

515-nm 大功率激光器控制系统设计

董全睿*, 张振东, 王伟国, 陈 涛, 陈 飞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现激光器稳定且安全地输出, 设计了一款基于 515-nm 的大功率激光器控制系统。首先, 对该系统的泵浦驱动模块进行研究, 利用现场可编程门阵列(FPGA)完成对模块的模拟采样并在数字信号处理(DSP)中完成计算输出, 采用数字 PID 方式完成恒流源的闭环控制; 其次, 使用半导体制冷器(TEC)实现倍频晶体模块的稳定温度控制, 以热敏电阻(NTC)作为反馈实现温度控制; 最后, 设计了激光器的人机交互系统, 实现了对激光器内部状态的实时监测、判断与存储。为了验证控制系统的有效性, 选择一款泵浦进行测试。实验结果表明: 泵浦驱动模块能够持续稳定地工作, 控制系统能够实时监测激光器的内部状态, 安全可靠。倍频后的激光器输出中心波长为 514.98 nm, 功率可达 170 W, 光功率稳定度为 ± 0.07 dB, 并且控制系统的所有器件及设备均 100% 采用国产化, 满足 515-nm 大功率激光器的系统设计需求。

关键词: 光纤激光器; 泵浦驱动; 激光器控制系统

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0133

Control system design of 515-nm high power laser

DONG Quan-rui*, ZHANG Zhen-dong, WANG Wei-guo, CHEN Tao, CHEN Fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: dongquanrui0431@126.com

Abstract: In order to realize the stable and safe output of lasers, a control system based on a 515-nm high-power laser is designed. Firstly, the pump drive module of the system is studied. The analog sampling of the module is completed by Field Programmable Gate Array (FPGA) and the calculation output is completed in Digital Signal Processing (DSP). The closed-loop control of the constant current source is completed by using the digital Proportion-Integral-Derivative (PID) algorithm. Secondly, a Thermo Electric Cooler (TEC) is used to achieve the stable temperature control of the frequency doubling crystal module, and the Negative Temperature Coefficient (NTC) is used as the feedback to realize the temperature control. Finally, the human-computer interaction system of the laser is designed, which realizes the real-time monitoring, judgment and storage of the internal state of the laser. In order to verify the effectiveness of the control system, a pump is selected for testing. The experimental results show that the pump drive module can work continuously and stably, and the control system can monitor the internal state of the laser in real time, which is safe and reliable. The laser output center wavelength after frequency doubling is 514.98 nm, the power can reach 170 W,

收稿日期: 2022-07-18; 修订日期: 2022-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFB3601402)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB3601402)

and the optical power stability is ± 0.07 dB. All devices and equipment for the control system are made in China, meeting the system design requirements of 515-nm high-power laser.

Key words: fiber laser; pump drive module; laser control system

1 引言

光纤激光器由于具有转化效率高、光束质量好以及输出功率稳定等特点,在医学监测、激光加工以及国防军事等领域应用广泛^[1-2]。泵浦源的稳定性是高功率激光器控制系统的关键。目前,市场上多数泵浦源都采用大功率半导体二极管(Laser Diode, LD)作为发光部件,并使用稳定的恒流源为其供电^[3-4]。市场上高端激光器泵浦源及其配套产品主要被国外厂家垄断,价格昂贵且订货周期长。因此,设计一个稳定可靠的激光泵浦源控制系统是大功率激光器的核心功能。此外,由于激光器倍频晶体与基频光的相位匹配对温度变化十分敏感,为了提高激光的转换效率,倍频晶体的精确温度控制也将影响激光器的光束质量^[5]。

为了解决上述问题,本文基于全国产化器件完成大功率激光器的控制系统设计。该控制系统集成了泵浦驱动模块、倍频晶体温度控制模块以及人机交互模块等功能。实验结果显示所设计的控制系统满足 515-nm 大功率激光器的系统设计需求。

2 基本原理与系统组成

2.1 基本原理

光纤激光器由增益光纤、谐振腔和泵浦源 3 部分组成^[6],如图 1 所示。产生激光信号需要同时满足激光阈值、具备粒子束反转和激光增益三方面条件,泵浦源的作用是利用外部能量使增益介质中粒子能级跃迁,当谐振腔内的增益高于损耗时将产生激光震荡,此时才会有激光信号输出^[7]。一般选择掺杂稀土元素的半导体激光器作为泵浦源,其荧光寿命较长,能够实现很高的转换效率。激光器泵浦源激励方式可分为恒定电流与脉冲两种方式^[8]。由于泵浦产品多使用半导体二极管,本文设计的控制系统采用恒流激励的方法驱动激光器泵浦源。因此,泵浦驱动模块本质上就是实

现恒流源的数字控制,同时带有过压保护、短路保护等防护功能。

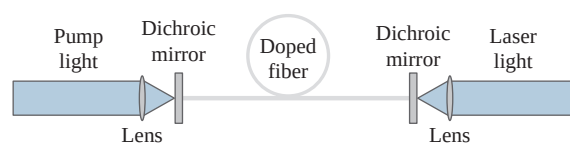


图 1 光纤激光器的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber laser

激光器基频光向倍频光单向不断转换的过程需要使用倍频晶体实现,相位匹配则是提高转换效率的关键,相位匹配包括角度相位匹配和温度相位匹配^[9]。倍频晶体温控模块是通过控制半导体制冷片电流的流向实现对晶体的加热与制冷需求。激光器在出光和停光的瞬间,晶体上热量会发生明显改变。因此,保证激光器的输出功率、光束质量及晶体温度的稳定是激光器控制系统的必要环节。

2.2 系统组成

该激光器控制系统原理框图如图 2 所示,主要包括泵浦驱动模块、倍频晶体温控模块以及人机交互模块等。泵浦驱动模块负责给泵浦源供电,并增加了驱动模块的防护功能。倍频晶体温控模块由倍频晶体、半导体制冷片以及热敏电阻组成,通过控制半导体制冷片上电流的大小与方向达到加热或制冷的作用。人机交互模块选用国

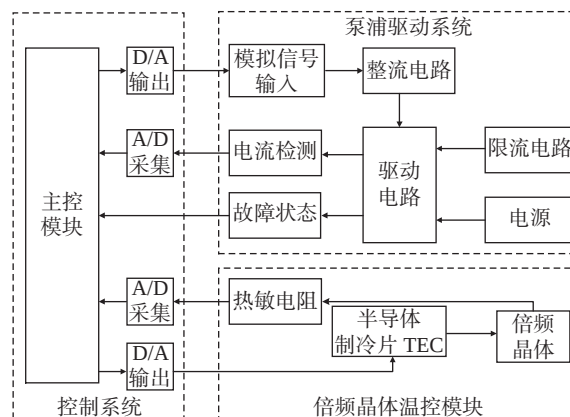


图 2 大功率激光器控制系统原理框图

Fig. 2 Functional block diagram of the high power laser control system

产 DSP+FPGA 的嵌入式系统, 能够完成对激光器的指令执行、状态监督以及数据存储等功能。

3 系统模块设计

3.1 泵浦驱动模块

为了满足激光器的功耗要求以及功率稳定性需求, 设定该激光器的泵浦驱动模块设计指标, 如下: (1) 电流为 0~20 A 连续可调; (2) 电压小于 48 V; (3) 电流纹波峰峰值小于 0.1%。为了减小泵浦驱动模块工作过程中的电路损耗, 采用脉宽调制技术进行驱动。泵浦驱动模块的基本构成如图 3 所示, 泵浦驱动模块主要包含恒流驱动单元、采样单元和控制单元。恒流驱动单元的主要器件为 MOSFET, 采样单元的核心器件为霍尔芯片和 A/D 转换芯片, 控制单元则使用 DSP+FPGA 的硬件结构。泵浦驱动模块工作时采用基于负反馈控制结构, 即: 采样单元得到泵浦驱动模块的输出电流, 通过 A/D 转换为电压信号发送给 DSP, DSP 通过计算得到 PWM 方波, 最后通过驱动单元实现电流调节的目的。

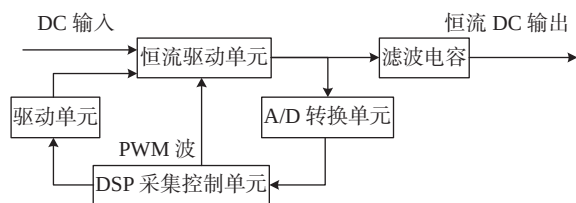


图3 泵浦驱动模块示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the pump drive module

3.2 倍频晶体温控模块

由于倍频晶体对温度变化十分敏感, 因此, 设计一个精准的温控系统十分必要。半导体制冷片是以半导体材料的珀尔帖效应为原理, 串联多组 PN 结制作而成的^[10]。半导体制冷片上下两面是陶瓷电极, 中间是半导体元件, 当直流电源流过半导体制冷片的两个电极时, 其中一面的热量将会被吸收, 然后运送到另一面释放, 从而实现热量传递。制冷量 Q_c 可通过式(1)描述:

$$Q_c = Q_p - \frac{1}{2} Q_j - Q_k = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (1)$$

其中, Q_j 为焦耳热, Q_k 为传导热, α 为热电系数, T_c 和 T_h 分别表示半导体制冷片制冷侧和加热侧的

温度, K 为热传导系数, R 为半导体制冷片的电阻值。

图 4 表示倍频晶体温控模块示意图。可见, 晶体与半导体制冷片表面接触, 晶体温度反馈通过热敏电阻测得, 热敏电阻阻值与温度关系为^[11]:

$$T_1 = \frac{1}{\left[\frac{\ln(R_1/R)}{B} + \frac{1}{T_2} \right]}, \quad (2)$$

式中, T_1 为实际开尔文温度, R_1 为 T_1 温度下的阻值, T_2 为常温开尔文温度, R 为 T_2 温度下的标称阻值, B 值为热敏指数, T_1 对应实际温度 $t = T_1 - 273.15$ 。本温控模块选用在 25 °C 下阻值为 10 kΩ 的热敏电阻, $B=3950$ K。主控模块完成预设温度与实际温度的闭环控制算法, 直流输出到半导体制冷片两端进行调节。半导体制冷片驱动电压为 24 V, 最大电流为 7 A。

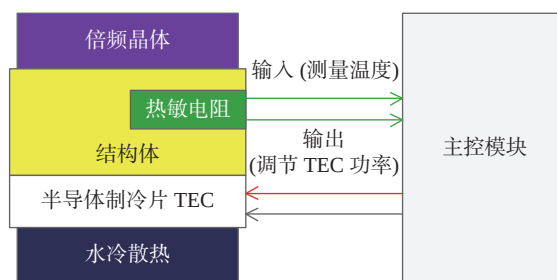


图4 倍频温控模块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the frequency doubling temperature control module

3.3 主控模块

主控模块硬件电路包括主控处理器、主控电源电路、温度检测电路和主控通信电路等。主控模块负责接收上位机指令, 并将指令成功执行至激光器, 使激光器能够稳定工作。同时, 主控模块需要对激光器运行时的工作状态进行实时监测, 及时发现故障, 定位故障并上报故障信息, 确保激光器的工作状态及其使用环境符合需求。主控模块具有 12 路模拟采集通道, 4 路模拟输出通道, 4 路 422/485 串口通信通道, 8 路 232 串口通信通道, 可编程开关 16 路, 所有硬件电路设计均满足国产化需求。

主控处理器选用国产进芯科技 DSP+紫光同创 FPGA, DSP 负责泵浦驱动模块和温控模块控制算法的计算、PWM 方波的产生以及与主控软件通信; FPGA 则负责模拟信号采集, 包括电流信号、温度信号和气压信号等, 此外, FPGA 也兼顾

与外围电路的通信等功能。

控制系统输入电源为 24 V 直流电压, 模拟采集与模拟输出芯片需要 5 V 直流供电, 处理器模块还需要被提供 3.3 V 和 1.8 V 的直流电压。因此, 需要设计电压转换电路, 主电源芯片选自金升阳的隔离型宽电压输入电源模块, 其他辅助电源选用贝岭的降压电源稳压器。

A/D 模拟采集芯片和 D/A 模拟输出芯片均选自核芯互联公司, A/D 转换芯片是 8 通道单端输入电荷再分配逐次逼近型寄存器 (SAR) 型模数转换器, 使用 SPI 兼容接口实现配置寄存器的写入和转换结果的读取。硬件电路通过外围扩展多路复选芯片将模拟采集通道扩展为 12 路, 分辨率为 16 位, 转换速率 200 kSPS。D/A 模拟输出芯片具有 4 路通道, 分辨率为 16 位, 可提供低于 1 LSB 的线性度, 温漂系数最大为 5 ppm/°C, 与主控芯片的数字接口配置为 SPI 模式, 满足激光器控制系统使用需求。

主控系统与上位机之间使用 422 串口通信方式, 为了抑制共模干扰和 EMI 问题, 串口芯片选择金升阳的隔离型差分收发芯片, 传输速率高达 1 Mb/s, 满足系统通信需求。

3.4 软件开发流程

主控系统的工作流程图如图 5 所示。系统上电后首先进行初始化, 包括外设设置、参数初始化和待机初始化设置等。接着进入上电自检状态, 主要包括传感器的温湿度信息、压力信息以及种子源自检, 自检完成后设置晶体温度, 当晶体温度达到预设值之后进入待机状态, 等待上位机发出出光指令。该上位机系统还设置了调试模式, 在调试模式下, 上位机可以通过设置泵浦电流值调节激光器的输出功率, 满足用户的调试需要。系统接到停光指令后, 激光器的泵浦电流值以 0.5 A/s 的速率降为零, 泵浦关闭之后再关闭种子源。当系统出现故障时, 进入中断程序, 上报故障信息给上位机并采取急停方式关闭激光器。

4 测量实验与结果

4.1 泵浦驱动模块测试

为了验证泵浦模块的驱动能力, 对泵浦源进行 $P-I$ 特性测试, 测试温度为 25 °C。实验过程中, 泵浦驱动模块的电流由 1 A 逐渐增加到 20 A,

并且每次供电过程都稳定在 10 min, 记录每个电流值下的光功率。由实验数据可绘制出泵浦源的电流-光功率特性曲线, 如图 6 所示。

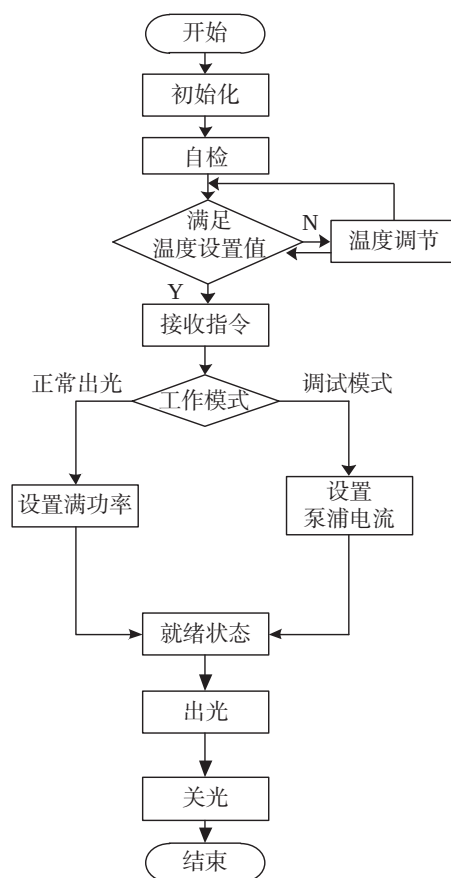


图 5 主控系统工作流程示意图

Fig. 5 Working flow diagram of the control system

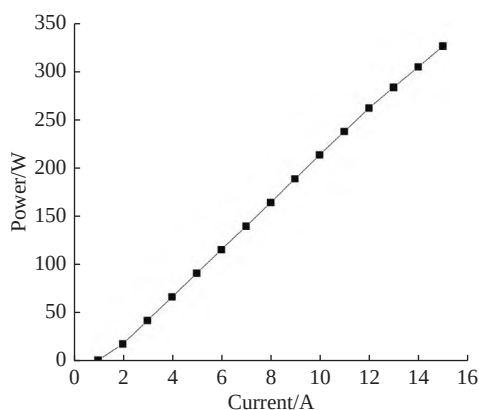


图 6 泵浦源电流-功率特性曲线

Fig. 6 Current-power characteristic curve of the pump source

根据图 6 对电流-功率数据进行最小二乘拟合, 可得到电流-功率的线性相关度为 0.9956。因此, 实验结果表明泵浦源的电流-功率特性曲线具有良好的线性度。

4.2 晶体模块温度测试

在环境温度为 25 °C 的条件下,对晶体进行加热测试,温度设定范围为 40~50 °C,每次设定温度递增 1 °C,每个设定温度值测量 3 次,测量时间间隔为 5 min。测试结果如表 1 所示。

表 1 温度测试结果

Tab. 1 Results of temperature measurements (°C)

Expected temperature	1 st Measured temperature	2 nd Measured temperature	3 rd Measured temperature	Average temperature	[Max error]
40	39.98	40.01	39.99	39.99	0.02
41	41.02	40.99	41.01	41.01	0.02
42	42.03	42.02	41.99	42.01	0.03
43	42.99	42.99	43.01	43.00	0.01
44	44.02	43.97	44.01	44.00	0.03
45	44.99	45.01	45.02	45.01	0.02
46	46.01	45.98	45.99	45.99	0.02
47	47.01	47.03	46.99	47.01	0.03
48	48.01	48.01	47.99	48.00	0.01
49	48.99	48.98	49.01	48.99	0.02
50	50.01	50.03	49.99	50.01	0.03

从表 1 可以看出,实际温度值能够最终稳定在目标温度,温度误差最大为 0.03 °C,满足倍频晶体温控模块需求。

5 结 论

本文为满足 515-nm 大功率激光器稳定工作的要求,设计一款全国产化高稳定度的激光器控制系统。文中首先介绍了该激光器控制系统的工作原理以及系统组成;然后对大功率激光器控制系统的泵浦驱动模块、倍频晶体温控模块和主控模块进行了详细研究;最后,对泵浦源进行上电测试,保证了激光器能够稳定输出,此外,还对倍频晶体模块进行了温度测试。实验结果表明:温度误差最大为 0.03 °C,控制系统能够实时监测激光器的内部状态,安全可靠。倍频后的激光器输出中心波长为 514.98 nm,功率可达 170 W,光功率稳定度为±0.07 dB。该激光器控制系统具有一定的通用性,并且所有元器件完全自主可控,可满足一类激光器控制系统的需求,具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 党文佳,李哲,卢娜,等. 0.9~1.0 μm近红外连续光纤激光器的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 264-274.
DANG W J, LI ZH, LU N, *et al.*. Research progress of 0.9~1.0 μm near-infrared continuous-wave fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 264-274. (in Chinese)
- [2] 石俊凯,王国名,纪荣祯,等. 结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 810-819.
SHI J K, WANG G M, JI R Y, *et al.*. Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 810-819. (in Chinese)
- [3] 陈柄言,于永吉,吴春婷,等. 窄线宽1 064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO: PPLN光参量振荡器[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 361-367.
CHEN B Y, YU Y J, WU CH T, *et al.*. High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO: PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1 064 nm fiber laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 361-367. (in Chinese)
- [4] 王烨,张岩,秦莉,等. 高功率半导体激光器列阵封装引入应变的测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1951-1958.
WANG Y, ZHANG Y, QIN L, *et al.*. Measurement of packaging-induced strain in high power diode laser bar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1951-1958. (in Chinese)
- [5] 任乐燕. 非线性晶体温度控制系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
REN L Y. *Research of temperature control system for nonlinear crystal*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 黄超,马连英,朱峰,等. 陶瓷表面放电光泵浦源放电特性研究[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1321-1328.
HUANG CH, MA L Y, ZHU F *et al.*. Discharge characteristics of optical pumping source by ceramic surface discharge[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1321-1328. (in Chinese)
- [7] ERICKSON C J, VAN ZIJLL M, DOERMANN G, *et al.*. An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7): 072107.
- [8] 田小建,尚祖国,高博,等. 980 nm高稳定度激光泵浦源控制系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 982-987.

- TIAN X J, SHANG Z G, GAO B, *et al.*. Control system for 980 nm high stability laser pump source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
- [9] 谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.
- TAN G J, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512. (in Chinese)
- [10] 王镇锐, 张兴斌, 温世喆, 等. 结合TEC的泵驱两相温控系统的空间应用[J]. 宇航学报, 2018, 39(10): 1176-1184.
- WANG ZH R, ZHANG X B, WEN SH ZH, *et al.*. Space applications of pumped two-phase temperature control system combined with TEC[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(10): 1176-1184. (in Chinese)
- [11] 张元飞, 樊绍巍, 刘宏, 等. 面向高温的NTC温度检测系统设计优化及标定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(1): 18-23.
- ZHANG Y F, FAN SH W, LIU H, *et al.*. Optimal design and calibration of NTC thermistor based temperature measurement system for high temperature application[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(1): 18-23. (in Chinese)

作者简介:



董全睿(1992—), 男, 吉林长春人, 工学博士, 2014 年于吉林大学获得学士学位, 2020 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光电精密跟踪测量技术方面的研究。E-mail: dongquanrui0431@126.com