

文章编号: 1001-3806(2016)04-0586-06

36kV/10kW CO₂ 激光器充电电源的研制

张兴亮^{1,2}, 石宝松^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了改善现有 CO₂ 激光器工频 LC 谐振充电时充电电压随激光器工作频率升高而降低、影响激光输出的稳定性和光束质量, 不利于装置的小型化和轻量化的问题。采用全桥逆变结构和串联谐振软开关电路, 研究了 36kV/10kW 高频高压充电电源。该电源系统采用三相 380V 交流电作为供电系统, 大功率智能功率模块作为全桥逆变电路。逆变交流信号经串联谐振电路及高频脉冲变压器得到高压脉冲信号, 高压脉冲经整流给负载电容充电, 电源应用电压电流双闭环控制系统, 输出电压、电流经采样及放大后, 反馈到电源控制芯片 SG3525, 芯片 SG3525 通过判断反馈信号的大小, 控制输出脉冲宽度调制驱动信号的占空比。激光器放电频率为 25Hz 时, 电源输出电压为 37kV, 峰值输出功率为 13.05kW, 充电效率为 0.826。结果表明, 该高频高压充电电源适合用作 CO₂ 激光器的高压充电电源。

关键词: 激光技术; CO₂ 激光器; 串联谐振; 充电电源; 高频高压变压器

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.027

Development of 36kV/10kW charging power supply used in CO₂ laser

ZHANG Xingliang^{1,2}, SHI Baosong¹

(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)

Abstract: The output voltage of a traditional high voltage charging power supply of CO₂ laser in LC resonant charging configuration drops with the increase of operating frequency, which affect the stability of laser output and the beam quality. Meanwhile, traditional high voltage charging power supply has huge size and weight which is disadvantageous to small size and weight of the device. In order to resolve the problems, a 36kV/10kW high frequency and high voltage charging power supply was studied by using a full bridge inverter circuit and a series resonant soft switch circuit. Three phase 380V alternating current (AC) was used as the energy system, high power intelligent power module(IPM) was used as full bridge inverter circuit. High voltage pulse signal was obtained by the inverter AC signal through series resonant circuit and high frequency pulse transformer. High voltage pulse charged power supply for load capacitor through rectifier. Voltage and current double closed-loop control system was used in the charging power. After sampling and amplification, the output voltage and current were fed back to the power supply control chip SG3525. SG3525 controlled the duty cycle of pulse width modulation driving signal by feedback signal. Experimental results show that the output voltage of the charging power supply is 37kV, output peak power is 13.05kW, and charging efficiency is 0.826 when laserdischarge frequency is 25Hz. The high frequency and high voltage charging power supply is suit for high voltage charging power of CO₂ laser.

Key words: laser technique; CO₂ laser; series resonant; charging power supply; high frequency and high voltage transformer

引言

脉冲 CO₂ 激光器因其脉冲能量高、大气传输特性好、波长位于远红外窗口等特点, 在激光切割、金属除

污、激光推进以及光电对抗等领域有着极大的应用前景^[1-5]。CO₂ 激光器存在电激励、光激励、化学激励等多种激励方式, 其中, 电激励脉冲 CO₂ 激光器的能量转换效率最高, 达到 20% ~ 30%。电激励脉冲 CO₂ 激光器主要由高压充电电源、储能放电系统、开关触发系统、风机系统、制冷系统、控制系统和激光谐振腔组成。激光器工作过程为: 高压充电电源对储能放电系统中的高压电容器组充电至额定电压, 控制系统发出触发信号激励开关触发系统产生高压脉冲击穿储能放电系统中的放电开关, 高压电容器组与主放电电极构成闭

基金项目: 长春市地院合作创新集群专项资助项目 (11DJ02)

作者简介: 张兴亮 (1986-), 男, 博士研究生, 从事激光充电电源、高压脉冲电源方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-07-14

合回路放电,激励主放电电极之间的气体发生粒子束反转,进而产生激光;风机系统和制冷系统使放电开关和主放电电极间隙中的气体循环流动降温;控制系统的作用为根据操作者的输入指令,实时控制整机系统的运行^[6]。

激光器的核心工作过程为高压电容器组的反复充放电,激光输出的频率取决于高压电容器组充放电的频率,其中,对高压电容器组充电的高压充电电源是一个核心子系统,其性能的改善对提高激光器的各项性能指标和运行稳定性举足轻重。目前中国科学院长春光学精密机械与物理研究所大功率脉冲横向激励大气压(transversely excited atmospheric, TEA) CO₂ 激光器充电电源采用的是工频 LC 谐振充电方式,无稳压措施,工作频率的提高导致输出电压下降,影响激光输出的稳定性和光束质量,同时,体积和重量庞大,不利于设备的小型化和轻量化;针对串联谐振软开关充电电源体积小、重量轻,精度、稳定性和可靠性高等优点,开展对高性能高频高压充电电源的研究,最终将其应用于车载工程项目中,对提高激光器的性能、车载系统小型化具有重大的意义。

欧美很多公司都已经推出串联谐振式充电电源的成型产品:美国的 TDK-Lambda 公司研制了输出电压 50kV、平均充电功率 30kJ/s、整体效率 85% 的串联谐振充电电源,多台并联可以实现最大功率 1MJ/s;美国 EMI 公司研制了输出电压 50kV、平均充电功率 30kJ/s、整体效率 85% 的串联谐振充电电源;英国 GENVOLT 公司研制了输出电压 60kV、平均充电功率 30kW、整体效率 92% 的串联谐振充电电源;德国 FuG Elektronik 公司研制了输出电压 65kV、平均充电功率 20kW、整体效率 90% 的串联谐振充电电源;法国 Euro-feedback 公司研制了输出电压 50kV、平均充电功率 15kJ/S、整体效率 85% 的串联谐振充电电源。在亚洲,韩国的 JEONG 等人在 2004 年成功研制了 25kV、35kJ/s 的电容充电电源,采用了串联谐振充电技术,开关频率 20kHz;TOSHIBA Corp 公司研制了输出电压 40kV、平均充电功率 19kJ/s、整体效率 80.4% 的串联谐振充电电源。在国内,中国科学院电工研究所是国内研究、研制串联谐振充电电源起步最早、最为专业和应用范围最广的机构,他们研制的 40kW/10kV 数字化控制高频高压脉冲电容器恒流充电电源是国内在串联谐振充电领域的代表作;华中科技大学 ZHONG 等人研制的以定宽调频控制方式工作的 0kV ~ 25kV 可调的串联谐振充电电源也已应用于激光核聚变的能源系统。本文中采用串联谐振软开关的电路拓扑结构,应用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制芯

片 SG3525 作为整个系统的核心控制芯片,整个电源系统采用模拟电路方式实现。

高压充电电源系统工作时电磁干扰十分强烈^[7-8],抑制电磁干扰同样是电源设计过程中必须重视的课题。根据充电电源的应用环境,设计了一套串联谐振充电电源,在激光器放电频率为 25Hz 时,此串联谐振充电电源输出电压 37kV,峰值输出功率 13.05kW,效率 0.826。

1 串联谐振充电电源的工作原理

串联谐振充电电源是一种直流-直流(direct current-direct current, DC-DC)变换器,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,减少了开关损耗,改善了开关工作环境^[9-15]。

如图 1 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 $D_{FR,1} \sim D_{FR,4}$ 、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 C 组成。直流电压 U_i 经全桥变换器变成脉冲信号,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。 N_1 为变压器初级匝数, N_2 为变压器次级匝数,变压器的变比 $n = N_1:N_2$ 。

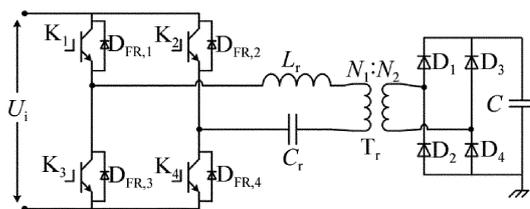


Fig. 1 Main circuit of charging power supply with full-bridge series resonance

根据逆变器开关工作频率 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:(1) $f_s < f_r/2$, 电流不连续工作模式(discontinuous current mode, DCM), 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;(2) $f_r/2 < f_s < f_r$, 电流连续工作模式(continuous current mode, CCM), 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,存在开通损耗,开关管处于硬开通、软关断状态;(3) $f_r < f_s$, 电流连续工作模式(CCM), 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,选择电流不连续工作模式,此时开关管可实现零电流开关,开关损耗小,抗负载短路能力强。

2 高频高压电源系统的设计

2.1 电源系统的组成

工作在 DCM 模式的串联谐振变换器具有恒流充电特性,抗负载短路能力强,36kV/10kW 充电电源选择此种充电方案。充电电源的研制包括电路设计和结构设计两部分。其中,电路设计包括功率电路设计和弱电控

制电路设计。功率电路包括整流滤波电路、上电软启动电路、功率因数校正(power factor correction, PFC)电路、串联谐振逆变电路、高频高压变压器、高压整流电路、放电保护电路、输出信号检测电路;弱电控制电路包括高压放电检测电路、电压电流反馈控制电路、谐振电流峰值保护电路、功率开关管驱动电路及电压电流显示电路等。充电电源的结构框图如图 2 所示。

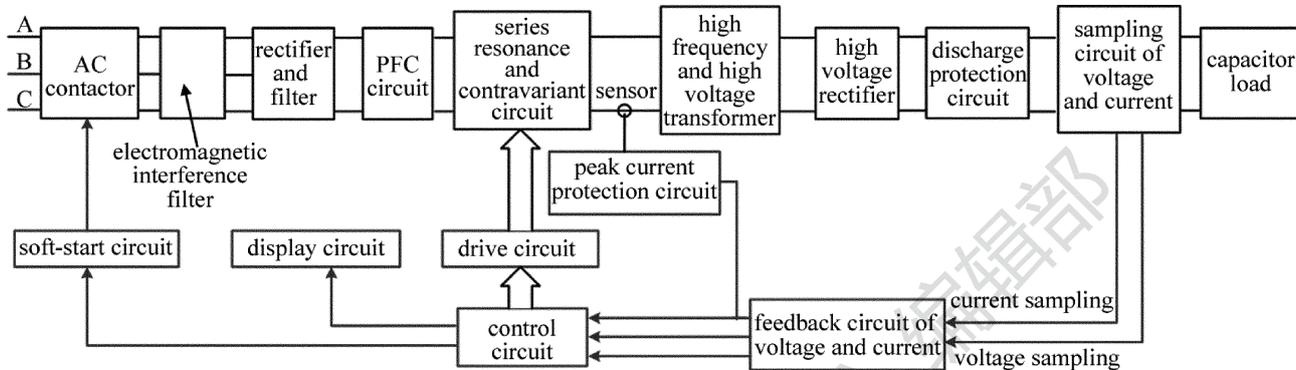


Fig. 2 Block diagram of charging power supply

充电电源的工作原理如下:弱电控制电路驱动串联谐振逆变电路将整流滤波的直流电压转换为脉冲信号,脉冲信号经高频高压变压器升压获得高压脉冲,高压脉冲经高压整流桥给负载电容充电,当负载电容充电到设定电压时,停止充电,当检测到负载电容电压小于预设电压,重新充电到预设电压。

针对充电电源的重复充放电工作模式,串联谐振逆变电路、高频高压变压器、反馈控制电路和高压放电检测电路是系统设计中的关键,下面逐个分析。

2.2 串联谐振逆变电路设计

2.2.1 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,兼有大功率晶体管高电流密度、低饱和电压和高耐压的优点,以及金属-氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)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二次保护,使得 IPM 相比绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块可靠性显著提高,并且 IPM 构成的全桥电路相比 IGBT 模块构成的全桥电路体积更小。本文中的全桥开关变换器选择 IPM,型号为 PM300CLA120。

2.2.2 谐振参量设计 由 380V 的供电系统可知,开关变换器的直流输入电压 $U_i \approx 500V$,负载电容 $C = 0.29\mu F$,变压器的变比 $n \approx 100$,系统的充电时间 $\tau =$

15ms,根据充电时间公式:

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

式中, τ 代表充电时间, C 代表负载电容, U_0 代表负载电压, L_r 代表谐振电感, C_r 代表谐振电容,将参量带入(1)式,得:

$$\sqrt{L_r C_r^{-1}} = 4.57 \quad (2)$$

根据选择的 IPM 可知,其开关工作频率 $f_s \leq 20kHz$,选择 IPM 的开关工作频率为 $f_s = 20kHz$,则谐振周期 $T_r = 25\mu s$ 。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(2)式和(4)式可计算出: $L_r = 18.19\mu H$, $C_r = 0.897\mu F$ 。实际应用中采用磁粉芯磁芯绕制电感,电感值 $L_r \approx 15\mu H$,选取电容 $C_r = 0.94\mu F$,电容用 2 只标准的 $0.47\mu F/1200V$ 电容并联组成。

2.3 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^[16-18]。本系统中的输出功率 10kW,工作频率 20kHz,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主要有铁基纳米晶、

坡莫合金、锰锌铁氧体 3 种,根据变压器的工作频率和输出功率,选择铁基纳米晶材料的磁芯,磁芯型号为 XDONL-1308050,饱和磁感应强度为 1.25T,磁芯结构如图 3 所示。

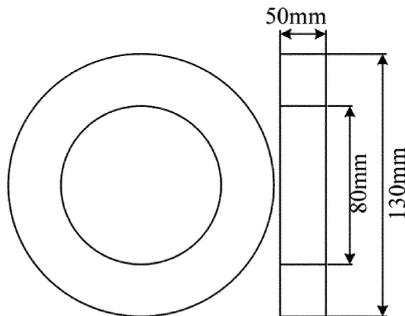


Fig. 3 Core structure

磁芯面积乘积 $AP = 1290\text{cm}^4$,其中, AP 代表磁芯截面积与窗口面积的乘积。

根据变压器的视在功率计算磁芯面积乘积,视在功率为:

$$P_a = P_o \left(1 + \frac{1}{\eta} \right) = 10 \times \left(1 + \frac{1}{0.8} \right) = 22.5\text{kW} \quad (5)$$

式中, η 为变压器的效率,设为 0.8; P_o 代表输出功率。

全桥变换器的磁芯截面积和窗口面积的乘积为:

$$AP = \frac{35 \times P_a}{f \times B_m} = 131.25\text{cm}^4 \quad (6)$$

式中, B_m 为磁芯的工作磁通密度,选为 0.3T。由于高压变压器的高绝缘要求需要磁芯拥有大的窗口,实际选择磁芯的 AP 值远大于理论值。

根据参考文献[19]中的公式计算变压器初次级匝数为:

$$N_p = \frac{V_i}{K_f f_s B_w A_e} \quad (7)$$

式中, V_i 为输入电压幅值; B_w 代表工作磁通密度(T); A_e 代表磁芯有效截面积(m^2); K_f 代表波形系数,正弦波时为 4.44,方波时为 4。

计算得到初级匝数 5 匝,次级匝数 500 匝。初级绕组采用直径为 2.5mm 的漆包线、4 股并绕,次级绕组导线选用三重绝缘漆包线,绝缘层采取聚酰亚胺膜与 Nomex410 纸配合使用,采用油浸灌封方式实现。

2.4 反馈控制电路设计

充电电源存在两个工作阶段:恒流充电阶段和电压维持阶段。恒流充电阶段由电流环控制,电压维持阶段由电压环控制。当充电电源开始工作时,需要快速向高压电容器组充电,此时电源系统工作在恒流充电阶段,谐振电路工作在零电流开关状态,电流环起作用。当检测到高压电容器组的电压达到设定电压时,停止输出驱动信号,电容器组电压低于设定电压时,控

制电路发出窄脉冲驱动信号补偿电容的漏电,电源系统工作在电压维持阶段,开关管工作在硬开关状态,电压环起作用。本系统采用输出电压电流双闭环的模式,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。电压采样采用阻容并联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。

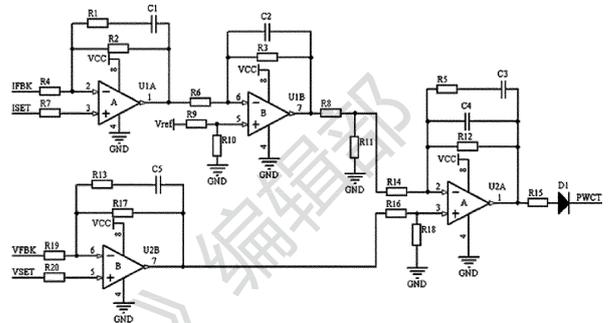


Fig. 4 Feedback control circuit

如图 4 所示, $VSET$ 代表电压设定信号, $ISET$ 代表电流设定信号, $VFBK$ 代表电压反馈信号, $IFBK$ 代表电流反馈信号, $PWCT$ 代表脉冲宽度控制信号。工作原理为:上电初始阶段, $U2A$ 的 3 脚和 2 脚间的电压差最大, $PWCT$ 的电压值最高,输出脉冲宽度最大;当反馈电流达到设定电流, $U1B$ 的 7 脚输出固定的电压信号, $U2A$ 的 3 脚和 2 脚间的电压差恒定, $PWCT$ 的电压值稳定,输出脉冲宽度恒定;当反馈电压达到设定电压, $PWCT$ 为零电平,不输出脉冲信号;随着负载电容的放电,进入电压维持阶段。

2.5 高压放电检测电路设计

在激光器系统中,高压储能电容器组放电后,如立即对其充电,可能导致激光器主放电电极发生连弧现象,使得充电电源工作在持续短路状态导致功率开关器件或某些功率元件因过载而损坏,这就要求在高压储能电容器组放电的 100ns 内检测到高压放电,并停止充电一段时间,然后重启充电。

放电检测电路须具有快速检测放电、停止充电及自动重启充电 3 个功能。高压电容器组放电时电压采样电路将输出一个快速的下降沿,下降沿约为 100ns,需要一个边沿触发模式工作的芯片,并且此芯片能检测到边沿为 100ns 的触发信号;检测到高压放电后要求系统停止充电,将 SG3525 芯片 10 脚置高电平停止输出 PWM 信号使功率开关器件关断能满足此要求;停止充电一段时间后系统自动重启充电,则 SG3525 的 10 脚变为低电平;因此,在检测到高压放电后输出一个脉冲信号控制 SG3525 的 10 脚可以达到放电检测

的功能;放电检测电路如图5所示。

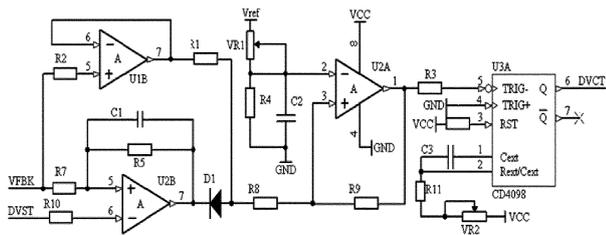


Fig. 5 Discharge detection circuit

图5中,VFBK代表电压反馈信号,DVST代表放电电压设定值,DVCT代表放电电压输出控制信号。当电容充满电时,CD4098的6脚为零电平;电容放电后,运放U2A的1脚输出一个下降沿,触发CD4098的6脚输出固定脉冲信号,脉冲信号宽度由14脚和15脚的外接电阻电容值决定;CD4098可以检测到下降沿大于20ns的脉冲信号。

3 系统及测试结果

充电电源的测试结果含有两部分内容,调试阶段的测试结果和与激光器联机测试结果。在电源调试阶段以0.1μF的高压电容作为负载,首先,调试高压放电检测功能;其次,测试充电电压。放电检测功能是在相对低的输出电压、低输出功率条件下利用气体的自击穿功能测试;通过充电电压的测试修正谐振电路及控制电路参量,使系统达到功率和电压要求。

图6所示为高压放电检测功能无效时的充放电波形。

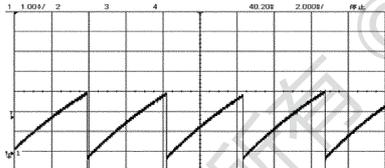


Fig. 6 Waveforms with invalid detection

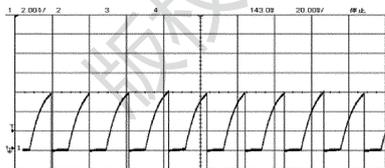


Fig. 7 Waveforms with effective detection

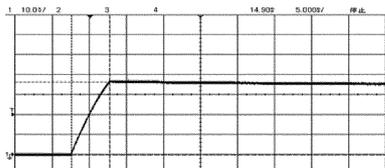


Fig. 8 Waveform of single charge to 36kV

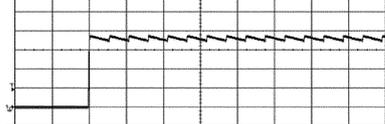


Fig. 9 The maintained waveform

形。图7所示为高压放电检测功能有效时的充放电波形。图8所示为单次充电到36kV电压波形。图9所示为非放电状态下充电电压的维持波形。

由图6可知,无放电检测功能的充电电源在放电后立即充电。由图7可知,第2.5节中设计的放电检测电路能实现高压放电检测功能,在检测到系统放电后,停止充电固定时间后自动重启充电。由图8可知,系统启动充电后约5ms将0.1μF的电容器充电到36kV,计算得到充电电源的峰值输出功率约为12.96kW。由图9可知,充电电源的纹波在(36±2)kV,符合电源的设计要求。

将充电电源与CO₂激光器主机进行联机试验,得到25Hz工作频率时激光器的充放电波形,如图10所示。由实验波形可知,此充电电源使激光器在25Hz工作频率下能稳定工作,电源本身工作稳定可靠。

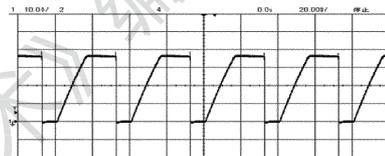


Fig. 10 Discharge waveforms of laser

经计算,充电电源的峰值功率为13.05kW,充电电源在激光器中的工作处于研究阶段,选择其工作在25Hz的放电频率,平均输出功率为4.894kW。应用钳形表测试此时的网电电源线的供电电流为9A,电源的效率为0.826。

4 结论

根据高频高压充电电源充电速度快、精度高、体积小等特点,提出将高频谐振充电技术应用于高功率CO₂激光器充电电源,并介绍了串联谐振充电电源的拓扑结构和工作原理。实验结果表明:在25Hz放电频率时,充电电源的峰值输出功率为13.05kW,输出电压37kV,效率为0.826。通过36kV/10kW充电电源与CO₂激光器的联机工作,证明了高频高压充电电源适合作为CO₂激光器的高压充电电源,为高频高压技术在CO₂激光器中的应用奠定了基础。

参考文献

- [1] BEKEY I. Project Drion; orbit debris removal using ground based sensors and laser[C]// Proceedings of the Second European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany; European Space Agency, 1996: 699-701.
- [2] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100kW class repetitive pulsed CO₂ laser[J]. SPIE, 2003, 5120: 717-730.
- [3] GONSALVES J N, DULEY W W. Cutting thin metal sheets with the CW CO₂ laser [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43 (11): 4684-4687.
- [4] TSUNERNI A, HAGIWARA K, SAITO N, et al. Complete removal

- of paint from metal surgace by ablation with a TEA CO₂ laser [J]. *Applying Physics*, 1996, 63(2): 435-439.
- [5] ROBERT B. A compact switched-capacitor regulated chargepump power supply [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2006, 41(8):1944-1953.
- [6] MENG F J. Application of digital signal processor on high power TEA CO₂ laser control system [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 12-15 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] ZHANG X L, GUO L H, MENG F J, *et al.* Application of series resonant charging technology to trigger system for rotated spark switch [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1416-1423 (in Chinese).
- [9] WANG M, TIAN Y, LI T M, *et al.* Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage syetem [J]. *Transations of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(8): 65-70 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] KOPELOVICH E A, VANYAEV V V, KHVATOV S V. Features of electromagnetic processes in high voltage power supplies with a series resonant inverter [J]. *Russian Electrical Engineering*, 2011, 82(10): 523-528.
- [12] DO L H. Soft-switching high step-up DC-DC converter with single magnetic component [J]. *International Journal of Circuit Theory and Application*, 2014, 42(6): 620-631.
- [13] ZHANG J H, LAI J S, YU W S, *et al.* High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(4): 1145-1152.
- [14] KANG W, ZHANG L X, LIU C Y. Output filter design method in current-source PWM converters [J]. *Transations of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(6): 83-89 (in Chinese).
- [15] YANG D S, RUAN X B, LI Y, *et al.* A new multiple-input full bridge converter [J]. *Transations of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(8): 24-32 (in Chinese).
- [16] FILCHEV T, CARASTRO F, WHEELER P, *et al.* High voltage high frequency power transformer for pulsed power application [C] // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York, USA: IEEE, 2010: 165-170.
- [17] 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.
- [18] DALESSANDRO L, da SILVERIA CAVALCANTE F, KOLAR J W, *et al.* Self-capacitance of high-voltage transformers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(5): 2081-2092.
- [19] TRANSFORMER MANUFACTURING PIPELINE COMMITTEE. *Electronic transformer manual* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1999: 392-394 (in Chinese).