

## 基于 Marx 发生器的快速 Q 开关驱动电路设计

冯 文, 颜凡江, 赵梁博, 杨 超, 李 旭

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 针对电光 Q 开关要求速度快的特点, 提出基于 Marx 发生器的高压快速调 Q 驱动电路的设计方法。利用高压模块产生一级高压为并联电容充电, 采用变压器隔离驱动 8 路 MOS 管。当触发信号引入时, 功率 MOS 管导通使电容串联同时放电, 从而电压倍增获得快速的高压脉冲。实验结果表明: 通过该方法获得了上升沿 12 ns, 幅值 3 000~4 000 V 数字可调的高压脉冲波形。相比于传统脉冲变压器法的波形, 上升时间减小了近 35 ns。此调 Q 电路已应用于激光二极管(LD)泵浦的固体 Nd:YAG 激光器中, 且长期稳定工作。

**关键词:** 调 Q; Marx 发生器; 功率 MOS 管; 高压脉冲

**中图分类号:** TN78; TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906009

## Design of high speed Q-switch drive circuit based on Marx generator

Feng Wen, Yan Fanjiang, Zhao Liangbo, Yang Chao, Li Xu

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of high speed for Q-switch, a novel design method of high speed Q-switch drive circuit based on Marx generator was proposed. The high pressure module was used to generate high voltage to charge the capacitors in parallel, and the transformer was used to drive 8 MOS transistors. When the trigger signal arrived, meanwhile the capacitors discharge in series as the MOS transistors were in ON-state, so that a higher voltage pulse can be obtained as the voltage multiplier. Experiment results show that the rise time of Q-switch pulse is about 12 ns, voltage magnitude is 3 000–4 000 V. Compared to the wave of traditional pulse transformer, the rise time minish 35 ns. The Q-switched module has already been used in the laser diode (LD) pumped solid Nd:YAG laser, and it works steadily and chronically.

**Key words:** Q-switched; Marx generator; power MOS transistors; high voltage pulse

## 0 引言

采用电光调 Q 技术可有效提高激光脉冲峰值功率并压缩脉宽<sup>[1-4]</sup>,而 Q 开关速度是影响激光器电光效率的一个重要因素,因此如何设计调 Q 驱动电路提高 Q 开关速度一直备受关注<sup>[5-9]</sup>。常用的电光调 Q 脉冲产生方法有三种<sup>[4,8]</sup>:脉冲变压器法、高频金属陶瓷三极管法和雪崩三极管法。脉冲变压器法具有电路结构最简单,供电电压低,输出电压可调范围宽以及干扰小等优点而被广泛应用,缺点是由普通铁氧体环形磁芯构成的变压器产生的高压脉冲前沿缓慢(40~90 ns)。高频金属陶瓷三极管法产生的高压脉冲前沿 2~5 ns,电压可调范围宽,缺点是触发电压需达到几千伏,电路设计复杂。采用雪崩三极管的优点是前沿时间快(2~3 ns),但是雪崩效应不稳定,电压调节范围小,供电电压较高,干扰较大,同时对多个雪崩管的一致性要求很高,且雪崩管容易损坏,因此器件选型困难。Marx 发生器由高储能密度、低电感的电容器和电子开关组成,利用电容充放电方式产生高压脉冲。其以结构简单,控制方便等优点,广泛应用于脉冲功率技术、高能物理及电工学领域<sup>[10]</sup>。该研究在分析传统 Marx 发生器基础上,选用 8 只功率 MOS 管串联作为单元开关使用。触发控制信号通过隔离变压器将 8 只 MOS 管同时导通,实现电容串联同时放电,进而电压倍增获得快速 Q 开关驱动高压脉冲波形。

## 1 工作原理及系统组成

### 1.1 传统脉冲变压器法原理<sup>[8]</sup>

传统脉冲变压器法的典型调 Q 驱动电路如图 1 所示,触发信号为低电平时,开关管 V 断开,一次高压 HV 通过电阻 R、C 和脉冲变压器 T 的初级线圈为电容 C 充电,当触发信号为高电平时,C 储存的能

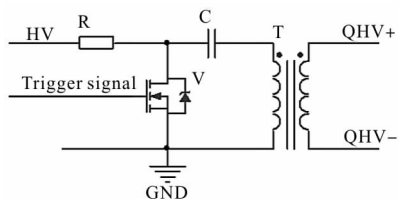


图 1 典型电光 Q 开关驱动电路

Fig.1 Typical electro-optic Q-switch drive circuit

量通过 V 快速释放,从而在脉冲变压器 T 的次级产生一个高压脉冲。

### 1.2 Marx 发生器原理<sup>[11]</sup>

传统 Marx 发生器是指电阻隔离型 Marx 电路,其基本原理就是高压源 HV 通过充电电阻 R 给储能电容 C 先并联充电,后导通主开关 S 改变电路结构使电容串联同时放电,从而通过电压倍增获得快速高压脉冲,电路结构原理图如图 2 所示。其中,一个电容 C 与相邻的两个充电电阻 R 构成了 Marx 发生器的一阶,文中采用 8 阶 Marx 电路。

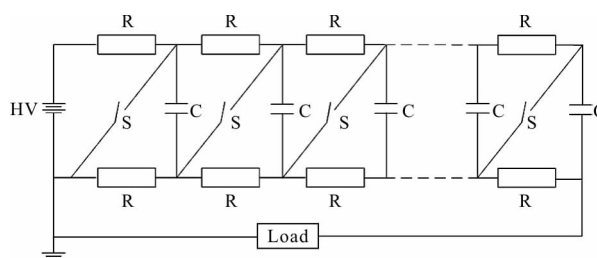


图 2 Marx 发生器基本电路

Fig.2 Basic circuit of Marx generator

### 1.3 系统组成

基于 Marx 发生器原理,文中设计的调 Q 驱动电路基本结构如图 3 所示,主要由一级高压转换电路、二级脉冲高压转换电路、一级高压可控制电路,触发脉冲输入电路四大部分组成。其中二级脉冲高压转换电路由储能电容、功率 MOS 管、充电电阻组成;触发脉冲控制电路由驱动芯片、驱动器件 MOS 管和隔离变压器组成。该驱动电路具备接收终端信息处理电路发送的数据包,并根据该数据包进行指令控制,具体包括 12 V 供电指令,一级高压大小可调指令、调 Q 电压脉冲触发指令。

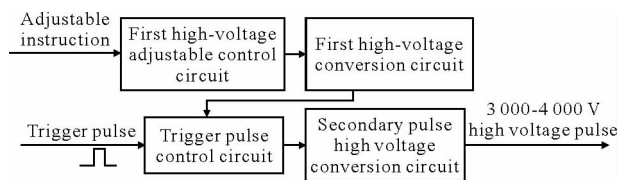


图 3 调 Q 驱动电路结构原理图

Fig.3 Schematic of Q-switch drive circuit

## 2 电路设计

### 2.1 一级高压转换电路

一级高压转换电路的核心是高压模块,将供电

电压 12 V 生成一级高压 HV。一级高压大小可调控控制电路是通过分立器件搭建的 DA 电路, 将一级高压可调指令, 解算为调 Q 高压可调信号控制高压模块实现一级高压大小可调, 进而实现脉冲高压幅度的数字可调。

### 2.2 触发脉冲控制电路

触发脉冲控制电路是核心电路之一, 原理示意图如图 4 所示, 包括驱动芯片 U1、驱动器件 MOS 管 V1 和 8 组隔离变压器 T1~T8。U1 将幅度 3.3 V 的触发信号转换成驱动能力更强幅度为 12 V 的触发脉冲信号, 驱动 MOS 管 V1。当触发信号未输入时, V1 管断开, 由高压模块产生的一级高压通过脉冲变压器 T1~T8 的初级向电容 C1 充电, 当触发信号输入时, V1 导通, C1 通过 T1~T8 的初级放电, T1~T8 均压在次级产生触发脉冲信号驱动二级脉冲高压转换电路的 8 路 MOS 管。脉冲变压器的匝比为 1:1, 其不仅实现了 8 路脉冲驱动信号的同时产生, 且将调 Q 驱动电路的前级触发脉冲电路与二级脉冲高压转换电路实现了物理隔离, 保证了系统的可靠性和稳定性。

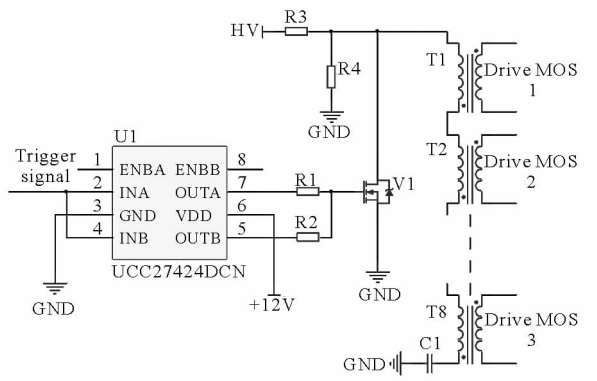


图 4 触发脉冲控制输出电路原理图

Fig.4 Schematic of trigger pulse control output circuit

### 2.3 二级脉冲高压转换电路

二级脉冲高压转换电路基于 Marx 发生器原理设计, 电路原理图如图 5 所示。其中, 储能电容 C 采用低电感、储能密度和耐压高的无极性电容, MOS 管 V 则采用耐压 1 000 V 的 IRFNG40。高压模块产生的高压 HV 通过隔离电阻向各储能电容 C 充电, 当图 4 中触发信号输入时, 由 T1~T8 产生的触发脉冲信号将 8 路 MOS 管 V 同时导通, 储能电容 C 被串联导通同时进行放电, 用测试设备在 QHV+ 和 QHV- 两

端监测, 可获得一快速上升的正极性高压脉冲波形。

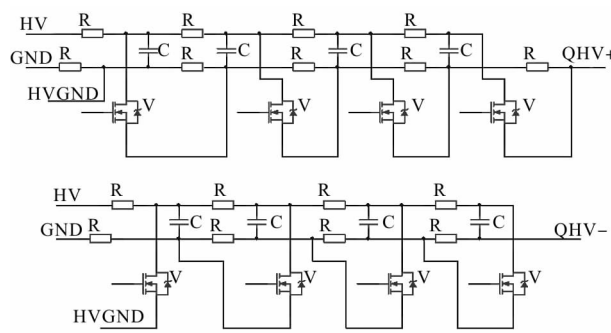


图 5 高压脉冲输出电路原理图

Fig.5 Schematic of high voltage pulse output circuit

## 3 设计结果

将高压示波器探头 (THDP0100, 100 MHz, 600~6 000 Vpk, 1 000:1 衰减探头) 的正负极分别与图 1 中的 QHV+、QHV- 连接, 得到基于传统脉冲变压器法产生的调 Q 高压脉冲输出波形如图 6 所示, 从图中看出, 高压脉冲幅度为 4 000 V, 脉冲上升前沿为 48 ns, 脉冲宽度为 58 ns。

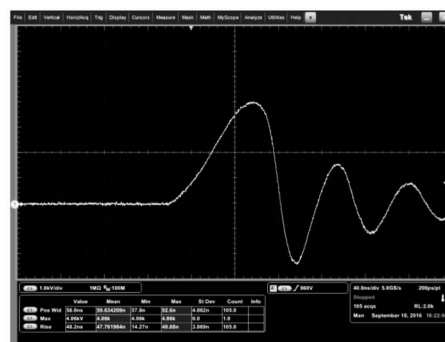


图 6 高压脉冲输出波形

Fig.6 High-voltage pulse output waveform

基于 Marx 发生器原理设计完成电装的调 Q 高压电路板如图 7 所示, 左边的接插件通过电缆与终端信息处理电路连接实现通信, 右边的两条引出线缆输出快速高压脉冲。

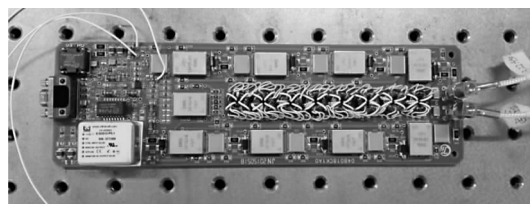


图 7 调 Q 高压电路板

Fig.7 Circuit board of Q-switch high voltage

将调 Q 高压电路板与终端信息处理电路板连接, 高压示波器探头的正负极分别与图 7 中电路板右边高压输出端连接, 对一级高压大小可调控制指令信号进行一系列系统调试后, 实现了脉冲高压幅度 3 000~4 000 V 范围内可调, 且脉冲波形性能稳定。基于 Marx 发生器的快速 Q 开关 4 000 V 高压脉冲输出波形和前沿波形如图 8 和图 9 所示, 幅度约为 4 000 V, 脉冲上升沿时间为 12~13 ns, 相比于脉冲变压器法的图 6 波形, 上升沿时间快了~35 ns, 但其下降沿较缓慢, 达到了上百微秒。

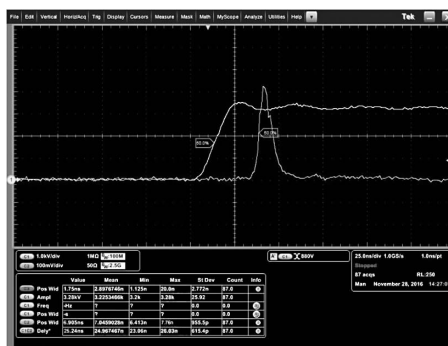


图 10 激光脉冲波形

Fig.10 Laser pulse waveform

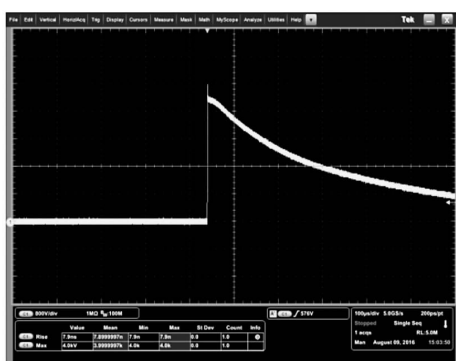


图 8 高压脉冲输出波形

Fig.8 High-voltage pulse output waveform

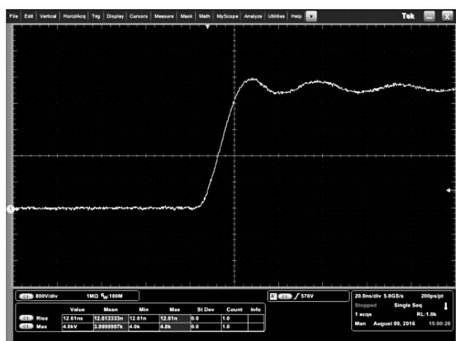


图 9 高压脉冲前沿波形

Fig.9 High-voltage pulse rise-time waveform

将该调 Q 电路板用于 Nd: YAG 激光器调试且出光, 通过调试, 将调 Q 高压设置为 3 300 V 时, 通过 10 min 的工作观察, 激光器输出的单脉冲能量为  $160 \pm 2$  mJ。用光电探头测得的激光脉冲波形如图 10 所示, 其脉冲宽度为 6.9 ns, 脉冲前沿相对于高压脉冲前沿延时约 25 ns。单脉冲能量和宽度都满足激光测距系统对激光器的指标要求。

## 4 结论

文中基于 Marx 发生器原理, 设计了快速 Q 开关驱动电路并完成电路板的制作, 通过与终端信息处理电路板的连接调试, 实现了幅度 3 000~4 000 V 数字可调、上升沿 12~13 ns 的高压脉冲波形输出。这一方案相比于传统脉冲变压器法, 上升时间减少了~35 ns。将该电路进一步应用于激光器调试实验中, 激光器输出脉冲能量和宽度稳定。因此文中设计的高压脉冲产生电路提高了调 Q 速度, 取得了很好的实验效果, 具有一定实用价值, 同时对其他领域应用高压快速电路的设计具有一定参考意义。

## 参考文献:

- [1] Dong Xiaolong, Gao Lanlan, Zhang Fan, et al. Simulation of actively Q-switched pulse parameters in Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (7): 1986-1990. (in Chinese)  
董小龙, 高兰兰, 张帆, 等. Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:YAG 主动调 Q 脉冲参数模拟[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 1986-1990.
- [2] Han Yonglin, Liang Wei, Hu Yonghong. Design of high repetition rate electro-optically Q-switched module with vertical metal oxide semiconductor field effect transistor component[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(10): 1329-1332. (in Chinese)  
韩永林, 梁伟, 胡永宏. 用金属氧化物半导体场效应晶体管器件实现的高重复率光电调 Q 模块设计[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1329-1332.
- [3] Zhang Xiang, Feng Chi, Xie Xiying, et al. Nanosecond electro-optically Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub> laser [J]. *High*

- Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2361–2364.  
(in Chinese)  
张翔, 冯驰, 谢希盈, 等. 纳秒电光调 Q Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2361–2364.
- [4] Chen Wei, Sun Feng, Liu Zaizhou. Experiment study electro-optics Q-switched driver based on normal transistors [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 74–77. (in Chinese)  
陈伟, 孙峰, 刘在洲. 基于普通三极管电光调 Q 驱动器的实验研究 [J]. 光学与光电技术, 2011, 9(6): 74–77.
- [5] Zhu Jun, Ye Zhisheng, Wang Shengping, et al. Design of Q-switching high voltage pulse generators with nanosecond rise time [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, 14(3): 256–260. (in Chinese)  
朱军, 叶志生, 王生平, 等. 纳秒上升时间 Q 开关高压脉冲发生器的设计 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(3): 256–260.
- [6] Zhang Pengquan, Ye Zhisheng, Sa Yu. Design of a high voltage high speed Q-regulated switching power [J]. *Power Electronics*, 2005, 39(3): 90–92. (in Chinese)  
张鹏泉, 叶志生, 撒昱. 高压快速调 Q 开关电源的设计 [J]. 电力电子技术, 2005, 39(3): 90–92.
- [7] Dang Junli, Liu Baiyu, Ouyang Xian, et al. High speed electro optic gating system design for Q-switched laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 212–215. (in Chinese)  
党君礼, 刘白玉, 欧阳娴, 等. 用于激光调 Q 技术的高速电光门控系统的设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 212–215.
- [8] Zhang Xin, Chen Manchao, Xi Wenqiang, et al. Design of high speed Q-switched driver circuit based on radio frequency field effect transistor [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(3): 58–61. (in Chinese)  
张鑫, 陈满超, 席文强, 等. 基于射频场效应管的快速电光调 Q 驱动电路设计 [J]. 光学与光电技术, 2014, 12(3): 58–61.
- [9] Chen Ying, Sa Yu, Ye Zhisheng, et al. Experiment research of fast electrooptic Q-switch drive circuit in solid laser [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(8): 1613–1616. (in Chinese)  
陈颖, 撒昱, 叶志生, 等. 固体激光器的快速电光 Q 开关驱动电路的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1613–1616.
- [10] Zhao Xin, Zhang Dongfang, Liu Jinyuan. A design of negative high voltage nanosecond pulse circuit [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2014, 31(1): 30–34. (in Chinese)  
赵鑫, 张东方, 刘进元. 一种纳秒前沿的负高压脉冲产生电路 [J]. 深圳大学学报理工版, 2014, 31(1): 30–34.
- [11] Li Bing. The design and application of high voltage pulsed power Marx supply [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 12–17. (in Chinese)  
李冰. Marx 高压脉冲电源的设计和应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 12–17.