

文章编号: 1001-3806(2006)02-0116-03

一种基于 CUK 变换器的通用型固体激光电源

马新敏, 陈 潇, 王 振, 郭泽俊, 汪 鹏

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 介绍了一种性能优异的新型固体激光电源。采用新型的变换器结构, 使电源具有较强的通用性。给出了原理电路模型, 分析了工作原理。实验证明, 该电源结构简单、适应范围广、成本较为低廉、工作可靠。

关键词: 激光技术; CUK 变换器; 升降压; PWM 控制; 恒流特性; 恒压限流特性

中图分类号: TN245 文献标识码: A

A new flexible solid-state laser power supply based on CUK converter

MA Xin-min, CHEN Xiao, WANG Zhen, GUO Ze-jun, WANG Peng

(National Engineering Research Center for Laser Processing HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract A new flexible solid-state laser power supply based on CUK converter with high performance is presented. The principle of the power supply system is analysed and the schematic diagram of the circuit is provided. Experiments prove the power system has good electrical character flexibility and reliability.

Key words laser technique; CUK converter; step-up and step-down voltage; PWM control; constant current; constant voltage & restricted current

引 言

激光技术的飞速发展, 需要先进的电能变换与控制技术支持。对于灯抽运 YAG 固体激光器, 按其工作方式不同有脉冲型和连续型之分。其电源的配置按传统做法是, 对不同类型的激光器配备不同种类的电源。对连续激光器, 需要恒定的电流向氪灯供电, 电源需具备恒流输出特性, 通常采用非隔离的单管降压型 (BUCK 型) 变换器作为主电路拓扑, 其缺陷在于, 采用单相交流供电时, 电源的输出电压无法满足双灯串连的负载要求。为此, 须变更主电路的结构, 例如可采用带隔离变压器的推挽式、半桥式或全桥式变换器, 这样不仅电路结构复杂, 成本也会随之升高; 对脉冲激光器, 需具备恒压限流功能的电源高效率地向电容储能网络充电^[1]。在脉冲激光焊机中电源通常采用 BUCK 变换器作为主电路结构, 这种电源仅适用于三相交流供电, 若采用单相交流输入, 电源的输出电压明显偏低; 在要求峰值功率较高的脉冲切割机中, 即便采用三相交流供电, BUCK 型变换器仍不易满足加工要求。传统的切割机电源采用所谓 LC 谐振式充电方式, 即: 三相交流输入电压经可控硅全桥相控整流得到直流电

压 E , 再通过 LC 串联谐振将电压升至 \sqrt{E} 存储在储能电容 C 中, \sqrt{E} 称为升压系数, 通常在 1.5~1.8 之间^[2], 这种电路采用晶闸管作为电能变换的主导器件, 电路结构复杂, 体积庞大, 材料成本高, 电气性能差^[3]。

综上所述可知, 对于 YAG 固体激光器配置的专用电源, 无论是对交流供电条件, 还是对负载电压等级, 在使用上都有很强的局限性, 对生产厂商而言, 因电源品种较多, 大大增加了生产和售后维修成本。若能开发出性能优异, 电路结构简单, 通用性强, 适用于中小功率的 YAG 固体激光电源, 不仅具有可观的经济效益, 也具有可观的社会效益。

1 电路结构框图及工作原理分析

通用型电源主电路与控制电路原理结构示意图 1 所示。

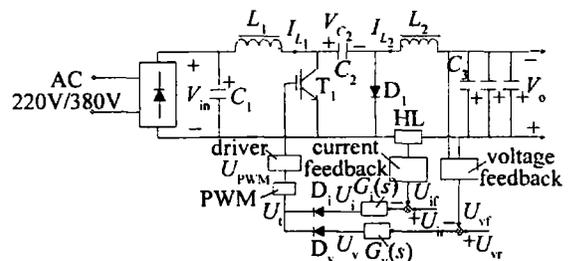


Fig 1 Schematic diagram

主电路中, T_1 采用大功率半导体器件 IGBT 作为开关管, D_1 为续流二极管, 与电感 L_1 , L_2 及电容 C_1 , C_2 一起, 构成 CUK 型 DC-DC 变换器。单相 220V 或三相

作者简介: 马新敏 (1957-), 男, 副教授, 主要从事电力电子技术方面的科研和教学工作。

E-mail: bbbhe@tm.com

收稿日期: 2004-11-02 收到修改稿日期: 2005-08-23

380V 交流电源, 经全桥整流和电容滤波后得到约 300V 或 500V 的直流电压 V_{in} , 作为变换器的直流输入。采用高频 PWM 开关控制, 通过改变 T_1 的占空比 D 来改变电路的变压比 V_o/V_{in} 。

每个开关周期 T_s 中, 在开关管 T_1 导通时间 $T_{on} = DT_s$ 内, 直流输入电压 V_{in} 经 T_1 加于 L_1 两端, 使电流 I_{L1} 线性增加, 与此同时, 续流二极管 D_1 因承受反压而截止, 电容 C_2 经 T_1 对电容 C_3 放电, 并使流过 L_2 的电流 I_{L2} 线性增长。在随后的 $T_{off} = (1-D)T_s$ 期间, T_1 阻断, 电流 I_{L1} 经 C_2 和 D_1 续流, V_{in} 与 L_1 的感应电动势 $V_{L1} = -L_1 di/dt$ 串联相加, 经 D_1 对 C_2 充电, 同时, I_{L2} 也经 D_1 续流, 将磁场能转化为电能向负载供电, 完成一个开关工作周期^[4]。每一周期中, 能量的存储和传递在 T_1 开通和阻断的两个时区、两个环路中同时进行, 因此变换效率高^[5]。

当电源稳态运行时, 在一个开关周期内, 对电感 L_1 , 由伏-秒平衡原理可以得到:

$$\int_0^{DT_s} V_{in} dt = \int_0^{(1-D)T_s} (V_{C2} - V_{in}) dt \quad (1)$$

由于 C_2 取值较大, 且开关频率较高, 故 V_{C2} 可认为恒定不变, 则由 (1) 式可得:

$$V_{C2} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (2)$$

(2) 式表明, CUK 变换器的前一部分将 V_{in} 升为 V_{C2} , 相当于一个升压 (BOOST) 变换器^[6]。同理, 在一个周期内对电感 L_2 , 由伏-秒平衡原理有:

$$\int_0^{DT_s} (V_{C2} - V_o) dt = \int_0^{(1-D)T_s} V_o dt \quad (3)$$

由 (3) 式可得:

$$V_o = DV_{C2} \quad (4)$$

(4) 式表明, CUK 变换器的后半部分将 V_{C2} 降至 V_o , 相当于一个降压 (BUCK) 变换器^[6]。由 (2) 式和 (4) 式, 可得输出电压 V_o 与输入电压 V_{in} 之间的函数关系为:

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} = KV_{in} \quad (5)$$

式中, $K = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D}$ 称为变压比。

(5) 式表明, CUK 变换器相当于一个升压变换器与其后的降压变换器的串联组合^[7]。以高频 PWM 控制方式调节 T_1 驱动信号的占空比 D , 可方便灵活的在宽范围内调节输出电压, 以满足不同负载的需求。因此, 电源不仅适用于三相交流供电, 也适用于单相交流供电, 而且, 在电网输入欠电压时, 仍可正常工作。

通过改变输入输出电感 L_1 , L_2 的大小, 可以降低输入电流 I_{L1} 和输出电流 I_{L2} 的纹波, 或将电感 L_1 和 L_2 相互耦合, 当参数匹配时, 可以把输入或输出的电流脉

动纹波降到任意程度, 显著的改善整个电源系统的电磁兼容性能^[8]。

控制电路中, 电流负反馈和电压负反馈环路的输出经二极管 D_i 和 D_v 并行连接, 电流 PI 调节器 $G_i(s)$ 与电压 PI 调节器 $G_v(s)$ 分时调控 T_1 驱动信号的脉宽, 以得到恒压限流或恒流限压的通用型矩形输出特性, 参见文献 [1] 中的图 3 和图 4。

图 1 中, U_v 和 U_i 分别为电源输出电压和输出电流的给定信号, 其值大小可根据不同类型的激光器分别整定; U_{vi} 和 U_{if} 分别为输出电压和输出电流的反馈取样信号。IGBT 驱动信号 U_{PWM} 脉宽由两调节器输出电压 U 和 U' 中电压较高者决定^[1]。

作为 YAG 连续激光电源使用时, 为得到恒流输出特性, 可通过整定电压给定值 U_{vr} , 将电源输出电压 U_{oh} 调至略高于氦灯满负荷工作时的电压, 这时电压 PI 调节器 $G_v(s)$ 仅在电源空载时起输出限压作用。电源空载时因输出电流 $I_o = 0$ 使电流反馈取样信号 $U_{if} = 0$ 经 $G_i(s)$ 的反比例积分调节使其输出 U_i 为负饱和值, 二极管 D_i 截止, D_v 导通, $U_i = U_v$, $G_i(s)$ 从电路中退出, 仅电压调节器 $G_v(s)$ 单独工作, 电源在电压负反馈作用下作限压运行。电源处于负载运行时, 因输出电压的取样信号 U_{vi} 始终小于给定信号 U_{vr} , 经 $G_v(s)$ 的反比例积分调节使其输出 U_v 为负饱和值, 二极管 D_v 截止, 仅 D_i 导通, $U_i = U_{vi}$, 这时 $G_v(s)$ 从电路中退出工作, 仅由电流调节器调控输出信号 U_{PWM} 的脉宽, 电源在电流负反馈作用下作恒流运行, 相当于一台恒流源。电压给定值 U_{vr} 出厂前一次整定就绪, 电流给定值 U_{if} 出厂前仅确定其上、下限值, 出厂后用户根据需要可在上、下限间随意调节。主电路电容 C_3 作输出滤波之用, 其容量不需太大。

作为 YAG 脉冲激光电源使用时, 为得到恒压限流的输出特性, 以满足对储能电容高效率高精度的充电, 可通过整定电流给定值 U_{ir} 对电源的输出电流 I_{oa} 加以限制, I_{oa} 值的选取依电源的负载能力而定, 电压给定值出厂前仅确定其上、下限值, 用户可根据加工需要在上、下限间随意调节, 以得到所需的充电电压 U_{oh} 。每一充电周期的前期和后期, 由电流 PI 调节器和电压 PI 调节器分时的调控脉冲信号 U_{PWM} 的宽度。每次充电过程中, $G_i(s)$ 单独工作, 电源以设定的限流值 I_{oa} 对储能电容恒流充电。充电结束时, $G_v(s)$ 单独工作, 将电容电压保持在预设的恒压值 U_{oh} , 电源在 $G_v(s)$ 作用下作恒压运行。主电路中电容 C_3 兼作储能网络之用, 电容量较大。

2 测试数据

利用 50A/1700V 的 IGBT 按图 1 电路构成 4.5kW

通用型固体激光电源,单相交流输入时,其输出电压调节范围 50V~450V,输出电流可达 10A,(选用耐压值更高,电流容量更大的 IGBT,可进一步扩大输出电压和电流的调节范围)。

2 1 输出特性

外接电阻箱 R_1 作为负载,将输出的电压值 U_{out} 和限流值 I_{ok} 分别设置在接近 400V 和 5A,改变 R_1 阻值,测得一组输出特性数据如表 1 所示,其中 V_o 为电源的输出电压, I_o 为输出电流。

Table 1 Test data of the output characteristic

R_1 / Ω	I_o / A	V_o / V
213 0	1. 91	403
158 8	2. 54	403
124 8	3. 27	401
94 6	4. 30	401
80 9	4. 96	398
74 6	5. 03	370
56 1	5. 03	281
33 9	5. 03	170
12 1	5. 03	59

由表可见, $R_1 = 80\Omega$ 时对应于输出特性的转折点 B,当 $R_1 > 80\Omega$ 时,电源的输出为恒压特性;当 $R_1 < 80\Omega$ 时,输出为恒流特性。电源具有较为理想的矩形输出特性。

2 2 直流输入电感电流 I_{L1} 波形

利用电流传感器测得对应于 $I_o = 5A$ 时直流输入侧电流 I_{L1} 的波形如图 2 所示。由图 2 可见,输入电流 I_{L1} 中纹波电流峰-峰值较小,仅为 0.49A,远远小于传统激光电源中 BUCK 变换器输入电流的纹波。

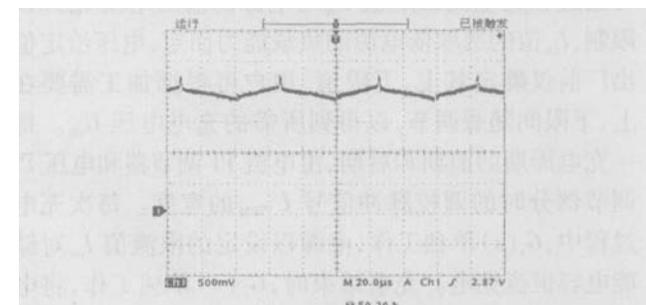


Fig 2 The input current waveform

2 3 输出电感电流 I_{L2} 的波形

利用电流传感器,测得 $I_o = 5A$ 时的输出电感电流 I_{L2} 波形如图 3 所示,由图 3 可知, I_{L2} 中纹波电流峰-峰值为 1.41A。

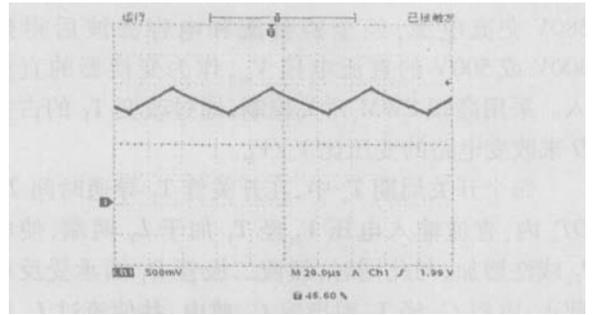


Fig 3 The output current waveform

3 结 论

采用 CUK 变换器作为主电路拓扑,配以电压、电流闭环调节电路可构成性能优异的通用型固体激光电源模型,其优异的性能在于:具有较为理想的恒压恒流矩形输出特性;输入输出电感可相互耦合,有效地降低直流电流 I_{L1} 的纹波,减小对电网的谐波污染,提高电源的电磁兼容性能;电路结构简单,成本较为低廉,在无需变压器的情况下,仅对单管实施高频 PWM 控制,通过调节占空比,可方便地实现输出升压和降压,且输出的恒压值和恒流值可在较宽范围内连续可调。这些优异的性能使电源针对交流供电条件和负载电压的等级在使用上都具有很强的通用性:既适用于单相交流供电,也适于三相交流供电;通过对电路参数和控制参数的简单调整,既可用作连续激光电源,也可用作脉冲激光电源,作脉冲激光电源时,既可用于焊接机,又可用于切割机。通用型固体激光电源的开发研制,在激光电能变换与控制领域无疑具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] MAX M, GUO Z J, CAO H B. 15kW constant-voltage & current-limiting switching power supply for YAG pulse laser [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 466~469 (in Chinese).
- [2] LIANG G Zh, LIANG Z L. Laser power supply circuit [M]. Beijing Publishing House of Weapon Industry 1995. 83~88 (in Chinese).
- [3] WANG Y Q, GUO Zh H, Li Z G. A new power supply for pulse solid laser with high repeated frequency [J]. Laser Technology, 1995, 19(4): 209~213 (in Chinese).
- [4] CAI X S. High frequency power electronics [M]. Beijing Science Press 1993. 162~171 (in Chinese).
- [5] JUTTY M, KAZMIERCZUK M K. Efficiency of the transformer Cuk PWM converter [A]. Proceeding of the IEEE National Conference on Aerospace and Electronics (NAECON)' 93 [C]. New York: IEEE, 1993. 639~644.
- [6] YAN B P, CHEN Zh M, LIU J. Decoupled switched capacitor Cuk DC-DC converter [J]. Journal of Xi'an University of Technology 1998, 14(3): 236~241 (in Chinese).
- [7] BRYANT, B KAZMIERCZUK M K. Derivation of the Cuk PWM DC-DC converter circuit topology [A]. Proceeding of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)' 03 [C]. New York: IEEE, 2003. 292~295.
- [8] CHEN J. Power electronics [M]. Beijing Higher Education Press 2002. 79~87 (in Chinese).