

大功率红外激光器高效驱动电源设计

吕 焱^{1,2}, 高军燕², 蒋艺杰¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川 成都 610500)

摘 要:根据大功率红外激光器功率-电压-电流(Power-Voltage-Intensity of current, PVI)曲线的特点,提出一种双环控制结构的恒流驱动电源设计方案。硬件电流控制环路采用深度电流负反馈电路实现了高精度恒流驱动;数字式控制环路根据激光器工作电流实时调节DCDC输出电压,使得恒流电路中MOSFET稳态压降保持恒定,从而在保证电流控制精度的同时显著提升了系统效率。本文首先分析了激光器PVI曲线的特点,提出了系统总体设计思路,然后重点阐述了输出可调的DCDC电源模块和硬件恒流驱动电路的设计方法,并详细介绍通讯软件和DCDC电压控制算法的实现过程,最后给出了DCDC电源效率和电流控制的测试结果,通过与传统方案的对比测试验证了本设计在系统效率上的优势。

关键词:红外激光器;恒流电路;过流保护;Pelco_D协议

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.03.008

Design of efficient power supply for high power infrared laser diode

LÜ Yi^{1,2}, GAO Jun-yan², JIANG Yi-jie¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Computer Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: According to the Power-Voltage-Intensity of current (PVI) characteristic of high power infrared laser diode, one constant-current power scheme with two control loops is proposed. The hardware-based control loop performs high-precision current regulation; the software-based digital control loop is used to adjust the DCDC module output voltage according to the laser's working current, and thus maintains the steady-state voltage drop of MOSFET in constant-current circuit almost constant. This type of structure effectively reduces the power consumption, and meanwhile holds high current accuracy. Firstly, the PVI characteristic is analyzed and the system structure is proposed. Then the design principle of the constant-current driver circuit and high-efficiency DCDC power supply circuit with adjustable output voltage are designed. The implement of communication protocol and the control algorithm of DCDC output voltage are discussed in detail. Finally, DCDC efficiency and laser current control effect are given, and the comparison test result further reveals the efficiency advantage of the proposed design scheme.

Key words: infrared laser diode; constant-current circuit; over current protection; Pelco_D protocol

1 引 言

大功率红外激光器是红外夜视系统的核心部

件,实现远距离红外照明光源,配合红外摄像机或微光夜视系统可以用于远距离夜视监控,其照明距离

基金项目:广东省科技计划项目(No. 2017A010101004)资助。

作者简介:吕 焱(1981-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向包括嵌入式与物联网工程,智能控制技术,可靠性建模与维修。E-mail:lyi913001@163.com

收稿日期:2018-08-13;修订日期:2018-09-24

可达数公里,目前在高铁、森林防护和远距离夜视监控等领域应用日益广泛。

大功率激光器的驱动电源为恒流源结构。很多学者从不同的应用需求对恒流电路做了大量的研究与实践工作。文献[1]中采用了基于电流模式同步降压开关控制芯片 LTC1625 和电流检测放大芯片 LT1620 的恒流电源方案实现了额定电流 12 A 的激光器电源设计。文献[2]~[5]采用分离器件方案,根据电流负反馈设计了恒流驱动电路。集成 IC 相对于分离器件方案具有设计简单的优势,但是成本较高且缺乏灵活性。本设计采用后者,并针对电流调节能力进行了优化,减小了电流纹波。文献[6]和[7]采用硬件恒流电路结构,但电流设定采用开环方式,不能通过单片机消除激光器电流的稳态误差和温度漂移。文献[8]中激光器工作电流采用高稳定性基准电压来设定,无法由程序动态调节。大功率激光器驱动电源能量密度较高,提高电源变换效率一方面可以降低系统功耗需求,另一方面可以减少电源发热量,从而降低散热成本。激光器电源效率由 DCDC 电源和恒流电路共同决定。恒流电路的发热主要来自其调整管,在工作电流恒定的情况下,其发热量由调整管压降决定。文献[9]和[10]中采用 YIHONGTAI 公司的 NR 系列隔离型 DCDC 模块,此类电源模块效率为 87%,输入电压范围 18~36 V,只能提供几种典型电压输出:12 V、15 V、24 V 和 48 V,如果采用此类电源模块,将造成恒流电路中调整管压降大,功耗高的弊端。以 12 V 输出为例,在激光器满载工作情况下,恒流电路效率只有 67%,此时调整管发热将非常严重,整体效率低下,散热成本也会随之增加。文献[11]中采用了硬件恒流电路和数字调节的双控制环路结构提高了系统的灵活性,但数字控制环路主要用于激光器电流的微调,未涉及到系统效率优化。

本系统设计了效率高达 92% 且输出电压可调的 DCDC 模块,单片机根据激光器不同的工作状态,调节 DCDC 模块输出电压,进而降低恒流电路中调整管的功耗,在不影响恒流电路的电流调节能力的前提下有效提升了系统效率。

2 大功率红外激光器光电特性

本系统选用红外激光器功率-电压-电流(Power-Voltage-Intensity of current, PVI)特性如图 1

所示,曲线①为伏安特性曲线,曲线②为其输出光功率曲线。其最大输出光功率 30 W,工作电压范围为 5.9~8.2 V,最大工作电流 8 A,启动电流为 1.42 A。输出光功率随着工作电流的增加而线性增加,电流-功率斜率约为 4.54 W/A,通过调节激光器的工作电流可以改变其输出光功率,其关系为 $P_{out} = 4.54 \times (I - 1.42)$,本设计中将按照此关系通过调节输出电流实现输出光功率的控制。该激光器工作温度范围为 -20~65℃,最大电光转换效率为 55%,满载工作时发热量较大,需要散热电路,在室外环境温度低于 -2℃ 时,激光器需要预热方可以启动,本设计中采用基于半导体制冷片的加热、制冷电路实现了激光器的温度控制。

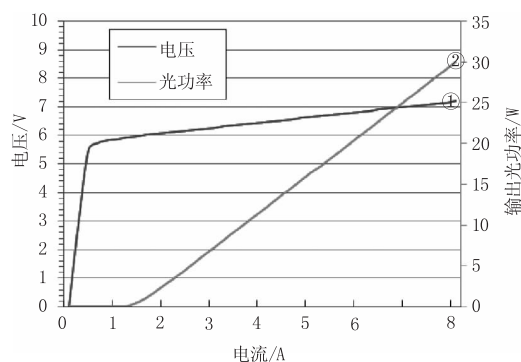


图 1 红外激光器光 PVI 电特性曲线

Fig. 1 PVI characteristic of infrared laser diode

3 红外激光器电源设计

红外激光器电源系统结构如图 2 所示,共包括三部分,分别为:(1)DCDC 模块;(2)恒流电路;(3)电源控制单元。DCDC 模块将输入电源变换为合适激光器工作的电压,减小恒流电路中 MOS 管的压降;恒流电路采用电流负反馈实现了对激光器工作电流的精确控制。电源控制单元由 STM32F100C8T6 单片机和 485 通讯电路组成,与控制主机之间采用 Pelco_D 协议,根据主机的控制命令实现激光器的开关控制,亮度调节等功能。如图 2 所示,单片机通过 ADC1 采集恒流电路 MOS 管源极电压,通过 ADC2 可得到实际工作电流和 MOS 管漏极电压,通过 DAC2 输出改变横流电路的工作电流设定,从而改变激光器光强。此外为了进一步优化稳态工作效率,单片机还将通过 DAC1 实现 DCDC 模块的电压输出的调节,从而降低稳态工作过程中恒流电路中 MOSFET 的功耗,改善整体工作效率。

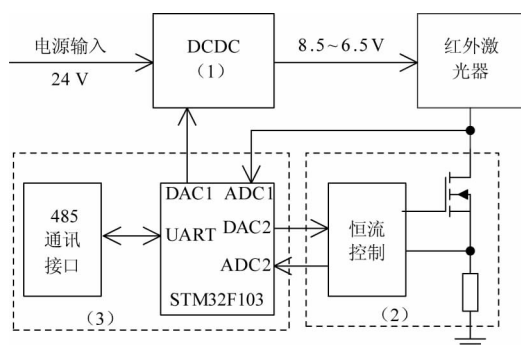


图2 系统结构图

Fig.2 System structure diagram

3.1 输出可调式DCDC设计

夜视云台为红外激光器提供的电源为直流24V,由图1激光器光电特性可知,其正常工作电源范围是5.8~7.2 V。本系统中设计了基于同步整流BUCK电源芯片LM25117的DCDC模块,将24 V输入电压变换到激光器工作电压范围内,电路原理如图3所示。当LM25117上电后,通过其芯片内部的10 μ A的恒流源对SS引脚的外接电容充电,伴随着该电容电压的升高,误差放大器移相角加大,输出电压逐渐升高,当电容电压达到0.8 V时输出达到稳态额定电压,软启动过程结束。图3中的软启动电容C11为0.1 μ F,软启动时间8 ms,满足红外激光器对上电过程的要求。R5和R6构成输入欠压保护功能,当 V_{UVLO} 电压低于1.25 V,LM25117进入待机状态,本设计中R5和R6分别为62 k Ω 和5.1 k Ω ,输入欠压保护阈值为15 V。LM25117工作在电流控制模式,但并未从高边MOS管直接检测电流,而是通过电流检测电阻R3和斜坡补偿网络C19与R13来重构电感电流。R3选用8 m Ω 的合金电阻,R4和C5为电流采样滤波器,避免了输出级高频噪声干扰电流采样回路。

本设计通过降低MOS管Q1、Q2和功率电感L1等主要功率元件的发热对电路工作效率进行了优化。MOS管的通态功耗有其导通电阻决定,开关损耗则主要受MOS管开关延迟时间影响,本设计中采用了英飞凌的BSC028N06LS3,导通电阻2.8 m Ω ,耐压60 V,导通延迟时间19 ns,关断延迟77 ns,且其封装形式相对于传统D2PAK和SOP8热阻表现更为优秀。电感L1采用了线艺公司SER2918-103大电流一体成型电感,直流电阻仅2.86 m Ω ,最大饱和电流28 A。此外为了实现单片机对DCDC输出电压的调节,在FB引脚、DAC1和 V_{out} 之间设计了由

R8、R10和R16构成的电阻网络,单片机通过其DAC1调节LM25117的FB管脚电压,从而改变其输出电压 V_{out} ,FB管脚的调节阈值电压为0.8 V,根据弥尔曼定理可得 V_{out} 与单片机DAC1输出的关系为:

$$0.8 = \frac{\frac{V_{DAC}}{10} + \frac{V_{out}}{9.1}}{\frac{1}{10} + \frac{1}{9} + \frac{1}{1.1}}$$

化简得:

$$V_{out} = 8.72 - 0.9 \times 3.3 \times \frac{DAC1_value}{4096} \quad (1)$$

其中, V_{DAC} 表示单片机DAC1输出的模拟电压;DAC1_value表示其对应的数字量。由公式(1)可知,DCDC输出电压范围是5.75~8.72 V,最小调节精度为0.7 mV,根据图1中的PVI特性可知,DCDC输出调节能力完全满足该激光器的需求。

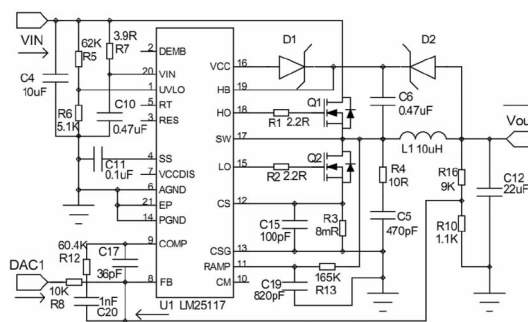


图3 DCDC电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of DCDC circuit

3.2 恒流电路设计

激光器横流驱动电路如图4所示,其中Q3为恒流调整管,本设计中采用了IRFP064,额定电流110 A,热阻为40 $^{\circ}$ C/W。电阻R20~R23为检流电阻,采用了低温漂的合金电阻,阻值10 m Ω ,2510封装,温漂60 ppm,并采用了如图所示的组合方式,降低了温升并减小了阻值误差的影响。U8-C、R31、R33和R34为10.1倍反馈放大电路,U8-C的输出端与单片机ADC2相连,实现单片机对工作电流的采集,此外U8-C输出电压进入误差放大器U8-D,U8-D、R24、C28构成了比例积分电路,其参考信号来自单片机DAC2输出。R19和C27构成相位补偿电路,在控制回路中引入一个零点,补偿MOS管GS极间电容产生的零点,防止电流动态调节中发生震荡。本电路通过调节Q3的门极电压实现对

激光器电流的控制。该电流负反馈电路的稳态关系为:

$$V_{DAC2} = \frac{R_{31} + R_{34}}{R_{31}} \times R_{\text{sensor}} \times i = 0.1 \times i \quad (2)$$

其中, V_{DAC2} 为单片机输出的恒流参考信号; i 为激光器电流。U8-B、C31、R32、Q6 构成了激光器过流硬件保护功能,其保护阈值为 8.5 A,当工作电流高于该阈值时 U8-B 输出高电平, Q6 导通,迅速拉低 Q3 的门极电压,关闭 MOSFET,单片机若采集到运放 U8-B 的输出为高电平便表明发生过流故障,并将通过 Pelco_D 通讯接口将该故障信息及时上报云平台主机。

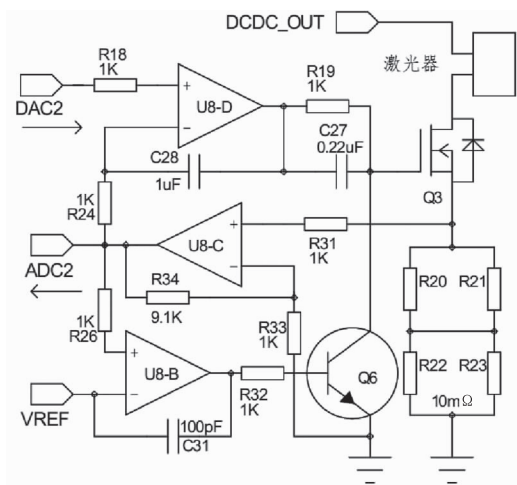


图 4 恒流控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of constant-current circuit

4 软件设计

4.1 通讯协议设计

Pelco_D 协议由派尔高公司首次提出,主要应用于视频监控领域中控制主机和监控设备间通讯。本设计中,控制主机通过 Pelco_D 协议实现对激光器开关、工作电流调节和激光器变焦等控制功能,同时控制器也可以向控制主机上报激光器状态和故障代码。如图 2 所示,本系统物理层采用 RS485 总线接口,SN65HVD3082 完成 RS485 与 TTL 电平之间的转换,单片机通过 UART 中断完成数据的收发。该协议数据帧包括了同步字段、地址字段、控制命令、数据和检验字段。数据帧解析采用了状态机设计方法,状态机如图 5 所示,空闲状态收到同步字段后进入地址状态,地址匹配后依次接收命令和数据字段,校验通过后,置位接收标志位 RcvFlag,主程序中完成对该命令的解析和执行。数据帧的发送则采用队列方式,主程序中

将不包括同步字段的回应帧写入队列,USART_DR 中写入 0xFF 启动发送,并在发送中断服务程序中将队列内容发送完毕。

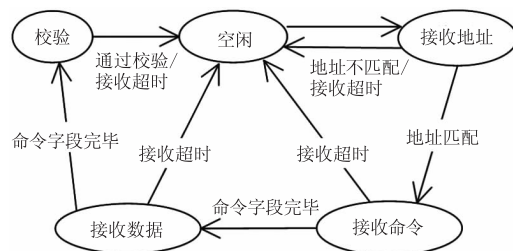


图 5 Pelco_D 协议接收状态机

Fig. 5 State machine of receiving process of Pelco_D protocol

4.2 系统效率控制算法

由图 1 中激光器 PVI 特性可知:(1)激光器所需电压会随着工作电流线性增加;(2)在激光器整个电流范围内,其所需最小电压为 5.8 V,最大电压为 7.4 V。在本电路中,DCDC 输出电压等于 MOS 管 Q3 漏源极电压、激光器电压和检流电阻电压之和。其中激光器和检流电阻电压由其工作电流决定。若采用 DCDC 输出电压保持恒定的方案,为使激光器在整个电流范围内正常工作,并且考虑到激光器的个体特性差异,DCDC 输出电压不能低于 8 V。这种情况下,如果激光器电流设定为 4 A,则激光器电压约为 6.3 V, MOS 管 Q3 漏源极电压约为 1.7 V,功耗约为 6.8 W。可见,降低 MOS 管的功耗是提高恒流电路效率的主要途径。MOS 管的功耗计算公式为:

$$P_{\text{mos}} = I_{\text{laser}} (V_{\text{DCDC}} - V_{\text{laser}} - I_{\text{laser}} \times R_{\text{sensor}}) \quad (3)$$

其中, I_{laser} 为激光器工作电流; V_{DCDC} 为 DCDC 输出电压值; V_{laser} 是激光器工作电压; R_{sensor} 为采样电阻阻值。由此可见降低 V_{DCDC} 是减小 MOS 管功耗的有效途径。实际测试得到:当 MOS 管漏源极压降低于 0.3 V 后, MOS 管接近饱和区,恒流电路开环增益降低,对电流控制能力变差,恒流精度和稳定度都受到影响,当漏源极电压高于 0.38 V, MOS 管恢复电流控制能力。本设计具体采用的方法是:硬件恒流电路实现激光器电流动态调节过程中的恒流驱动,调节完毕后采用软件 PID 方法控制 DCDC 输出电压,使得在稳态工作情况下恒流电路中的 MOS 管 Q3 进入接近饱和导通状态,从而降低其稳态工作功耗,提升系统效率。

本设计算法流程图如图 6 所示,当收到电流调

节命令后,根据公式(4)计算得到 DCDC 输出电压初始值,

$$V_{\text{DCDC}}(I_{\text{set}}) = V_{\text{laser}}(I_{\text{set}}) + V_{\text{ods}} + I_{\text{set}} \times R_{\text{sensor}} + V_0 \quad (4)$$

其中, I_{set} 为来自控制主机的激光器工作电流设定; $V_{\text{laser}}(I_{\text{set}})$ 表示由 PVI 特性计算的激光器电压; V_{ods} 为 MOS 管漏极压降初始设定值; V_0 用于补偿激光器 PVI 特性的个体差异,本设计中取 0.5 V。为保证激光器电流动态调节过程中恒流电路对其电流的控制,本设计中 V_{ods} 取 1 V。然后根据公式(2)和激光器电流变化速度控制 DAC2 输出模拟电压,调节激光器电流至 I_{set} 。最后启动 PI 控制器,直至调节 V_{ds} 到 0.4 V,为防止出现超调,本设计中微分调节未使用, K_p , K_i 分别取 2.3 和 0.8,控制周期 10 ms, V_{ds} 死区范围为 0.38 ~ 0.45 V。

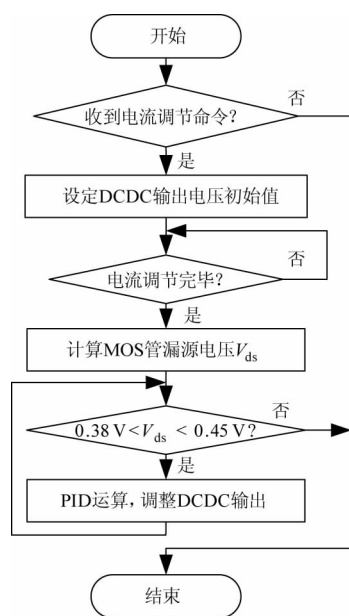


图6 激光器电流调节流程图

Fig. 6 Flow chart of laser current control

5 系统测试

5.1 DCDC 电源效率测试

DCDC 模块效率测试结果如表 1 所示。在激光器电流工作区间内平均效率大于 92%, 工作温升小于 56℃。进一步测试发现,选用导通电阻更小、开关速度更快的 MOS 管,选用导通电阻更低的功率电感,还可以进一步提高电源转换效率,但是随之会带来成本上升和体积变大的不足,对效率要求更为严苛的设计可以依照此方法对电路进一步优化。

表 1 DCDC 工作效率测试

Tab. 1 DCDC productivity testing

输入电压 /V	输入电流 /A	输出电压 /V	输出电流 /A	效率	温升 /℃
24	0.45	8.13	1.36	0.921	15
24	0.85	8.10	3.02	0.928	22
24	1.63 8.08	5.00A	0.936	28	
24	2.4	8.05	6.65	0.930	40
24	3.2	8.02	8.87	0.927	56

5.2 激光器电流控制功能测试

激光器电流控制测试结果如图 7 所示,曲线①为电流波形,曲线②为 V_{ds} 信号。本测试中上位机分别在 $t=0$ s, 2 s 和 4 s 时刻发送调光命令,将激光器电流分别设定为 1 A, 3 A 和 7 A,收到电流设定命令后,根据公式(2)设定 DCDC 输出电压,然后按照预先设定的电流变化速率调节激光器电流到设定值。在激光器电流动态调节过程中,由 PVI 特性可知,激光器电压逐渐增加,DCDC 输出电压不变,因而 V_{ds} 呈线性下降特性。当电流动态调节结束后,单片机通过 PID 算法调节 DCDC 输出电压,进而将 V_{ds} 稳态工作电压控制在 0.38 ~ 0.45 V,使 MOS 管在能够保证其电流控制能力的同时功耗降至最低。

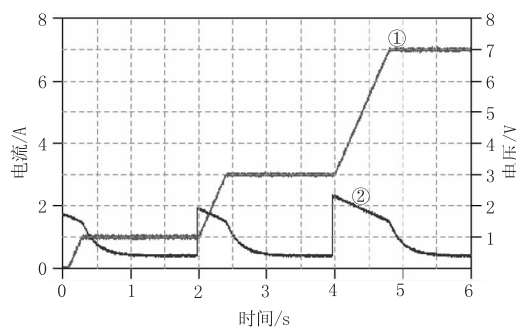


图7 激光器电流控制测试

Fig. 7 Laser current control test

5.3 系统综合效率测试

在激光器发光效率一定的情况下,系统效率由 DCDC 电源和恒流电路效率共同决定。恒流电路主要的功率损耗来自于电路图 4 中 MOS 管 Q3,其工作电流由激光器决定。本设计中通过 PID 调节 DCDC 输出电压,实现了在激光器的不同工作电流下, Q4 漏源极压降恒定为 0.4 V,实现了优化系统效率的效果。通过实测,各种工作电流下激光器电源在系统效率约 88%,与两种 DCDC 固定电压输出的设计方案进行对比测试,结果如图 8 所示,相对于采用 DCDC 固定电压的设计方案,系统效率在整个工作电流范围内得到了明显提升。

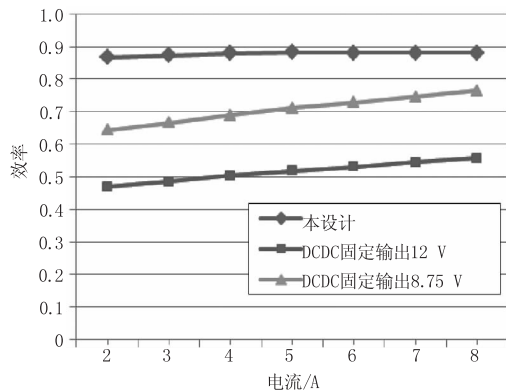


图8 系统效率对比测试

Fig.8 Comparison test of system efficiency

6 总结

本文设计了一种采用双环路控制结构的激光器驱动电源。采用硬件恒流电路实现激光器电流的动态调节,通过软件 PID 方法调节 DCDC 电源的输出电压,从而有效控制了恒流电路 MOS 管的稳态功耗,在证电流控制精度的同时显著提升了系统工作效率。实际测试证明,本设计方案电流控制的动态性能和精度均满足红外激光器工作要求,电源稳态运行效率大于 88%,与传统采用固定电压输出的 DCDC 的设计方案相比,系统效率得到明显提升。

参考文献:

- [1] ZHANG Ruifeng, KONG Linghang, LV Chengang. A kind of constant current source design for high-power semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 80 - 83. (in Chinese)
张瑞峰, 孔令杭, 吕辰刚. 大功率半导体激光器恒流源设计[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 80 - 83.
- [2] DONG Yang, CHEN Haiyan, CHEN Changyan, et al. Driving circuit design for low power 980 nm wavelength semiconductor laser[J]. Modern Electronic Technology, 2014, 37(13): 119 - 121. (in Chinese)
董阳, 陈海燕, 程昌彦, 等. 低功率 980nm 波长半导体激光器驱动电路设计[J]. 现代电子技术, 2014, 37(13): 119 - 121.
- [3] ZHANG Yueling, ZHOU Guanjun. LD driving power design for high power fiber laser pump source [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(2): 70 - 74. (in Chinese)
张悦玲, 周冠军. 大功率光纤激光器泵浦源 LD 驱动电源设计[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 70 - 74.
- [4] LI Dong, MA Jiaju, GENG Hongwei. Design of large current pulsed constant current source for semiconductor laser[J]. Technology of Measure and Control, 2012, 31(8): 5 - 8. (in Chinese)
- [5] LU Kai, LIU Baiyu, BAI Yonglin, et al. Driving power design for high-power semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(06): 2680 - 2684. (in Chinese)
卢凯, 刘百玉, 白永林, 等. 大功率半导体激光器驱动电源的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2680 - 2684.
- [6] CHEN Chen, HUANG Jianqiang, LV Mo, et al. High-precision nanosecond driving power for Infrared quantum cascade lasers [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 46(6): 738 - 742. (in Chinese)
陈晨, 黄渐强, 吕默, 等. 高精度纳秒级红外量子级联激光器驱动电源[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 738 - 742.
- [7] LUO Liang, HU Jiachen, WANG Canyuan, et al. Design of high-precision driving power and temperature control circuit for semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 200 - 204. (in Chinese)
罗亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 200 - 204.
- [8] HOU Qingzhi, XIONG Jijun, CAO Yanchang. Semiconductor laser source with high stability[J/OL]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(7): 86 - 89. (in Chinese)
侯庆志, 熊继军, 曹延昌. 高稳定度半导体激光器电源[J/OL]. 光电与控制, 2014, 21(7): 86 - 89.
- [9] DANG Jinming, ZHAI Bing, GAO Zongli, et al. Nanosecond driver for multiple pulse-modulated Infrared quantum cascade lasers [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2209 - 2216. (in Chinese)
党敬民, 翟冰, 高宗丽, 等. 纳秒级脉冲型群红外量子级联激光器驱动电源[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2209 - 2216.
- [10] CONG Menglong, LI Li, CUI Yansong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1629 - 1636. (in Chinese)
丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1629 - 1636.
- [11] LIU Pingying, DING Youlin. Design of high-precision driving power system for semiconductor laser[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32(8): 166 - 169. (in Chinese)
刘平英, 丁友林. 高精度半导体激光器驱动电源系统的设计[J]. 现代电子技术, 2009, 32(8): 166 - 169.