

文章编号: 1001-3806(2015)03-0386-05

两相两重斩波变换的半导体激光器电源研究

王志强, 马新敏*, 王 超, 郭 飞

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了提高传统线性半导体激光器电源的电能转换效率、输出电流的动态响应以及对负载电压的自适应能力, 采用两相两重斩波变换技术, 设计了一种半导体激光器用 2kW 直流驱动电源。测试并分析了该电源在激光系统中的静态特性、动态特性以及两相两重斩波变换电流源的效率。结果表明, 电源对负载电压自适应能力强, 具有较好的矩形输出特性; 直接驱动激光二极管模块时, 该电流源的电能转换效率高达 93%, 输出电流 0A ~ 100A 的上升、下降时间仅为 0.5ms, 电流纹波系数小于 0.03%。

关键词: 光电子学; 半导体激光器电源; 两相两重斩波变换; 输出电流动态响应; 负载电压自适应

中图分类号: TN245

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.023

Research of laser diode driver based on double-phase dual chopping conversion

WANG Zhiqiang, MA Xinmin, WANG Chao, GUO Fei

(National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the power conversion efficiency, dynamic response of the output current and the load voltage adaptability of a traditional linear laser diode driver, a 2kW laser diode driver was designed based on double-phase dual chopping conversion. The static and dynamic characteristics of laser diode driver were tested and analyzed. The power efficiency of the double-phase dual chopping conversion current source was measured. The results show that the power system has good adaptability to the load and outputs rectangular waveforms. The power conversion efficiency of the current source is up to 93% when driving laser diode modules directly. Typical rise and fall time of output current in the range of 0A ~ 100A is approximately 0.5ms. Current ripple factor is less than 0.03%.

Key words: optoelectronics; laser diode driver; double-phase dual chopping conversion; output current dynamic response; load voltage adaptive

引 言

高功率半导体激光器驱动电源根据电流输出模式的不同, 主要分为连续、准连续和脉冲 3 种输出模式^[1-3]。目前, 在激光加工领域广泛采用连续输出模式, 为满足加工要求^[4-6], 该类电源要有几十瓦到几千瓦的驱动能力, 同时有快速的输出电流动态响应速度^[7-8]。电路结构上普遍采用两级变换器相串联^[1-2], 其中前级为含有高频隔离变压器的开关型交流/直流变换器, 输出呈恒压源特性; 后级采用串联反馈式线性变换电流源, 以便将前级输出的直流恒定电压 U_{in} 转换成负载激光二极管 (laser diode, LD) 模块所需的直流电流 I_o , 同时减小输出电流纹波, 提高输出电流的动态响应速度^[9-10]。但是, 串联反馈式线性电流源中的调

整管工作在线性放大区, 结构上与负载相串联, 全部的负载电流 I_o 流过调整管, 功率损耗大、电源效率低。一旦 LD 模块内部发生局部短路使端电压降低或电源改接低电压 LD 负载时, 都会造成功耗的大幅增加, 调整管易过热损坏, 这说明电源对负载电压的自适应能力较差。为满足大电流负载要求, 调整管常采用多个功率金属氧化物半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 相并联, 以此来均匀分担负载电流和管耗。这势必造成后级电路使用的功率器件增多, 相应的控制电路复杂, 散热器加大, 硬件成本升高。

目前, 国外对高功率 LD 驱动电源的研究已取得令人瞩目的成果, 处于明显的领先水平。功率在 2kW 左右的 LD 驱动电源相关产品, 有美国艾赛斯公司生产的额定输出 20V/125A, 型号 PCO-6131 的 LD 驱动电源; 德国 Lumina Power 公司研发的型号 LDY-2500-XX-YY 的额定输出 2.5kW, 最大输出电流 150A 的 LD 驱动电源。由于电源采用高频开关型变换器结构, 因

作者简介: 王志强 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光电领域电能变换与控制技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 293313203@qq.com

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-05-16

此电能转换效率较高,对负载电压自适应能力强。国内对 LD 驱动电源的研究起步较晚,现今发展水平与国外仍有较大差距。现有西安炬光科技有限公司生产的额定输出 24V/100A,型号 FL-DLD06-24-100-CW 的 LD 驱动电源;天津鼎曦光学科技有限公司研发的额定输出 30V/100A,型号 CLP-SP-30V100A-12 的 LD 驱动电源。由于电源后级采用串联反馈式线性变换电流源结构,导致电源对负载电压的自适应能力较差,后级变换器效率较低难以突破 90%,电源整体效率偏低。

为克服上述后级串联反馈式线性变换电流源的诸多缺陷,作者基于两相两重斩波变换技术,研发出一种性能优异的开关型变换电流源。该电流源结构简单,采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)技术,电能转换效率高;对负载电压自适应能力强;输出电流动态响应速度快,能很好地满足激光加工要求。

1 电源整体设计及原理分析

1.1 主电路结构

基于两相两重斩波变换技术的半导体激光器用 2kW 电源,该电源(power supply, PS)电路结构如图 1 所示。主电路由两级功率变换环节 PS₁ 和 PS₂ 串联组成。其中前级 PS₁ 为高频隔离式开关型交流/直流(alternating-current/direct-current, AC/DC)变换器,具有恒压输出特性。后级 PS₂(图 1 中虚线框所示)为两相两重斩波变换电流源,用于驱动 LD 模块。

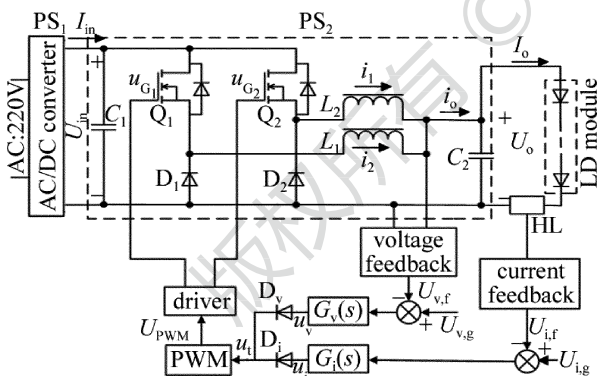


Fig. 1 Schematic diagram of 2kW laser diode driver

1.2 两相两重斩波变换器工作原理分析

两相两重斩波变换电流源实质上是由两路降压式开关型变换器组成^[11],其输出端并联后向负载供电,参见图 1 中的 PS₂,其中一路由开关器件 Q₁、续流二极管 D₁、储能电感 L₁ 组成,另一路则由 Q₂、D₂ 和 L₂ 组成,且两路器件参量完全一致。Q₁ 和 Q₂, D₁ 和 D₂ 皆选用低耐压大电流容量的功率 MOSFET,其中 D₁, D₂ 是利用 MOSFET 管内的体二极管作续流二极管,以便实现高频率开关和大电流输出。采用高频 PWM 开关

控制,在每个开关周期 T 内, Q₁ 与 Q₂ 交错导通且占空比同为 D,通过调节 D 来改变电路的变压比 U_o/U_{in},以此调控负载电流 I_o。其中占空比 D 是指单管的导通时间与整个开关周期 T 的比值,如图 2 所示。

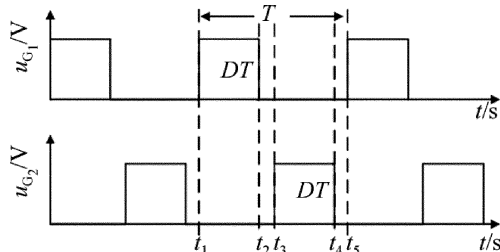


Fig. 2 Driving waveforms of Q₁ and Q₂

前半周期的 [t₁, t₂] 时段为 Q₁ 导通时间 T_{on,1} = D × T,期间加在 L₁ 两端电压为 U_{in} - U_o,使电感电流 i₁ 线性增加,同时向负载 LD 模块供电,电流 i₁ 的变化率 Δi₁⁺/Δt 为:

$$\frac{\Delta i_1^+}{\Delta t} = \frac{U_{in} - U_o}{L_1} \quad (1)$$

[t₂, t₅] 时段为 Q₁ 截止时间 T_{off,1} = (1 - D) × T,此时加在 L₁ 两端电压为 -U_o,i₁ 经二极管 D₁ 续流,将 L₁ 存储的磁能转换成电能向负载供电,电流 i₁ 线性减小,i₁ 的变化率 Δi₁⁻/Δt 为:

$$\frac{\Delta i_1^-}{\Delta t} = -\frac{U_o}{L_1} \quad (2)$$

在整个前半周期 [t₁, t₃], Q₂ 均处于关断状态,电感电流 i₂ 经 D₂ 续流,向负载供电。

Q₁ 和 Q₂ 在每个开关周期按 180° 错导通且导通时间均为 DT。稳态时,在一个开关周期 T 内,对电感 L₁ 或 L₂,由伏秒平衡^[12]原理可以得到:

$$\int_0^{DT} (U_{in} - U_o) dt = \int_{DT}^T U_o dt \quad (3)$$

由于输出电容 C₂ 取值足够大,且开关频率较高,故单个周期内 U_o 可认为恒定不变,则由(3)式可得:

$$U_o = D \times U_{in} \quad (4)$$

考虑到 Q₁, Q₂ 交错导通存在死区时间,最大占空比 D_{max} < 1/2,故根据(4)式有 U_o < 1/2 U_{in},即要求输入电压 U_{in} 高于 2 倍的输出电压 U_o。同理也可得到流过电感 L₂ 的电流 i₂ 的变化情况。电流 i₁, i₂ 及总电流 i_o 的波形如图 3 所示。

由图 3 可见,两电感电流 i₁, i₂ 波形完全相同,仅在时间上互差 180°,且总电流 i_o = i₁ + i₂,i_o 经输出电容 C₂ 滤波后,流向负载 LD 模块的总平均电流等于两路电感的平均电流之和,即 I_o = I₁ + I₂,且 I₁ = I₂。总电流 i_o 的脉动频率较电感电流 i₁, i₂ 的脉动频率提高 1 倍,变为 2/T,脉动幅值却大大减小。同时滤波电容

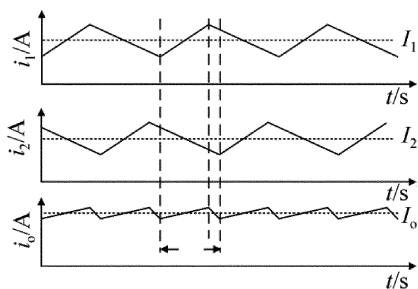


Fig. 3 Inductor current and total current waveforms

C_2 采用等效串联电阻较小的聚丙烯金属膜电容,在高频开关状态下,使输出纹波电流更小,电路输出更加稳定。

在同等输出条件下,两相两重斩波变换电路中的储能电感 L_1, L_2 及主电路 MOSFET 承受的电流比单路降压变换电路小,降低了单个 MOSFET 的导通损耗,减少了储能电感 L_1, L_2 和滤波电容 C_2 的值,同时提高输入电压 U_{in} ,大大提升了电感 L_1 和 L_2 中电流的上升变化率 $(U_{in} - U_o)/L$,使电路在启动时可以快速地给负载供电,从而提高电路的动态响应速度^[13]。

1.3 控制电路工作原理分析

控制电路中(如图 1 所示), $U_{v,g}$ 为电源输出电压的给定信号, $U_{i,g}$ 为输出电流的给定信号,其值大小可根据选定的 LD 模块的规格来分别整定; $U_{v,r}$ 为输出电压的反馈取样信号, $U_{i,r}$ 为输出电流的反馈取样信号。电压反馈环路和电流反馈环路的输出经二极管 D_v 和 D_i 并行连接,由电压比例-积分调节器 $G_v(s)$ 的输出 u_v 和电流比例-积分调节器 $G_i(s)$ 的输出 u_i 二者中电压较高者调控开关管驱动信号的脉宽,从而实现恒流限压的矩形输出特性^[14],控制电路采用比例-积分调节方式,电路拓扑结构具体参见参考文献[14]中的图 4,这里不再赘述。

电源给 LD 模块供电时,为得到恒流输出特性,可通过整定输出电压的给定值 $U_{v,g}$,使对应的限定电压略高于 LD 模块额定工作时的电压,此时电压比例-积分调节器 $G_v(s)$ 仅在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 $U_{i,r} = 0$ 而 $U_{i,g} > 0$,经电流比例-积分调节器 $G_i(s)$ 的反向比例-积分调节使输出 u_i 为负饱和值,二极管 D_i 截止而 D_v 导通, $u_i = u_v$,电流调节器 $G_i(s)$ 退出,仅由电压调节器 $G_v(s)$ 单独调控,电源在电压负反馈作用下输出呈限压特性。电源带负载后,因输出电压反馈取样信号 $U_{v,r}$ 始终小于电压给定信号 $U_{v,g}$,经电压比例-积分调节器 $G_v(s)$ 的反相比例-积分调节使输出 u_v 为负饱和值,二极管 D_v 截止而 D_i 导通, $u_i = u_i$,电压比例-积分调节器 $G_v(s)$ 退出,仅由电流比例-积分调节器 $G_i(s)$

单独调控驱动信号 U_{PWM} 的脉宽,电源在电流负反馈作用下呈恒流源输出特性^[12]。

2 电源特性测试与分析

本文中选用的 PS_1 为额定输出 48V/50A 的隔离式交流/直流变换器。按图 1 所示电路结构,与 PS_2 构成了 2kW 额定输出 20V/100A 的 LD 驱动恒流电源。外接可调电阻(型号 ZB120-095,阻值范围为 $0\Omega \sim 18\Omega$) R_0 作为负载,对电源的静态输出特性和后级电感均流特性分别进行测试,测试用示波器型号为泰克 MDO4054-3 混合域示波器,电流探头型号为泰克 TCP0150(量程 25A/150A,30MHz)、泰克 TCP0030(量程 30A,120MHz),测试环境为室温。

2.1 电源静态输出特性

将输出电压上限值 $U_{o,h}$ 和输出电流上限值 $I_{o,h}$ 分别设为 18V 和 50A。改变负载电阻 R_0 的阻值(非等阻值变化),测得 1 组电源静态输出特性数据,绘制成伏安特性曲线,如图 4 所示。

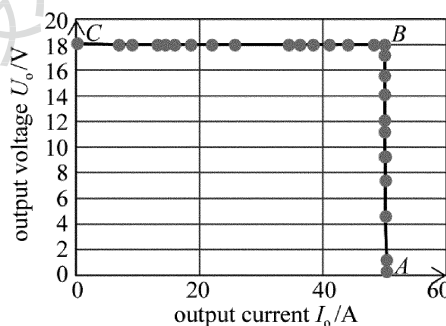


Fig. 4 V-I curve

由图 4 可知:(1)当负载 $R_0 = 0.36\Omega$ 时,对应输出特性曲线的转折点 B;(2)当 $R_0 > 0.36\Omega$ 时,电源工作在 BC 段,输出电流 I_o 随负载 R_0 阻值增加而逐渐减小,输出保持恒定电压 $U_o = 18V$,电源输出呈限压特性;(3)当 $R_0 < 0.36\Omega$ 时,电源工作在 AB 段,输出电压 U_o 随负载 R_0 阻值减小而逐渐减小,输出保持恒定电流 $I_o = 50A$,电源输出呈恒流特性,这也正是 LD 驱动电源的正常工作区域。

因此,无论是 LD 模块内部发生局部短路使端电压降低,还是电源外接低电压的 LD 模块负载,电源均能保证输出恒定的负载电流而不损坏内部的功率器件。可见,电源对负载电压自适应能力强,具有较好的矩形输出特性。

2.2 后级电感电流波形

设置电源输出电流 $I_o = 59.8A$,电源恒流正常工作时,使用电流探头(TCP0030,量程 30A)直接测量流过电感 L_1 和 L_2 的电流 i_1 和 i_2 。测得电感电流 i_1 和 i_2

波形如图 5 所示。图 5 表明,流过电感 L_1 和 L_2 的电流平均值相等,与第 1.2 节中的理论分析一致,说明 PS₂ 中两路降压式开关型变换器的均流效果好。

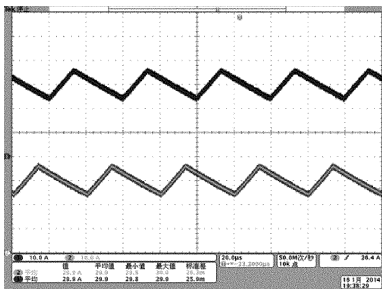


Fig. 5 Inductor current waveform of i_1 and i_2

3 高功率激光系统联机数据测试

将德国 DILAS 公司生产的激光二极管模块(如图 6 所示,型号 E15.4Y-940.3-960C-VH8.1)作为电源负载。当流过 LD 模块的电流为 100A 时,其导通压降约为 18V。测试用激光功率计为 Primes PowerMonitor 大功率激光功率计,其它测试仪器与第 2 节中相同。

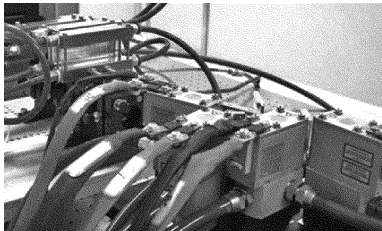


Fig. 6 Diode laser module

3.1 高功率激光系统静态特性

按照第 1.3 节中所述,设置输出电压的限压值 $U_{o,h} = 20V$,调节电源在恒流模式下工作。

(1)将负载开路,测量驱动电源(如图 7 所示)输出端电压 U_o, U_i 保持在限压值 20V。

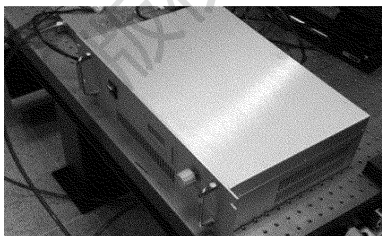


Fig. 7 Laser diode driver

(2)接入负载,将输出电流从 0A 连续调节到 100A,激光系统工作正常;当 $I_o \approx 14A$ 时,LD 模块开始出光;当 $I_o = 100A$ 时,实现了 LD 模块 1110W 的连续光功率输出。

(3)将电源输出端短路,设置输出电流 $I_o = 100A$,短路状态下电源维持恒流 100A 输出不变。

由此可见,电源表现出良好的静态输出特性。

3.2 输出电流的动态响应特性

负载情况下,设置输出电流的给定信号 $U_{i,g}$ 为方波(频率 50Hz、幅值 0V ~ 10V),如图 8 上方示波器 1 通道所示, $U_{i,g}$ 幅值 0V ~ 10V 线性对应输出电流 0A ~ 100A 变化。使用电流探头(TCPO150)直接测量电源输出电流 I_o 的波形,如图 8 下方示波器 2 通道所示。

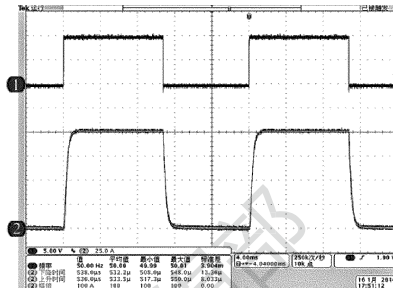


Fig. 8 Square-wave response of output current

由图 8 可见,输出电流 0A ~ 100A 的上升、下降时间仅为 0.5ms。与同类传统线性变换电流源 1ms 的动态响应时间相比较,略有提升。同时克服了传统开关型电源输出响应速度慢的缺点,可满足激光加工过程中快速地开光和关光要求。

3.3 输出电流纹波测量

负载情况下,调节输出电流 $I_o = 100A$,静态时测试电源输出纹波电流的波形如图 9 所示。其中示波器上方 1 通道为输出纹波电流波形,下方 2 通道为静态输出电流幅值。

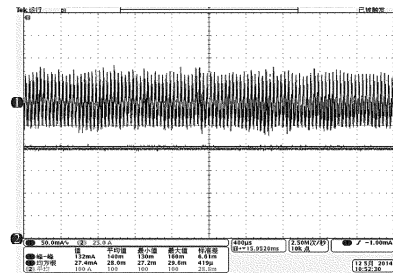


Fig. 9 Current ripple

由图 9 可见,在输出满载电流 $I_o = 100A$ 时,纹波电流的峰峰值 $I_{RPP} \approx 140mA$,其均方根值 $I_{RMS} \approx 28mA$,电流纹波系数为 0.028%,远小于满载输出电流的 0.5%,满足激光加工要求。

3.4 后级两相两重斩波变换电流源效率

负载情况下,调节输出电流 I_o 从 10A 逐步增加到 100A,步长 10A,测试数据经计算整理后,可得后级两相两重斩波变换电流源 PS₂ 的电转换效率 η 随输出功率 P 的变化曲线,如图 10 所示。

图 10 表明,在额定输出范围内, η 保持在 93% 以上,证明两相两重斩波变换电流源具有较高的电转换效率,克服了传统的串联反馈式线性变换电流源效

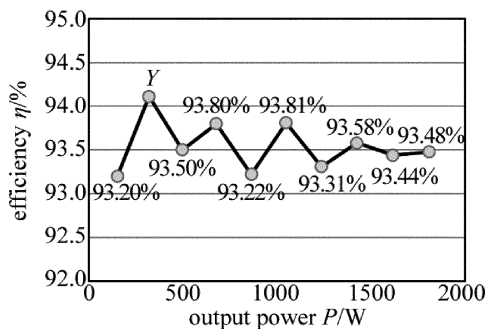


Fig. 10 Power-efficiency curve ($P-\eta$ curve)

率低的缺点。若能针对续流二极管 D_1 和 D_2 的功耗,合理运用同步整流技术,可进一步提升低电压大电流类电流源的电能转换效率。

4 结 论

采用两相两重斩波电路作为电源主电路后级变换器的拓扑结构,再结合电压、电流闭环调节电路,构成了性能优异的半导体激光器用 2kW 电源。

(1) 电源后级采用开关型变换电流源,与传统线性变换电流源相比,电路结构简单、成本低廉,电能转换效率可高达 93%。

(2) 电源具有较为理想的恒流限压矩形输出特性,对负载电压自适应能力强,提高了电源运行的安全性。

(3) 两相两重斩波变换器中的双路降压变换电路交错导通工作,加快了输出电流的动态响应速度,使电源输出满载电流的方波响应时间降至 0.5ms 左右,满足工业加工过程中快速地开光和关光要求,在激光加工领域具有很强的实用价值。

参 考 文 献

[1] LU K, LIU B Y, BAI Y L, *et al.* High power laser diode drive power

supply [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (10) :2680-2684 (in Chinese).

[2] DENG J, DAN J D, ZHANG N, *et al.* Research and design of high-power semiconductor laser diode driver [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(5) :319-320 (in Chinese).

[3] ZHANG Y C, SUN L J, FU S Y, *et al.* Research on adjustable high power high pulse-repetition-frequency compact LD power supply [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6) : 731-734 (in Chinese)

[4] WANG L J, PENG H Y, GU Y Y, *et al.* Applications of laser diode on processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(s1) : 310-313 (in Chinese).

[5] GUO L, WANG F, ZHANG Q M, *et al.* Research of techniques of laser-MIG hybrid welding of 304 stainless steel [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6) :781-785 (in Chinese)

[6] CUI L, ZHANG Y C, HE D Y, *et al.* Research progress of high power fiber laser welding [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2) :154-159 (in Chinese).

[7] HUA Y Q, XIAO T, XUE Q, *et al.* Experimental study about laser cutting of carbon fiber reinforced polymer [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5) :565-570 (in Chinese)

[8] YAN C, LI L Y, LI J, *et al.* Review of surface quality of study on laser sheets cutting [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3) :270-274 (in Chinese).

[9] DU L H, ZHU L Q, ZHANG M M, *et al.* A high-stable laser diode power supply system for pumping fiber laser [J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 39(12) : 84-87 (in Chinese).

[10] YUAN Z Q, ZHOU L Y, LIU R, *et al.* Semiconductor laser power based on MAX1968 [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 13 (19) : 180-183 (in Chinese).

[11] CHEN J, KANG Y. *Power electronics* [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2011: 80-81 (in Chinese).

[12] MA X M, CHEN X, WANG Z, *et al.* A new flexible solid-state laser power supply based on CUK converter [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2) :116-118 (in Chinese).

[13] WANG R, YANG Y G, LI N. Research on essential safety for interleaving buck converter [J]. *Power Electronics*, 2011, 45(7) : 117-120 (in Chinese).

[14] MA X 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).