

## 新型小功率半导体激光器驱动及温控电路设计

杨 涛, 李武森, 陈文建

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了应对带钢激光平直度测量仪中半导体激光器 (LD) 输出光功率稳定性对平直度测量精度的影响问题, 设计了一款高稳定度的 LD 恒流驱动、温控电路以及保护电路。系统以现场可编程门阵列 (FPGA) 为控制核心, 利用深度负反馈恒流驱动电路实现对 LD 驱动电流的精准控制; 基于 ADN8830 温控电路实现了对 LD 工作温度的有效控制; 改进后的慢启动电路可实现 LD 驱动电流缓慢地线性增加到设定值, 且准确控制慢启动时间; 限流及静电保护电路能够实现激光器过流保护、有效避免浪涌电流和高压静电的损坏。结果表明, 该电路可实现激光器驱动电流在 0~75 mA 连续可调, 电流调节精度达 0.025 mA, 电流短期稳定度达 0.014%, 长期稳定度达 0.016%; 在控制工作温度为 25 °C 时, 输出光功率稳定性为 0.205%。

**关键词:** 半导体激光器; 恒流驱动; 温度控制; FPGA; 高稳定度

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210764

## Design of new-style driving and temperature control circuit for low power diode laser

Yang Tao, Li Wusen, Chen Wenjian

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to deal with the influence of the stability of the output optical power of diode laser (LD) on the flatness measurement accuracy of the strip laser flatness measuring instrument, a high stability diode laser constant current driving circuit, temperature control circuit and protective circuit were designed. FPGA was used as the system control core. Based on the principle of deep negative feedback, the accurate current control was achieved by the constant current driving circuit. The effective control of LD operating temperature was realized by temperature control circuit based on ADN8830. Driving current was slowly and linearly increased to preset value by improved slow-start circuit, and the slow-start time can be controlled precisely. High reliability and high security were realized by current limiting and electrostatic protection circuit. The results show that the driving current can be adjusted continuously from 0 to 75 mA, the adjustment accuracy can reach 0.025 mA, the short-term stability of current can reach 0.014% and the long-term stability can reach 0.016%. When the operating temperature is controlled at 25 °C, the stability of the output optical power is 0.205%.

**Key words:** diode laser; constant current driving; temperature control; FPGA; high stability

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2021-11-05

作者简介: 杨涛, 男, 硕士生, 主要从事半导体激光器驱动控制方面的研究。

导师简介: 李武森, 男, 副教授, 研究生导师, 博士, 长期从事光纤光学、光电传感器以及数字图像处理方面的科研与教学工作。

## 0 引言

半导体激光器 (LD) 具有体积小、寿命长、高亮度、方向性好等优点, 被广泛应用于光学精密测量、光通信、光存储、军工、医学诊断等领域<sup>[1-4]</sup>。但 LD 是一种极其脆弱的结型器件, 对电流和温度变化十分敏感, 电流的微弱变化和温度变化会对 LD 的输出波长、阈值电流及输出功率稳定性产生明显影响<sup>[5-6]</sup>。

目前, 国内外很多企业及高校对激光器驱动控制系统投入研究, 并取得一定成果。美国 ILX Lightwave 公司的 LDX-3220 激光器驱动电源的输出电流稳定度小于 0.002%, 电流调节精度为 0.01 mA。Wavelength 公司生产的激光器电流源 PLD200 的输出电流稳定度小于 0.01%, 控制精度达 0.1 mA。吉林大学丛梦龙等设计了双场效应晶体管 (MOSFET) 电路, 减小漏电流引起的偏差, 改善了电流和电压之间的线性度<sup>[7]</sup>。中国计量大学罗亮等<sup>[8]</sup>设计的 LD 恒流驱动及温控电路可实现驱动电流 0 A~100 mA 可调, 电流稳定度达到 0.02%, 温控最大误差为 0.03 °C。太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西重点实验室<sup>[9-11]</sup>实现了对不同型号热电制冷器 (TEC) 激光器的温控和高稳定度高精度的双通道电流驱动, 但缺少激光器保护电路的设计。

在带钢平直度测量系统中, 半导体激光器作为发射光源垂直照射在被测带钢表面, CMOS 传感器接受光斑反射信号并将其变为电信号, 再经系统数字转换及处理后传输给上位机, 上位机根据接收到的光斑信息求解带钢平直度。此过程中, LD 输出功率的稳定性将直接决定光斑定位的准确度, 进而影响平直度的测量结果。因此, 高稳定性的半导体激光器驱动电路尤为重要。

根据上述要求, 文中设计了一种基于 FPGA 的新型半导体激光器恒流驱动及温度控制电路。首先, 通过 LD 电流的闭环负反馈来控制其输出功率; 其次, 利用温控芯片 ADN8830 保证 LD 工作在恒温环境中, 以此减小温度波动对 LD 光输出特性的影响; 还设计了相应的保护电路, 有效地对 LD 进行保护, 使其能在具有复杂强电磁干扰的热轧带钢生产车间正常工作。

## 1 电路总体设计方案

### 1.1 激光器的选型

激光器作为热轧带钢平直度测量系统的发射光

源, 它的性能参数将对后级 CMOS 传感器的光斑信号采集、处理以及整个系统的测量精度有着重要影响<sup>[12]</sup>。在该系统中, 主要考虑激光器发光强度、波长以及方向性的影响。首先, 线阵 CMOS 传感器采集被测带钢的反射信号, 只有足够的发光强度才能够为 CMOS 传感控制模块提供好的信噪比和灵敏度; 其次, 在系统检测过程中带钢处于红热状态, 为了便于调试, 应选取易于人眼识别的激光颜色; 最后, 激光器的方向性越好就会获得越小的聚焦光斑, 且聚焦光斑的能量密度越高, 所以应选取方向性好、高亮度的激光器<sup>[13]</sup>。

综合考虑系统需求, 选取德国 OSRAM 公司的 PLT5-450B 蓝色单横模半导体激光器作为发射光源。PLT5-450B 的发射波长为 450 nm, 输出功率为 80 mW, 阈值电流为 17 mA, 工作电压范围为 5.2~6.5 V, 工作温度范围为 -40~70 °C。在恒定温度条件下, 当 LD 工作电流大于阈值电流时, LD 输出功率与工作电流具有良好的线性关系。

### 1.2 总体设计方案

如图 1 所示, 整个设计主要包括驱动电路和恒温控制电路两部分, 采用 XILINX 公司的 Spartan6 系列 XC6SLC16-2CSG324 芯片作为核心处理器。恒流驱动电路由负反馈积分电路、差分放大电路、采样电路、慢启动电路、限流及静电保护电路等构成。温控电路的控制核心为温控芯片 ADN8830, 电路主要包括测温电路、TEC 驱动电路、PID 补偿电路等。系统采用 RS422 串口与上位机通信, 保证信息传输的稳定性, FPGA 主要负责驱动数模转换器 (DAC) 输出限流电压  $V_{lim}$ 、恒流控制电压  $V_i$ 、温控电压  $V_{temp}$ , 对来自模数转换器 (ADC) 的工作电流及温度数据进行 PID 控制处理, 并控制 LCD12864 显示屏实时显示。

## 2 驱动电路设计

### 2.1 线性慢启动电路

在 LD 开关的瞬间, 浪涌电流会对其造成损伤<sup>[7]</sup>, 为避免此现象, 必须设计慢启动电路, 使得 LD 的驱动电流从零缓慢地线性增加到设定值。在 LD 驱动电路中常使用 RC 充放电慢启动技术, 传统 RC 慢启动电路虽然能够消除浪涌电流的冲击, 但是在慢启动过程中电压上升斜率变化过大, 导致慢启动时间难以准确控制。根据电容的电压与电流的关系:

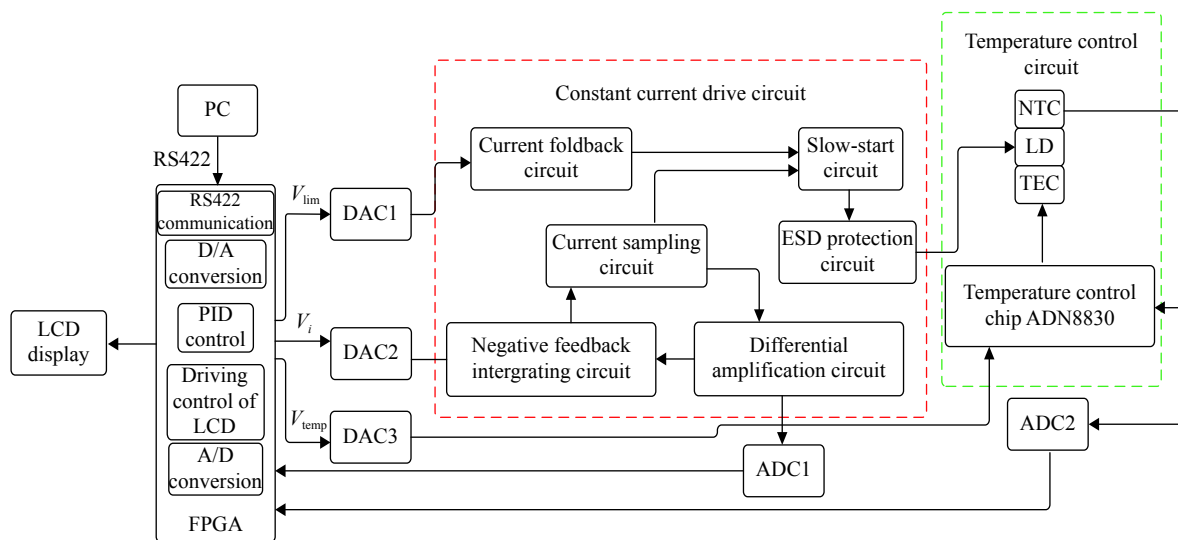


图 1 总体设计框图

Fig.1 Block diagram of overall design

$$c \frac{du}{dt} = i \quad t \geq 0 \quad (1)$$

则电容的电压可表示为:

$$u = \frac{1}{c} \int_0^t idt \quad t \geq 0 \quad (2)$$

由公式 (2) 可知,若电容的电流为一个定值,则可实现电容电压  $u$  线性增长。基于此原理,设计了一种线性慢启动电路,如图 2 所示,  $V_1$  为供电电源,  $U_2$  为 2.5 V 的基准电压源,通过  $R_1$  获得 2.5 V 电压,  $U_1$  为通用运算放大器,  $Q_5$  为恒定电流输出三极管,电容  $C_2$  实现电流的  $I-V$  转换,  $U_3$  为电压跟随器,用来提高驱动能力。工作原理是,  $R_2$  上的电压与  $U_2$  的电压进行比较,由此控制  $Q_5$  输出设定的电流,通过改变  $R_2$  和  $C_2$  的大小即可改变慢启动时间。将电压跟随器

的输出端连接至 2.2 节恒流驱动电路中  $U_5$  的输出端,即可控制 LD 工作电流从零线性增加到设定值。瞬态仿真结果如图 3 所示,设置  $R_2$  为 100 k $\Omega$ ,  $C_2$  为 10  $\mu$ F,

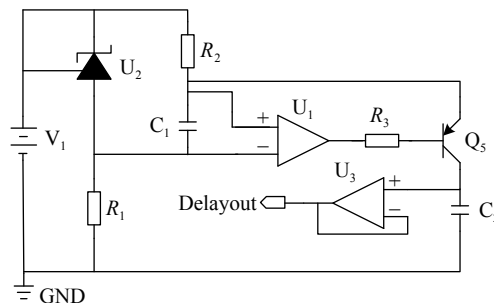
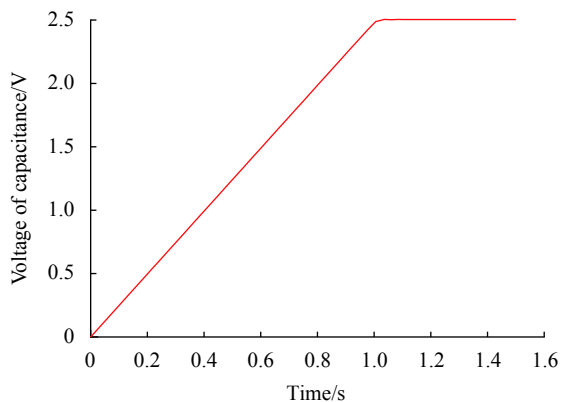
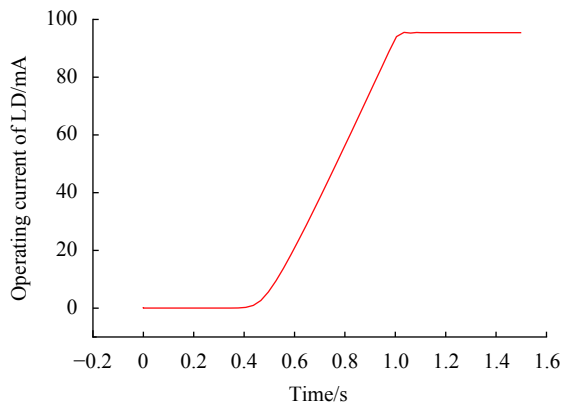


图 2 恒流线性慢启动电路

Fig.2 Constant current linear slow-start circuit



(a) 电容  $C_2$  两端的电压波形  
(a) Voltage waveform at both ends of capacitor  $C_2$



(b) LD 的工作电流仿真波形  
(b) Simulation waveform of LD's operating current

图 3 慢启动电路仿真结果

Fig.3 Simulation results of slow-start circuit

C<sub>2</sub> 的电压线性增大,慢启动时间为 1.02 s。

### 2.2 恒流驱动电路设计

LD 的恒流驱动电路设计原理如图 4 所示。将采样电阻 R<sub>s</sub> 与 LD 串联实现流经 LD 电流的 I-V 转换,再通过差分放大器 U<sub>4</sub> 将采样电压进行放大,U<sub>4</sub> 选用 TI 公司的高速精密差分运算放大器 INA143,增益误差仅 0.01%。放大后的采样电压 V<sub>f</sub> 通过电阻 R<sub>1</sub> 连接至 U<sub>5</sub> 的反相输入端,U<sub>5</sub> 的输出端和反相输入端之间通过电容 C<sub>1</sub> 引入深度负反馈,构成深度负反馈积分电路。控制电压 V<sub>i</sub> 连接至 U<sub>5</sub> 的同相输入端,利用积分电路对电容 C<sub>1</sub> 进行充放电,从而调整 U<sub>5</sub> 输出电压的大小。当 V<sub>i</sub> > V<sub>f</sub> 时,电路对 C<sub>1</sub> 进行充电,U<sub>5</sub> 输出电压增大;当 V<sub>i</sub> < V<sub>f</sub> 时,C<sub>1</sub> 放电,U<sub>5</sub> 输出电压减小;当 V<sub>i</sub> = V<sub>f</sub> 时,C<sub>1</sub> 停止充放电,U<sub>5</sub> 输出电压稳定,即保证 LD 工作电流稳定。U<sub>5</sub> 选用 ADI 公司的低失真、低噪声的精密运放 AD8599。由于 AD8599 的输出能力有限,所以利用三极管设计功率放大电路,使得三极管工作在放大区,实现功率放大。负反馈积分电路的输出电压通过控制三极管 Q<sub>1</sub> 的基极电流,进而控制 LD 工作电流的大小。

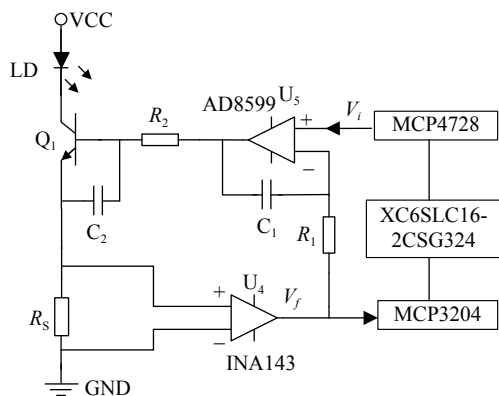


图 4 恒流驱动电路

Fig.4 Constant current drive circuit

为防止电路产生自激振荡,在三极管的基极和发射极之间并联一个陶瓷电容 C<sub>2</sub>。在恒流驱动模式下,LD 驱动电流的稳定性和控制精度主要由采样电阻的温度系数和基准电压的稳定度决定<sup>[14-15]</sup>。文中设计选用 0.1% 精度、稳定度为 ±0.5%、阻值为 2 Ω 的采样电阻。需注意的是,在 PCB 布局时应使采样电阻远离三极管等发热严重的元器件,避免温度影响采样精度。电路中的 DAC、DAC 芯片采用 Microchop 公司的 4 通道 12 位 MCP4728 及 MCP3204,分别由芯片内

部和外部电源电路提供 2.048 V 参考电压。

根据图 4 可知,经差分运放 INA143 的输出电压 V<sub>f</sub> 大小为:

$$V_f = I \cdot R_s \cdot G \quad (3)$$

式中: R<sub>s</sub> 为采样电阻 2 Ω; I 为 LD 的工作电流; G 为 INA143 放大倍数, G = 10。

根据运放“虚短”特性可知:

$$V_{U_{5+}} = V_{U_{5-}} \quad (4)$$

$$V_{U_{5+}} = V_i \quad (5)$$

$$V_{U_{5-}} = V_f \quad (6)$$

由公式 (3)~(6) 可得通过 LD 的工作电流为:

$$I = \frac{V_f}{G \cdot R_s} = \frac{V_i}{20} \quad (7)$$

系统采用的 12 位 DAC 输出 V<sub>i</sub>, DAC 的参考电压为 2.048 V, 则可得 LD 工作电流的最小调节量 I<sub>lim</sub> 表达式如公式 (8):

$$I_{lim} = \frac{V_{ref}}{2^{12} \times 20} \quad (8)$$

则 LD 工作电流的控制精度可达 0.025 mA。

### 2.3 限流及静电保护电路

为避免驱动电流过大对 LD 造成不可逆的损伤,设计了如图 5 所示的限流保护电路。电路主要是由两个恒流驱动电路与 LD 串联构成,当控制电压 V<sub>i</sub> 大于限流电压 V<sub>lim</sub> 时,LD 的工作电流为 V<sub>lim</sub>/20; 当控制电压 V<sub>i</sub> 小于限流电压 V<sub>lim</sub> 时,LD 的工作电流为 V<sub>i</sub>/20。

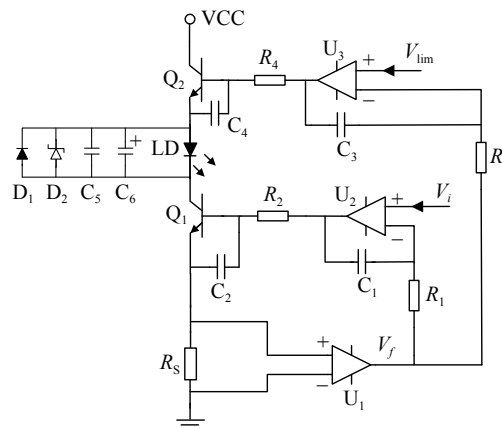


图 5 限流及静电保护电路

Fig.5 Current limiting and electrostatic protection circuit

此外, 半导体激光器极易受静电或反向浪涌电流的冲击, 保护电路设计必不可少。在 LD 两端并联上二极管  $D_1$ 、单向瞬态抑制二极管  $D_2$ 、容值小的陶瓷电容  $C_5$ 、容值大的电解电容  $C_6$ , 以达到吸收反向电流和反向电压的作用。

### 2.4 温控电路设计

如图 6 所示, 整个温控系统采用闭环控制结构, ADN8830 芯片通过由负温度系数 (NTC) 热敏电阻构

成的 H 桥测温电路感应 LD 的温度变化, 测温电路的采样电压与目标温度对应的电压值进行比较产生偏差信号, 再经 PID 补偿网络得到一个优化后的调节量; 最后, ADN8830 通过采用脉冲宽度调制 (PWM) 控制 MOSFET 的通断或线性输出相结合的方式调节 TEC 的电流大小和方向, 进而控制其制冷或制热<sup>[16]</sup>, 使得 LD 工作在目标温度下。该方法既减小了电流纹波又提高了效率。温控电路实物如图 7 所示。

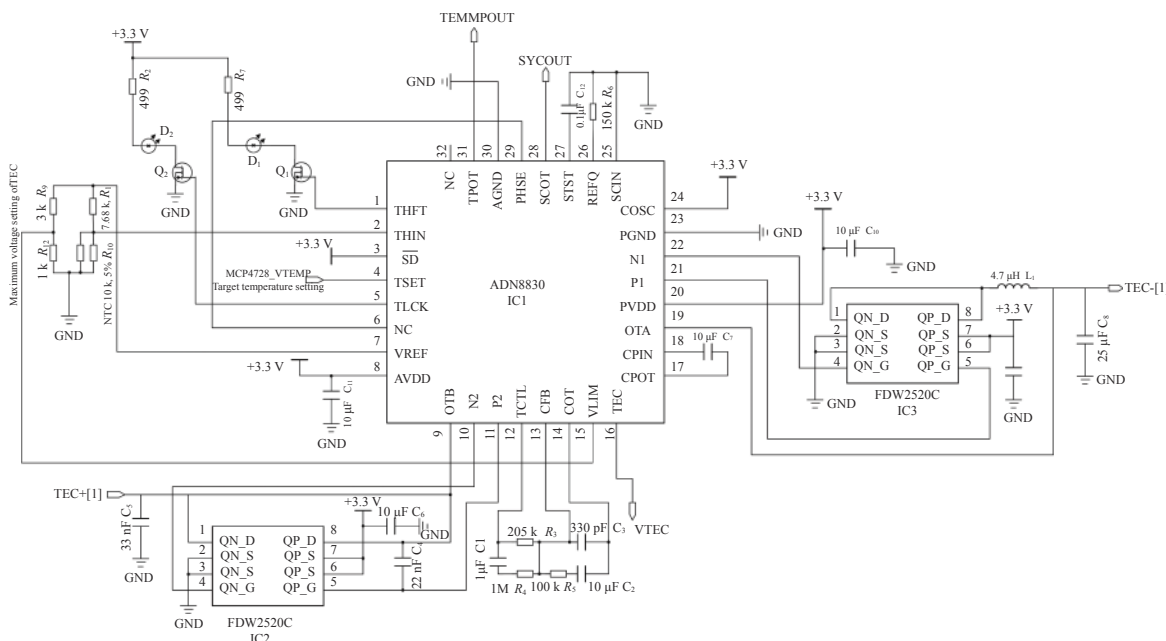


图 6 温度控制电路原理图

Fig.6 Schematic diagram of temperature control circuit

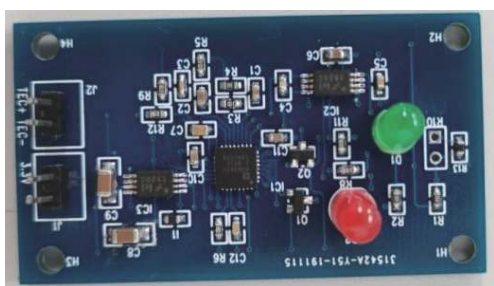


图 7 温控电路实物图

Fig.7 Physical drawing of temperature control circuit

### 3 FPGA 软件设计

FPGA 芯片具有资源丰富、运行速度快等优点, 将其作为热轧带钢平直度测量系统的控制核心, 不仅可以稳定地控制激光光源输出功率, 还可以满足 CMOS 传感通信模块实时进行大量数据高速处理的

需求。在 FPGA 控制模块中, 主要有 PID 控制算法、LCD12864 显示控制、RS422 通信、A/D 转换控制、D/A 转换控制。

具体工作流程为: 首先上电后对系统各模块初始化, 上位机通过 RS422 通信设置目标电流和目标温度; 然后 D/A 转换模块将其转化为模拟电压输出, 完成电流及温度设置。其次, A/D 转换模块将采集的电流和温度从模拟信号转换为数字信号, 并传递给 LCD12864 显示模块实时显示。同时, 将采样值与目标值进行对比, 若采样值与目标值一致, 则无需调整输入控制信号, 若采样值与目标值存在偏差, 根据偏差进行 PID 控制算法处理, 经 PID 控制算法优化后的控制信号重新对 D/A 模块赋值。FPGA 内部控制流程如图 8 所示。

设计增量式 PID 控制模块对激光器的驱动电流



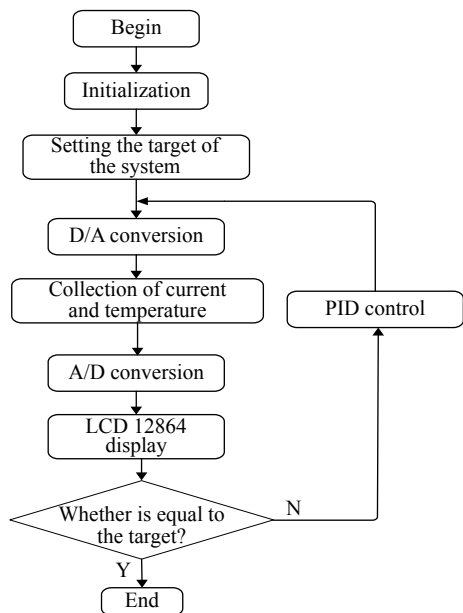


图 8 软件控制流程图

Fig.8 Flow chart of software control

和温度进行调节,实验时可以使用 Ziegler-Nichols 整定法来调整 PID 参数的大小。PID 数学模型如公式 (9) 所示,其中  $u(x)$  为 PID 输出控制量,  $e(k)$ 、 $e(k-1)$  为偏差信号,  $k_p$  为比例系数、 $k_i$  为积分系数、 $k_d$  为微分系数。

$$u(x) = k_p e(k) + k_i \sum e(j) + k_d(e(k) - e(k-1)) \quad (9)$$

$$u(x-1) = k_p e(k-1) + k_i \sum e(j) + k_d(e(k-1) - e(k-2)) \quad (10)$$

两式相减可得增量式 PID 数学表达式为:

$$\Delta u(x) = k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) - e(k-2)) \quad (11)$$

如图 9 所示为系统的 PID 控制模块的 RTL 图。PID 控制模块内部有三个子模块,分别是计算偏差的 Error 模块、计算 PID 增量  $\Delta u(x)$  的 Incre\_value 模块,以及计算 PID 控制输出值  $u(x)$  的 Pid\_value 模块。

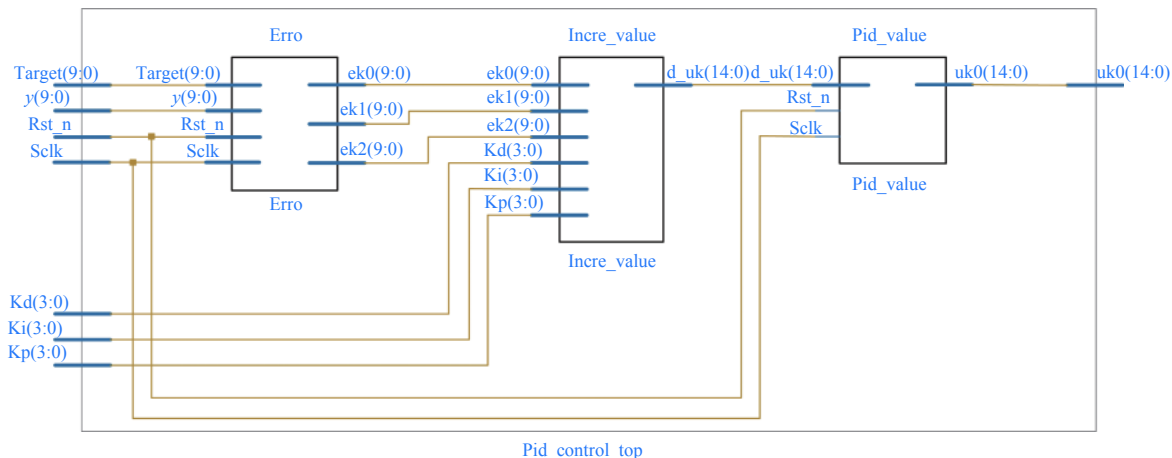


图 9 增量式 PID 控制模块 RTL 图

Fig.9 RTL diagram of incremental PID control module

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 恒流输出特性实验

图 10 为 LD 驱动控制系统测试平台。由 PLT5-450B 激光器的数据手册可知,该激光器的额定工作电流范围为 0~75 mA,则根据公式 (7) 可得,对应控制电压范围为 0~1 500 mV。实验时使用 KEITHLEY-2110 数字万用表测量采样电阻两端电压,进而得到 LD 实际工作电流大小,实验数据如表 1 所示。

根据实验数据,使用最小二乘法对控制电压和 LD 工作电流进行拟合,拟合曲线如图 11 所示。一阶

拟合方程为:

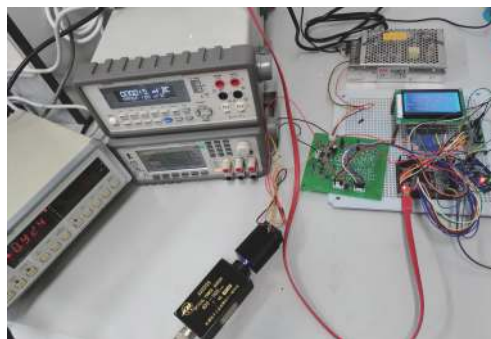


图 10 LD 驱动控制系统测试平台

Fig.10 Experimental platform of diode laser drive control system

表 1 控制电压与工作电流的线性实验数据

Tab.1 Linearity measurement data of control voltage and operating current

Item	Value							
Control voltage/mV	0	106.89	205.96	306.09	405.06	505.71	606.91	707.82
Operating current/mA	0.045	5.377	10.313	15.293	20.233	25.2405	30.273	35.308
Control voltage/mV	807.75	907.87	1007.2	1108.0	1207.4	1309.1	1409.1	1508.0
Operating current/mA	40.285	45.269	50.215	55.240	60.19	65.255	70.24	75.17

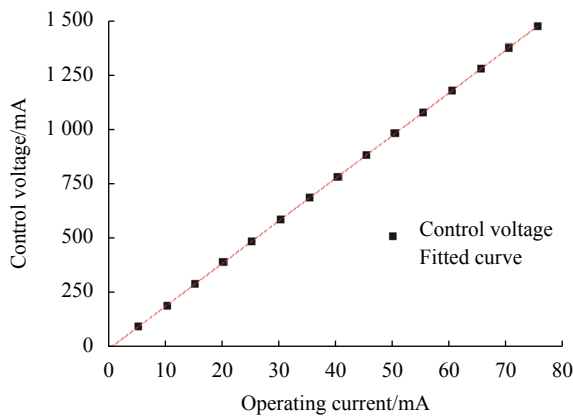


图 11 控制电压与工作电流拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of control voltage and operating current

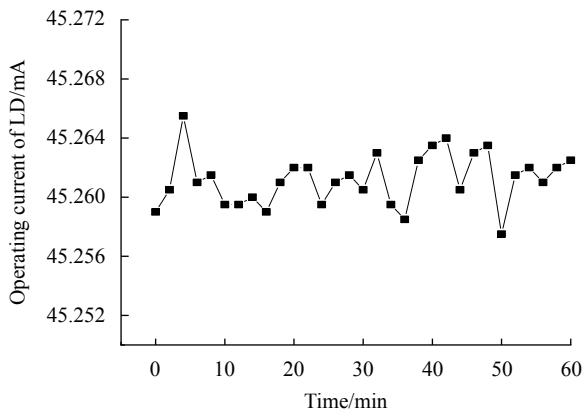
$$u_{set} = 20.07872 \cdot I - 1.16085 \quad (12)$$

由线性度计算公式求得控制电压与 LD 工作电流线性度为:

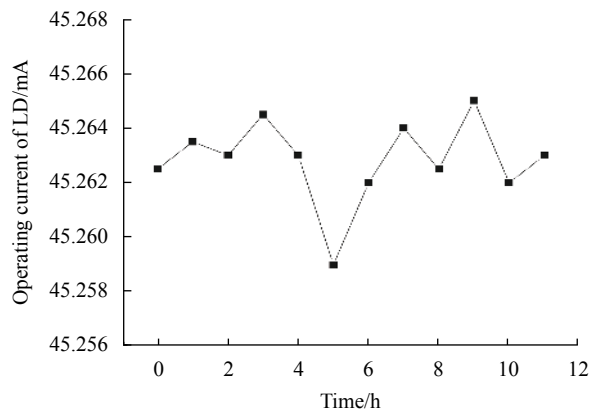
$$\gamma_1 = \frac{\Delta I_{max}}{I_{max}} \times 100\% = \frac{0.23}{75.4} \times 100\% \approx 0.305\% \quad (13)$$

式中:  $\Delta I_{max}$  为实际电流与设置电流最大偏差;  $I_{max}$  为最大电流设置值, 从结果可看出控制电压与 LD 工作电流线性度良好。

对恒流驱动电路的工作电流短期稳定性和长期稳定性进行测试, 预设 LD 工作电流为 45.25 mA, 分别每隔 2 min 和 0.5 h 记录一次测量结果, 实验结果如图 12(a)、(b) 所示。



(a) 电流短期稳定度  
(a) Short-term stability of current



(b) 电流长期稳定度  
(b) Long-term stability of current

图 12 LD 的电流稳定度

Fig.12 Current stability of LD

根据实验数据, 由稳定度计算公式  $\gamma = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_0}$

可得, LD 驱动电流短期稳定度为 0.014%; 长期稳定度 (12 h) 为 0.016%。其中,  $I_{max}$  为实际电流最大值,

$I_{min}$  为实际电流最小值,  $I_0$  为驱动电流理论值。

#### 4.2 半导体激光器输出功率稳定性实验

为测试恒流驱动电路及温控电路对 LD 输出光功率的影响, 设定工作温度为 25 °C, 使用机械电子工业

部第四十一研究所 AV2495 光功率计每 5 min 测一次 LD 的输出光功率, 连续监测 1 h, 测量结果如图 13 所示。

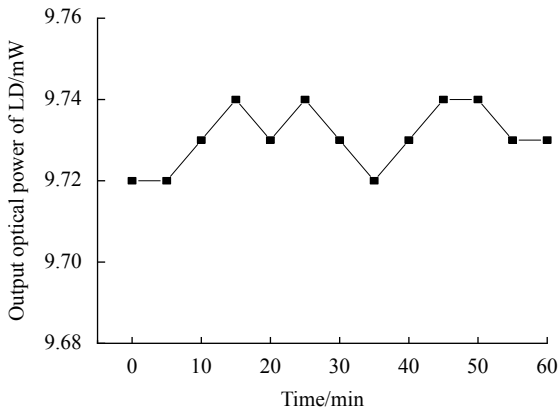


图 13 输出光功率稳定度  
Fig.13 Stability of the output optical power

实验结果表明, LD 输出光功率稳定度为 0.205%。

## 5 结束语

文中设计了一款以 FPGA 为控制核心的 LD 驱动控制系统, 通过模拟、数字两种方式对驱动电流和温度进行快速稳定的控制。恒流驱动电路利用深度闭环负反馈原理实现激光器工作电流的高精度高稳定度控制。温控电路使用 ADN8830 作为主控芯片, 通过模拟 PID 补偿网络及 TEC 驱动电路使得 LD 工作在恒温环境下。线性慢启动电路可控制驱动电流从零缓慢线性增大到设定值, 从而有效防止了浪涌电流的冲击, 并精确控制启动时间。限流电路将 LD 的工作电流限制在最大允许电流值之下, 静电保护电路能保护 LD 免受高压静电的损坏。实验结果表明, 文中设计的电路可实现对 LD 驱动电流的高稳定控制, 保证了其输出光功率的稳定性, 满足热轧带钢激光平直度测量系统的需求。

### 参考文献:

[1] Xu Wenhai, Yang Mingli, Zhu Wei. Development of a laser diode driving based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 368-372. (in Chinese)

[2] Wang Qiming. The breakthrough and development of semiconductor laser in China [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2190-2197. (in Chinese)

[3] Wang De, Li Xueqian. New progress in semiconductor lasers

and their applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(3): 279-283. (in Chinese)

[4] Tian Yaling, Li Chuangshe, Zhang Chaoyang. High precision and high stability diode laser constant current drive power supply [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(3): 1-5. (in Chinese)

[5] Xu Wenhai, Yang Mingli, Tang Wenyan. Development of multifunctional laser diode driving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 465-468. (in Chinese)

[6] Zhong Qirun, Jiang Haiming, Dai Junke, et al. Development status of diode laser controller [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(5): 52-54. (in Chinese)

[7] Cong Menglong, Li Ni, Cui Yansong, et al. Design of high stability digital drive power supply for diode laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1636. (in Chinese)

[8] Luo Liang, Hu Jiacheng, Wang Chanyuan, et al. Design of high precision driving power supply and temperature control circuit for diode laser [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 200-204. (in Chinese)

[9] Yang Shuaijun, Zhang Jianzhong, Liu Yi, et al. Design of precise temperature control and driving circuit for chaotic laser [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2018, 35(5): 516-522. (in Chinese)

[10] Yu Xiaoyu, Wang Xing, Zhang Jianzhong, et al. Design of driving circuit for chaotic lasers with different thermoelectric coolers [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2019, 36(5): 544-550. (in Chinese)

[11] Xu Wenmin, Yang Qiang, Wang Xing, et al. Design of high stability control system for chaotic semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0714008. (in Chinese)

[12] Li Ziqi, Chen Wenjian, Li Wusen. Research on photoelectric measurement method for filament diameter based on FPGA[C]//SPIE, 2019, 10839: 108390D.

[13] Zhang Mengli. Design of laser on-line flatness meter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[14] Deng Jun. Study of drive modes and reliability on semiconductor laser [D]. Changchun: Jiling University, 2008. (in Chinese)

[15] Zhou Zhen, Qi Zhongliang, Qin Yong. Design of driving method for low power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2689-2693. (in Chinese)

[16] 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)