

文章编号: 1001-3806(2013)04-0541-06

用于光纤测量的 1310nm/1550nm 半导体激光驱动电源

廖 平, 莫少武

(中南大学 机电工程学院 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 为了实现光纤的精确快速测量, 设计了一种高稳定功率连续可调的 1310nm/1550nm 半导体激光驱动电源。该电源采用电流串联负反馈技术组成精密恒流源驱动半导体激光二极管, 恒温控制电路驱动半导体制冷器, 从而保证了激光器输出功率的稳定。控制器局域网络总线电路实现激光源的功率连续可调及激光的选择, 通过变速积分 PID 控制算法消除了积分饱和, 加速系统温度的稳定。采用激光保护和软启动电路, 实现半导体激光器可靠稳定运行。结果表明, 半导体激光器工作在室温 25℃ 时, 温度稳定性达 $\pm 0.01^\circ\text{C}$, 激光长期输出功率稳定度达 $\pm 0.018\text{dB}$ 。相对于传统的 1310nm/1550nm 半导体激光光源, 该光源稳定性高、稳定速度快、体积小, 方便光纤在线测量。

关键词: 激光技术; 激光电源; 恒温控制; 比例-积分-微分; 控制器局域网络总线

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.028

1310nm/1550nm semiconductor laser power supply for the optical fiber measurement

LIAO Ping, MO Shao-wu

(State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A high stability and continuously adjustable 1310nm/1550nm semiconductor laser power supply was designed for accurate and rapid measurement of the optical fiber. The laser power supply uses precision constant current source to drive the semiconductor laser diodes by applying the current negative feedback control technology and constant temperature control circuit to drive thermoelectric coolers, and ensures the stability of the laser output power. The controller area network bus circuit realizes continuous power adjustment and laser source selection, and variable integration proportion-integration-differentiation algorithm eliminates the integral saturation and accelerates the system temperature stability. The laser power supply works reliably and stably under laser protection and soft-start circuit. The experimental results show that the system has stability of temperature of $\pm 0.01^\circ\text{C}$ and the long-term output power stability of $\pm 0.018\text{dB}$ when the laser works at room temperature 25°C . Compared with the traditional 1310nm/1550nm laser power supply, the system has high and fast stability, small size and facilitates the optical fiber online measurement.

Key words: laser technique; laser power supply; constant temperature control; proportion-integration-differentiation; controller area network bus

引 言

半导体激光器作为一种新型激光光源, 其效率高、体积小、重量轻、寿命长、可靠性高、能够直接调制^[1]。但是半导体激光器作为高量子效率器件, 微

小的电流变化不仅会造成半导体激光功率的波动, 还会造成输出波长光谱的变化。由于半导体激光为电流驱动型器件, 高稳定的恒流驱动是输出功率稳定的前提。同时半导体激光器对温度非常敏感, 环境温度的变化不仅会引起驱动电流的变化, 还会使激光的阈值电流、量子效率、输出波长和功率发生很大变化。因此, 恒温控制使半导体激光工作在室温下是非常重要的。

随着光纤通信的高速发展, 1310nm/1550nm 半导体激光器被广泛用于光纤测量、光无源器件检测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90923030)

作者简介: 廖 平(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事机电一体化和计算机测控技术的研究。

E-mail: liaoping0@163.com

收稿日期: 2012-08-27; 收到修改稿日期: 2012-09-03

等方面。而传统的 1310nm/1550nm 半导体激光驱动电源系统控制精度低,系统开机后需等待较长的时间后才能正常使用,在运行一定时间后系统输出功率会产生较大的偏移和波动。为此作者设计出一种高稳定度连续可调的激光电源系统,该系统具有快速稳定和长期输出稳定度,经过实验测试和工厂应用,达到很好的效果。

1 系统原理

半导体激光器是依靠载流子的注入而工作的,注入电流的稳定性对半导体激光器的功率输出有很大的影响。图 1 为本系统所选的 1310nm 半导体激光器的 $P-I$ 曲线,半导体激光的阈值电流为 9.98mA,当注入电流小于该电流时,激光器的增益小于谐振器的损耗,无法形成激光震荡;当注入电流大于阈值电流时产生了激光震荡,激光器发出激光。在外界条件一定的情况下,半导体激光器的输出光功率随着注入电流的增加,在一定范围内呈线性增加。当注入电流发生微小改变时,激光器输出功率也会相应的改变,因此,半导体激光器的驱动电源必

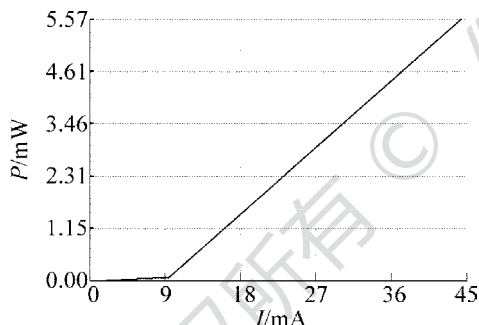


Fig. 1 $P-I$ characteristic curve of semiconductor diode

须是一个恒流源,具有很高的电流稳定性和很小的纹波系数,否则激光器的工作状态就会受到影响^[2]。在这里采用放大器加场效应管组成电流串联负反馈电路实现恒流控制。

半导体激光器自身工作时会产生热量,从而使激光器的温度升高,同时外界环境温度的变化也会影响激光器。温度的变化将对半导体激光器的阈值电流产生明显的影响,温度升高、阈值电流增大、输出功率降低,并且影响波长的稳定性。所以恒温控制对于激光器十分重要,恒定的工作温度才能保证激光器具有最大的效率和最小的功率波动^[3-4]。目前很多激光器内置半导体制冷器(thermoelectric coolers, TEC),因此,有效地控制 TEC 是稳定激光输出的重要条件。制冷器 TEC 由 N 型和 P 型半导体材料组成的电偶通过半导体金属片串联、并联或者串并联焊接而成,其一面热端一面冷端,当电子从其中一个电偶的 P 型材料流至 N 型材料时,先吸收热量再将热量放出,实现能量的传递,从而形成冷热端,如电子运动方向相反,冷热端也改变方向^[5]。

2 硬件电路

该系统由驱动电源模块和主机模块组成,驱动电源模块包括恒流源驱动电路、恒温控制电路、激光源保护和软启动电路、控制器局域网(controller area network, CAN)总线电路。主机模块由激光源选择和功率调节电路、液晶显示电路组成,实现人机交互,完成光源 1310nm 和 1550nm 的选择以及光功率的调节。其系统框图如图 2 所示。

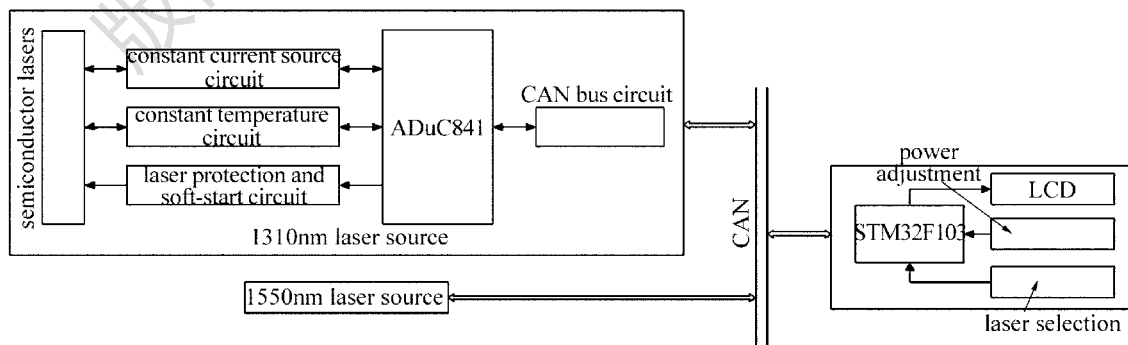


Fig. 2 System block diagram of laser power supply

2.1 激光源驱动电路

激光源驱动电路如图 3 所示,它包括恒流源驱动电路、软启动电路和激光源选择电路。

该恒流源驱动电路主要由放大器 U4、场效应管 Q₂、采样电阻 R_s 组成,通过负反馈实现稳定的恒流

源输出^[6-7]。放大器 U4A 的输入电压为 U,则激光二极管 U3A 的电流 $I = U/R_s$ 。由此可见,驱动电流的精度与输入电压 U 和采样电阻 R_s 有关。本系统中采用 ADI 公司生产的精密模拟微控制器 ADuC841,其内部集成高精密的数字模拟转换器

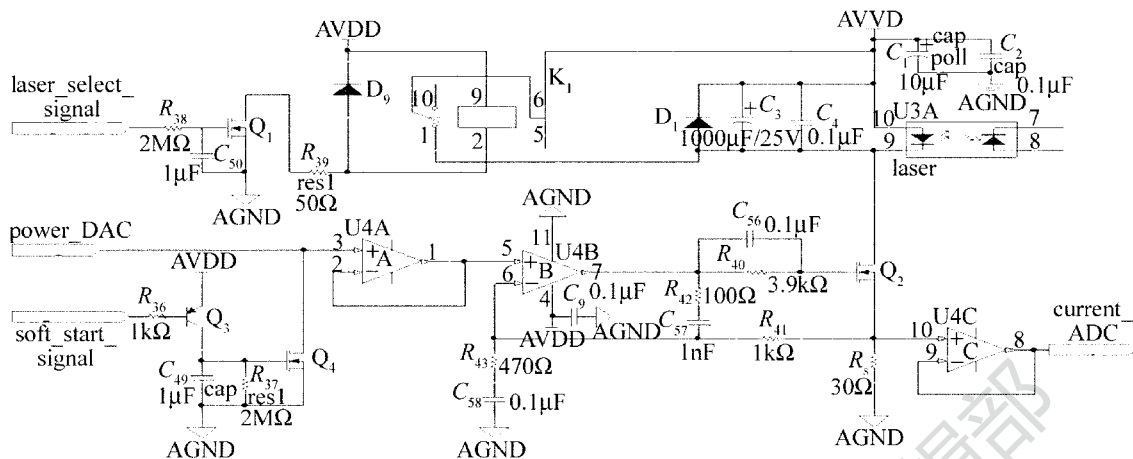


Fig. 3 Laser source driving circuit

(digital to analog converter, DAC) 和模拟数字转换器 (analog to digital converter, ADC) 以及大容量 Flash, 特别适用于测控系统^[8]。U 即为 12 位 DAC 的输出电压, 其 DAC 参考电压为 2.5V, 温度系数为 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 则其分辨率为 $2.5\text{V}/4096 = 0.61\text{mV}$ 。采样电阻 $R_s = 30\Omega$ 、精度为 0.1%、温度系数为 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 0805 封装的高精密低漂移电阻, 因此驱动电流的分辨率为 $0.61\text{mV}/30\Omega = 0.02\text{mA}$, 保证了驱动电流的精度。在该电路中, 模拟电源 AVDD、负载激光二极管 U3A、场效应管 Q₂ 以及采样电阻 R_s 构成一个串联负反馈回路, C₅₆ 和 R₄₀ 并联引入一个零点, 通过加速补偿将原来高频极点移至低频段来减小系统的震荡; R₄₃ 和 C₅₈ 构成高通滤波器, 作用在于为反馈系数 F 提供一对极点和零点, 从而使 F 的高频响应降低; R₄₁, R₄₂ 和 C₅₇ 进行积分滤波, 使输出电流中高次谐波成分无法 (或大部分无法) 进入运放, 从而提高了驱动电流的稳定性。

半导体激光二极管是一种结型器件, 抗冲击能力很差。因此, 必须保证激光器两端不能加上阶跃电压, 因为这种上升沿很陡的阶跃电压, 即使幅度很小, 也会对激光器产生不良影响。软启动电路可以很好地解决这个问题, 所谓软启动, 就是电流源开机后, 电流不是立即加到半导体激光器上, 而是通过一

定的时间, 从 0 开始逐渐上升到目标值, 这样就从根本上保证了半导体激光器不受电流源开启时而产生电冲击的影响。如图 3 所示, 当 soft_start_signal 为低电平时, Q₃, Q₄ 打开, power_DAC 的电压被拉低至 0, 激光不工作; 当 soft_start_signal 为高电平时, Q₃ 关闭, Q₄ 随着 C₄₉ 放电而逐渐关闭, 从而使 power_DAC 的电压从 0 逐渐上升到目标值, U4 采用的是轨对轨放大器 AD8630, 能够输出 0 至电源电压, 实现激光器的软启动过程。

激光源选择和保护电路由场效应管 Q₁ 和继电器 K₁ 组成, 半导体激光二极管两端通过常闭继电器 K₁ 短路, 即使未开机, 也被保护免受静电的破坏。由于浪涌电流在电源接通和断开时大量出现, 通过控制继电器就可以避开浪涌电流的冲击^[9]。U4C 起限流作用, 防止电路出现异常电流过大烧坏激光。

2.2 恒温控制电路

恒温控制电路包括温度采集电路和制冷器驱动电路。

温度采集电路如图 4 所示, U3B 为激光器内置的负温度系数 (negative temperature coefficient, NTC) 热敏电阻, 其具有体积小、稳定性好、灵敏度高、价格低廉等显著特点, 虽然线性度很差, 但是激光只要工作在温度稳定的条件就行, 一般为室温下。

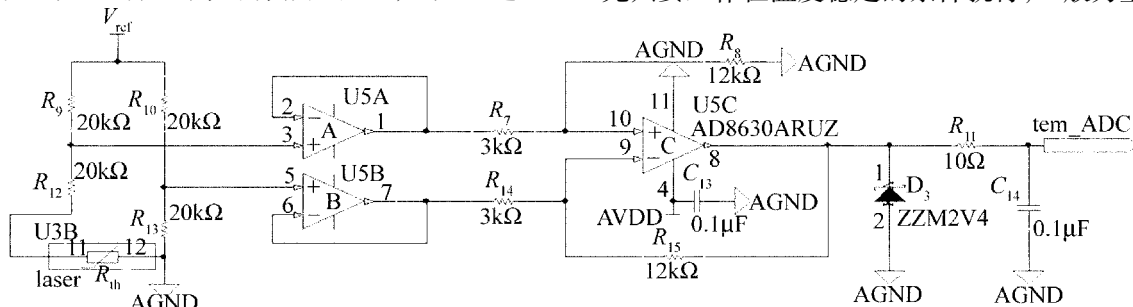


Fig. 4 Temperature collection circuit

电压 V_{ref} 为模拟微控制器 ADuC841 输出的基准电压 2.5V, 温度系数为 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。为了提高测量的动态范围和测量精度, 这里采用平衡桥电路的方法, 通过差分放大电路来获取热敏电阻的阻值。 $R_9, R_{10}, R_{12}, R_{13}$ 为精密低漂移电阻, 电阻值取为 20k Ω , 则输出的电压 $U_{tem_ADC} = 4 \times V_{ref} \times \left(\frac{20 + R_{th}}{40 + R_{th}} - 0.5 \right)$ 。当

激光工作在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下时, 输出的电压为 1V。这样既保证了输出电压在 ADC 的测量范围内, 也提高了测量的灵敏度和测量精度。

制冷器驱动电路如图 5 所示, 制冷器 TEC 驱动采用 MAXIM 公司生产的 MAX1968A。MAX1968A 是一款高效率、高集成、高精度开关型驱动芯片, 适用于 Peltier 热电制冷器模块。

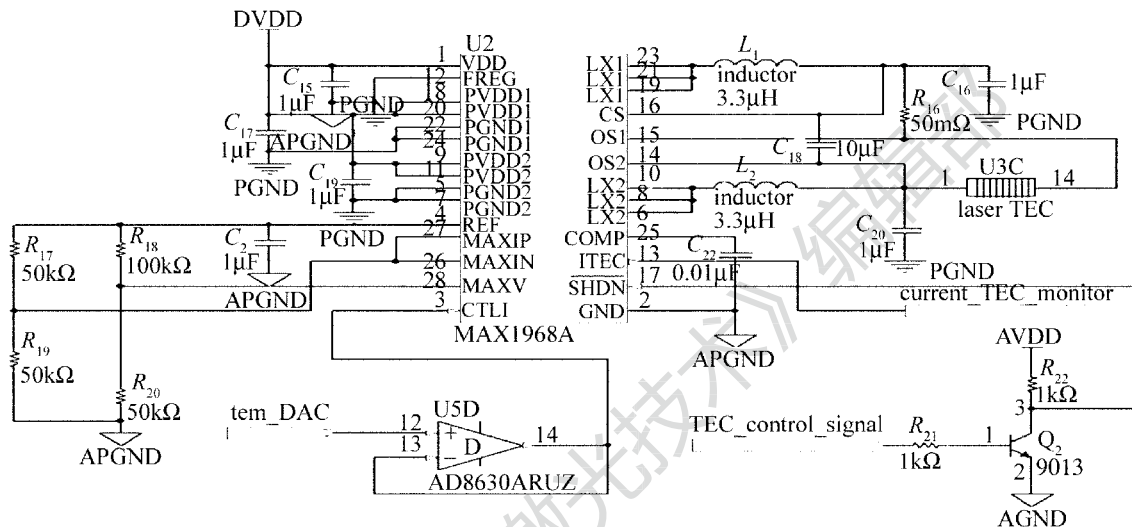


Fig. 5 TEC driving circuit

在该电路中, TEC 制冷器 U3C 的电流 $I_{tec} = \frac{U_{tem_DAC} - 1.5}{10 \times R_{16}}$, 当输入端 tem_DAC 电压为 1.5V 时, 输出电流为 0, 制冷器不工作; 当输入电压大于 1.5V 时, 制冷器加热; 当输入电压小于 1.5V 时, 制冷器制冷。TEC_control_signal 用于启动 MAX1968A 工作, 高电平有效, 通过三极管 Q_2 取反是防止单片机上电时该引脚为高电平, MAX1968A 就开始工作在强制制冷状态。current_tec_monitor 用于监测制冷器的电流。为了保护负载 TEC, TEC 最大工作电流为 1.5A, 最大工作电压为 2V。电路中 AGND, PGND, APGND 分别表示电路模拟地, MAX1968A 数字地以及其模拟地, 它们通过单点连在一起, DVDD 为数字电源, AVDD 为模拟电源。在画 PCB 时一定要注意元器件的布局和散热的处理。

2.3 CAN 总线电路

为了实现激光功率连续可调, 通过 CAN 总线进行通信。激光源中 CAN 控制器采用 SJA1000, CAN 收发器采用 TJA1050T。主机采用 Cortex-M3 内核的 STM32F103CBT6, 内部集成 CAN 控制器。该电路

CAN 总线两端必须接 2 个 120 Ω 的终端匹配电阻, 同时采用光电隔离器 HCPL0600, 忽略它们会使数据通信的抗干扰性和可靠性大大降低^[10]。主机通过按键输入要调节的激光功率, 然后转换为 2 个字节(12 位)的数据, 然后按 1 个字节报文标识符 + 1 位激光波长选择位 + 2 个字节数据位 + 1 个字节校验位发送给 CAN 总线, 下位机接收到 CAN 数据后就可以改变激光的打开和输出功率。

3 软件实现

该系统软件分为主机和驱动电源两部分, 通过 CAN 总线相互通信。上电后, 主机初始化以 1310nm 波长默认功率工作, 然后通过外部中断来选择波长和功率的调节。驱动电源初始化后先检测环境的温度是否加热或者制冷, 然后通过比例积分微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 算法调节系统温度至室温, 再通过 CAN 总线中断来判断激光源的打开和功率的调节, 在运行过程中通过定时器中断实时环境检测并调节温度实现恒温控制, 其流程图如图 6 所示。

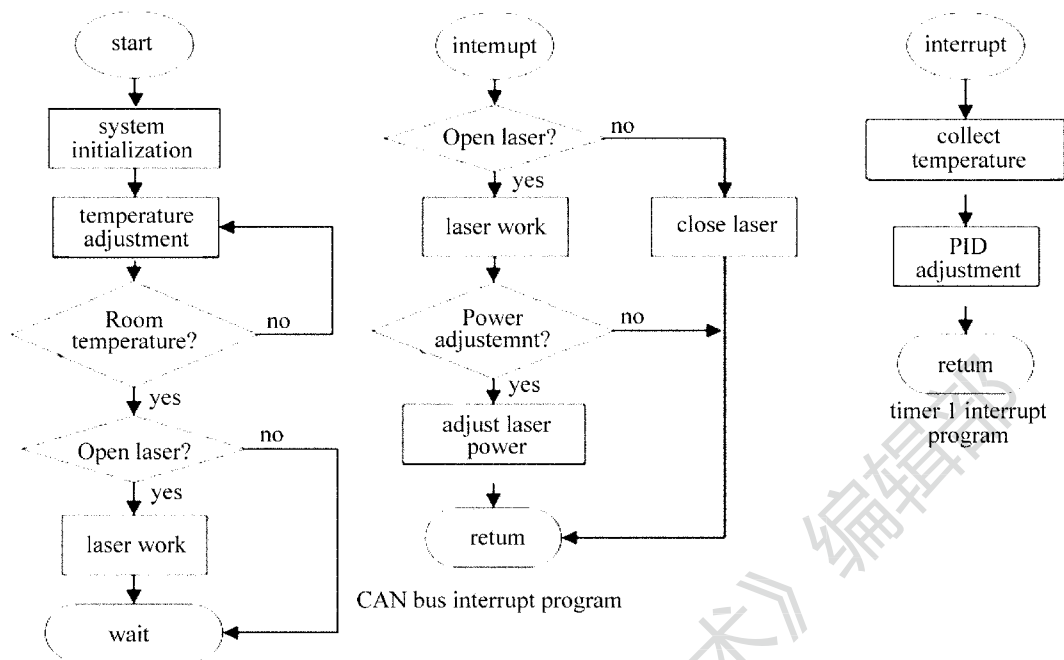


Fig. 6 Flow chart of system software

3.1 变速积分 PID

在普通 PID 的控制算法中,积分的作用是通过消除静差来提高系统的精度。由于积分系数是常数,所以在整个控制过程中,积分项增量不变。而系统对积分项的要求是系统偏差小时积分作用应该加强,而在偏差大时积分作用应减弱甚至全无。对于温度过程控制变化比较缓慢且带有纯滞后环节,积分系数若取小了则不能及时消除静差,若取大了则又会产生超调,甚至积分饱和。在此系统中采用变速积分 PID 算法,来改变积分项的累积速度,加速了系统温度的稳定,效果显著^[11-12]。变速积分 PID 公式如下:

$$U(k) = k_p E(k) + k_i \left[\sum_{i=0}^{k-1} E(i) + f[E(k)] \right] + k_d [E(k) - E(k-1)] \quad (1)$$

式中, $U(k)$ 表示变速积分的输出值, k_p, k_i, k_d 为比例常数、积分常数和微分常数; $E(k), E(k-1)$ 为 $k, k-1$ 时刻 12 位 ADC 采样热敏电阻值与目标值的差。

$$f[E(k)] =$$

$$\begin{cases} 1, (|E(k)| \leq B) \\ \frac{A - |E(k)| + B}{A}, (B < |E(k)| \leq A + B) \\ 0, (|E(k)| > A + B) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 和 B 为变速积分 PID 的积分控制区间,当温

差变大时,积分部分的作用变小;温差很小时,积分作用变强,实现了系统的快速稳定。

4 实验数据

系统采用 14 脚双列直插式封装 (dual in-line package, DIP) 封装半导体激光器,内部集成热敏电阻、制冷器 TEC 用于恒温控制。本系统中,通过 PID 参量确定得 $k_p = 12, k_i = 0.03, k_d = 10, A = 200, B = 100$, 采样时间为 0.4s, 通过定时器中断采集热敏电阻的阻值,换算得到温度曲线如图 7 所示。从图中可知,系统温度的控制精度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$, 并很快就稳定到室温 25°C , 达到了设计要求。

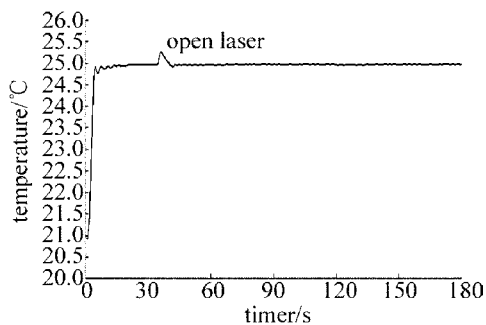


Fig. 7 Temperature curve of the laser power supply

实验中 1310nm 激光器的额定功率为 4.324mW, 额定电流为 35mA, 图 8 为激光工作在额定功率下电流曲线图, 通过采集放大器 U4C 的电压值除以精密电阻 R_s 的阻值得到, 横坐标为采样点, 采样时间为 0.2s, 采样 1500 个数据点。从图可知, 该电流源非常稳定, 最大偏差为 $\pm 0.02\text{mA}$, 纹波电

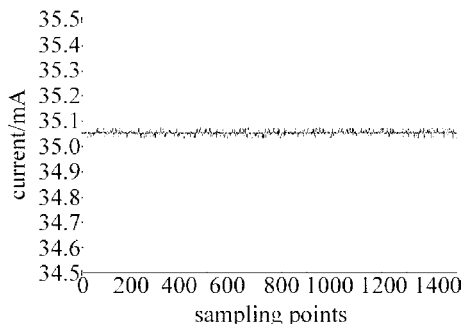


Fig. 8 Current curve of the laser power supply

流基本为 0。

图 9 是激光电源工作 12h 后,用标准光功率计通过上位机测得的 2000 个数据点绘成的功率曲线图,横坐标为采样点,采样时间为 0.05s。从图中可知,激光电源输出的平均功率为 1.435dBm,最大偏差为 ± 0.006 dBm,光源稳定性为 ± 0.018 dB。

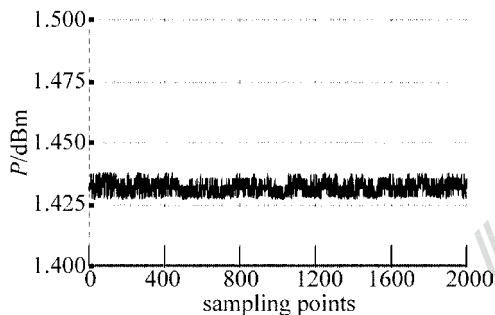


Fig. 9 Power curve of the laser power supply

5 结 论

本系统使用精密模拟微控制器 ADuC841 对半导体激光器进行恒流控制,利用变速积分 PID 算法对系统温度进行调节,主机通过 CAN 总线实现激光源 1310nm 和 1550nm 的选择和功率的连续可调。通过实验数据表明,温度稳定性达 ± 0.01 ℃,光源长期稳定度 ± 0.018 dB,保证了激光长时间稳定的光

功率输出。因此,该系统可以广泛应用于光纤测量以及光无源器件检测等很多方面。

参 考 文 献

- [1] WANG L W. Development of semiconductor lasers and their application[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2003, 22(3): 34-38 (in Chinese).
- [2] ZENG H L, JIANG P F, XIE F Z. Temperature control of semiconductor laser for interferometry[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(5): 339-340 (in Chinese).
- [3] ANDERONI E, XU J H. A simple system of thermal control and frequency stabilization of solitary diode lasers[J]. Review of Scientific Instrument, 2000, 71(10): 3648-3652.
- [4] ZHANG N, YU Y L, TIAN X J, et al. Theory and application on the constant temperature control of laser diode[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2002, 40(3): 284-287 (in Chinese).
- [5] CHEN X H, CHEN X Y, ZHOU Y H. Optimal analysis of the performance of a new heat-driven semiconductor thermoelectric refrigerator[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2003, 31(1): 52-55 (in Chinese).
- [6] ZHANG R F, KONG L H, LU C G. Design of constant-current source for high power semiconductor laser diode[J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 80-83 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y C, SUN L J, FU S Y, et al. Research on adjustable high power high pulse-repetition-frequency compact LD power supply[J]. Laser Technology, 2012, 36(6): 731-734 (in Chinese).
- [8] FANG Y, XU J, YU P. Laser power supply control circuit design based on ADuC841[J]. Electrotechnics Electric, 2011, 5(1): 17-26 (in Chinese).
- [9] ZOU W D, GAO Y Q. Semiconductor laser power supply controlled by single-chip microcomputer[J]. Laser Journal, 2002, 23(4): 70-71 (in Chinese).
- [10] LI G Y, YU D, SHI G, et al. Design of data collection system based on CAN bus[J]. Instrumentation Technology, 2010, 1(1): 15-20 (in Chinese).
- [11] LIAO Zh Y, DENG H F, WU L H, et al. Design of high precision constant temperature control systems based on laser diodes[J]. Laser Technology, 2012, 36(6): 771-775 (in Chinese).