



·脉冲功率技术·

20 kV 高压脉冲幅度校准装置设计*

龙国浩¹, 袁 汉¹, 何 鹏¹, 郭晓东¹, 王凌云²

(1. 中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621000; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对高压脉冲幅度的量值传递需求, 开展了脉冲幅度 1~20 kV、脉宽 1~100 μs 的高压脉冲幅度校准装置设计。校准装置以高压 MOSFET 器件为核心, 搭建多级 Marx 结构实现高压脉冲成型, 同时通过截尾回路的设计缩短脉冲下降时间, 实现矩形脉冲波形的输出。在 Marx 结构基础上开展装置整体设计, 通过触发脉冲信号及高压直流电源电压调节脉宽与幅度, 通过隔离电源及光信号保证了高压隔离强度。装置采用高精度高压探头和数据采集卡构成校准装置的内部测试系统, 其测量值作为校准装置的标准量值, 经评定装置脉冲幅度不确定度为 2%, 并通过两台比对法进行了验证。采用其他多型高压探头对校准装置进行实验测试, 结果表明与低压脉冲校准源测试相比, 高压脉冲可明显有效地表征高压探头的性能及测量准确度, 同时本装置也可作为高压脉冲发生器应用于脉冲功率领域其他用途。

关键词: 脉冲功率; 脉冲幅度; 校准; MOSFET; Marx

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220298

Design of 20 kV high voltage pulse amplitude calibration device

Long Guohao¹, Yuan Han¹, He Peng¹, Guo Xiaodong¹, Wang Lingyun²

(1. The Center of Metrology and Testing, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to meet the need of magnitude transmission of high voltage pulse amplitude, this paper develops the design of high voltage pulse amplitude calibration device with pulse amplitude of 1-20 kV and pulse width of 1-100 μs . The calibration device takes the high voltage MOSFET as the core, and builds up a multi-stage Marx structure to achieve high voltage pulse. At the same time, the truncation circuit greatly reduces the pulse fall time and realizes the output of rectangular pulse waveform. On the basis of the Marx structure, the unit is built as a whole. The pulse width and amplitude can be adjusted by triggering pulse and high voltage DC power supply voltage, and the high voltage isolation is guaranteed by isolating power module and optical signal. The device uses high-precision high voltage probe and oscilloscope to constitute the internal measurement module. The measurement value is the standard value of the calibration device. The uncertainty of the pulse amplitude of the device is evaluated, and it is verified by comparison of two measurement standards. The calibration device is tested with other types of high voltage probes. The results show that, compared with the low-voltage pulse calibration source, the high voltage pulse can effectively characterize the performance and measurement accuracy of the high voltage probe, achieve the calibration of the high voltage probe, and the device can also be applied as a high voltage pulse source for other purposes in the field of pulse power field.

Key words: pulse power, pulse amplitude, calibration, MOSFET, Marx

脉冲功率领域中包含了大量的高电压、大电流、高功率短脉冲的产生及测量, 高压脉冲幅度作为高压脉冲信号最重要的波形特征, 其量值准确度及溯源体系一直是脉冲参数计量、高压计量的重要研究内容, 也直接表征了脉冲功率中瞬态信号的量值准确性和一致性^[1]。目前高压探头的校准一般仅给出了高压直流/工频下的衰减比准确度, 低压下的频率响应及阶跃信号时域响应, 未直接进行高压脉冲下的测试及校准。虽然国内外进行了很多高压脉冲发生器的设计及研究, 但一般均关注其功率输出或后级物理效应, 不能直接用于高压脉冲波形参数的校准, 除标准的冲击高压校准源外, 目前仍缺乏如高压矩形波、双指数波的标准波形脉冲校准源。针对上述现状, 本文

* 收稿日期: 2022-09-23; 修订日期: 2022-11-22

联系方式: 龙国浩, longghnuaa@163.com。

通信作者: 王凌云, 101kpa@sina.com。

进行了高压脉冲幅度校准装置的设计,以 MOSFET 为核心搭建多级 Marx 装置,可产生典型脉冲幅度 1~20 kV、脉冲宽度 1~100 μs 、上升时间小于 100 ns 的高压脉冲,其脉冲幅度不确定度为 2%,可用于不同类型高压探头的量值溯源及校准应用,也可作为高压脉冲发生器用作其他适用场合。

1 装置设计及实现

1.1 装置总体方案

用于计量校准用途的标准脉冲幅度校准装置,除了需要关注常规输出电气参数(脉冲电压、脉冲宽度、上升时间、下降时间)以外,还需重点关注其脉冲幅度的准确度、顶降、重复性和稳定性。常见脉冲功率领域更关注特定阻抗下的信号输出及功率密度^[2-4],而计量校准关注标准测量条件下的高压脉冲波形特征,根据其需求进行总体方案的设计,重点从开关、脉冲成型结构进行设计。

目前,脉冲功率技术中常用的开关器件包括气体开关、液体开关、等离子体开关和半导体固态开关等。传统的气体开关通常无法自主关断,较难实现矩形脉冲波形的输出^[5-6]。随着半导体技术的不断发展,近年来半导体固态开关在脉冲功率领域得到越来越多的应用,由于其具备体积小、稳定性高和门极可关断等特性,可以使得其输出波形具备很高的灵活性和准确性,适用于设计与实现具有高稳定性和高准确性要求的标准幅度高压脉冲发生器^[7-8]。

常见的高压脉冲成型包括 Marx 结构、LTD 结构、半导体固态开关串并联等结构,分别适用于不同的应用场合。Marx 发生器基于“并联充电,串联放电”工作原理,通过脉冲高压叠加获得脉冲电压输出倍增的效果^[9]。LTD 结构则是利用感应叠加的原理,将多个模块输出脉冲进行合成,LTD 每一级原边电路均接地,无需进行隔离设计,其输出波形与磁芯特征相关。本装置根据需求较为关注脉冲输出的波形特征,选择 Marx 结构进行搭建,由于固态开关 Marx 每一级独立工作,输出波形的频率、幅度和波形特征有极大的灵活型。校准装置在 Marx 结构上开展设计实现,主要包括多路触发信号电路设计、Marx 触发信号及供电的高压隔离设计以及内部测试单元。内部测试单元由高压探头与数据采集卡组成,其测量值作为装置的标准测量值。

1.2 Marx 结构设计

根据装置的总体设计方案,首先进行单模块的设计和验证。本装置设计脉冲波形上升时间需不超过 100 ns,电流不超过 2 A。目前各种典型半导体固态开关中,高压 MOSFET 耐压值可达到 3.3, 4.5 kV 等,上升时间一般小于 50 ns,因此本装置选择 MOSFET 作为核心器件,选择某耐压值 4.5 kV 的 MOSFET 进行单模块电路的搭建,重点开展了 MOSFET 的驱动电路设计。MOSFET 接通关断过程中栅级源级间表征为电容充放电过程,选择 IXDI614YI 集成驱动芯片进行驱动,通过提高驱动电流降低米勒效应影响^[10],保证脉冲输出的上升时间和下降时间。根据高压隔离的需求,单模块接收光信号作为触发信号,采用隔离 DC/DC 模块进行供电。通过设计单模块实现了脉冲幅度 100 V~4 kV 可调,上升时间不超过 25 ns。

固态开关 Marx 结构与传统基于气体开关的 Marx 原理一致,但是不同于传统气体开关仅仅需触发前级,后续级会自击穿闭合导通。固态开关 Marx 需对每一级进行独立的触发电路设计,因此触发回路设计较为复杂。同时每一级开关触发时所处的电位依次增加,因此每一级驱动电路必须进行隔离设计。固态开关 Marx 的每一级均需独立触发,也成为其相应的优势,通过控制不同的触发状态及时序可调制出不同的高压脉冲波形。本装置各级均同步触发,从而尽可能缩短脉冲的上升时间。

本设计中关键的多级固态开关 Marx 结构如图 1 所示,其为 6 级 Marx 结构,粗线表示独立高压线缆,通过高压线缆实现各单模块、高压电源、放电负载的连接,高压脉冲为正极性脉冲,最终在 R_{13} 两端成型,其中负端为 GND。高压探头或其他高阻负载连接于 PULSE-OUTPUT、GND 间即可实现装置的高压脉冲输出。

根据高压电容、MOSFET 安全工作范围要求,高压电源 DC-IN 端输入设计为 100 V~4 kV 可调输入, $R_1\sim R_6$ 为电容充电限流电阻,MOSFET₁~MOSFET₆ 为脉冲成型主开关,MOSFET₇~MOSFET₁₂ 为缩短下降时间的截尾回路, $R_7\sim R_{12}$ 为截尾回路的限流电阻。装置的主要工作过程如下:

(a) 充电阶段。MOSFET₁~MOSFET₆ 处于断开状态,MOSFET₇~MOSFET₁₂ 处于导通状态,通过高压电源对装置进行充电,其中 $R_1\sim R_6$ 为充电限流电阻,装置充电时间由器件各参数计算可知。充电完成后,高压电源不再有电流输入,所有单模块均处于相同状态,其中单模块高端电压为电源电压,低端为地。

(b) 放电阶段。首先将 MOSFET₇~MOSFET₁₂ 断开,延时大于约 1 μs 后,MOSFET₁~MOSFET₆ 通过驱动电路实现固定时间的导通,装置输出固定脉冲宽度的高压脉冲,整个过程中 MOSFET₇~MOSFET₁₂ 仍处于断开状态。

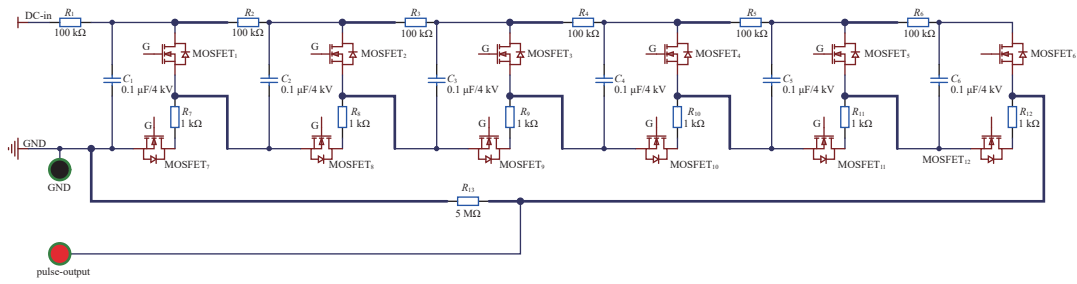


Fig. 1 Schematic diagram of multistage solid state switch Marx structure

图1 多级固态开关 Marx 结构原理简图

高压脉冲成型为典型的 Marx 串联放电,如第二级的高压端因开关导通升压至充电电压的 2 倍,依次类推,第 N 级的高压端升压至充电电压的 N 倍,最后电压通过整体负载实现放电回路,实现各级脉冲电压的叠加。

(c)断电阶段。MOSFET₁~MOSFET₆ 断开,断开约 100ns 后 MOSFET₇~MOSFET₁₂ 导通约 1 μs 的时间,高压脉冲成型结束,电压降低至初始状态。各级 MOSFET 的残余电容通过低阻抗回路实现快速放电,大大缩短脉冲下降时间。高压脉冲完成一个波形的输出,所有固态开关恢复到断开状态,装置完成一次高压脉冲输出的全部过程。

1.3 脉冲波形优化

本校准装置设计为外部接高阻负载或测量设备,因此内部选取大阻值高压无感电阻作为脉冲成型电阻。如采用传统的 Marx 结构中 R_7 ~ R_{12} 一般为高压电阻或者高压二极管,多级回路造成大量的杂散电容和电感的存在,同时还包括了固态开关的残余电容,当高压脉冲输出完毕后电容与脉冲成型负载共同构成了 RC 放电回路,脉冲下降沿为 30~200 μs,使得输出脉冲偏离矩形波。本装置增加截尾回路的设计,高压脉冲关断后打开截尾回路,各固态开关的残余电容通过 R_7 ~ R_{12} 快速释放到地端, R_7 ~ R_{12} 为对应的电流限制电阻,可将下降沿有效减小至 500 ns~1.5 μs,满足了系统的设计需求。系统截尾设计在原基础上增加了一倍的 MOSFET 器件及相应的触发驱动设计,截尾回路开关在主开关接通时需处于关断状态。

高压脉冲成型中,回路中的电容电感等杂散参数均会影响脉冲波形的信号完整性。高压连接线及其他元器件中均存在电感,电感将直接影响高压脉冲的上升沿。为减小杂散参数对输出波形的影响,在电路设计时,对 PCB 电路板进行优化设计,例如采用布局紧凑、走线采用同轴的方式、回路导线尽量加粗等方法,来减小电路中的杂散参数。

同步触发与高压隔离也直接影响了装置正常工作及高压脉冲波形特征,光耦隔离、磁隔离一般不超过 6 kV,本装置设计采用光信号进行隔离^[11]。驱动电路将电脉冲信号转换为光信号,Marx 发生器的每级采用光接收器将光信号转变为触发电信号。经测试初始电触发脉冲至 MOSFET 上升沿延时约 120 ns,多路测试延时差不超过 5 ns,不影响 Marx 结构的多级同步性,因此 Marx 中各级的光信号均可由同一路电信号触发。光隔离有效保证了装置的同步性和触发信号完整型,但采用光信号隔离需进行单独的隔离供电,选用 RECOM 的 20 kV 高隔离度 DC/DC 供电,对 Marx 各级进行了有效的电气隔离。

1.4 装置设计实现

校准装置在 Marx 结构上进行整体装置的设计实现如图 2 所示,主控/触发电路选择常用的 ARM M4 系列 MCU 实现 2 路 PWM 电信号的输出,通过定时器比较模式实现 2 路脉冲信号的频率、脉宽及时间间隔可调,时间间隔调节分辨率为 10 ns^[12]。每路电信号输出选用 AVAGO 的 HFBR1414TZ 将电信号转换为 6 路 820 nm 光信号,Marx 中通过 AVAGO 的 HFBR2412TZ 接收光信号,将光信号转换为电信号控制 MOSFET 驱动器。高压模块电源选择 100 V~4 kV 可调电压输出,通过高压模块电源的电压调节控制装置的高压脉冲幅度。

高压脉冲幅度校准装置的核心为脉冲幅度的准确度,为了提高其准确度,本装置中高压脉冲成型单元设计为激励源,通过内部测试单元实现脉冲的测量作为装置输出的标准量值。内部测试单元采用高压探头与数据采集卡直接测量,对比 20 kV 内主流的各高压探头,选取标称准确度最高的北极星 PVM-1 探头,数据采集卡可选择 100 MHz 带宽内 12 位采集卡^[13-14]。装置测量值不确定度来源主要包含了高压探头测量不准、数据采集卡测量不准以及测量结果的重复性。本装置输出高压脉冲频域范围均在 5 MHz 内,北极星 PVM-1 高压探头在该范围内衰减比误差限技术指标为 ±1.5%,数据采集卡 NI 5164 脉冲幅度测量误差限为 ±0.65%,测量重复性实测约为 0.3%。取单次测量值为装置标准量值,根据不确定度评定方法可得到测量值的不确定度为 2%。

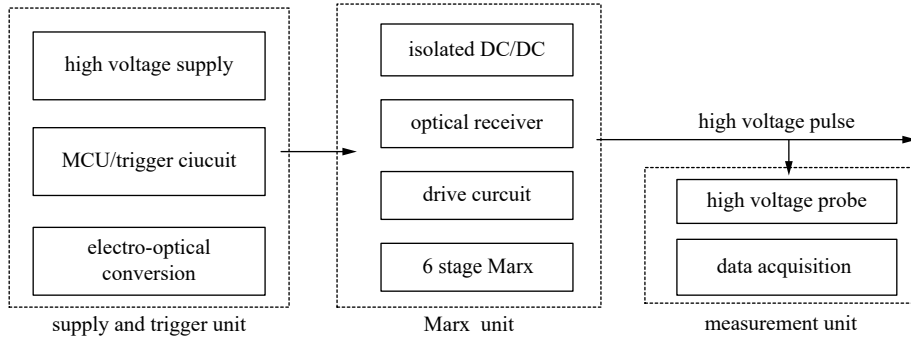


Fig. 2 Composition sketch of calibration device
图 2 校准装置组成简图

2 实验验证

为验证校准装置性能,装置进行了高压脉冲输出,同时采用多型高压探头进行了测试。图 3(a)为测试装置图。图 3(b)为装置典型脉宽 1 μs、幅度为 1~20 kV 的高压脉冲输出,其中 1 kV 时上升沿约 15 ns,随着幅度增加上升时间增加,20 kV 脉冲输出时上升时间约 85 ns。图 3(c)为 1~100 μs 内典型不同脉宽的高压脉冲输出,通过对比可以看出,通过截尾回路的设计有效缩短了脉冲下降时间,其中 1 kV 时下降时间约为 1.2 μs,20 kV 输出时下降时间约为 780 ns。通过表 1 可得不同脉冲幅度输出时的高压直流电源电压输出值,可以看出脉冲电压输出通过 Marx 结构进行了有效的多级叠加,与方案设计相符。

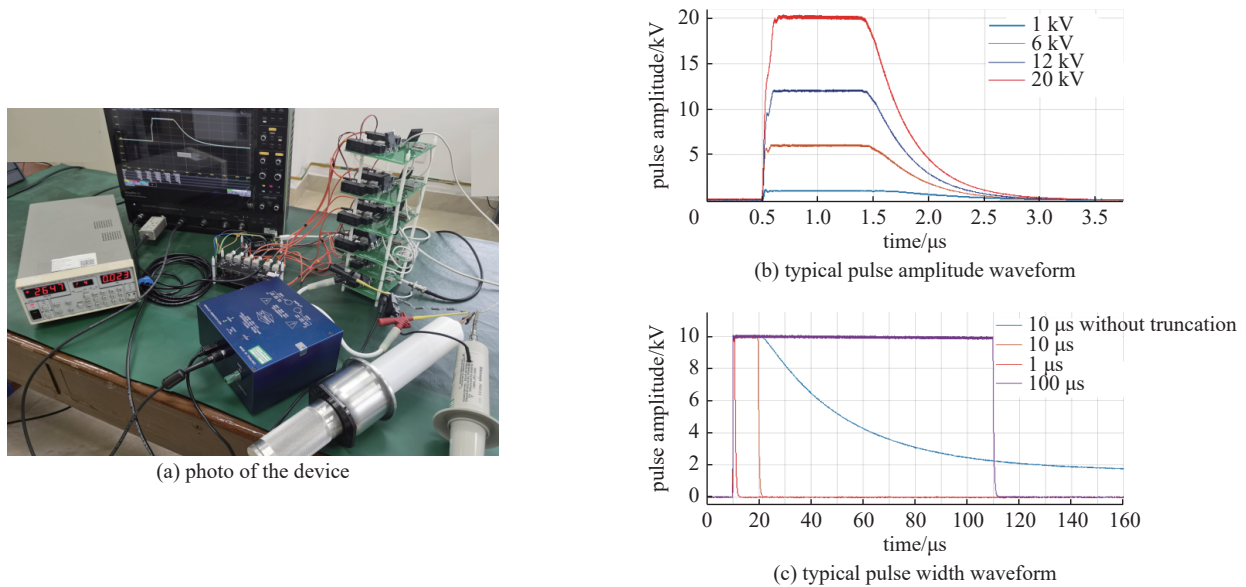


Fig. 3 Photo diagram and output waveform diagram of high voltage pulse amplitude calibration device
图 3 高压脉冲幅度校准装置实物图及输出波形图

为验证校准装置输出脉冲幅度的准确度,另选取一只北极星 PVM-1 高压探头,接入力科 Wavepro 804HD 示波器进行两台比对。Wavepro 804HD 示波器直流增益误差限为±0.5%,因此可认为装置标准值与 PVM-1 测量值的测量不确定度相同,装置标准值与 PVM-1 测量值如表 1 所示,两台比对^[15]满足

$$|y_1 - y_2| \leq \sqrt{(U_1 y_1)^2 + (U_2 y_2)^2} \quad (1)$$

式中: y_1, y_2 分别为装置标准值、PVM-1 测量值; U_1, U_2 分别为对应的测量不确定度,均为 2%。

选取 CIC 公司 DP20-20K-LVC 及泰克公司 P6015A 作为典型高压探头进行测试,高压探头接入校准装置数据采集卡的另一通道,测试数据如表 1 所示,DP20-20K-LVC 高压探头在 1~15 kV 内脉冲幅度测量误差在±1%以内,但 15~20 kV 测量值准确度明显降低,调整脉宽可以看出 DP20-20K-LVC 高压探头在波形上升沿后 10 μs 内有明显过冲现象,波形失真,因此 DP20-20K-LVC 探头在测量 10 μs 脉宽内、15~20 kV 脉冲幅度时量值不能得到保证。P6015A 高压探头在全量程范围内脉冲幅度测量误差在±3%以内,但其低压补偿调节会严重影响测量值,厂家也同

表 1 多型高压探头测试数据表
Table 1 Multi-type high voltage probe test data table

standard voltage/kV	supply voltage/kV	voltage of PVM-1/kV	voltage of DP20-20K-LVC/kV	voltage of P6015A/kV
1	0.176	1.007	1.008	1.023
6	1.050	6.052	6.052	6.027
12	2.100	12.080	12.110	12.040
18	3.200	18.150	19.620	17.780
20	3.600	20.220	23.040	20.340

样建议在更换示波器或温度变化时进行补偿调节,因此 P6015A 需在良好的补偿调节、校准状态下才能保持标称的测量准确度。

3 结 论

本文完成了高压脉冲幅度校准装置的设计,采用基于 MOSFET 的多级 Marx 结构作为高压脉冲成型的关键部分,通过截尾回路设计优化了波形特征,通过触发控制、高压隔离、内部测试完成装置的设计实现。通过试验测试可知,装置实现了预期的技术指标,表明 MOSFET 固态开关、Marx 发生器可有效应用于高压脉冲校准源的设计,装置可用于典型高压探头的测试及校准。本文中重点进行了高压脉冲激励源的设计,脉冲幅度的准确度依赖于现有货架测量产品,后续可据此为出发点,通过设计测量电路或对高压脉冲源幅度进行理论计算及验证,进一步提高脉冲幅度的准确度。

参考文献:

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [2] 陈静, 周晓青. 基于固体开关器件的新型高压脉冲驱动源[J]. 现代电子技术, 2012, 35(4): 208-210. (Chen Jing, Zhou Xiaoqing. New high-voltage pulse driving source based on solid switch device[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(4): 208-210)
- [3] 石小燕, 丁恩燕, 梁勤金, 等. 20kV/20kHz/100A高压脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 045002. (Shi Xiaoyan, Ding Enyan, Liang Qinjin, et al. Design of 20kV/20kHz/100A high voltage pulse generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 045002)
- [4] Ryoo H J, Kim J S, Rim G H, et al. Development of 60kV pulse power generator based on IGBT stacks for wide application[C]//Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh IEEE International Power Modulator Symposium. 2006: 511-514.
- [5] Redondo L M. A DC voltage-multiplier circuit working as a high-voltage pulse generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2725-2729.
- [6] Rao Junfeng, Liu Kefu, Qiu Jian. All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1123-1128.
- [7] 王冬冬. 大功率固态开关在脉冲功率应用中的特性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011. (Wang Dongdong. Characteristic analysis of high power solid state switches in pulsed power applications[D]. Shanghai: Fudan University, 2011)
- [8] 董守龙, 姚陈果, 杨楠, 等. 基于Marx电路的全固态纳秒脉冲等离子体射流装置的研制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 35-44. (Dong Shoulong, Yao Chenguo, Yang Nan, 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)
- [9] 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.
- [10] 孙国勇. 高性能驱动关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. (Sun Guoyong. Research on key technologies of high-performance drive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018)
- [11] 李洪涛, 王传伟, 王凌云, 等. 500 kV全固态Marx发生器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 917-920. (Li Hongtao, Wang Chuanwei, Wang Lingyun, et al. 500 kV all-solid-state Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 917-920)
- [12] 姚陈果, 章锡明, 李成祥, 等. 基于现场可编程门阵列的全固态高压ns脉冲发生器[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 929-934. (Yao Chenguo, Zhang Ximing, Li Chengxiang, et al. All solid-state high-voltage nanosecond pulse generator based on FPGA[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 929-934)
- [13] 陆福敏. 脉冲参数测量方法综述[J]. 上海计量测试, 2008, 35(2): 2-7. (Lu Fumin. Review of the measuring methods of pulse parameters[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2008, 35(2): 2-7)
- [14] 李启丙. 数字示波器中波形参数自动测量算法研究[J]. 计算技术与自动化, 2011, 30(3): 87-89. (Li Qibing. The research on waveform parameter automatic measurement algorithm of digital oscilloscope[J]. Computing Technology and Automation, 2011, 30(3): 87-89)
- [15] GJB 2749A-2009, 军事计量测量标准建立与保持通用要求[S]. (GJB 2749A-2009, General requirement of establishment and conservation of measurement standard for military metrology[S])