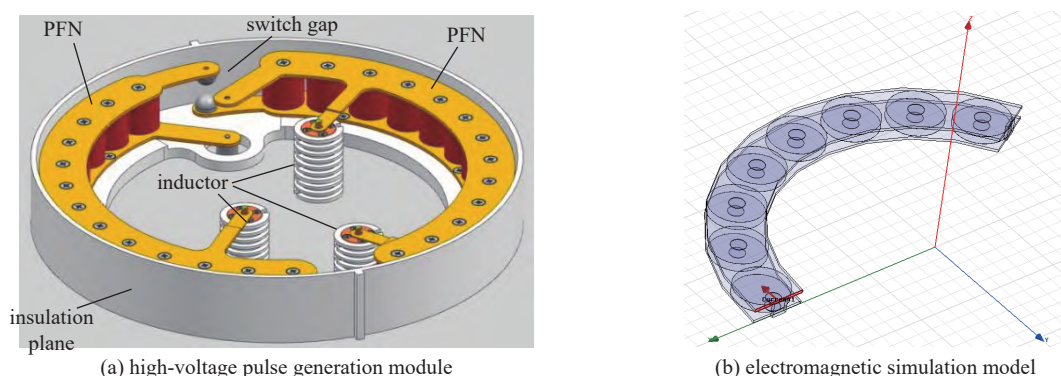


Fig. 1 Schematic diagram of the structure and electromagnetic simulation model of high-voltage pulse generation module

图1 高压脉冲产生模块的结构及电磁仿真模型示意图

采用电磁仿真软件建立带状PFN的物理模型,如图1(b)所示。对PFN单元的电场分布以及电感参数进行计算,根据计算结果优化金属电极的尺寸和结构参数,得到的金属电极设计参数为外径 $\phi 334$ mm、内径 $\phi 266$ mm、上下电极板间距35 mm。

1.3 PFN-Marx电路仿真

基于PFN脉冲形成单元电参数建立高压脉冲产生模块仿真电路,如图2所示,其中考虑开关电感20 nH、损耗0.25 Ω。

在电路仿真中,两级PFN充电电压分别设置为正负50 kV,仿真得到8.3 Ω负载电阻上输出电压如图3所示,峰值48.5 kV、半高宽112 ns、前沿6 ns,脉冲平顶(前沿峰值90%至后沿峰值90%)宽度大于90 ns,纹波系数小于

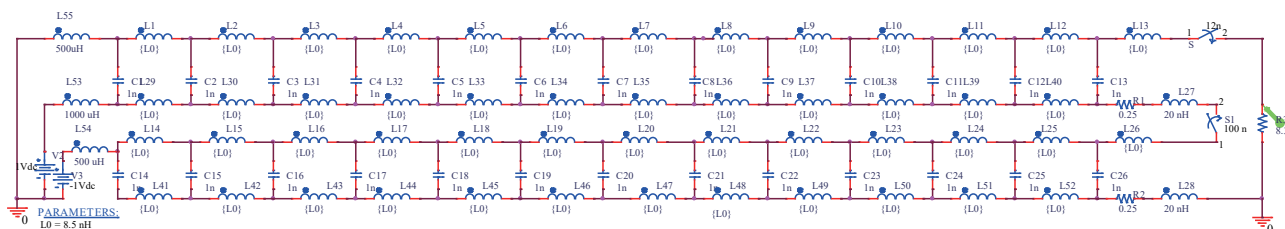


Fig. 2 Simulation circuit of PFN high-voltage pulse generation module

图 2 高压脉冲产生模块仿真电路

2%。根据以上仿真结果分析可得, 11 个 PFN 高压脉冲产生模块组成的 22 级 PFN-Marx 在充电 50 kV 的条件下输出电压可达 530 kV、脉宽约 110 ns、电流 6.4 kA。

2 功率源结构与实验研究

2.1 PFN-Marx 装置结构

为了满足紧凑化需求, PFN-Marx 设计为同轴结构, 圆环形高压脉冲产生模块高度为 55 mm、直径为 360 mm, 充放电隔离电感置于圆环内部。由于采用正负极性充电, 1 个高压脉冲产生模块仅需 1 个放电开关, 11 个模块层叠时相邻模块的半环形电极板之间通过铜柱和螺钉连接, 如图 4 所示。在第一个开关中设置触发电极, 形成三电极触发气体开关, 通过对触发器与高压充电电源同步控制, 实现 PFN-Marx 的重频工作。圆柱形 PFN-Marx 功率源设计总长 665 mm、直径 410 mm, 内部采用 SF₆ 气体绝缘。

2.2 PFN 脉冲产生实验

单个半环形带状 PFN 实验布局如图 5(a) 所示, 以 4.3 Ω 固体电阻作为负载, 通过电阻分压器监测负载电压, PFN 下环形电极板充正电压, 上环形电极板通过负载电阻接地。当充电 55 kV 时, 测得负载电压(U)波形如图 5(b) 所示, 峰值 26.7 kV, 脉冲半高宽 108 ns、脉冲前沿 16 ns, 平顶(90%~90%)宽度约 73ns、脉冲后沿(90%~10%)约 59 ns。由于实验中负载端接线电感较大以及分压器本身响应较慢, 且负载电阻通过上下铜板并联, 有一定的阻容特性, 使得测试波形脉冲前沿较缓。进一步对 PFN 高压脉冲产生模块进行了实验测试, 采用 8.5 Ω 电阻作为负载, 充电 51 kV 时获得负载电压峰值 49.6 kV、脉冲半高宽 108 ns、前沿 14 ns, 平顶(90%~90%)宽度约 74 ns、脉冲后沿(90%~10%)约 60 ns。

2.3 PFN-Marx 功率源实验

PFN-Marx 功率源实验负载采用多个耐压 50 kV 的固体电阻组合而成, 阻值为 84 Ω, 封装在负载腔体中, 充入 SF₆ 气体进行高压绝缘, 实验装置如图 6(a) 所示。为了满足 ns 级快前沿脉冲高电压测试需求, 在功率源输出端设

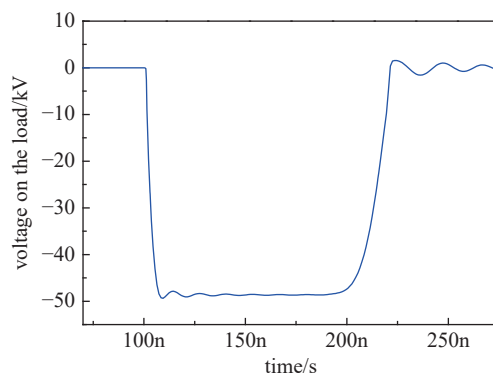


Fig. 3 Simulation waveform of output voltage of high-voltage pulse generation module

图 3 高压脉冲产生模块输出电压仿真波形

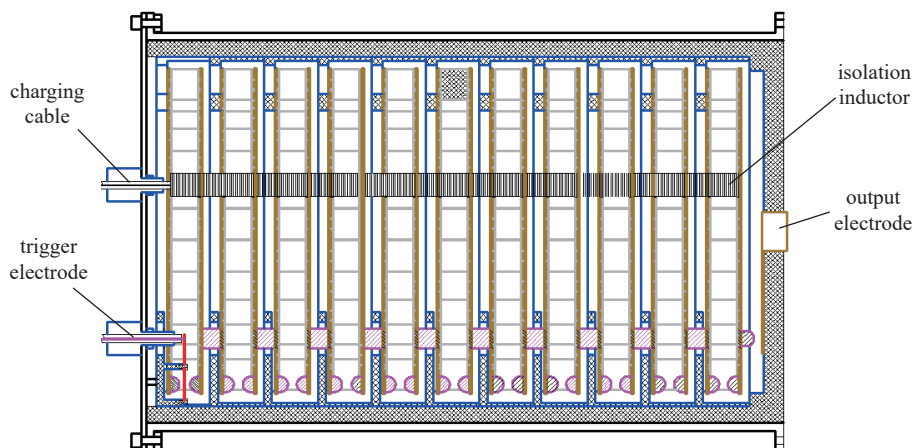


Fig. 4 Design structure of modular 22-stage coaxial PFN-Marx pulse power source

图 4 22 级同轴 PFN-Marx 脉冲功率源模块化设计结构

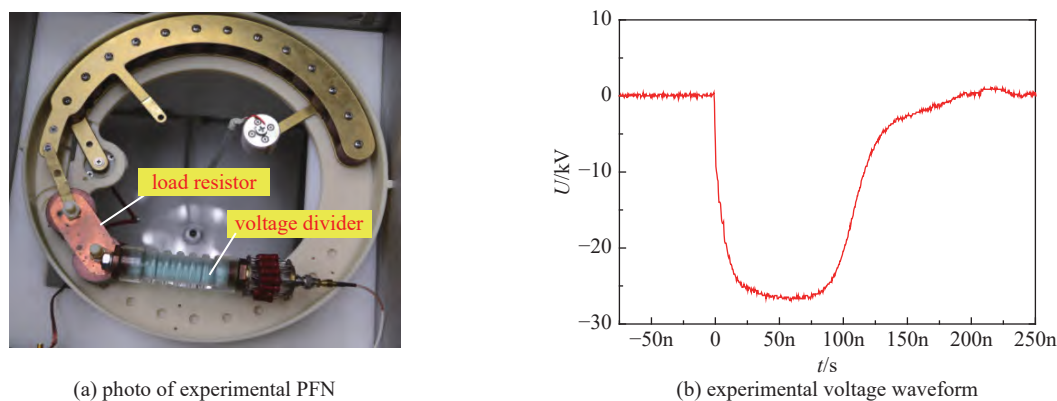


Fig. 5 Photo of PFN and experimental output voltage waveform

图5 PFN实验照片及输出电压波形

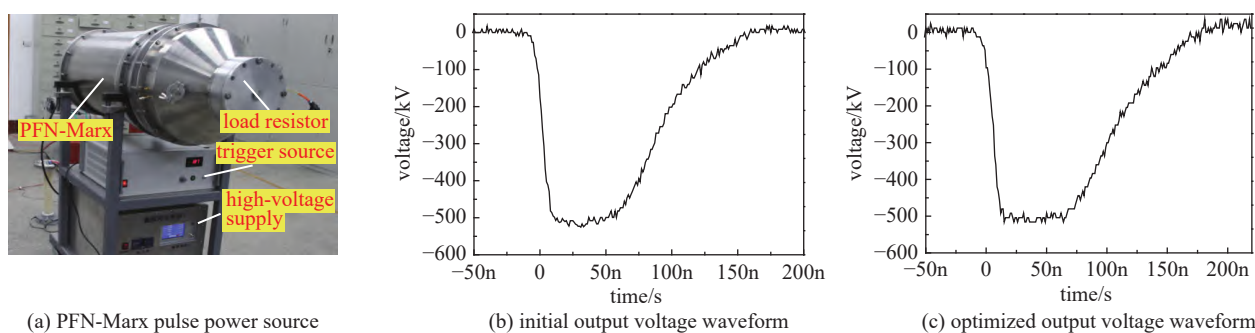


Fig. 6 PFN-Marx pulse power source experimental setup and load voltage waveform

图6 PFN-Marx功率源实验装置及负载电压实验波形

计了基于电容分压原理的 V-dot 探头^[18] 对负载电压进行测试, 通过快响应电流线圈(量程 2 kA、响应时间 2 ns)在低电压工作条件下对 V-dot 探头进行标定。在功率源第一轮实验中 22 级 PFN-Marx 充电 48 kV 实验测得负载电压峰值 525 kV, 脉冲前沿 13 ns、半高宽 92 ns、平顶(90%~90%)宽度 54 ns, 脉冲后沿(90%~10%)约 76 ns, 波形如图 6(b) 所示。对比单 PFN 脉冲形成单元输出波形发现, 平顶减少了 19 ns、半高宽缩短 16 ns, 同时脉冲后沿增加了 17 ns, 即减少的平顶几乎都变成了缓慢下降的脉冲后沿。

从脉冲形成线的波过程分析, 当相邻形成线存在较强的电磁耦合时, 原传输线中部分电磁能通过耦合方式释放, 电磁能量释放过程需要的时间由脉冲形成线电长度和耦合通道电长度及波反射等因素共同决定, 输出脉冲由形成线产生的电脉冲和电磁耦合产生的电脉冲叠加而成。当耦合通道电长度较短且释放能量较少时, 有可能出现输出脉冲幅值增大、脉冲半高宽缩短而底宽无明显变化。由此判断, 阻断或减弱相邻 PFN 模块的电磁耦合是解决脉宽缩短问题的关键所在。

根据电磁耦合的一般规律, 距离越近耦合越强、面积越大耦合的通道越多, 减小相互作用的面积和增大距离是降低电磁耦合的有效途径。因此, 在功率源输出性能优化过程中, 尝试适当减小 PFN 半环形电极的宽度和增加相邻模块的间距, 达到减弱相邻模块间电磁耦合同时稍微提高 PFN 模块阻抗的目的。优化后在不改变脉冲功率源整体尺寸的基础上, 将充电电压提高至 51 kV, 相同负载上获得峰值电压 516 kV, 脉冲前沿 11 ns, 脉冲半高宽 104 ns, 平顶(90%~90%)宽度 63 ns, 纹波系数 2.4%, 实验波形见图 6(c)。实验结果表明, 优化后 PFN-Marx 输出电压脉冲前沿减少了 3 ns, 脉冲宽度增加了 12 ns, 脉冲平顶宽度增加了 9 ns, 具有更好的方波特性, 波形品质得到明显改善。

在 PFN-Marx 模块优化后, 以固体电阻为负载进行了重频验证实验。重频充电采用自行研制的正负双极性大功率直流电源^[17], 尺寸约 610 mm(长)×420 mm(宽)×400 mm(高), 质量不超过 65 kg。该电源采用恒流谐振大功率高压直流充电技术由市电供电, 整流滤波后经过逆变全桥转换为高频交流电压, 通过升压变压器和 LC 谐振电路升压, 再经硅堆整流变换为直流高压对 PFN 模块电容充电, 实验调试中对 PFN-Marx 重频 20 Hz 充电波形如图 7 所示。

PFN-Marx 脉冲功率源全系统重频工作调试完成后, 实现了连续 15s、20 Hz 重频运行, 在上述固体电阻(阻值 84 Ω)负载上输出电压大于 500 kV、电流大于 6 kA, 实验波形如图 8 所示, 其中负载电流采用自制的磁探针 B-dot^[19] 进行测量。实验结果表明, 本文研制的脉冲功率源重频工作稳定, 输出脉冲波形一致, 幅值变化小于 2%。

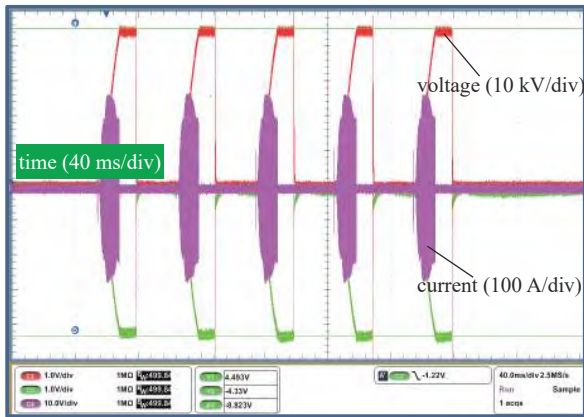


Fig. 7 20 Hz repetitive pulses recharging experiment waveforms

图 7 20 Hz 重频充电实验波形

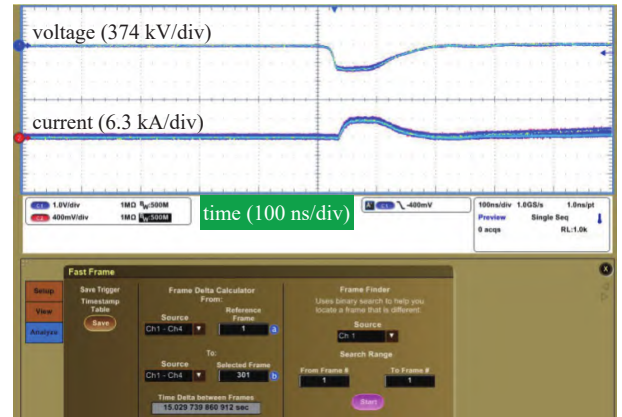


Fig. 8 20 Hz repetitive pulses experiment waveforms in 15 s

图 8 20 Hz 连续 15 s 重频工作输出波形

3 结论

本文针对高功率相对论磁控管实验需求, 为了实现方波脉冲输出且结构紧凑, 设计并研制了一套同轴紧凑型 PFN-Marx 脉冲功率源。提出了基于陶瓷电容器储能的一种半环形 PFN 脉冲形成单元设计方案, 结构简单、阻抗和脉冲宽度灵活可调, 具有较好的方波特性; 提出了包含两个脉冲形成单元的圆环形高压脉冲产生模块设计方案, 结构紧凑, 可多模块层叠使用。基于以上设计研制了总长 665 mm、直径 410 mm 的紧凑型脉冲功率源, 实验中发现多模块集成后输出脉冲宽度缩短。通过对脉冲形成的波过程分析, 解释了造成脉冲缩短的内在原因, 并提出了解决措施, 为 PFN-Marx 功率源阻抗调节和波形优化提供了一种实用的技术手段。优化后研制的 PFN-Marx 脉冲功率源在 84Ω 电阻负载上输出电压峰值 516 kV, 脉冲前沿 11 ns、半高宽 104 ns、平顶 63 ns、纹波系数 2.4%, 具有较好的方波特性, 并实现了 20 Hz、连续 15 s 稳定重频工作, 输出波形完全一致。

参考文献:

- [1] 何朝雄, 李天明, 胡标. 相对论磁控管技术及其应用[J]. 真空电子技术, 2016(6): 1-6. (He Chaoyong, Li Tianming, Hu Biao. Technology and applications of relativistic magnetrons[J]. Vacuum Electronics, 2016(6): 1-6)
- [2] Lei Lurong, Qin Fen, Xu Sha, et al. Preliminary experimental investigation of a compact high-efficiency relativistic magnetron with low guiding magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 209-213.
- [3] 秦奋, 张勇, 鞠炳全, 等. L 波段相对论磁控管长时间稳定运行实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 073002. (Qin Fen, Zhang Yong, Ju Bingquan, et al. Experimental investigation of L-band relativistic magnetron at long-term steady operation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 073002)
- [4] 刘则阳, 樊玉伟, 徐浩东, 等. L 波段相对论磁控管的初步试验[J]. 真空电子技术, 2022(3): 23-26. (Liu Zeyang, Fan Yuwei, Xu Haodong, et al. Preliminary experiment of an L-band relativistic magnetron[J]. Vacuum Electronics, 2022(3): 23-26)
- [5] 谢霖桑, 贾伟, 郭帆, 等. 百千伏紧凑型 Marx 发生器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 045016. (Xie Linshan, Jia Wei, Guo Fan, et al. Development of an 100 kV compact Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 045016)
- [6] 伍友成, 何洪, 戴文峰, 等. 基于快 Marx 发生器的紧凑型重频脉冲驱动源[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4032-4038. (Wu Youcheng, He Yang, Dai Wenfeng, et al. Compact repetitive pulsed power system based on fast Marx generator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4032-4038)
- [7] 伍友成, 杨宇, 何洪, 等. 重复频率低阻抗紧凑型 Marx 脉冲功率源[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 075002. (Wu Youcheng, Yang Yu, He Yang, et al. Compact repetitive Marx generator with low impedance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 075002)
- [8] 宋法伦, 李飞, 龚海涛, 等. 高功率重复频率 Marx 型脉冲功率源小型化技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 020201. (Song Falun, Li Fei, Gong Haitao, et al. Research progress on miniaturization of high power repetition frequency Marx type pulse power source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 020201)
- [9] 刘宏伟. 紧凑型低阻抗方波 Marx 发生器技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017. (Liu Hongwei. Investigation of a compact low impedance Marx generator with quasi rectangular pulse output[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2017)
- [10] 李志强, 杨建华, 张建德, 等. 固态化脉冲形成网络 Marx 脉冲发生器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 065004. (Li Zhiqiang, Yang Jianhua, Zhang Jiande, et al. Solid state pulsed forming network Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 065004)
- [11] 王朋, 罗敏, 康强, 等. 紧凑型脉冲功率驱动源设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 025005. (Wang Peng, Luo Min, Kang Qiang, et al. Design and experimental study of compact pulse power driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 025005)
- [12] Zhang Haoran, Shu Ting, Li Zhiqiang, et al. A compact 4 GW pulse generator based on pulse forming network-Marx for high-power microwave application[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92: 064707.

- [13] Zhang Haoran, Shu Ting, Liu Shifei, et al. A compact modular 5 GW pulse PFN-Marx generator for driving HPM source[J]. *Electronics*, 2021, 10: 545.
- [14] 郝世荣, 谢卫平, 丁伯南, 等. Marx 发生器驱动的电感储能型脉冲功率源[J]. *高电压技术*, 2009, 35(3): 657-660. (Hao Shirong, Xie Weiping, Ding Bonan, et al. Inductive-energy-storage pulsed power source energized by a Marx generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 657-660)
- [15] Hao Shirong, Xie Weiping, Wu Youcheng, et al. Inductive-energy-storage pulsed power source based on electro-exploding wire opening switch[C]//2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). 2013.
- [16] 孙奇志, 刘伟, 刘正芬, 等. 紧凑型爆炸脉冲电源[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 782-786. (Sun Qizhi, Liu Wei, Liu Zhengfen, et al. Compact explosive pulsed power source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 782-786)
- [17] 冯传均, 伍友成, 何洪, 等. 正负双极性重复频率充电电源研制[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 035001. (Feng Chuanjun, Wu Youcheng, He Yang, et al. Development of a bipolar repetitive high voltage power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 035001)
- [18] 卫兵, 顾元朝, 周荣国, 等. 真空磁绝缘线 B-dot 电流探测器的研制[J]. *高电压技术*, 2007, 33(9): 188-191. (Wei Bing, Gu Yuanchao, Zhou Rongguo, et al. Design of B-dot monitor in magnetically insulated transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(9): 188-191)
- [19] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计 and 应用[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 39-43. (Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high voltage pulse measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12): 39-43)