

文章编号: 1001-3806(2015)03-0353-04

大功率半导体激光器高精度温控系统研究

王宗清, 段 军*, 曾晓雁

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了减小温度对半导体激光器输出光波长和功率稳定性的影响, 设计了由恒流模块驱动半导体制冷器, 通过改变恒流模块的电流来控制半导体制冷器的制冷量, 利用分段积分的比例-积分-微分控制算法, 选择最优控制参量, 实现大功率半导体激光器的精密温控系统。系统包括高精度测温电路、控制核心 DSP F28335、半导体制冷器控制电路、人机交互及通信模块。在 5℃ ~ 26℃ 环境下对系统进行测试, 实现 50W 大功率半导体激光器的恒温控制, 温控范围为 15℃ ~ 45℃, 温控精度达到 ± 0.02 ℃。结果表明, 该系统温控范围广, 控制精度高, 满足大功率半导体激光器的温控要求。

关键词: 光电子学; 温度控制; 恒流源; 半导体激光器; 温控算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.016

Research of precise temperature control systems of high-power semiconductor lasers

WANG Zongqing, DUAN Jun, ZENG Xiaoyan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to reduce the influence of temperature on output wavelength and power stability of semiconductor lasers, a constant current module was designed to drive thermoelectric cooler. The cooling capacity of the thermoelectric cooler was controlled by changing the current of the constant current module. The optimal control parameters of proportion-integration-differentiation algorithm were set to realize high precision temperature control. The system consists of high precision temperature measurement circuit, control core of DSP F28335, thermoelectric cooler control circuit, human-computer interaction and communication module. Constant temperature control was realized for a 50W high power laser diode at 5℃ ~ 26℃ ambient temperature, the temperature control accuracy reached ± 0.02 ℃ at 15℃ ~ 45℃. The results show that this system has a wide temperature control range and high control precision, which satisfies the requirement of temperature control of high power semiconductor lasers.

Key words: optoelectronics; temperature control; constant current source; semiconductor laser; temperature control algorithm

引 言

半导体激光器 (laser diode, LD) 的性能受温度的影响很大, 如阈值电流、输出光波长和功率都会随温度变化。在 LD 电流恒定的情况下, 激光波长随温度的偏移量为 $0.2\text{nm}/\text{℃} \sim 0.3\text{nm}/\text{℃}$ 。在 $18\text{℃} \sim 28\text{℃}$ 范围内, LD 抽运的 Nd:YAG 激光器在 LD 温度变化时, 激光器输出功率随之发生较大变化^[1-2]。随着 LD 被越来越广泛地用于国防、科研、医疗、光通信等领域, 半导体激光器对波长和功率的稳定性提出了很高的要求, 这就要求对 LD 进行高精度温控^[3-5]。

作者简介: 王宗清 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光电子技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: duans@hust.edu.cn

收稿日期: 2014-04-25; 收到修改稿日期: 2014-05-21

以 Analog Devices 公司的芯片 DN8830 为例, 当前国外处于领先水平的公司推出半导体制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 控制芯片可实现 ± 0.01 ℃ 激光器温控精度。目前, 国内多对大功率 LD 采用水冷来进行控温, 其响应速度慢、温控精度低。而利用 TEC 对 LD 进行温控, 由于其驱动电路电流不超过 3A, 无法满足大功率制冷需求。报道的最高精度为 ± 0.05 ℃^[6]。本文中的温控对象为 nLIGHT 额定出光功率 50W 的半导体激光器, 发热效率约 47%, 最佳工作温度 25℃。采用 TEC1-12710 作为制冷片, TEC 由大电流恒流源电路驱动, 驱动电流可达 7.5A^[7]。采用分段积分的比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 算法自动调整控制量^[6], 以高精度、线性可调节的恒流源驱动 TEC, 完成对 TEC 制冷功率的精细调整, 实现高精度温控。

1 LD 温控系统设计

LD 温控在 LD 抽运固态激光器中,属于控制系统的一个部分。温控系统设计框图如图 1 所示,主要由三部分构成:第一部分由测温电路、数/模(digital/analog, D/A)转换电路和恒流源电路构成,完成对 LD 的温度的高精度测量,温度传感器为 10kΩ 热敏电阻,装置在 LD 激光器壳体内,可以高精度测量 LD 内部温度,测量精度可达 0.01℃;第二部分为控制核心数字信号处理(digital signal processing, DSP) F28335,由内部自带的 12 位 A/D 模块完成对温度信号的采集,和数据处理以及温度控制;第三部分为 DSP 外设温度预值电路,由键盘和液晶组成的人机交互模块,实现温度的设定与显示,RS232 串口为保留的通信接口,与上位机通信。

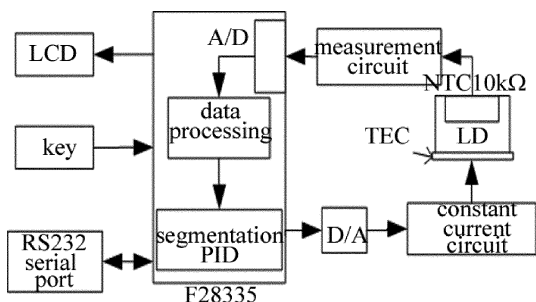


Fig. 1 Diagram of system structure

该温控系统工作原理为:热敏电阻将 LD 的温度信号变为电压信号,放大滤波后送入 A/D 模块转换成数字信号输入到 DSP。DSP 对该信号进行分段积分的 PID 运算处理后,输出控制量,经过 D/A 转换为合适控制电压,调整恒流源电流大小,来控制 TEC 制冷量的控制,实现对温度的精确控制,并在液晶上实时显示 LD 温度值。由于 TEC 在制冷量恒定时,其驱动电流大小随 TEC 冷热端温差的变化发生改变,为保证控制效果,系统需在 TEC 的制热端安装热沉等有效的散热装置。图 1 中,LCD(liquid crystal display)为液晶显示器。

1.1 测温电路

测温电路如图 2 所示,由恒压源、不平衡电桥热电阻测量电路和运放器 INA114 组成。采用不平衡电桥测量电路可防止测量电路输出负电压,避免电压变化幅度超过 A/D 转换电压范围 0V ~ 3V 而损坏 DSP。采用恒压源对热敏电阻检测电路供电的方式,是因为 10kΩ NTC 在 0℃ ~ 50℃ 温度范围内变化时,其阻值变化范围较大,约为 28kΩ ~ 4kΩ,可以消除导线自身随温度变化而引起电阻变化的影响,同时可以限制电压过高而损坏运放器。

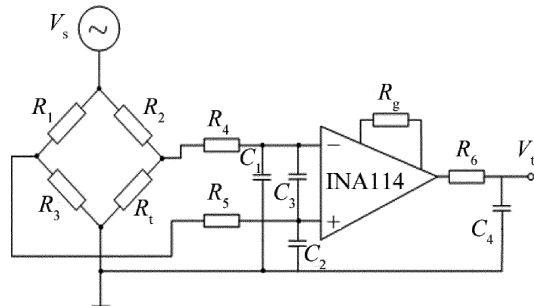


Fig. 2 Circuit of temperature measurement

恒压源选用低噪声高精度的 ADR4550 模块,给电桥提供 5V 电压,其最大初始误差为 ±0.02%,长期输出电压漂移低,有效提高测温精度。电路中高精度仪表运放 INA114 具有低输入偏置电流,高共模抑制比,可以准确放大电压信号,满足测量要求。

图 2 中输出电压 V_t 与热敏电阻 R_t 的关系为:

$$V_t = K \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_t}{R_2 + R_t} \right) \quad (1)$$

式中, K 为仪表运放增益。

由于 DSP 内部 A/D 输入电压范围为 0V ~ 3V,应合理选择电阻值,避免 V_t 超过转换范围;A/D 输入端口设计了限幅电路,防止电压过高损坏 DSP。系统设计 $R_1 = R_2 = 100k\Omega$, $R_3 = 50k\Omega$;经过计算电路正常测温范围为 -12℃ ~ 55℃,电路工作于 25℃ 时, $V_t = 1.33V$ 满足设计要求。

1.2 TEC 控制电路

由于温控系统要求较大制冷功率,所以设计了大电流电路驱动 TEC,电流峰值达到 7.5A,稳态时约为 6.5A,TEC 最大制冷功率达到 80W。经实验验证,此控制电路可实现 0.01A 的高分辨率线性调节,实现高精度调节 TEC 制冷功率。

控制电路包括 12 位串行 DAC7611 构成的数模转换电路和恒流源电路两部分^[8]。其工作原理是由 DAC7611 将 DSP 输出的控制量转换成电压信号,通过控制恒流源电流大小,来控制 TEC 的制冷量。

DAC7611 属于 12 位串行输入的模数转换器,转换时间快达 7μs,无需额外提供参考电平,简化了电路,且其接口可直接匹配 F28335 芯片,方便设计。输出电压线性可调范围为 0V ~ 4.095V,转换误差为 ±0.01V,满足恒流源电路的控制精度要求。

恒流源电路主路由稳压输出的开关电源、调整管 Q_1 、TEC 测流电阻 R_s 组成。调整管 Q_1 为 IRF1503,其导通电阻 R_d 仅为 3.3mΩ,具有转换速度快的特点。测流电阻 PBV-R010 的阻值较小,需对测得电压进行高倍放大。 R_7, R_8, R_9 和 R_{10} 均为高精度电阻,以提高精度。比例-积分电路中运放 LM7171 为高速运放,匹配电路实时

快速调整的要求。恒流源电路如图 3 所示。

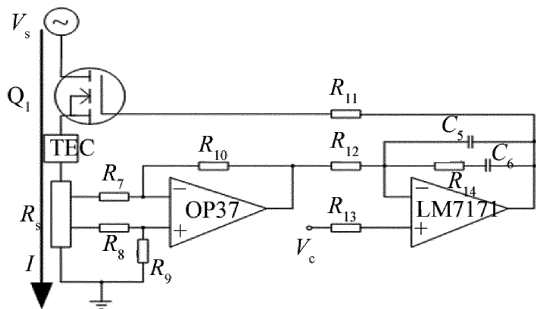


Fig. 3 Circuit of constant current source

图 3 中 TEC 驱动电流与控制电压的关系为：

$$I = V_c \left(\frac{R_7}{R_5 R_{10}} \right) \quad (2)$$

式中, $R_7 = R_8, R_9 = R_{10}, V_c$ 为 DAC 输出的控制电压, I 为 TEC 驱动电流。

恒流源电路工作原理是:测流电阻将电流值转化成电压值,经过 OP37 放大,与数/模转换输出的控制电压 V_c 进行比较,通过比例-积分电路构成反馈电路输出调整电压,控制调整管的导通程度来调整主回路电流,实现稳定的恒流输出。

1.3 人机接口

系统用按键控制电路,可直接设置温控目标温度;LCD 实时显示设定温度和实测 LD 温度,实现人机交互的功能。上位机可通过 RS232 串口与温控系统通信,实现温控的智能和远程控制。

2 程序设计

主程序流程图如图 4 所示,系统采用模块化的结构,将整个系统划分为相互独立的模块,因此明确每个模块的工作,只要设计好与其它模块的接口,就不会受到其它模块的干扰,便于设计复杂的程序。

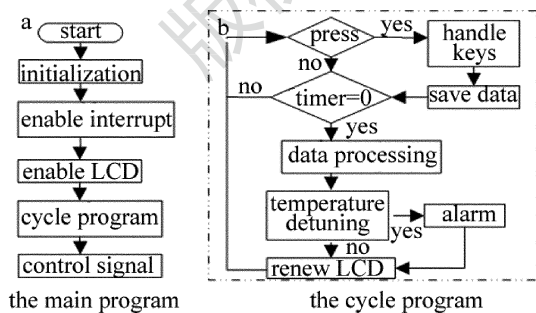


Fig. 4 Program flow chart

主要包括系统初始化、中断服务程序、串口通信程序、按键扫描程序、液晶显示刷新程序、数据处理程序、PID 算法实现等。数据处理程序主要是包括对采样值进行数字滤波、平均、计算,得到准确温度值,经过分段积分的 PID 算法处理,输出控制量。

2.1 PID 算法

PID 算法因其算法简单、可靠性高,而广泛应用于工业过程控制和温度控制中。离散的 PID 表达式如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (3)$$

式中, $e(k)$ 为第 k 次采样的偏差值, $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次的采样偏差值, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

在大功率 LD 温控系统中,由于 LD 制热量较大,为防止出现温度失调的情况,此系统选择改进的分段积分的 PID 算法^[9]。即对于不同的温度区间,采取不同的积分值,实现不同的调整速度,达到安全、快速稳定的目的。具体分段情况如下式:

$$\begin{cases} u(k) = u(k)_{\max}, (e(k) \geq e_0) \\ K_i = i_1, (e_1 \leq e(k) \leq e_0) \\ K_i = i_2, (e(k) < e_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u(k)_{\max}$ 为最大调节量, i_1 和 i_2 为两个具体的积分系数值, e_0 和 e_1 为温度偏差值。

在实际控制中, e_0 和 e_1 是与目标温度的差值,分别取 1 和 0.5; $u(k)_{\max}$ 由硬件电路确定。在自动调节过程中, PID 积分项可能会累积较大的调节量,影响温控速度,所以程序在每次温控开始前对积分量清零。

2.2 PID 参量调节

作者选择 4:1 衰减法对 PID 参量进行整定,其基本原理是先把积分时间放到最大,微分时间放到 0。待调节系统稳定后,逐步减小比例度,观察输出电压(电流)和调节过程的波动情况,直到出现 4:1 衰减过程为止。记录 4:1 衰减比例度和操作周期,根据经验公式,求得调节器各个参量的具体数值^[10-11]。再结合实验进行微调,得到较理想控制效果,实验参量为: $K_p = 4500, i_1 = 0.4, i_2 = 1, K_d = 500$ 。

3 实验结果

在 $5^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$ 的环境下对该温控系统进行长时间测试,系统稳定工作。LD 开启关闭全过程的温控动态曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,LD 启动时电流是一个缓慢上升的过程,关闭时缓慢下降;额定工作电流 7.5A,此时出光功率为 50W,发热功率约为 45W,温度稳定于 25°C 。开启时温度在 LD 达到额定工作状态后迅速稳定下来,TEC 在 LD 关闭后停止制冷,温度缓慢降至室温。LD 开关全过程中,温度在室温与目标温度间正常波动。解决了开关机时温度失调的问题。

改变设定温度值时,系统温控情况如图 6 所示。

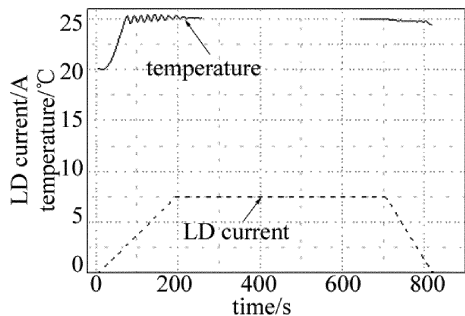


Fig. 5 Overall process of temperature control

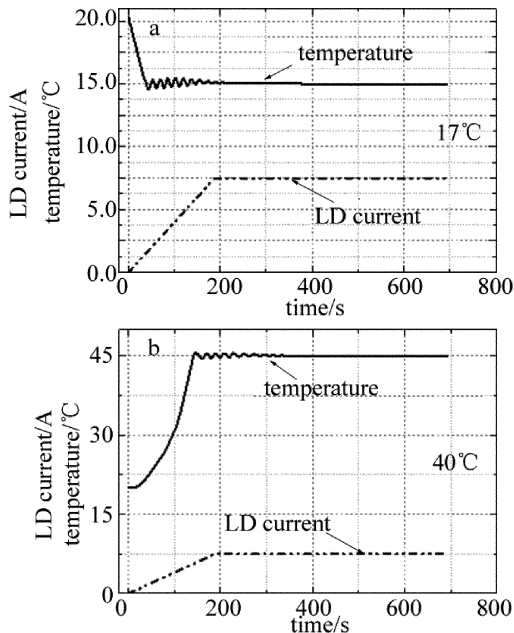


Fig. 6 Different temperature control

图 6a 中的设定温度值为 17℃, 图 6b 中的设定温度值为 40℃。实验结果表明, 系统温控范围达到 15℃ ~ 45℃。系统长时间稳定工作时的温度稳态曲线如图 7 所示。

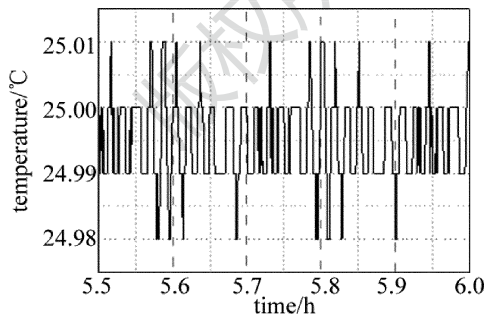


Fig. 7 Stable temperature control

温控系统进行了 6h 以上的测试, 结果表明, LD 温度长时间稳定在 ±0.02℃ 的范围内, 满足设计要求。

当 LD 电流发生变化, 即改变 LD 发热功率时, 实测温度曲线如图 8 所示。

测试结果表明, 系统具有良好的自调节能力, 在发热功率发生变化时, 迅速调整 TEC 制冷功率, 可在 2min 内恢复稳态。该温控系统在发热功率为 1W ~

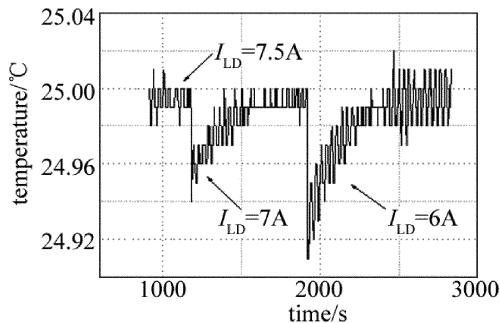


Fig. 8 Temperature control with the change of different current

60W 的范围内, 实现 ±0.02℃ 的温控。

4 结论

系统采用 DSP F28335 作为控制核心, 配合高精度的测温电路, 采用分段积分的 PID 控制算法, 使用大电流恒流源电路驱动 TEC, 实现了对大功率 LD 的高精度智能温控。DSP 丰富的外设端口及串口通信功能, 使该温控系统具有良好的扩展性和兼容性。该温控系统为额定功率 60W 以下的 LD, 提供了一种高精度的温控方案, 可应用于 LD 抽运的固态激光器等工业场景。

参考文献

- [1] ZHANG W P, LI M Sh, SHANG W D, *et al.* Temperature control precision of LD in DPL[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 69-72 (in Chinese).
- [2] YAN S, LI D G, YU Zh L. Research on the simulation of temperature control of semiconductor laser based on ADRC [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2013(1): 3-5 (in Chinese).
- [3] FENG D Q, REN X M. Simulation research on fuzzy PID in network control system[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2013, 34(1): 61-63 (in Chinese).
- [4] XU G P, FENG G X, GENG L. Temperature control of high density TEC based on MCU operation[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3): 254-256 (in Chinese).
- [5] GAO P D, ZHANG F Q. Design and implementation of high precision temperature control system for semiconductor lasers[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 270-273 (in Chinese).
- [6] ZHANG R, WAN H J, WANG A H. Research of PID control based on piecewise integral[J]. *Technology of Automation and Applications*, 2013, 32(8): 8-9 (in Chinese).
- [7] HUANG Y W, CUI R Zh, GONG M L, *et al.* TEC based thermostat system for high power semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 143-147 (in Chinese).
- [8] HUANG T Ch, JIA S, YU J H, *et al.* Design and realization of digital controlled DC current source with high-precision [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, 40(6): 27-29 (in Chinese).
- [9] DUAN W Y, WU L H, ZHOU J, *et al.* Amelioration of the integral part in PID method[J]. *Control and Automation Publication Group*, 2007, 23(6/1): 63-64 (in Chinese).
- [10] FAN Y F, LI P. PID controller tuning[J]. *China Instrumentation*, 2002(3): 24-27 (in Chinese).
- [11] QIU L, ZENG G, ZHU X F, *et al.* A comparative study of PID turning methods[J]. *Techniques of Automation & Applications*, 2005, 24(11): 28-31 (in Chinese).