



·脉冲功率技术·综述·

高功率紧凑 PFN-Marx 发生器研究进展综述*

刘世飞, 张建德, 张自成

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘要: PFN-Marx 发生器可同时实现升压和脉冲形成, 具有紧凑的基因。特别是近年来脉冲储能技术的发展, 使得直接利用 PFN-Marx 发生器驱动各类负载成为现实, 因而 PFN-Marx 发生器逐渐成为国内外研究热点。对国内外的高功率紧凑 PFN-Marx 发生器的研究进展进行了系统介绍, 评述其参数和结构特点。通过总结, 从时间发展历程上看, PFN-Marx 发生器采用高储能密度器件, 装置的储能密度水平在不断地提高, 尺寸紧凑化水平也在提高; 在追求紧凑化的手段上, PFN-Marx 发生器的空间结构的优化设计效果优于 PFN 网络拓扑参数的优化设计; PFN-Marx 发生器采用波形优化方法具有较明显的收益, 可有效降低装置紧凑化带来级间分布参数更强耦合的负面影响。同时论文探讨了 PFN-Marx 发生器的发展趋势, 为 PFN-Marx 发生器的研究和技术路线探索提供参考和依据。

关键词: 高功率; 脉冲形成网络; PFN-Marx 发生器; 高储能密度

中图分类号: TM214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210483

Review of high power compact pulse forming network-Marx generators

Liu Shifei, Zhang Jiande, Zhang Zicheng

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The pulse forming network (PFN)-Marx generator can realize both integration of pulse modulation and pulse voltage accumulation, exhibiting a the natural “gene” of compactness. In recent years, the pulsed energy storage technology has been developing rapidly, which makes it a reality to use PFN-Marx generators to drive various loads directly. The PFN-Marx generator has gradually become a worldwide research focus. The research progress of high-power compact PFN-Marx generators are systematically introduced in this paper. In summary, judging from the development over time, PFN-Marx generators adopt high-energy-density components and thus improve the energy density level themselves, which makes the generator more and more compact. In the pursuit of compactness, the effect of optimal design of PFN-Marx generator spatial structure is better than optimal design of PFN network topology parameters. The waveform optimization method of the PFN-Marx generator has obvious benefits, which can effectively reduce the negative impact of stray parameters strongly coupling between stages caused by small size of generator. In the meanwhile, this paper discusses the development trend of PFN-Marx generator.

Key words: high power, pulse forming network, PFN-Marx generator, high energy storage density

脉冲功率技术的重要发展方向是高功率、长脉冲、紧凑化、高稳定可靠^[1-2]。脉冲形成网络型 (PFN)-Marx 发生器可同时实现升压和脉冲形成, 具有紧凑的基因, 逐渐成为国内外研究热点^[3-6], 并且可以在实现较长脉冲输出的同时保持紧凑化、模块化和固态化^[5, 7-8]。特别是近年来陶瓷电容、云母电容工艺水平的发展, 耐压能力和储能密度大大提升, 自身电感也逐渐减小, 这为 PFN-Marx 高平均功率的进一步提升提供了空间, 使得尺寸紧凑、微秒准方波脉冲输出的 PFN-Marx 发生器成为可能^[8-11]。本文将对国内外的高功率紧凑 PFN-Marx 发生器的研究进展进行系统介绍, 评述其参数和结构特点。通过对比、讨论, 总结其发展趋势, 为 PFN-Marx 发生器的研究和技术路线探

* 收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677190, 51707199); 湖南省自然科学基金项目(2017JJ1005)

联系方式: 刘世飞, liushifei16@nudt.edu.cn。

通信作者: 张建德, zhangjiande@nudt.edu.cn。

索提供参考和依据。

1 Marx 发生器技术路线

Marx 发生器在脉冲调制方式中有多种技术路线。传统的 Marx 发生器仅能产生双指数波形,具有快上升前沿和长拖尾,而大部分应用场合希望发生器能够直接输出方波脉冲,这使得具有方波脉冲输出的 Marx 发生器技术快速发展^[12-14]。采用 Marx 发生器输出方波脉冲,比较常见的脉冲调制方式有采用脉冲形成线型的方法、波形叠加或调制的方法,以及脉冲形成网络型的方法。其典型分别有:英国思克莱德大学在 2000 年采用 50 Ω 同轴高压电缆构建了一台输出 87.5 kV 的脉冲形成线型 Marx 发生器^[15-16];美国 Sci-Eng Solutions 公司在 2006 年采用具有脉冲形成功能盘状传输线作为储能单元进行波形叠加,该脉冲形成线型 Marx 发生器实现 500 kV,脉宽 200 ns 的脉冲输出^[17];美国密苏里州哥伦比亚大学于 2005 年在 Marx 发生器上连接一个 LC 回路^[18-20],构建一个波形调制型 Marx 发生器使其产生方波脉冲,实现了 1.5 MV/1 μ s 的电脉冲输出;国防科技大学对此也有研究^[21]。

典型的脉冲形成网络型 Marx 发生器技术方案的特点为,将 PFN 作为 Marx 发生器的单元以并联充电串联放电的方式构成脉冲形成网络型 Marx 发生器,即为 PFN-Marx 发生器^[4-5]。PFN-Marx 发生器兼具 Marx 发生器升压和 PFN 调制的功能,可以实现更高电压(可达 MV 级)下方波特性较好的脉冲输出,并且能够实现长脉冲输出。在文献 [4] 中的装置就具有 PFN-Marx 发生器的典型电路结构,如图 1 所示。红色虚线标注为单个 PFN,红色实线标注为气体开关,多个 PFN 通过气体开关串联放电即组成了 PFN-Marx 发生器。

2 PFN-Marx 发生器国内外研究现状

为了方便对比研究,在论述 PFN-Marx 发生器研究现状时,按照其输出的脉冲宽度来划分类别。通过这样的划分,可以使得后续装置的能量体积比计算更加明了,使文章的脉络上更加清晰。具体分类如下:长脉冲为输出脉宽 400 ns 左右或以上,宽脉冲在 200~300 ns 之间,短脉冲为 100 ns 左右。若装置的输出脉宽可调,则按照其最大的脉宽来对装置的类别进行划分。近年来,国内外在这 3 种脉宽尺度的 PFN-Marx 发生器研究上均取得了一定的研究成果。

2.1 长脉冲 PFN-Marx 发生器的研究进展

加拿大国家科研委员会(NRCC)在 2001 年研制了一台 PFN-Marx 发生器,薄膜电容置于装置底部,上部是气体开关,如图 2 所示^[11]。该 PFN-Marx 发生器包含 8 级,采用了 Maxwell 实验室的 S-type 型 PFN 结构,波形调制较好,气体开关用紫外线照射以减少抖动,采用了陡化电容以减少输出脉冲的上升沿。其输出脉冲可以达到 300 kV,上升沿是 15 ns,阻抗是 7.5 Ω , 10 Hz 重复频率,如图 3 所示。并且通过后沿翘断开关可以调节输出的脉冲宽度使其在 100~500 ns 之间,按照其最大输出脉宽和幅值计算得到的储能密度水平在 2 J/L 左

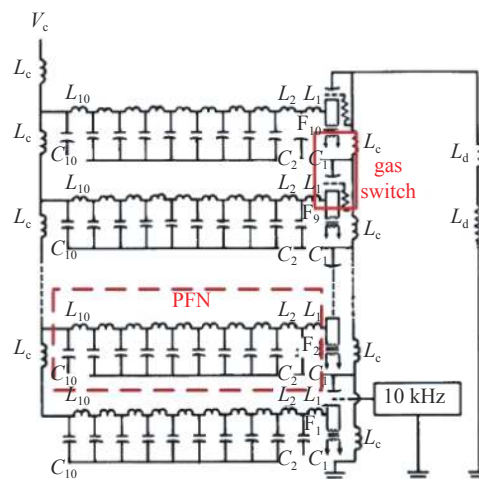


Fig. 1 Typical circuit diagram of PFN-Marx generator
图 1 PFN-Marx 发生器典型电路图

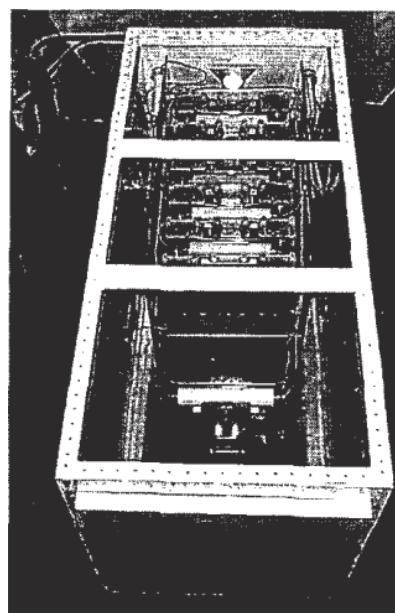


Fig. 2 NRCC setup diagram of PFN-Marx generator
图 2 NRCC PFN-Marx 发生器装置图

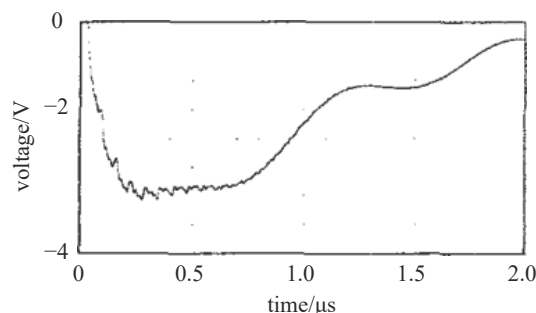


Fig. 3 Waveform of output pulse
图 3 输出电压波形图

右。该单位之前研制的 32 级 PFN-Marx 也采用类似的开关设置方案^[22], 采用陶瓷电容, 其输出电压范围在 200~650 kV, 负载阻抗范围为 300~700 Ω , 脉冲宽度 400~500 ns。

美国 Applied Energetics 公司 Richard J. Adler 人在 2009 年设计了一台模块化 PFN-Marx 发生器, 如图 4 所示^[23]。PFN-Marx 发生器包含 14 级 PFN, PFN 采用 type C 结构, 总阻抗为 50 Ω 。当 PFN-Marx 发生器充电 ± 40 kV (80 kV) 的时候, 在 50 Ω 的负载上可以输出 500 kV/11 kA/5 kJ 的电压方波, 5 Hz 运行数 s。脉冲平顶 1 μ s, 上升沿小于 200 ns, 下降沿小于 300 ns, 储能密度水平在 2 J/L。典型的输出波形图如图 5 所示。整体装置采用的是油绝缘, 体积和质量较大。装置输出波形质量较好, 原因有二, 其一是各级 PFN 分别采用空芯变压器充电, 减少了充电环节附带的杂散电感电容。其二是 PFN 采用吉列曼 type C 结构, 方波特性好。

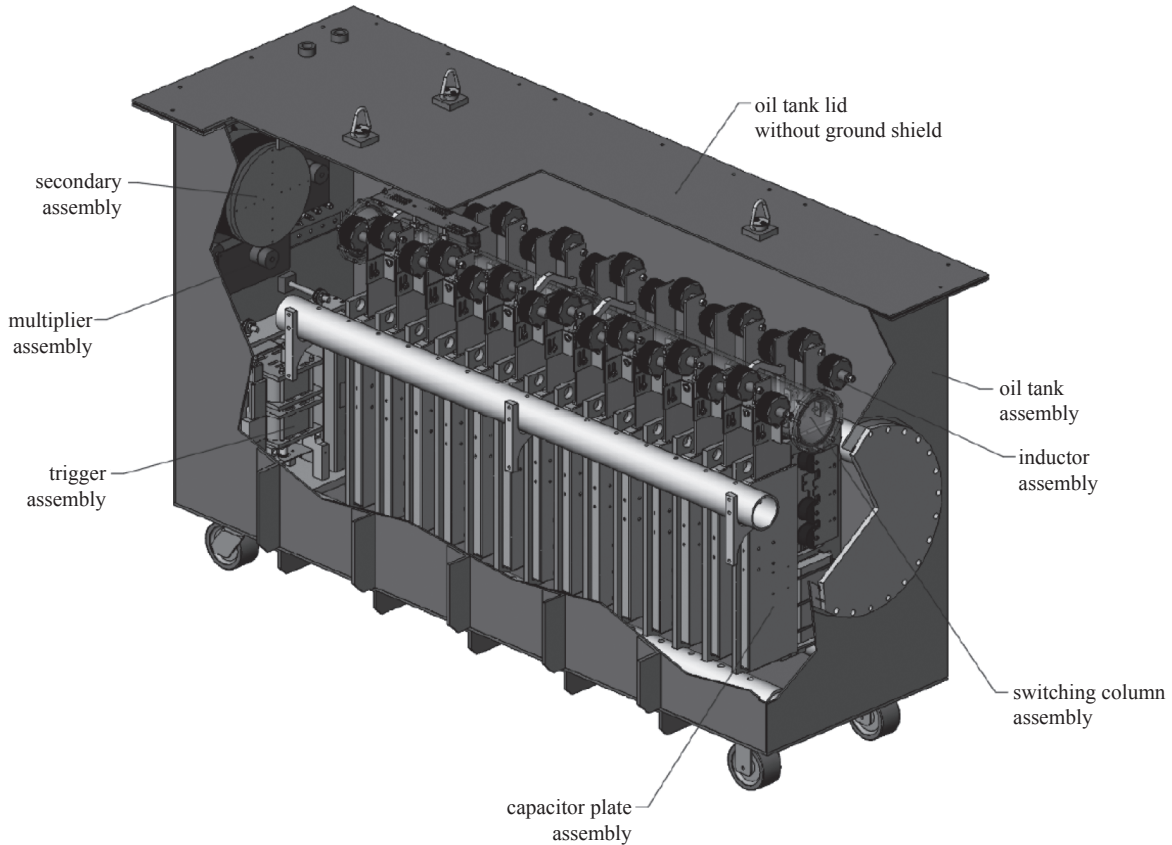


Fig. 4 AE setup diagram of PFN-Marx generator

图 4 AE PFN-Marx 发生器装置图

2.2 宽脉冲 PFN-Marx 发生器的研究进展

美国德克萨斯理工大学 (TTU) 在近几年的工作中, 主要研究 PFN-Marx 发生器直接驱动虚阴极振荡器, 脉宽较短并且重复频率较高, 其脉冲调制方式和触发方式值得参考^[22-32]。TTU 在 2005 年研制了一台紧凑重复频率 PFN-Marx 发生器直接驱动虚阴极振荡器, 如图 6 所示^[22]。该发生器为 25 级, 单级排布结构为圆盘形, 每级为 4 个云母电容器并联, 火花开关在圆盘中心, 如图 7 所示。PFN-Marx 发生器充电 21 kV 时, 可以实现 250 kV/500 J/10 Hz 重复频率输出, 输出电压上升沿是 50 ns, 脉宽约 200 ns。装置尺寸直径 30 cm, 长度 70 cm。储能密度在 10 J/L 的水平。TTU 在 2014 年研制一台 10 级 PFN-Marx 发生器驱动虚阴极振荡器, 在 70 Ω 匹配负载上可以实现脉宽 50 ns 的 300 kV/42 J/100 Hz 重复频率输出, 储能密度水平为 1.2 J/L^[29]。

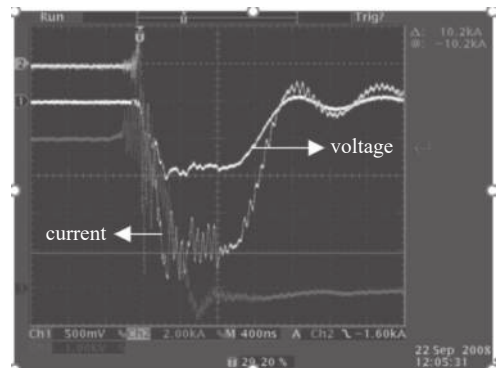


Fig. 5 Waveform of output pulse

图 5 输出电压波形图

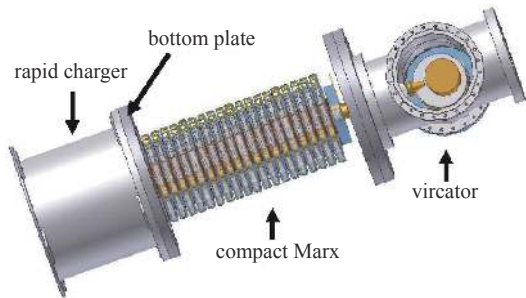


Fig. 6 TTU setup diagram of PFN-Marx generator
图6 TTU PFN-Marx 发生器装置图

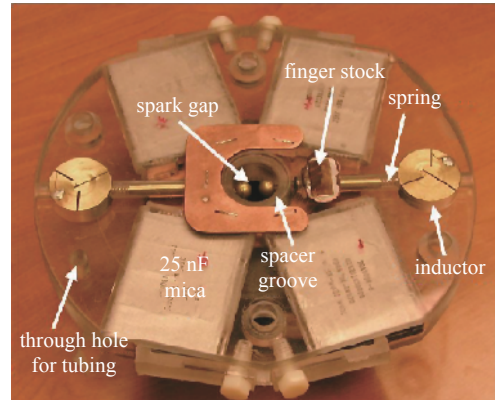


Fig. 7 Structural diagram of a PFN
图7 PFN 结构图

韩国浦项加速器实验室 S. S. Park 在 2008 年研制了一台 PFN-Marx 发生器, 如图 8 所示^[33]。PFN-Marx 发生器包含 33 级 PFN, 每一级的 PFN 由 16 个 2 nF 的陶瓷电容组成, 单级 PFN 特性阻抗为 3.5 Ω 。该装置直径是 500 mm, 长度 3000 mm。该装置充电为 35 kV 时, 可在 131 Ω 的水负载上产生电压 540 kV、脉宽 250 ns 的高压输出。单脉冲能量为 550 J, 储能密度水平在 1 J/L。输出脉冲如图 9 所示。

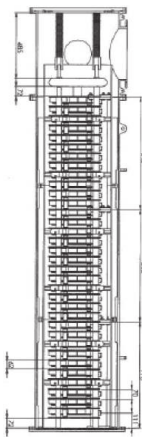


Fig. 8 PAL setup diagram of PFN-Marx generator
图8 PAL PFN-Marx 发生器装置图

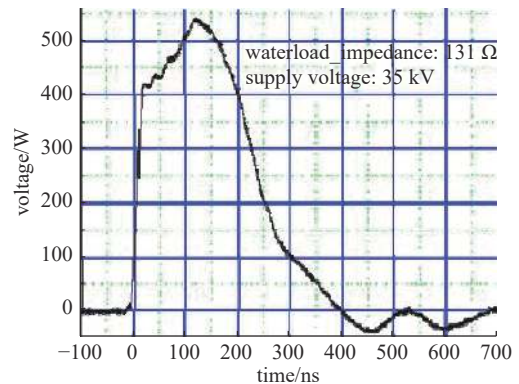


Fig. 9 Waveform of output pulse
图9 输出电压波形图

美国应用物理电子有限公司 (APEL) 开发了一系列的陡化前沿 PFN-Marx 发生器产品, 可以应用于各种领域^[34-37]。其主要技术特点是 PFN-Marx 发生器输出端添加陡化电容, 使得波形上升沿表现较好。APEL 2011 年研制了一台直立型 PFN-Marx 发生器^[37]。该 PFN-Marx 发生器包含 8 级子 Marx 发生器, 该技术方案采用的是多发生器组成单级 PFN 的设计, 其一个子 Marx 可以作为一个“电容”, 多个“电容”组成单级 PFN, 是先升压后整波形的技术路线。采用 11 nF 的陡化电容来陡化输出前沿和采用磁开关来减少输出后延, 如图 10 所示。其单级结构是 20 级的子 Marx 发生器, 每一个子 Marx 发生器可以单独工作。其 PFN-Marx 发生器的特性阻抗是 25 Ω , 可以输出一个 350 kV, 脉宽在 180~220 ns 之间, 上升沿小于 40 ns, 输出波形如图 11 所示。该装置储能密度水平在 15.5 J/L。该技术难点一是不同子 Marx 的首触发不容易同步和触发存在抖动, 二是子 Marx 发生器必须很好地相互独立以防止误触发。

中国工程物理研究院采用双电容结构储能与脉冲形成一体化模块, 研制了一系列可靠性高且易于维护的模块化 PFN-Marx 发生器^[38-39], 如图 12 所示。2017 年研制的 PFN-Marx 发生器型高功率微波驱动源^[40] 输出脉冲电压约 980 kV、功率约 19.2 GW、脉冲宽度约 180 ns; 在重复频率 30 Hz 条件下, 输出功率约 16 GW, 可连续运行 10 s; 该系统体积约 2.0 m³, 质量约 2 t, 储能水平在 3 J/L, 如图 13 所示。相比具有相同技术指标的以往高功率微波驱动源, 该 PFN-Marx 发生器体积重量约缩减至原技术方案的 1/5。气体开关采用环形轨道式电极结构设计, 采用了平面触发极设计以减少烧蚀, 提高了整体开关的寿命至 10 万次, 并且引入气体循环, 降低开关输出抖动至 3 ns。该 PFN-Marx 发生器中的 PFN 为合成的一体化模块, 本身就自带合理的电容电感参数, 可以输出一定平顶的脉冲。

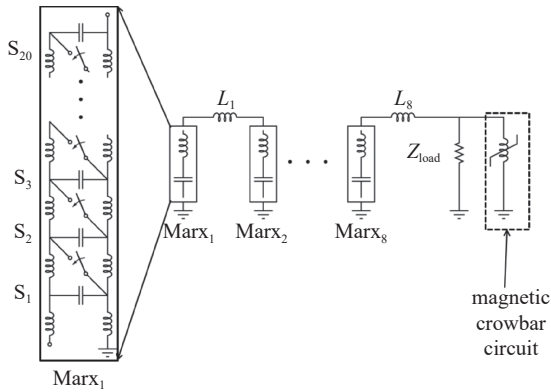


Fig. 10 APELC circuit diagram of PFN-Marx generator

图 10 APELC PFN-Marx 发生器电路图

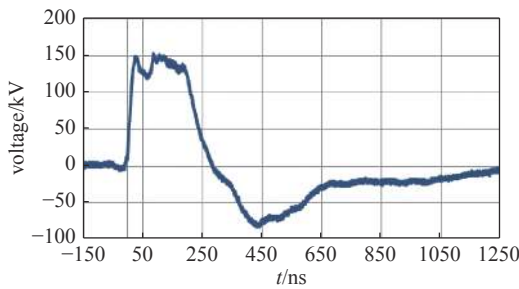


Fig. 11 Waveform of output pulse

图 11 输出电压波形图

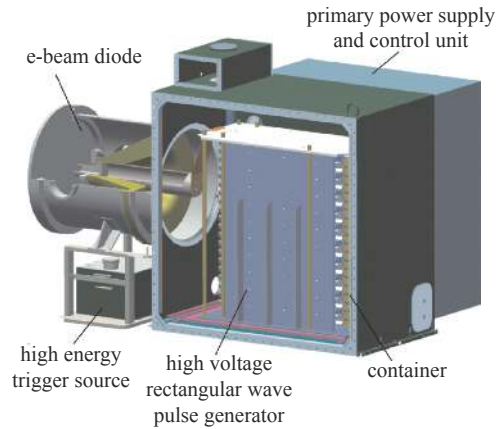


Fig. 12 CAEP setup diagram of PFN-Marx generator

图 12 中国工程物理研究院 PFN-Marx 发生器装置图

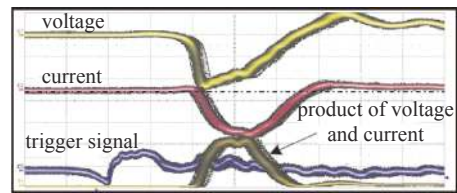


Fig. 13 Waveform of output pulse

图 13 输出电压波形图

2.3 短脉冲 PFN-Marx 发生器的研究进展

印度巴哈哈原子研究所在 2012 年提出一种具有陡化电容和开关的 PFN-Marx 发生器^[41]。20 级同轴结构的 PFN-Marx 发生器，每一级 PFN 的节电容是 1.2 nF 的陶瓷电容，节电感为 112.58 nH。充电电压是 30 kV，其整体实物图如图 14 所示。利用了陡化开关和陡化电容 360 pF，实现了对脉冲前沿的压缩，如图 15 所示。PFN-Marx 发生器的阻抗是 220 Ω。电压输出可以达到 300 kV，脉宽为 150 ns，上升沿为 4~5 ns，单脉冲能量是 64 J，储能密度在 0.5 J/L 的水平。采用陡化电容前后，输出电压电流提升非常明显，如图 16 和图 17 所示。

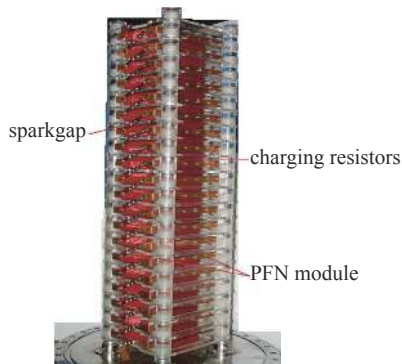


Fig. 14 Indian setup diagram of PFN-Marx generator

图 14 印度 PFN-Marx 发生器装置图

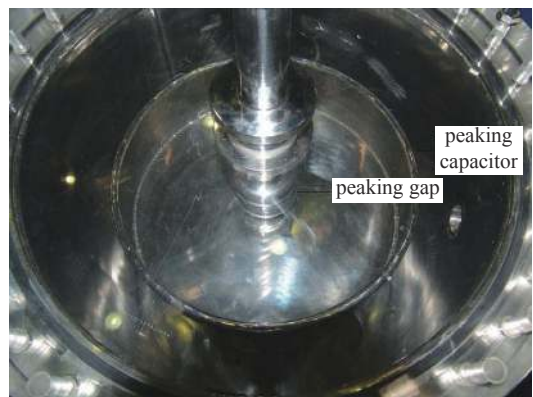


Fig. 15 Peaking gap and the peaking capacitor

图 15 陡化开关及陡化电容

法国原子能源部(CEAEA)在 2018 年研制了一台 400 kV 的 PFN-Marx 发生器，来驱动 X 波段相对论性返波振荡器的电子束二极管，如图 18 所示^[42]。该 PFN-Marx 发生器为 16 个级，可以在 100 Ω 的阻抗上输出 400 kV 脉宽为 85 ns 的脉冲，上升时间不到 5 ns，单脉冲的能量为 136 J。典型的输出波形图如图 19 所示。该 PFN-Marx 发生器采用了“之”字型结构，是基于在带状线内连接的六个陶瓷电容器(2.1 nF/45 kV)。16 个 PFN 级放置在直径为 360 mm 的气压容器中，长 650 mm。对于电阻负载和 X 波段相对论性返波振荡器的电子束二极管，重复频率模式可以在

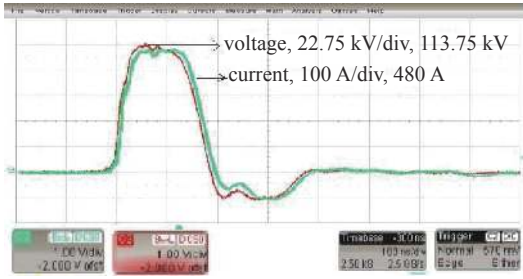


Fig. 16 Waveform of output pulse without peaking capacitor

图 16 无陡化电容输出电压波形

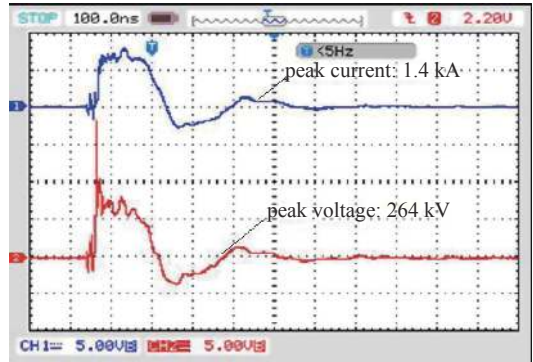


Fig. 17 Waveform of output pulse with peaking capacitor

图 17 采用陡化电容输出电压波形

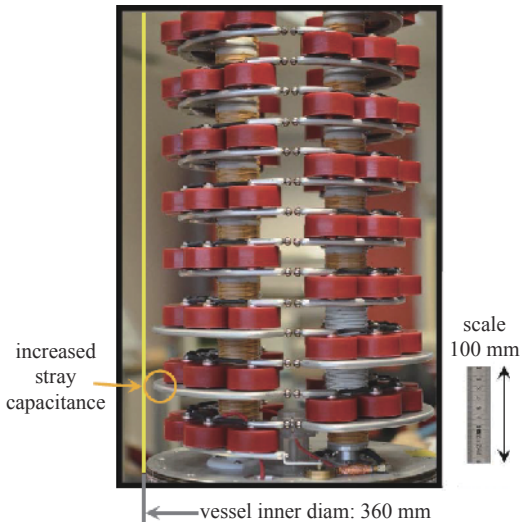


Fig. 18 CEAEA setup diagram of PFN-Marx generator

图 18 CEAEA PFN-Marx 发生器装置图

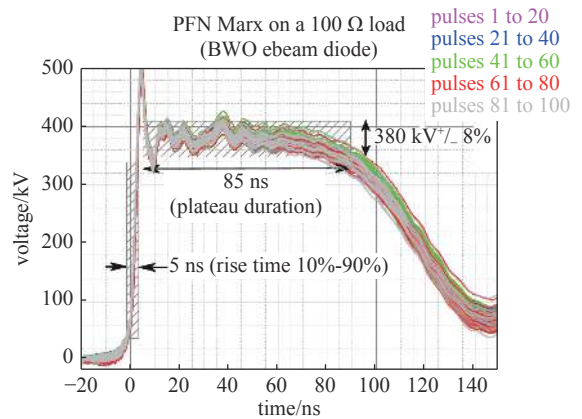


Fig. 19 Waveform of output pulse

图 19 输出电压波形图

100 Hz 的脉冲重复频率下持续工作 10 s 的时间。整体储能密度在 2 J/L 的水平。这种空间排布结构使得整体结构紧凑,外壳更加靠近 PFN 的传输线,相对减少了 PFN-Marx 发生器本身的对地电感,进而减少输出脉冲上升沿。

中国工程物理研究院刘宏伟在 2017 年研制了一个 20 GW 的 PFN-Marx 发生器^[43]。与传统的 PFN-Marx 发生器不同的是,该 PFN-Marx 发生器基于傅里叶理论使用了不同容值的电容器。该 PFN-Marx 发生器包含 16 个 PFN 模块,如图 20 所示。每个模块包括 2 个 27 nF 薄膜电容器,4 个 1.5 nF 的陶瓷电容器,1 个气体开关,1 个充电电感器,1 个接地电感器,以及为所有部件提供机械支持的绝缘材料,如图 21 所示。PFN-Marx 发生器以 32 ns 的上升时间、120 ns 的脉冲宽度、50 ns 的平顶宽度、550 kV 的电压和 20 GW 的功率实现了脉冲输出,阻抗是 15 Ω,单脉冲能量在 2400 J,如图 22 所示。储能密度的水平在 8 J/L 的水平。

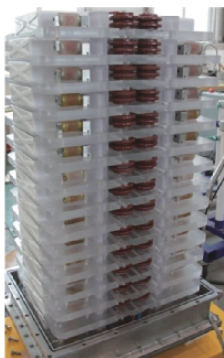


Fig. 20 CAEP setup diagram of PFN-Marx generator

图 20 中国工程物理研究院 PFN-Marx 发生器装置图

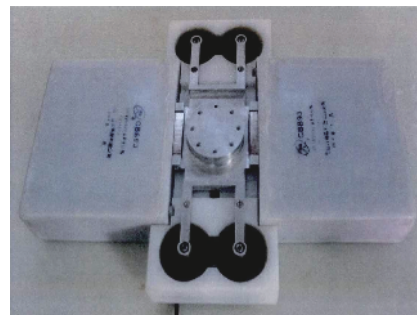


Fig. 21 Structural diagram of a PFN

图 21 PFN 结构图

国防科技大学对基于 T 型脉冲形成网络的 Marx 发生器进行了深入研究,研制了多台 PFN-Marx 发生器,其输出阻抗均较高^[44-45]。国防科技大学于 2016 年研制了一台紧凑重复频率脉冲形成网络 PFN-Marx 发生器,发生器直

径为 480 mm, 长度为 700 mm, 共 22 级, 如图 23 所示。3 组单线阻抗约 5.4Ω 的 PFN 并联组成一级。前期输出电参数为单次 10 GW, 脉冲宽度 100 ns, 前沿 10 ns, 阻抗 40Ω 。重复频率工作时输出功率 7 GW, 频率 5 Hz。后期改进为重复频率 10 Hz, 10 GW, 脉冲宽度 70 ns, 前沿 10 ns, 阻抗 50Ω 。其储能密度在 6 J/L 的水平。其典型的输出波形图如图 24 所示。

国防科技大学 2020 年研制了多台 PFN-Marx 发生器^[46-47]。其中一台 PFN-Marx 发生器由 22 级 PFN 组成, 单级 PFN 是由 3 个并联的云母电容 ($6 \text{ nF}/50 \text{ kV}$) 组成的 T 型网络, 如图 25 所示。该 PFN-Marx 发生器能够在 50Ω 负载上以 30 Hz 的重复频率输出 500 kV、脉冲宽度 90 ns 的脉冲, 功率达到 5 GW, 如图 26 所示。整体装置的储能密度水平为 6.5 J/L , 功率密度为 90 MW/kg 。

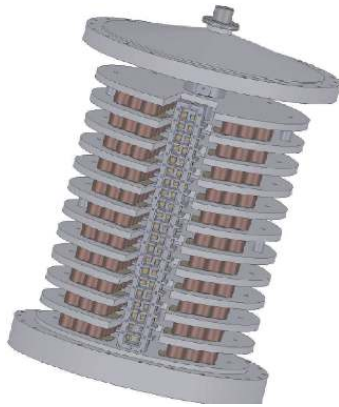


Fig. 23 NUDT setup diagram of PFN-Marx generator
图 23 国防科技大学 PFN-Marx 发生器装置图

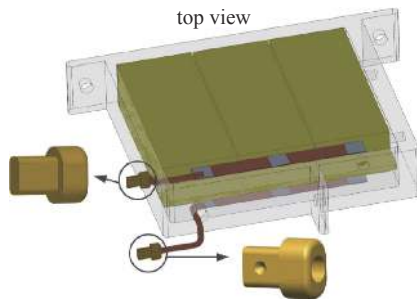


Fig. 25 NUDT structural diagram of a PFN
图 25 国防科技大学 PFN 结构图

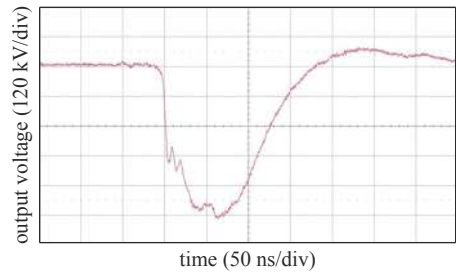


Fig. 22 Waveform of output pulse
图 22 输出电压波形图

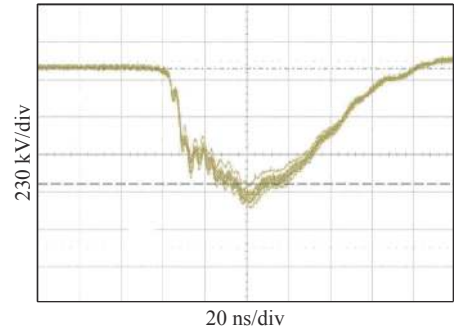


Fig. 24 Waveform of output pulse
图 24 输出电压波形图

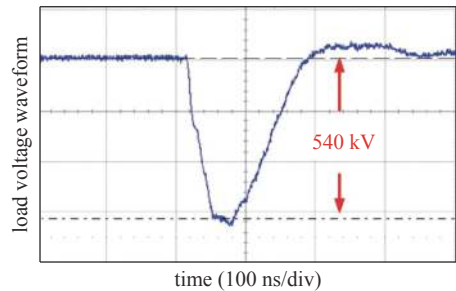


Fig. 26 Waveform of output pulse
图 26 输出电压波形图

3 讨论

上述总结的 PFN-Marx 发生器涵盖国内外近 20 年来的研究进展, 各国在 PFN-Marx 发生器的研究上均取得相当成果。从整体储能水平上看, 得益于脉冲储能技术的不断革新和进步, PFN-Marx 发生器发展迅速, 不断地朝着小型紧凑化高储能密度方向发展。美国在 PFN-Marx 方面达到了世界前列水平, APEL 的系列 PFN-Marx 发生器已形成技术较为成熟的系列产品, 其他各国的研究发展也不断进步, 差距在逐渐缩小。

3.1 装置输出参数

将各脉宽的典型 PFN-Marx 发生器装置输出参数总结起来对比, 如表 1 所示。装置的整体参数用能量体积比 (能量密度) 来衡量比较准确。PFN-Marx 发生器能量密度不断增大, 从最初的 $1 \sim 2 \text{ J/L}$, 逐渐提升到 $3 \sim 4 \text{ J/L}$ 甚至 6 J/L 以上。同时, 低阻抗发生器能量体积比相对较高, 达到 10 J/L 以上, 对于 50Ω 左右的发生器, 能量体积比一般不大于 6 J/L 。

对比输出参数可以发现, 各装置的输出电压范围在 $250 \sim 900 \text{ kV}$, 发生器重复频率范围 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 。频率 20 Hz 左右、脉宽在 $100 \sim 200 \text{ ns}$ 的装置居多, 这是与高功率微波源的发展相适配的。

表 1 典型装置参数对比
Table 1 Comparison of typical device parameters

setup	year	pulse width/ns	output voltage/kV	rising edge/ns	repetition rate/Hz	peak power/GW	impedance/ Ω	energy density/($J \cdot L^{-1}$)
NRCC	2001	500	300	15	10	12	7.5	2
AE	2009	1000	500	<200	5	5	50	2
TTU	2005	200	250	<80	10	3.3	18.5	10
CAEP	2017	180	980	40	30	16	50	3
CEAEA	2018	85	400	<5	100	1.6	100	2
NUDT	2020	90	540	45	30	5	50	6.5

Note: NRCC—National Research Council of Canada, AE—Applied Energetics of USA, TTU—Texas Tech University of USA, CAEP—China Academy of Engineering Physics, CEAEA—Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives of France, NUDT—National University of Defense Technology of China

3.2 结构特点

PFN-Marx 发生器的结构上发展和改进,其最终目标都是为了改善输出波形和提高储能密度。从各类型发生器来看,优化方式多种多样,但又有一定的共性。

PFN 采用网络拓扑参数设计优化。除了采用等电容电感的 T 型网络,还有采用吉列曼网络,还有基于傅里叶变换推导出来的电容电感的网络。T 型网络由于等电容电感的特性,在工程上容易实现,更容易遭到热捧。而吉列曼网络脉冲波形相对于 T 型网络有较好的改善,主要的缺点是所有容器的电容量不一致,有的甚至精确到小数点后两三位,一般很难找到电容量一致的高电压脉冲电容器。若采用定制电容的方式,成本则会比较高,因此一般都会在既定的电容数量上做妥协,如此又导致脉冲波形质量受限。美国 Applied Energetics 公司研制的 PFN-Marx 发生器即是这方面的代表,采用的是吉列曼 type-C 结构。

整体采用结构优化设计。从单级 PFN 的排布方式看,采用环形电容分布,或者采用直排型分布,这样排列紧凑且方便通过引线控制电感量。级间的 PFN 排布,普遍采用直接层叠的方式,能够压缩层间空间,使得装置更加紧凑化,也有采用左右错开的 PFN 排布方式,充分利用横向的空间。装置结构上的优化,是为了降低级间的杂散参数和耦合参数,加快脉冲上升沿而获取更好的方波,其核心是减少对地电感和级间耦合电容。如 NRCC 研制的 PFN-Marx 发生器,通过让火花隙开关靠近接地返回电流路径的金属外壳,并且采用较大横截面积的导线来连接电路元件。法国 CEAEA 研制的 PFN-Marx 发生器,通过采用“之”字型结构的 PFN 排布方式使得级间相互错开,可以有效减少级间电感磁场耦合和电容耦合。还有美国 APELC 采用多发生器的结构,用一个 Marx 发生器来代替一个“超高压电容”,组成一个 PFN,完成先升压后整型的过程。

优化开关拓扑结构。采用气体火花开关,并且采用开关处于同一光路的设计,或者直接采用一体化的开关。这种设计有利于前一级开关导通时产生紫外线对后级开关进行光致预电离,提高整体开关导通一致性,降低导通延时。优化开关电极结构,如 CAEP 研制的装置,其气体开关采用环形轨道式电极结构设计,实现多通道导通,从而减小气体开关导通电感。

采用陡化结构优化脉冲波形。普遍使用陡化电容来提升脉冲上升沿,同时也有采用磁开关来改善脉冲下降沿,或者截断波形来调整需要的脉宽。如印度 Bhabha 研究所,其对比了采用陡化电容前后的波形,输出脉冲上升沿从 25 ns 的提升到不超过 5 ns,提升非常明显。不过将陡化前沿 PFN-Marx 发生器产品化推行最全面的应属美国 APELC 公司,其开发了一系列的陡化前沿 PFN-Marx 发生器产品,可以应用于各种领域^[30-33]。

采用模块化设计。PFN-Marx 发生器天然具有模块化基因,易于模块化设计,将单级 PFN、开关和隔离电感集成起来,或者将开关、电感分别一体化集成,易于组装和检修,对于实现 PFN-Marx 发生器的模块化具有借鉴意义。美国 TTU、中国工程物理研究院研制的装置体现了这一特点。中国工程物理研究院研发的装置,采用双薄膜电容结构储能与脉冲形成一体化模块,该 PFN 为合成的一体化模块,本身就自带电容电感参数,经过适当设计,可以输出满足一定要求的平顶脉冲。

采用高储能密度电容作为储能器件,采用电感作为隔离元件。各国装置普遍采用薄膜电容、陶瓷电容和云母电容。随着技术的发展,高压脉冲电容储能密度提高,也大幅度减小装置的体积。并且除了使用较广泛的陶瓷电容之外,还逐渐有采用更高储能密度的云母电容。使用云母电容的装置,其整体储能密度可以达到 6.5 J/L,如国防科技大学研制的 PFN-Marx 发生器装置。

3.3 发展趋势

总结近年国内外 PFN-Marx 发生器的研究进展,可以看到 PFN-Marx 发生器的发展趋势将朝着以下几个方向发展。

(1) PFN-Marx 发生器向高功率、高重复频率、高稳定可靠的方向发展。提升发生器的输出功率和提高重复运行频率,这是提升和发展 PFN-Marx 发生器性能的必由之路。很多 PFN-Marx 发生器单次运行已经达到了 GW 量级,但在重复频率运行的时候,往往峰值功率会有所降低。解决重复频率运行带来的倍增热累积、电子累积等难题,可以使发生器在高重复频率下稳定可靠高功率地运行。提升初级能源的利用效率,如直接采用成熟高效率的高压电源对 PFN 充电,可以减少脉冲充电时变压器损耗的能量。

(2) 结构上更加合理科学、紧凑化、模块化,进一步提高系统储能密度及功率密度。采用更高性能的脉冲电容能够直接提升 PFN-Marx 发生器的性能。而系统储能密度及功率密度的提高一方面受制于脉冲电容器,另一方面也受制于装置的结构设计。通过对模块结构的优化设计,采用更加合理科学的空间拓扑结构,可以提升发生器的耐压水平,同时也可以提升脉冲波形质量,使输出波形具有更好的前后沿。实现电容开关一体化设计,降低开关电感。结构上目前电容的性能还没完全发挥,进一步挖掘具有更高性能的绝缘和支撑的固态材料,整体采用气体绝缘,能够提高系统储能密度水平。

(3) 探索波形优化方法。在 PFN-Marx 发生器输出端加入陡化电容和磁开关是常用的波形优化方法。通过设计更好的网络拓扑结构,在一定的技术指标下,探索更加合理的电容电感排列组合。或者在 PFN 级中加入一到两级的特殊 PFN,用以调节脉冲波形,这也是一种有效的手段。

4 结 论

本文综述近 20 年来的 PFN-Marx 发生器的研究进展,对各国典型 PFN-Marx 发生器装置设计参数、输出性能和结构特点进行了讨论,并且给出了 PFN-Marx 发生器的发展趋势。

(1) 从时间发展历程上看,PFN-Marx 发生器采用高储能密度器件,装置的储能密度水平在不断地提高,尺寸紧凑化水平也在提高。各装置的输出电压范围在 250~900 kV 左右,重复频率范围 1~100 Hz。而因驱动高功率微波源的应用需求,重复频率 20 Hz 左右、脉宽在 200 ns 左右的装置居多。

(2) PFN-Marx 发生器的空间结构的优化设计效果优于 PFN 网络拓扑参数的优化设计,这是由理论设计与工程应用之间矛盾的妥协而决定的。换言之,前者更易于工程应用,后者更易于理论设计。采用相同的元件易于空间结构设计,而空间结构的优化,最直接的是可压缩空间,核心是减少对地电感和级间耦合电容,优化波形。

(3) PFN-Marx 发生器采用波形优化方法具有较明显的收益,可有效降低装置紧凑化带来级间分布参数更强耦合的负面影响。较多装置采用陡化电容、陡化开关提升脉冲上升沿,且提升效果显著。同时也有采用磁开关改善脉冲下降沿,或者截断波形来调整需要的脉宽。

可以看出,进一步提高系统储能密度及功率密度,并探索波形优化方法,将是未来高功率、高重复频率、高稳定可靠的 PFN-Marx 发生器的重要发展方向。

参考文献:

- [1] Schamiloglu E, Barker R J, Gunderson M, et al. Modern pulsed power: Charlie Martin and beyond[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(7): 1014-1020.
- [2] Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [3] Kekez M M. A 480 joule, 650 kV, <3 ns risetime, 500 ns pulse width compact pulse generator[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference. IEEE, 1997: 1524-1529.
- [4] Phelps D A. High density compact tunable PFN-Marx modulators[C]//Nineteenth IEEE Symposium on Power Modulators. IEEE, 1990: 507-510.
- [5] 高景明. 陡化前沿Marx发生器及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009. (Gao Jingming. Research on a wave erection Marx generator and its applications[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009)
- [6] 张昊冉. 基于云母电容器的PFN-Marx相关技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016. (Zhang Haoran. Technique research on the PFN-Marx generator based on mica capacitors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016)
- [7] Hammon J, Lam S K, Drury D, et al. Compact 1 MV, 10 Hz pulser[C]//Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 147-152.
- [8] Li H T, Ryo H J, Kim J S, et al. Development of rectangle-pulse Marx generator based on PFN[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(1): 190-194.
- [9] 韩克华, 任西, 周密, 等. 高压脉冲电容器性能参数优选实验方法研究[J]. *爆破器材*, 2011, 40(3): 22-25. (Han Kehua, Ren Xi, Zhou Mi, et al. Study on the characteristics parameters optimization experiment with measurement method for high voltage pulsed power capacitor[J]. *Explosive Materials*, 2011, 40(3): 22-

25)

- [10] Chen Y J. Compact, repetitive Marx generator and HPM generation with the vircator[D]. Lubbock: Texas Tech University, 2005.
- [11] Kekez M M. A compact square waveform 15 kJ generator: 15 ns risetime, 7.5 Ω load impedance and 100-500 ns pulse width[C]//PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers. 2001: 1027-1030.
- [12] Hammon J, Lam S K, Pomeroy S. A transportable 500 kV, high average power modulator with pulse length adjustable from 100 ns to 500 ns[C]//Proceedings of 1996 International Power Modulator Symposium. IEEE, 1996: 157-160.
- [13] Su Jiancang, Zhang Xibo, Liu Guozhi, et al. A long-pulse generator based on tesla transformer and pulse-forming network[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(10): 1954-1958.
- [14] 张喜波, 苏建仓, 王利民, 等. 电容加载平板传输线型PFN理论与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(4): 591-594. (Zhang Xibo, Su Jiancang, Wang Limin, et al. Theoretical and experimental study of PFN based on capacitor-loaded plate transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(4): 591-594)
- [15] Turnbull S M, Koutsoubis J M, MacGregor S J. Development of a high voltage, high PRF PFN Marx generator[C]//Conference Record of the Twenty-Third International Power Modulator Symposium. Rancho Mirage: IEEE, 1998: 213-216.
- [16] Turnbull S M, MacGregor S J, Harrower J A. A PFN Marx generator based on high-voltage transmission lines[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(4): N51-N55.
- [17] McDonald K F, Slenes K. Compact modulator for high power microwave systems[C]//Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International Power Modulator Symposium. 2006: 397-400.
- [18] Heffernan L K. A fast, 3 MV Marx generator for megavolt oil switch testing and integrated Abramyan network design[D]. University of Missouri-Columbia, 2005.
- [19] Abramyan E A, Altercop B A, Kuleshov G D. Microsecond intensive E-beams[C]//1977 2nd International Topical Conference on Electron Beam Research & Technology. IEEE, 1977: 743-754.
- [20] Abramyan E A, Efimov E N, Kuleshov G D. Energy recovery and power stabilization of pulsed electron beams in Marx generator circuits[C]//1977 2nd International Topical Conference on Electron Beam Research & Technology. IEEE, 1977:755-760.
- [21] 张江华. 近方波Marx发生器及其触发开关的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011. (Zhang Jianghua. Research of rectangular pulse Marx generator and triggered-gap switch[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011)
- [22] Neuber A A, Chen Y J, Dickens J C, et al. A compact, repetitive, 500 kV, 500 J, Marx generator[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2005: 1203-1206.
- [23] Adler R J, Gilbrech J A, Price D T. A modular PFN Marx with a unique charging system and feedthrough[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2009: 1201-1206.
- [24] Gundersen M, Dickens J, Nunnally W. Compact, portable pulsed power: physics and applications[C]//Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Pulsed Power Conference. IEEE, 2003: 9-12.
- [25] Mankowski J, Chen Y, Dickens J, et al. A low-cost metallic cathode for a vircator HPM source[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2005: 66-69.
- [26] Giesselmann M, McHale B. Rapid capacitor charger for 10 Hz operation of a low-inductance compact Marx generator[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2005: 1184-1187.
- [27] Walter J, Dickens J, Kristiansen M. Performance of a compact triode vircator and Marx generator system[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2009: 133-137.
- [28] Walterx J, Dickens J, Kristiansen M. An "energy efficient" vircator-based HPM system[C]//2011 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2011: 658-661.
- [29] Taylor M B, Kelly P M, Parson J M, et al. Operation of a 500 kV, 4 kA Marx generator at 500 Hz rep-rate[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). IEEE, 2014: 377-379.
- [30] Parson J M, Lynn C F, Bragg J W B, et al. Rep-rate operation of a 300 kV, high-power microwave sealed-tube vircator[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). IEEE, 2014: 326-328.
- [31] Barnett D H, Rainwater K, Dickens J C, et al. 160 J, 100 HZ repetition rate, compact Marx generator and high power microwave system[C]//2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). IEEE, 2017: 1-3.
- [32] Barnett D H, Rainwater K, Dickens J C, et al. A reflex triode system with multicavity adjustment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(2): 1472-1476.
- [33] Park S S, Heo H, Choi O L, et al. Repetitive test of PFN Marx for pulse generator[C]//28th IEEE Power Modulator Symposium, Las Vegas. 2008.
- [34] Mayes J R, Mayes M G, Lara M B. A novel Marx generator topology design for low source impedance[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2005: 684-687.
- [35] Mayes J R, Hatfield C W. Development of a sequentially switched Marx generator for HPM loads[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2009: 934-937.
- [36] Nunnally C, Mayes J R, Hatfield C W, et al. Design and performance of an ultra-compact 1.8-kJ, 600-kV pulsed power system[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2009: 930-933.

- [37] Nunnally C, Lara M, Mayes J R, et al. A compact 700-kV erected pulse forming network for HPM applications[C]//2011 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2011: 1372-1376.
- [38] 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)
- [39] 秦凤, 宋法伦, 甘延青, 等. 模块化低阻抗紧凑型Marx发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 907-911. (Qin Feng, Song Falun, Gan Yanqing, et al. Compact low-impedance Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 907-911)
- [40] 宋法伦, 金晓, 李飞, 等. 20GW紧凑Marx型重复频率脉冲驱动源研制进展[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 020101. (Song Falun, Jin Xiao, Li Fei, et al. Progress on 20 GW compact repetitive Marx generator development[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 020101)
- [41] Tewari S V, Umbarkar S B, Agarwal R, et al. Development and analysis of PFN based compact Marx generator using finite integration technique for an antenna load[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2684-2690.
- [42] Lassalle F, Morell A, Loyen A, et al. Development and test of a 400-kV PFN Marx with compactness and rise time optimization[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3313-3319.
- [43] 刘宏伟. 紧凑型低阻抗方波Marx发生器技术研究[D]. 北京: 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]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2017)
- [44] 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)
- [45] 李志强, 杨建华, 张建德, 等. 紧凑重频PFN-Marx脉冲发生器[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015013. (Li Zhiqiang, Yang Jianhua, Zhang Jiande, et al. A compact repetitive PFN-Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015013)
- [46] Zhang Haoran, Li Zhiqiang, Zhang Zicheng, et al. Investigation on the generation of high voltage quasi-square pulses with a specific two-node PFN-Marx circuit[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 024702.
- [47] 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.