

基于时序控制的固态开关串并联高压脉冲技术

施阳杰^{1,2}, 梁 勛¹, 林 颖¹, 方晓东¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 针对生物医疗等高压陡脉冲应用需求, 设计了基于固态开关串并联高压陡脉冲发生电路, 并结合时序控制技术, 提出一种脉冲陡化新方法; 从理论上分析了脉冲陡化的关键、系统工作的过程以及设计要点。该方法能较好解决开关管增加后杂散参数、布线电感以及导线电感对开关速度的影响。以 2 kV 高压直流电源、110 Ω 的负载电阻进行实验, 负载脉冲信号的上升沿约为 50 ns, 下降沿约为 70 ns, 输出电流幅值约 18 A; 最小脉宽信号的半高宽为 100 ns, 系统的最小分辨率为 5 ns, 可实现步进为 5 ns 脉宽的灵活调节, 最大脉宽则与储能电容有关。

关键词: 宽高压脉冲; 固态开关; 串并联; 时序控制

Series and Parallel High-voltage Pulse Technology for Solid-state Switches Based on Timing Control

SHI Yangjie^{1,2}, LIANG Xu¹, LIN Ying¹, FANG Xiaodong¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In response to the high-voltage steep pulse application demands such as those in the biomedical industry, a series and parallel high-voltage steep pulse generator circuit based on solid-state switches is designed, and a novel pulse steepening method is proposed by combining the timing control technology. The key to pulse steepening, the system's working process and the main points of design are analyzed theoretically. This method can better reduce the influences of stray parameters, wiring inductance and wire inductance on the switching speed after adding the switching tubes. An experiment was carried out with a 2 kV high-voltage DC power supply and a load resistance of 110 Ω , and experimental results show that the rising edge of load pulse signal was 50 ns approximately, the falling edge was 70 ns approximately, and the output current amplitude was 18 A approximately. The half-height width of the minimum pulse width signal was 100 ns, and the system's minimum resolution was 5 ns, which can realize a flexible adjustment of 5 ns pulse width step by step. The maximum pulse width was related to the energy storage capacitor.

Keywords: High-voltage pulse; solid-state switch; series and parallel connections; timing control

脉冲功率技术就是将缓慢存储且具有高密度的能量, 进行快速压缩、转换或者直接释放给负载

的电物理技术, 其最大的特点为: 在时间轴上对脉冲能量进行压缩, 在极短的时间内 (ns- μ s) 进行脉冲功率输出, 峰值功率能达 (kW-MW) 量级^[1]。脉冲功率技术主要应用于粒子束惯性约束核聚变、相对论电子束加速器、准分子激光器、电磁脉冲技术、粒子束武器、材料加工、工业废气处理、微生物灭菌杀毒等领域^[2-6]。高压陡脉冲发生器便是在脉冲功率技术的基础上发展而来, 高压陡脉冲是指上升时间为几十纳秒, 幅值为几千伏的脉冲信号^[7-9]; 基于不可

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-06-26; 录用日期: 2021-07-13; 网络首发日期: 2022-02-23

基金项目: 中国科学院青促会资助项目 (2018481); 中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20210007)

This work is supported by Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences under the grant 2018481; Project of Scientific Research Instruments and Equipment of Chinese Academy of Sciences under the grant YJKYYQ20210007

逆电穿孔 IRE(irreversible electroporation)现象的发现与发展,使用高压陡脉冲电场消融肿瘤细胞的方法逐渐成为研究热点^[10-11],与传统的射频消融、微波消融、超声消融等方式相比,脉冲电场消融肿瘤具有快捷、可控、可视、“非热作用”的优势^[12]。

高压脉冲发生器通常可分为以下 4 种形式: Marx 型、脉冲升压型、传输线变压器 TLT(transmission line transformer)、固态开关串联型。Marx 发生器原理为电容器并联充电、串联放电,然而由于所用器件较多,器件的杂散因素对高压信号上升沿影响较大,上升沿较缓,一般为亚微秒量级^[13];脉冲升压型可获得较高的电压输出,然而受器件性能、回路分布参数、磁芯参数影响,输出脉宽可调节范围较小^[14];TLT 采用输入端并联,输出端串联方式获得高压脉冲,但输入端阻抗较小,对信号源脉冲产生装置提出耐高压、大电流的挑战,限制其无限扩展的可能性^[15];固态开关串联型使用多个开关串联以提高体系电压,通过精准控制充放电时序可得到脉宽、频率任意可调的高压脉冲,然而受器件自身参数以及驱动电路细微差异的影响,同时随着体系电压的不断提高,开关管的增多对固态开关串联型高压脉冲上升沿有着极大的影响。针对以上固态开关串联型的局限性,本文设计了固态开关串并联结构,能很好解决开关管增多带来上升沿变缓的问题。

本文针对生物医疗等高压陡脉冲应用需求,设计了不同于传统的基于固态开关串并联高压陡脉冲发生电路,结合时序控制技术,提出一种脉冲陡化新方法,并从理论上分析了系统工作的过程以及设计关键。此方法的关键在于构造纳秒量级的短路时序,以减少杂散参数、布线电感以及导线电感对脉冲信号上升沿的影响,并在高压陡脉冲结束阶段设计了放电回路,解决了传统串联结构只能控制脉冲上升沿的弊端。本文以 2 kV 的高压直流电源、110 Ω 负载电阻进行实验,负载脉冲信号的上升沿约为 50 ns,下降沿约为 70 ns,输出电流幅值约 18 A;最小脉宽信号的半高宽为 100 ns,系统的最小分辨率为 5 ns,可实现步进为 5 ns 脉宽的灵活调节,最大脉宽则与储能电容有关。

1 电路的设计与分析

1.1 电路基本结构

本文设计的高压陡脉冲形成回路拓扑结构如图 1 所示,其中多个固态开关串联分别组成开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 ; C_0 为储能电容,为高压脉冲提供能量; R_0 为负载电阻; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 的驱动信号均由 FPGA 经过精准延时模块后隔离触发;每个开关管均添加阻容吸收保护回路。电路工作过程可简述为:高压源给储能电容 C_0 充电,由 FPGA 产生驱动信号,通过控制 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 四个开关的时序,从而产生陡前后沿的高压脉冲信号。

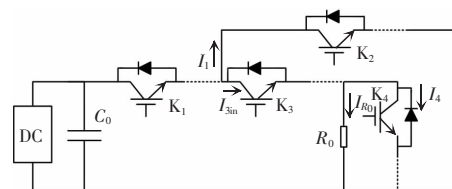


图 1 高压陡脉冲形成回路拓扑结构

Fig. 1 Loop topology formed by high-voltage steep pulse

电路的基本结构满足二阶 RLC 方程,与常见的串联固态开关高压脉冲形成回路相似,但其只能控制上升沿的时间,且无法消除回路电感对上升沿的影响;与 Marx 发生器相比,本文设计的结构所用器件少,由器件本身产生的杂散电感和分布电容小,因而此结构能产生陡前后沿脉冲信号。

1.2 触发时序的设计与分析

本文脉冲陡化的关键技术在于四路开关时序的设计,由于主回路 PCB 布线产生的寄生参数;回路连接导线产生的电感;阻容吸收保护回路等因素极大地影响着高压脉冲的上升沿的速度。本文设计了如图 2 所示的控制时序,其可分为 $t_0 \sim t_5$ 五个状态,时序设计的关键在于构造纳秒量级短路状态以释放回路中各种分布电容和杂散电感的能量,提高负载电流的上升率。

State 1: $t_0 \sim t_1$ 时刻,仅 K_2 导通,将 K_2 所在支路等效为电感 L_2 ,则等效电路如图 3 所示,此时回路处于静态不产生电流。

State 2: $t_1 \sim t_2$ 时刻, K_1, K_2, K_4 导通, K_3 关断, 将 K_1, K_2, K_4 支路等效为电感 L_1, L_2, L_4 , 则等效电路拓扑结构如图 4 所示, 此时回路初始状态 $U_c(0)=E, I_1(0)=0$; 假设无电流漏过 K_3 , 则有

$$L_1 C \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + L_2 C \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} = U_c(t) \quad (1)$$

$$I_1(t) = AB(e^{Bt} - e^{-Bt}) \quad (2)$$

式中: $A = \frac{EC}{2}$; $B = \sqrt{\frac{1}{C(L_1 + L_2)}}$ 。

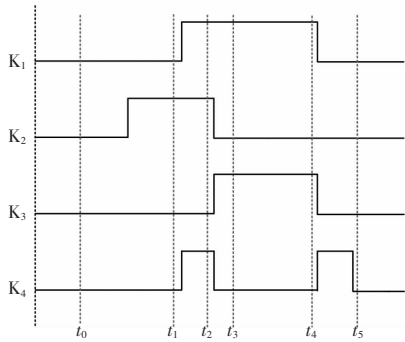


图 2 回路控制时序

Fig. 2 Loop control timing

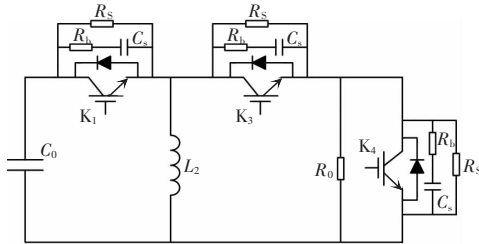


图 3 State 1 等效拓扑结构

Fig. 3 Equivalent topology in State 1

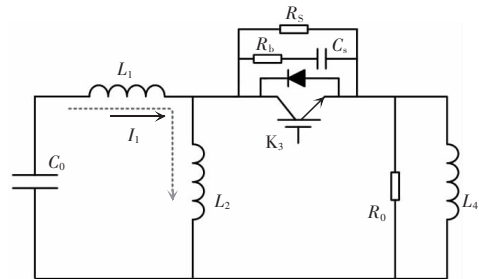


图 4 State 2 等效拓扑结构

Fig. 4 Equivalent topology in State 2

由于 $f(x) = e^x - e^{-x}$ 为单调增函数, 因此短路电流与时间呈指数增加关系。当 L_1 和 L_2 为几十纳亨量级时, 在开关管允许承载电流的范围内, 短路时间可估算为百纳秒量级。此目的主要为释放杂散电

感、导线电感所存储的能量, 可在最大程度上减少回路电感对上升沿的影响; 若有电流通过 K_3 漏过, 此时也由于 K_4 的导通, 可减少漏到负载上的电流, 减小漏电流对上升沿的影响。

State 3: $t_2 \sim t_3$ 时刻, K_1, K_3 导通, K_2, K_4 关断。 L_1 处于稳态, 可认为短路, 回路可等效为如图 5 所示的拓扑结构。 K_2 在关断的瞬间, L_2 电流续流, 图 5(a) 中初始状态为 $I_L(0) = I_1(t)$, 根据 RL 回路零输入响应可得

$$I_L(t) = I_1(t) e^{-\frac{R_0}{L_3} t} \quad (3)$$

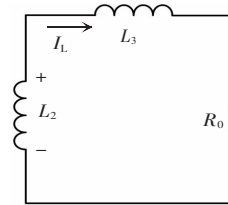
图 5(b) 中初始状态为 $U_c(0) = E, I_{C_0}(0) = 0$, 则根据 RL 回路零状态响应可得

$$I_{C_0}(t) = \frac{E}{R_0} \left(1 - e^{-\frac{R_0}{L_3} t} \right) \quad (4)$$

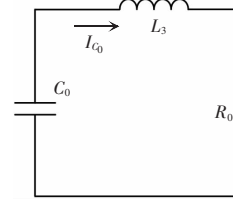
因此流入 K_3 的电流为

$$I_{3in}(t) = I_1(t) e^{-\frac{R_0}{L_3} t} + \frac{E}{R_0} \left(1 - e^{-\frac{R_0}{L_3} t} \right) \quad (5)$$

从式(5)可以看出 I_{3in} 为 L_2 中续流短路电流与 RL 回路零状态电流之和, 因此在负载上具有较大的电流上升率, 产生高压陡脉冲信号。



(a) 电感续流拓扑



(b) 零状态响应拓扑

图 5 State 3 等效拓扑结构

Fig. 5 Equivalent topology in State 3

State 4: $t_3 \sim t_4$ 时刻, 此时回路进入稳态, L_1, L_3 等效为短路状态, 回路的等效拓扑结构如图 6 所示, 则有

$$I_{R_0} = \frac{E}{R_0} \quad (6)$$

State 5: $t_4 \sim t_5$ 时刻, 在 K_1, K_3 关断, K_4 导通的瞬

间,将 K_1 、 K_3 、 K_4 所在支路等效为电感 L_1 、 L_3 、 L_4 ,回路等效拓扑结构如图 7(a)所示,此时流入 K_3 的电流 I_{3in} 为 I_{R_0} 与 I_4 之和。

回路的初始状态为: $U_{L_4}(0)=E, I_4(0)=\frac{E}{R_0}$, 根据 RL 回路零输入响应可得

$$I_4(t) = \frac{E}{R_0} e^{-\frac{R_0}{L_4}t} \quad (7)$$

由式(5)可知 $I_{R_0} = \frac{E}{R_0}$, 则可得

$$I_{3in}(t) = \frac{E}{R_0} e^{-\frac{R_0}{L_4}t} + \frac{E}{R_0} \quad (8)$$

由上可得 K_1 、 K_3 关断, K_4 导通的瞬间, 主回路电流大于 State 4 稳态工作的电流。

在 K_1 、 K_3 关断, K_4 导通后, 将开关管 K_4 源漏电容、负载分布电容等效为 C_i , 回路等效拓扑结构如图 7(b)所示, 此过程与典型切尾电路相同, 通过 RC 快速放电陡化脉冲下降沿。

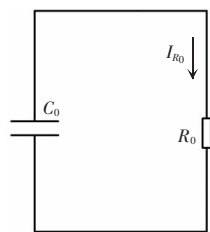
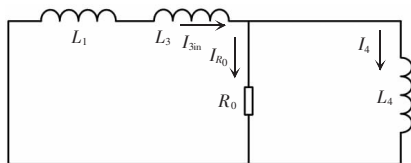
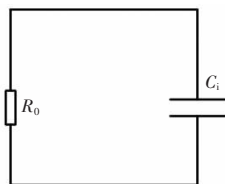


图 6 State 4 等效拓扑结构

Fig. 6 Equivalent topology in State 4



(a) 零输入响应拓扑



(b) 尾切电路拓扑

图 7 State 5 等效拓扑结构

Fig. 7 Equivalent topology in State 5

2 系统关键点设计与分析

2.1 系统最小分辨率

本文设计的高压陡脉冲发生电路开关管触发信号由 FPGA 产生, 其具有脉宽灵活可调、高精度、低抖动的优点。系统的最小分辨率如图 8 所示, 由上位机设置三路驱动信号在同一时刻触发, 三路信号之间脉宽差值为 5 ns。从图中可以看出, 每路信号之间延时为 5 ns, 与设置的脉宽差相同, 故驱动信号的最小分辨率为 5 ns。陡脉冲实现的关键在于时序控制, 一方面 5 ns 的分辨率可实现脉宽的灵活可调, 另一方面可实现不同时序的组合, 实现任意时序的组合控制。

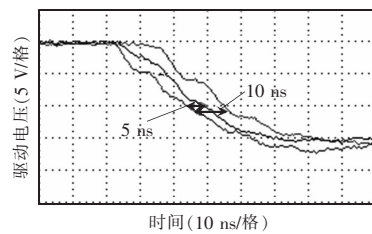


图 8 系统最小分辨率

Fig. 8 Minimum system resolution

2.2 负载脉冲前后沿

采用如图 1、图 2 所示的电路结构及时序进行实验, 其中 DC 为 2 kV 的高压电源; 触发信号脉宽为 10 μ s, 图 9(a)~(d) 为不同时间刻度下的实验波形, 其中 I_1 为短路电流, I_4 为流过 K_4 的电流, R_0 电压为负载电压, I_{R_0} 为负载电流 I_{R_0} 。

图 9(a) 中负载上电压均值为 1.8 kV, 脉宽为 10 μ s, 短路电流 I_1 峰值约为 92 A; 从图 9(b) 看出 I_1 在 280 ns 内增大至峰值, 在 400 ns 内迅速降至“T”点约 32 A, 此后约 1.2 μ s 后缓慢降至零, I_4 峰值为 25 A, I_{R_0} 约为 18 A, 电流值均在开关管安全工作范围内; 从图 9(c) 和图 9(d) 看出, 以电压值的 10%~90% 为标准计算上升沿约为 50 ns, 下降沿约为 70 ns, 在下降沿处, I_4 在约 40 ns 时增加至峰值约为 14 A, 随后在约 120 ns 内减小为零, R_0 与 K_4 构成放电回路, 陡化下降沿。

若 K_2 和 K_4 一直处于关断状态, 即回路无 K_2, K_4 协同工作, 则电路结构与传统固态开关串联电路相同, 此时负载 R_0 上电压与电流波形如图 10 所示。其中 I_{R_0} 为流过负载的电流, R_0 电压为负载电压, 从图中可以看出负载脉冲的上升沿约为 200 ns, 下降沿约为 4 μ s, 而有 K_2, K_4 协同工作时脉冲信号上升沿和下降沿分别为 50 ns、70 ns, 故此新型电路具有明显优势。

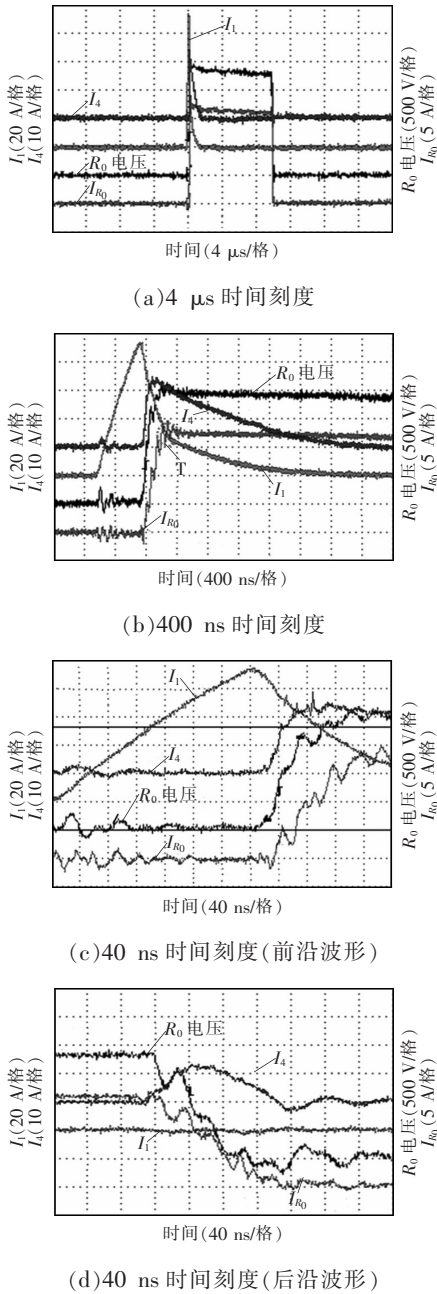


图 9 负载脉冲前后沿电压与电流

Fig. 9 Voltage and current of load pulse front and rear edges

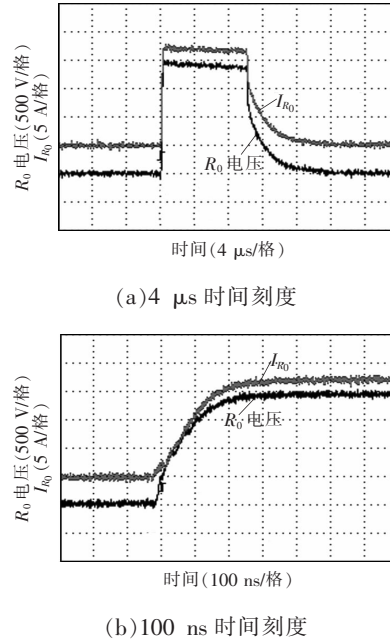


图 10 无 K_2, K_4 协同工作负载脉冲前后沿

Fig. 10 Load pulse front and rear edges without K_2 and K_4 coordination

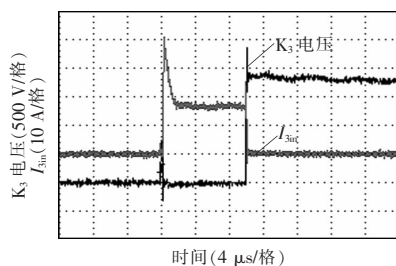
2.3 K_3 的瞬态分析

K_3 导通与关断瞬间波形分别如图 11 和图 12 所示, 其中 I_{3in} 为流入 K_3 的电流, K_3 为集射极两端电压。如图 11 所示, 约 130 ns 内流入 K_3 的电流峰值约为 40 A, 约 1.2 μ s 后流入 K_3 的电流减小为稳定值约 18 A。如图 12 所示, 在 K_3 关断瞬间流入 K_3 的电流会出现短暂的电流尖峰, 约 30 ns 内电流增加量为 10 A, 此后约 120 ns 内电流减少至零。前文 I_{3in} 的理论分析表明: K_3 导通的瞬间 I_{3in} 为 L2 续流电流与 RL 回路零状态响应之和, K_3 关断瞬间电流值会大于稳态工作电流, 故实际波形与理论电流变化趋势相符。

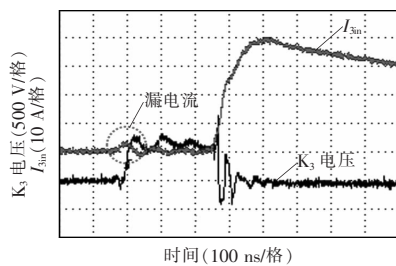
从图 11(b) 中看出, K_3 集射极电压在未导通时增加至约 800 V, 这是由于漏过 K_3 阻容吸收之路的电流约为 4 A, 此时吸收电容开始充电所致; K_3 关断时出现的电流尖峰导致 K_3 在集射两端形成电压尖峰, 从图 12 可以看到, 电压尖峰值为 2.4 kV。为了保护开关管 K_3 , 同样采用串联结构以提高其耐压值。

在本文设计的电路结构中, 开关管 K_3 起着重要的作用, 在脉冲产生的瞬间 K_3 限制短路电流 I_1

流向负载以减少对负载信号上升沿的影响;在脉冲结束的瞬间 K_3 需要有足够耐压值以消除“过压击穿”现象对系统工作寿命的影响。



(a) 4 μs 时间刻度



(b) 100 ns 时间刻度

图 11 K_3 导通瞬间流入电流与电压

Fig. 11 Current and voltage at the moment when K_3 is turned on

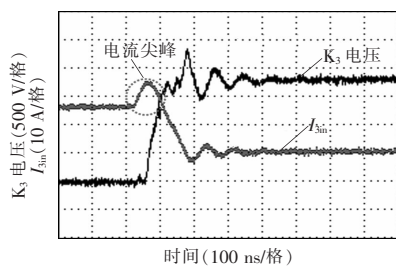


图 12 K_3 关断瞬间流入电流与电压

Fig. 12 Current and voltage at the moment when K_3 is turned off

2.4 最小脉宽

本文设计的脉冲信号最大脉宽由储能电容 C_0 所决定,则根据式(9)得出当高压电源、负载电阻不变时,增大储能电容就能增加放电时间。

$$UC = It = \frac{Ut}{R} \quad (9)$$

实验所得最小脉宽如图 13 所示,其中 R_0 为负载信号,从图中可以看出,电压幅值约为 1.8 kV,半高宽约为 100 ns, 上升沿约为 70 ns, 下降沿约为 40 ns。其中在脉冲信号下降沿处出现较大的振荡,本文设计的 K_3 导通的脉宽为 100 ns,由于 K_3 的脉

宽过小,开关管的栅射极电容较大,在导通时间内不足以将其充满就关断所致。

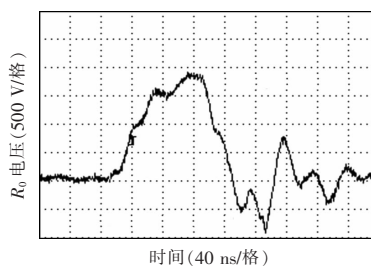


图 13 实验所得最小脉宽

Fig. 13 Minimum pulse width obtained in the experiment

3 结论

(1)针对生物医疗等高压陡脉冲应用需求,设计了基于固态开关串并联结构高压陡脉冲发生电路,结合时序控制技术,提出了一种脉冲陡化新方法,能较好解决回路布线电感、开关管串联数目增加后杂散参数、布线电感以及导线电感对开关速度的影响,并从理论计算上分析了脉冲陡化的关键,分析了系统工作的过程以及设计要点。

(2)以 2 kV 高压直流电源、110 Ω 的负载电阻进行实验,负载脉冲信号的上升沿约为 50 ns,下降沿约为 70 ns,输出电流幅值约 18 A;最小脉宽信号的半高宽为 100 ns,系统的最小分辨率为 5 ns,可实现步进为 5 ns 脉宽的灵活调节,最大脉宽则与储能电容有关。

参考文献:

- [1] 余琳. 用于高压脉冲电场杀菌的 IGBT 串联型高压脉冲发生器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 6.
Yu Lin. High-voltage pulse generator based on series-connected IGBTs for pulsed electric fields (PEF) sterilization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 6 (in Chinese).
- [2] Mathias R A, Williams E M. Economic design of saturating reactor magnetic pulse [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1955, 74(2): 169-172.
- [3] 孙承志. 介质阻挡放电用高频高压电源的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.

- Sun Chengzhi. Development of high frequency and high voltage power supply used in discharge of dielectric barrier [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004 (in Chinese).
- [4] 孙杏凡. 等离子体及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- Sun Xingfan. The Plasma and Its Applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983 (in Chinese).
- [5] Wilson C R. Pulse sharpening in a uniform LC ladder network containing nonlinear ferroelectric capacitors [J]. IEEE transactions on electron devices, 1991, 38(4): 1154-1159.
- [6] 万山明, 吴芳, 黄声华. 一种高压正弦波变频逆变电源 [J]. 电源技术应用, 2003, 15(10): 545-548.
- Wan Shanming, Wu Fang, Huang Shenghua. A kind of variable frequency inverter with high voltage sinusoidal wave [J]. Power Supply Technologies And Applications, 2003, 15(10): 545-548 (in Chinese).
- [7] 魏颖恬, 肖越勇, 张肖, 等. 胰腺癌纳米刀消融参数的设置原则与临床应用[J]. 中国介入影像与治疗学, 2017, 14(4): 252-255.
- Wei Yingtian, Xiao Yueyong, Zhang Xiao, et al. Clinical application and principled parameter setting of Nanoknife for pancreatic cancer [J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2017, 14(4): 252-255 (in Chinese).
- [8] 姚陈果. 新型复合脉冲不可逆电穿孔治疗肿瘤关键技术及临床应用研究进展[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 248-263.
- Yao Chenguo. Key technology and progress of novel composite pulse irreversible electroporation for tumor treatment with its clinical application [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 248-263 (in Chinese).
- [9] 陈雪, 吕毅, 任冯刚, 等. 不可逆电穿孔治疗恶性肿瘤的数值模拟[J]. 中国医疗设备, 2017, 32(10): 110-117.
- Chen Xue, Lü Yi, Ren Fenggang, et al. Numerical simulation irreversible electroporation based tumor treatment [J]. China Medical Devices, 2017, 32(10): 110-117(in Chinese).
- [10] 姚陈果, 赵亚军, 李成祥, 等. 不可逆电穿孔微创消融肿瘤技术的研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3725-3737.
- Yao Chenguo, Zhao Yajun, Li Chengxiang, et al. Recent advances in tissue minimally invasive ablation with irreversible electroporation [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3725-3737 (in Chinese).
- [11] 吴沛宏, 余俊豪. 不可逆电穿孔消融技术的应用原理与实践[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2015.
- Wu Peihong, Yu Junhao. Application Principle and Practice of Irreversible Electroporation Ablation Technique [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2015 (in Chinese).
- [12] 董守龙. 高频双极性微秒脉冲电场不可逆电穿孔消融肿瘤的实验与机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- Dong Shoulong. Experiments and mechanism research of irreversible electroporation by high frequency bipolar microsecond pulse for tumor ablation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [13] 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(2): 112-118.
- Rao Junfeng, Li Encheng, Wang Yonggang, et al. Self-triggering all-solid-state Marx generator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(2): 112-118 (in Chinese).
- [14] 张驰. 脉冲升压型高压脉冲电源的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- Zhang Chi. Study on high voltage pulse power supply with pulse Boost mode [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- [15] 卞昌浩. 基于 Blumlein 和 TLT 的模块化高频纳秒脉冲发生器的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Bian Changhao. Development of a modular high-repetition-rate nanosecond pulse generator based on Blumlein and TLT [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018 (in Chinese).



施阳杰

作者简介:

施阳杰(1996-),男,硕士研究生。研究方向:脉冲功率技术。E-mail:1364233484@qq.com。

梁勛(1982-),男,通信作者,博士,研究员,硕士生导师。研究方向:激光及光电电子技术、功率电子技术、高压脉冲技术等。E-mail:liangxu@aiofm.ac.cn。

林颖(1989-),女,大专,实验师。研究方向:激光技术。E-mail:linying@aiofm.ac.cn。

方晓东(1963-),男,博士,研究员。研究方向:激光技术。E-mail:xdfang@aiofm.ac.cn。