

面向超短脉冲激光器泵浦源的驱动系统设计及应用

高德辛, 吕昶见, 吕东明, 于 旺, 秦伟平

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 设计并实现了一种用于超短脉冲激光器泵浦源的驱动系统。该系统可以同时为五路半导体激光器提供高精度、高稳定度、高灵活性的恒温控制和恒流驱动。为了提高驱动系统的灵活性和可集成度, 硬件部分采用上位机、控制、驱动、供电分开的模块化设计方案; 基于嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 开发了系统驱动程序, 提高了实时性和扩展性, 输出校正部分采用遗传算法优化的增量式 PID 算法, 减少了系统的超调量和到达动态平衡的时间; 驱动系统具有完备的保护措施, 如软启动和关闭、驱动回路检测、过温保护等功能, 确保了泵浦源的稳定运行。在实际应用中, 半导体激光器温度稳定度优于 0.035%, 驱动系统输出电流稳定度优于 0.001%。将研制的驱动系统集成到 1.5 μm 飞秒光纤激光器中驱动五路半导体激光泵浦源, 获得的种子激光、放大器的输出激光脉冲光谱、脉冲序列和单脉冲均可稳定运行; 经过连续 3 h 的测试, 1.5 μm 飞秒光纤激光器的输出功率稳定度为 0.16%。

关键词: 超短脉冲; 半导体激光器; 恒温控制; 恒流驱动; 光纤激光器

中图分类号: TN245; TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210153

Design and application of driving system for pump source of ultrashort pulsed laser

Gao Dexin, Lv Changjian, Lv Dongming, Yu Wang, Qin Weiping

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A driving system for the pump source of the ultrashort pulse laser was developed, which could provide high precision, high stability and high flexibility of constant-temperature control and constant-current drive for the five semiconductor lasers simultaneously. In order to improve the flexibility and integration of the driving system, the hardware part adopted the modular design scheme that the host computer, control board, driving board and power supply module were separated. The driving system program was developed based on embedded real-time operating system $\mu\text{C}/\text{OS-III}$, which improved the real-time performance and expansibility of the system program. In the output correction part of the system, incremental PID algorithm optimized by genetic algorithm was adopted, the overshoot and the time to establish dynamic equilibrium of the system were reduced. The driving system had complete protection measures, such as soft-start and soft-shutdown, driving loop monitoring, overtemperature protection and other functions, to ensure the stable operation of the pump source. In

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11774132, 61875071); 吉林省重大科技招标专项 (20170203012GX);
吉林省重点科技研发项目 (20180201120GX)

作者简介: 高德辛, 男, 硕士生, 主要从事先进光子学器件与设备方面的研究。

导师简介: 秦伟平, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事稀土发光学与激光器方面的研究。

practical application, the temperature stability of the semiconductor laser is better than 0.035%, and the output current stability of the driving system is better than 0.001%. The developed driving system is integrated into a 1.5 μm femtosecond fiber laser, the driving system drives five semiconductor lasers as the pump source, the emission spectrum, output pulse trains and single pulse profile of the seed laser and the laser amplifier are stable, The output power stability of the 1.5 μm femtosecond fiber laser is 0.16% after three hours of continuous testing.

Key words: ultrashort pulse; semiconductor laser; constant-temperature control; constant-current drive; fiber laser

0 引言

超短脉冲激光具有时域脉宽极窄、频域光谱较宽的特点,在光纤通信、光电传感、非线性光学、生物医学、工业加工等领域有着广泛的应用^[1]。半导体激光器又称激光二极管(Laser Diode, LD),是固体激光器和光纤激光器的主要泵浦源,其输出稳定性直接决定了整机的输出性能^[2]。LD是以半导体材料作为工作物质而产生激光的器件,工作时可通过注入电流的激励方式,在半导体材料的能带(导带与价带)之间实现非平衡载流子的粒子数反转,若处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合,则会实现受激发射作用^[3-5]。LD因具有结构紧凑、质量轻、能量转换效率高、耗电省、便于波长调制等优点,被广泛应用于科研、工业、商业、医疗、军事等领域^[6-8]。LD在用作光纤激光器泵浦源时,具有易集成、效率高、热耗散小等优越性,但其输出功率除了受到电源电流影响外,还受外微分量子效率、阈值电流(两者大小均随温度变化)的影响,同时,温度的变化也会引起LD的输出波长漂移,导致LD输出功率与能量比不稳定。研究人员当下大都采用多片半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)做温控集成到驱动电源中或外加光学设备稳定LD波长两种方式来减小温度带来的影响。但方式一降低了小型化和功耗低的优势,方式二中外加的辅助设备本身也存在温度漂移问题^[9]。为充分发挥LD的应用优势,有必要为其设计高精度、高稳定性、高灵活性和易集成的驱动系统。

如今,在商用驱动电源方面,国内厂商主要有深圳市南方联合实业、泰德激光科技、湖北光通科技、武汉新特光电、上海技驰电子科技、北京特一安电源科技、镭志威光电等公司。其中上海技驰电子科技公司的产品性能最好,以J-CW6010型产品为例,其短期稳定性为 1×10^{-3} 。国外研制半导体激光器的驱动电

源的公司较多且技术更为成熟,如Wavelength、Vicor、ILXlight、Alpha-las、TOELLNER等,其产品的性能指标也普遍优于国内的产品。其中,Wavelength公司的MPL2500型产品可输出0~2.5 A的可调电流,短期(1 h)稳定度可达 3×10^{-5} ,长期(24 h)稳定度可达 7.5×10^{-5} ^[10]。温控系统方面,美国Arroyo Instrument公司生产的5300系列产品,在28~960 W范围内可实现0.004 $^{\circ}\text{C}$ 的稳定性;美国Thorlabs公司研制的TED200C型激光器恒温控制系统,输出电流为 ± 2 A,温度控制精度可达0.01 $^{\circ}\text{C}$,稳定性可达0.002 $^{\circ}\text{C}$ 。国内北京特一安电源科技有限公司生产的TWK-05V06A型产品,驱动电流为6 A,输出功率范围为10~30 W,温控精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。吉林大学闫万红等人基于嵌入式系统和积分限幅式的PID控制算法研制的温控仪器,温度控制稳定性达到了0.0048 $^{\circ}\text{C}$ ^[11]。但是,这些产品均未实现多通道的高精度电流驱动和温度控制,且存在体积大、灵活性差、不易集成等缺点。结合国内外商用产品现状及未来发展需求^[12-13],文中设计了一种用于超短脉冲激光器泵浦源的驱动系统,采用全数字化的系统架构,力求实现对LD的高精度、高稳定度及灵活驱动。

1 驱动系统硬件设计

驱动系统总体框图如图1所示,采用交互、控制、驱动、供电分开的模块化设计,隔离了发热源以方便系统的热设计^[14]。控制板如图2(a)所示,尺寸为10 cm \times 9 cm,可控制五路驱动板,主要负责电流、温度的设置,数据的处理、显示及存储,485通讯,串口通讯等功能;驱动板如图2(b)所示,尺寸为8 cm \times 6 cm,可便捷地集成到光纤激光器中,主要负责输出驱动电流和对LD的温度控制,可选择与控制板的连接数量,并可选择并联以提高驱动电流值;人机交互模块为工控屏(富昌维控电子科技,型号LEVI700ML),其

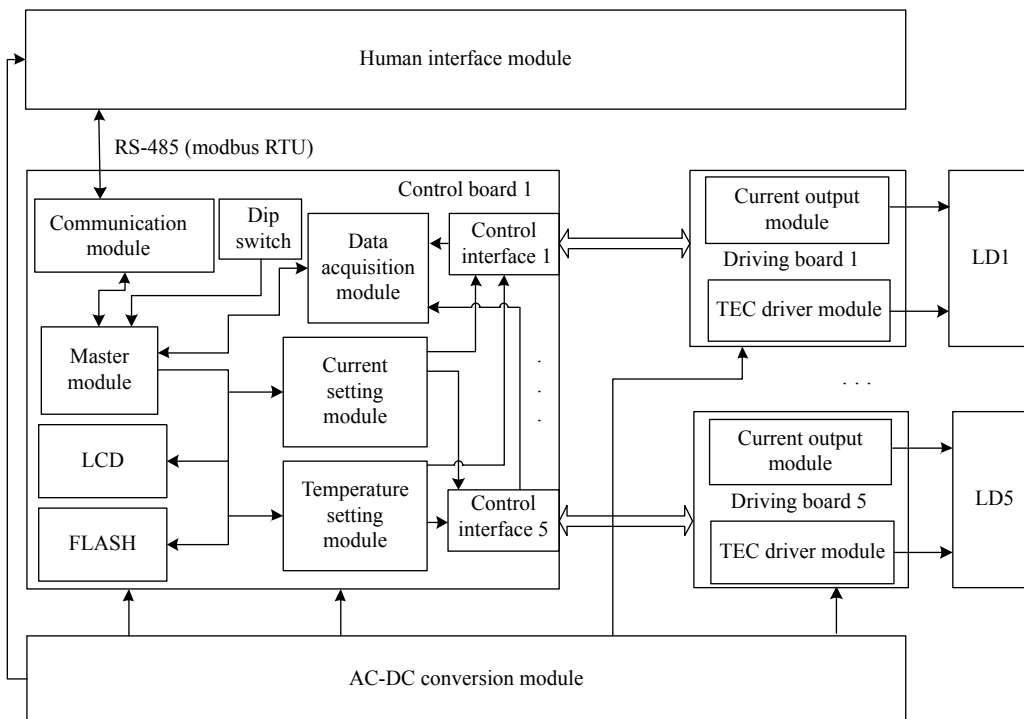


图 1 系统框图

Fig.1 Block diagram of the system

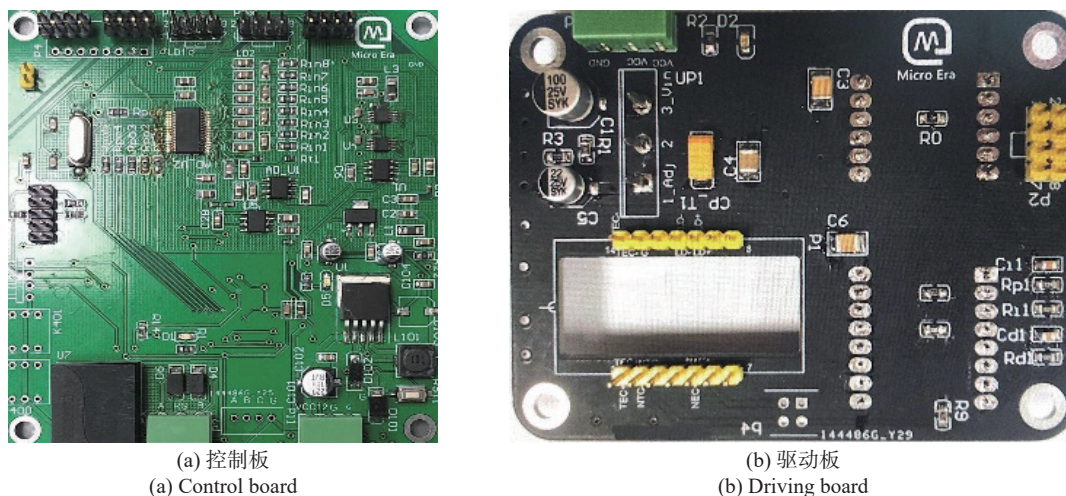


图 2 控制板和驱动板实物图

Fig.2 Photos of control board and driving board

带有的 485 接口可实现多设备 (控制板) 组网, 以控制更多通道的驱动板, 并有设置电流、温度, 显示实时电流、温度、报警信息等功能; AC-DC 电源转换模块为驱动系统提供电源。

相较于目前的商用电源, 文中设计的驱动系统硬件采用全数字化芯片架构, 具有精度高、体积小、易集成的优点, 且模块化的设计方案降低了硬件间的耦

合度, 大大提高了驱动的灵活性。

1.1 控制板设计

控制板主要实现对驱动板的控制以及与上位机的通信等功能, 如图 1 所示。其中主控模块为 ARM (STMicroelectronics, 型号 STM32) 和 FPGA (Intel, 型号 EP4CE10F17C8) 的双核架构, FPGA 负责驱动 24

位高精度模数转换器 ADS1256 (Texas Instruments, 型号 ADS1256) 采集实时数据并通过串口发送给 ARM 进行处理, 采样精度可达 0.6 μV 。与单主控设计相比, 双核架构降低了单主控引脚数量和算力不足的限制, 可灵活增加数模、模数芯片的数量以实现多通道控制。拨码开关负责设置下位机地址以支持 485 接口下的多设备组网; LCD 负责显示电流、温度以及激光二极管工作状态等信息; 使用 16 位高精度数模转换器 DAC8501 (Texas Instruments, 型号 DAC8501) 输出电流与温度的选点电压, 步进精度可达 38.15 μV ; FLASH 负责存储电流、温度等历史数据。在各模块的供电引脚和地之间并联接入钽电容以及陶瓷电容, 以此降低电源纹波的影响。在驱动系统的模拟地与数字地上串联接入 0 欧姆电阻, 以确保 ADC 采样和 DAC 输出的精确性。

1.2 激光器驱动电路设计

驱动系统采用恒流激光驱动器 ATLS2A201D (鞍山核心电子, 型号 ATLS2A201D) 为 LD 提供驱动电流, 可输出 0~2 A 连续可调电流, 其噪声峰-峰值为 3.97 μA , 稳定性可达 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (1 ppm= 10^{-6}), 带有当前电流和驱动回路状态指示、软启动和关闭以及过温保护等功能, 并具有效率高、无电磁干扰和体积小的优势。ARM 利用当前电流与设置值进行 PID 算法计算的结果, 控制数模转换器输出选点电压控制 ATLS2A201D 工作, 其工作的温度范围为 -40~85 $^{\circ}\text{C}$ 。考虑到连续输出大电流的工作要求, 预装了散热处理, 避免影响工作性能。

1.3 半导体制冷器驱动电路设计

针对如今 LD 大多内置 TEC 的情况, 文中选择高效 TEC 控制器 TEC5V4A-D (鞍山核心电子, 型号 TEC5V4A-D) 为其驱动, 其温度控制范围为 15~35 $^{\circ}\text{C}$, 稳定性可达 0.01 $^{\circ}\text{C}$, 带有当前温度和温度控制环路状态指示、软启动和关闭以及过温保护等功能, 且具有体积小、无电磁干扰等优势。ARM 采集当前的温度值与设定值进行 PID 算法校正, 控制数模转换器输出选点电压控制 TEC5V4A-D, TEC5V4A-D 可工作在 -40~85 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围^[11]。

2 驱动系统软件设计

基于嵌入式实时操作系统 (Operating System, OS)

$\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 开发了主控 ARM 驱动层的程序。相较于传统的轮询系统和前后台系统, 该设计具有更加优异的实时性和扩展性。驱动层程序主要完成如下操作: 激光驱动器和 TEC 驱动器输出的激活与关闭, 电流和温度的设置、输出与校正, LD 状态检测及报警, 输出限幅检测, 零点飘移校正, 硬件自检, 485 (MODBUS-RTU 协议) 通讯, 串口通讯, LCD 显示, FLASH 读写, CPU 和内存占用率监测等; FPGA 作为协处理器, 程序采用 Verilog 语言编写, 驱动模数转换器采集当前数据, 通过串口发送给 ARM 处理。

2.1 遗传算法优化的增量式 PID 控制器

遗传算法衍生自达尔文进化论中的“物竞天择, 适者生存”法则, 通过模拟遗传学机制和自然选择的过程寻找全局最优解, 具有自适应性和群体搜索能力, 并有避免需要优化参数在搜索期间因为落入局部某个单峰的极值点而将之作为最优解的优势^[15-17]。图 3(a) 为基本遗传算法最优解求解过程。

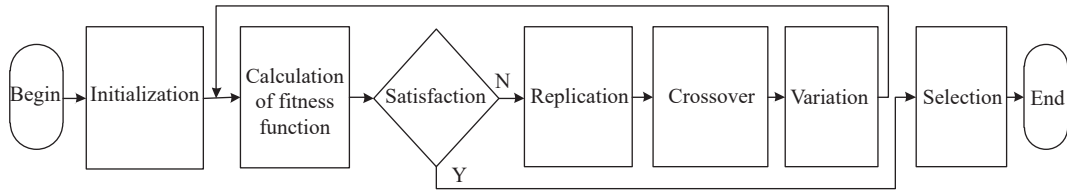
传统 PID 控制起源于 20 世纪初, 通过对设定值和实际值的偏差进行比例、积分、微分线性组合运算, 输出反馈结果到被控对象使其达到动态平衡^[18]。PID 控制具有简洁、鲁棒性好、易实现等优点, 对于大致呈线性、动态特性不随时间变化的系统具有优良的控制效果^[19]。图 3(b) 为传统 PID 控制系统工作原理图, 其位置式离散数学模型为:

$$OUT = (K_p \times E_k) + \left(K_i \times \sum_{k=0}^n E_k \right) + [K_d \times (E_k - E_{k-1})] \quad (1)$$

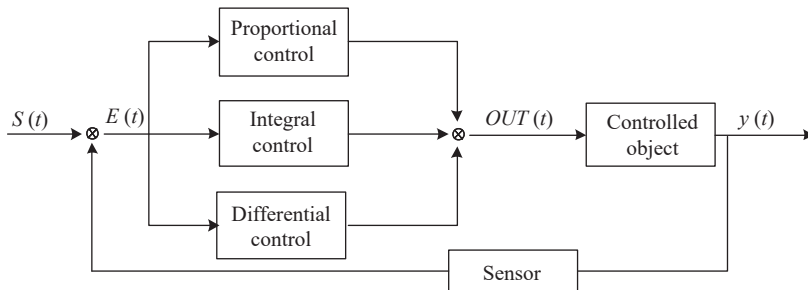
式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数; E_k 、 E_{k-1} 为本次和上次偏差; OUT 为输出结果。但在嵌入式系统中应用时, 该模型存在计算量大、占用内存多的缺点。为此, 采用增量式 PID 算法, 记上次的输出控制信号值为 OUT_{k-1} , 当前输出值为 OUT_k , 两者相减得到增量式 PID 输出 ΔOUT 的数学模型:

$$\Delta OUT = OUT_k - OUT_{k-1} = K_p \times (E_k - E_{k-1}) + K_i \times E_k + K_d \times (E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2}) \quad (2)$$

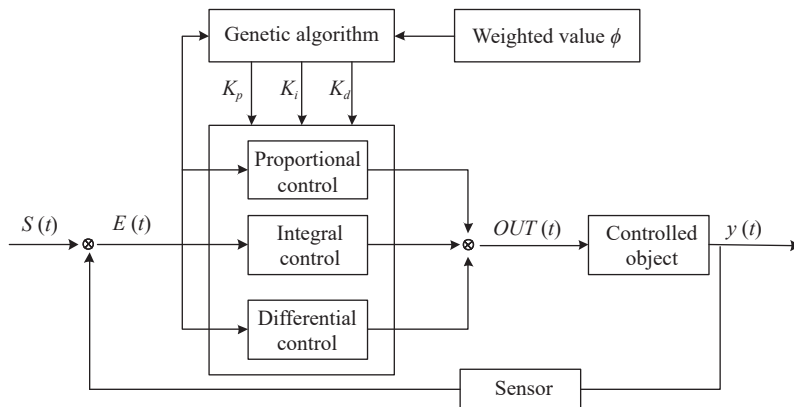
式中: E_{k-2} 为上上次偏差。增量式 PID 算法中没有对历史偏差的累加, 极大地弥补上述不足之处。但无论位置式还是增量式 PID 算法, 对 K_p 、 K_i 、 K_d 三个变量的整定是控制系统的关键, 整定方式一般选取经验数值或者试凑数值, 由于三个参数并非独立存在, 经验



(a) 基本遗传算法流程图
(a) Flow chart of basic genetic algorithm



(b) 传统 PID 控制系统框图
(b) Block diagram of traditional PID control system



(c) 遗传算法优化的增量式 PID 控制系统框图
(c) Block diagram of incremental PID control system optimized by genetic algorithm

图 3 校正算法框图

Fig.3 Block diagram of correction algorithm

法或试凑法往往需要耗费大量人力及时间,且在被控对象为参数时变或非线性时传统 PID 控制器经常存在控制效果不稳定的情况^[20]。

针对上述问题,文中结合遗传算法实现智能 PID 控制算法,更精准地进行电流和温度的校正。首先,参照 PID 参数整定的经验值,将比例、积分、微分三个参数的取值区间确定为: $K_p \in [0, 1]$, $K_i \in [0, 0.1]$, $K_d \in [0, 5]$, 依据参数区间初始化种群,并根据处理器性能将种群数量设置为合适值。评价 PID 算法控制效果的主要性能指标为超调量 σ 、上升时间 t_r 及其稳态误差函数,为平衡系统的动态和稳态性能指标,设定适应度函数如下:

$$J = (1 - \phi) \times \sigma + \phi \times t_r + \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

式中: ϕ 为加权值,取值区间为 (0,1); 遗传函数 J 的值越小代表个体适应能力越强。将个体适应度从大到小依次排序,淘汰概率设置为 50%,未被淘汰的个体进行概率为 α 的随机交叉,由个体 p 、 q 产生新个体 y 的算法为:

$$\begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix} = (1 - \alpha) \times \begin{bmatrix} K_{pp} \\ K_{ip} \\ K_{dp} \end{bmatrix} + \alpha \times \begin{bmatrix} K_{pq} \\ K_{iq} \\ K_{dq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

为防止参数整定过程在早期就因陷入局部最优解而终止,设置变异概率为 β ,对个体 y 有:

$$\begin{bmatrix} K'_{py} \\ K'_{iy} \\ K'_{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix} + (1-\beta) \times \begin{bmatrix} K_{py} \\ K_{iy} \\ K_{dy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

完成选择交叉变异操作之后,再次计算个体的适应度。当进化的次数达到最大迭代次数或整定参数满足条件,整定寻优过程停止,否则继续进行选择交叉变异操作,直至得到全局最优参数 K_p 、 K_i 、 K_d 并存储,下次开机可直接调用,以节约前期迭代的时间。图 3(c)为遗传算法优化的增量式 PID 控制系统结构图。

3 驱动系统性能测试

为验证研制的驱动系统性能,选取两个额定功率 500 mW、中心波长 980 nm 的 LD (Oclaro, 型号 LC96-A74P) 和三个额定功率 650 mW、中心波长 1480 nm

的 LD (Anritsu, 型号 AF4B), 分别编号 LD1~LD5。在室温环境下,将 LD1 电流设置为 80 mA, LD2 电流设置为 200 mA, LD3~LD5 电流均设置为 1200 mA, 所有 LD 温度均设定为 25 °C。使用六位半数字万用表 (Agilent Technologies, 型号 34410A) 测试五路 LD 的电流值,同时记录温度数据,每 5 min 一次,持续记录 300 min, 测试结果如图 4 所示。

根据稳定度计算公式^[21]:

$$\text{stability value} = \frac{\text{standard deviation}}{\text{average value}} \times 100\% \quad (6)$$

将测得数据代入公式 (6), 五路 LD 的输入电流稳定度分别为 0.001%, 0.0009%, 0.0005%, 0.0005%, 0.0006%, 温度稳定度分别为 0.032%, 0.031%, 0.034%, 0.033%, 0.035%。

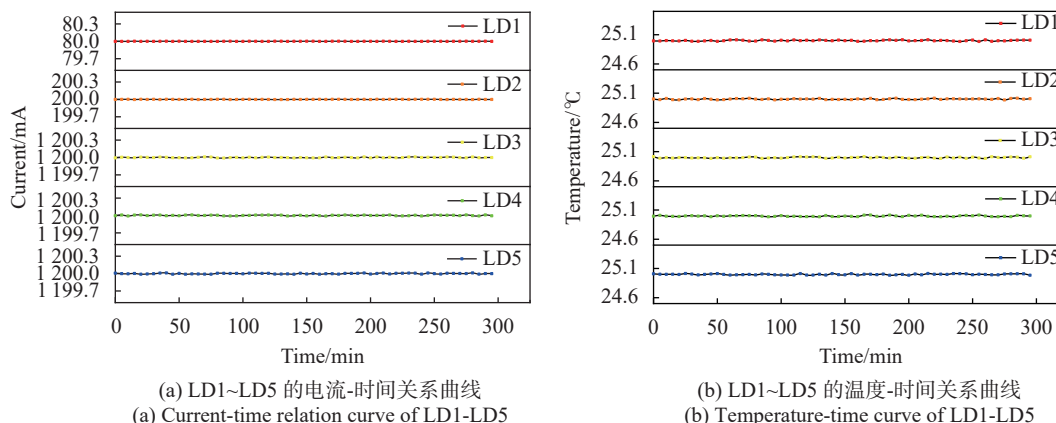


图 4 五路 LD 电流、温度-时间关系曲线

Fig.4 Current, temperature-time relation curve of five-channel LD

4 1.5 μm 飞秒光纤激光器测试

驱动系统是激光泵浦源的核心,为验证驱动系统稳定性,将文中设计的驱动系统集成到中心波长为 1.5 μm 的飞秒光纤激光器中驱动五路 LD 作为泵浦源,实验装置示意图如图 5 所示。

泵浦源采用波长为 980 nm 和 1480 nm 的 LD, 自左至右依次为 LD1~LD5, 其中 LD1 和 LD2 波长为 980 nm, LD3~LD5 波长为 1480 nm。经由波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 将泵浦光与信号光耦合进入谐振腔内,掺铒增益光纤 (Erbium-Doped Fiber, EDF) 作为激光器中的工作物质,通过吸收泵浦光的能量,

在谐振腔内产生 1.5 μm 波段的种子激光。腔内加入光隔离器 (Isolator, ISO) 确保激光的运转方向,规避产生空间烧孔效应。加入碳纳米管可饱和吸收体器件 (Carbon Nanotube Saturable Absorber, CNT SA) 在激光腔内对入射激光起到调制作用,脉冲激光通过一个分束比为 10 : 90 的输出耦合器 (Output Coupler, OC) 将 10% 的激光输出进入后级激光放大器,90% 的激光反馈回腔内用于铒离子的受激辐射。种子源激光器输出的脉冲激光进入一级掺铒光纤放大器进行放大,由中心波长为 980 nm 的 LD 泵浦,一级放大器输出的脉冲激光进入二级掺铒光纤放大器进行放大。二级放大器由三个中心波长为 1480 nm 的 LD 泵浦。在一、

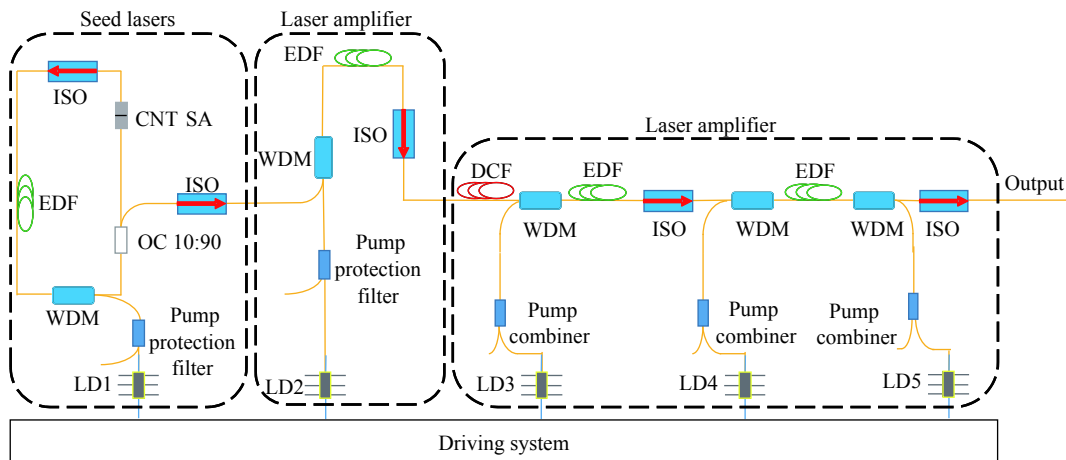


图 5 1.5 μm 飞秒光纤激光器实验装置

Fig.5 Experimental setup of the 1.5 μm femtosecond fiber laser

二级放大器之间接入色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF), 以防止脉冲激光峰值功率增加太快而损坏仪器, 或者过早出现非线性效应而影响对脉冲激光的功率放大。使用光谱仪 (YOKOGAWA, 型号 AQ6375)、数字示波器 (Tektronix, 型号 DPO70604C)、自相关仪 (Aveata, 型号 AA-10DD)、频谱仪 (Agilent, 型号 E4411B) 和光功率计 (Thorlabs, 型号 PM100D) 测试激光器输出的光信号^[22-24]。

在 1.5 μm 光纤激光器中, 种子泵浦源的工作温度设置为 25 °C, 提高 LD1 驱动电流至 60 mA, 激光器输出连续激光, 继续提高 LD1 驱动电流至 65 mA, 激光器实现自启动锁模脉冲激光输出。测得种子源输出光谱如图 6(a) 所示, 其 3 dB 带宽为 2.2 nm, 种子源输出的激光脉冲序列如图 6(b) 所示, 可以看出种子激光器具有稳定的脉冲输出, 其相邻脉冲时间间隔为 23.2 ns, 对应重复频率为 43.1 MHz。种子源输出的激光单脉冲如图 6(c) 所示, 脉冲宽度为 100 fs。保持激光器持续工作, 测得其射频谱如图 6(d) 所示, 其基频位于 43.47 MHz 处, 信噪比为 50 dB, 其中插图为大扫描范围 (1 000 MHz) 下的输出激光射频谱图, 可以看到锁模激光有稳定的脉冲输出。在测试长期稳定性时, 每间隔 36 min 进行一次光谱采样, 持续 3 h, 如图 6(e) 所示。测试结果表明, 锁模激光输出始终保持稳定, 说明驱动系统工作稳定性良好。

设置一级放大器的泵浦源 LD2 驱动电流为 200 mA, 二级放大器泵浦源 LD3~LD5 电流均为

1 200 mA, LD2~LD5 工作温度均设置为 25 °C, 测得一级放大器的输出光谱如图 7(a) 所示, 其 3 dB 带宽为 3.1 nm; 二级放大器的输出光谱如图 7(a) 所示, 在对超短脉冲激光进行放大时, 信号光经一级掺铒光纤放大器后进入一段色散补偿光纤, 由于自相位调制效应导致光谱变宽, 但其中心波长依旧为 1.5 μm。二级放大器的输出激光的脉冲序列如图 7(b) 所示, 可以看出其输出脉冲稳定, 间隔为 22.9 ns, 对应重复频率为 43.67 MHz, 其输出单脉冲如图 7(c) 所示, 由于脉冲激光峰值功率的增加, 其宽度被压缩为 98.0 fs。监测泵浦源的注入电流与 1.5 μm 光纤激光器的输出光功率, 得到其 *I-P* 关系如图 7(d) 所示。根据相关系数 *R* 的计算公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中: (X_i, Y_i) 代表驱动电流与光功率的第 *i* 个数据点; \bar{X} 和 \bar{Y} 为数据的平均值。当 $N=12$ 时, 得到 $R=0.997$ 。由此可知, 在该实验的注入电流与输出光功率范围内两者成线性关系^[25], 说明驱动系统温控效果良好。每隔 5 min 记录一次激光器的输出功率, 持续 300 min, 测试结果如图 7(e) 所示。根据公式 (6) 计算得到功率稳定度为 0.16%, 说明驱动系统输出电流和泵浦源工作温度稳定度均良好。

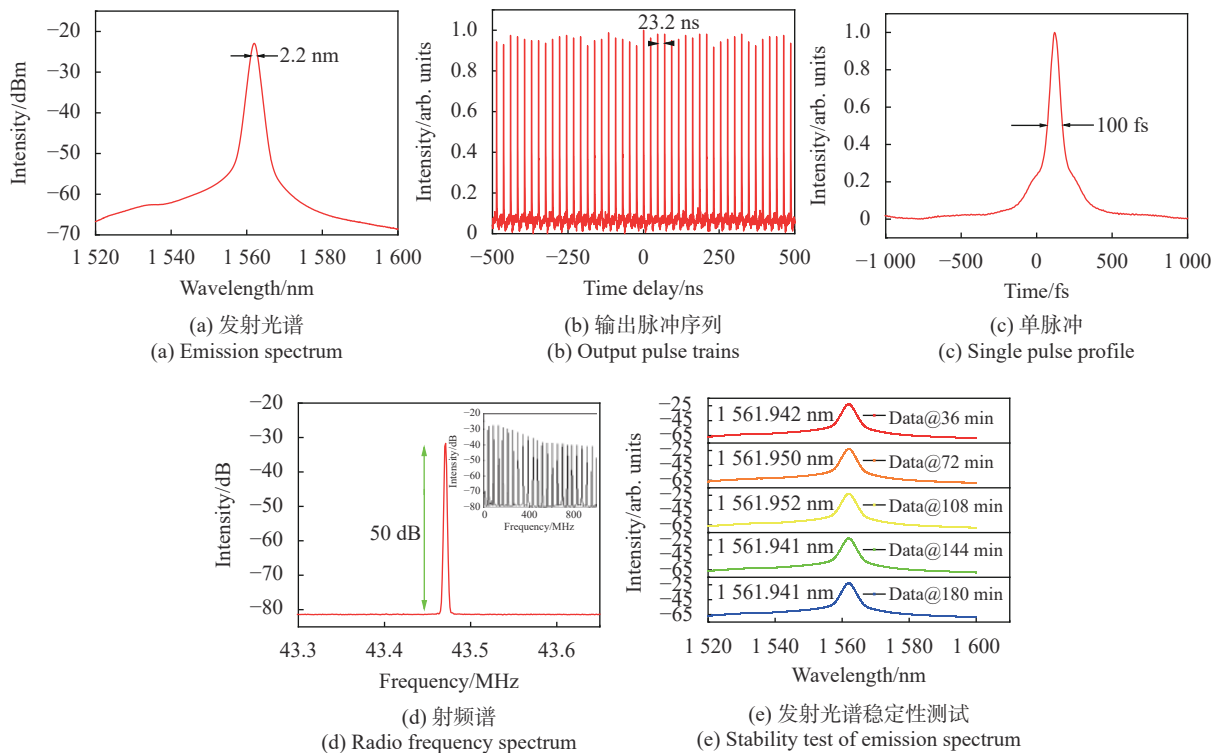


图 6 种子激光器测试数据

Fig.6 Figures of test data of seed laser

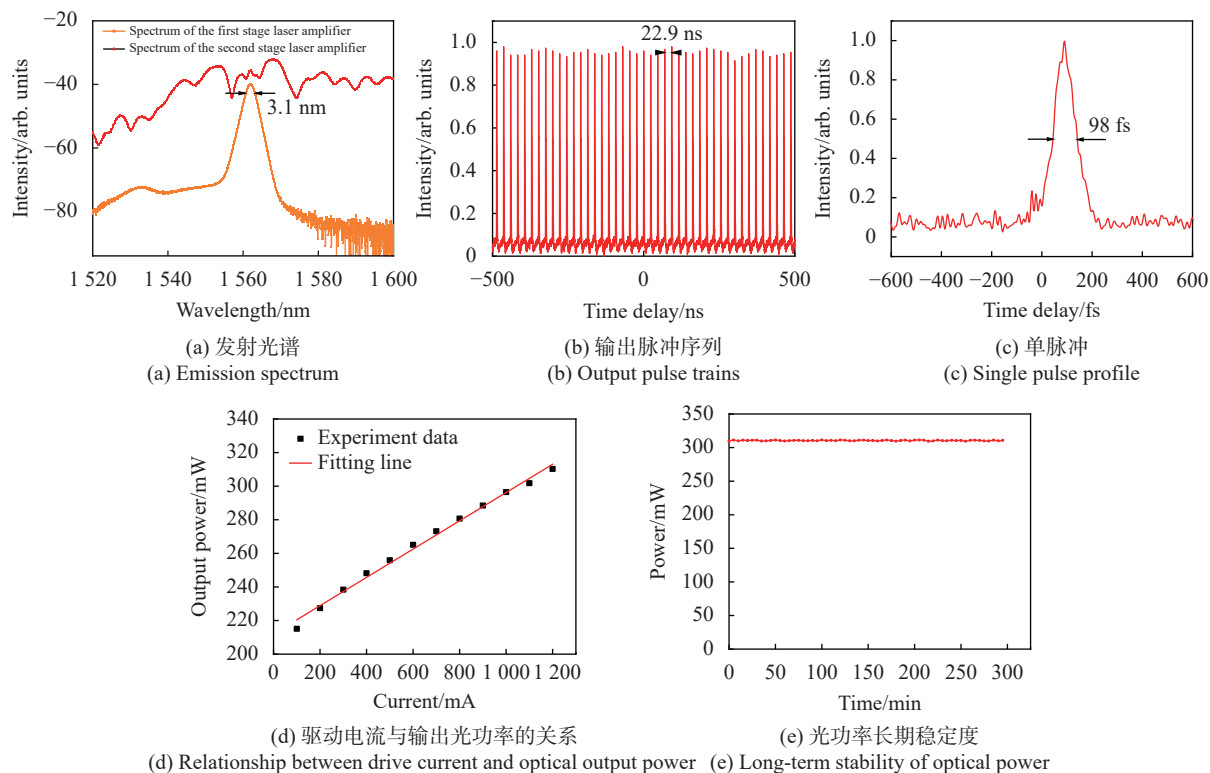


图 7 1.5 μm 飞秒光纤激光器测试数据

Fig.7 1.5 μm femtosecond fiber laser test data

5 结 论

以面向超短脉冲激光器泵浦源的驱动及温度控制为出发点,研制了一种基于嵌入式系统和遗传算法优化的增量式PID算法的多通道驱动系统,实现了对LD的恒温控制、恒流驱动以及输出保护等基本功能。所研制的系统还具有精度高、稳定度高、集成度高及灵活性高等优势。在实际测试中,输出电流稳定度优于0.001%,LD温度稳定度优于0.035%,普遍高于国内现有的LD稳定性(0.1%~1%)指标^[26],能够满足使用需求;将其应用于1.5 μm飞秒光纤激光器中驱动五路LD作为泵浦源,测试种子激光器和激光放大器,输出激光的中心波长稳定,脉冲序列以及单脉冲稳定,激光器输出功率稳定度为0.16%,证实了该驱动系统的性能,在激光器泵浦源驱动系统领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Ren Jun, Wu Sida, Cheng Zhaochen, et al. Mode-locked femtosecond erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602013. (in Chinese)
- [2] Ma Xiaoyu, Zhang Naling, Zhong Li, et al. Research progress of high power semiconductor laser pump source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 120-129. (in Chinese)
- [3] Yang D C, Chu S L, Wang Y F, et al. Frequency upconverted amplified spontaneous emission and lasing from inorganic perovskite under simultaneous six-photon absorption [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2066.
- [4] Li Jinyou, Wang Hailong, Yang Jin, et al. Voltage-temperature characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(8): 971-976. (in Chinese)
- [5] Zhang Peng. Analysis and study of the physical characteristics of a semiconductor laser [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(12): 106-110. (in Chinese)
- [6] Pongrac B, Onlagic D, Njegovec M, et al. THz signal generator using a single DFB laser diode and the unbalanced optical fiber interferometer [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4862.
- [7] Dong Ningning, Cui Jinjiang, Xu Jianguan, et al. Design of control system for 1470-nm high-power semiconductor laser lipolysis device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1896-1903. (in Chinese)
- [8] Lin Xingchen, Zhang Yawei, Zhu Hongbo, et al. 10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 820-825. (in Chinese)
- [9] Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyong, et al. Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505004. (in Chinese)
- [10] Cong Menglong, Li Li, Cui Yangsong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1635. (in Chinese)
- [11] Yan Wanhong, Zhou Yanwen, Yu Di, et al. Temperature control system of semiconductor device and application for infrared gas detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0312002. (in Chinese)
- [12] Research Group of Strategic Research on China's Laser Technology and Its Application by 2035. Strategic research on China's laser technology and its application by 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 1-6. (in Chinese)
- [13] Li Xudong, Mei Feng, Yan Renpeng, et al. Review of burst-mode lasers for high-speed PLIF imaging diagnostics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2116-2126. (in Chinese)
- [14] Quan Wei, Li Guanghui, Chen Xi, et al. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1080-1086. (in Chinese)
- [15] Wei Xiaochao, Ni Xiangdong, ZhaoXin, et al. Feedforward-feedback and PID control of hydraulic speed regulation system based on genetic algorithm [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(11): 21-26. (in Chinese)
- [16] Cuéllar M P, Gómez-Torrecillas J, Lobillo F J, et al. Genetic algorithms with permutation-based representation for computing the distance of linear codes [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60(6): 100797.
- [17] Ramos-Figueroa O, Quiroz-Castellanos M, Mezura-Montes E, et al. Variation operators for grouping genetic algorithms: A review [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, 60(6): 100796.
- [18] Hosseini S A, Shirani A S, Lotfi M, et al. Design and application of supervisory control based on neural network PID controllers for pressurizer system [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 130: 103570.
- [19] Zhou Jinglong, Chen Jun, Song Laijian. PID control method of calender temperature control system optimized by genetic

- algorithm [J]. *Plastics Science and Technology*, 2020, 48(10): 115-118. (in Chinese)
- [20] Meng Zhuo. Research on temperature control of cement rotary kiln based on neural network PID[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] Dai Yuanyuan, Song Limin, Zhong Haiwen, et al. Design of control system of portable dual-wavelength laser therapeutic instrument [J]. *Laser Journal*, 2020, 41(11): 144-148. (in Chinese)
- [22] Kang Zhe. Study on mode-locked fiber lasers based on gold nanorods saturable absorbers and their applications[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [23] Li Nan. Study on widely tunable ultrashort pulse fiber laser around 2 μm and its application[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [24] Liu Jiaying. Femtosecond fiber lasers based on gold nanorods/D-shaped fiber saturable absorber[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [25] Tian Xiaojian, Shang Zuguo, Gao Bo, et al. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
- [26] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong. Design of driving method for low power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 31(10): 135-139. (in Chinese)