



·高电压及脉冲功率技术·

变压器寄生参数和负载特性对高压脉冲波形的影响

朱振宇, 吴淑群, 卞伟杰, 顾亚楠, 张潮海

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

摘 要: 构建了输出电压幅值为 0~20 kV、脉冲重复频率为 0.25~20 kHz 的双极性高压脉冲电源实验平台, 研究了变压器寄生参数与负载特性对输出脉冲波形的影响。采用等效电路复频域解析方法, 分析了变压器寄生参数对输出脉冲波形的上升沿、平顶及下降沿的影响规律, 并通过改变变压器绕线方案间接验证。发现变压器分布电容和漏感越大, 输出脉冲波形上升沿与下降沿越平缓, 过冲电压幅值越大, 并采用脉冲变压器二次侧均匀密绕、一次侧均匀疏绕、高匝数的方案进行优化。进一步分析了纯阻性、阻容性或阻感性负载特性对输出高压脉冲波形的影响规律, 发现电阻值增大(5~50 k Ω), 过冲电压幅值增大, 脉冲上升沿和下降沿变陡; 当负载电阻回路串联小电容时, 过冲电压幅值显著增大, 而电容值高于一定值时输出脉冲波形恢复至与纯电阻波形一样; 当负载电阻回路串联电感时, 输出脉冲波形下降沿变平缓。

关键词: 双极性 Marx; 脉冲变压器; 寄生参数; 等效负载; 高压脉冲电源

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210086

Influence of transformer's parasitic parameters and load characteristics on high-voltage pulse waveform

Zhu Zhenyu, Wu Shuqun, Bian Weijie, Gu Yanan, Zhang Chaohai

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The experimental platform of bipolar high-voltage pulse power supply with an output voltage amplitude of 0–20 kV and pulse repetition rate of 0.25–20 kHz is constructed. The influence of parasitic parameters of the pulse transformer and load characteristics on the output pulse waveform is studied. By the complex frequency domain analysis method, the effects of parasitic parameters of the transformer on the rising edge, flat top, and falling edge of the output pulse wave are analyzed theoretically, which are further indirectly verified by changing the winding scheme of the transformer. It is found that the larger the distributed capacitance and leakage inductance of the transformer are, the longer the rising time and falling time of the voltage pulse are, and the larger the overshoot voltage is. An optimization winding scheme of the pulse transformer is proposed in that the secondary winding is evenly and densely wound, the primary winding is evenly and loosely wound, and the number of turns is as high as possible. Furthermore, the influence of load characteristics on the output high-voltage pulse waveform is analyzed. (1) When the resistance increases (5–50 k Ω), the overshoot voltage increases, and the rising time and falling time of the voltage pulse decreases. (2) When a resistor is connected in series with small capacitors, the overshoot voltage increases significantly. If the capacitance is higher than a certain value, the output pulse waveform will be the same as that in the case of a pure resistor. (3) When a resistor is connected in series with an inductor, the falling time of the voltage pulse becomes longer.

Key words: bipolar Marx; pulse transformer; parasitic parameters; equivalent load; high voltage pulse power supply

高压脉冲电源是一种重要的放电等离子体激励源, 广泛应用于等离子体医学、等离子体材料表面改性、流动控制及等离子体点火助燃等^[1-6]。与高压直流或高压交流激励源相比, 利用高压脉冲电源产生等离子体的方法具有

* 收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977110); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NT2020007)

作者简介: 朱振宇(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事脉冲电源技术研究。

通信作者: 吴淑群(1988—), 男, 博士, 教授, 主要从事高电压与放电等离子体研究。

能量利用率高和电子密度高的特点。在飞行器流动控制或航空发动机点火应用中,对高压脉冲电源提出了重量轻、体积小的苛刻要求^[7-8]。

固态开关电路^[9-14]与脉冲变压器相结合的升压方案是实现轻量化高压脉冲电源的途径之一。与全固态高压脉冲电路相比,该方案在输出电压等级较高时具有结构简单、升压比高、功率密度高等优势。葡萄牙里斯本大学的 L. M. Redondo 等^[15]在 2007 年采用了固态开关电路与变压器相结合的方案,提出了一种带能量复位的单极性 Marx 电路结构和控制策略,有效利用了脉冲关闭状态下变压器的单向磁化能量,提高了电源的效率和输出脉冲幅值,研制了一台在 5 kΩ 阻性负载条件下输出 -5 kV 幅值、10 kHz 重复频率、4~10 μs 脉宽的单极性脉冲电源。国内重庆大学的熊青等^[16]基于不带截尾控制的单极性 Marx 电路和脉冲变压器,研制了一台输出 0~35 kV 幅值、1~10 000 Hz 重复频率、0.25~10 μs 脉宽且极性可变的单极性脉冲电源,并提及了脉冲变压器的漏电感、分布电容、磁化电感和升压比等因素可能对输出脉冲形状产生较大影响。国内复旦大学的刘克富等^[17]采用桥式双极性 Marx 电路和脉冲变压器结合方案,建立了考虑脉冲变压器寄生参数的等效电路模型,并基于时域解析法,构建了变压器寄生参数与输出脉冲幅值之间的理论关系,最终研制了一台输出 0~25 kV 幅值、0.1~5 kHz 重复频率、2 μs 脉宽的双极性脉冲电源。大连理工大学陈希有等^[18]提出将两组带截尾控制的单极性 Marx 电路和脉冲发生器相结合的双极性脉冲形成方案,两个 Marx 电路共用一个直流输入电源,两个脉冲变压器副边串联,最终研制出一台输出 1.6 kV 幅值、50 kHz 重复频率、8~12 μs 脉宽的双极性脉冲电源。从上述文献来看,脉冲变压器寄生参数是影响高压脉冲电源输出波形的主要因素,但均是采用集总参数等效电路的时域解析方法,其推导过程较复杂、不易直观体现寄生参数影响规律,且较少提及变压器寄生参数的控制方法。另外,现有研究多数局限于阻性负载及介质阻挡放电负载测试,而较少提及负载特性本身对输出高压脉冲波形的影响^[19-20]。

高压脉冲波形对放电等离子体的产生与物理特性具有重要影响,如快速纳秒脉冲上升沿利于提高等离子体的电子温度和电子密度^[21]。为了进一步深入认识脉冲变压器寄生参数与负载特性对输出高压脉冲波形的影响规律,本文构建了一套固态开关电路与脉冲变压器相结合的高压脉冲电源实验平台,采用复频域解析法,研究了变压器寄生参数对输出高压脉冲波形的影响,并通过改变变压器绕制方式进行实验验证;进一步通过仿真和实验,分析了纯阻性、容性和感性负载对输出高压脉冲波形的影响。

1 高压脉冲电源实验平台

本文所使用的实验平台是一套自行研制的高压脉冲电源系统。该电源系统主电路的设计包括两个部分:固态双极性脉冲形成电路和高变比脉冲变压器,其电路原理如图 1 所示。固态双极性脉冲形成电路的拓扑结构由若干可级联的低压双极性脉冲形成单元构成。其中,除了构成全桥的 4 个开关管 S_{ai} , S_{bi} , S_{ci} , S_{di} ($i \in N$, $1 \leq i \leq 2$, 下同) 以外,还包括前后级全桥正向连接支路上的一个开关管 S_{chi} 和一个箝位二极管 D_{chi} 。该两级电路在带截尾的控制策略下可以将高压直流变换成双极性脉冲方波,脉冲输出幅值为 0~±2 kV 可调,脉宽为 1 μs,频率为 0.25~20 kHz

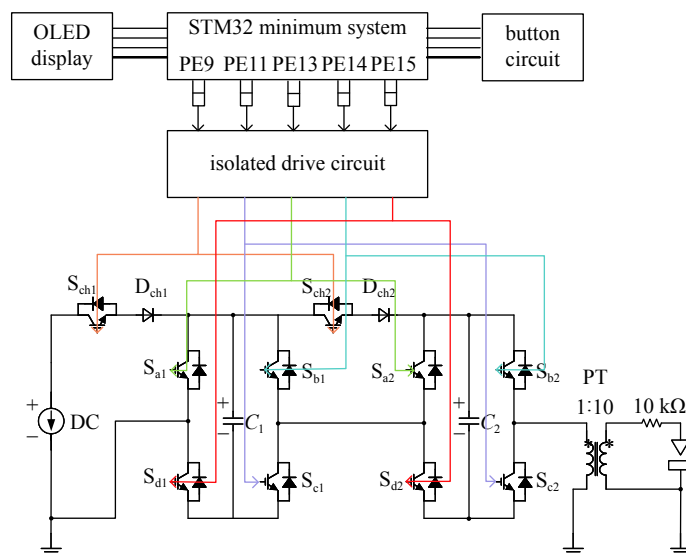


Fig. 1 Circuit schematic diagram of high voltage pulse power system

图 1 高压脉冲电源系统电路原理图

可调,脉冲上升沿和下降沿小于 20 ns。其中,在固体双极性脉冲形成电路中采用了截尾控制策略,其是通过在 1 μ s 脉宽中插入 0.5 μ s 死区实现的,电路中储能电容对变压器原边绕组的放电过程只持续 0.5 μ s,小于一个上升沿过冲振荡周期,剩余的 0.5 μ s 死区时间内主要依靠电路中半导体器件结电容上的残余能量维持电压。脉冲变压器的匝数比为 1 : 10,磁心为铁基纳米晶闭合磁环,磁环尺寸为 120 mm \times 70 mm \times 20 mm,绕组为多股并绕的高压硅胶绝缘导线,采用环氧树脂固体灌封方案。脉冲电源输入侧采用直流源供电,输出侧的变压器副边一端接地,另一端作为高压输出端。实验中采用高压探头 Tektronix P6015A 测量电压波形,电流探头 Pearson 6585 测量流过负载到地的电流波形,泰克示波器 MDO3034 记录电压电流波形。图 2 是高压脉冲电源实物。整个电源系统的最大输出功率为 800 W, \pm 20 kV 双极性脉冲输出和 20 k Ω 负载情况下电能变换效率为 77%。图 3 是输出的双极性脉冲电压波形。此时直流输入电压为 620 V,输出电压峰值 20 kV,脉冲频率为 20 kHz,脉宽为 1 μ s。

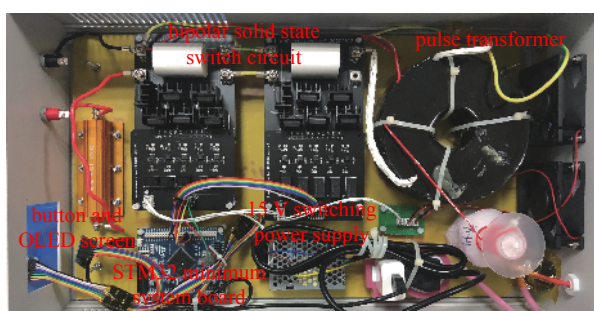


Fig. 2 Circuit prototype of high voltage pulse power supply system

图 2 高压脉冲电源系统电路实物图

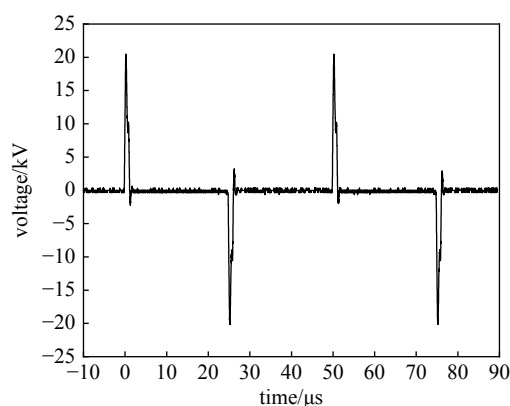


Fig. 3 Output bipolar pulse voltage waveform of high voltage pulse power supply system

图 3 高压脉冲电源系统输出双极性脉冲电压波形图

2 变压器寄生参数对输出高压脉冲波形的影响

2.1 理论分析

图 4(a) 为 IEEE 标准定义的脉冲变压器集总参数等值电路^[22-23]。在高变比升压应用场合,将变压器一、二次侧绕组铜损、磁心铁损对应的等效电阻和阶跃激励源内阻合并在一起,用 R_1 表示;变压器一、二次侧绕组间分布电容与二次侧绕组分布电容合并,用 C_2' 表示;一、二次侧漏感合并在一起,用 L_s 表示;脉冲激励和负载都经过了理想化处理,负载可简化为纯阻性,用 R_2' 表示,输入可看作为理想阶跃电压,幅值为 E ,负载上的电压用 U_2' 表示,一次侧绕组的分布电容为 C_1 。二次侧等效参量均已折算至一次侧,简化后的等值电路如图 4(b) 所示。

标准方波经过脉冲变压器后输出波形不可避免地会受到图 4(b) 中寄生参数的影响而发生不同程度的畸变,分别体现在上升沿、平顶和下降沿 3 个方面。在该 3 个阶段中,关键集总参数元件作用不同,可将图 4(b) 等效电路进一步简化成图 4(c)、图 4(d) 和图 4(e) 等效电路,从而将原本待求解电路的四阶偏微分方程简化为二阶偏微分方程或一阶偏微分方程。对于一阶偏微分方程,可以采用传统的时域解析法进行处理。然而,对于二阶偏微分方程,时域解析法求解复杂、不直观。因此,本文采用复频域解析法,再通过坐标变换得到特定参数下的时域解,分析寄生参数对脉冲波形的上升沿、平顶和下降沿的影响,可简化分析过程且便于理解。

脉冲上升沿这一物理过程可以看作理想阶跃电压输入零状态响应。脉冲变压器励磁电感一般远大于漏感,励

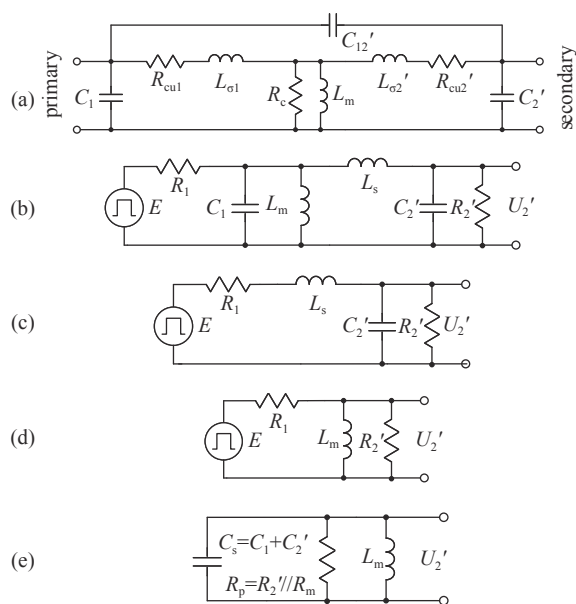


Fig. 4 Equivalent circuit diagram of pulse transformer

图 4 脉冲变压器等值电路图

磁支路 L_m 在脉冲上升沿期间可以近似看成断路。另外,高变比升压场合下二次侧绕组匝数远大于一次侧绕组匝数,可以忽略一次侧分布电容 C_1 ,分析上升沿的等值电路为图 4(c)。在复频域中建立电路的方程,得到复频域的解,然后借助数学工具软件求出给定参数下的时域解析式并绘制相关时域曲线进行分析。建立图 4(c)所示等值电路的复频域方程式(1)。式(2)定义了时间常数 τ_r 和分布系数 δ_r 这两个寄生参数耦合变量,将其代入式(1)并化简可以得到复频域下脉冲上升沿电压大小相对于输入阶跃电压幅值随时间变化的归一化表达式(3)。利用 Matlab 拉氏逆变换函数求解式(3)在不同 δ_r 值下对应的时域表达式并绘制其时域波形。如图 5 所示,横轴是时间相对于时间常数 τ_r 的归一值,纵轴是脉冲上升沿电压大小相对于输入阶跃电压幅值 E 的归一值。从脉冲上升沿幅值和时间归一化无量纲曲线可知,如果 δ_r 变小,上升沿会变陡而过冲则会变大, δ_r 取 0.8 是一种比较理想的折衷情况。此外,上升时间常数 τ_r 主要取决于 C_2' 和 L_s 的乘积。

$$U_2(s)' + \left(\frac{U_2(s)'}{R_2'} + sC_2'U_2(s)' \right) (R_1 + sL_s) = \frac{E}{s} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tau_r = \sqrt{C_2' L_s} \sqrt{\frac{R_2'}{R_1 + R_2'}} \\ \delta_r = \frac{R_1 C_2' + L_s / R_2'}{2 \sqrt{C_2' L_s}} \sqrt{\frac{R_2'}{R_1 + R_2'}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{U_2(s)'}{E} = \frac{1}{s^2 \tau_r^2 + 2s \tau_r \delta_r + 1} \frac{1}{s} \quad (3)$$

脉冲平顶过程可以看作是准直流状态,可近似忽略 C_1 、 C_2' 和漏感 L_s 的影响,其等值电路为图 4(d)。电路等价的独立状态方程为式(4)。式(5)中定义了表征输出输入静态电压关系的传递系数 α 和准直流低频时间常数 τ_1 ,进一步得到时域下脉冲平顶电压相对于输入阶跃电压幅值随时间变化的归一化表达式(6)。输出电压随时间增加呈现自然指数幕下降的关系,其下降速率取决于时间常数 τ_1 。图 6 为间接表征变压器寄生参数对脉冲平顶影响的标准无量纲曲线,横轴是时间相对于时间常数 τ_1 的归一值,纵轴是脉冲平顶电压大小相对于输入阶跃电压幅值 E 的归一值。

$$\begin{cases} U_2(t)' = L_m \frac{di_L}{dt} \\ E = U_2(t)' + \left(i_L + \frac{U_2(t)'}{R_2'} \right) R_1 \\ U_2(0)' = \frac{ER_2'}{R_1 + R_2'} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'} \\ \tau_1 = L_m \frac{R_1 + R_2'}{R_1 R_2'} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{U_2(t)'}{E} = \alpha e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (6)$$

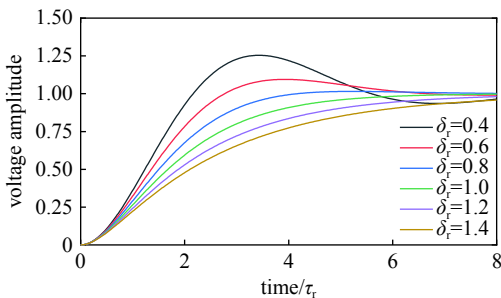


Fig. 5 Standard dimensionless curve during rising edge of pulse
图 5 脉冲上升沿期间标准无量纲曲线

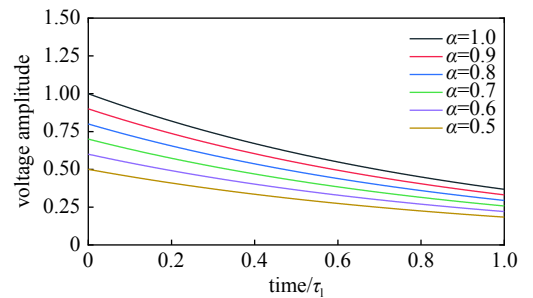


Fig. 6 Standard dimensionless curve during pulse flattening
图 6 脉冲平顶期间标准无量纲曲线

在下降沿阶段,由于主动截尾控制的作用,脉冲结束瞬间阶跃电压激励随即断开,变压器中的感性和容性集总参数元件 L_m , L_s , C_1 和 C_2' 中储存的能量会耗散在整个等值电路中,引起脉冲下降沿的振荡,此阶段电路可以看成处于零输入响应,可以得到图 4(e) 所示的简化 RLC 并联电路。电路状态方程为式(7)。类似的可以得到式(8)的时间常数 τ_f 和分布系数 δ_f 及式(9)的复频域下脉冲电压大小相对于输入阶跃电压幅值随时间变化的归一化表达式。这里忽略了脉冲平顶期间的顶降,同时假设 $R_2' \gg R_1$, 近似认为下降沿截尾时刻电容电压为 E , 励磁电感电流基本为 0。如图 7 所示,如果 δ_f 变大,下降沿会变陡且反向过冲也会变小,因此 δ_f 在允许范围内越大越好。

$$\frac{U_2(s)'}{R_p} + \frac{U_2(s)' + s i_{L_m}(0^-)}{sL} + sC_s U_2(s)' - C_s U_c(0^-) = 0 \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_f = \sqrt{L_m C_s} \\ \delta_f = \sqrt{\frac{L_m}{4R_p^2 C_s}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{U_2(s)'}{E} = \frac{\tau_f^2 s}{\tau_f^2 s^2 + 2\tau_f \delta_f s + 1} \quad (9)$$

2.2 实验结果

为了定性研究寄生参数对脉冲变压器输出波形的影响,通过改变脉冲变压器绕线方案间接影响变压器某一个或某几个分布参数,验证上述理论分析结果。采用的绕线方案包括绕线方向、绕线匝数和绕线分布。脉冲变压器原边输入为双极性脉冲波形(频率 5 kHz、幅值 1 kV、脉宽 1 μ s),负载为 50 k Ω /100 W 高频高压电阻。此时,理论输出脉冲的平顶幅值应为 10 kV,下文的上升沿时间、上升沿过冲电压幅值和下降沿过冲电压幅值均按照理论计算。脉冲变压器详细参数如下:励磁电感 L_m : (5 \pm 1) mH,一次侧绕组漏感 $L_{\sigma 1}$: (5 \pm 1) μ H,一次侧绕组分布电容 C_1 : (500 \pm 100) pF,一次侧绕组电阻 R_{cu1} : (2 \pm 0.5) Ω ,二次侧绕组漏感 $L_{\sigma 2}$: (70 \pm 10) μ H,二次侧绕组分布电容 C_2 : (2 \pm 0.5) pF,二次侧绕组电阻 R_{cu2} : (10 \pm 5) Ω ,一、二次侧绕组分布电容 C_{12} : (10 \pm 5) pF。

首先,改变绕线方向,间接影响脉冲变压器的分布电容。将 90 匝副边绕组均匀紧密地单层绕制在磁环上,其首尾距离 2 cm 左右,9 匝一次侧绕组沿着磁环一周均匀疏绕在副边绕组上,一次侧绕组绕制方向与二次侧绕组绕制方向保持一致,且一、二次电压同相,称为正常绕制;对照实验则将二次侧绕组绕制方向反向,且一、二次电压相位相反,称为反向绕制。如图 8 所示,正常绕制情况下输出脉冲电压波形的上升时间为 130 ns,而反向绕制情况下输出脉冲电压波形的上升时间则增加至 146 ns,两种绕制情况下的上升沿过冲电压幅值均为 7.8 kV,过冲基本保持不变。这是由于反向绕制方式中,一、二次侧绕组电场分布反向,绕组间电场能增加,绕组间的动态电容值变大,又因为单层绕制无需考虑层间电容,且匝间分布电容不变,故图 4(c) 中的 C_2' 和图 4(e) 中的 C_s 稍有增大,而其他寄生参数基本不变。结合式(2)和式(8)以及实验现象可知,上升时间常数 τ_r 变大,而上升沿分布系数 δ_r 变化相对较小,所以反向绕制情况下输出脉冲电压波形的上升时间比正常绕制方式要长,上升沿过冲幅值基本保持不变。

其次,改变绕线匝数,保持匝比不变,影响脉冲变压器的漏感与分布电容。二次侧绕组均匀紧密地单层绕制在

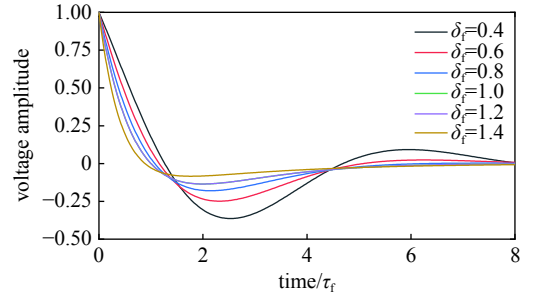


Fig. 7 Standard dimensionless curve during falling edge of pulse

图 7 脉冲下降沿期间标准无量纲曲线

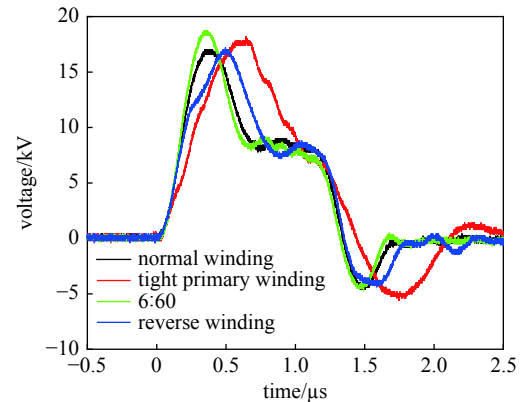


Fig. 8 Comparison of output positive pulse waveforms under different winding conditions

图 8 不同绕制情况下输出正脉冲波形对比

磁环上,一次侧绕组沿着磁环一周同向均匀疏绕在二次侧绕组上,绕制方式为正常绕制。其中,将一、二次侧匝数比从 9:90 改为 6:60。如图 8 所示,将绕组匝数改为 6:60 匝比后,其输出的上升沿过冲幅值从 7.8 kV 显著增大为 9.7 kV,输出脉冲电压上升时间从 130 ns 减小为 122 ns,而下降沿过冲幅值保持为约 5.6 kV。这是由于减少绕组匝数将导致匝间距离变大,匝间分布电容减小,同时一次侧匝数减小会引起漏感 L_s 和励磁电感 L_m 减小,故图 4(c) 中的 C_2' , L_s 减小,图 4(e) 中的 C_s , L_m 近似同比减小,结合式(2)和式(8)以及实验现象可知,上升沿时间常数 τ_r 减小,上升沿分布系数 δ_r 稍减小,下降沿分布系数 δ_f 基本不变,所以 6:60 匝比情况下输出脉冲电压波形的上升时间比正常绕制方式要短,上升沿过冲幅值更大,而下降沿过冲幅值不变。

最后,改变绕组分布,影响脉冲变压器的漏感与分布电容。采用正常的绕制方式,90 匝二次侧绕组均匀紧密地单层绕制在磁环上,首尾距离 2 cm 左右,9 匝一次侧绕组继续同向绕制在副边绕组上。对照组的一次侧绕组则改为在磁环小部分区域紧凑密绕,称为一次侧密绕。如图 8 所示,一次侧密绕方式输出脉冲电压波形的上升时间显著长于正常绕制,正常绕制的上升时间为 130 ns,而采用一次侧密绕方式的上升时间增加到 174 ns。此外,采用一次侧密绕方式输出的上升沿过冲幅值从 7.8 kV 增大为 8.6 kV,下降沿过冲幅值从 5.6 kV 增大为 6.2 kV,高于正常绕制方式的上升沿过冲幅值和下降沿过冲幅值。这是由于采用一次侧紧凑密绕的方式,会导致一次侧线圈高度减小,漏感增大。同时,一次侧绕组紧凑密绕会导致一次侧绕组的分布电容明显增大,故图 4(c) 中的 C_1 , L_s 和图 4(e) 中的 C_s 均增大,结合式(2)和式(8)以及实验现象可知,上升沿时间常数 τ_r 明显增大,上升沿分布系数 δ_r 和下降沿分布系数 δ_f 均减小,所以一次侧密绕情况下输出脉冲电压波形的上升时间比正常绕制方式要长,上升沿过冲幅值和下降沿过冲幅值均增大。

3 负载特性对输出脉冲波形的影响

放电等离子体负载多种多样,实际上较为复杂。为了能够了解负载特性对脉冲波形的影响,本文简单的将等离子体负载等效为纯阻性、阻容性或阻感性等值网络来进行分析。输入直流电压为 500 V,脉冲频率为 5 kHz,脉宽 1 μ s,脉冲变压器采用 2.2 节正常绕制的方式。

首先,选取阻值为 5, 10, 50, 100 k Ω 的纯电阻负载,研究输出脉冲波形变化规律。仿真和实验结果分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示,发现输出脉冲波形的电压过冲幅值和上升沿受负载阻值的影响较大。当负载阻值从 5 k Ω 增加至 50 k Ω 时,实验发现上升沿处电压过冲幅值从 4.5 kV 增加至 8 kV,脉冲上升沿时间从 245 ns 减小至 182 ns;实验与仿真结果趋势一致。这是由于负载阻值增大,使得图 4(c) 中的 R_2' 和图 4(e) 中的 R_p 均增大,结合式(2)和式(9)以及实验现象可知,上升沿时间常数 τ_r 稍有增大,上升沿分布系数 δ_r 和下降沿分布系数 δ_f 显著减小,所以上升沿过冲幅值和下降沿过冲幅值均显著增大,输出脉冲电压波形的上升时间减小。当负载阻值大于 50 k Ω 后,负载相当于开路,改变负载阻值对波形几乎无影响。在文献 [16-17, 24-26] 中,同样发现了纯阻性负载情况下,输出脉冲波形存在电压过冲现象,上升沿过冲比例为 11%~28%,比本文结果明显更低。这可能是变压器磁心材料、绕制参数及电阻值不同造成的。如文献 [16] 的变压器是采用一、二次侧分开紧密绕制,电阻值为 20 k Ω ,文献 [24] 中的电阻负载为 1500 Ω ,文献 [26] 采用了铁氧体磁心材料。

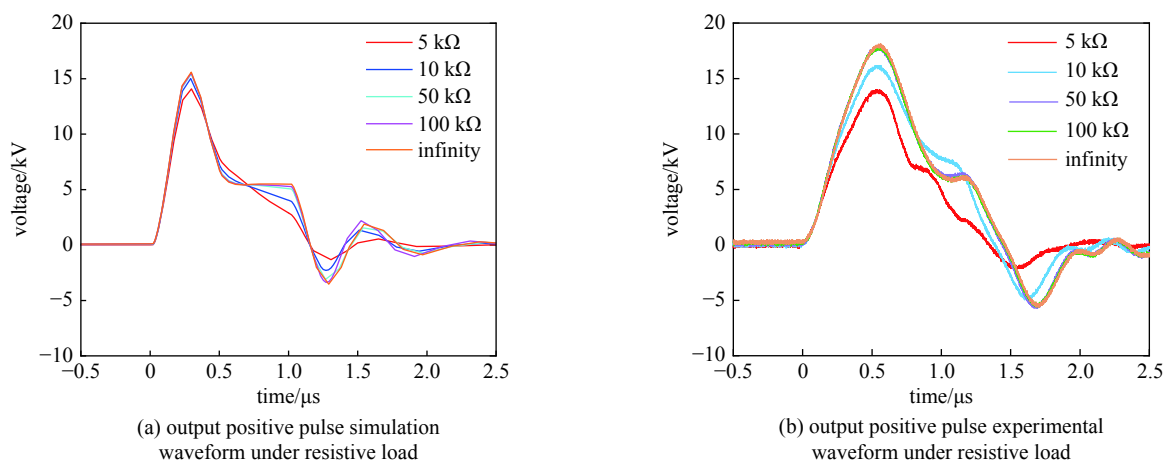


Fig. 9 Simulation and experimental waveform of output positive pulse under resistive load

图 9 阻性负载下输出正脉冲电压仿真和实验波形

其次,考虑到实验室和工业应用中介质阻挡放电负载的等效电容变化范围大(从 pF 级至 μF 级)^[27-29],本文选取容量为 5 pF, 2 nF, 1 μF 的电容分别与 5, 50 k Ω 电阻串联构成阻容性负载,研究阻容性负载对输出脉冲波形的影响。如图 10 和图 11 所示,相比于 5 k Ω 阻性负载,串联 5 pF 小电容后输出电压上升沿过冲幅值从 4.8 kV 增大为 8.9 kV,下降沿过冲幅值从 3.1 kV 增大到 6.5 kV,仿真与实验结果现象一致。在这种情况下,负载容性分量增大,相当于脉冲变压器模型中的电容增大,故图 4(c)中的 C_2' 和图 4(e)中的 C_s 均增大,上升沿分布系数 δ_r 和下降沿分布系数 δ_f 均减小,引起上升沿过冲幅值和下降沿过冲幅值均显著增大。其中,5 pF 小电容上分得的电压峰值为 15.6 kV,具有较大的电压分量。当串联电容增大为 1 μF 时,阻容性负载的电压波形基本和纯阻性负载的电压波形保持一致。当阻性负载为 50 k Ω 时,串联不同容值的电容对脉冲输出电压波形影响较小。由此可见,当阻性分量较小时(5 k Ω),脉冲电压的输出波形受电容容值的影响较大,电容分量越小,输出电压的过冲幅值越大;当阻性分量较大时(50 k Ω),脉冲电压的输出波形受电容容值的影响很小。在文献 [17] 中,负载为介质阻挡放电,其介质等效电容 C_d 大小为 366.28 pF,发现上升沿处的电压过冲比例约为 30%,明显大于纯电阻负载情况下的电压过冲比例,与本文结果类似。

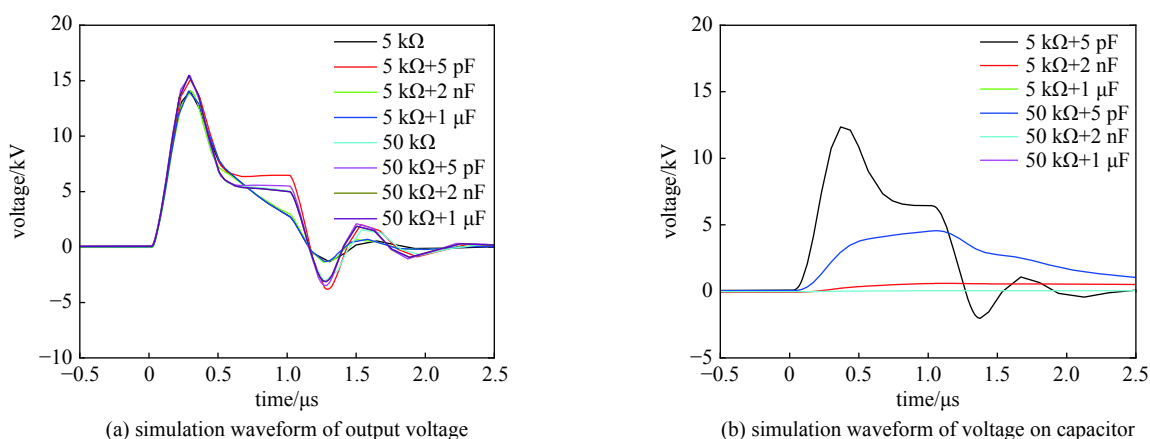


Fig. 10 Simulation of output positive pulse and voltage on capacitor under resistive and capacitive load

图 10 阻容性负载下输出正脉冲及电容上电压仿真波形

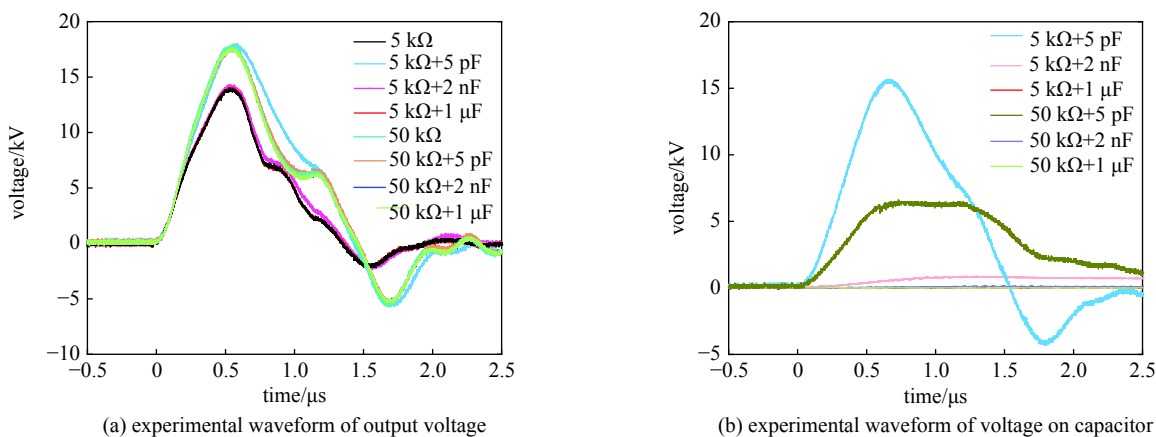


Fig. 11 Output positive pulse experimental voltage waveform under resistive capacitive load

图 11 阻容性负载下输出正脉冲及电容上电压实验波形

最后,选取 5, 50 k Ω 电阻分别与 360, 540 μH 电感串联组合构成阻感性负载,研究阻感性负载对输出脉冲波形的影响。如图 12 和图 13 所示,相比于 5 k Ω 阻性负载,5 k Ω 阻性负载串联 360 μH 的电感后,上升沿过冲电压幅值从 4.8 kV 增大为 5.6 kV,下降沿过冲电压幅值从 3.1 kV 减小为 1.9 kV。这是由于负载感性分量增大,使得脉冲变压器模型中的电感增大,故图 4(c)中的 L_s 和图 4(e)中的 L_m 均增大,上升沿分布系数 δ_r 减小,而下降沿分布系数 δ_f 增大,引起上升沿过冲幅值增大,而下降沿过冲幅值减小。5 k Ω 阻性负载串联 540 μH 与串联 360 μH 的电感情况下输出波形基本相同。类似于阻容性负载的情况,当阻感性负载电阻阻值较大时(50 k Ω),串联电感后对脉冲输出电压波形影响较小。此外,阻感性等效负载中感值越大,感抗越大,脉冲作用期间电感上分得的电压也较大,并且电感值的影响会随着阻性分量的增加而减小。

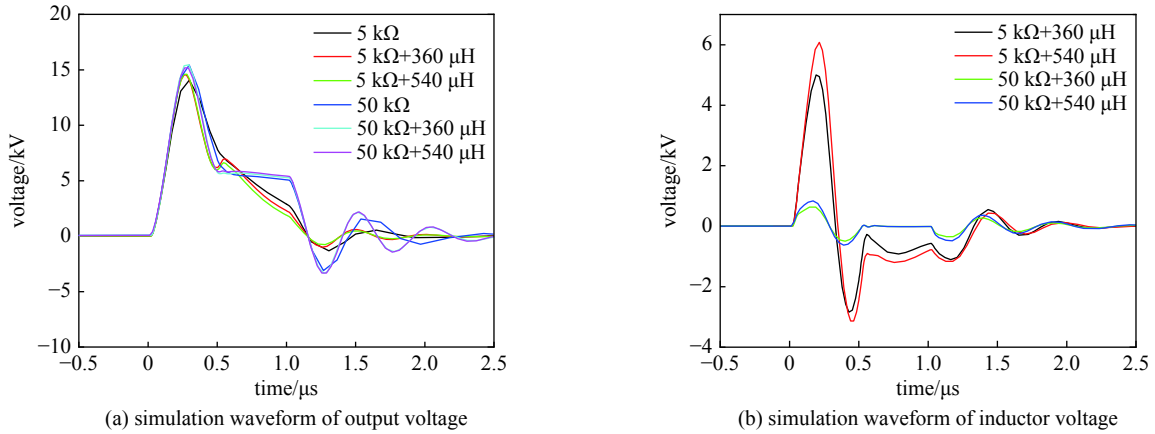


Fig. 12 Output positive pulse experimental voltage waveform under resistive inductive load

图 12 阻感性负载下输出正脉冲及电感上电压仿真波形

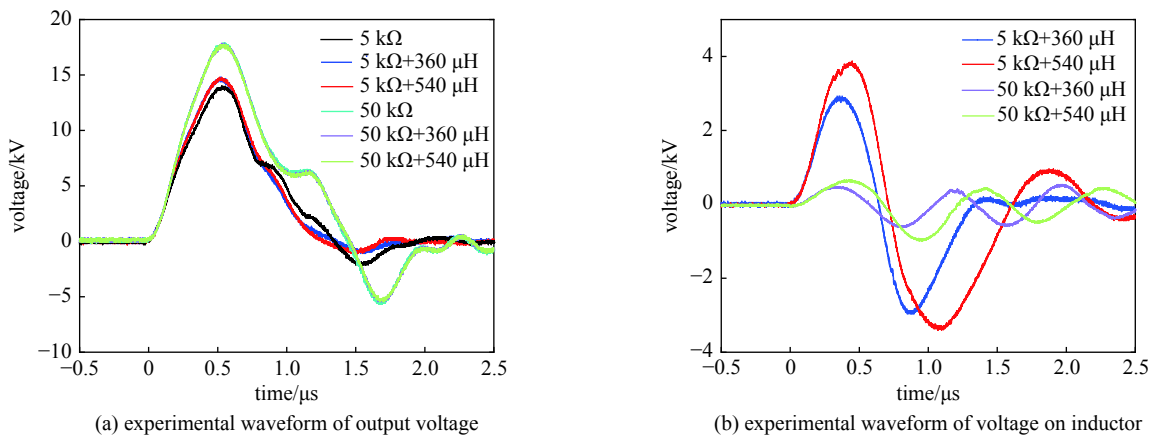


Fig. 13 Output positive pulse experimental voltage waveform under resistive inductive load

图 13 阻感性负载下输出正脉冲及电感上电压实验波形

4 结论

本文构建了双极性脉冲开关电路和脉冲变压器相结合的高压脉冲电源实验平台,研究了脉冲变压器寄生参数和负载特性对输出高压脉冲波形的影响,获得了如下结论:(1)不同于传统时域解析方法,采用等效电路的复频域解析方法,理论分析了变压器寄生参数对输出脉冲波形的影响规律,方法更简易且直观;(2)变压器分布电容和漏感越大,输出脉冲波形的上升沿和下降沿越平缓,过冲电压幅值越大。因此,在制作脉冲变压器时,建议采用二次侧绕组均匀单层密绕,一次侧绕组均匀单层疏绕,一、二次侧匝数较多的方案,尽可能减小分布电容和漏感;(3)分析了纯阻性、阻容性或阻感性负载特性对输出高压脉冲波形的影响规律,发现电阻值增大(5~50 kΩ),过冲电压幅值增大,脉冲上升沿和下降沿变陡;当负载电阻回路串联小电容时,过冲电压幅值显著增大,若串联电容高于一定值时输出脉冲波形恢复至与纯电阻波形一样;当负载电阻回路串联电感时,输出脉冲波形下降沿变平缓。值得注意的是,放电等离子体经常呈阻容性,当等效气隙电容过大时,电容电压非常小,甚至不足以发生气体击穿。因此,上述研究不仅可为高压脉冲变压器的研制提供理论分析方法和实验绕制方案参考,而且对不同放电等离子体负载情况下输出高压脉冲波形的分析及控制具有借鉴意义,为全固态开关电路和脉冲变压器结合的高压脉冲电源开发提供重要参考。

参考文献:

- [1] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705. (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705)
- [2] 熊紫兰, 卢新培, 鲜于斌, 等. 大气压低温等离子体射流及其生物医学应用[J]. 科技导报, 2010, 28(15): 97-105. (Xiong Zilan, Lu Xinpei, Xian Yubin, et al. Atmospheric pressure low temperature plasma jets and their biomedical applications[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(15): 97-105)
- [3] 米彦, 苟家喜, 刘露露, 等. 脉冲介质阻挡放电等离子体改性对BN/EP复合材料击穿强度和热导率的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3949-3959. (Mi Yan, Gou Jiayi, Liu Lulu, et al. Effect of pulse dielectric barrier discharge plasma modification on breakdown strength and thermal conductivity of BN/EP

- composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3949-3959)
- [4] Zhao Guangyin, Li Yinghong, Liang Hua, et al. Flow separation control on swept wing with nanosecond pulse driven DBD plasma actuators[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(2): 368-376.
- [5] 聂万胜, 周思引, 车学科. 纳秒脉冲放电等离子体助燃技术研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1749-1758. (Nie Wansheng, Zhou Siyin, Che Xueke. Review of plasma assisted combustion technology by nanosecond pulsed discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6): 1749-1758)
- [6] 梅丹华, 方志, 邵涛. 大气压低温等离子体特性与应用研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1339-1358. (Mei Danhua, Fang Zhi, Shao Tao. Recent progress on characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1339-1358)
- [7] Deng Jianjun, Shi Jinshui, Xie Weiping, et al. Overview of pulsed power research at CAEP[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(8): 2760-2765.
- [8] 王秉卓, 司剑飞, 于春风. 基于脉冲功率技术的高压电场感应取能设计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 160-166. (Wang Bingzhuo, Si Jianfei, Yu Chunfeng. A design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(6): 160-166)
- [9] 刘克富. 固态Marx发生器研究进展[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781-1787. (Liu Kefu. Research progress in solid-state Marx generators[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1781-1787)
- [10] Liu Kefu, Luo Yan, Qiu Jian. A repetitive high voltage pulse adder based on solid state switches[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(4): 1076-1080.
- [11] 饶俊峰, 李恩成, 王永刚, 等. 自触发驱动的全固态Marx发生器[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 025001. (Rao Junfeng, Li Encheng, Wang Yonggang, et al. Self-triggering all-solid-state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 025001)
- [12] 王晓雨, 董守龙, 马剑豪, 等. 一种新型的双极性Marx高重频脉冲发生器[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 799-806. (Wang Xiaoyu, Dong Shoulong, Ma Jianhao, et al. A novel high-frequency pulse generator based on bipolar and Marx topologies[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(4): 799-806)
- [13] 饶俊峰, 李成建, 李孜, 等. 全固态高重频高压脉冲电源[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 035001. (Rao Junfeng, Li Chenjian, Li Zi, et al. All solid state high-frequency and high voltage pulsed power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 035001)
- [14] Jiang Weihua, Sugiyama H, Tokuchi A. Pulsed power generation by solid-state LTD[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3603-3608.
- [15] Redondo L M, Silva J F, Margato E. Analysis of a modular generator for high-voltage, high-frequency pulsed applications, using low voltage semiconductors (<1 kV) and series connected step-up (1:10) transformers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78: 034702.
- [16] Wang Xia, Huang Qinghua, Xiong Lin, et al. A compact all-solid-state repetitive pulsed power modulator based on Marx generator and pulse transformer[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(6): 2072-2078.
- [17] Wang Yonggang, Tong Liqing, Liu Kefu, et al. Repetitive high-voltage pulse modulator using bipolar Marx generator combined with pulse transformer[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3340-3347.
- [18] Wu Zhaokang, Chen Xiyu, Mu Xianmin. Bipolar Marx circuit based on double transformers[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2020: 1875-1879.
- [19] 孙毅超, 丁楠木, 王琦. 基于共载波调制的功率复合型模块化多电平固态变压器[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 2-8. (Sun Yichao, Ding Nanmu, Wang Qi. Power integrated modular multilevel solid-state transformer with common carrier modulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(4): 2-8)
- [20] 高旭泽, 段然, 任明, 等. 长段电缆中局部放电脉冲信号的传输特性及耦合研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 2-9. (Gao Xuze, Duan Ran, Ren Ming, et al. Transmission characteristics and coupling of partial discharge pulse signals in long cables[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(5): 2-9)
- [21] 郝玲艳, 李清泉, 秦冰阳, 等. 纳秒脉冲电源作用下沿面介质阻挡放电等离子体激励器的特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2936-2942. (Hao Lingyan, Li Qingquan, Qin Bingyang, et al. Characteristics of surface dielectric barrier discharge plasma actuator under the nanosecond pulse voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2936-2942)
- [22] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (Wang Ruihua. Design of pulse transformer[M]. Beijing: Science Press, 1996)
- [23] ANSI/IEEE Std 390-1987, IEEE standard for pulse transformers[S].
- [24] Bortis D, Ortiz G, Kolar J W, et al. Design procedure for compact pulse transformers with rectangular pulse shape and fast rise times[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(4): 1171-1180.
- [25] Redondo L M, Silva J F, Margato E. Pulse shape improvement in core-type high-voltage pulse transformers with auxiliary windings[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(5): 1973-1982.
- [26] Redondo L M, Silva J F. Repetitive high-voltage solid-state Marx modulator design for various load conditions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(8): 1632-1637.
- [27] 章程, 方志, 赵龙章, 等. 基于SIMULINK的介质阻挡放电的仿真[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 218-221. (Zhang Cheng, Fang Zhi, Zhao Longzhang, et al. Simulation of dielectric barrier discharge using SIMULINK[J]. *High Voltage Apparatus*, 2007, 43(3): 218-221)
- [28] 郝世强, 刘星亮, 李武华, 等. 介质阻挡放电的分段负载模型和断续模式能量压缩方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 3058-3067. (Hao Shiqiang, Liu Xingliang, Li Wuhua, et al. Discontinuous-current-mode energy compression method of dielectric barrier discharge with piecewise load model[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 3058-3067)
- [29] 祁泽武, 张伟, 李平林, 等. DBD高频高压放电电源的设计及其放电特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 807-812. (Qi Zewu, Zhang Wei, Li Pinglin, et al. Design of DBD high-frequency high-voltage power supply and its discharging characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 807-812)