

一种100kV Mini-Marx发生器系统设计

李学华, 李玺钦, 马成刚, 李洪涛

中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900

摘要: 本文设计了一套包含Mini-Marx发生器及高压脉冲触发源的系统。触发源系统输出高压脉冲幅度达到0~30kV、脉冲前沿<15ns、脉冲宽度>500ns。采用固态IGBT半导体开关器件产生预触发和主触发脉冲, 控制气体开关氢闸流管VE4141瞬间导通放电输出高压脉冲信号, 去触发后级Mini-Marx脉冲发生器产生超过100kV的高压脉冲, 脉冲宽度超过200ns, 前沿小于3ns, 抖动不超过1.5ns。

关键词: Mini-Marx发生器, 氢闸流管, 抖动, 高压脉冲, 触发源

随着高功率脉冲技术的发展, Marx发生器是脉冲功率装置系统中用来获得幅值从数百千伏到数兆伏, 持续时间从几十纳秒到数微秒高压脉冲功率源的重要设备, 被广泛地应用于高功率微波、高功率激光、电磁发射等脉冲功率系统领域^[1-2]。高压脉冲触发源输出脉冲前沿的快慢、幅度的稳定以及抖动时间的大小等参数性能, 都取决于脉冲形成开关的特性, 因此氢闸流管触发源设计是该系统的关键。为满足100kV Mini-Marx发生器对高压脉冲触发源的技术需求, 本文采用以VE4141型氢闸流管器件为主体开关, 设计了带有预点火和主触发功能的触发电路^[3], 大大降低了氢闸流管工作时自身的抖动时间, 实现了触发源输出的高压脉冲信号不仅抖动<4ns, 达到触发电压在25kV时输出的高压脉冲前沿<15ns、脉宽>500ns。Marx脉冲发生器实现系统抖动<1.5ns, 输出幅度>100kV、前沿<3ns、脉宽>200ns的高压脉冲信号, 并给出了高压脉冲触发源和100kV Mini-Marx脉冲发生器输出波形的实验结果。

1 系统组成及工作原理

该100kV Mini-Marx发生器系统主要包括其触发源及100kV Mini-Marx发生器主体部分。

高压脉冲触发源系统主要由触发输入电路、脉冲整形及驱动电路、氢闸流管VE4141和高压脉冲形成电路四大部分组成, 如图1所示。其工作原理是: 氢闸流管经过15分钟的预热, 触发输入电路输出低压触发信号, 送至脉冲整形及驱动电路单元后, 产生两路延迟时间为0.5μs、脉宽为1μs和2μs左右的高压触发信号。一路传至氢闸流管VE4141的预点火极作为预触发脉冲信号, 而另一路

则加至氢闸流管VE4141的栅极上作为主触发脉冲信号, 来控制氢闸流管在高压脉冲形成电路中瞬间放电, 输出一幅度为0kV~30kV、脉宽大于500ns、前沿小于15ns以及系统抖动小于1ns的高压脉冲, 送至100kV Mini-Marx脉冲发生器作为触发信号。



图1 高压脉冲触发源系统图

Fig.1 High voltage pulse power supply system schematic

Marx发生器沿用传统设计原理, 见图2。5级电容器并联充电, 串联放电。本文采用单边充电的结构形式, 当电容充电完成后, 开关导通, 电容的电压即叠加输出到负载。

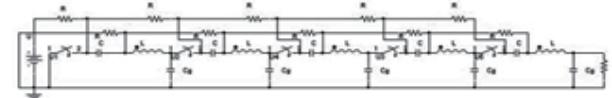


图2 Marx发生器原理图

Fig.2 Principle circuit of Marx generator

2 触发源设计

2.1 氢闸流管触发电路

为实现氢闸流管输出低抖动、快前沿的高压脉冲, 氢闸流管触发通过预触发脉冲和主触发脉冲相互作用实现。其触发电路由触发输入电路、数模混合电路^[4]、延迟电路^[5]、IGBT驱动电路^[6-7]以及触发脉冲形成电路五个部分组成, 如图3。触发输入电路将接收到的光信号通过光电转换器件转化为电信号, 与电触发信号和手动触发信号作用产生幅

度变换,输出三个电平信号;该组信号通过数模混合电路“与非”整形,输出一路脉宽为 $2\mu s$ 、幅度为低电平的触发信号;延迟电路将数模混合电路输出的信号分解、整形产生两路延迟时间为 $0.5\mu s$ 、脉宽分别为 $1\mu s$ 和 $2\mu s$ 的低电平触发信号;通过IGBT信号放大处理,产生两路幅度达500V、脉宽分别为 $1\mu s$ 和 $2\mu s$ 及固有延迟为 $0.5\mu s$ 的高压触发信号;触发脉冲形成电路由两个变比不同的脉冲变压器构成^[8],对IGBT驱动电路输出两路幅度为500V的触发信号进行幅度变换以满足氢闸流管的触发要求。由于氢闸流管的预点火脉冲和栅极触发脉冲幅度要求不一样,预点火脉冲的脉冲变压器匝数比采用1:2,栅极触发脉冲的脉冲变压器匝数比采用1:3。经过脉冲变压器,输出一路电压1kV、脉宽 $2\mu s$ 的高压脉冲,为氢闸流管预点火触发脉冲信号;一路电压1.5kV、脉宽 $1\mu s$ 、相对于预点火触发脉冲信号时延为 $0.5\mu s$ 的高压脉冲,为氢闸流管栅极触发脉冲信号。



Fig.3 Hydrogen thyratron trigger circuit schematic

2.2 高压脉冲形成电路

高压脉冲形成电路由高压电源、储能网络、高压气体开关和高压脉冲输出电路^[9-10]四部分组成,如图4。氢闸流管作为开关时,开关的接通由控制栅极上施加正触发脉冲实现。为进一步减少氢闸流管输出高压脉冲时固定时延在不同时刻的漂移,对氢闸流管(VE4141)采用预触发脉冲和主触发脉冲先后触发动作的工作方式。预触发脉冲电压幅度达1kV、脉宽 $2\mu s$,主触发脉冲电压幅度为1.5kV、脉宽 $1\mu s$ 、延迟时间为 $0.5\mu s$ 。

电路工作过程是:0~220V交流电源通过由高压变压器T1、整流桥(D1~D4)以及滤波电容(C1~C2)组成的高压电源后,输出可调节的直流高压信号。该直流高压一路经限流电阻R3对储能网络中的高压储能电容C3进行充电,给氢闸流管阳极(A)提供一个直流高电压;另一路则通过分压电阻R1和R2作用后加至数字式电压表两端,对电压数值进行显示;氢闸流管(VE4141)的预点火触发极G1和栅极G2两个触发电极未接收到来自氢闸流管触发电路输出的触发脉冲信号,则处于未触发状态。氢闸流管触发电路一旦触发动作,输出的两路触发脉

冲信号立刻被传至到氢闸流管(VE4141)的两个触发电极上,氢闸流管(VE4141)瞬间导通,储能网络中电容C3上的能量通过氢闸流管、高压脉冲连接器以及高压传输电缆迅速向负载放电,最终在100kV Mini-Marx发生器上实现输出幅度达到0~30kV、脉宽大于500ns、脉冲前沿小于15ns的高压脉冲信号。

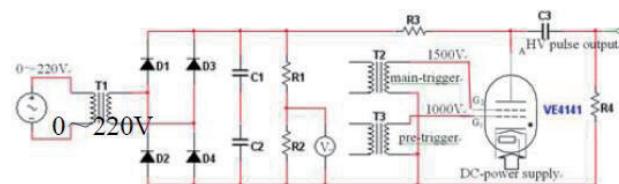


图4 高压脉冲形成电路原理

Fig. 4 High voltage pulse form circuit schematic

3 Mini-Marx设计

Marx结构设计总体要求电性能绝缘可靠,不能发生电击穿。在满足绝缘强度的情况下,Marx结构尽可能紧凑。^[1]评价一个Marx发生器的好坏,主要有两个指标:一是Marx发生器的稳定性,二是Marx发生器的动作时间、脉冲前沿和抖动^[11]。这就要求Marx发生器本身的电感要小,火花间隙开关的导通时延和抖动尽量小,为此设计同轴状结构,如图5。通过单边恒流充电方式输入,为5级电容并联充电,串联放电,末端连接负载。

图5所示为5级Marx发生器结构,每级采用3个7500pF陶瓷电容并联,充电电阻和对地电阻采用5W/2MΩ的金属膜固体电阻,电容电阻直接与全部采用倒角的宽铜片连接,有效减小了Marx发生器本身结构电感和回路电感。Marx发生器的电极并列成一排,前级开关导通产生的紫外线可导致后级开关间隙的预电离。将电极设计为扁球形,使每级间隙都可形成多通道放电,从而有效减小开关的导通时延和火花间隙电感。Marx发生器内部充纯氮气绝缘,使得整体结构紧凑,火花间隙变小,从而也减小了火花通道导通的电阻和电感。



图5 Marx发生器结构

Fig.5 Structure of Marx generator

4 实验结果分析

4.1 实验结果

该 100kV Mini-Marx 发生器系统通过进行一系列系统调试实验后，各项技术指标均达到设计要求。在触发源工作电压 25.8kV、Marx 充电电压 27.5kV、Marx 充气 0.4MPa（氮气）以及 Marx 发生器输出负载为 75Ω 时工作条件下，触发源输出的高压触发脉冲信号和 100kV Mini-Marx 脉冲发生器产生的高压脉冲信号波形如图 6。其主要技术参数达到：触发源输出触发脉冲幅度为 -25.2kV，前沿达到 14.87ns；100kV Mini-Marx 发生器产生的高压脉冲信号幅度为 -113kV (-22.6V×5000)，前沿 7.3ns；触发源输出的触发脉冲与 Marx 发生器产生的高压脉冲信号之间的延迟时间为 210.3ns。通道 3 为触发源系统输出的高压触发脉冲信号，测试采用 1000 : 1 高压探头；通道 4 为 100kV Mini-Marx 脉冲发生器产生的高压脉冲信号，测试采用 5000:1 高压探头。



图 6 触发脉冲及高压脉冲输出波形

Fig. 6 Trigger pulse and High voltage pulse output

4.2 实验分析

系统调试过程中，通过调高氢储存器热丝电压，触发源系统在工作电压 20kV 时，可以得到输出的高压脉冲前沿达到小于 10ns，从外触发输入到负载上获取高压脉冲的时间抖动实现小于 1ns（绝对值）。当触发源系统工作电压在 25kV 时，氢闸流管出现自击穿现象，导致触发源系统不能够正常工作，无法满足 100kV Mini-Marx 发生器要求触发源工作电压 20kV ~ 30kV 的技术指标。通过合理调节氢储存器热丝电压后，触发源系统工作电压在 30kV 时未出现异常现象。在工作电压为 25kV 时，触发

源系统输出的触发脉冲前沿达到小于 15ns，从外触发信号输入到在负载上获取触发脉冲的时间抖动实现小于 4ns（绝对值）。Marx 发生器匹配负载上成功获得超过 100kV 的高压脉冲输出，脉冲宽度超过 200ns，前沿小于 3ns，抖动不超过 1.5ns。

5 结论

实验证明，基于 VE4141 设计的触发源是该系统的重要组成部分，通过对氢闸流管器件参数的合理使用，以及电路结构上的优化设计，达到 100kV Mini-Marx 脉冲发生器的技术要求。在技术指标规定的工作电压（20kV ~ 30kV）范围内，对 100kV Mini-Marx 发生器可靠触发，提高了系统整体的可靠性。

参考文献

- [1] 刘锡山. 高功率脉冲技术 [M]. 北京：国防工业出版社，2005 : 333 — 367. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:333-367)
- [2] 王莹. 高功率脉冲电源 [M]. 北京：原子能出版社，1991 : 1-6. (Wang Ying. High pulsed power generator. Beijing: Atomic Energy Press, 1991:1-6)
- [3] 谢敏，丁伯南，刘云涛，等. 脱硫用重复频率脉冲电源设计 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3):435. (Xie Min, Ding Bonan, Liu Yuntao, et al. Design of pulse voltage generator with repeat frequency for DeSO₂. High Power Laser and Particle Beam, 2002, 14(3):435).
- [4] 李玺钦，丁明军，吴红光，等. 基于 TTL 数字电路控制的高压脉冲源 [J]. 强激光与粒子束, 2012.24(3):678-680. (Li Xiqin, Ding Mingjun, Wu Hongguang, et al. High-voltage pulsed power controlled by TTL digital circuit. High Power Laser and Particle Beams. 2012. 24(3):678-680)
- [5] 阎石. 数字电子技术基础 [M]. 北京：高等教育出版社，1985:271-310;432-456. (Yan Shi. Basic Digital Electronic Technology .Beijing: Higher Education Press. 1985:271-310, 432-456)
- [6] 甘孔银，汤宝寅，王小峰，等. 绝缘栅双极晶体管固体开关技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2002.14(6):954-956. (Gan K Y, Tang B Y, Wang X F, et al. Resarch on IGBT solid state switch. High Power Laser and Particle Beams. 2002. 14(6):954-956)

下转168页