

单信号驱动的固态脉冲源

罗雨航¹, 郑静¹, 杨鸽¹, 李恩成²

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611231; 2. 国网四川省电力公司攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要:随着脉冲功率电源在材料表面改性、污水处理以及生物医学等方面的广泛应用, 脉冲功率电源正在朝着小型化、驱动简单及稳定的方向发展。目前, 由于固态脉冲电源信号需要进行高压隔离, 造成系统复杂且体积庞大。为了降低系统的质量和体积, 文中提出了一种单信号驱动的固态脉冲源的拓扑结构, 通过一个信号控制第一级开关的导通和关断, 经主电容对剩余开关的门极电容充电后自行触发余下开关。最后, 基于该拓扑结构在通用电路分析(PSPICE)中仿真了10级单信号驱动的固态脉冲源电路, 结果表明该新型电路拓扑直流充电电源工作在800 V, 系统输出幅值约为8 kV, 脉宽约为200~800 ns的脉冲电压, 对于生物医学应用、肿瘤消融以及污水处理有重大意义。

关键词: 固态脉冲电源; 单信号驱动; 固态开关; 脉冲功率

中图分类号: TN 782 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)04-0016-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220404

Solid-state Pulsed Generator Driven by Single Signal

LUO Yuhang¹, ZHENG Jing¹, YANG Ge¹, LI Encheng²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, Sichuan, China; 2. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: With the wide application of pulsed power supply in material surface modification, sewage treatment and biomedicine, pulsed power supply is developing towards miniaturization, simple driving and stability. At present, since the solid-state pulse power signal needs to be isolated at high voltage, the system is complicated and bulky. In order to reduce the weight and volume of the system, a topology of a single-signal-driven solid-state pulsed generator is proposed. The turn-on and turn-off of the first-stage switch is controlled by a signal, and the gate capacitance of the remaining switches is charged through the main capacitor, and then the remaining switches are triggered themselves. Finally, based on this topology, a 10-level single-signal-driven solid-state pulsed generator circuit is simulated in PSPICE. The results show that the DC charging source of the new circuit topology works at 800 V, the system output amplitude is about 8 kV, and the pulse width is about 200~800 ns pulsed voltage, which is of great significance for biomedical applications, tumor ablation and sewage treatment.

Key words: solid-state pulsed generator; single-signal-driven; solid-state switch; pulse power

0 引言

固态脉冲源是一种储能装置, 可以实现脉冲压缩和电压放大的功能, 被广泛应用于国防^[1]、电力装备^[2]、绝缘材料^[3]、等离子体放电^[4]、生物医学工程^[5]等领域, 特别是在生物工程领域, 脉冲电场引起的电穿孔效应^[6-8]已广泛应用于肿瘤消融^[9]、消毒杀菌^[10]等领域。传统脉冲电源是基于火花隙开

关^[11], 可输出兆瓦级功率, 主要应用于国防军工领域。但由于火花隙开关具有重复频率低、寿命短、效率低、体积大等缺点, 造成系统庞大, 较少应用于民用领域。随着电力电子技术的发展, 电力电子开关的应用促进小型脉冲电源的发展, 同时全控性固态开关可使脉冲电源输出的脉冲参数任意可调^[12-15], 大幅提升输出效率且操作简单。传统的固态脉冲电源通常采用高压磁隔离驱动技术^[16], 该技术可将驱动信号和功率部分进行隔离, 避免脉冲电源在放电

时冲击驱动电路。但高压磁隔离驱动需要较多的磁芯来完成多路隔离信号驱动,加大了系统的体积和质量,同时驱动电路复杂且不稳定。而采用光纤提供隔离同步信号的驱动方案隔离电压高,同步性更好,但是成本也较高,且需提供多路隔离的驱动供电电源。因此,驱动稳定且结构简单的高压脉冲发生器将使得结构更加紧凑,节约成本。文献[17]提出一种可靠的功率 MOSFET 堆叠方法,控制一个 MOSFET,通过特定的电路结构使得后续 MOSFET 自动开通和关断。这种方法可以使高压脉冲发生器的驱动更为简单,减少了体积和质量。但受驱动电路、控制型号、半导体开关差异等因素的影响,不同步的半导体开关的开通,容易引起过压击穿^[18]。通常需要添加有源钳位电路或 RCD 缓冲电路。传统的有源钳位电路反馈时间较长,文献[19]采用了一种高速的反馈电路,将钳位动作时间缩短到 30 ns,从而减少过压尖峰。

目前的串联半导体开关技术,由于开通关断不同步,在有源区工作时长不一致。文献[20]提出了一种自触发高频纳秒发生器,其主电路结构采取 Marx 电路,在远离电源一级提供一路信号驱动开关的导通状态,其余开关通过主电容对开关门极电容充电自行触发导通,驱动电路简单且无需磁芯隔离,大大缩减电源的体积和质量。因此,在此基础上提出了一种单信号驱动的固态脉冲电源的拓扑结构,该结构只需要一路信号驱动第一级固态开关,其余开关通过主电容的充电分压自行进行导通,系统即可实现对负载释放脉冲高压。该结构无需磁芯隔离驱动,除第一级开关外其余开关均不需单独的驱动电路,大大缩减了系统的体积和质量,节约成本。

1 单信号驱动的固态脉冲源工作原理

图 1 为单信号驱动的固态脉冲源的拓扑结构,以 3 级为例,每一级包含一个主电容,2 个充电电阻和一个 MOSFET 开关。直流电源 DC 通过充电电阻对各级主电容进行并联充电,当各级主电容达到额定电压时,触发开关 Q1 导通,电容 C1 经过 Q1—Ctr1—Ciss1—C1 回路对开关 Q2 的门极电容 Ciss1 进行充电。当电容 Ciss1 两端电压达到开关 Q2 的阈值电压时,开关 Q2 自行触发导通。同理,后级开关依次导通。当全部开关均可靠导通后,各级主电容 C1、C2、C3 串联对负载放电。此时,如果提供关断信号使第一级开关 Q1 切换到关断状态,各级主

电容依然处于充电状态;而第二级开关 Q2 的门极电容 Ciss1 无法形成充电回路,电容 Ciss1 停止充电且通过 Ciss1—Ctr1—R2 回路对电阻 R2 释放电能。当 Ciss1 两端电压降到阈值电压以下无法维持开关 Q2 导通,开关 Q2 自行关断。同理,后级开关逐级关断。当各级开关均关断时,系统处于截止状态,电源将不再对负载放电。

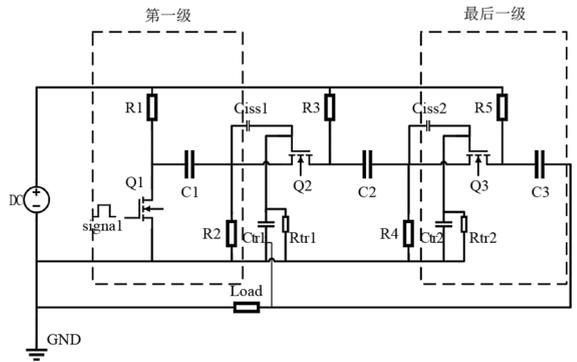


图 1 单信号触发的固态脉冲源

1.1 充电模型

图 2 为单信号驱动的固态脉冲源的主电容充电回路示意图,直流电源 DC 经过充电电阻对各级主电容进行并联充电,充电电阻可防止在系统放电时脉冲高压冲击直流电源,同时也可在放电时起到隔离作用。但由于充电电阻的存在限制了充电电流的大小,也限制了各级主电容的充电速度。通过设置直流电源 DC 的充电电压可改变各级主电容两端的电压,进而可输出不同幅值的脉冲高压。

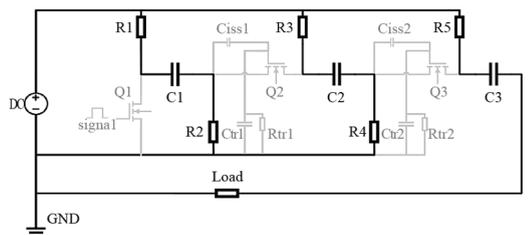


图 2 单信号的固态脉冲源的主电容充电回路

图 3 为单信号驱动的固态脉冲源的单信号导通回路的示意图。当导通信号触发开关 Q1 开通时,由于主电容 C1 电容值远大于开关 Q2 门极电容 Ciss1 的电容值,此时电容 C1 会充当直流电源对电容 Ciss1 进行充电,充电回路为 C1—Q1—Ctr1—Ciss1—C1,如图 3(a) 红色实线所示。与此同时,电容 C1 经过 C1—Q1—R1 对电阻 R1 放电,但该回路与 Ciss1 充电回路是并联关系,两个回路独立并不会互相影响。当 Ciss1 两端电压达到开关 Q2 的阈值电压时,开关 Q2 自行导通。同理,开关 Q2 导通后,主电容 C1 和 C2 串联等效为直流电源对 Ciss2 进行充电,Ciss2 两

端电压达到开关 Q3 的阈值电压时,开关 Q3 自行导通。充电回路如图 3(b)红色实线所示,充电路径为 C1—Q1—Ctr2—Ciss2—C2。同理,电容 C1 和 C2 并联也会对电阻 R4 放电,但该回路与电容 Ciss2 充电回路为并联关系,二者互相独立。当开关 Q1、Q2、Q3 均触发导通时,系统会进入放电状态,此时可通过测试是否有输出电压来确定各级开关是否完全导通。

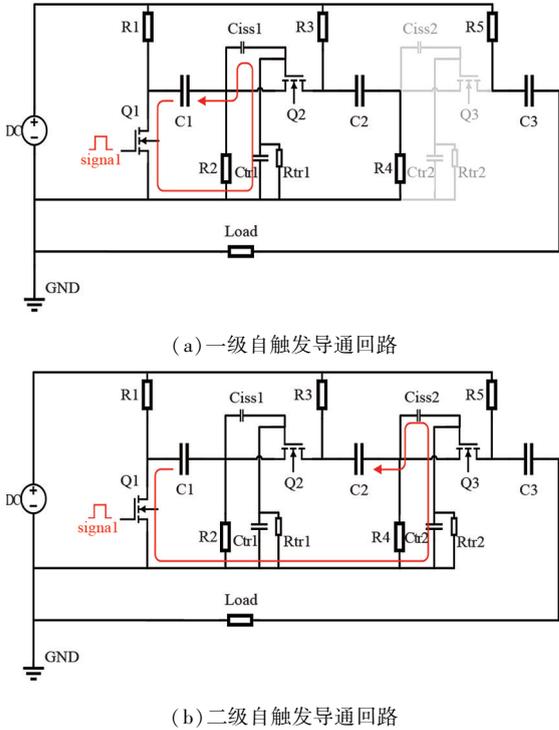


图 3 单信号的固态脉冲源的单信号导通回路

1.2 放电模型

图 4 为单信号驱动的固态脉冲源的放电回路示意图。当各级开关全部导通时,系统进入放电状态,主电容 C1、C2、C3 将会串联对负载放电,实现电压的叠加。通过改变 DC 直流电源的充电电压可改变系统输出脉冲电压的幅值,通过调节开关 Q1 的导通信号脉宽,可使系统输出不同脉宽的脉冲电压。

图 5 为单信号驱动的固态脉冲源的第二级单信号关断回路示意图。提供信号触发开关 Q1 关断时,门极电容 Ciss1 和 Ciss2 都将停止充电,同时门极电容 Ciss1 和 Ciss2 都将分别对电阻 R2 和 R4 进行能量泄放,放电回路如图中绿色实线所示。当门极电容 Ciss1 和 Ciss2 两端电压低于开关阈值时,开关 Q2 和 Q3 断开,系统进入截止状态。根据一阶电路的零输入响应原理,电阻 R2 和电阻 R4 的阻值决定了开关 Q2 和开关 Q3 的下降沿,阻值越大其下降沿越慢。但对系统输出脉冲的下降沿几乎没有影响,这是由于开关 Q1 一旦断开,整个系统对负载的

放电回路就处于开路状态。因此系统输出脉冲的下降沿取决于开关 Q1 的信号。

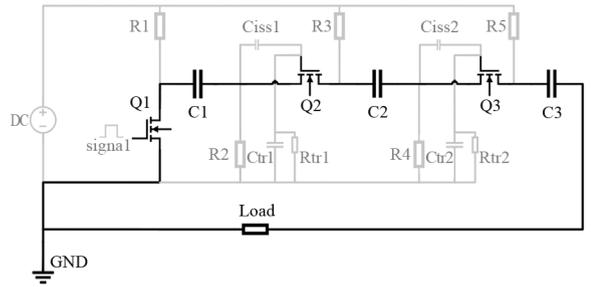


图 4 单信号的固态脉冲源的放电回路

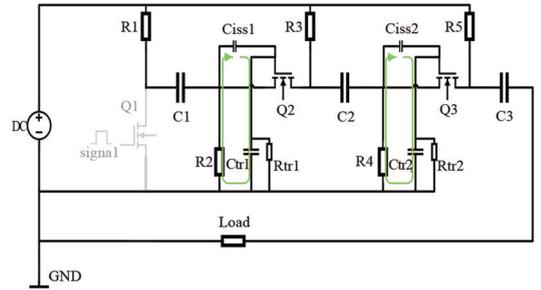


图 5 单信号的固态脉冲源的自触发关断回路

2 仿真实验

为验证单信号驱动的固态脉冲源的工作原理,通过通用电路分析(PSPICE)仿真了 10 级电路拓扑,如图 6 所示。直流充电电源工作电压设置为 800 V,负载为 500 Ω 纯电阻负载,每级主电容的容量为 1 μF,各级开关的选型为 CREE 公司的 C2M0080120D,耐压 1200 V,门极电容为 950 pF,导通阈值电压为 3.2 V,门源极电压范围为 -10~25 V。由于级数越大,驱动电容的充电电压越大。因此根据电容分压关系,随着级数的增加,驱动电容 Ctri 的取值越小。Ctr1—Ctr9 的电容取值依次为 330 pF、160 pF、105 pF、80 pF、65 pF、55 pF、45 pF、40 pF、30 pF。驱动电容参数的选择可参考文献[21]。表 1 为仿真电路实验参数。

为比较自触发驱动电压和第一级信号的电压差异,测试了第一级开关 Q1 和第二级开关 Q2 的门源极电压,测试结果如图 7 所示。从图中可明显看出 Q1 的驱动电压为完整的方波,幅值为 20 V。而 Q2 的自触发驱动电压有一个明显的欠阻尼震荡,这是由于自触发过程中 Q2 门极电容 Ciss2 充电回路中的电阻电容参数引起的,可在各级开关门源极并联瞬态二极管得到一定的抑制。同时,从图中可看出 Q2 自触发驱动电压幅值约为 17.2 V,已达到开关

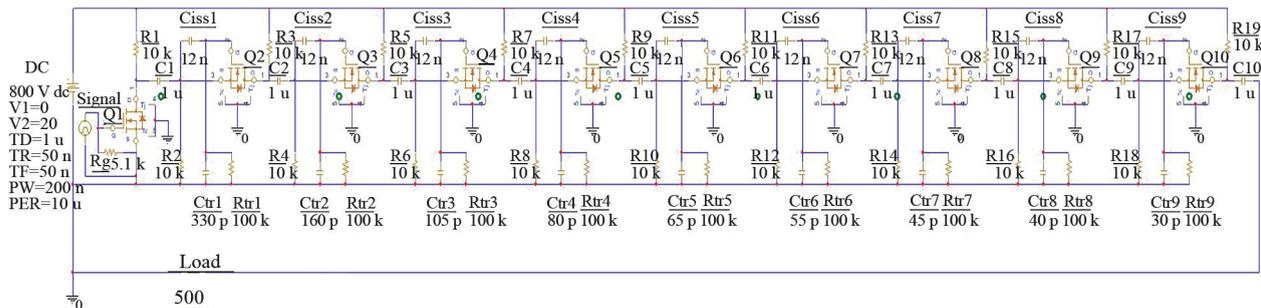


图 6 单信号的固态脉冲源的仿真电路

表 1 实验参数

参数	数值	参数	数值
直流充电源电压/V	800	充电电阻/kΩ	10
脉冲宽度/ns	200	门极串联电阻/kΩ	100
门极电容/nF	12	负载电阻/Ω	500

明显看出各输出脉冲波形顶宽接近开关 Q1 的驱动信号脉宽,进一步验证了该电源可输出不同脉宽的脉冲电压。

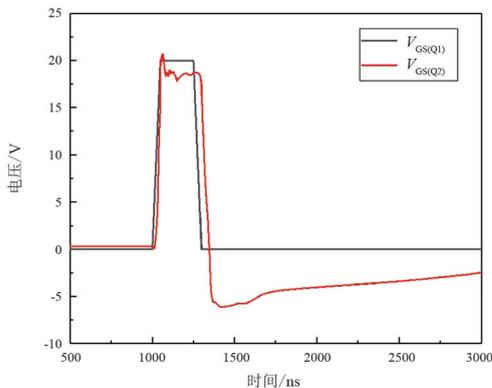
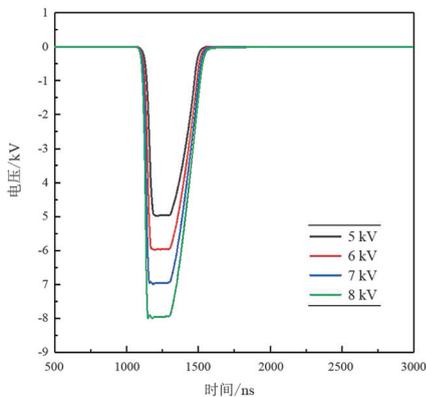
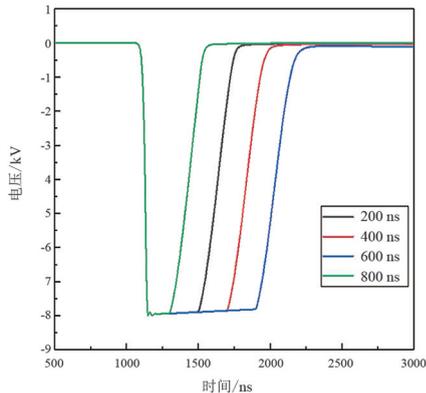


图 7 开关 Q1 和 Q2 驱动电压对比



(a) 输出不同电压

Q2 的阈值电压,能可靠导通开关 Q2。



(b) 输出不同脉宽

为验证单信号驱动的固态脉冲源可输出不同幅值和不同脉宽的脉冲电压,分别测试了 DC 直流充电源工作在 500 V、600 V、700 V、800 V 时的输出电压,如图 8(a) 所示,此时第一级开关驱动信号脉宽为 200 ns,负载为 500 Ω。从图中可明显看出不同幅值的输出电压波形顶宽约为 200 ns,这是由于电源对负载放电回路必须经过开关 Q1,而后级开关由于门极串联电阻导致开通速度变慢,会导致后级开关的脉宽变宽。因此脉宽最窄的开关 Q1 决定了电源输出电压脉冲顶宽。同时,可看出电源输出 5 kV、6 kV、7 kV、8 kV 的脉冲电压的上升沿分别约为 81 ns、65 ns、54 ns、49 ns,输出电压越高上升沿越短,这是由于输出电压的幅值取决于直流充电源的工作电压,工作电压越大,各级主电容的电压越大,自触发回路电流越大,触发上升沿越窄,促使电源对负载输出的脉冲电压上升沿越窄。如图 8(b) 测试了该电源工作电压在 800 V,负载为 500 Ω,第一级开关 Q1 的驱动信号脉宽分别为 200 ns、400 ns、600 ns、800 ns 的输出脉冲电压波形,从图中可

图 8 单信号驱动的固态脉冲源脉宽可调和电压可调波形

为验证该电源可应用不同阻值负载的功能,测试了工作电压为 800 V, Q1 信号脉宽为 200 ns,负载分别为 500 Ω 和 2 kΩ 的输出脉冲波形,如图 9 所示。从图中可明显看出,负载为 500 Ω 和 2 kΩ 的输出波形脉冲顶宽与 Q1 驱动信号脉宽保持一致,下降沿分别为 352 ns 和 903 ns,负载阻值越大,下降沿越大,这是由于在相同幅值的电压下,阻值越大,放电电流越小,因此负载越大输出脉冲的下降沿越大。

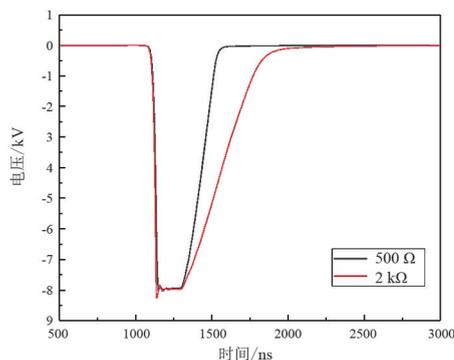


图9 不同阻值负载单信号驱动的
固态脉冲源输出波形

3 结 论

上面提出的单信号驱动的固态脉冲源只需单个驱动信号即可控制整套电源的开通和关断,通过控制第一级开关的导通状态,自行导通和关断其余开关,极大简化驱动电路,大幅缩减系统的体积和质量,最终输出幅值高达 8 kV、脉宽 200~800 ns 的脉冲电压,对于生物医学应用、肿瘤消融以及污水处理有重大意义。但该技术由于充电电阻的存在造成系统的充电速度较慢,充电损耗较大且输出脉冲频率会受到限制,今后将围绕这些问题展开研究工作。

参考文献

- [1] 刘锡三.高功率脉冲技术的发展及应用研究[J].核物理动态,1995,12(4):16-18.
- [2] L Hamada, N Otonari, T Iwasaki. Measurement of electromagnetic fields near a monopole antenna excited by a pulse[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, 2002, 44(1):72-78.
- [3] 杜伯学,梁虎成,杜强,等.交流与脉冲电压联合作用下环氧树脂表面电荷的动态特性[J].高电压技术, 2018, 44(3):688-695.
- [4] Shoulong DONG, Chenguo YAO, Nan YANG, et al. The Development of Solid-State Nanosecond Pulsed Plasma Jet Apparatus Based on Marx Structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24):35-44.
- [5] K SUBRAMAINI, R VEERARAGHAVALU. Diode clamped gate driver-based high voltage pulse generator for electroporation[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2018, 26:2374-2384.
- [6] 唐潇,姚陈果,郑爽,等.不可逆电穿孔多因素动态电导率模型的研究与分析[J].电工技术学报, 2021, 36(14):2912-2921.
- [7] 姚陈果,宁郡怡,刘红梅,等.微/纳秒脉冲电场靶向不同尺寸肿瘤细胞内外膜电穿孔效应研究[J].电工技

术学报, 2020, 35(1):115-124.

- [8] 姜松,张旺,饶俊峰,等.一种用于细胞电穿孔的新型宽窄脉冲结合的高压脉冲发生器: 202110885515 [P]. 2021-09-24.
- [9] 吕彦鹏,姚陈果,董守龙,等.高频双极性脉冲诱导 SKOV-3 细胞生物电效应的实验研究[J].高电压技术, 2018, 44(2):617-623.
- [10] Maj Kobe ZGALIN, Dusa HODZIC, Matej REBERSEK, et al. Combination of Microsecond and Nanosecond Pulsed Electric Field Treatments for Inactivation of Escherichia Coli in Water Samples [J]. Journal of Membrane Biology, 2012, 245:643-650.
- [11] 褚宗兰,张适昌,刘正华.采用火花隙开关的冲击磁体脉冲发生器[C]//中国物理学会全国粒子加速器学术年会论文集.北京:中国物理学会, 1988:342-347.
- [12] 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):1-11.
- [13] 刘克富.固态 Marx 发生器研究进展[J].高电压技术, 2015, 41(6):1781-1787.
- [14] 饶俊峰.基于固态开关的重复频率脉冲功率源的脉冲调制技术及其应用[D].上海:复旦大学, 2013.
- [15] 李柳霞.容性负载下全固态脉冲源的特性研究[D].上海:复旦大学, 2013.
- [16] Ying LIU, Rui FAN, Xiaoning ZHANG, et al. Bipolar high voltage pulse generator without H-bridge based on cascade of positive and negative Marx generators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2):476-483.
- [17] H L HESS, R J BAKER. Transformerless capacitive coupling of gate signals for series operation of power MOS devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5):923-930.
- [18] 张春朋,张树卿,赵国亮.串联 IGBT 动态均压方法综述[J].电工技术学报, 2013, 28(S1):197-202.
- [19] Ting LU, Zhengming ZHAO, Shiqi JI, et al. Active clamping circuit with status feedback for HV-IGBT[C]. 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, 2012:1-5.
- [20] Weirong ZENG, Chenguo YAO, Shoulong DONG, et al. Self-Triggering High-Frequency Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8):8002-8012.
- [21] Lei PANG, Tianjun LONG, Kun HE, et al. A Compact Series-Connected SiC MOSFETs Module and Its Application in High Voltage Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12):9238-9247.

作者简介:

罗雨航(1993),男,硕士,助教,研究方向为脉冲功率、脉冲电源、高电压等。(收稿日期:2022-06-03)