



·脉冲功率技术·

PFN-Marx 发生器内电磁耦合分析研究^{*}

刘世飞¹, 张建德², 张自成², 邱旭东¹, 高明珠¹, 李锐¹, 周业凯³

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 3. 复旦大学, 上海 200433)

摘 要: PFN-Marx 发生器准方波输出特性与装置的紧凑性是一对矛盾。随着对装置紧凑性的更高要求, 发生器叠加过程中 PFN 波传输产生的级间电磁耦合愈发明显, 其对 PFN 的脉冲调制特性有显著的影响, 进一步影响发生器的准方波输出特性。基于此问题, 本文开展 PFN-Marx 发生器叠加过程中 PFN 的电磁耦合分析。首先, 通过理论推导, 分析波传输过程中 PFN 级内和级间的电磁耦合现象, 并得出其计算公式; 然后, 建立典型的 PFN-Marx 发生器的 3D 模型进行场路协同仿真; 最后, 分别搭建单级、多级发生器进行实验验证。通过分析对比三种结果, 提高对 PFN-Marx 发生器波传输过程中电磁耦合的认识, 从而在设计中规避部分电磁耦合, 提升 PFN-Marx 发生器方波输出能力。本文可以为 PFN-Marx 发生器的准方波输出和紧凑化提供技术参考。

关键词: 波传输过程; 电磁耦合; 场路协同仿真; 脉冲形成网络; PFN-Marx 发生器

中图分类号: TM214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250264

Analysis and research on electromagnetic coupling within PFN-Marx generator

Liu Shifei¹, Zhang Jiande², Zhang Zicheng², Qiu Xudong¹, Gao Mingzhu¹, Li Rui¹, Zhou Yekai³

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: [Background] The quasi-square wave output characteristic of a PFN-Marx generator is a pair of contradictions with the compactness of the setup. With the higher requirement of the compactness of the setup, the inter stage electromagnetic coupling of PFN wave transmission becomes increasingly significant, which has a significant effect on the pulse modulation characteristics of the PFN and further affects the quasi-square wave output characteristics of the generator. [Purpose] It is necessary to investigate the electromagnetic coupling during the wave transmission process of the PFN-Marx generator and derive the corresponding calculation formulas. This allows for the avoidance of specific electromagnetic couplings during the design phase, ensuring both the quality of the output waveform and the compactness of the device. [Methods] This paper presents an electromagnetic coupling analysis of the PFN during the discharging process of PFN Marx generator. Firstly, the electromagnetic coupling phenomena in the PFN and between the PFNs are analyzed by theoretical derivation, and the calculation formulas are obtained. Then, the 3D model of the typical PFN Marx generator is built up for field circuit simulation. Finally, a single-stage generator and a multi-stage generator are built for experimental verification. [Results] The experimental results verify the theoretical analysis and simulation results, showing good consistency. The preliminary design optimization directions for the PFN-Marx generator can be outlined as follows: 1. Maintain appropriate inter-wire spacing; 2. Increase design redundancy to compensate for electromagnetic coupling; 3. Keep the transmission lines neat and regular to minimize unnecessary electromagnetic coupling. [Conclusions] Based on the above results, the understanding of electromagnetic coupling in the wave transmission of PFN-Marx generator can be improved, so as to avoid partial electromagnetic coupling in design and improve the square wave output ability of PFN-Marx generator. This paper can provide technical reference for the development of quasi-square wave technology and compact

* 收稿日期: 2025-08-19; 修订日期: 2026-02-03

基金项目: 高功率微波驱动源技术研究创新团队(ZCXTD202303)

联系方式: 刘世飞, liushifei@nint.ac.cn.

technology of the PFN-Marx generator.

Key words: wave transmission, electromagnetic coupling, field-circuit simulation, pulse forming network, PFN-Marx generator

脉冲功率驱动源的重要发展方向包括更高的输出功率、更紧凑的结构设计及长脉冲输出^[1-2]。PFN-Marx 发生器可同时实现脉冲调制和电压叠加,具有天然的紧凑基因,其已逐渐成为世界性研究的热点^[3-4]。国外如美国应用能源公司^[5-7]、德克萨斯理工大学^[8-9]、法国原子能委员会^[10]及国内的中国工程物理研究院^[11-14]、国防科技大学^[15-18]、西北核技术研究所^[19-20]等单位均研制出了性能卓越的 PFN-Marx 发生器。为保持 PFN-Marx 发生器的紧凑性及其准方波的输出特性,核心要义是采用高能量密度的电容器,并通过改进空间和拓扑结构来降低杂散耦合参数。文献 [16] 中 PFN-Marx 发生器可在 50 Ω 负载上实现 30 Hz、5 GW 的输出,能量密度为 6.5 J/L;文献 [14] 中 PFN-Marx 发生器可在 40 Ω 负载上以 10 Hz 输出 8 GW 脉冲,整体储能密度为 5.5 J/L;文献 [12] 中 PFN-Marx 发生器可在 15 Ω 负载上输出 20 GW 脉冲,整体储能密度为 8 J/L。此类发生器追求高储能密度而进行了高紧凑设计,从而引入更多杂散和耦合参数,叠加低阻抗的输出环境,输出波形质量并不理想,整体更类似于电容放电的指数型波。文献 [11] 中提到降低电磁耦合的有效途径是减小 PFN-Marx 发生器内波传输过程中电极的相互作用面积和增大级间距离,但并未提及具体电磁耦合的计算方式及减小方法。该研究在降低电磁耦合后,发生器输出脉冲的上升沿相对于优化前减小了 3 ns,脉冲宽度增加 12 ns,具有更好的方波特性。

为了解决以上问题,对 PFN-Marx 发生器内电磁耦合展开分析和研究。以一等电容电感的 PFN 为例,通过理论分析波传输过程中 PFN 级内和级间的电磁耦合并得出其计算公式;建立典型的 PFN-Marx 发生器的 3D 模型进行场路协同仿真;通过搭建单级和多级的发生器进行实验验证,为实现发生器的准方波输出提供有意义的指导和参考。

1 电磁耦合的理论推导计算

1.1 PFN 级内电磁耦合

以一典型的 Rayleigh 型 PFN 为例,其示意图如图 1 所示。节电容为 6 nF 的云母电容,共 9 个,由矩形铜带并联同时铜带充当节电感,铜带尺寸为 320 mm×10 mm×1 mm。根据电感计算手册^[21],矩形截面的导线自感计算式为

$$L_{jx} = \frac{\mu_0 l_{jx}}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2l_{jx}}{b_{jx} + c_{jx}} \right) + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

式中: c_{jx} 是矩形铜带的宽度, l_{jx} 是矩形铜带的长度, b_{jx} 是矩形铜带的厚度, L_{jx} 是矩形铜带的自感。

PFN 中矩形铜带的位置如图 2 所示,图中云母电容已略去。在该 PFN 放电过程中,电流如图 2 红线箭头所示。以下推导过程中考虑不同级间 PFN 的放电电流情况基本一致,若级间 PFN 的放电电流情况差别较大,需要代入合适的电流表达式进一步精确耦合计算。上下铜片之间的电磁耦合会减少铜片的自感,即表现为互感。根据电感计算手册^[21],等长平行导线之间的互感计算式为

$$M_{jx} = \frac{\mu_0 l_{jx}}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{l_{jx} + \sqrt{l_{jx}^2 + h_{jx}^2}}{h_{jx}} \right) - \frac{\sqrt{l_{jx}^2 + h_{jx}^2}}{l_{jx}} + \frac{h_{jx}}{l_{jx}} \right) \quad (2)$$

式中: M_{jx} 是铜带导线之间的互感, h_{jx} 是铜带之间的距离。PFN 级内的铜带是串联的且电流相反,铜带之间是负耦合,因而单级 PFN 总电感 L_{PFN1} 为

$$L_{PFN1} = 2L_{jx} - 2M_{jx} \quad (3)$$

电容电极之间的距离 h_{jx} 为 20 mm,根据铜带的尺寸代进式(1),可以得到单条铜带提供 292 nH 的电感,互感 M_{jx} 计算为 162 nH。组成 PFN 之后,利用式(2)和式(3)可以计算出两条铜带组成的电感即 $L_{PFN1}=260$ nH,平均单条

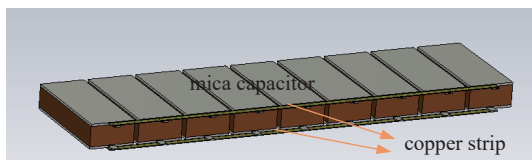


Fig. 1 Schematic diagram of a PFN
图 1 等电容电感 PFN 示意图

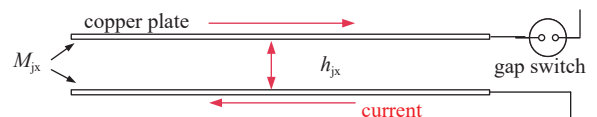


Fig. 2 Schematic diagram of the position of copper strips
in a single-stage PFN
图 2 单级 PFN 中矩形铜带的位置的示意图

铜带电感为 130 nH 左右。从计算结果可知, PFN 级内的电磁耦合很大。

1.2 PFN 级间电磁耦合

式(2)提供的导线之间的互感计算较难准确地计算出有限长的铜带之间的互感, 且如果按照单条铜带之间的互感计算, 会导致计算量繁复。电感计算手册中对于回路的互感大多数集中在两个完整回路之间, 在 PFN-Marx 内主要是平行导线之间的互感, 如果将 PFN 级内的两根铜带看作是完整回路, 在计算 PFN 级间的电磁耦合将导致较大的误差。考虑有限长度的单条铜带与平行铜带之间的互感较为合理。基本思路是: 单条铜带与平行铜带之间的电磁耦合, 先推导单条铜带导线外磁场强度, 然后对两条铜带组成的矩形面积分得到全磁通, 从而计算互感。

两级 PFN 间的铜带示意图如图 3 所示, 以铜带(2)顶点建立坐标, 当铜带(2)通 y 方向的电流, 将在 xy 平面上半面产生从纸面向外的磁场, 在下半面产生朝纸面向里的磁场。利用毕奥-萨伐尔定律, 有限长铜带线外一点 $B(x,y)$ 的磁场强度为

$$B_{jx} = \frac{\mu_0 I_{jx}}{4\pi b_{jx}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) d\theta \quad (4)$$

式中: $\theta_1 = \arctan\left(\frac{l_{jx}-y}{x}\right)$, $\theta_2 = \pi - \arctan\left(\frac{x}{l_{jx}-y}\right)$, x, y 是 B 点坐标。利用式(4)对图 3 中的红框矩形面积进行面积分, 可以得到平行铜带在铜带(2)磁场下的全磁通 Ψ_{jx1} , 同理可以得到平行铜带在铜带(1)下的全磁通 Ψ_{jx2} , 且这两个全磁通方向相反。

$$\Psi_{jx1} = \int_{d_{jx}}^{h_{jx}+d_{jx}} \int_0^{l_{jx}} \frac{\mu_0 I_{jx}}{4\pi b_{jx}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) d\theta dy dx \quad (5)$$

$$\Psi_{jx2} = \int_{h_{jx}+d_{jx}}^{2h_{jx}+d_{jx}} \int_0^{l_{jx}} \frac{\mu_0 I_{jx}}{4\pi b_{jx}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta) d\theta dy dx \quad (6)$$

式中: d_{jx} 是级间矩形铜带的距离, 利用 $M_{PFN1} = (\Psi_{jx1} - \Psi_{jx2})/I_{jx}$ 可以计算得到单条铜带与平行铜带之间的互感。 M_{PFN1} 是相邻两个 PFN 之间的耦合电感, 可以计算得到两个 PFN 叠加之后的电感 L_{PFN2} 为

$$L_{PFN2} = 2L_{PFN1} - 2M_{PFN1} \quad (7)$$

估算一下, 当 $d_{jx}=25$ mm 时, $M_{PFN1}=13.9$ nH, 而相隔一个 PFN 的之间的耦合电感为 $M_{PFN2}=5.2$ nH。可以计算得到相隔两个 PFN 以上的耦合电感将非常小, 在接下来的计算中将忽略。

2 场路协同仿真

利用 CST 微波工作室中的场路协同仿真可以模拟 PFN 级间电磁耦合对波形的影响。其中, PFN 用 3D 模型建立, 以仿真其中的电磁场耦合; 电路部分主要是为 3D 模型提供充电电源、开关和阻性负载。建立一个三级的 PFN-Marx 发生器, PFN 模块之间的距离 d_{jx} 范围分别为 5 mm 到 25 mm, 如图 4 所示。云母电容的模型简化为提供 6 nF 电容的平板式电容器。电容器的两端平板采用的是理想导体, 铜带按照实际采用纯铜材料, 电容介质是虚拟材料主要为了提供 6 nF 的电容。电路方面如图 5 所示。图 4 中预留的 6 个端口 (port 1~port 6) 与图 5 中的电路模型端口是对应的。port 1、3、5 设计用于输入电压信号, 而 port 2、4、6 被设计为连接开关和阻性负载 7Ω , 构建 PFN 充电电路模型, 设置两个探头 P1 和 P2 用于检测充电电压波形和输出电压脉冲。

场路协同仿真过程: 当瞬态仿真开始时, 电压控制开关(1)打开, -50 kV 直流电源开始为 3D 模型 PFN 充电。同时, 电压控制开关(2)关闭。在 1000 ns 时刻, 电压控制开关(2)导通, 压控开关(1)关断, 然后将 PFN 放电到阻性负载, P1 记录充电电压, P2 记录负载电压。

场路协同仿真中主要考虑 PFN 之间的距离为 5 mm、15 mm 和 25 mm 的情况。典型充电电压如图 6 所示, 因为

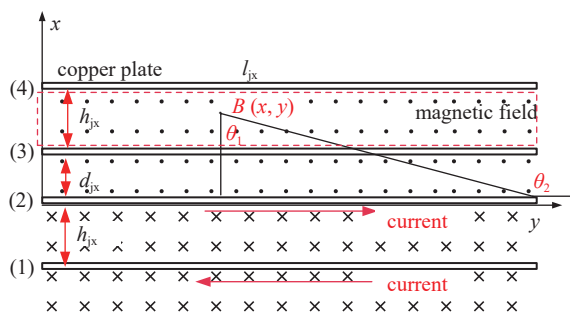


Fig. 3 Magnetic field intensity at an external point of a finite-length copper strip

图 3 有限长铜带线外一点的磁场强度

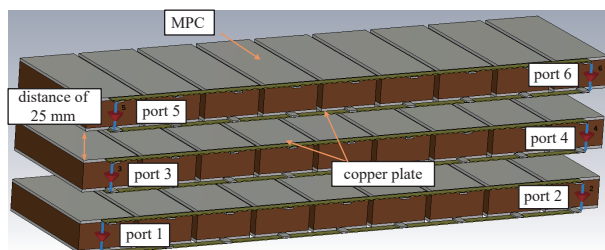


Fig. 4 Model of a three-stage PFN-Marx

图 4 三级 PFN-Marx 的模型

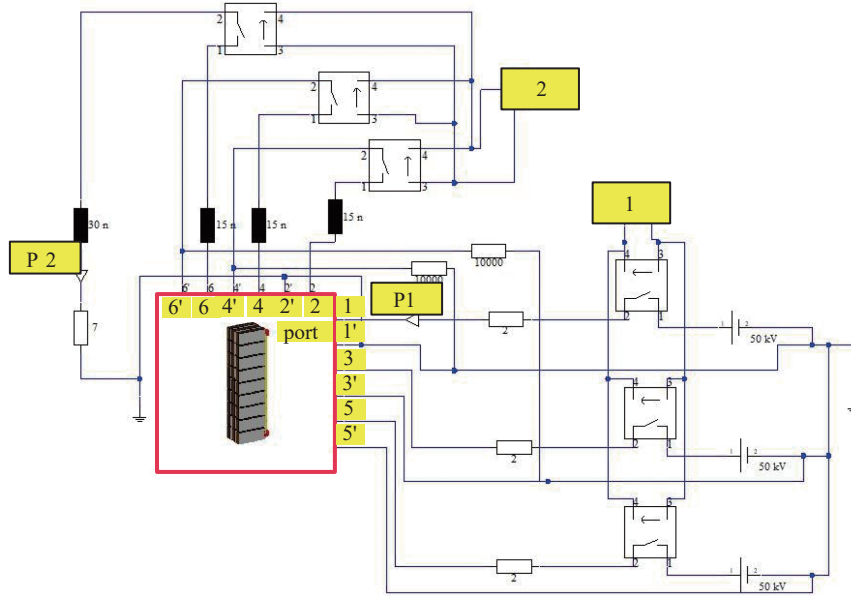


Fig. 5 Diagram of the electric circuit of the field-circuit simulation

图 5 场路协同仿真的电路部分的示意图

充电电阻很小只有 $2\ \Omega$, 电容器的充电电压在 $1000\ \text{ns}$ 时刻已经稳定在 $-50\ \text{kV}$ 。三种距离的 PFN 的仿真负载波形如图 7 所示, 其中电压已经归一化处理。从图 7 可以看出, 负载脉冲宽度随着距离的减小而减小, 从 $275\ \text{ns}$ 减少到 $250\ \text{ns}$ 。结果表明节电感的降低导致了负载脉冲宽度缩短。

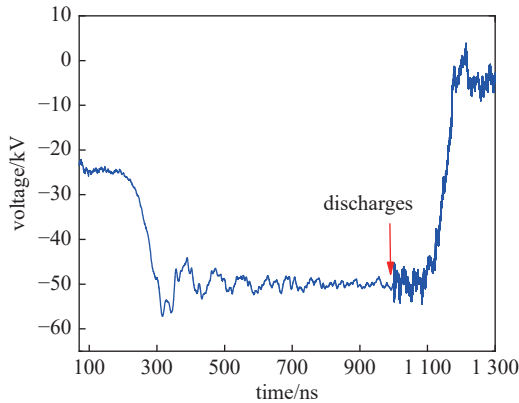


Fig. 6 Typical charging waveform

图 6 典型的充电波形

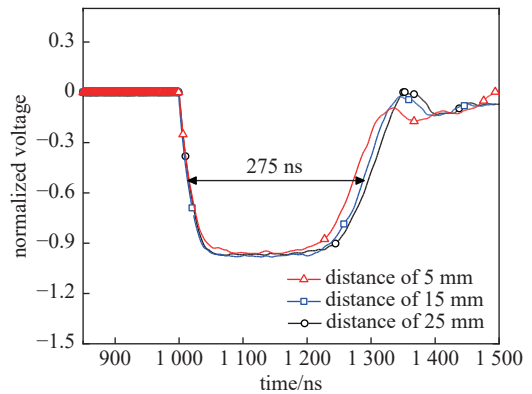


Fig. 7 Simulation results of the load voltage waveform under three distance conditions

图 7 三种间距的仿真结果的负载波形

3 实验验证

首先, 对单个 PFN 的电感量进行实验验证。将单级 PFN 短路放电, 可以利用式(8)估算回路的等效电感。

$$T_{\text{period}} = 2\pi \sqrt{L_{\text{eq}} C_{\text{eq}}} \quad (8)$$

式中: T_{period} 是短路放电的振荡周期, C_{eq} 是回路的等效电容, 可以直接通过 LCR 仪测量得到, L_{eq} 是回路的等效电感。

将组装的单级 9 节 PFN 充电 $-1\ \text{kV}$ 之后, 直接进行短路放电测试, 利用罗氏线圈测量回路的电流波形, 其结果如图 8 所示。其中振荡周期约为 $754\ \text{ns}$, 可以计算得到回路的等效电感约 $270\ \text{nH}$ 。而 1.1 小节中 PFN 的电感计算值为 $260\ \text{nH}$ 。实验测试值要比 1.1 小节中计算值稍大一些, 是因为电容器也存在内感, 内感也算在了等效电感中。

根据仿真结果, 设置与仿真模型相同的实验布置, 以验证电磁耦合, 实物装置如图 9 所示, 侧视示意图如图 10 所示。将三个 PFN 放置在充有 SF_6 气体的尼龙容器中进行绝缘。水电阻用于吸收装置的输出能量, 并利用高压探头记录其电压波形。水电阻的阻值为 $7\ \Omega$, 基本与三级 PFN 匹配。PFN 采用不同厚度的尼龙盒子, 以此来控制间距。另外为了方便适应 PFN 的高度, 隔离电感和气体开关的级数为 6 级。

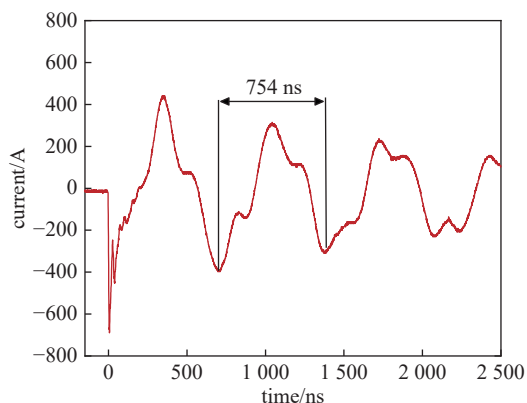


Fig. 8 Oscillating current waveform of the load during short-circuit discharge

图 8 短路放电时负载上电流振荡波形

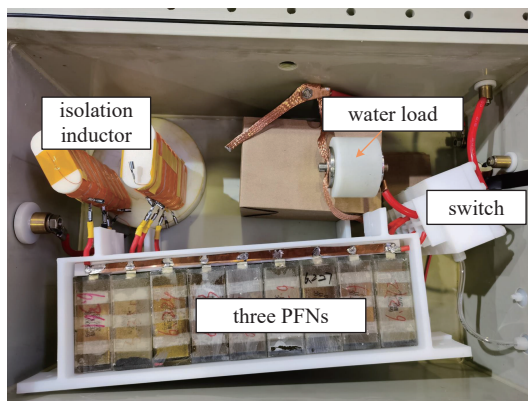


Fig. 9 The three-stage PFN-Marx generator

图 9 三级 PFN-Marx 发生器

具体实验流程为: 首先调节 PFN 级间的间距为 25 mm, 给 PFN 充电至 -5 kV, 开关导通后测量得到负载的波形, 而后调整 PFN 级间的距离, 以此重复实验。实验结果如图 10 所示, 电压波形已归一化处理。从图上结果可知, 随着距离的从 25 mm 减少至 5 mm, 电压波形的脉宽脉冲从 270 ns 减少到 240 ns, PFN 的电感量明显在减小。

对比图 7 和图 11, 5 mm 和 15 mm 的实验电压波形似乎与仿真相去甚远, 5 mm 距离的 PFN-Marx 发生器的输出负载波形看起来更像是指数波形, 并且伴随上升沿变缓、半波宽减小的现象, 这些迹象表明实验的级间电磁互感比场路协同仿真的互感要更复杂一些。进一步分析如下: (1) 电磁耦合不仅存在于相邻级间的 PFN 中, 还存在于其他引线中, 如电容器引线、开关引线、负载的引线等(放电时隔离电感内电流很小, 考虑其引线不参与放电过程)。这部分尺寸和形状较复杂其本身电感和之间的互感在场路协同仿真中很难完全准确计算出来, 考虑其不影响仿真结果的趋势因而在仿真中这部分互感值被忽略了。(2) 在实验中, 堆叠的 PFN 之间采用不同厚度的尼龙盒子来控制间距, 但阵列式开关的高度固定。因此, 在减小 PFN 级间间距时, PFN 因耦合电感量下降, 而 PFN 开关连线之间的间距未能对应减小, 导致这部分引线间的电感电磁耦合相对较小, 相当于开关引线的电感占比较大, 导致输出上升沿变缓, 使得输出负载波形呈现指数波形。

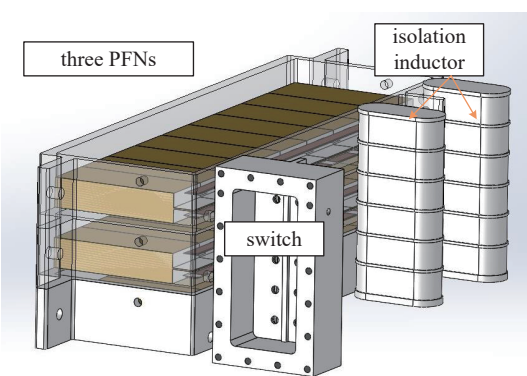


Fig. 10 Side view of the three-stage PFN-Marx generator

图 10 三级 PFN-Marx 发生器的侧视图

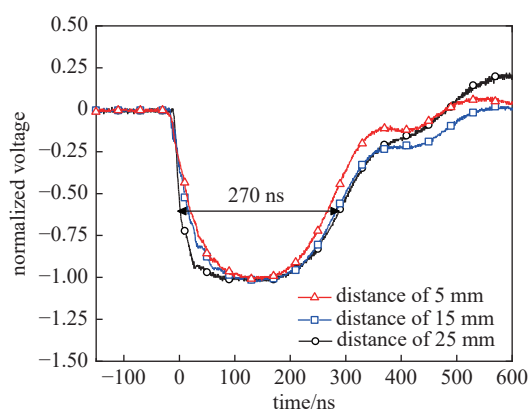


Fig. 11 Experimental results of the load voltage waveform under three distance conditions

图 11 三种距离的 PFN-Marx 的负载波形对比

将上述的理论计算、仿真研究和实验验证的结果汇总在表 1 中, 仿真结果和实验结果均为根据输出的脉宽, 利用等电容等电感的 PFN 建立对应的 PSpice 仿真计算得到对应的 PFN 回路总电感。理论、仿真和实验基本一致。

从上述分析可知, PFN 的电磁耦合主要与输出脉宽相关。在 PFN 内波传输的过程中, 级内和级间的电磁耦合会使得铜带电感量下降, 而该过程与电流传输距离强相关。PFN 的电感量下降到一定程度之后, 将不能促使电容器按顺序放电, 使得 PFN 更像是把电容器并联起来的模块而失去了脉冲方波调制的特性, 所以电磁耦合严重的 PFN 负载波形往往像指数波, 导致发生器的输出脉冲电压失去方波特性。另外, 通过实验发现, PFN 之间的距离缩短之后, 带来的并不只有输出波形脉宽的缩短, 还伴随着波形叠加高频振荡, 应该是 PFN 的级间电容耦合带来的

表 1 理论计算、仿真及实验结果对应的 PFN 参数

Table 1 PFN parameters corresponding to theoretical calculations, simulations, and experimental results

	inductance of PFN/nH			corresponding pulse width/ns		
	distance of 5 mm	distance of 15 mm	distance of 25 mm	distance of 5 mm	distance of 15 mm	distance of 25 mm
theory	184	221	248	245	263	271
simulation	195	225	252	250	266	275
experiment	176	211	247	240	260	270

负面影响。在 PFN-Marx 发生器的设计中, 应通过理论、仿真计算, 考虑波传输过程的电磁耦合, 提前设计电感量或者控制距离, 保证输出波形质量以及装置的紧凑化水平。

4 结 论

本文首先通过理论推导, 分析波传输过程中 PFN 级内和级间的电磁耦合现象, 并得出其计算公式; 然后, 建立典型的 PFN-Marx 发生器的 3D 模型进行场路协同仿真; 最后, 通过搭建单级和多级的发生器进行实验验证。理论、仿真和实验结果较为吻合。通过分析对比三种结果, 可知 PFN 内波传输的过程的电磁耦合与距离强相关。本研究可以提高对 PFN-Marx 发生器波传输过程中电磁耦合的认识, 从而在设计中规避部分电磁耦合, 保证输出波形质量以及装置的紧凑化水平。根据以上结果, 可以初步给出 PFN-Marx 发生器的设计优化方向: (1) 保持线间距不小于 25 mm, 其电感值计算、仿真值和实验值更接近, 而且跨级之间的耦合更小, 整系统的电磁耦合复杂程度更小一些; (2) 在设计中, 提前考虑电感因为电磁耦合而减小, 提前增大回路中的电感设计, 保证 PFN 的输出脉冲特性; (3) 系统中开关、输出等各类引线的形状保持规整, 方便计算电感和互感值, 并且可以有效减少不必要电磁耦合, 减少对整体 PFN-Marx 发生器的输出能力。

参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008: 1-45. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 1-45)
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical pulse power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003)
- [3] 王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [4] 彭建昌, 苏建仓, 宋晓欣, 等. 40 GW 重复频率脉冲驱动源研制进展[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 712-716. (Peng Jianchang, Su Jianchang, Song Xiaoxin, et al. Progress on a 40 GW repetitive pulsed accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 712-716)
- [5] 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. 1996: 157-160.
- [6] Mayes J R, Mayes M G, Lara M B. A novel Marx generator topology design for low source impedance[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 684-687.
- [7] Mayes J R, Hatfield C W. Development of a sequentially switched Marx generator for HPM loads[C]//Proceedings of 2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 934-937.
- [8] Neuber A A, Chen Y J, Dickens J C, et al. A compact, repetitive, 500kV, 500 J, Marx generator[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005: 1203-1206.
- [9] 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]//Proceedings of 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2014: 326-328.
- [10] Lassalle F, Morell A, Loyer 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.
- [11] 伍友成, 冯传均, 付佳斌, 等. 基于 PFN-Marx 技术的紧凑型重频脉冲功率源[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 055019. (Wu Youcheng, Feng Chuanjun, Fu Jiabin, et al. A compact PFN-Marx repetitive pulsed power source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36: 055019)
- [12] 刘宏伟. 紧凑型低阻抗准方波 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: Institute of Fluid Physics China Academy of Engineering Physics, 2017)
- [13] 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)
- [14] Song Falun, Zhang Beizhen, Li Chunxia, et al. Development and testing of a three-section pulse-forming network and its application to Marx circuit[J]. Laser and Particle Beams, 2019, 37(4): 408-414.

- [15] 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)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 杨双, 孙晶晶, 李典耕, 等. 高效率高阻抗层叠 Blumlein 线固态脉冲发生器研究[J]. 现代应用物理, 2024, 15: 030401. (Yang Shuang, Sun Jingjing, Li Diangeng, et al. Blumlein lines solid-state pulse generator using high-efficiency and high-resistance stacked[J]. Modern Applied Physics, 2024, 15: 030401)
- [19] 崔光曦, 李俊娜, 陈旭良, 等. 一种基于 Marx 发生器的纳秒脉冲实验平台[J]. 现代应用物理, 2022, 13: 040402. (Cui Guangxi, Li Junna, Chen Xuliang, et al. A nanosecond pulse experimental platform based on Marx generator[J]. Modern Applied Physics, 2022, 13: 040402)
- [20] Qiu Xudong, Su Jiancang, Li Yongdong, et al. Theoretical investigation on double-matched Marx generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8342-8352.
- [21] 卡兰塔罗夫, 采依特林. 电感计算手册[M]. 陈汤铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992. (Kantarov L T. Handbook of inductance calculation[M]. Chen Tangming, trans. Beijing: China Machine Press, 1992)