



·脉冲功率技术·

# 基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性 脉冲发生器的研制\*

彭媛媛, 陈文光, 卢 杨, 刘之戩, 欧林祥, 左 芊

(南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘 要:** 在肿瘤消融、污水处理等领域的脉冲功率技术应用中, 研究发现双极性电脉冲往往比单极性电脉冲效果更佳, 这极大地刺激了双极性高压脉冲电源的研发需求。设计了一台基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器, 该发生器结合 boost 电路与 Marx 发生器的特点, 实现了具有升压功能的双极性脉冲的产生, 且利用峰值检测电路对双极性脉冲发生器的输出峰值进行取样, 并反馈到 DSP 处理器, 实现峰值电压闭环控制, 从而实现双极性脉冲恒定峰值的输出。为了验证提出的拓扑电路的可行性与稳定性, 对 5 级恒峰值双极性脉冲发生器进行了仿真和实验研究。实验结果表明, 当输入电压在 100 V 时, 可产生重复频率 5 kHz、脉冲宽度 5~10  $\mu\text{s}$ 、电压幅值为  $\pm 2.0$  kV 的恒峰值双极性脉冲波形。该脉冲电源使用模块化设计, 便于级联, 结构紧凑, 可灵活输出恒峰值的双极性或单极性正(负)脉冲。

**关键词:** 高压脉冲电源; boost 电路; Marx 发生器; 双极性脉冲; 峰值检测; 闭环控制

中图分类号: TM823

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220179

## Development of constant peak bipolar pulse generator based on Boost closed-loop control

Peng Yuanyuan, Chen Wenguang, Lu Yang, Liu Zhijian, Ou Linxiang, Zuo Qian

(School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In the application of pulse power technology in tumor ablation, sewage treatment and other fields, it is found that bipolar electric pulse is often better than unipolar electric pulse, which greatly stimulates the research and development demand of bipolar high-voltage pulse power supply. A constant peak bipolar pulse generator is designed based on Boost closed-loop control. The generator perfectly combines the characteristics of Boost circuit and Marx generator to realize the generation of bipolar pulse with boost function. The peak detection circuit is used to sample the peak value of bipolar pulse and feed it back to DSP to realize closed-loop control, so as to realize the output of constant peak bipolar pulse. To verify the feasibility and stability of the proposed topology circuit, simulation and experiment of the developed 5-stage constant peak bipolar pulse generator are carried out. The experimental results show that when the input voltage is 100 V, a constant peak bipolar pulse waveform with repetition frequency of 5 kHz, pulse width of 5–10  $\mu\text{s}$  and voltage amplitude of  $\pm 2.0$  kV can be generated. The pulse power supply uses modular design, which is easy to cascade, compact, and can flexibly output bipolar or unipolar positive (negative) pulses with constant peak value.

**Key words:** high voltage pulse power supply, Boost circuit, Marx generator, bipolar pulse, peak detection, closed-loop control

随着半导体开关技术的发展, 脉冲功率技术愈来愈成熟, 主要体现在重复频率、脉冲宽度、可控性、体积、寿命等方面。近年来脉冲功率技术广泛应用于臭氧产生<sup>[1]</sup>、食品杀菌<sup>[2]</sup>、肿瘤消融<sup>[3-4]</sup>、污水处理<sup>[5]</sup>等领域。在医学领

\* 收稿日期: 2022-05-31; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0303103)

联系方式: 彭媛媛, 2836735028@qq.com。

通信作者: 陈文光, chenwg@usc.edu.cn。

域中,利用不可逆电穿孔技术治疗肿瘤,研究者发现使用高压单极性脉冲治疗时,会导致消融不足、肌肉收缩、针电极移动、疼痛感增加等负面影响;而在治疗肿瘤效果无明显差异的情况下,高频高压双极性脉冲能有效抑制直流分量,减轻患者的肌肉收缩以及疼痛感<sup>[6]</sup>。在污水处理领域中,研究者发现与单极性脉冲电源相比,双极性脉冲电源不仅能节省电耗和电极损耗,还可以有效防止电极钝化和电极表面结垢,出水水质稳定<sup>[7]</sup>。综上所述,在肿瘤消融、污水治理等领域,双极性脉冲发生器比单极性脉冲发生器的效果更佳,可极大满足高压电脉冲在领域应用中的需求。

目前,国内外对双极性脉冲发生器的研究较多。饶俊峰等人研制了一款全固态直线型变压器驱动源(SSLTD),双极性 SSLTD 由结构完全相同的 LTD 模块经过副边绕组反向串联构成,能够在  $500\ \Omega$  负载上稳定产生双极性纳秒脉冲,输出电压  $0\sim\pm 5\ \text{kV}$  可调,脉宽  $200\sim 400\ \text{ns}$  可调,正负脉冲时间间隔  $0\sim 1\ \text{ms}$  可调,上升沿和下降沿  $20\sim 50\ \text{ns}$ <sup>[8]</sup>。王晓雨研制了一款双极性 Marx 高重频脉冲发生器,6 级级联且输入电压  $850\ \text{V}$  时,输出电压幅值  $\pm 5\ \text{kV}$ ,重复频率  $2.5\ \text{MHz}$ ,脉冲宽度  $200\ \text{ns}\sim 10\ \mu\text{s}$ <sup>[9]</sup>。针对全固态脉冲发生器,若要输出更高的电压脉冲,可通过增加级联级数或加大供电电压实现;增加级数导致发生器的体积以及成本大大增加,采用更高电压的供电电源同样面临成本过大的问题,研究升压型脉冲发生器成为必然趋势。徐春柳提出了一款 Boost-Marx 型高压脉冲电源,4 级级联电路在输入电压  $430\ \text{V}$  时,其输出单极性脉冲幅值可达  $1.79\ \text{kV}$ <sup>[10]</sup>。Devesh Malviya 提出了升压型的高压脉冲电源,4 级级联电路在输入电压  $100\ \text{V}$  下,输出电压幅值  $2\ \text{kV}$ ,重复频率为  $5\ \text{kHz}$  的双极性脉冲<sup>[11-12]</sup>。为进一步提高脉冲的电压调节精度,缩短充电调节时间,稳定脉冲峰值,有必要对脉冲发生器的自动控制进行研究。饶俊峰提出了固态 Marx 发生器的自动控制研究,在 20 级的固态方波 Marx 发生器样机中产生重复频率方波脉冲电压。波形表明,该样机已经初步实现自动化控制,并能可靠运行<sup>[13]</sup>。

本文设计了一种基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器,其主电路结构由 Boost 电路与双极性脉冲电路结合而成,通过控制升压开关管的占空比,可控制脉冲电源的升压倍数,控制方式简单、脉冲电源结构紧凑,与传统双极性脉冲发生器相比,整体的升压倍数大幅提高,对供电电源的要求较低。为提高发生器的负载调整率、稳定脉冲峰值,引入峰值检测电路,检测脉冲峰值并反馈至微处理器中,形成 Boost 电路的闭环控制,实现恒峰值双极性脉冲的输出。最后设计并研制了一台 5 级恒峰值双极性脉冲发生器,采用仿真和实验研究的方法,验证了脉冲发生器的可行性、稳定性。

## 1 恒峰值双极性脉冲发生器的设计

基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器的结构框图如图 1 所示,主要由 DSP 控制器、直流电压源、双极性脉冲发生器、脉冲电压取样电路、峰值检测电路、隔离驱动、全桥驱动、同步驱动电路组成。DSP 作为整个系统的控制器,主要作用有产生脉冲控制信号、升压控制信号、AD 采样以及 PID 调节,其中脉冲控制信号主要影响

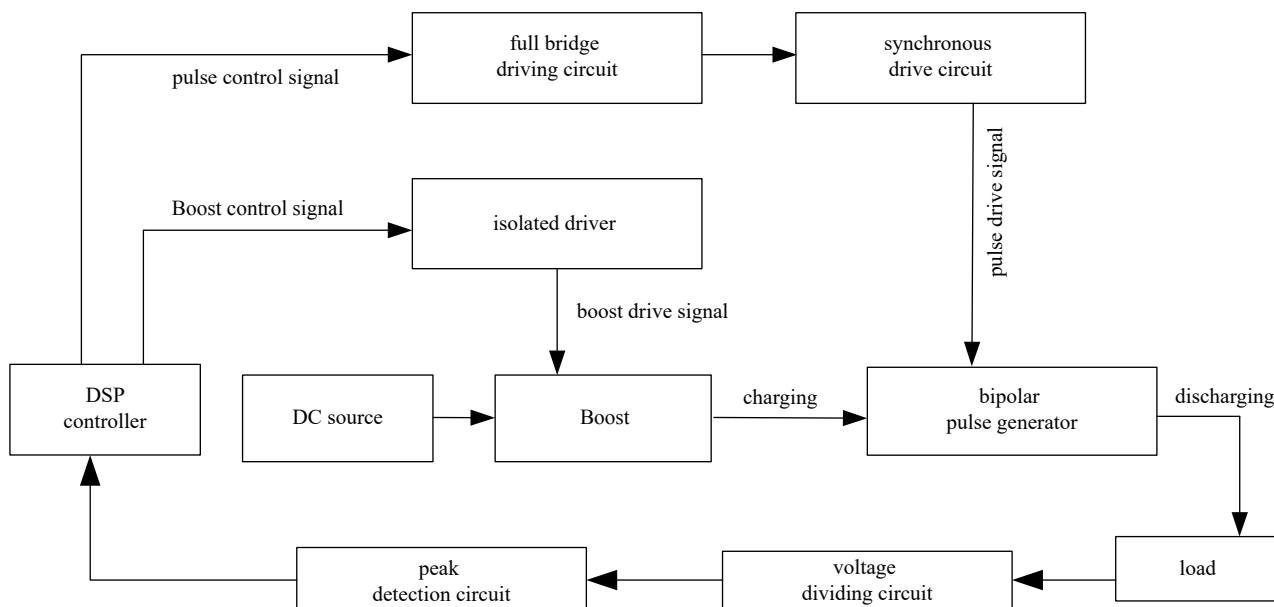


Fig. 1 Structure block diagram of constant peak bipolar pulse generator with boost closed loop control

图 1 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器的结构框图

输出双极性脉冲的重复频率、脉冲宽度及脉冲极性，升压控制信号主要影响输出双极性脉冲的脉冲幅值。由于 DSP 产生的控制信号驱动能力不足，需要额外设计驱动电路。直流电压源给脉冲发生器供电，当双极性脉冲发生器工作时，在负载上输出高压双极性脉冲，该脉冲在分压取样后，转换为幅值低于  $\pm 3\text{ V}$  的脉冲信号，对此进行脉冲峰值检测，并将脉冲峰值反馈至 DSP 中，与设定峰值比较，并根据峰值电压偏差进行 PID 调节，自动输出相应升压控制信号，使双极性脉冲峰值电压逼近设定峰值电压，从而实现恒峰值双极性脉冲的输出。

### 1.1 主电路设计

主电路的拓扑结构如图 2 所示，该拓扑结构由 Boost 电路与双极性脉冲发生器组成，构成一种新型的升压型双极性脉冲发生器，可通过控制前级开关管  $S_B$  的 PWM 波的占空比，实现升压比的控制，其升压比灵活，有利于脉冲发生器的闭环控制，提高负载调整率、稳定峰值电压。整体结构分为两部分——Boost 电路与双极性脉冲发生电路。

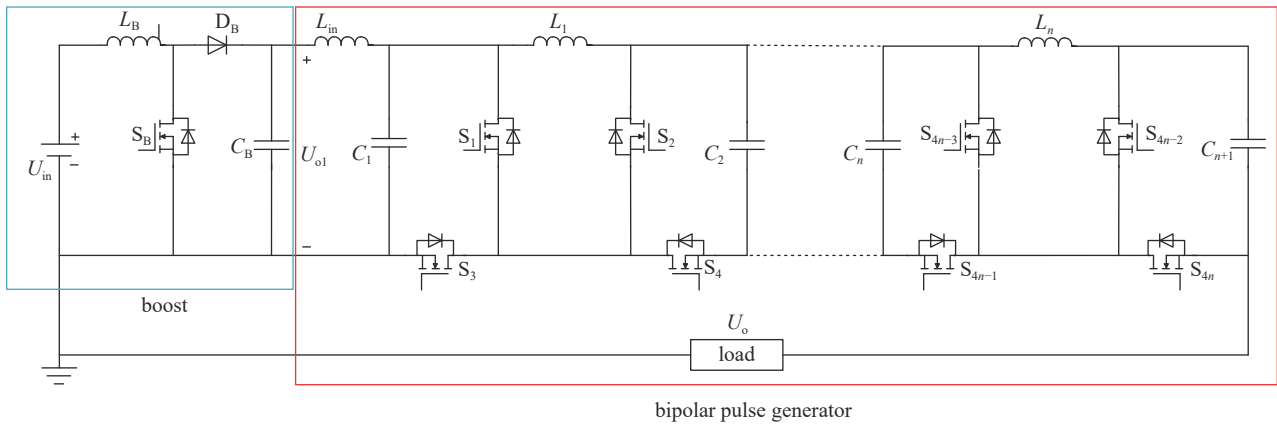


Fig. 2 Main circuit topology

图 2 主电路拓扑结构

Boost 电路的工作原理：当开关管  $S_B$  导通时，电感  $L_B$  储存能量，电容  $C_B$  对负载进行放电；当开关管  $S_B$  截止时，直流电源  $V_{in}$  与电感共同给电容充电，为负载提供能量。设开关管  $S_B$  的控制信号 PWM 的占空比为  $D$ ，根据电感的伏秒平衡原则可得出 Boost 电路的输入输出电压关系为

$$U_{o1} = \frac{1}{(1-D)} U_{in} \quad (1)$$

式中  $U_{o1}$  为滤波电容  $C_B$  两端的电压。

双极性脉冲发生电路的供电电源  $U_{o1}$  由 Boost 电路提供；为了便于后续的理论计算，将各电容充电时间定为相同，故开关管的时序将以高度对称为例，如图 3 所示，其中  $T_s$  为双极性脉冲的脉冲周期， $d$  为正负极性的脉冲占空比。在一个周期内，双极性脉冲电源共有 5 个工作阶段，分为 5 种模式，其工作原理如下：

(1) 模式 1 ( $0 \leq t < \frac{1-2d}{3} T_s$ )

当开关管  $S_3, S_4, \dots, S_{4n-1}, S_{4n}$  导通，其他开关管均关断时，电源  $U_{o1}$  通过电感  $L_{in}, L_1, \dots, L_n$  及导通开关管向电容  $C_1, C_2, \dots, C_n, C_{n+1}$  充电，实现电容的并联充电。当状态达到平稳时，电容电压将稳定到供电电压  $U_{o1}$ ，输出电压由于开关管的导通，故其电压值为 0，将该工作模式称为电容并联充电模式。

(2) 模式 2 ( $\frac{1-2d}{3} T_s \leq t < \frac{1+d}{3} T_s$ )

当开关管  $S_1, S_4, \dots, S_{4n-3}, S_{4n}$  导通时，电容  $C_1, C_2, \dots, C_n$  被串联起来对负载进行放电，负载将得到正极性脉冲；由于电感的电流不能突变的性质，电感将通过电容、开关管形成一个续流回路，泄放其存储的能量，将该工作模式称为正极性放电模式。

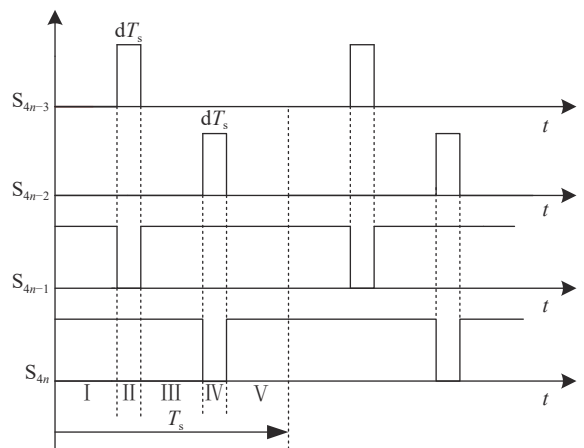


Fig. 3 Switch on sequence

图 3 开关管导通时序

(3) 模式 3 ( $\frac{1+d}{3}T_s \leq t < \frac{2-d}{3}T_s$ )

模式 3 的电路运行状态与模式 1 的电路运行状态相同, 即该模式也为电容并联充电模式, 供电电源对电容进行并联充电, 对正极性放电过程中的电容能量消耗进行了及时的补偿, 确保了负极性脉冲的幅值与正极性幅值保持一致。

(4) 模式 4 ( $\frac{2-d}{3}T_s \leq t < \frac{2-2d}{3}T_s$ )

当开关管  $S_2, S_3, \dots, S_{4n-2}, S_{4n-1}$  导通时, 电容  $C_2, \dots, C_n, C_{n+1}$  被串联起来对负载进行放电, 负载得到负极性脉冲; 同样, 电感将通过电容、开关管形成一个续流回路, 电容给电感提供能量, 电感储能, 将该工作模式称为负极性放电模式。

(5) 模式 5 ( $\frac{2-2d}{3}T_s \leq t < T_s$ )

模式 5 的电路运行状态与模式 3 的电路运行状态及功能作用相同。

双极性脉冲发生器电路中, 各储能电容的电压近似为供电电压  $U_{o1}$ , 脉冲放电时各  $n$  级电容串联放电, 脉冲电压幅值满足

$$U_o = nU_{o1} \tag{2}$$

式中  $n$  为级数,  $U_o$  为双极性脉冲输出电压。

将式(1)代入式(2), 可得出升压型双极性脉冲发生器输入输出关系

$$U_o = \frac{n}{1-D} U_{in} \tag{3}$$

升压型双极性脉冲发生器的输出仅与占空比  $D$ 、级数  $n$ 、输入电压  $U_{in}$  有关, 升压比调节灵活, 且升压倍数比传统脉冲发生器更高, 整体体积更加紧凑, 可实现闭环调节, 提高双极性脉冲发生器的负载调整率、电压调整率, 以及稳定峰值电压, 实现恒峰值双极性脉冲的输出。

### 1.2 峰值检测电路设计

双极性脉冲发生器的峰值检测电路如图 4 所示, 运算放大器  $A_1$  同相端将输入信号与  $A_2$  的输出信号作比较, 其中输出信号为前一次的峰值信号, 若输入信号的峰值比前一次的峰值信号高, 则  $A_1$  输出高电平, 此时  $D_2$  导通,  $C_1$  充电到相同峰值为止; 若输入信号的峰值低于上一次峰值信号,  $D_2$  截止,  $C_1$  对电阻  $R_1$  放电, 直至放电到相同峰值为止。本文提出的峰值检测电路加入了一个保持电容  $C_1$  的放电回路, 使峰值检测电路能够实时顺应脉冲峰值的变化, 确保了峰值电压闭环电路的准确性。

### 1.3 同步驱动电路的设计

双极性脉冲电源中开关管的驱动电路如图 5 所示, 同步电路由脉冲变压器、MOS 管、稳压管、限流电阻组成<sup>[14-15]</sup>。脉冲变压器由一个原边、多个副边组成, 原边采用 1 匝高压同轴线用于传输控制信号; 副边采用多匝绝缘导线绕制而成; 此结构确保了主开关管的导通与关断的同步性。

驱动信号时序如图 6 所示, 其中黑色为控制信号, 蓝色为主开关管的驱动信号。驱动电路的工作原理如下: (1) 当控制信号为 turn-on 时, 电流回路如图 5 中红色线所示, 电流通过 MOS 管  $Q_{1-1}$  的体二极管、限流电阻  $R_1$ 、MOS 管  $Q_{1-2}$  对主开关管  $S_1$  的 G-S 级间电容  $C_q$  充电至正电压, 主开关管导通; (2) 当控制信号为 remain 时, MOS 管  $Q_{1-1}$ 、 $Q_{1-2}$  均截止,

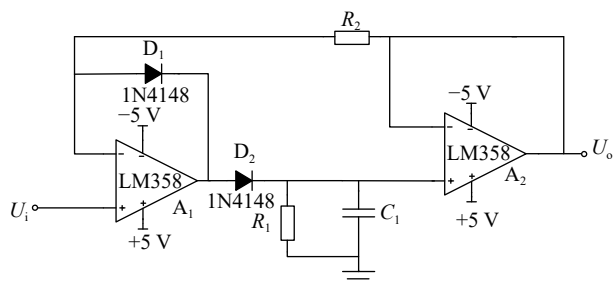


Fig. 4 Peak detection circuit  
图 4 峰值检测电路

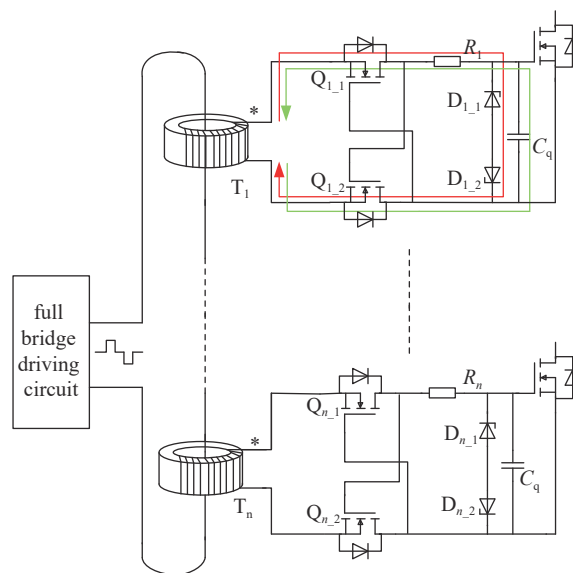


Fig. 5 Schematic diagram of driving circuit  
图 5 驱动电路原理图

级间电容  $C_q$  无泄放回路, 保持正电压, 主开关管维持导通; (3) 当控制信号为 turn-off 时, 电流回路如图 5 中绿色线所示, MOS 管  $Q_{1-1}$  导通, 级间电容反向充电为负电压, 保证了主开关管可靠截止; (4) 控制信号为 remain, 电容电压保持负电压不变, 主开关管维持关断。

#### 1.4 元器件的选择

本文设计了供电电源  $U_{in}=100\sim 120\text{ V}$ , 负载阻值  $R_L=1\text{ k}\Omega$ , 输出脉冲幅值  $\pm 2.0\text{ kV}$ 、脉冲宽度  $5\sim 10\text{ }\mu\text{s}$  的 5 级升压型双极性脉冲发生器, 该发生器的稳定性以及可行性主要受升压电感  $L_B$ 、隔离电感  $L_x$  以及储能电容  $C_x$  (其中  $x=1, 2, \dots, n, n+1$ ) 的影响。为保证整个系统的稳定性以及高效性, 其  $L_B$  的选择尤为重要, 根据文献 [16], 升压电感值需满足

$$L \geq \frac{U_{in(\min)} D_{\max} (1 - D_{\max})}{r I_o f_B} \quad (4)$$

式中:  $r$  为电流纹波率 (取 0.4);  $I_o$  为电感电流;  $f_B$  为升压电路工作频率; 与脉冲的重复频率不一致,  $D_{\max}$  为 Boost 电路设计中最大占空比。根据设计要求及上式公式计算, 当  $f_B=50\text{ kHz}$ ,  $I_o=1.2\text{ A}$  时, 电感值  $L \geq 925\text{ }\mu\text{H}$ 。

储能电容  $C_x$  主要作用是储存能量, 是影响脉冲质量最关键的元件, 其容值大小与脉冲电压降紧密相关, 在选择电容器时需要考虑容值与耐压值, 根据文献 [17], 储能电容的容值需满足

$$C = \frac{n^2 d [2 + d(2\eta + 1/n)]}{4R_L f \alpha} \quad (5)$$

式中:  $d$  为脉冲宽度占空比;  $\eta$  为双极性脉冲发生器的效率;  $\alpha$  为脉冲顶降率;  $f$  为双极性脉冲的重复频率。设定  $\eta=92\%$ ,  $\alpha=10\%$ ,  $d=5\%$ ,  $f=5\text{ kHz}$ , 计算得出电容值  $C=1.3\text{ }\mu\text{F}$ 。

隔离电感在电路中起储能与脉冲隔离作用, 极短的脉冲放电下, 电感支路可近似视为开路, 隔离电感的感值需满足

$$L > \frac{2R_L^2 C}{n(4R_L C f - nd)} \quad (6)$$

式中:  $C$  为储能电容的容值;  $R_L$  为电阻负载阻值。将数据代入式 (6), 计算得出电感值  $L > 20\text{ mH}$ 。

升压型双极性脉冲发生器的主开关管选择安森美公司的 FDPF15N65, 该 MOS 管的耐压值为  $650\text{ V}$ , 其上升沿与下降沿时间分别为  $125\text{ ns}$  和  $65\text{ ns}$ , 满足发生器的边沿需求。本文中发生器共需要产生 9 路控制信号, 其中 8 路信号存在错相现象, 选择 DSP 芯片作为控制器, 其型号为 TMS320F28335。

## 2 仿真实验及结果

为了验证提出的基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器的可行性及输入输出公式的准确性, 利用 Plescs 仿真软件搭建了 5 级电路模型, 仿真参数设置如表 1 所示, 其中电感、电容均根据以上公式计算得到。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings

$U_{in}/\text{V}$	$f_B/\text{kHz}$	$D/\%$	$L_B/\text{mH}$	$L/\text{mH}$	$C/\mu\text{F}$	$f/\text{kHz}$	$d_{\max}/\%$	$R_L/\text{k}\Omega$
100	50	66.7	1.2	20	2	5	5	1

当脉冲的升压占空比为  $75.0\%$ , 重复频率为  $5\text{ kHz}$ , 脉冲占空比  $d$  为  $2.5\%$  时, 负载电压仿真波形如图 7 所示, 其正、负双极性脉冲幅值均为  $2.0\text{ kV}$ , 脉冲幅值符合双极性脉冲发生器  $\pm 2.0\text{ kV}$  的理论值; 脉冲宽度为  $5\text{ }\mu\text{s}$ , 由于放电时间较大, 负载电阻较小, 故脉冲波形出现了较小的顶降。

仿真实验结果初步验证了升压型双极性脉冲电路的可行性及输出公式的准确性, 在此基础上, 为实现恒峰值双极性脉冲的输出, 搭建了 5 级基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲仿真电路, 双极性脉冲输出到分压电路将高电压脉冲取样为低电压脉冲, 其衰减比  $1000:1$ , 将衰减后的低压脉冲输入至脉冲峰值检测电路中检测脉冲峰值电压, 并作为系统的反馈值与设定峰值进行比较, 在 PID 调节下自动改变升压占空比  $D$ , 实现恒峰值双极性脉冲的

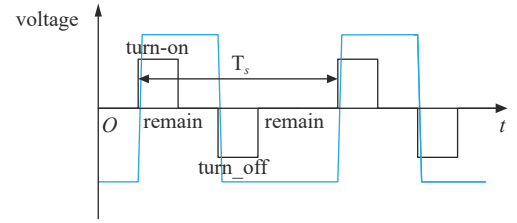


Fig. 6 Control signal sequence

图 6 控制信号时序图



输出。

当输入电压为 100 V、负载阻值为 1 k $\Omega$ 、重复频率为 5 kHz、脉冲占空比  $d$  为 2.5%、设定峰值为 2.0 时, 按其衰减比, 对应输出双极性峰值理论值应为 2.0 kV, 测量负载  $R_L$  上的输出波形如图 8 所示, 输出整体波形有 PI 调节过程, 最终达到设定峰值电压且保持平稳, 测单个脉冲波形, 其正负极性的脉冲宽度均为 5  $\mu$ s, 其双极性脉冲幅值为 2.0 kV, 仿真结果表明双极性脉冲峰值能自动达到设定峰值, 实现了恒峰值双极性脉冲的输出, 且能稳定运行。

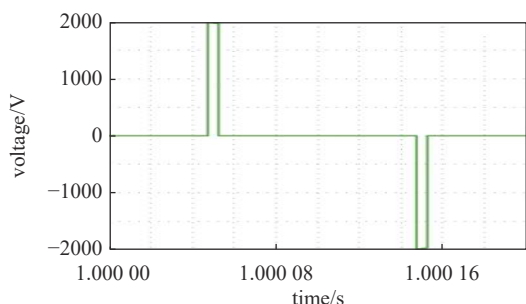


Fig. 7 Simulation waveform of load voltage under boost duty ratio  $D=75.0\%$

图 7 升压占空比  $D=75.0\%$  下负载电压仿真波形

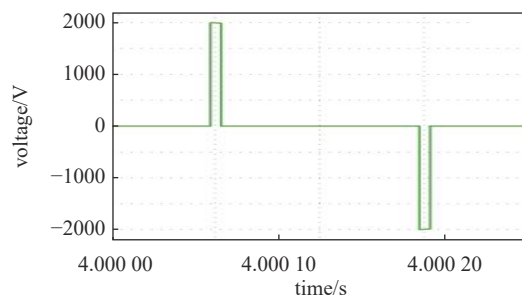


Fig. 8 2.0 kV constant peak bipolar pulse simulation waveform

图 8 2.0 kV 恒峰值双极性脉冲仿真波形

### 3 实验结果

为进一步验证电路的可行性, 搭建了 5 级基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器, 实物样机如图 9 所示, 各元器件参数与仿真参数一致。其中储能电容采用 X7R 无极性贴片电容, 隔离电感采用磁芯 EC28 绕制而成。

在供电电源为 100 V、升压占空比  $D$  设定值为 66.7%、脉冲占空比  $d$  为 2.5% 时, 对恒峰值双极性脉冲发生器进行开环验证, 测试负载波形如图 10 所示, 负载上得到一个重复频率为 5 kHz、脉冲宽度 5  $\mu$ s、脉冲幅值为  $\pm 1.5$  kV 的双极性脉冲, 且双极性脉冲波形平整, 双极性脉冲电压与理论计算符合, 且可稳定运行。

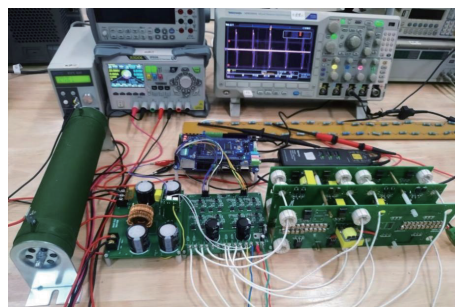


Fig. 9 Physical prototype

图 9 实物样机

对恒峰值双极性脉冲发生器进行闭环控制, 在供电电源为 100 V、脉冲占空比  $d$  为 5%、脉冲峰值设定值为 2.0 时, 测试负载波形如图 11 所示, 负载上波形为重复频率为 5 kHz、脉冲宽度 10  $\mu$ s、脉冲幅值  $\pm 2.0$  kV 的双极性脉

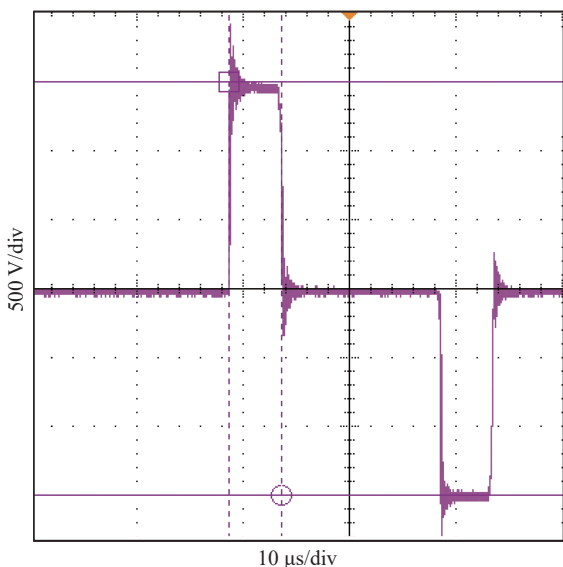


Fig. 10 Boost bipolar pulse waveform when boost duty ratio  $D=66.7\%$

图 10 升压占空比  $D=66.7\%$  时升压型双极性脉冲波形

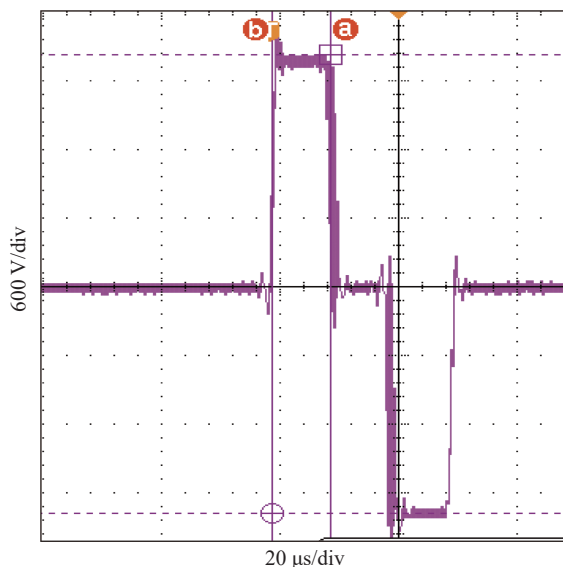


Fig. 11 2.0 kV constant peak bipolar pulse waveform

图 11 2.0 kV 恒峰值双极性脉冲波形

冲。实验结果表明：所设计的电路可按设定的峰值电压参数输出双极性脉冲，且脉宽在一定范围内改变，说明本文提出的基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器设计方法可行可靠。

## 4 结 论

本文设计了一种基于 Boost 闭环控制的恒峰值双极性脉冲发生器，对该发生器的运行模式进行了理论分析与数学推导，得出了发生器的输出电压公式。搭建了仿真模型与实验样机，在输入电压 100 V、5 级级联的情况下，可实现重复频率 5 kHz、幅值 $\pm 2.0$  kV、脉宽 5~10  $\mu$ s 的恒峰值双极性脉冲的输出，验证了恒峰值双极性脉冲发生器的可行性及输出电压理论的正确性，该发生器可输出脉宽、幅值、重复频率均可调的恒峰值双极性脉冲，解决了常规脉冲升压比不可调的限制，提高了发生器的负载调整率、电压调整率、脉冲峰值稳定性。

## 参考文献：

- [1] 陈刚, 储金宇, 陈万金, 等. 高压窄脉冲臭氧发生器电源的研究[J]. *安全与环境工程*, 2001(3): 25-29. (Chen Gang, Chu Jinyu, Chen Wanjin, et al. Design of high-voltage pulsed-power to ozonizer[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2001(3): 25-29)
- [2] 齐梦圆, 刘妍妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 284-292. (Qi Mengyuan, Liu Qingyan, Shi Susu, et al. Recent progress in the application of high-voltage electric field technology in food sterilization[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 284-292)
- [3] 孙钢. 不可逆电穿孔技术消融肿瘤研究进展[J]. *介入放射学杂志*, 2015, 24(4): 277-281. (Sun Gang. Irreversible electroporation technology for ablation treatment of tumors: recent progress in research[J]. *Journal of Interventional Radiology*, 2015, 24(4): 277-281)
- [4] 王越, 任冯刚, 王浩华, 等. 纳米刀治疗肿瘤的基础研究[J]. *临床医学研究与实践*, 2017, 2(7): 1-2,7. (Wang Yue, Ren Fenggang, Wang Haohua, et al. Basic research on tumor treatment with Nanoknife[J]. *Clinical Research and Practice*, 2017, 2(7): 1-2,7)
- [5] 王兴贵, 赵金山. 一种用于污水处理的脉冲电源研究[J]. *电源技术*, 2012, 36(3): 388-391. (Wang Xinggui, Zhao Jinshan. Research on pulse power for the sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2012, 36(3): 388-391)
- [6] 董守龙, 王艺麟, 余亮, 等. 一种基于感应隔离的双极性脉冲发生器[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(24): 5050-5056. (Dong Shoulong, Wang Yilin, Yu Liang, et al. A bipolar pulse generator based on inductive isolation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(24): 5050-5056)
- [7] 李冬黎, 何湘宁. 脉冲电源污水处理技术[J]. *高电压技术*, 2001, 27(6): 22-23,33. (Li Dongli, He Xiangning. Study on the wastewater treatment with pulsed power[J]. *High Voltage Engineering*, 2001, 27(6): 22-23,33)
- [8] 饶俊峰, 吴施蓉, 朱益成, 等. 双极性固态直线变压器驱动器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065006. (Rao Junfeng, Wu Shirong, Zhu Yicheng, et al. Development of bipolar solid-state linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065006)
- [9] 王晓雨, 董守龙, 马剑豪, 等. 一种新型的双极性Marx多重脉冲发生器[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)
- [10] 徐春柳, 魏学业. Boost-Marx型高压脉冲电源设计[J]. *电力电子技术*, 2020, 54(4): 1-3. (Xu Chunliu, Wei Xueye. Design of Boost-Marx high-voltage pulsed power source[J]. *Power Electronics*, 2020, 54(4): 1-3)
- [11] Malviya D, Veerachary M. A boost converter-based high-voltage pulsed-power supply[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(5): 5222-5233.
- [12] Malviya D, Veerachary M. A novel boost converter based high-voltage pulsed-power supply[C]//2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS). Bhubaneswar: IEEE, 2019: 353-358.
- [13] 饶俊峰, 杨世龙, 王永刚, 等. 固态Marx发生器的自动控制研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 045003. (Rao Junfeng, Yang Shilong, Wang Yonggang, et al. Research on automatic control of solid state Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 045003)
- [14] McNeill N, Holliday D, Mellor P H. Half-bridge power device gate driver circuit with isolation using integrated magnetic component and carrier signal phase switching[C]//Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham: IEEE, 2011: 1-10.
- [15] Li Zi, Liu Haotian, Rao Junfeng, et al. Gate driving circuit for the all solid-state rectangular Marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(8): 4058-4063.
- [16] 赵子睿, 王艳, 刘湘. 基于boost电路的车载充电机系统设计[J]. *电子设计工程*, 2017, 25(2): 101-104. (Zhao Zirui, Wang Yan, Liu Xiang. The design of vehicle charging system based on the boost circuit[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(2): 101-104)
- [17] Zeng Weirong, Yu Liang, Dong Shoulong, et al. A novel high-frequency bipolar pulsed power generator for biological applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 12861-12870.