

文章编号 1004-924X(2015)05-1416-08

谐振充电技术在火花开关触发系统中的应用

张兴亮^{1,2}, 郭立红^{1*}, 孟范江¹, 方艳超¹, 张振东¹, 毛书勤¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:为提高触发高功率横向激励大气压(TEA) CO₂ 激光器中旋转火花开关的稳定性和可靠性,减小火花开关触发系统的体积和重量,提出了将高频谐振充电技术应用于触发系统的方法。研发了采用全桥逆变结构和串联谐振软开关电路、输出电压大于38 kV、输出功率为2 kW的高频高压充电电源并将其作为旋转火花开关触发系统。该系统的全桥逆变电路由智能功率模块(IPM)构成,采用MSP430单片机控制IPM驱动信号的频率、脉宽以及个数,直流电压经全桥逆变电路及串联谐振电路在高压脉冲变压器原边获得脉冲信号。此脉冲信号经高压脉冲变压器的升压和变压器次级整流给高压电容充电,当电容电压达到火花开关间隙的自击穿电压时,电容放电。实验结果表明,该系统在500 Hz的重复频率下能连续稳定触发旋转火花开关,提高了触发系统的可靠性和稳定性,其体积及重量为脉冲式触发系统的1/2。

关键词:TEA CO₂ 激光器;旋转火花开关;触发系统;串联谐振;充电电源

中图分类号:TN248.2;TM564 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1416

Application of series resonant charging technology to trigger system for rotated spark switch

Zhang Xing-liang^{1,2}, Guo Li-hong^{1*}, Meng Fan-jiang¹, Fang Yan-chao¹, Zhang Zhen-dong¹, MAO Shu-qin¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: guolh@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve the stability and reliability of the rotated spark switch system in a high power Transversely Excited Atmospheric(TEA) CO₂ laser and to reduce the volume and weight of a trigger system for the rotated spark switch, this paper induces the series resonant charging technology into the trigger system. A high-frequency high-voltage charging power supply consisting of a full bridge inverter circuit and a series resonant soft switch circuit is developed. The charging power supply is taken as a trigger system for the rotated spark switch and offers a output voltage greater than 38 kV and a output power of 2 kW. In this system, the full bridge inverter circuits consist of Intelligent Power Models(IPMs), and the MSP430 is used to control the frequency, pulse width and the number of pulses for IPM driving signals. After full-bridge inverter circuit and series-resonant circuit get the

收稿日期:2014-05-18;修订日期:2014-07-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM0902-01);长春市地院合作创新集群专项资助项目(No. 11DJ02)

pulse signals, it will charge for a high voltage capacitor by increasing the voltage and rectifying for a high-voltage pulse transformer. When the voltage reaches the hold-voltage of spark switching, the capacitor discharges. The results suggest that the system can continuously and stably trigger the rotated spark switch when the Pulse Repetition Frequency (PRF) is 500 Hz. As a result, the system enhances the stability and reliability of triggering rotated spark switch and reduces the volume and weight of the system by 1/2 that of a pulse trigger system.

Key words: TEA CO₂ laser; rotated spark switch; trigger system; series resonance; charging power supply

1 引言

近年来,横向激励大气压二氧化碳激光器 (TEA CO₂ laser) 由于具有脉冲能量高、大气传输特性好、波长位于远红外窗口等特点,在材料加工、航天航空以及光电对抗等领域都有着极大的应用前景。特别是近年来发展起来的激光推进技术把 TEA CO₂ 激光器列为首选激光器,使其有了更大的发展空间^[1-3]。由于 TEA CO₂ 激光器的工作气压高,输出的脉冲峰值功率可达兆瓦,单个脉冲能量可达数千焦耳,非常符合激光推进的技术要求,因此,研制脉冲 TEA CO₂ 激光器,实现高重复频率输出是激光推进的关键技术之一^[4-7]。TEA CO₂ 激光器属于高压电脉冲激励型激光器,其核心工作过程是对电容器组的反复充放电,因此,放电开关是它的核心部件。TEA CO₂ 激光器通常以闸流管或火花开关作为放电开关。相比闸流管,火花开关以其导通能量大、放电速度快等优点在大功率 TEA CO₂ 激光器中得到更广泛应用^[8-12]。中科院长春光机所的大功率 TEA CO₂ 激光器就是采用旋转火花开关作为放电开关,通过高压脉冲触发系统控制旋转火花开关的导通与关断的。在高气压、高电压下工作的旋转火花开关对高压脉冲触发系统提出了严格的要求,而高压脉冲触发系统工作的稳定性和可靠性又直接影响旋转火花开关的稳定性和可靠性,继而严重影响 TEA CO₂ 激光器的稳定性和可靠性。

气体开关触发器主要有两大类:一类是 Marx 发生器型,适用于单次工作;另一类是脉冲变压器型,适合重复工作,美国的 NIF 工程即采用此种触发气体开关。美国圣地亚哥 Maxwell 实验室研究的重频脉冲触发器运用两个脉冲变压器实现电磁脉冲压缩,空载输出脉冲幅值为 40 kV,脉宽为 1 μ s;美国 Physics 公司研制的 TG-75S 触发器

的输出电压为 55 kV,脉宽为 160 ns;华中科技大学和国防科技大学研制的火花开关触发系统均采用两级变压器升压技术,通过两级变压器中间的控制开关控制高压电容放电。但是,脉冲变压器型触发器在气体被击穿后存在大量的剩余能量,需要大功率的吸收电路,增加了触发器的重量、体积和造价,同时,脉冲变压器型触发器在气体击穿瞬间产生强烈的电磁干扰^[13-15]、大电流及高反向电压,极易损坏功率开关管及其驱动电路。

本文提出的火花开关触发系统采用串联谐振充电技术,该技术基于给高压小电容充电,使其达到放电间隙的自击穿电压而放电的原理。考虑旋转火花开关放电时电磁干扰非常强烈^[13-15],对功率电路会产生强烈的冲击,本文采用了充电式触发技术,不仅保证了开关触发的稳定性和可靠性,减小了系统的体积和重量,同时减弱了放电对功率电路的冲击。

2 旋转火花开关及其触发系统的原理

2.1 旋转火花开关的原理

旋转火花开关在 CO₂ 激光器中的作用如图 1 所示,旋转火花开关主要由高压电极、接地电极和旋转的触发电极组成。

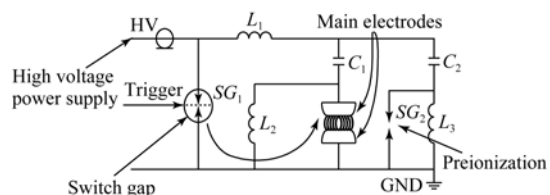


图 1 CO₂ 激光器充放电回路

Fig. 1 Charge-discharge circuit of CO₂ laser

图中: L_1 为主放电回路分布电感; L_2 为主储能电容充电电感; L_3 为预电离电容充电电感; C_1 为主储能电容; C_2 为预电离电容; SG_1 为旋转火

火花开关; SG_2 为预电离火花间隙。

脉冲 CO_2 激光器工作时, 触发系统产生脉冲高压, 并将其施加到触发电极, 从而使开关上下电极间隙中的气体被迅速击穿, 形成短路, 继而引发主放电电极放电。

2.2 串联谐振充电电源的工作原理

串联谐振充电电源是一种 DC-DC 变换器^[16-19], 它具有恒流充电、体积小、效率高、功率密度大、适合宽范围变化负载等优点, 并可使开关管工作在软开关状态, 因此减少了开关损耗, 改善了开关管的工作环境。图 2 为全桥串联谐振充电电源的主电路图。

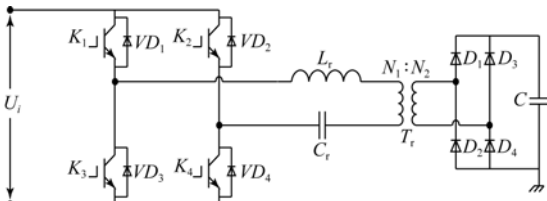


图 2 全桥串联谐振充电电源主电路

Fig. 2 Main circuit of full-bridge series resonant charging power supply

如图 2 所示, 全桥串联谐振充电变换器由功率开关管 $K_1 \sim K_4$ 、快恢复二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 、谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 、高压高频变压器 T_r 、输出整流桥 $D_1 \sim D_4$ 和负载电容组成。直流电压 U_i 经全桥变换器转换成脉冲信号, 脉冲信号经串联谐振电路谐振, 再通过高频高压变压器升压后, 获得高压输出信号, 此信号经整流桥整流后给负载电容 C 充电。

根据逆变器开关频率 f_s 与谐振频率 f_r 的关系, 串联谐振充电电源共有 3 种工作模式:

$f_s < f_r/2$ 时为电流不连续工作模式 (Discontinuous Mode, DCM), 此时开关管为零电流开通, 零电流或零电压关断, 开关管损耗低且干扰小, 适用于小功率电源。

$f_r/2 < f_s < f_r$ 时为电流连续工作模式 (Current Continuous Mode, CCM), 此时同一桥臂上的一个开关管与另一个开关管的反并联二极管存在强迫换流和开通损耗, 开关管处于硬开通、软关断状态。

$f_r < f_s$ 时为电流连续工作模式 (CCM), 此时谐振回路呈感性, 开关管为软开通、硬关断状态, 开关损耗和干扰较大, 一般很少采用。

根据以上分析, 本文选择电流不连续工作模式, 因为此时开关管可实现零电流开关, 开关损

耗小。

本文将高频串联谐振充电电源应用于触发旋转火花开关, 当负载电容充电达到旋转火花开关的自击穿电压时, 旋转火花开关间隙被击穿导通。为满足旋转火花开关在高气压及高重复频率下工作的要求, 根据流注理论、相关公式^[20] 以及工程试验分析, 现在用的旋转火花开关的最小击穿电压为 32 kV, 但随着电极的不断烧蚀, 击穿电压会增加。为给后续工作留有一定裕量, 所设计的高压脉冲触发系统的输出电压最大值大于 38 kV; 重复频率为 500 Hz。

3 旋转火花开关触发系统的设计

火花开关触发系统的研制经验表明, 若要击穿旋转火花开关间隙, 需要使触发电极与地之间的电压达到高气压气体的自击穿电压, 以及一定的放电能量, 这样才能稳定地引燃主放电电极。根据试验分析, 选择高压负载充电电容为 5 nF, 输出充电电压按照 40 kV 设计。

3.1 旋转火花开关触发系统的组成

旋转火花开关触发系统的组成如图 3 所示。整个系统由供电系统、控制电源、全桥开关变换电路、串联谐振电路、高频高压脉冲变压器、高压整流桥、输出检测反馈及信号控制板组成。

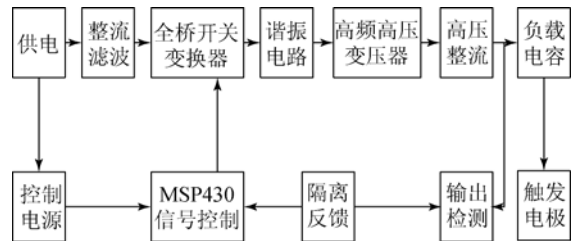


图 3 旋转火花开关触发系统的组成

Fig. 3 Composition of rotated spark switch trigger system

触发系统的工作原理: 全桥开关变换电路将整流滤波的直流电压转换为脉冲信号。脉冲信号经串联谐振电路整形再经高频高压脉冲变压器升压, 以获得高压脉冲。高压脉冲经高压整流桥给负载电容充电, 当负载电容充电到旋转火花开关的自击穿电压时, 火花开关间隙被击穿, 负载电容放电。当检测到负载电容放电时, 信号控制板停止发送脉冲信号, 等待下个工作周期。

3.2 供电系统选择

相对于单相 220 V 的供电系统, 三相 380 V 的供电系统对电路安规及元器件的要求更高。鉴

于串联谐振充电电源适合宽范围负载工作,并且旋转火花开关的击穿对功率要求不是很高,故本文选择单相 220 V 的供电系统。

3.3 全桥串联谐振电路设计

3.3.1 全桥开关变换器设计

智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)是一种先进的功率开关器件,绝缘栅双极型晶体管 IGBT 兼有大功率晶体管的高电流密度、低饱和电压和高耐压的优点,以及半导体场效应晶体管 MOSFET 的高输入阻抗、高开关频率和低驱动功率的优点,而且 IPM 内部集成了逻辑、控制、检测和保护(过流、短路、超温、欠压)电路,一旦发生负载事故或使用不当等异常情况,模块内部即以最快速度进行保护,同时将保护信号送给外部控制电路进行二次保护。因此,IPM 比 IGBT 模块的可靠性显著提高,并且由 IPM 构成的全桥电路比由 IGBT 模块构成的全桥电路的体积更小。本文的全桥开关变换器选择 IPM,型号为 PM150CL1A060。

3.3.2 谐振参数设计

由 220 V 的供电系统可知开关变换器的直流输入电压 $U_i \approx 300$ V,负载电容 $C=5$ nF,变压器的变比 $n \approx 166$,系统的工作周期为 2 ms,设计时为充电时间保留一定的裕度,令充电时间 $\tau=1$ ms,根据充电时间公式为:

$$\tau = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{nCU_0}{U_i} \cdot \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (1)$$

将参数带入公式(1),得:

$$\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = 5.77 \quad (2)$$

根据所选择的 IPM 型号知,其开关频率 $f_s \leq 20$ kHz,文中为 $f_s = 20$ kHz,则谐振周期 $T_r = 25$ μ s。根据公式:

$$T_r = 2\pi \sqrt{L_r C_r} \quad (3)$$

可得

$$\sqrt{L_r C_r} = \frac{25}{2\pi} \quad (4)$$

根据式(2)和式(4)可计算出:

$$L_r = 22.96 \mu\text{H}, C_r = 0.689 \mu\text{F}.$$

实际应用中采用铁氧体磁芯绕制电感,其电感值略大于 22.96 μ H,选取电容 $C_r = 0.69$ μ F,电容由标准的 0.47 μ F/1 200 V 和 0.22 μ F/1 200 V 并联组成。

3.4 高频高压变压器设计

高频高压变压器在整个系统中起着升压、能量传递和安全隔离的作用,是整个硬件系统中的

核心组成单元。本系统的输出功率为 2 kW,工作频率为 20 kHz,变压器传递的电压波形为交变正负对称的方波,设计时要考虑两点:(1)保证铁芯材料在高频工作状态下的功率损耗尽可能小,(2)铁芯材料有较高的饱和磁通密度、动态磁导率和较好的温度特性。应用于开关电源高频功率脉冲变压器的材料主要有 Fe-Ni 基非晶、坡莫合金、MnZn 铁氧体 3 种,其中 MnZn 铁氧体性能介于坡莫合金和 Fe-Ni 基非晶之间,而且其成本低于非晶合金,制作工艺相对稳定,适合作为试验变压器。

根据面积乘积(AP)法设计高压脉冲变压器^[21-23]:选用 UF93 铁氧体磁芯,变压器初级匝数为 14,次级匝数为 2 324。根据铁芯的结构及变压器绕组的匝数,变压器的结构设计为:初次级绕组分成两部分分别绕制在磁芯的两个磁柱上,两个绕组串联使用。初级绕组采用铜皮绕制,厚度为 0.1 mm;为增加次级绕组的匝间绝缘,次级绕组采用三重绝缘漆包线绕制;层间绝缘配合使用 NHN 纸与聚酰亚胺薄膜,高压输出端采用硅胶高压线引出,并用绝缘套管增强绝缘性能;绕组经过多次浸漆、干燥及环氧树脂灌封制作成干式变压器,干式变压器相比油浸式变压器体积小、质量轻、便于固定。最终绕制的脉冲变压器初级电感为 396 μ H,初级漏感为 4 μ H,次级电感为 10.5 H。

3.5 输出信号检测电路

本系统采用输出电压电流双闭环模式,反馈电流采样用于控制信号占空比;反馈电压采样用于检测输出电压的幅值以及放电检测。电压采样采用电阻分压后滤波放大的方法;电流采样采用在地与高压整流桥之间加电阻采样地线电流的方法,由于采样电阻消耗功率很小,在设计电路时可以忽略。电路如图 4 所示。

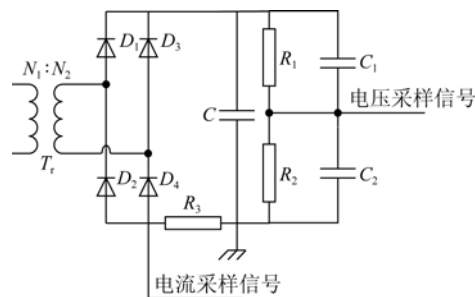


图 4 输出采样电路

Fig. 4 Sampling circuit of system output

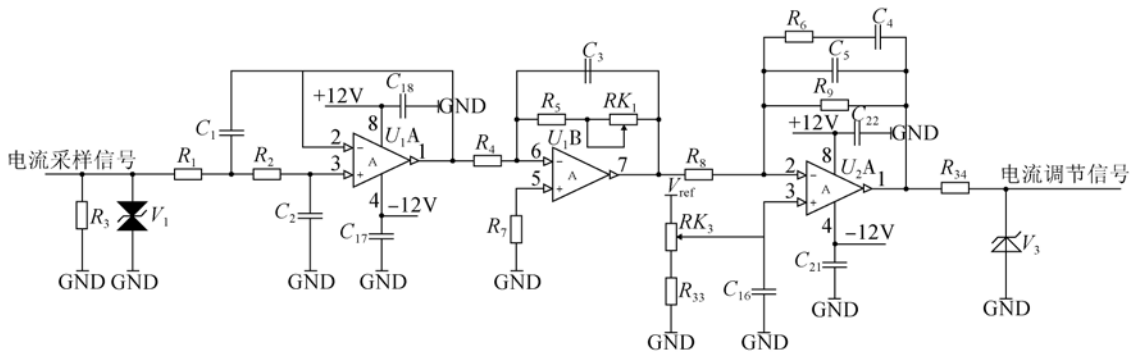


图 5 电流反馈放大电路

Fig. 5 Current feedback amplifier circuit

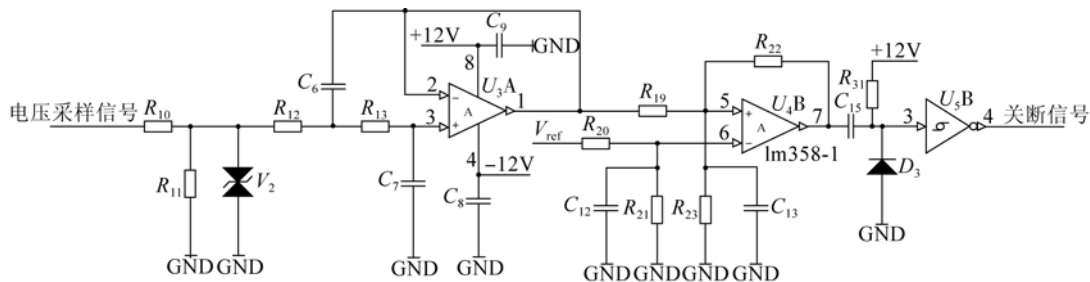


图 6 电压反馈放大电路

Fig. 6 Voltage feedback amplifier circuit

经反馈放大电路得到的信号经过线性光耦隔离,再经过 A/D 转换到 MSP430 单片机,最后通过算法由单片机发出脉冲信号。

4 系统仿真及测试结果

4.1 主电路仿真

为验证功率器件以及谐振参数选择的准确性,对主电路进行了仿真,即将变压器的副边参数折算到原边,得到主电路的等效电路,再应用 PSPICE 软件对等效电路进行仿真,得到的输出电压以及谐振电流的仿真波形分别如图 7、8 所示。

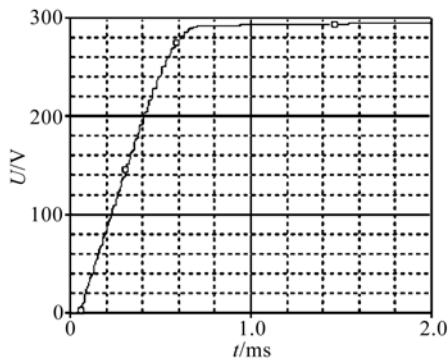


图 7 负载电压波形

Fig. 7 Waveform of load voltage

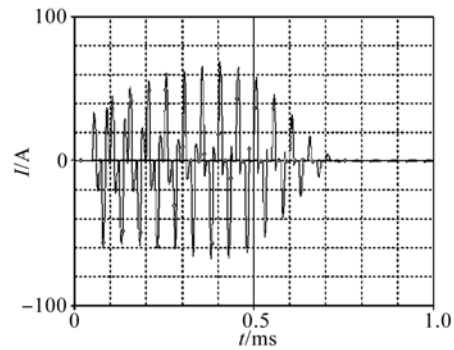


图 8 谐振电流波形

Fig. 8 Waveform of resonant current

从仿真波形可以读出,负载电压呈线性上升,接近 1 ms 时基本充满;谐振电流的最大值小于 80 A,本文选择 150 A 的 IPM,留有 2 倍裕量,以适合工程应用。

4.2 测量实验与结果

本文采用型号为 P6015A 的高压探头测量高压侧的信号波形,结果如图 9 所示;采用 LEM 公司型号为 LA 100-P 的传感器测试得到谐振电路电流波形,波形如图 10 所示;激光腔主电极的放电波形如图 11 所示。

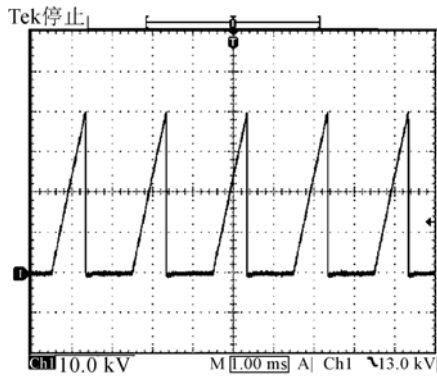


图 9 触发电极电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of trigger electrode

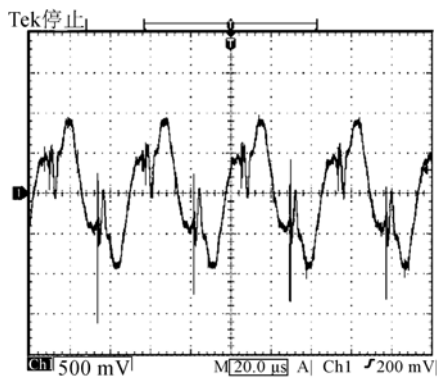


图 10 谐振电流波形

Fig. 10 Waveform of resonant current

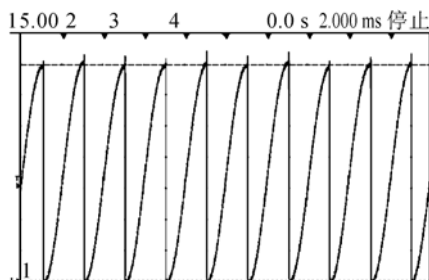


图 11 主电极放电波形

Fig. 11 Discharge waveform of main electrode

由实验波形可知,当激光器工作在 500 Hz 重复频率下,旋转火花开关可以得到稳定可靠的触发,击穿电压约为 38 kV。电流传感器输出端所接电阻 $R=40 \Omega$,由此可知谐振电路的电流峰值约为 50 A。通过对比仿真波形与实验波形可知,仿真在一定程度上可以指导工程设计,但仿真与实验又有所不同,这是因为仿真为理想化的建模,而实验则更为复杂,并且受环境的影响很大。

4.3 两种模式触发器

表 1 为不同触发系统的基本参数。对于触发

器的研发,过去一直以单个开关管、脉冲触发模式的电路为基本电路,这种电路模式受负载及放电的影响很大,放电时开关管容易损坏,并且单管模式电路的吸收电路特别复杂,需要小阻值大功率的吸收电阻等,从而使触发系统的体积和重量比较大;在负载放电时,谐振充电式触发系统的谐振电路将保护开关管的安全,另外,高压放电产生的反向电压将被高压整流桥钳位,减少了气体击穿放电对变压器及开关管的冲击,同时减少了对电网的干扰。

表 1 不同触发系统的参数

Tab. 1 Parameters of different trigger systems

	单脉冲式	多脉冲式	充电式
输出电压/kV	>38	>38	>38
体积/cm ³	30×30×90	30×30×50	40×20×20
重量/kg	100	50	20

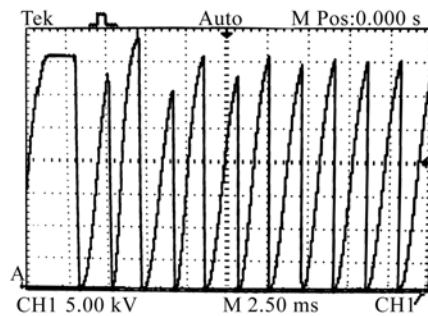


图 12 脉冲模式下主电极放电波形

Fig. 12 Discharge waveform of main electrode in pulse mode

脉冲式触发系统工作时主电极放电波形如图 12 所示。对比图 11 和图 12 可得,脉冲式触发系统工作时激光器储能偶尔会有不放电的现象,而应用了串联谐振充电技术的触发系统可以保证激光器储能放电的可靠性和稳定性。

5 结 论

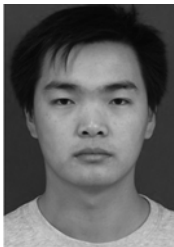
为了提高触发高功率 TEA CO₂ 激光器中旋转火花开关的稳定性和可靠性,减小触发系统的体积和重量,本文将高频谐振充电技术应用于触发系统,并介绍了高频谐振充电电源的结构和工作原理。实验结果表明:高频谐振充电技术适用于开关触发系统。该系统具有结构紧凑、运行稳定及抗干扰能力强等优点,其体积及重量较脉冲式触发系统减少了一半,满足触发 TEA CO₂ 激光器旋转火花开关的要求。

参考文献:

- [1] PHIPPS C R, MICHAELIS M M. NEO-LISP: Deflecting near-earth objects using high average power, repetitively pulsed lasers [C]. *23rd European Conference on Laser Interaction with Matter*, St. John's College, Oxford, England, Sep, 1994.
- [2] CAMPBELL J W, *et al.*. Project Orion: Orbit-debris removal using ground-based sensors and lasers [J]. *NASA Technical*, 1996.
- [3] 胡群力. TEA CO₂ 激光器充电电源及其数字控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007, 1-5.
HU Q L. *Capacitor charging power supply and its digital control for TEA CO₂ Laser* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007, 1-5. (in Chinese)
- [4] WITTEMAN W J. *The CO₂ Laser* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 10-20.
- [5] GEOFFREY A L. Advanced solar-and laser-pushed lightsail concepts (final report) [R]. *NASA Institute for Advanced Concepts*, 1999.
- [6] 伍贤欣, 程谋森, 廖育荣. 微型卫星激光推进发射概念与影响因素研究 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, 17(3): 61-66.
WU X X, CHENG M S, LIAO Y R. Study on concept and effects of a Nano-sat launch system based on laser propulsion [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(3): 61-66. (in Chinese)
- [7] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW class repetitive pulsed CO₂ laser [J]. *SPIE*, 2003, 5120: 717-730.
- [8] WAN C Y, YAN N Y, YAN L, *et al.*. Retating spark gap switched discharge TEA CO₂ laser with average power up to 12 kW [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5777: 426-432.
- [9] 黄磊, 朱海红, 程祖海, 等. 用于激光推进的球隙火花开关放电特性的研究 [J]. *激光推进技术*, 2007, 28 (5): 561-565.
HUANG L, ZHU H H, CHENG Z H, *et al.*. Investigation of discharge characteristics of the high-voltage trigatron switch for laser propulsion [J]. *J. Propulsion Technology*, 2007, 28 (5): 561-565. (in Chinese)
- [10] 贺臣. 重复频率长寿命气体火花开关的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004, 17-35.
HE CH. *Study on the repetition-rate long-life-time gas spark switch* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004, 17-35. (in Chinese)
- [11] 张祥龙, 王毅. 双极性与单极性 ns 级高压脉冲电源设计及特性比较 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(4): 964-969.
ZHANG X L, WANG Y. Design and characteristic comparison of bipolar and unipolar high voltage nanosecond pulsers [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(4): 964-969. (in Chinese)
- [12] 李世明, 李殿军, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器旋转火花开关电极的烧蚀实验 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(3): 263-268.
LI SH M, LI D J, YANG G L, *et al.*. Erosion experiment of rotated spark switching system of high-power TEA CO₂ laser [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 263-268. (in Chinese)
- [13] 孟范江, 郭立红, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器系统中电磁干扰的抑制 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 177-181.
MENG F J, GUO L H, YANG G L, *et al.*. Suppression of electromagnetic interference in high power TEA CO₂ laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 177-181. (in Chinese)
- [14] 葛欣宏, 郭立红, 孟范江, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光器的电磁辐射测试及屏蔽方舱设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 15(5): 983-991.
GE X H, GUO L H, MENG F J, *et al.*. Electromagnetic radiation test of high-power TEA CO₂ laser and its shielding cabin design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 15(5): 983-991. (in Chinese)
- [15] 张兴亮, 郭立红, 孟范江, 等. 旋转火花开关多脉冲触发系统的设计 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(1): 21475-21481.
ZHANG X L, GUO L H, MENG F J, *et al.*. Design of a multi-pulse trigger system for rotated spark switch [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(1): 21475-21481. (in Chinese)
- [16] JEONG I W, KIM J S. Design of 35kJ/s 25 kV capacitor charging power supply for pulsed power systems [C]. *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2004, 2860-2863.
- [17] ROBERT GREGOIRE B. A compact switched-capacitor regulated charge pump power supply [J]. *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 2006, 41(8): 1944-1953.
- [18] 王建新. 谐振式软开关恒流充电电源的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011, 12-22.
WANG J X. *Research of resonant soft-switching constant current charging power supply* [D].

- Harbin; Harbin Institute of Technology, 2011, 12-22. (in Chinese)
- [19] 林泽钦. 高功率 TEA CO₂ 激光器全桥串联谐振电源的研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2012, 25-40.
LIN Z Q. *Research of high power TEA CO₂ laser full-bridge power supply with series resonant mode* [D]. Beijing: Beijing jiaotong University, 2012, 25-40. (in Chinese)
- [20] 庄池杰, 曾嵘. 短间隙流注放电数值仿真方法研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 157-166.
ZHUANG CH J, ZENG R. Research and development on short gap streamer discharge simulation methods [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(22): 157-166. (in Chinese)
- [21] TODOR F, FABIO C, PAT W, *et al.*. High voltage high frequency power transformer for pulsed power application [C]. *14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2010: 165-170.
- [22] ZHANG Y, LIU J L, CHENG X B, *et al.*. Output characteristics of a kind of high-voltage pulse transformer with closed magnetic core [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(4): 1019-1027.
- [23] LUCA D, FABIANA D, SILVERIA C, *et al.*. Self-capacitance of high-voltage transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(5): 2081-2092.

作者简介:



张兴亮(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于电子科技大学获得学士学位,主要从事大功率激光充电电源及触发系统的研究。E-mail: zqliang1987@163.com

导师简介:



郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,博士,研究员,博士生导师,1986年于长春理工大学获得学士学位,1998、2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事激光对抗、天文惯导、计算机应用等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:马健)
(版权所有 未经许可 不得转载)