

大功率半导体激光器驱动电源及温控系统设计

张 龙¹, 陈建生^{1,2}, 高 静^{1,2}, 檀慧明¹, 武晓东¹

- (1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163;
2. 苏州国科医疗科技发展有限公司, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 为了解决大功率半导体激光器的输出波长和功率的稳定性问题, 设计了一套大功率激光器恒流驱动电源及温控系统。利用深度负反馈电路实现对激光器驱动电流的恒流控制, 采用硬件比例-积分(Proportional-Integral, PI)温控电路结合恒流驱动, 控制半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)的工作电流, 实现激光器工作温度的精确控制。所设计的驱动电源可实现输出电流 0~12.5 A 连续可调, 同时具有电流检测、过流保护、晶体管-晶体管逻辑(Transistor-Transistor Logic, TTL)信号调制等功能。所设计的温控系统的控制精度可达到 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时设定温度连续可调, 温度可实时监测。实验结果表明该设计能够保证稳定的电流输出和温度控制, 满足大功率激光器的使用要求。

关键词: 半导体激光器; 恒流驱动电源; 温控系统

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1005003

Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser

Zhang Long¹, Chen Jiansheng^{1,2}, Gao Jing^{1,2}, Tan Huiming¹, Wu Xiaodong¹

- (1. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215263, China;
2. Suzhou Guoke Medical Science & Technology Development Co., Ltd., Suzhou 215163, China)

Abstract: In order to solve the output wavelength and power stability of high power semiconductor laser, high power semiconductor laser constant current driver and temperature control system were designed. Deep negative feedback circuit was used to control the laser drive current, the analog Proportional-Integral (PI) circuit and constant current driver were adopted to control the working current of Thermoelectric Cooler (TEC), the laser working temperature can be kept accurately. The design can realize the linear adjustment of output current from 0~12.5 A, and has the function of current detection, over-current protection and Transistor-Transistor Logic (TTL) modulation. The control precision of the temperature control system can achieve $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperature can be adjusted continuously and can be monitored in real time. Experiment results show that the design can guarantee the output current and temperature control stably, which satisfies the requirement of high power semiconductor laser.

Key words: semiconductor laser; constant current driver; temperature control system

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-06-10

基金项目: 江苏省重点研发计划(BE2016090, BE2016005-2); 国家重点研发计划(2016YFB0402202)

作者简介: 张龙(1987-), 男, 博士生, 主要从事光学诊仪技术方面的研究。Email: zhanglong@sibet.ac.cn

导师简介: 武晓东(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 硕士, 主要从事激光技术及医疗光谱仪器方面的研究。Email: wuxd@sibet.ac.cn

0 引言

大功率半导体激光器具有波长范围广、效率高、寿命长等特点,在皮肤治疗、手术治疗肿瘤、光针灸等医学领域应用广泛,另外,大功率激光器在工业生产和军事国防等行业同样有着广泛的应用,如材料加工和激光测距等。大功率半导体激光器价格昂贵,其输出波长和功率与驱动电流、结温度有很大关系^[1-3],同时浪涌电流以及电网冲击等多种瞬态的电压或电流尖峰都很容易损坏激光器,缩短其使用寿命,因此对半导体激光器的驱动电源和温控系统有很高的要求^[4-5]。

目前市场上高档大功率半导体激光器驱动电源和温控系统主要由国外的 ILX Lightwave 公司、Analog Technologies Inc 公司、Wavelength 公司、Thorlabs 公司、Martek Laser 公司、Lumina Power 等公司垄断,产品价格高昂。国内在该领域的研究较少,具有代表性的生产厂商有上海技驰电子科技有限公司、深圳市兴博科技有限公司、西安炬光科技有限公司、武汉新特光电有限公司等,典型产品有上海技驰科技公司生产的型号为 J-CW5025 的大功率半导体激光器电源,输出电压自适应负载,输出电流 0~25 A,其体积较大,结构复杂,且只有恒流驱动功能。文中设计并制作了一款集成了恒流驱动与温度控制两个功能的大功率半导体激光器控制系统。该系统具有较高的驱动稳定度及温控能力,此外,该系统采用了模块化的设计思路,具有一定的普适性,可以通过微控制系统的的设计来适应其他不同输出参数的泵浦。

1 系统总体设计

系统总体设计方案如图 1 所示,主要包括恒流驱动、温度控制以及微处理器系统。恒流驱动系统主要包括模拟信号输入、信号调理、恒流单元、电流检测、限流保护、晶体管-晶体管逻辑 (Transistor-Transistor Logic, TTL) 信号输入、软件保护。温度控制系统包括温度测量、温度设置及比例-积分 (Proportional-Integral, PI) 控制、半导体制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 驱动。该设计采用 STM32 为微处理器,系统的供电电源根据半导体激

光器的伏安特性、工作电流、TEC 制冷量大小等参数综合考虑选择。

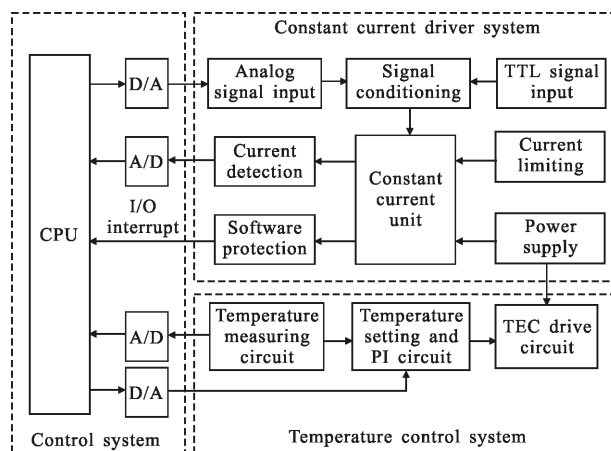


图 1 系统总体设计

Fig.1 Overall design of system

2 恒流驱动系统设计

恒流驱动系统的设计如图 2 所示,按功能可大致分为以下几个模块:模拟信号输入、信号调理、恒流单元、电流检测、限流保护、TTL 信号输入、软件保护、假负载。下面就各个模块的设计和工作原理做详细介绍。

2.1 模拟信号输入

模拟信号输入用来设置恒流驱动源的工作电流的大小,既可通过系统内部微处理器的 D/A 信号来提供,也可以将此接口留给用户,由外部接入一个模拟信号。模拟开关 MAX4544,即用来选择模拟信号输入是由内部微处理器还是由外部信号来提供。当 MAX4544 的 1 脚 Laser-On 为低电平时,4 脚和 5 脚导通,选择外部信号;当 Laser-On 为高电平时,6 脚和 5 脚导通,选择内部微处理器信号。

2.2 信号调理

为了使模拟信号输入和输出驱动电流之间有一个线性对应关系,设计了信号调理电路,用来调节线性倍数,模拟输入信号经过 R7 和 R11 分压,然后经过 AD822 跟随,接着再经过 R8、R9 和滑动变阻器 RP2 进行分压,产生恒流单元的控制信号 Vset。

2.3 恒流单元

恒流单元是驱动系统的核心部分,采用电流串联负反馈原理^[6-8]。Vset 信号用于设置恒流源的工作电流,设定值为 $V_{set}/RB4$,其中 RB4 为采样电阻。

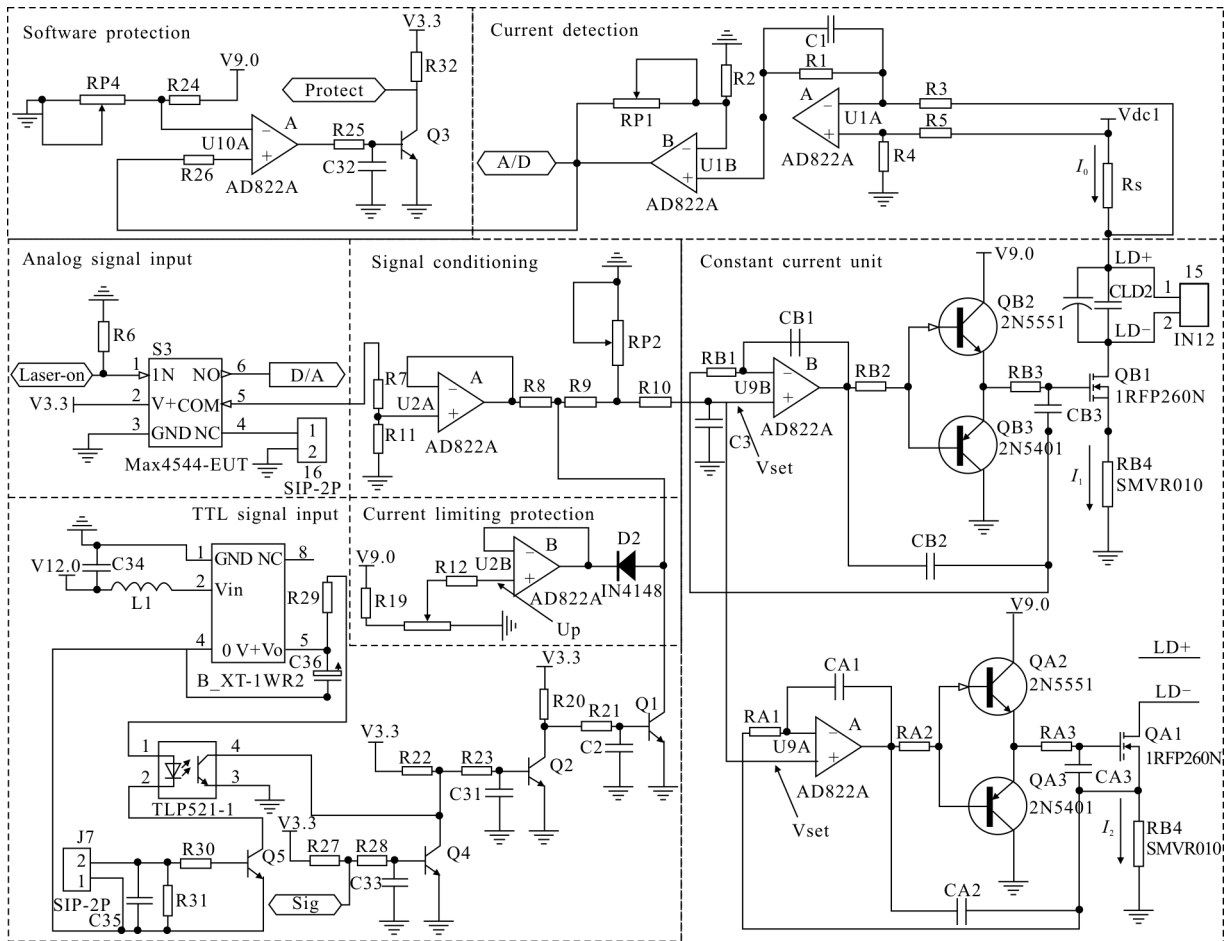


图 2 恒流驱动系统原理图

Fig.2 Schematic of the laser constant current driver circuit

U9B 是 AD822 放大器, Vset 信号输入到 U9B 的正相输入端, 采样电阻 RB4 将电流转换成电压, 输入到 U9B 的反相输入端。Vset 电压和采样电阻的反馈电压, 经过误差放大器放大, 产生输出, 放大器的输出端连接互补推挽电路, 推挽电路由 NPN 三极管 QB2 和 PNP 三极管 QB3 组成, QB2 型号为 2N5551, QB3 型号为 2N5401。互补推挽电路连接场效应管 QB1 的栅极, 增强栅极的驱动能力, 通过调节栅极电压来控制场效应管的工作电流。场效应管选用 IRF3205, 它的导通电阻为 8 mΩ, 漏源极可承受电压为 55 V, 最大导通电流为 110 A。

恒流源的供电电源是 Vdc1, 该实验系统中供电电源采用 Agilent 6684A 电源, 可提供 0~40 V, 0~128 A, 最大输出功率为 5 000 W 的直流电源, 方便系统调试。当负载激光器的工作特性确定后, 可选用固定功率的开关电源模块为供电电源, 提高系统的电

源效率。该设计采用两路完全独立的压控恒流源并联结构, 使电流在各支路平均分配, 总电流即为 2Vset/RB4。对于更大泵浦电流的驱动实现, 根据不同的泵浦源可以扩展成多路独立的压控恒流源并联结构增强系统的驱动能力。图中的电阻 RB4 除了作为电流采样电阻, 还是均流电阻, 两路并联电路的均流电阻采用同样的型号和大小, 这样在每路栅极加相同的电压时, 能够保证每路流过的电流大致相同, 这样就会大大降低 MOS 管因为分流不均而造成损坏的可能性, 提高系统的可靠性。

2.4 电流检测

电流检测单元用于检测恒流驱动电源工作电流的大小, Rs 为总工作电流采样电阻, R1、R3、R4、R5 组成差分放大电路, 放大采样电阻 Rs 两端的电压, R2、U1B 和滑动变阻器 RP1 组成放大倍数可调的同相放大电路, 放大过的电压, 送给微处理器 A/D 口

进行模数转换,再经过计算,得出电路的总电流。

2.5 限流保护

为了使恒流驱动电源工作在一定的范围内,设计了限流保护电路^[9]。限流保护电路由 R19、RP3、R12、U2B 和 D2 组成,调节 RP3 的阻值,使 U2B 的同相输入端设定一个阈值电压 U_p ,当二极管右端的电压大于 U_p 时,被二极管拉低到 U_p ,当二极管右端的电压小于 U_p 时,电压保持不变,这样就能使控制恒流源的信号不超过 U_p ,起到保护电路的作用。

2.6 TTL 信号输入

为了能够使恒流驱动电源工作在脉冲模式,设计了 TTL 信号输入电路。TTL 信号可以是外部输入,也可由系统内部微处理器提供。

当采用系统内部微处理器产生 TTL 信号时,Sig 为信号输入脚,当 Sig 为高电平时,Q4 的基极为高电平,Q4 导通,R22 右端被拉低,Q2 的基极为低电平,Q2 不导通,R21 左端为高电平,Q1 基极为高电平,Q1 导通,R8 右端被拉低,恒流源没有输出;Sig 为低电平时,Q4 的基极为低电平,Q4 不导通,R22 右端为高电平,Q2 基极为高电平,Q2 导通,R21 左端为低电平,Q1 基极为低电平,Q1 不导通,R8 右端正常输出,控制恒流源输出恒流。

当采用外部 TTL 信号时,外部信号要经过光耦隔离输入到电路中,J7 为外部 TTL 输入接口,D3 的 4 脚是经过光耦隔离后的输出信号。

采用外部 TTL 输入信号时,Sig 要置低。当外部信号是高电平时,Q5 导通,D3 光耦导通,D3 的 4 脚为低电平,R22 右端被拉低,Q2 的基极为低电平,Q2 不导通,R21 左端为高电平,Q1 基极为高电平,Q1 导通,R8 右端被拉低,恒流源没有输出;当外部信号是低电平时,Q5 不导通,D3 光耦不导通,D3 的 4 脚为高电平,R22 右端为高电平,Q2 基极为高电平,Q2 导通,R21 左端为低电平,Q1 基极为低电平,Q1 不导通,R8 右端正常输出,控制恒流源输出恒流。

2.7 软件保护

本设计除了硬件限流保护外,还设计了软件保护电路。

电流检测电路将采集到的总电流信号送到 U10A 的同相输入端。U10A 的反相输入端设定一个阈值电压,当同相输入端电压大于设定的阈值电压时,U10A 的输出脚输出高电压,Q3 导通,集电极电

压被拉低,微处理器探测到 Protect 为低,可通过软件编程控制模拟信号输入和 TTL 输入单元关闭恒流输出,起到保护作用。

2.8 假负载

由于激光器价格昂贵,对电源系统要求高,而二极管便宜耐用且导通特性和激光器类似,故采用二极管作为假负载模拟大功率激光器,二极管的型号选择 DSEI60-12A 快恢复二极管,该二极管能承受的反向峰值电压是 1 200 V,最佳通过电流能力是 52 A,二极管在流过大电流时会产生热量,需要将二极管固定在散热器上进行散热。二极管和散热器之间要垫绝缘片。为了提高散热效果,二极管和散热器与绝缘片接触的表面需要均匀涂上一层导热硅胶。J5 是激光器的接口,在实验时,假负载接在此接口。

3 温控系统设计

为使大功率半导体激光器工作在稳定温度,配合所设计恒流驱动电源工作,设计了温控系统。所设计的温控系统如图 3 所示。主要由测温电路、温度设置及 PI 电路、TEC 驱动电路组成,下面分别介绍各部分的工作原理。

3.1 温度测量

温度测量的传感器选用负温度系数热敏电阻 (Negative Temperature Coefficient, NTC),RT1 是热敏电阻的接口,采用恒流式测温电路,通过滑动变阻器 RP7 设定一个电压送到 U11B 的同相输入端,通过运放 U11B、Q7 和反馈电阻 R66 组成的负反馈恒流源电路将电压转换为恒流源。恒流源的大小为 $I=V_c/R66$ 。电流通过热敏电阻 RT1 时产生压降,通过 U11A 和 U12B 进行信号调理,就可以将温度转换成对应的电压。电流信号和温度信号分别送到 AD-I 和 AD-T 接口,通过微处理器经过模数转换,计算出实际的电流和温度值。

3.2 温度设置及 PI 控制

采用硬件 PI 电路来控制温度^[10],Vtset 是温度设置电压,Vtout 是温度反馈电压。调节滑动变阻器 RP5,使 U21A 设定一个固定电压 V_t 。在此电路中,积分电路 R53 和 R52 阻值的大小是比例电路 R42 和 R33 阻值大小的 10 倍,可以认为流过 R53 和 R52 的电流忽略不计,则流过 R42 的电流的大小和流过

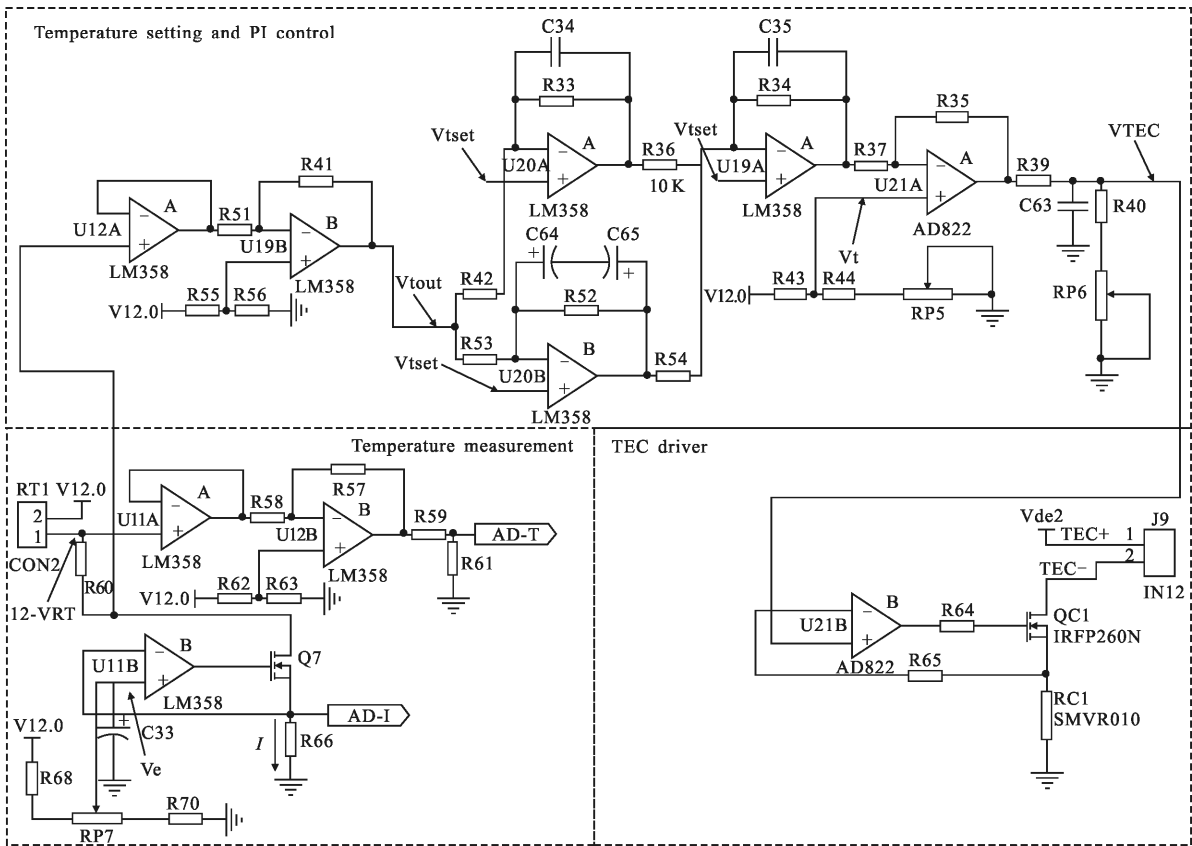


图 3 温控系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of temperature control circuit

R34、R37 的电流的大小相等。Vtout 和 Vtset、Vt 的关系为：

$$\frac{V_{tout} - V_{tset}}{R42} = \frac{V_{tset} - V_t}{R34 + R37} \quad (1)$$

经过整理得：

$$V_{tout} = \frac{V_{tset} \cdot (R42 + R34 + R37) - V_t \cdot R42}{R34 + R37} \quad (2)$$

电路中，R42=10 kΩ，R34=20 kΩ，R37=10 kΩ，经过计算得到：

$$V_{tout} = \frac{3}{4} V_{tset} - \frac{1}{3} V_t \quad (3)$$

设热敏电阻两端的电压是 VRT，R60=R66=10 kΩ 取值相同，R55 和 R56 阻值相同，则可得 VRT 和 Vtout 的关系：

$$\frac{12 - V_{RT} - V_c - 6}{R51} = \frac{6 - V_{tout}}{R41} \quad (4)$$

电路中，R51=R41=10 kΩ，经过整理得：

$$V_{RT} = V_{tout} - V_c \quad (5)$$

由公式(1)和公式(2)可得：

$$V_{RT} = \frac{3}{4} V_{tset} - \frac{1}{3} V_t - V_c \quad (6)$$

式中：Vt 和 Vc 可根据设计要求调整，电路中，Vt=3.5 V，Vc=2.3 V，Vtset 取 3.5~5.5 V，则 VRT 的取值范围是 1.2~3.87 V。由 Vc=2.3 V，R66=10 kΩ，则流过热敏电阻的电流为 I=2.3 V/10 kΩ=0.23 mA。

根据欧姆定律计算热敏电阻的阻值变化范围是 5.22~16.83 kΩ，热敏电阻的参数是 R25℃阻值是 10 kΩ，B 值是 3 950，根据查表可得，温控范围是 14~40℃。

PI 参数的调整主要是电路中电阻电容的参数改变实现，参数设定的原则是先在电路中只加比例电路，确定好 P 值；后加入 I 积分电路，确定 I 值。温差信号经过 PI 电路调理后，产生控制 TEC 制冷强弱的输出量 VTEC。

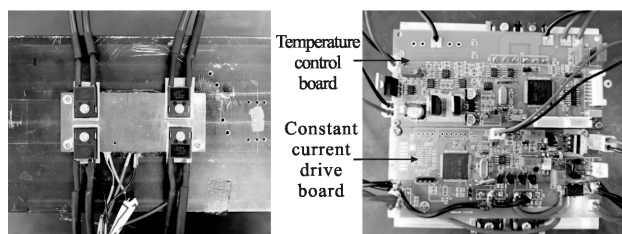
3.3 TEC 驱动

温差信号经过 PI 电路调理的输出量 VTEC，用来驱动 MOS 管 QC1。J9 是 TEC 的接口，该系统选用

TEC 型号为 TEC1-12706U,最大工作电流为 6.0 A,最大工作电压为 15.4 V,最大制冷量为 51.4 W,尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm×3.8 mm。TEC 的供电电源是 Vdc2,该系统选用明纬公司型号为 RS-100-15 的开关电源,输出为 15 V、7 A 的直流电源。U21B、QC1 和 RC1 组成了负反馈调节的恒流源系统,通过控制恒流源电流的大小来控制 TEC 的制冷量,保证了温控调节的稳定性。

4 实验结果

系统的实物图如图 4 所示。包括假负载、恒流源驱动模块和温控模块。



(a) 假负载 (a) Dummy load
(b) 恒流驱动模块和温控模块 (b) Constant current drive module and temperature control module

图 4 系统实物图

Fig.4 Pictures of the system

4.1 恒流源实验结果

当模拟输入信号 $DA=0.1\text{ V}$ 时,通过信号调理电路, $V_{set}=2.5\text{ mV}$,采样电阻是 $10\text{ m}\Omega$,一路对应的电流为 0.25 A ,该电路中共有两路,电路的总电流为 0.5 A 。使用 Tektronix 的 A622 型电流探头测量电路中的电流。

设定电压 DA 和实际测量的电流结果如表 1 所示。

从表 1 实验结果来看,恒流源的测量电流与设定电流存在最大有 0.15 A 的误差,因为该设计是用小电压控制大电流, 2.5 mV 的步进电压控制 0.5 A 的步进电流,文中控制信号采用 STM32 芯片上 12 位的 DA 信号,DA 供电电压为 2.5 V ,对应的控制电压最小误差为 $2.5/4096=0.6\text{ mV}$,此外运放失调电压和温漂也会引起控制电压的误差,从而导致实际测量电流与设定电流的误差。对于高精度的电流控制可选用高精度的 DA 以及低失调电压、低温漂的

运放,以及采用软件校正来减少设置电流与实际电流的误差。

表 1 设定电压和测量电流

Tab.1 Setting voltage and measured current

Setting voltage/V	Setting current/A	Measured current/A	Setting voltage/V	Setting current/A	Measured current/A
0	0	0.00	1.3	6.5	6.60
0.1	0.5	0.49	1.4	7.0	7.09
0.2	1.0	1.02	1.5	7.5	7.62
0.3	1.5	1.51	1.6	8.0	8.12
0.4	2.0	2.00	1.7	8.5	8.65
0.5	2.5	2.50	1.8	9.0	9.14
0.6	3.0	3.03	1.9	9.5	9.63
0.7	3.5	3.52	2.0	10.0	10.13
0.8	4.0	4.02	2.1	10.5	10.62
0.9	4.5	4.51	2.2	11.0	11.12
1.0	5.0	5.04	2.3	11.5	11.65
1.1	5.5	5.57	2.4	12.0	12.14
1.2	6.0	6.07	2.5	12.5	12.64

根据表 1 的数据,对电压和实际测量的电流进行最小二乘线性拟合,线性拟合曲线如图 5 所示。根据线性公式 $Y=A+BX$,计算出 $A=-0.0147$, $B=5.07115$,线性相关度 0.9999 。结果表明:设定电压和实际测量电流具有良好的线性度。

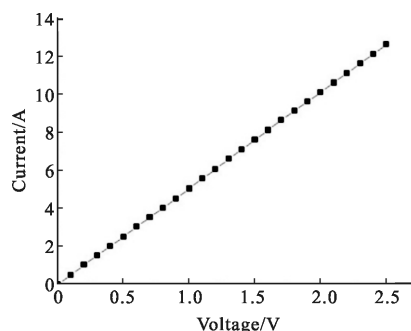


图 5 设定电压和电流的线性拟合

Fig.5 Linear fitting of setting voltage and current

4.2 温控实验结果

测试环境:在环境温度 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 时,设定温度以 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 步进增加,设定范围为 $15\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。每个设定温度每隔 5 min 测量一次,每个设定温度测量 5 次。

从表 2 可以看出, 测量温度与设定温度的最大 误差为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足精度的要求。

表 2 设定温度与测量温度

Tab.2 Setting temperature and measured temperature

Setting temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Measured temperature 1/ $^{\circ}\text{C}$	Measured temperature 2/ $^{\circ}\text{C}$	Measured temperature 3/ $^{\circ}\text{C}$	Measured temperature 4/ $^{\circ}\text{C}$	Measured temperature 5/ $^{\circ}\text{C}$	Average temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Maximum difference/ $^{\circ}\text{C}$
15	14.97	14.98	14.95	15.02	15.01	14.99	-0.05
16	15.99	16.01	16.02	16.04	15.98	16.01	0.04
17	16.97	17.02	16.98	17.01	17.04	17.00	0.04
18	17.98	18.02	18.03	17.96	18.05	18.01	0.05
19	19.03	18.97	19.01	18.98	19.03	19.00	0.03
20	19.98	19.97	20.01	20.02	20.00	20.00	-0.03
21	20.97	20.98	21.02	21.03	20.98	21.00	0.03
22	22.02	21.97	21.98	22.03	22.01	22.00	0.03
23	22.97	23.01	23.03	22.95	22.98	22.99	-0.05
24	23.95	24.01	24.03	23.98	24.05	24.00	0.05
25	25.02	25.00	24.98	25.02	24.95	24.99	-0.05

5 结 论

文中设计并制作了一套大功率的激光泵浦源控制系统。采用数字控制方式, 使驱动电源智能化程度高, 操作方便; 采用两路独立的压控恒流源并联结构增强了电源输出能力, 提高电源的可靠性, 同时具有限流保护、电流检测、TTL 调制等多种功能, 其输出电流可以在 0~12.5 A 范围内连续可调, 温控精度可达 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结果表明: 该系统达到了设计要求目标, 能够满足大功率半导体激光器的恒流驱动和温度的控制要求, 具有重要的实用意义。

参考文献:

- [1] Christopher J, Erickson, Marshall Van Zijll, et al. An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 073107.
- [2] Wang Zongqing, Duan Jun, Zeng Xiaoyan. Research of precise temperature control systems of high-power semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2015, 39 (3): 353-356. (in Chinese)
- [3] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749. (in Chinese)
- [4] Dai Qin, Song Wenwu, Wang Xijun. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 745-748. (in Chinese)
- [5] Rafal Piersiak. Implementation and design of a low cost Laser Diode temperature controller [C]//IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), NY: Farmingdale, 2012.
- [6] Lu Kai, Liu Baiyu, Bai Yonglin, et al. High power laser diode drive power supply [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2680-2684. (in Chinese)
- [7] Xu Wenhai, Yang Mingwei, Tang Wenyan. Development of multifunctional laser diode driver [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 465-468. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Yuan Lincheng, Jiang Shubo, Song Xianglong, et al. Research and design of driving circuit for semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2015, 38 (6): 1287-1291. (in Chinese)
- [10] Zhang Guoxiong, Huang Chunhui. Continuously adjustable semiconductor laser diode driver with high stability [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 160-163. (in Chinese)