

文章编号: 1001-3806(2003)05-0466-04

15kW 具有恒压限流功能的 YAG 脉冲激光电源

马新敏 郭泽俊 曹红兵 王敏 黄维玲

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 介绍用于 YAG 固体脉冲激光器的 15kW 具有恒压限流功能的开关电源, 分析了控制电路原理, 给出了实现电路。实用表明, 电源性能良好、运行安全可靠、结构简单、成本低廉。

关键词: 恒压限流; 外特性; 脉宽调制; YAG 脉冲电源

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A

15kW constant-voltage & current-limiting switching power supply for YAG pulse laser

Ma Xinmin, Guo Zejun, Cao Hongbing, Wang Min, Huang Weiling

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A 15kW switching power supply with the function of constant-voltage & current limit for YAG pulse laser is presented. In this paper, the operation principle of the control circuit is discussed, and the implemented circuit is also described. Analytical and experimental results prove that the power supply has good static characteristics, fast dynamic response and high reliability. Furthermore, the configuration is simple and the cost is low.

Key words: constant-voltage & current-limiting; $V-I$ characteristics; PWM; supply for YAG pulse laser

引言

对于大功率 YAG 脉冲激光加工设备, 应用开关电源技术可大大提高产品性能、减小体积重量、提高效率、降低成本、扩展市场。但是, 开关电源的输出若仅具备单一的恒压特性(即恒压源)或者单一的恒流特性(即恒流源)并非安全实用。若采用恒压源供电, 因电源内阻太小, 每当脉冲放电过后储能电容充电的初期, 充电电流过大危及电源安全, 更为严重的是, 当脉冲氙灯连通时, 过大的灯电流会引发炸棒事故。可以证明, 在整个恒压充电过程中, 电源提供的能量有一半要消耗在充电回路的电阻上, 充电效率仅为 50%^[1]; 若采用恒流源供电, 虽充电电流受到限制, 但充电电压不易控制, 难以满足加工要求。若使开关电源恒压输出时具备限流功能, 即: 充电过程中将输出限制在设定的恒流值, 充电完毕将输出保持在预定的恒压值, 且限流值与恒压值可按要求随意整定, 问题便迎刃而解。

1 电路结构框图

电路结构框图如图 1 所示。主电路中, 三相工频 380V 电源经整流平滑后得到约 500V 的直流电压 u_d 。图中 Z_2 为二单元 IGBT 模块。由其中的 VT_2 作开关器件, VD_1 作续流二极管, 连同外接的电感 L_2 , 储能电容 C 一起构成下端斩控式 BUCK 型 DC-DC 变换器, 给储能电容网络充电。控制电路中, 电流反馈和电压反馈环路的输出经二极管并行连接, 在每个充电周期的前期和后期, 由电流 PI 调节器 $G_c(s)$ 和电压 PI 调节器 $G_v(s)$ 分时地调控脉冲信号的宽度, 以实现恒压限流的充电要求。

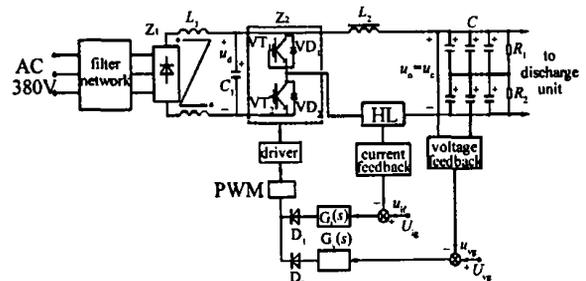


Fig. 1 Schematic diagram showing the circuit

作者简介: 马新敏, 男, 1957 年 5 月出生。副教授。从事电力电子技术方面的研究与教学。

收稿日期: 2002-10-08; 收到修改稿日期: 2003-01-21

2 电源外特性及控制电路的实现

因与储能电容 C 相并联的均压电阻, 反馈取样电阻以及电容自身的漏泄电阻均很大, 对充电电流 $i_c(t)$ 的分流作用很小可忽略不计, 故可将 C 视为理想电容。

对 C 充电的等效电路如图 2 所示。图中 R 为充电回路的有效电阻, 它包含充电限流电阻以及电容自身的损耗电阻。若将电容电压 $u_c(t)$ 由初始值 U_{ol} 上升到预定值 U_{oh} 所需的充电时间记为 t_0 , 则可用变分法求得在 $0 \sim t_0$ 期间使 R 损耗的能量 J_R 为最小的充电电流 $i_c(t)$ [1]。

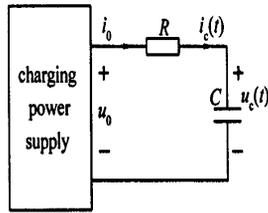


Fig. 2 The charge circuit

电阻 R 消耗的能量为:

$$J_R = \int_0^{t_0} i_c^2(t) \cdot R dt = \int_0^{t_0} R \cdot C^2 \frac{du_c}{dt} dt = \int_0^{t_0} RC^2 \dot{u}_c^2 dt = \int_0^{t_0} F(u_c, \dot{u}_c, t) dt \quad (1)$$

式中, $F(u_c, \dot{u}_c, t)$ 为被积函数。

使泛函(1)最小的极值曲线 $u_c(t)$ 是以下尤拉-拉格朗日方程的解:

$$\frac{\partial F}{\partial u_c} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{u}_c} \right) = 0 \quad (2)$$

解得电容电压为: $u_c(t) = At + B$ 。

代入边界条件 $u_c(0) = U_{ol}$ 和 $u_c(t_0) = U_{oh}$, 得到常数 A 和 B 分别为: $A = (U_{oh} - U_{ol}) / t_0$, $B = U_{ol}$ 。于是有:

$$u_c(t) = \frac{U_{oh} - U_{ol}}{t_0} \cdot t + U_{ol} \quad (3)$$

$$i_c(t) = C \frac{du_c}{dt} = C \cdot \frac{U_{oh} - U_{ol}}{t_0} = \text{const} \quad (4)$$

这说明, 充电过程中当充电电流 $i_c(t)$ 为一恒定直流, 充电电压 $u_c(t)$ 随时间线性增长时, 回路电阻的损耗最小。与之对应的充电电源必须是一个恒流源, 在 $u_c(t)$ 自 0 达到预定值 U_{oh} 期间充电电流始终恒定。

在初始电压 $U_{ol} = 0$ 的条件下, 恒流充电过程的效率为:

$$\eta = \frac{J_C}{J_C + J_R} = \frac{t_0}{t_0 + 2RC} \quad (5)$$

式中, J_C 为 t_0 时刻 C 储存的能量。

显然, 当回路电阻为 0 时, 充电效率趋于 1。故恒流充电时可取消限流电阻, 以取得充电的高效率。

满足以上充电要求的电源外特性如图 3 所示。图中 I_{ox} 为可整定的输出限流值, U_{oh} 为可设定的输出恒压值, 它们的大小应根据激光器放电脉宽、重复频率以及单脉冲能量的需求而定, 以满足不同加工工况的要求。

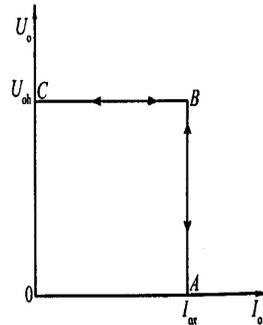


Fig. 3 Characteristic curve for constant-voltage & current limit

电源实际的工作过程为: 随着脉冲氙灯周期性大电流放电, 储能电容的电压 u_c 会随之陡然大幅跌落至某一值 U_{ol} , 随后由开关电源迅速补充能量, 在下一放电脉冲到来之前将其充电至 U_{oh} , 完成一个充电周期, 如此周而复始地进行。每次充电的起始阶段, 电容电压 $u_c < U_{oh}$, 电源以限定的电流 I_{ox} 对 C 充电, 工作点的轨迹落在图 3 的 AB 段。随着时间的推移, u_c 升高, 当 u_c 达到 U_{oh} 时, 工作点沿特性曲线由 B 点迅速接近 C 点, 这时充电电流仅为电容漏电流和均压电阻电流之和, 其值很小近似为 0, u_c 维持在恒压值 U_{oh} , 等待下一个放电脉冲的到来。

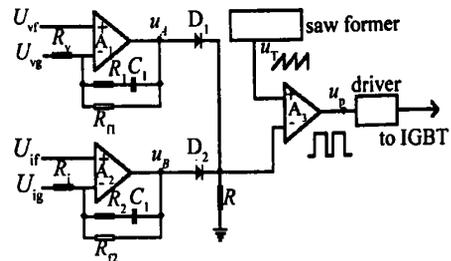


Fig. 4 Circuit diagram for constant-voltage & current limit

实现图 3 恒压限流功能的控制电路原理如图 4 所示, 图中运放 A_1, A_2 与各自的外接电阻电容一起分别构成电压调节器 $G_v(s)$ 和电流调节器 $G_i(s)$, 其输出经 D_1, D_2 并联后与锯齿波 u_T 相比较, 以产生 PWM 波 u_p , u_p 的脉宽由 u_A, u_B 中电压较高者决定, 如图 5 所示。

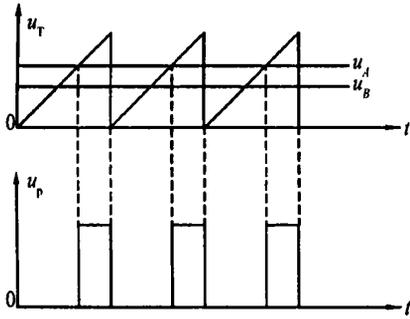


Fig. 5 The schematic plan of the PWM wave generating

每个充电周期中,起初因储能电容的电压 u_C 较低,电压反馈值 u_{vf} 低于给定值 U_{vg} ,电压调节器 $G_v(s)$ 试图将 u_p 的脉冲展宽来增加 u_C ,致使 u_A 降低, A_1 工作在负饱和值, D_1 截止,实际上 $G_v(s)$ 对脉宽失去调节作用。与此同时, u_C 较低必然引起主电路充电电流 I_o 的增大,电流反馈值 u_{if} 会大于限流给定值 U_{ig} ,这时电流调节器 $G_i(s)$ 起作用,将 u_B 升高 ($u_B > u_A$) 用于调节 u_p 的脉宽,电流负反馈使电源系统作限流运行,将 I_o 限制在 $I_{o,x}$ 值;随着充电电荷的积累,储能电容的电压 u_C 及其反馈值 u_{vf} 升高。在充电后期,当 u_{vf} 超出给定值 U_{vg} 时,电压调节器 $G_v(s)$ 开始起作用使 u_A 升高,对 u_p 的脉宽进行调节,系统在电压负反馈作用下作恒压运行,使 u_C 恒定在与 U_{vg} 对应的 U_{oh} 值,此时的充电电流 I_o 及其反馈值 u_{if} 随 u_C 升高自然减小, $u_{if} < U_{ig}$,电流调节器 $G_i(s)$ 使 u_B 降低(试图将脉冲 u_p 展宽以增大 I_o), $u_B < u_A$, D_2 截止, $G_i(s)$ 对脉宽的控制失效。

因任一时刻仅由一个 PI 调节器在起作用,故在分析闭环系统性能时,可只考虑其中一个反馈闭环。由控制原理可知,PI 调节器的传递函数为: $G(s) = K_p + K_i/s$ 。

这里 PI 调节器为系统提供了一个开环积分环节,对要求输出为恒值的调节系统,当输入为阶跃信号时,系统能完全消除跟踪误差,所以电源的稳压、稳流精度很高^[3]。

实际电源中,图 4 所示的控制电路可用一集成 PWM 控制专用芯片 TL494 及外围元件实现,如图 6 所示。有关 TL494 的原理和功能可参见文献 [4],不赘述。

采用集成 PWM 芯片后,控制电路的接线简单,性能稳定,可靠性大大提高。电源的恒压值和限流值可根据不同的加工工况独立设置,互不影响。通过 TL494 的 4 脚还实现了软启动和故障保护功能。

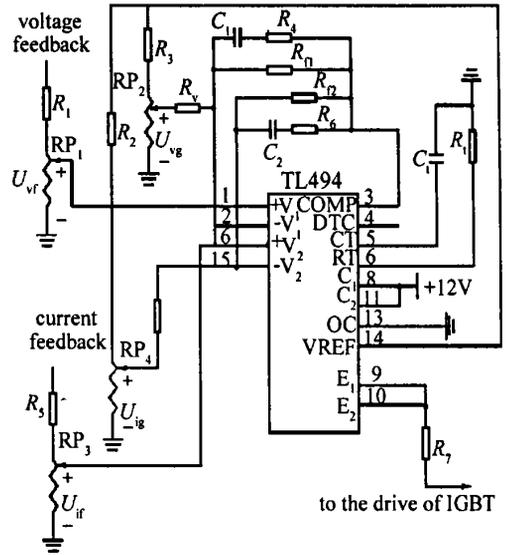


Fig. 6 The control circuit for constant-voltage & current limit

3 测试结果

应用上述电路制作的供 YAG 脉冲激光焊接机使用的 15kW 具有恒压限流功能的开关电源具有以下技术指标。

3.1 输出伏安特性

外接可变电阻箱 R_L 作为负载,将恒压值 U_{oh} 和限流值 $I_{o,x}$ 分别设置在接近 300V 和 25A。改变 R_L 阻值,测得一组外特性数据如表 1 所示,其中 I_o 为主电路输出电流, U_o 为输出电压。

由表可知, R_L [0 ~ 12.05] 时,工作点位于图 3 中的 AB 段,当 $R_L > 12.05$ 时,工作点落在图 3 中的 BC 段。

Table 1 Test data (ambient temperature 25 °C)

R_L / Ω	I_o / A	U_o / V
0.07	24.915	1.76
3.98	24.915	100.71
6.09	24.915	152.22
9.60	24.915	239.2
11.72	24.915	293.5
12.05	24.884	300.2
13.10	22.954	300.6
26.98	11.097	301.8
60.73	4.960	302.0
99.76	3.030	302.2
118.67	2.558	302.2
	0.031	302.5

3.2 特性指标

输入: AC380V ±10%, 输出电压调整范围: (100 ~ 500)V, 输出限流调整范围: (5 ~ 30)A。

3.3 输出短路时, IGBT 集-射极间的电压 u_{CE} 波形

将负载电阻箱 R_L 短路, 从电源输出端测得短路导线及其端头的接触电阻共约 0.07, 此时输出电流被限制在 $I_o = 24.915A$, 输出电压 $U_o = 1.76V$ 仅为短接线路压降。 u_{CE} 波形如图 7 所示。

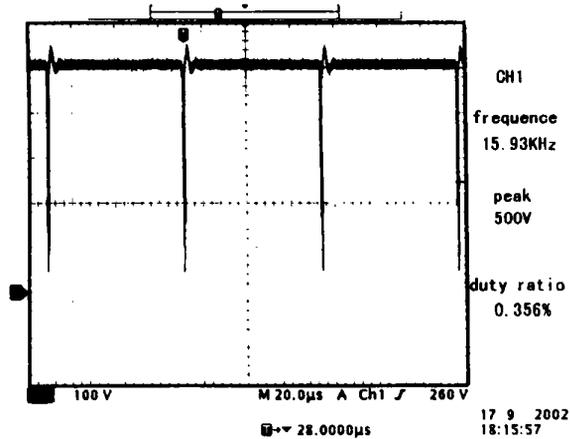


Fig. 7 The wave showing u_{CE} for the output short cutting

3.4 输出特性转折点($R_L = 12.05$)处, IGBT 集-射极间的电压 u_{CE} 波形

当 $R_L = 12.05$ 时, 测得 $I_o = 24.884A$, $U_o = 300.2V$, 此时的 u_{CE} 波形如图 8 所示。

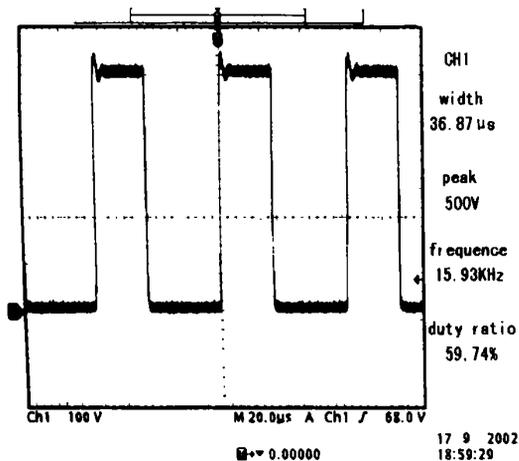


Fig. 8 The wave showing u_{CE} for a 12.05 load

3.5 输出开路($R_L =$)时, IGBT 集-射极间的电压 u_{CE} 波形

输出开路时, 由于储能电容上接有均压电阻 R_1

和 R_2 , 开关电源实际上是处在轻载小输出电流 ($I_o = 0.031A$) 状态下运行, 这时电感 L_2 的电流断续, 以开关频率周期性地向储能电容补充电流以维持输出电压 $U_o (= 302.5V)$ 恒定。此时的 u_{CE} 波形如图 9 所示。

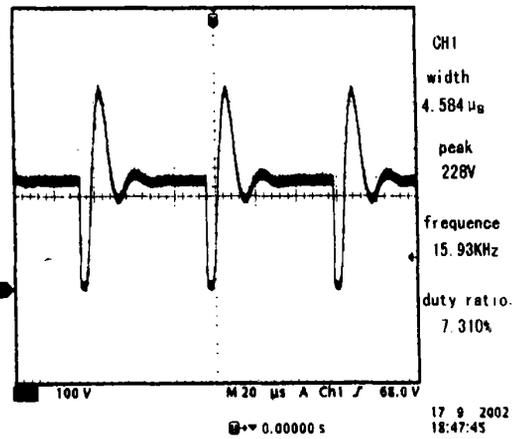


Fig. 9 The wave showing u_{CE} for output open running

4 结 论

采用大功率半导体器件 IGBT 构成的 BUCK 型开关式脉冲激光电源, 配以电压、电流闭环调节电路, 分时地对脉宽实施调控, 可以获得较为理想的恒压限流特性, 实现对储能电容高效率高精度地充电。电源结构简单、成本低廉、体积小、重量轻, 动态响应速度快, 可在负载短路时限流工作, 这样既可避免电源本身的短路损坏, 又可防止脉冲氙灯连通引起的炸棒事故, 提高了整机运行的安全性和可靠性, 可广泛地应用于高功率 YAG 脉冲固体激光器, 也适用于对大容量蓄电池的充电。电源历经研发, 已步入产品化轨道。

参 考 文 献

- [1] 梁国忠, 梁作亮. 激光电源电路. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 56 ~ 65.
- [2] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 1999: 7 ~ 19.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理. 3 版. 北京: 国防工业出版社, 1994: 244 ~ 246.
- [4] 叶治政. 电力电子技术, 1991, 25(3): 9 ~ 12.