

可控硅开关型脉冲激光电源

龙晓 张锐 王殿奎 姚建铨

(天津大学精密系, 300072)

林晓霖 徐世璞 任崇发

(沈阳机电研究设计院)

提要: 建立了开关型脉冲激光电源的数学模型并给出了设计方法。采用快速可控硅做为开关元件完成了一台容量为 55k W、重复频率可达 200 Hz 的脉冲激光电源, 给出了具体的电路并进行了分析。

关键词: 开关型电源, 脉冲激光电源, 大功率激光

SCR switched power supply for pulsed lasers

Long Xiao, Zhang Rui, Wang Diankui, Yao Jianquan

(Dept. of Precision Instrument, Tianjin Univ. Tianjin)

Lin Xiaolin, Xu Shipu, Ren Congfa

(Shenyang Electromechanical Research Institute)

Abstract: The mathematical model of switched power supply for pulsed lasers has been established and the general designing method is given. With fast SCR as the switching elements, a pulsed laser power supply, with can obtain an output power of 15 kilowatts at the repetition rate of 200 Hz has been fabricated. The details of this circuit are given and analysis is made.

Key words: Switching power supply, pulsed laser power supply, high power laser

开关型激光电源是近年来发展起来的用于激光器泵浦的很有发展前途的激光动力装置, 它大大减少了电源的成本和体积, 克服了传统的脉冲激光电源由于电压源所产生的电流冲击和功率损耗, 提高了电容的充电精度, 使电源的性能得到很大的改善。

一、开关型脉冲激光电源的理论及设计方法

建立以电容为负载的逆变器等效数学模型是分析和设计开关型脉冲激光电源的关键, 这种等效模型(图 1)是根据以下规则建立的: 1) 在正常工作条件下, 由于变压器的耦合作用, 储能电容 C_s 在逆变器电路中等效为一个容量为 $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot C_s$ 的电容 C'_s ; 2) 高频全桥整流电路可等效为一个自动改变 C_s 充电电流方向的变换器, 以保证在任何时刻 $\dot{r}c_s(t) > 0$ 成立; 3) 高频全桥整流电路也可等效为一个自动开关电路, 它能保证在任何时刻 $dV_{cs}/dt \geq 0$ 成立。根据这些等

效原则,建立了开关型电源的数学模型^[1],由此模型出发,采用数值分析的方法,对该电源的每一时刻的工作状态进行了模拟计算,从而对该电源的工作过程,电路各参数对电源特性的影响有了一个全面的了解。并由这些理论分析的结果^[1],归纳出以下开关型脉冲激光电源的设计方法。

1) 选择逆变器的工作频率 f_{\max}

逆变器的最高工作频率主要受可控硅开关速度 τ 及其它元件高频特性的限制,通常取 $(4\sim 6)\tau$ 为谐振电路电流达到最大值的时刻,由此可求出:

$$f'_{\max} = (0.04\sim 0.06)/\tau \quad (1.1)$$

又根据逆变器的外控工作周期应大于逆变器 LC 谐振回路固有周期这一要求,可求出电感和电容的乘积:

$$L \cdot C \leq (1.6\sim 3.6)\tau^2 \quad (1.2)$$

2) 选择谐振回路的电感和电容

电感、电容是与逆变器状态最直接相关的参数,是设计逆变器的关键,以 L/C 为参变量的输出功率 (P_{out}) 随充电周期数 (N) 的变化曲线见图 2^[1],由此可知在 $L \cdot C = \text{常数}$, 即电流达到最大值的时间不变的情况下,随着 L/C 的减小,最大平均输出功率明显增加,但通过减小 L/C 来提高电源输出功率是有限的,即须满足谐振条件 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 。根据(1.2)式及激光电源要求设计最大平均功率。从图 2 选一个 L/C 值,使该 L/C 值对应曲线的最大平均输出功率不小于设计值,由此即可求出具体的电感,电容参数。

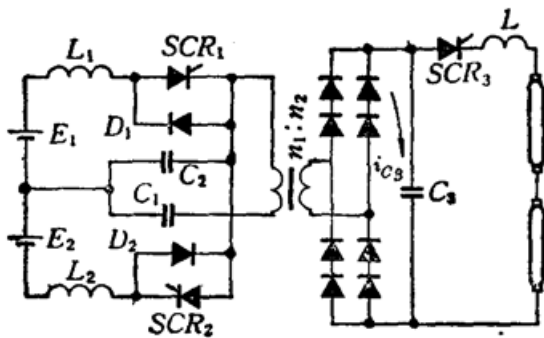


Fig. 1 Schematic diagram of switched power supply for pulsed lasers

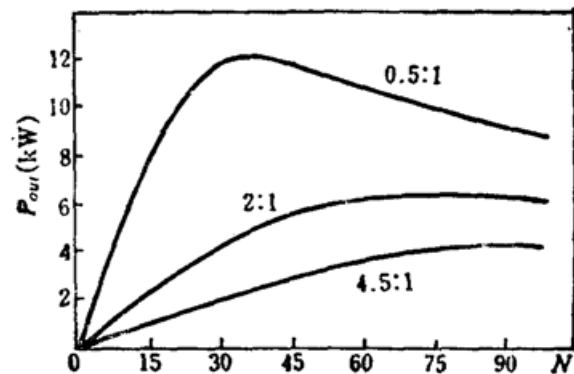


Fig. 2 Variation of output power vs charging cycle number with different parameter L/C

3) 选择脉冲成形网络

C_s 和 V_s 等主要是根据脉冲成形网络与负载阻抗匹配的原则选取的^[2], 即

$$C_s = 0.09 \cdot \left(\frac{E_{\text{out}} \cdot t_p^2}{K_0^4} \right)^{1/3} \quad (1.3)$$

$$V_s = \left(\frac{2 \cdot E_{\text{out}}}{C_s} \right)^{1/3} \quad (1.4)$$

$$L = \frac{t_p^2}{9C_s} \quad (1.5)$$

其中 $K_0 = 1.27(P/450)^{0.2} \cdot \frac{1}{d}$ 为泵浦灯的特征参数, t_p 为灯光脉宽, L 为放电电感。

4) 选择变压器的变化 $\frac{n_2}{n_1}$

根据激光电源要求的最高重复频率 f_{max} 及放电脉冲宽度 t_p , 可求出逆变器充电脉冲的个数 $N_0 = (T_5 - t_p) / T_2$, 其中 $T_2 = \frac{1}{f'_{max}}$, $T_5 = \frac{1}{f_{max}}$. 由此 N_0 和电源平均输出功率随充电周期数的变化曲线见图 3^[1], 可求出一个 C'_3 值, 此 C'_3 所对应曲线的最大输出功率出现在充电周期数为 N_0 处, 由此可求出:

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{C'_3}{C_3}\right)^{1/2} \tag{1.6}$$

二、大功率可控硅开关型脉冲激光电源的实际电路及分析

根据以上设计方法, 研制了一台单机容量为 15kW 的可控硅开关型脉冲激光电源, 该电路的主电路见图 4, 各部分的具体参数为:

逆变器部分: $L=9.5 \mu\text{H}$, $C_1=18 \mu\text{F}$, $C_2=6 \mu\text{F}$, 开关元件选用 KK 200 A/1600 V 的高频快速可控硅, 其开通和关断速度小于 $10 \mu\text{s}$;

中频升压部分: E 型中频变压器磁芯由块状铁涂氧拼接而成, 其变化为 $\frac{n_2}{n_1} = 6$, 整流桥由

八支 ZK 20 A/1600 V 的高频整流二极管构成;

负载部分: $110 \mu\text{F}$ 储能电容和 $250 \mu\text{H}$ 放电电感组成脉冲成形网络, 泵浦灯采用两支 $\phi 12 \times 110 \text{ mm}$ 的脉冲氙灯。

由此参数可求出逆变器谐振电路的固有周期 $T_{1max} = 4\pi \cdot (L \cdot C)^{1/2} = 189.7 \mu\text{s}$, 为保证逆变器可靠工作, 并考虑到分布电阻的影响, 取谐振电路电流达到最大值的时间为五倍可控硅的开关速度, 即取 $T_2 = 200 \mu\text{s}$. 习惯上将电流的工作频率称为开关型激光电源的逆变频率, 故该激光电源逆变器的工作频率为 $f'_{max} = 10 \text{ kHz}$. 另由数值计算知, 在以上特

定的参数下, 逆变器的最大平均输出功率出现在充电周期数 $N_0 = 35$ 处, 此时,

储能电容的储能: $E_{out} = 119.41 \text{ J}$;

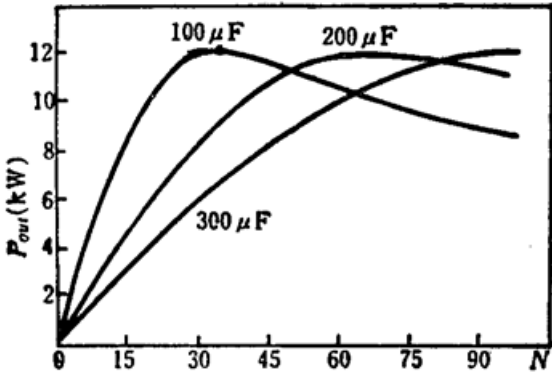


Fig. 3 Variation of output power vs charging cycle number with different parameter C_3

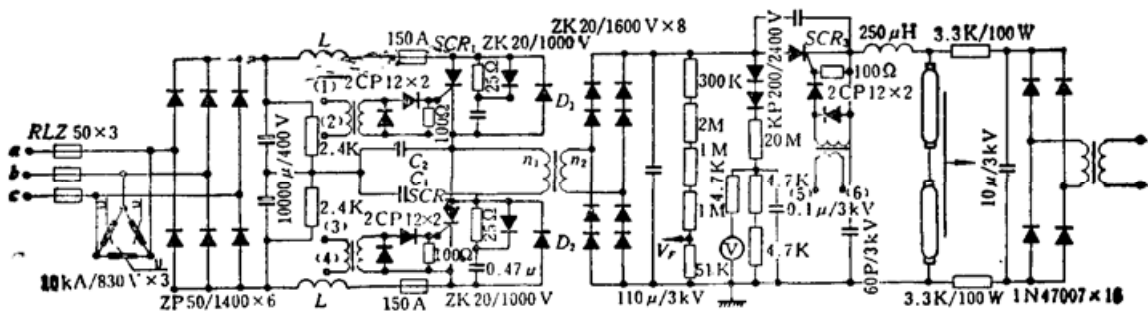


Fig. 4 Main circuit of 15kW switched power supply for pulsed lasers

储能电容的电压: $V_{c_s} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cdot V'_{c_s} = 1545.42 \text{ V}$;

电源的最高功率: $P_{\text{out}} = 15.35 \text{ kW}$;

电源的最高频率: $f_{\text{max}} = P_{\text{out}}/E_{\text{out}} = 128.5 \text{ Hz}$;

允许的放电时间: $T_4 = 0.75 \text{ ms}$;

实际放电脉冲宽度: $t_p = 0.5 \text{ ms} < T_4$ 。

该电源的控制线路见图 5。由 IC1 和 IC2 组成的放电频率控制电路和由 IC5 组成的逆变器频率控制电路分别产生两组独立的频率信号。放电频率控制电路产生的频率, 可由电源重复频率调节电位器 W_1 进行调节, 并通过 IC3 放大后由 $3\frac{1}{2}$ 位数字电压表显示, 其频率范围在 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 。该放电信号在工作方式选择在自动挡时, 由电子开关选送进由 IC4 组成的放电脉宽控制电路, 并产生一与放电信号在时间上同步且具有与放电脉宽对应的脉宽为 T_4 的高电平信号。另外该放电信号还同步地被送入 IC9, 由此产生一定宽度的触发信号并经三极管功率放大后去触发放电可控硅 SCR3。在工作方式选在手动档时, 放电信号由手动按钮 AN1 产生, IC12 为一消抖动电路, 以保证可靠地产生一个触发信号。逆变器频率控制电路产生一频率为 5 kHz 的固定信号, 且其前后沿分别触发两个由 IC7、IC8 组成的单稳, 从而产生两组在时间上有一定间隔的, 且有一定宽度的触发信号, 该信号经三极管放大后, 分别去触发 SCR1, SCR2。但 IC7、IC8 是否能产生输出信号是由接在其控制端上的 IC6 的输出决定的, 只要 IC6 的任何一输入端为高电平, IC6 就产生一低电平输出信号, 逆变器就停止工作。IC6 的输入端是与由 IC4 组成的放电脉宽控制电路和由 IC10、IC11 组成的电压比较控制电路相联接的, 放电脉宽控制线路是为避免放电回路与逆变器同步工作而短路联通所设置的, 它能产生一与放电脉冲在时间上相对应的脉冲宽度为 $T_4 > t_p$ 的信号, 能确保在放电时逆变器停止工

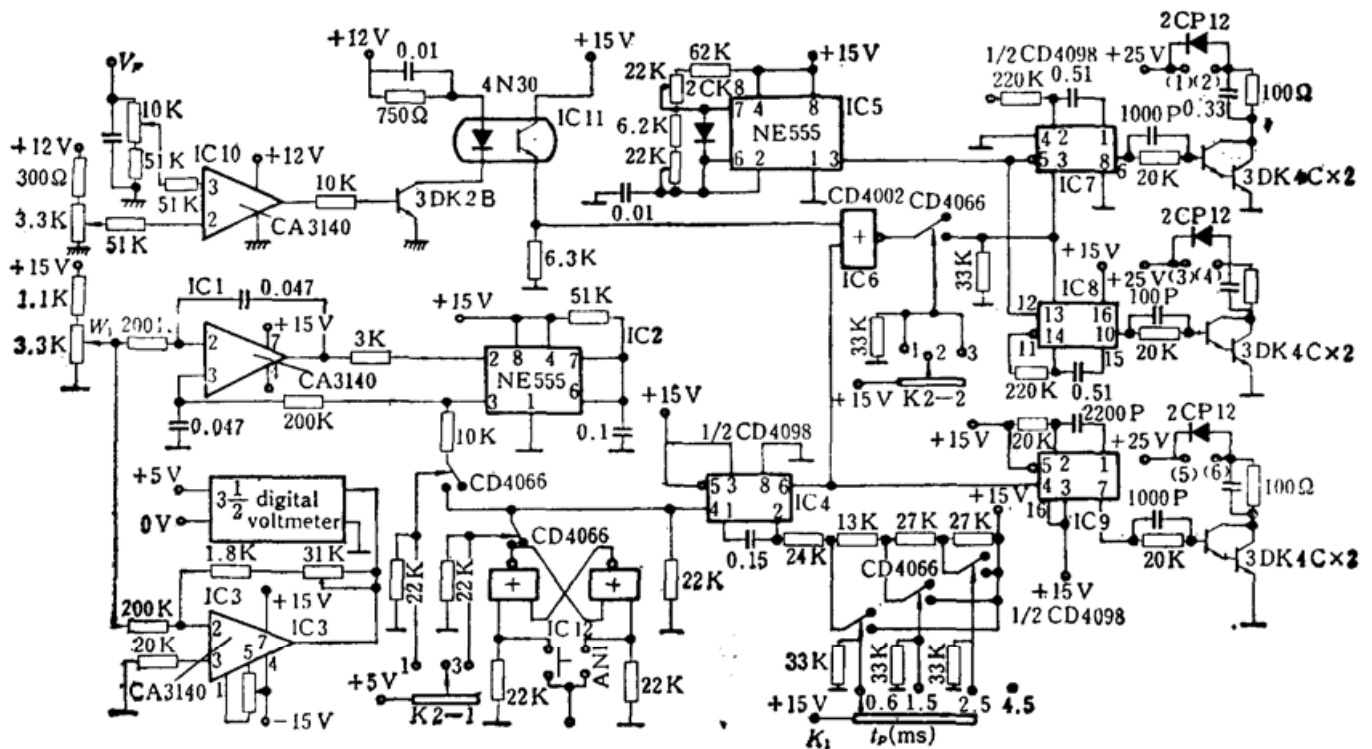


Fig. 5 The control circuit of 15 kW switching power supply for pulsed lasers

作。电压比较控制电路保证当电容电压达到预定值时产生一高电平从而使逆变器停止工作。

该电源的一个突出特点就是在频率优先的前提下,具有最大输出功率自动限制的功能。即在 $P_{\text{out}} = \frac{1}{2} C_s \cdot V_s^2 \cdot f \leq P_{\text{out,max}}$ 时,电源的充电电压和重复频率能独立地调节,而当 $P_{\text{out}} > P_{\text{out,max}}$ 时,该电源能在保持所设定的重复频率下,使充电电压自动下降,偏离设定的电压值,以保证 $P_{\text{out}} \leq P_{\text{out,max}}$ 。由图 5 可知该功能的实现主要是由与脉冲重复频率信号同步的脉宽控制信号实现的,该信号通过 IO6 与充电电压控制信号发生联系,一起控制逆变器的开停。当 $P_{\text{out}} \leq P_{\text{out,max}}$ 时,达到预定电压所需充电时间 T 小于脉冲重复率周期 T_5 和 T_4 之差 ΔT ,此时逆变器的停止信号由充电电压控制电路给出,随着脉冲重复频率的提高, ΔT 减小,当 $P_{\text{out}} > P_{\text{out,max}}$ 时, $T > \Delta T$,此时逆变器的停止信号改由脉宽控制电路给出,充电时间也自动地由 T 转为 ΔT ,从而导致充电电压随脉冲重复频率的自动下降。电源的这种功能,使得器件能在多种满负荷状态下工作,从而为实际应用提供了便利。

制作高功率开关型脉冲激光电源存在着许多技术上和工程上的困难。最突出的就是高频引起的损耗、高频变压器的制做及分布参数的控制等。开关型脉冲激光电源的单机最大容量是有限制的,单机容量越大,分布参数就越难控制,从而给制作和调试带来许多困难。实验表明,单机容量 15 kW 时,其分布参数的作用就已很明显,电路参数的选择和控制也比较困难了,这基本上就是一个临界容量。因此,建议将开关型激光电源的单机最大容量控制在 10 kW 以内,以减少不必要的制作困难。

参 考 文 献

- 1 龙晓,天津大学学报,(4),10(1990)
- 2 W. 克希奈尔,固体激光工程,科学出版社,北京,1983年,318