



·脉冲功率技术·

## 双路脉冲输出结构理论设计与仿真\*

高明珠<sup>1</sup>, 苏建仓<sup>1</sup>, 邱旭东<sup>1,2</sup>, 曾搏<sup>1</sup>, 李锐<sup>1</sup>, 赵亮<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所 先进高功率微波技术重点实验室, 西安 710024;

2. 西安交通大学 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 基于单台脉冲功率驱动源同时驱动两个微波器件产生双频高功率微波的构想, 设计了一种双路短脉冲输出结构, 其接于主开关后, 能够将主开关产生的高压纳秒脉冲传输至高功率微波产生器。两路脉冲由同一脉冲源产生, 具有很好的一致性。对双路输出结构脉冲传输过程进行了建模仿真, 研究了传输线阻抗、输入脉冲前沿等电学参数对输出波形质量的影响规律, 并完成了绝缘风险分析及结构优化。经评估, 在前沿 4~8 ns 的准方波输入脉冲下, 双路脉冲输出线的输出波形质量与单路传输线相当, 其过冲振荡均小于 20%、平顶振荡均小于 1%, 且能满足绝缘要求。

**关键词:** 双路输出线; 脉冲质量; 数值模拟; 高功率微波; 短脉冲传输线

中图分类号: TM85 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220310

## Design and simulation of dual short pulse transmission structure

Gao Mingzhu<sup>1</sup>, Su Jiancang<sup>1</sup>, Qiu Xudong<sup>1,2</sup>, Zeng Bo<sup>1</sup>, Li Rui<sup>1</sup>, Zhao Liang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Science and Technology on High Power Microwave, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The scheme of a dual short pulse output structure is proposed, according to the concept that two microwave device driven by the same pulsed accelerator can produced stable dual-frequency high power microwave (HPM) simultaneously. Structure model of a dual short pulse output structure is designed, which is connected to the main switch and can transmit the high voltage nanosecond pulse generated by the switch to the HPM generator. The two-channel pulse is produced by the same pulse source and has good consistency. In this paper, the pulse transmission process of the dual short pulse transmission structure is modeled and simulated, and the influence of electrical parameters such as transmission line impedance and input pulse front on output waveform quality is studied. The risk analysis about insulation and structural optimization are completed. It is estimated that the output pulse quality of the simultaneous output line is equal to that of the single transmission line under 4–8 ns quasi-square wave input pulse, and the overshoot oscillation is less than 20%, the flat top oscillation is less than 1%, and it can meet the insulation requirement.

**Key words:** dual transmission structure, the output pulse quality, numerical simulation, high power microwave, short transmission line

在高功率微波(HPM)系统中, 驱动源能够将低功率的能量在时间上压缩, 形成高电压、大电流脉冲, 以此驱动 HPM 产生器件产生高功率微波辐射<sup>[1-3]</sup>。高功率、长脉冲(百 ns 量级)、轻小化已成为脉冲功率驱动源的主要发展方向<sup>[4-6]</sup>。微波功率合成成为获得更高功率微波辐射的重要技术途径, 双频高功率微波源的研究是高功率微波领域内新的研究方向<sup>[7-8]</sup>。目前微波功率合成的方法主要为: 利用两套独立运行的 HPM 源产生 HPM, 并在输出端用功率合成装置进行合成<sup>[8]</sup>。这种方法存在很大的缺点: 两台独立运行的驱动源同步输出很难实现, 高功率合成存在很大困难, 且研究成本十分昂贵<sup>[7]</sup>。因此, 利用单台脉冲驱动源同时驱动两台高功率微波产生器, 再共天线辐射产生拍波的方案具有重要的学术及应用价值<sup>[3]</sup>。本文提出并设计了一种双路短脉冲传输结构, 并利用 3D 电磁模拟软件, 完成了脉冲传输分析及绝缘特性优化。

\* 收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377135)

联系方式: 高明珠, gaomingzhu@nint.ac.cn.

## 1 双路短脉冲输出结构

双路脉冲传输线接于主开关后,将开关产生的高压纳秒脉冲传输至 HPM 产生器。其工作过程为:首先充电电源在微秒时间内给形成线充电,当电压达到气体开关自击穿电压值时开关导通产生脉冲信号,脉冲信号分两路传输到两个二极管负载上,在负载端通过高压探头获得脉冲输出电压波形。

设计了图 1(a)所示的双路脉冲输出结构,其采用“人”字双锥绝缘支撑结构<sup>[9]</sup>,综合考虑重量与效率,限制最大径向尺寸不超过 900 mm,设计“人”字绝缘子内径约 140 mm;主开关前为同轴脉冲形成线,其阻抗为 44  $\Omega$ 、电长度为 25 ns;输出线电长度为 1.5 ns。利用 CST 软件的 MICROWAVE STUDIO 工作室进行仿真,在双路输出结构的输入端加载上升沿 4 ns、脉宽 45 ns 的归一化准方波脉冲信号,脉冲持续时间 80 ns,输出端接无箔二极管。二极管实际工作时,阻抗并未一直保持稳定,而是在很短时间内下降到某个数值后维持稳定<sup>[2-3]</sup>。图 1(b)给出了二极管负载阻抗随时间的变化曲线,在约 8 ns 时间内,阻值由数 k $\Omega$  下降到约 80  $\Omega$  并维持稳定。

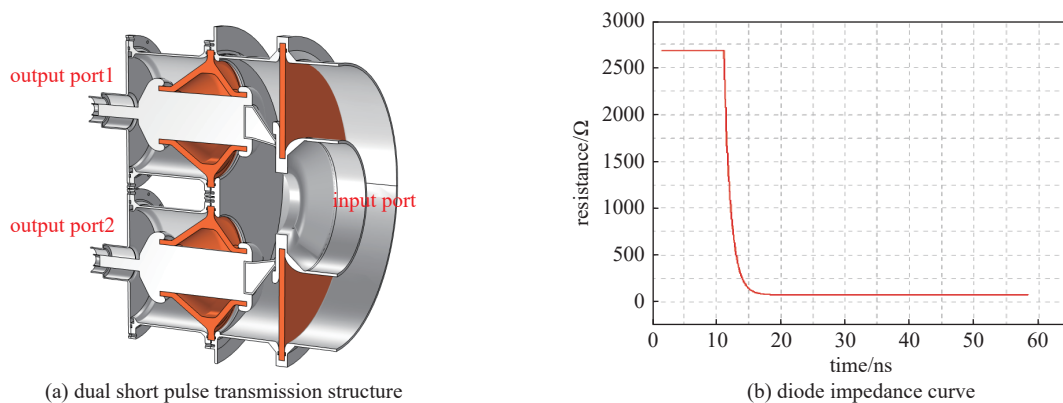


Fig. 1 Two-way pulse simultaneous output structure and load impedance

图 1 双路脉冲同时输出结构及负载阻抗图

根据传输线理论,当输出线电长度远小于输入脉宽时,负载输出电压幅值为

$$U_R = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_0 = 0.952 \text{ V} \quad (1)$$

式中:  $U_0$ 、 $U_R$  为输入、输出脉冲稳定后幅值;  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为输入、输出阻抗。

## 2 脉冲传输分析

双路脉冲传输线两输出端可接不同类型的二极管,存在三种情况:①两路负载最终的稳定阻值不同;②两路负载阻抗下降速率不同;③两路负载阻抗起始下降时刻不同。

第一种情况,两路传输线一路稳定阻值保持 80  $\Omega$  不变(记为端口 1);另一路稳定阻值分别为 60、70、80、90 及 100  $\Omega$ ,其下降速率相同(记为端口 2)。图 2 分别给出了端口 1、2 的输出波形对比图,端口信息见表 1 所示,可以看出,随着端口 2 稳定阻值的增加,端口 1 电压过冲随之减小,端口 2 电压过冲呈现增大趋势,并且当端口 1 稳定幅

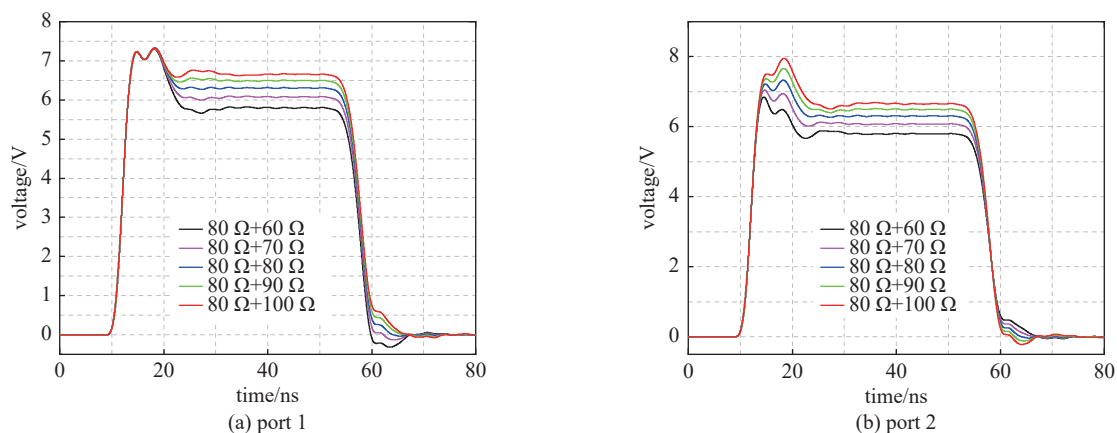


Fig. 2 Output waveforms under different load stabilization resistances of two ways

图 2 两路负载稳定阻值不一致情况下的输出波形

表 1 两路负载稳定阻值不一致对输出波形影响

Table 1 Influence of inconsistent two-way load resistances on output waveforms

port 1 resistance/ $\Omega$	port 2 resistance/ $\Omega$	output resistance/ $\Omega$	port 1 overshot/%	port 2 overshot/%	output voltage/V
80	60	34.28	25.83	15.48	0.876
80	70	37.33	20.46	16.15	0.919
80	80	40.00	16.10	16.31	0.952
80	90	42.35	13.47	18.06	0.979
80	100	44.44	10.47	19.27	1.003

值大于端口 2 时, 端口 1 的电压过冲更大; 反之, 端口 2 过冲更大。综合考虑两端口的输出波形质量, 应该尽量保证两端口稳定阻值相同。

第二种情况, 两路传输线中一路下降时间保持 8 ns 不变(记为端口 1); 另一路稳定下降时间分别为 6、7、8、9 及 10 ns, 其最终稳定阻值均为 80  $\Omega$ (记为端口 2)。图 3 分别给出了端口 1、2 的输出波形对比图, 可以看出, 无论负载下降时间多长, 两端口输出脉冲最终稳定值均相同, 与理论分析一致。另外, 负载阻抗下降时间对端口 1、端口 2 的波形质量影响并不是单调的, 两路下降时间同步时, 端口 1、2 的波形质量较好。因此为了获得质量良好的输出波形, 应当尽量控制两路负载下降速率相同。

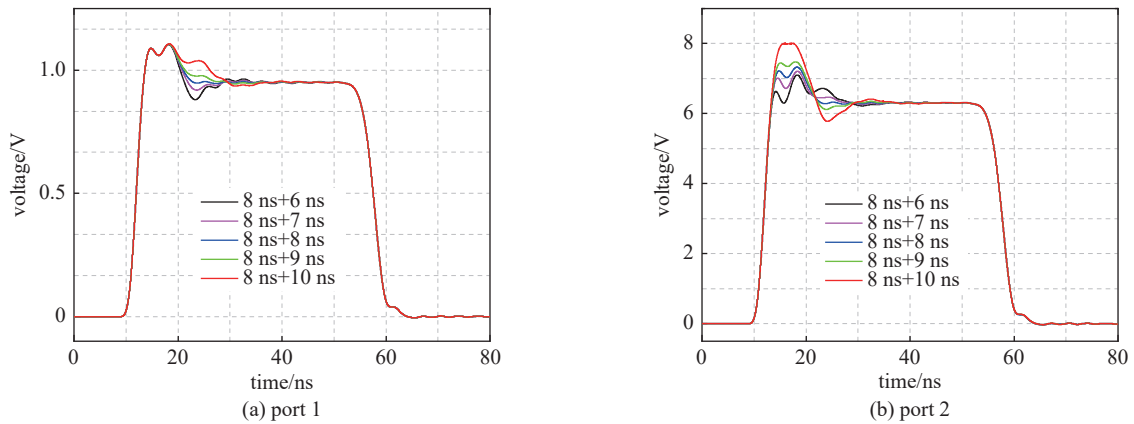


Fig. 3 Output waveforms with discordant load impedance rate

图 3 两路负载阻抗下降速率不一致的输出波形

第三种情况, 两路传输线中一路起始下降时刻对应输出端口电压为 0.4 V(记为端口 1); 另一路负载阻值起始下降时刻对应输出端口电压依次设为 0.15、0.26、0.4、0.72、0.84 V(记为端口 2)。电压小对应起始下降时间早。图 4 分别给出了端口 1、2 的输出波形对比图。

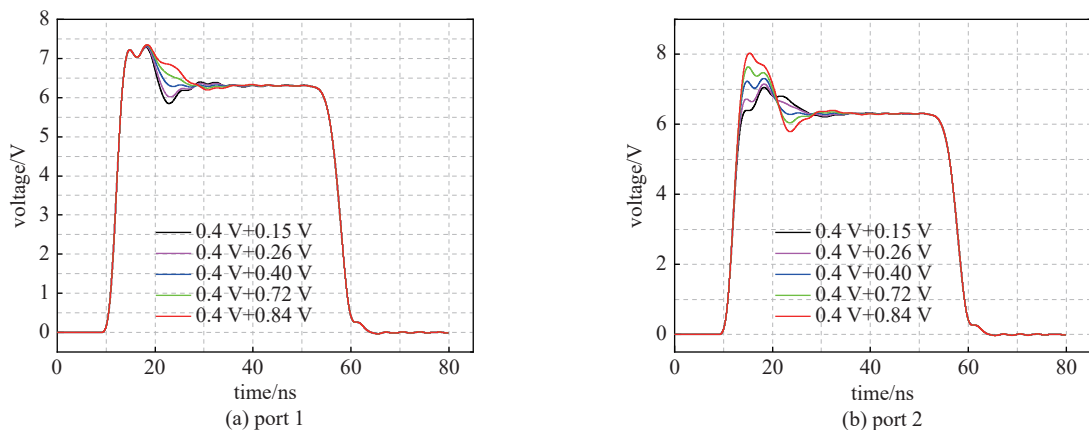


Fig. 4 Output pulses of two-way load impedance at the inconsistency of the start-down time

图 4 两路负载阻抗起始下降时刻不一致时的输出脉冲

负载起始下降时刻不同, 会对端口 1 过冲后一小段波形产生影响, 当端口 2 负载下降起始时间早于端口 1(对应起始下降时刻端口 2 电压小于端口 1), 端口 1 波形在紧随过冲后存在“凹坑”, 该“凹坑”极大可能会影响二极管

正常工作,是不期望出现的。而对于端口 2,影响过冲幅值以及过冲后小段波形,当端口 2 负载起始下降时刻逐渐变晚,过冲振荡明显增大,并且当端口 2 负载下降起始时间晚于端口 1(对应起始下降时刻端口 2 电压大于端口 1),端口 2 波形在紧随过冲后也会出现“凹坑”。因此,综合考虑两端口输出波形质量,应尽可能保证两端口负载起始下降时刻保持一致。综合考虑三种情况,为获得质量良好的输出波形,应该尽可能保证输出两端口负载一致,限定两二极管特性差异不超过 5%。

### 3 电参数对输出脉冲质量影响分析

#### 3.1 传输线阻抗对输出波形质量影响

双路传输线单路阻抗分别为 30、44、60、80、100  $\Omega$  时的输出波形如图 5(a) 所示。可以看出,无论阻抗为何值,最终输出脉冲稳定值均为 0.952 V,与理论分析一致。另外,传输线阻抗会对输出脉冲上升沿及过冲振荡有影响,具体规律如图 5(b),分析得出,随着传输线阻抗的增大,输出脉冲过冲振荡增加但上升沿时间减小,对于二极管工作性能来讲,输出脉冲越接近方波越好,具体来讲,就是上升沿时间越短、平顶时间越长/脉宽越大,过冲、凹坑、振荡占比越小越好。因而,综合考虑绝缘、损耗以及输出波形质量,选定单路阻抗 60  $\Omega$  时输出波形质量较好,此时输出脉冲上升沿约 4.6 ns、过冲振荡约 17%。

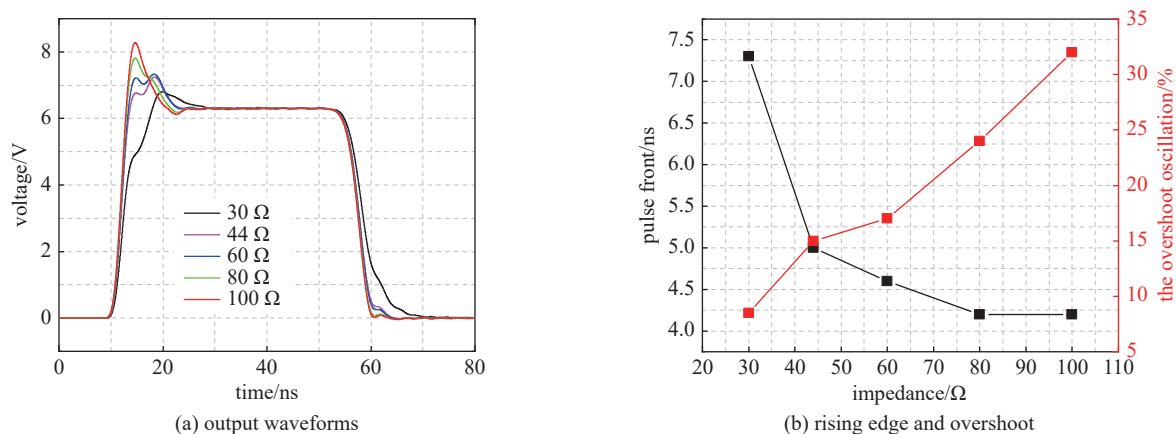


Fig. 5 Difference of output pulses and electrical characteristics of different transmission line impedance

图 5 不同传输线阻抗下输出脉冲及其电学特性差异

#### 3.2 输入脉冲对输出波形质量影响

图 6 分别给出了不同前沿、脉宽输入脉冲下的输出波形。可以看出,随着脉冲上升沿的增加,过冲振荡随之减小,脉宽基本不变;随着输入脉宽的增大,输出脉宽随之增大,对过冲振荡无影响。若将实际的脉冲上升沿限制在 6~8 ns 之间,既可以保证小的过冲振荡,又可以使得上升沿不至于太慢。

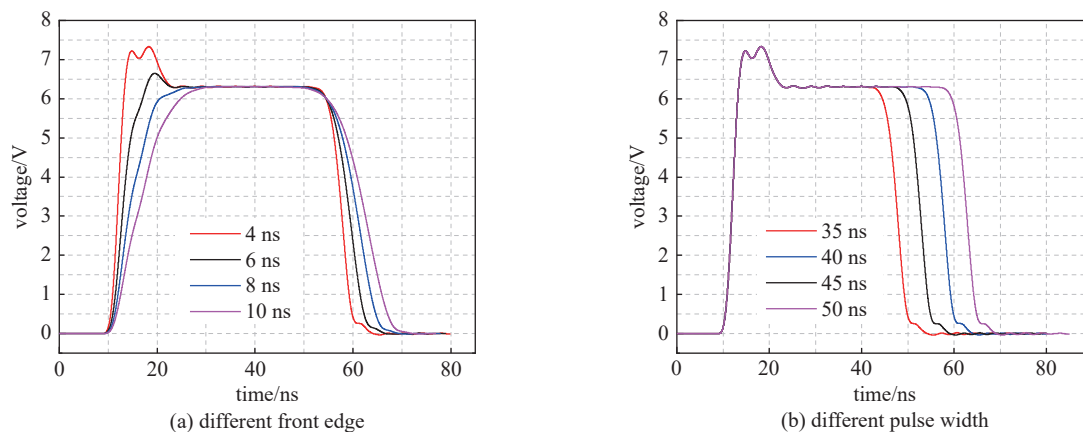


Fig. 6 Effect of input pulse characteristics on output waveforms

图 6 输入脉冲特性对输出波形影响规律

### 4 绝缘分析

双路传输线的“人”字形绝缘子选用聚酰亚胺(PI)材料,其将气体与真空隔离开来,气体侧充 0.5 MPa 的 SF<sub>6</sub>。

设计中涉及 SF<sub>6</sub> 气体击穿、SF<sub>6</sub> 沿面闪络、真空击穿、真空沿面闪络、固体击穿等几种绝缘类型。三结合点是绝缘设计中重点关注的，图 7 给出了三结合点的处置措施：其中 I、III 点通过增加气隙规避了“电场尖点”，II 点通过电极屏蔽效应减小了电场，使得三结合点并不列入风险点。另外通过对电极曲线的细节优化，得到图 8 所示的幅值 500 kV 输入脉冲作用下最大电场云图，将各风险点最大电场及参考标准汇总于表 2，可以看出，各绝缘风险点的最大电场均小于绝缘参考值。判定其绝缘性能是可靠的。

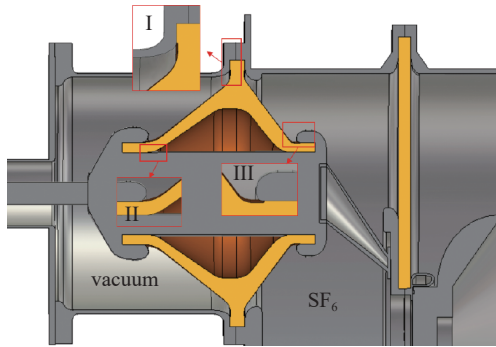


Fig. 7 Triple junctions and disposal measures

图 7 三结合点及处置措施

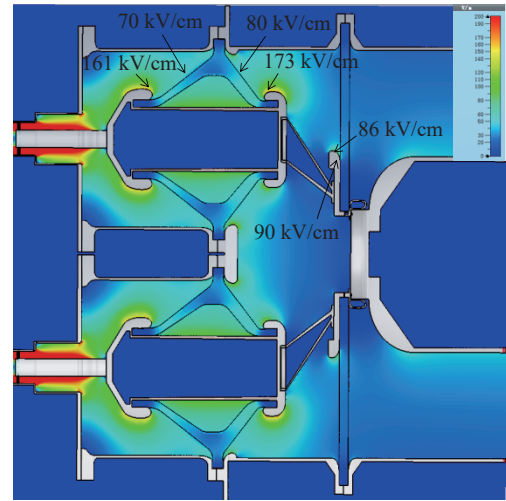


Fig. 8 Maximum electric field cloud under input pulse

图 8 输入脉冲作用下的最大电场云图

表 2 两路输出线绝缘风险点电场及其设计标准

Table 2 Electric field and design standard of dual short pulse transmission structure's insulation point

risk point	$E_{max}/(kV \cdot cm^{-1})$	standards/ $(kV \cdot cm^{-1})$
ball-vacuum	161	218 <sup>[10]</sup>
ball-gas	173	208 <sup>[11-13]</sup>
electrode surface	86	208 <sup>[11-13]</sup>
insulating board	90	104 <sup>[11-13]</sup>
insulator-vacuum	70	100 <sup>[14-16]</sup>
insulator-gas	80	104 <sup>[11-13]</sup>

## 5 结 论

本文设计了一种双路短脉冲输出结构，并利用电磁模拟软件，对脉冲传输过程进行了建模仿真，研究了传输线阻抗、输入脉冲前沿等电学参数对输出波形质量的影响规律，并完成了绝缘风险分析及结构优化。经评估，在前沿 4~8 ns 的准方波输入脉冲下，双路脉冲传输线的输出波形质量与单路传输线相当，其过冲振荡均小于 20%、平顶振荡均小于 1%，且能满足绝缘要求。

### 参考文献：

- [1] 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 Jiancang, Song Xiaoxin, et al. Progress on a 40 GW repetitive pulsed accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 712-716)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [3] 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. An introduction to applied high power pulse technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003)
- [4] 李锐, 张喜波, 苏建仓, 等. 基于 TPG2000 的三路输出线理论设计与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 576-580. (Li Rui, Zhang Xibo, Su Jiancang, et al. Theoretical design and simulation of three transmission lines based on TPG 2000[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 576-580)
- [5] 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)
- [6] 彭建昌, 苏建仓, 张喜波, 等. 20GW/100Hz 脉冲功率源研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 2919-2924. (Peng Jianchang, Su Jiancang, Zhang Xibo, et al. Development of 20GW/100Hz repetitive pulsed accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 2919-2924)
- [7] 宋刚永, 蒙林, 于新华, 等. 双频相对论返波振荡器的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 103-107. (Song Gangyong, Meng Lin, Yu Xinhua, et al.

- Numerical simulation of dual-frequency relativistic backward wave oscillator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(1): 103-107)
- [8] 宋玮, 黄文华, 李佳伟, 等. 高功率微波合成技术进展[J]. *现代应用物理*, 2014, 5(1): 12-20. (Song Wei, Huang Wenhua, Li Jiawei, et al. Development of the high power microwave combination technology[J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(1): 12-20)
- [9] 徐秀栋, 李锐, 曾搏, 等. 脉冲同轴输出装置双锥支撑结构的设计与分析[J]. *现代应用物理*, 2021, 12: 021001. (Xu Xiudong, Li Rui, Zeng Bo, et al. Structural design and analysis of cone-shaped brace for pulse coaxial output device[J]. *Modern Applied Physics*, 2021, 12: 021001)
- [10] 苏兆锋, 杨海亮, 张鹏飞, 等. 脉冲电场下两种电极材料表面电子发射阈值特性的实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 106801. (Su Zhaofeng, Yang Hailiang, Zhang Pengfei, et al. Preliminary experimental research of electron emission characteristics on surface area of two kinds of electrodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 106801)
- [11] 黎斌. SF<sub>6</sub>高压电器设计[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2019. (Li Bin. SF<sub>6</sub> high voltage electrical design[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2019)
- [12] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2015. (Yan Zhang, Zhu Deheng. High voltage insulation technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015)
- [13] 郑殿春. SF<sub>6</sub>介电特性及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (Zheng Dianchun. The dielectric characteristics and application of SF<sub>6</sub>[M]. Beijing: Science Press, 2019)
- [14] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [15] 高巍. 高压纳秒脉冲下真空绝缘沿面闪络特性研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2005. (Gao Wei. Study on flash-over characteristics of vacuum insulation along surface with high pressure nanoseconds[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering of the Chinese Academy of Sciences, 2005)
- [16] 邵涛. 重复频率纳秒脉冲气体击穿研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006. (Shao Tao. Study on repetitive nanosecond-pulse breakdown in gases[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering of the Chinese Academy of Sciences, 2006)