



·脉冲功率技术·

# 一级 Marx 压缩的高稳定纳秒脉冲电源的设计\*

姚学玲<sup>1</sup>, 焦梓家<sup>1</sup>, 孙晋茹<sup>1</sup>, 谌 贝<sup>2</sup>, 陈景亮<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

**摘 要:** 针对目前缺乏标准纳秒高压脉冲电源的现状, 开展高稳定性纳秒高压脉冲电源回路分析、结构设计及性能测试研究。通过建立纳秒脉冲发生器等效电路模型, 仿真计算获得 5 级初级脉冲发生电路参数, 以及一级压缩陡化间隙对纳秒脉冲特性的影响规律。通过纳秒高压脉冲电源结构设计及低抖动电晕稳定开关特性研究, 建立高稳定输出的纳秒脉冲电源系统。研制纳秒电阻分压器, 建立基于 ns 及  $\mu$ s 量级传递校准测试相结合的刻度因数标定方法, 准确获得纳秒电阻分压器的刻度因数。脉冲电源输出特性测试结果表明: 纳秒脉冲电源系统可以输出上升时间  $2.3 \text{ ns} \pm 0.5 \text{ ns}$ 、幅值范围  $10 \sim 60 \text{ kV}$  的指数纳秒脉冲; 输出脉冲电压在全幅值范围内的相对标准偏差不大于  $\pm 1.5\%$ 。

**关键词:** 纳秒脉冲电源; 电阻分压器; 分布电容; 标定方法; 相对标准偏差

中图分类号: TM835

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220362

## Design of high stability nanosecond pulse power supply based on one-stage Marx compression

Yao Xueling<sup>1</sup>, Jiao Zijia<sup>1</sup>, Sun Jinru<sup>1</sup>, Chen Bei<sup>2</sup>, Chen Jingliang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** In response to the lack of standard nanosecond high-voltage pulse power supply, this paper carries out the circuit analysis, structural design and performance testing of high-stability nanosecond high-voltage pulse power supply. By establishing the equivalent circuit model of nanosecond pulse generator, the circuit parameters of 5-stage primary pulse generation and the influence law of one-stage compression steepening gap on the characteristics of nanosecond pulse are obtained by simulation. The nanosecond high-voltage pulse power supply structure design and low jitter corona stabilization switching characteristics are studied to establish a nanosecond pulse power supply system with highly stable output. Development of a nanosecond resistive voltage divider and establishment of a scale factor calibration method based on a combination of nanosecond and microsecond scale transfer calibration tests are made to accurately obtain the scale factor of the nanosecond resistive voltage divider. The pulse power supply output characteristics test results show that the nanosecond pulse power supply system can output exponential nanosecond pulses with a rise time of  $2.3 \text{ ns} \pm 0.5 \text{ ns}$  and an amplitude range of  $10 \sim 60 \text{ kV}$ ; the relative standard deviation of the output pulse voltage in the full amplitude range is within  $\pm 1.5\%$ .

**Key words:** nanosecond pulse supply, pulse resistor divider, distributed capacitance, calibration method, relative standard deviation

强电磁脉冲(HEMP)的能量可以通过线缆、天线、孔隙等结构耦合到信息化系统中,造成电子设备功能混乱、硬件损伤等,电子系统运行的安全性和可靠性严重下降<sup>[1]</sup>。HEMP模拟装置是高功率电磁脉冲防护性能非常重要的试验设备<sup>[2-4]</sup>,但HEMP标准电源、特别是几十kV、上升时间在几个ns、可连接 $50 \Omega$ 负载、且便于同轴输出和测量的高性能的纳秒高压电源,目前国内外并未有相关的文献报道。开展高性能纳秒高压电源及其测量技术的

\* 收稿日期:2022-10-28; 修订日期:2023-03-20

基金项目:强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室开放课题基金项目(SKLIPR2101)

联系方式:姚学玲, xlyao@xjtu.edu.cn。

通信作者:孙晋茹, jinrusun2016@xjtu.edu.cn。

研究,对纳秒脉冲传感器的校验乃至纳秒脉冲发生及测试标准的建立,具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

Marx 回路凭借其结构简单、性能可靠、调节方便等优势,在 HEMP 模拟装置中被广泛采用。研究者基于开关、电容元件和绝缘腔体的一体化设计方法,研制了多种紧凑型 Marx 发生器,用于脉冲激光、GIS 装置高频特性检测、等离子体加热及生物电磁学等<sup>[5-8]</sup>。随着对高强度快前沿纳秒电磁脉冲试验需求的增长,在高电压下,Marx 发生器本身的电感不足以满足上升时间的要求。在此情况下,国内的研究机构通常采用多级 Marx 电路的初级脉冲形成再加上一级或多级脉冲压缩技术<sup>[9]</sup>。谢霖霖等人采用 5 级 Marx 脉冲发生以及一级陡化方法,在等效阻抗  $120\ \Omega$  的条件下,能够产生上升时间  $1.6\ \text{ns}$ 、脉宽  $42\ \text{ns}$  的纳秒脉冲<sup>[10]</sup>;贾伟等人开展了基于 Marx 发生器的中小型紧凑型电磁脉冲模拟器驱动源技术研究,在  $120\sim 180\ \Omega$  负载下可输出上升时间  $1.2\sim 2.7\ \text{ns}$ 、半宽  $32\sim 41\ \text{ns}$  的双指数纳秒波<sup>[11]</sup>;中物院团队采用 5 级 Marx 初级脉冲形成回路和一级陡化回路,在负载阻抗  $150\ \Omega$  的条件下,实现了上升时间  $2.5\ \text{ns}$ 、半宽约  $23\ \text{ns}$ 、输出电压达百 kV 或电场强度在  $0.2\sim 60\ \text{kV}$  范围内可调整的纳秒高压脉冲源<sup>[12-13]</sup>。国外学者同样采用类似的技术方案,将其应用在电压范围几十 kV 到几 MV 量级的 HEMP 模拟装置中<sup>[14-15]</sup>。

但是,上述研究成果中对于研制的脉冲电源的输出稳定性缺乏评估与测试,而纳秒脉冲传感器是准确获得波形全频域信息、有效评估电磁脉冲发生器性能的关键。纳秒双指数脉冲具有上升沿陡、脉冲半宽窄的特点,对测量系统的要求非常苛刻。但在已发表的 HEMP 模拟装置研究成果中,一些研究人员利用未经校准的自制电压传感器进行特定纳秒脉冲信号的测量<sup>[15-17]</sup>,有的甚至未提及测量装置。因此,需要研制出适用于 HEMP 测量的宽频带电压探头,同时解决一直困扰从业者的传感器校准问题,才能对研制的脉冲电源进行精确的评估与测试。

D-Dot 探头和电容电压探头是脉冲功率技术中普遍采用的电压传感器<sup>[18-22]</sup>。然而,D-Dot 探头的输出信号为被测信号的微分,在测量纳秒脉冲时会发生超过记录装置量程范围的高幅值信号,影响测量系统的稳定可靠运行;另外使用积分还原电路将引入额外的测量不确定性,还会造成高频、低频分量不同程度的衰减,而引起纳秒脉冲电压信号的失真。电容式分压器由于高压、低压臂电容介电特性的差异,使得对较宽的频带或较大频率跨度的脉冲信号难以准确测量,同时存在高频响应差等缺陷。

纳秒脉冲传感器的校准方面,往往通过在低强度脉冲下与现有的商业探头<sup>[23]</sup>或标准衰减器<sup>[20,24]</sup>进行对比而完成。在此情况下,测量的有效性完全取决于被选中作为标准的传感器性能,但这些“标准器”的传感因数一般是在  $\mu\text{s}$  脉冲条件下确定的,并且其可追溯性往往无法保证,同时刻度因数是否在纳秒脉冲下不因杂散参数而改变,会极大地影响传感器的测量准确性。由于在纳秒脉冲发生器研制及传感器技术方面存在的稳定性、电磁兼容、校准方法方面的困难,而各国计量机构尚不能对快上升、高幅值的纳秒脉冲测试系统及响应的传感器进行校准<sup>[25]</sup>。因此,发展适用于传感器校准的高稳定纳秒脉冲测试系统,是进行传感器可靠校准和标定的核心,也是评估研发的各型纳秒电磁脉冲电源的输出性能及稳定性是否满足设计要求的關鍵。

本文围绕纳秒高压脉冲电源以及纳秒高压脉冲测量技术开展研究,通过对纳秒脉冲放电回路结构、快速放电开关触发特性的设计、仿真及测试,建立了电压等级  $60\ \text{kV}$ 、上升时间约  $2\ \text{ns}$  的高稳定性纳秒脉冲电源系统;基于对纳秒脉冲电阻分压器的特性研究,研究了纳秒脉冲电源的输出性能,为纳秒脉冲传感器的校验和纳秒脉冲标准的建立奠定了良好的基础。

## 1 纳秒高压脉冲发生的理论分析

### 1.1 纳秒高压脉冲的 Marx 及其一级压缩回路

高压脉冲通常采用 Marx 发生回路产生,但对于上升时间在 ns 量级的高压脉冲,由于 Marx 发生回路剩余电感的限制无法满足快速上升的要求,脉冲压缩成为缩短上升时间的有效措施。纳秒脉冲发生电路原理如图 1 所示,

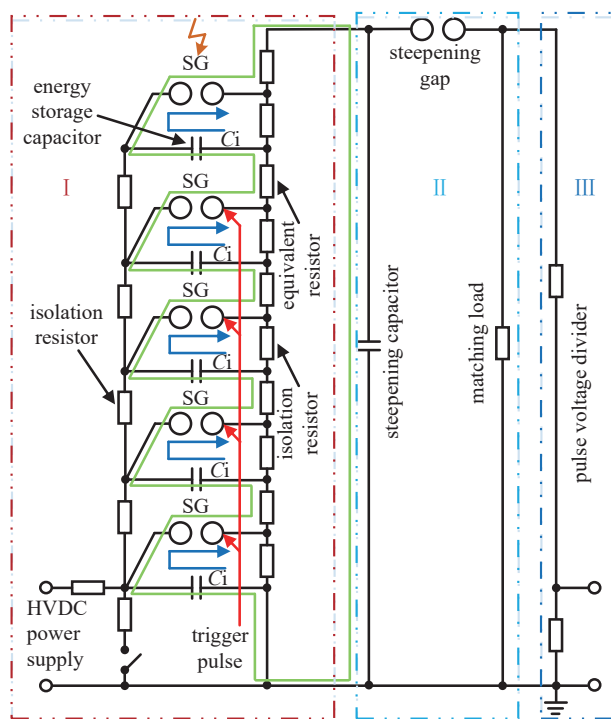


Fig. 1 Principle circuit of nanosecond pulse generation

图 1 纳秒脉冲发生器的原理电路

Marx 初级脉冲发生电路包含 5 级开关, 前 4 级开关在触发脉冲的作用下击穿, 第 5 级开关在倍压作用下自击穿导通, 陡化间隙在初级 Marx 脉冲的作用下自击穿。通过调整陡化间隙的间距和气压改变其自击穿电压, 从而调整其击穿时刻, 实现进一步压缩脉冲电压的目的, 最终在测量端输出纳秒级上升沿的高压脉冲。

纳秒高压脉冲的 Marx 一级压缩回路原理如图 2 所示。Marx 一级压缩脉冲发生回路分为左网孔的初级脉冲

形成回路和右网孔初始脉冲压缩回路。图中:  $C_T$ 、 $L_T$  分别为多级 Marx 回路的储能电容和等效电感;  $S_T$  为 Marx 放电回路的多级放电开关的总表征;  $C_p$  为陡化电容;  $S_p$  为一级脉冲压缩开关;  $L_p$  为陡化回路等效电感;  $R_L$  为匹配负载, 通常为  $50 \Omega$ , 以便与纳秒脉冲的输出结构匹配形成同轴输出。陡化回路中的  $S_p$  在陡化电容  $C_p$  的电流峰值处导通。  $C_p$  远小于主储能电容  $C_T$ ,  $C_p$  所在的支路可近似为开路, 在满足回路过阻尼状态条件下,  $C_T$ 、 $L_T$ 、 $L_p$ 、 $R_L$  构成的二阶多回路可以在负载电阻  $R_L$  两端输出一个单极性的双指数电压波。

### 1.2 纳秒高压脉冲压缩电路的过程解析

纳秒脉冲电源的左网孔初级纳秒脉冲发生回路为一个三阶电路, 右边回路为一个二阶电路。一阶压缩电路的左边网孔回路中, 开关  $S_p$  未导通前是一个三阶电路。假设流过电感  $L_T$  的电流为  $i_{LT}$ , 且其初始电流为 0; 电容  $C_p$  的两端电压为  $v_{CP}$  且初始电压为 0, 而电容  $C_T$  的两端电压为  $v_{CT}$  且其初始电压为  $v_{CT}(0_-)$ 。右网孔二阶电路  $S_p$  在  $t_3$  时刻导通时, 前 3 级电路中  $C_T$ 、 $C_p$  和  $L_T$  的初始电压和初始电流分别为

$$\begin{cases} v_{CT}(t_3) = v_{CT}(0_-) \left( \frac{\beta}{\alpha} - \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \cos(\sqrt{\alpha} t_3) \right) \\ v_{CP}(t_3) = v_{CT}(0_-) \left( \frac{\beta}{\alpha} - \frac{\beta}{\alpha} \cos(\sqrt{\alpha} t_3) \right) \\ i_{LT}(t_3) = \frac{v_{CT}(0_-)}{L_T} \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \sin(\sqrt{\alpha} t_3) \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\alpha = 1/(C_T L_T) + 1/(C_p L_T)$ ;  $\beta = 1/(C_p L_T)$ 。在  $t_3$  时刻后, 一级压缩纳秒发生电路按照四阶电路运行, 求解该四阶电路, 即可获得负载  $R_L$  上电压如式(2)所示。负载上的电压波形  $v_{RL}$  呈现衰减振荡的特点, 每个振荡峰值随时间的增加而减少。对式(2)求导, 可得式(3)。

$$v_{RL}(t) = r_{11}e^{x_1 t} + r_{12}e^{x_2 t} + r_{13}e^{x_3 t} + r_{14}e^{x_4 t} \quad (2)$$

$$v'_{RL}(t_{p1}) = x_1 r_{11}e^{x_1 t_{p1}} + x_2 r_{12}e^{x_2 t_{p1}} + x_3 r_{13}e^{x_3 t_{p1}} + x_4 r_{14}e^{x_4 t_{p1}} = 0 \quad (3)$$

方程式(3)有多个根, 最小的根  $v_{RL}(t)$  为第一次达到峰值的时间  $t_{p1}$ , 对应脉冲波形的主峰。求解上式即可得到负载上纳秒脉冲波形前沿时间  $t_r$  和半宽时间  $t_{half}$ 。

### 1.3 一级脉冲压缩回路的精确求解与仿真验证

典型  $2.5 \text{ ns} \pm 0.5 \text{ ns} / 23 \text{ ns} \pm 5 \text{ ns}$  纳秒脉冲电压的一级压缩回路参数要求如下

$$\begin{cases} 2 \text{ ns} \leq t_r \leq 3 \text{ ns}, & t_{half} \geq 25 \text{ ns} \\ v_{RL}(t_{p1}) \approx 0.75 v_{CT}(0_-) \\ L_T \geq 1 \mu\text{H}, & L_p \approx 100 \text{ nF} \end{cases} \quad (4)$$

通过对回路解析方程的分析, 可计算得出满足上式的回路元件参数, 如表 1 所示。在此基础上, 建立如图 2 所示纳秒脉冲电压的仿真计算电路模型。此外, 为探究陡化时刻以及 Marx 开关的状态对最终输出的纳秒脉冲电压波形质量的影响, 在仿真中通过设置不同的陡化间隙  $S_p$  击穿电压来调整陡化时刻, 并改变  $S_T$  的开关状态, 实现对

表 1 一级压缩电路的部分电路参数

Table 1 Circuit parameters of the one-stage compression circuit

	capacitor/pF	inductance/nH	resistor/ $\Omega$
primary pulse circuit	500	$\sim 1000$	$\sim 2$
steepening circuit	200	100	—
load resistor	—	—	50

一级脉冲压缩回路的仿真验证与特性研究。

在 20 kV 放电电压条件下,一级脉冲压缩回路的纳秒脉冲电压输出结果如图 3 及表 2 所示。从结果可知,随着陡化间隙动作时间的延迟,一级压缩纳秒脉冲的输出电压增加,但输出效率减少;同时,初级脉冲的上升时间增加,陡化压缩纳秒脉冲的上升时间变短。此外,随着陡化间隙动作时间的延迟,纳秒脉冲的波尾出现的振荡现象逐渐显著,这与 Marx 发生回路中的放电开关在动作后的绝缘恢复状态有较大关系,初级 Marx 脉冲发生回路中的储能电容、陡化电容通过陡化间隙开关同时对负载放电,造成了纳秒脉冲波尾的振荡,这种现象可以从图 3(e)及图 3(f)得出。综合仿真结果可以看到,陡化时刻在 20 ns 左右时,输出纳秒脉冲电压的波形更加符合预期的标准双指数波的波形特征,此时一级纳秒脉冲电路输出脉冲电压的上升时间为 3.5 ns 左右。

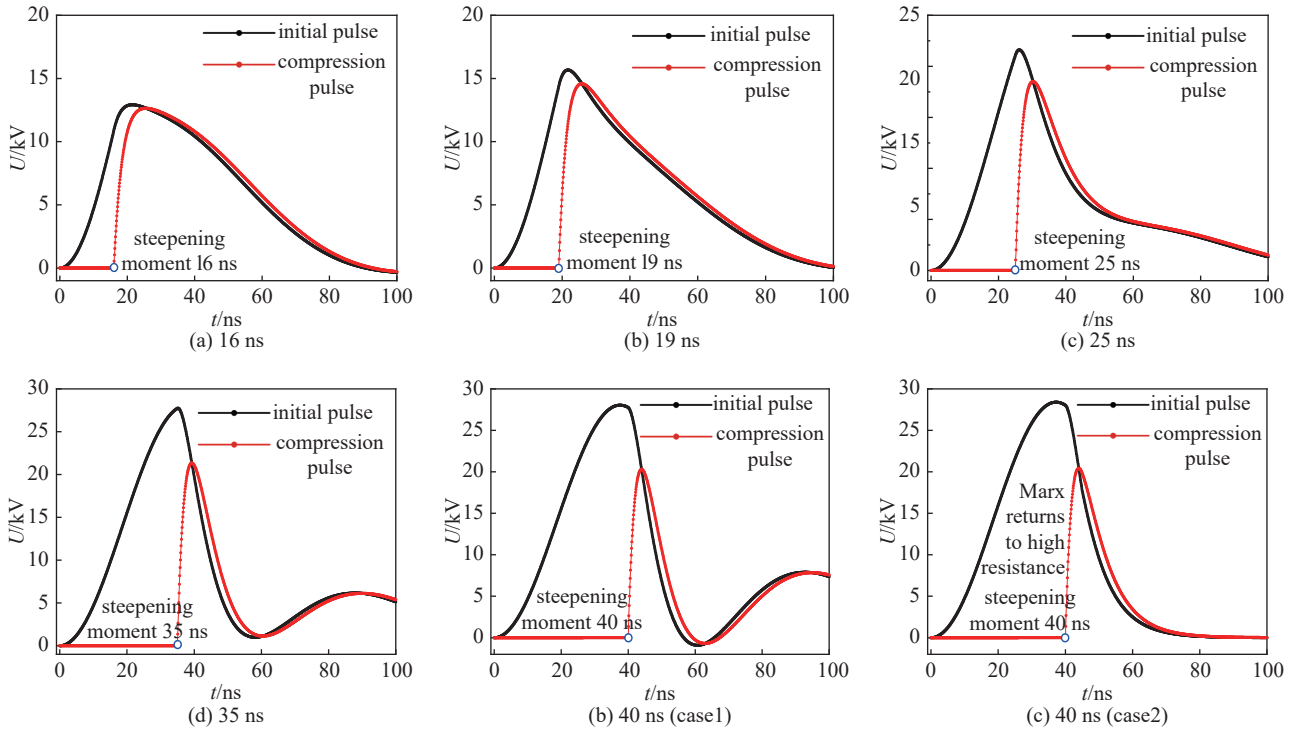


Fig. 3 Effect of steepening moment on the output of nanosecond pulse generator

图 3 陡化时刻对纳秒脉冲源输出结果的影响

表 2 陡化开关动作时间对纳秒脉冲电压参数的影响

Table 2 Effect of steepening switch action time on nanosecond pulse voltage parameters

steepening time/ns	rise time/ns		peak output voltage/kV		efficiency/%
	primary pulse	compressed pulse	primary pulse	compressed pulse	
16	11.58	4.492	14.15	12.94	91.45
19	12.97	3.438	16.08	14.48	90.05
25	16.70	2.809	21.12	18.89	89.44
35	21.59	2.305	28.17	21.59	76.64
40	21.88	2.223	28.40	20.41	71.87

回路电感从波形上升时间及输出效率方面影响纳秒脉冲参数,如图 4 所示。陡化时刻为 19 ns 时,回路电感从 100 nH 缩减至 60 nH 后,纳秒脉冲的上升时间从 3.438 ns 减少到 2.275 ns,同时电源输出效率增大,输出电压从 14.48 kV 增加到 14.85 kV。因此,为产生上升时间更短的纳秒脉冲电压波形,设计采用高气压、短间距的陡化间隙以尽可能减小等效电感。

## 2 纳秒高压脉冲电源的设计

根据上述对纳秒高压脉冲电源的理论分析,建立由 Marx 发生器回路、电晕稳定开关、陡化电容、陡化间隙以及匹配负载组成的纳秒脉冲电源(图 5),各部件以同轴管式结构密封于腔体。



### 2.1 电晕稳定放电开关

为了提升 5 级 Marx 发生回路放电的一致性, 本文设计了具有优良放电性能的电晕稳定放电开关, 图 6(a) 为电晕稳定放电开关的结构示意图, 开关的主电极采用凹凸结构, 触发介质在触发极与阴极之间, 其直径为 1 mm, 触发极与触发介质高出阴极凹表面约 0.1 mm, 此外开关阴阳极之间的距离可调。

电晕稳定放电开关的工作性能受到电场分布特征影响, 从图 6(b) 的电场仿真结果可以得出, 本文设计的电晕稳定畸变开关的电场不均匀系数约为 2.5; 电极凹凸处电场发生明显畸变, 有利于提升开关触发导通的一致性和稳定性。为验证电晕稳定开关的工作特性, 测量了不同气压背景下 ( $N_2$  环境) 电晕稳定放电开关触发导通的时延和抖动, 如图 7 所示。可以看到: 在  $N_2$ 、0.2 MPa 环境下, 在欠压比 65% 至 85% 的范围内, 电晕稳定开关的放电时延小于 10 ns, 抖动不大于 2 ns, 可确保 5 级 Marx 放电开关的同步放电及放电稳定性。

### 2.2 Marx 发生器、同轴陡化电容等重要部件的设计与集成

根据原理电路, 建立图 8(a) 所示的 Marx 发生器。储能电容为 0.65 nF; 隔离电阻使用无感电阻 (2 k $\Omega$ ); 电晕稳定开

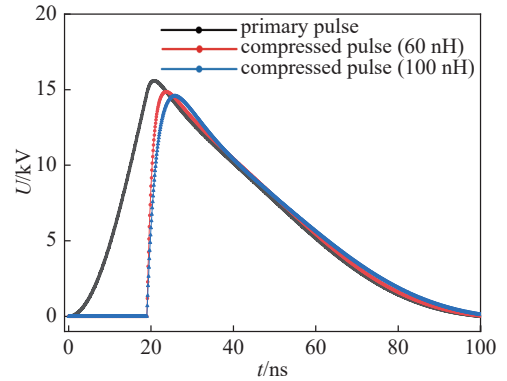


Fig. 4 Effect of steepening inductance on the output of one-stage compression nanosecond pulse

图 4 陡化电感对一级压缩纳秒脉冲输出的影响

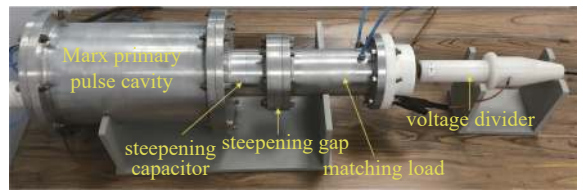
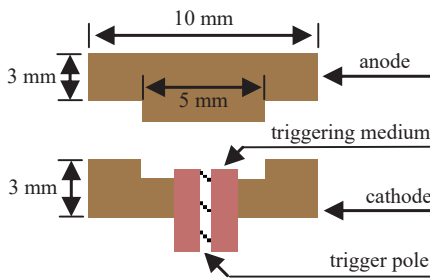
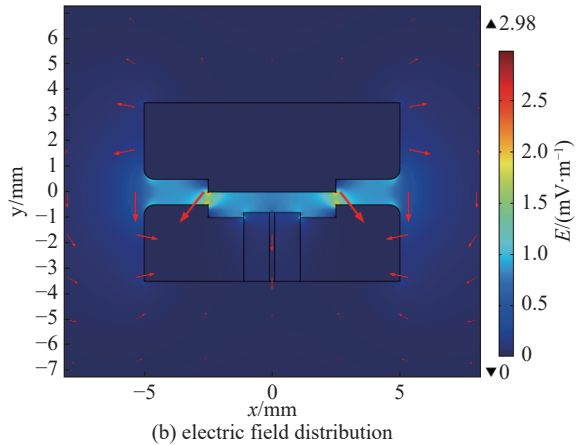


Fig. 5 Structure of nanosecond pulse generator circuit

图 5 纳秒脉冲发生器回路的结构



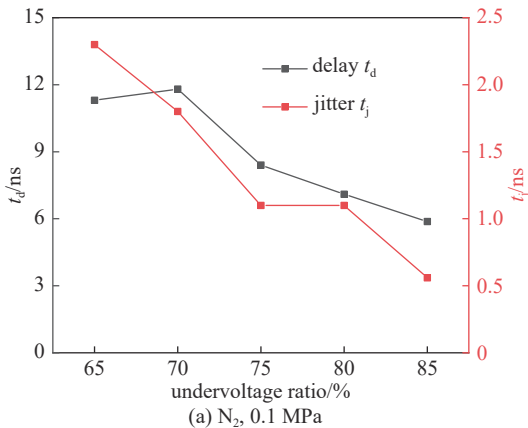
(a) structure of corona discharge switch



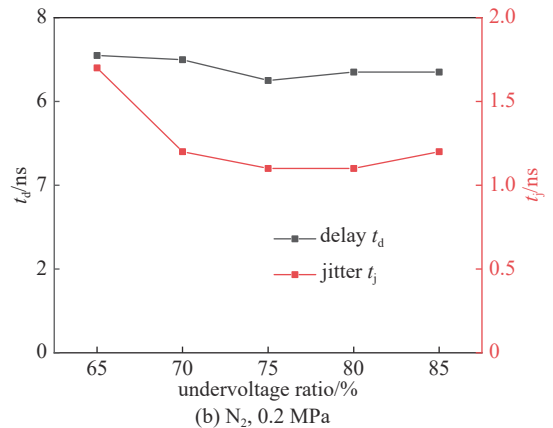
(b) electric field distribution

Fig. 6 Structure and electric field distribution of corona stabilized discharge switch in Marx generation circuit

图 6 Marx 发生回路电晕稳定放电开关的结构及电场分布



(a)  $N_2$ , 0.1 MPa



(b)  $N_2$ , 0.2 MPa

Fig. 7 Discharge time delay and jitter of corona stabilized discharge switch

图 7 电晕稳定放电开关的放电时延和抖动

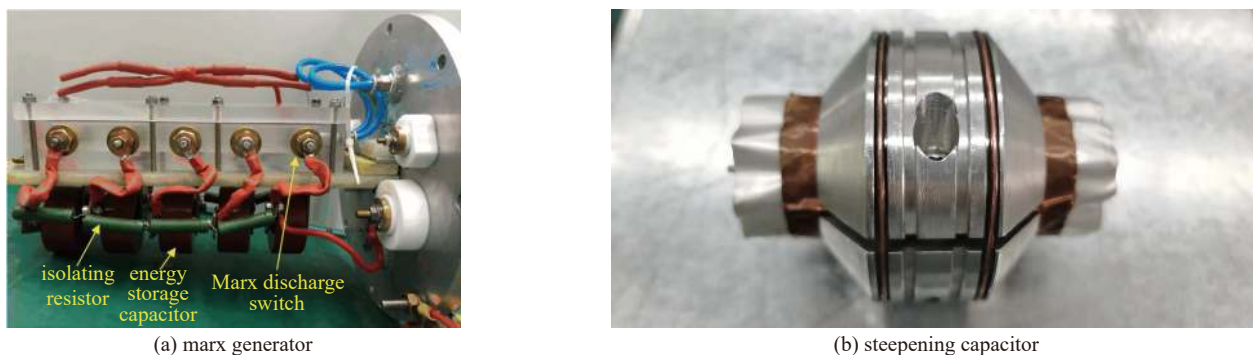


Fig. 8 Marx generator and steepening capacitor

图 8 Marx 发生回路和陡化电容

关主间隙的直流击穿电压为 5 kV(标准大气压,空气环境);回路连接采用铜编织线以减少寄生电感。

同轴陡化电容器具有电感小、耐压高、可设计性强等特点,本文设计了如图 8(b)所示同轴陡化电容。依据本项目脉冲源输出指标为 60 kV,从绝缘的角度考虑,设计的陡化电容的耐压不小于 120 kV,且根据表 1 中对陡化电容参数的计算结果,将陡化电容的容量控制在 200 pF 左右。依据本项目脉冲源输出指标为 60 kV,从绝缘的角度考虑,设计的陡化电容的耐压不小于 120 kV 即可。根据表 1 中对陡化电容参数的计算结果,将陡化电容的容量控制在 200 pF 左右。同轴陡化电容内芯的一侧与 Marx 初始纳秒脉冲发生器的输出端连接,另一端连接陡化开关间隙腔体,同轴陡化电容的外层电极与纳秒脉冲源的同轴金属外壳相连。陡化开关的结构设计采用与电晕稳定开关相同的设计原理,其电极设计为凹凸结构。将陡化间隙的其中一个电极与陡化电容同轴安装连接,另一个电极与纳秒脉冲源的匹配电阻安装在一个密闭腔体中,且同轴连接,完成纳秒高压脉冲电源的集成。

### 3 纳秒高压脉冲电源的性能测试

#### 3.1 纳秒电阻分压器的研究与设计

针对高压脉冲电压的测量过程中电容分压器存在的过冲现象,开展高压脉冲传感器及纳秒脉冲测量系统的理论和实验研究,研制和开发高耐压、高稳定性纳秒高压脉冲分压器。

首先,通过脉冲电阻分压器的建模计算和实验研究,获得电阻分压器的分布电容随电阻分压器结构参数变化的规律,确定本项目 60 kV 纳秒脉冲电阻分压器的优化结构参数为  $(\phi 20 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}) \times (100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm})$ 。随后进行电路分析,得出纳秒脉冲电阻分压器响应时间的理论计算公式,根据本文的设计需要,将纳秒脉冲电阻分压器的阻值设计为 500~1000  $\Omega$  可以满足要求。受趋肤效应的影响,高频电阻比低频时大得多,而本文设计的电阻分压器用于测量纳秒级上升时间的脉冲电压,为避免电阻分压器在测量高频信号时产生较大误差,使用薄膜电阻作为脉冲电阻分压器的高压臂电阻和低压臂电阻。

在上述纳秒脉冲电阻分压器关键技术研究的基础上,研制和开发了如图 5 所示的用于耐压不低于 60 kV 的纳秒脉冲电阻分压器,其高、低压臂电阻串联安装在同轴结构管心,且外壳采用聚四氟乙烯绝缘。

#### 3.2 纳秒电阻分压器的校准

本文采用标准微秒脉冲下刻度因数传递的方法对纳秒电阻分压器的刻度因数进行标定,并与直流或交流稳态下分压器的刻度因数相比较,以验证纳秒电阻分压器刻度因数标定方法的可行性和合理性。采用上升时间为 1 ns 的纳秒方波发生器测试脉冲电阻分压器的阶跃响应特性,使用泰克 DPO3054 示波器记录数据。

从各传感器的阶跃方波响应可以计算出,纳秒电阻分压器、P5100A、P6015A 和 PVM-1 高压探头的阶跃响应时间分别为 1.06、0.67、1.22 和 3.80 ns,如图 9 所示。其中,P6015A 的响应时间与其带宽(75 MHz)存在明显不合理的差异,而北极星 PVM-1 高压探头的阶跃方波响应时间过大。因此后续标定实验使用 P5100A 探头。

纳秒电阻分压器、泰克 P5100A 高压探头经过中国第三方计量中心站的校准鉴定。其中,纳秒电阻分压器的稳态刻度因数为 1020,1.2/50  $\mu\text{s}$  雷电脉冲下,其动态刻度因数的平均值为 1025。由此得出纳秒电阻分压器静态、动态刻度因数之间的误差 0.49%,支撑了用高精度电桥、阶跃方波响应标定纳秒传感器性能参数的合理和可行性。同时,为验证纳秒电阻分压器刻度因数标定的合理性,在 1.2/50  $\mu\text{s}$  标准雷电脉冲和纳秒脉冲电压下,本文与经校准的刻度因数为 100.76 的 P5100A 高压探头进行横向比对测量,测试波形如图 10 所示。

测试结果如下:在 1.2/50  $\mu\text{s}$  脉冲电压下,纳秒电阻分压的刻度因数为 1016.91,与其稳态和纳秒脉冲下刻度因

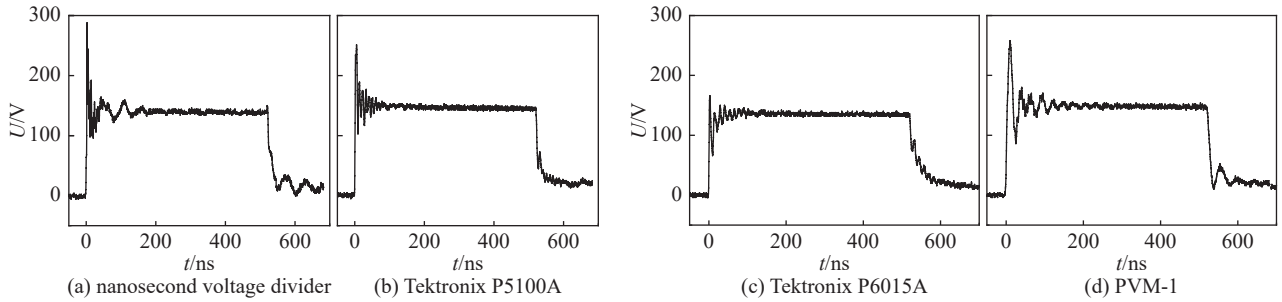


Fig. 9 Square wave response of the sensor involved

图 9 参与传递的传感器的方波响应

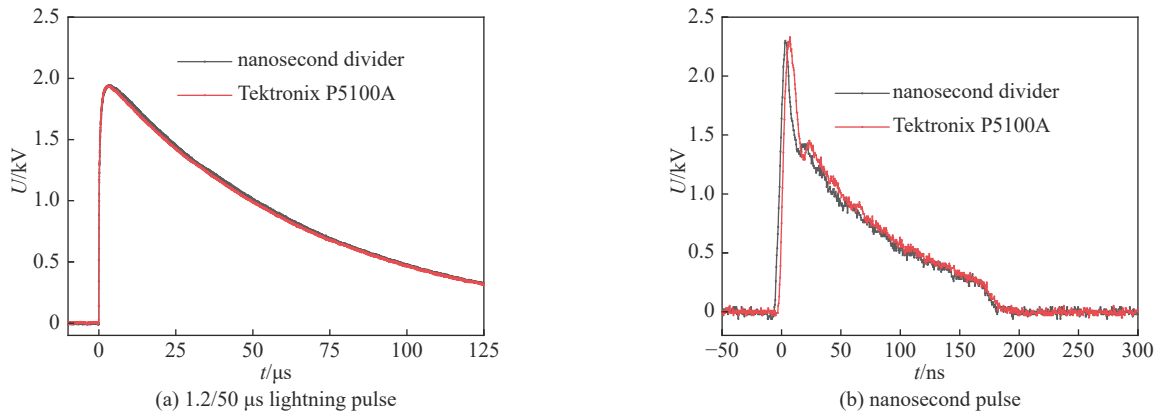


Fig. 10 Comparison measurement waveform of nanosecond resistance divider with P5100A

图 10 纳秒电阻分压器与 P5100A 的对比测量波形

数之间的误差分别为 $-0.30\%$ 和 $-0.79\%$ 。在纳秒脉冲电压作用下,纳秒电阻分压的刻度因数为 $1020.63$ ,与其稳态和 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 电脉冲下刻度因数之间的误差分别为 $-0.062\%$ 和 $-0.43\%$ 。以泰克 P5100A 高压探头校准的纳秒电阻分压器的刻度因数之间的绝对偏差仅为 $2.10$ ,相对误差约为 $2.00\%$ 。

基于以上测试结果可分析得出:在无纳秒高压脉冲校准源以及纳秒脉冲标准器的情形下,采用微秒标准源或者微秒标准分压器进行纳秒电阻分压器的校准,在方法是可行的。但纳秒电阻分压器须进行阶跃响应实验,以确保电阻分压器的响应时间或者上限频率能够满足纳秒电压脉冲准确测量的要求。

### 3.3 纳秒脉冲电源的输出特性测试结果

在 $\text{SF}_6$ 气体环境中,调整两个腔体的气压和 Marx 回路充电电压,可以获得上升时间 $2.3\text{ns}\pm 0.5\text{ns}$ 、半峰值时间 $25\text{ns}\pm 5\text{ns}$ 、幅值范围 $10\sim 60\text{kV}$ 的纳秒脉冲,为获得更高的测试精度,使用泰克 MSO54 示波器(带宽 $1\text{GHz}$ 、采样率 $6.25\text{GS/s}$ )测量输出波形如图 11 所示。

纳秒脉冲回路及其纳秒脉冲测量单元构成了纳秒脉冲电源系统。为了考核脉冲电源系统的稳定性,本文在 $60\text{kV}$

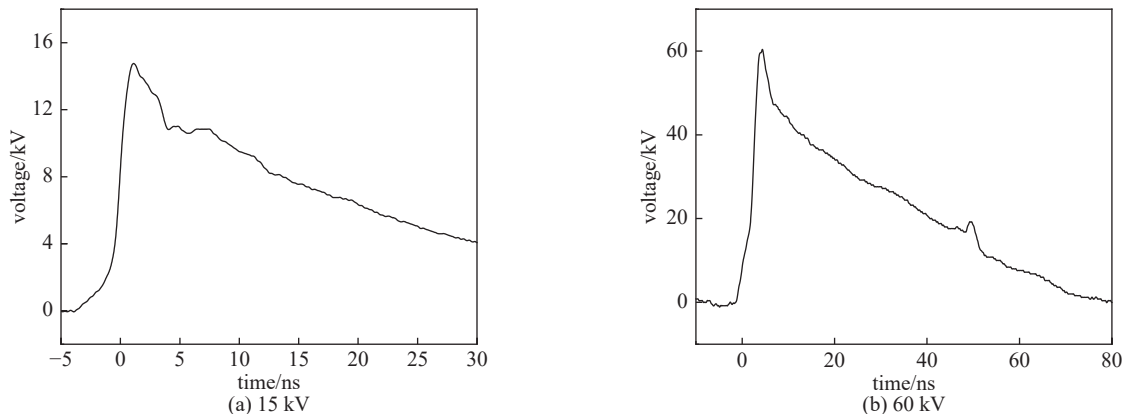


Fig. 11 Output waveforms of nanosecond power supply

图 11 纳秒电源的输出波形

范围内进行了选取 6 个电压等级、分别进行 30 次重复放电实验,采用相对标准偏差表征纳秒电压输出的稳定性。从表 3 所示的测试结果可以得出,在输出电压的 10~60 kV 范围内,纳秒脉冲电源系统输出纳秒脉冲的相对标准偏差不大于 $\pm 1.5\%$ 。针对目前无纳秒标准源和无纳秒标准器的现状,该高稳定性纳秒脉冲电源系统的研制对纳秒脉冲校准计量技术的研究和标准化进程的推进,具有非常重要的理论意义和应用价值。

表 3 纳秒脉冲电源的输出特性  
Table 3 Output characteristics of nanosecond pulse power supply

No.	voltage amplitude at each voltage block/kV					
	15 kV	25 kV	35 kV	40 kV	50 kV	60 kV
1	14.88	24.16	35.55	40.10	50.60	59.78
2	14.90	24.65	34.72	39.86	49.89	57.90
3	15.24	23.87	34.38	39.59	49.87	61.06
4	15.03	24.48	34.93	39.65	51.35	60.24
5	14.76	24.17	35.34	40.17	51.49	59.51
6	14.79	24.49	34.48	39.39	51.09	61.03
7	14.91	24.35	35.98	39.61	50.33	58.55
8	15.01	24.75	34.71	39.88	50.28	59.07
9	15.14	24.47	34.50	40.10	50.55	59.04
10	14.77	24.18	35.66	39.71	49.85	60.64
11	14.15	24.32	35.92	40.36	51.06	59.06
12	14.88	24.15	35.30	39.42	51.73	59.51
13	14.78	24.49	34.99	39.36	50.24	59.05
14	14.89	24.05	34.45	39.69	51.37	59.44
15	14.88	24.68	35.13	39.66	50.65	58.57
16	14.89	24.84	34.38	38.97	51.35	59.04
17	14.87	24.50	34.88	39.95	50.66	58.68
18	14.80	24.79	34.71	39.88	50.69	60.64
19	14.91	23.68	35.45	40.66	50.24	58.67
20	15.22	24.22	34.93	40.05	50.23	60.23
21	14.88	24.17	34.71	39.65	49.84	60.16
22	15.00	24.33	34.47	40.10	50.59	59.49
23	15.14	24.32	34.68	39.86	50.68	60.98
24	15.00	24.04	35.13	39.36	50.57	59.91
25	15.14	24.00	34.54	39.92	52.67	59.44
26	14.65	24.34	34.11	39.61	49.46	59.09
27	15.01	24.67	33.99	39.70	50.67	59.48
28	14.92	24.69	34.92	39.79	49.86	58.56
29	15.12	24.15	34.71	39.61	50.92	59.10
30	15.12	24.54	34.68	40.05	50.96	59.07
average value	14.92	24.35	34.88	39.79	50.66	59.50
standard deviation (relative standard deviation)	0.21(1.383%)	0.29(1.171%)	0.49(1.417%)	0.34(0.845%)	0.68(1.336%)	0.82(1.375%)

## 4 结 论

本文采用一级压缩的 5 级 Marx 纳秒脉冲设计方案,研制了高稳定性纳秒脉冲电源系统。通过建立纳秒脉冲发生回路的等效电路模型,获得了上升时间  $2.3 \text{ ns} \pm 0.5 \text{ ns}$ 、半峰值时间  $25 \text{ ns} \pm 5 \text{ ns}$  的一级压缩纳秒脉冲发生回路的电路参数。基于紧凑型纳秒高压脉冲回路结构及电晕稳定开关设计,建立纳秒脉冲电源系统。通过纳秒电阻分压器测量不确定度的溯源校准研究,提出了纳秒电阻分压器刻度因数和测量不确定性的校准方法,对集成的纳秒脉冲电源进行了测试,测试结果表明:由纳秒脉冲电源与纳秒电阻分压器组成的纳秒脉冲电源系统,可以输出幅值范



围 10~60 kV、上升时间  $2.3 \text{ ns} \pm 0.5 \text{ ns}$  的双指数波纳秒脉冲，纳秒脉冲电源系统输出幅值的相对标准偏差不大于  $\pm 1.5\%$ 。

#### 参考文献：

- [1] IEC 61000-2-9-1996, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: environment - section 9: description of HEMP environment - radiated disturbance. Basic EMC publication[S].
- [2] Wraight A, Prather W D, Sabath F. Developments in early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) test methods[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 492-499.
- [3] Hoad R, Radasky W A. Progress in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) standardization[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 532-538.
- [4] Sabath F, Potthast S. Tolerance values and the confidence level for high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) field tests[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 518-525.
- [5] Lara M B, Mayes J R, Mayes M G, et al. A modular compact Marx generator design for the Gatling Marx generator system[C]//Proceedings of 2005 IEEE Pulsed Power Conference. 2005.
- [6] Carey W J, Mayes J R. Marx generator design and performance[C]//Proceedings of the 25th International Power Modulator Symposium. 2002: 625-628.
- [7] Pecastaing L, Paillol J, Reess T, et al. Very fast rise-time short-pulse high-voltage generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1822-1831.
- [8] Hahn U, Herrmann M, Leipold F, et al. Nanosecond, kilovolt pulse generators[C]//Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001: 1575-1578.
- [9] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Application of pulse power technology[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2016)
- [10] 谢霖森, 贾伟, 郭帆, 等. 用于有界波模拟器的紧凑型纳秒脉冲源[J]. 环境技术, 2014(s1): 60-62. (Xie Linshen, Jia Wei, Guo Fan, et al. A compact high voltage pulse generator for bounded-wave EMP simulator[J]. *Environmental Technology*, 2014(s1): 60-62)
- [11] 贾伟, 陈志强, 郭帆, 等. 基于MARX发生器的中小型电磁脉冲模拟器驱动源[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073203. (Jia Wei, Chen Zhiqiang, Guo Fan, et al. Drivers of small and medium scale electromagnetic pulse simulator based on Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073203)
- [12] 张北镇, 宋法伦, 甘延青, 等. 300 kV有界波EMP模拟器高压脉冲源的设计与研制[J]. 现代应用物理, 2019, 10: 030401. (Zhang Beizhen, Song Falun, Gan Yanqing, et al. Design and development of a 300 kV high-voltage generator for bounded-wave EMP simulator[J]. *Modern Applied Physics*, 2019, 10: 030401)
- [13] 周开明, 李铮迪, 邓建红. 大动态高精度有界波电磁脉冲模拟器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063004. (Zhou Kaiming, Li Zhengdi, Deng Jianhong. Design of a high-precision and widely tunable bounded-wave electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063004)
- [14] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2554-2558.
- [15] Schilling H, Schluter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[C]//Proceedings of the 10th IEEE International Pulsed Power Conference on Digest of Technical Papers. 1995: 1359-1364.
- [16] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1000 pps high-voltage nanosecond pulse generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(2): 258-265.
- [17] 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.
- [18] Baum C E. Electromagnetic sensors and measurement techniques[M]//Thompson J E, Luessen L H. Fast Electrical and Optical Measurements. Dordrecht: Springer, 1986.
- [19] 王启武, 李炎新, 石立华. 纳秒电磁脉冲测量用D-dot探头设计及实验[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 115004. (Wang Qiwu, Li Yanxin, Shi Lihua. Design and experimental research of D-dot probe for nuclear electromagnetic pulse measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 115004)
- [20] Liu Jinliang, Ye Bing, Zhan Tianwen, et al. Coaxial capacitive dividers for high-voltage pulse measurements in intense electron beam accelerator with water pulse-forming line[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(1): 161-166.
- [21] 王亮平, 郭宁, 李岩, 等. 测量强光一号负载电压的电容分压器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 696-700. (Wang Liangping, Guo Ning, Li Yan, et al. Capacitive divider for voltage measurement of diode load on Qiangguang-I accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 696-700)
- [22] Zhang Lu, Mao Chen, Pu Lu, et al. Conical voltage sensor for measuring very fast transient overvoltage up to 3 MV in ultra-high-voltage class gas-insulated switchgear[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2018, 12(3): 405-410.
- [23] Liu Yi, Lin Fuchang, Hu Guan, et al. Design and performance of a resistive-divider system for measuring fast HV impulse[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 60(3): 996-1002.
- [24] He W, Yin H, Phelps A D R, et al. Study of a fast, high-impedance, high-voltage pulse divider[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(11): 4266-4269.
- [25] Khan M S, Agazar M, Le Bihan Y. Development of a standard measuring system for high-voltage nanosecond pulse measurements[C]//Proceedings of 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. 2020: 1-2.