

文章编号: 1001-3806(2007)04-0445-04

LD 组件温度稳定性设计

杨家桂

(安徽财经大学 信息工程学院, 蚌埠 233041)

摘要: 为了研究热电致冷器模块对半导体激光器温度控制系统稳定性的影响, 采用模拟比例-积分-微分 (PID) 网络作为系统的控制器, 通过对 PID 控制网络的调整, 优化了热电致冷模块的响应, 并根据调整后的 PID 控制网络及各组成部分的特性建立系统的数学模型, 分析了系统对单位阶跃输入的稳态误差和稳定性。经仿真比较, 结果表明, 优化后的系统具有很好的瞬态特性和稳定性。

关键词: 激光器; 稳定性; 热电致冷器; 比例-积分-微分控制

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Temperature stability design for a laser diode module

YANG Jiagui

(Information Engineering College, Anhui University of Finance & Economics, Bengbu 233041, China)

Abstract Thermoelectric cooler (TEC) behaves approximately as a two-pole system, acting as the most important component to regulate operating temperature of the laser diode (LD). In order to research the influence of thermoelectric cooler module on stability of a temperature control system for a laser diode module, an analog proportional-integral-differential (PID) network was adopted as the system controller. By adjusting the PID control network, the response of TEC was optimized. For unit step input, the stable state error and stability was studied. A conclusion can be made that the system takes on the better instantaneity and stability.

Key words lasers; stability; thermoelectric cooler; proportional-integral-differential control

引 言

随着光纤通信、光纤传感等技术的发展, 半导体激光器 (LD) 的应用也越来越广泛, 作为光源^[1], 它具有许多独特的优点: 如体积小、重量轻、结构简单、输出功率大、可直接调制等。但半导体激光器是温度敏感器件, 其输出特性与其工作温度有很大关系, 如对于一个在 780nm 波长发射 3mW 能量的典型激光二极管, 发射波长的平均漂移量为 0.26nm/°C, 阈值电流的平均漂移量为 0.3mA/°C。对于一个在 1550nm 波长发射 20mW 能量的分布反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器, 发射波长的平均漂移量为 0.11nm/°C, 阈值电流的平均漂移量为 0.2mA/°C。另外, 工作温度每升高 25°C, 工作寿命会减少一半^[2]。因此, 对于工作波长和输出功率稳定性要求较高的场合, 必须严格控制

其工作温度并且要稳定在设定的温度上。

1 LD 的温度特性^[1, 3]

根据半导体激光器的工作原理, 其输出功率与阈值电流的关系如下式所示: $P = P_{th} + (\eta_d h\nu/e)(I - I_{th})$ (1) 式中, P 为 LD 的输出光功率, I 为驱动电流, P_{th} 和 I_{th} 为相应的阈值功率和阈值电流, $h\nu$ 和 e 分别为光子能量和电子电荷, η_d 为外微分量子效率 (表示激光器的电/光转换效率), η_d 随温度升高而减小。

由此可知, 温度升高, I_{th} 增大, η_d 减小, 输出光功率明显下降。温度对输出光脉冲的另一个影响是“结发热效应”。即使工作环境温度不变, 由于调制电流的作用, 引起激光器结区温度的变化, 因而使输出光脉冲的形状发生变化引起调制失真, 甚至会损坏激光器。因此, 为了保证输出特性的稳定, 提高 LD 的使用寿命, 对激光器进行温度控制就显得十分重要。

2 LD 的组成及温度控制原理

在实际应用中, 通常把半导体激光器做成组件形式, 包括激光二极管、热电致冷器、温度传感器、PN 光检测器、热沉等, 如图 1 所示。偏置电流和信号电流经

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金资助项目 (2006KJ051B)

作者简介: 杨家桂 (1970-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电子测量技术、传感器技术与应用、微机原理等方面的教学和科研工作。

E-mail: yjg_yy@sohu.com

收稿日期: 2006-06-14 收到修改稿日期: 2006-09-19

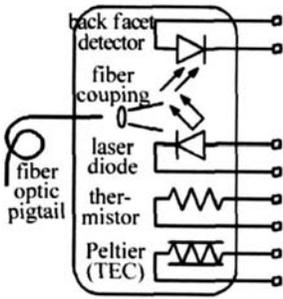


Fig 1 The frame of LD

驱动电路作用于激光二极管,激光二极管正向发射的光经透镜进入光纤,反向发射的光经PN光检测器转换进入自动功率控制,同时致冷器的冷端与激光二极管的热沉接触,通过埋在热沉里的热敏电阻可以探测到激光器结区的温度,并与设定的工作温度比较,将产生的误差信号传递给比例-积分-微分(proportional-integral-differential PID)控制电路,通过控制电路改变热电致冷器(thermoelectric cooler TEC)电流的大小和流向以达到加热或致冷,保持激光器工作温度的恒定,构成自动温度控制系统^[1]。

3 LD自动温度控制系统

3.1 TEC响应特性的优化

为了控制半导体激光器的工作温度,常用的控温方式有水冷、风冷和电致冷方式,对于中小功率的半导体激光器,基本都采用具有体积小、启动快、简单可靠的电致冷方式,即利用Peltier效应来实现制冷或加热的热电式装置——热电致冷器。

在一些半导体激光器温度控制的文章^[4,5]中,通常将TEC模块和激光器都是作为一阶惯性环节来讨论的,在系统模型中也只给出一个惯性环节。但对于大多数半导体激光器,TEC模块近似为双极点系统,一个极点在0.02Hz,另一个极点在1Hz。通常地,在第2个极点后,由于相位裕量不足可能会导致系统产生振荡,而且TEC模块在致热时具有很强的热增益^[6],这会影响其瞬态响应,因此,为了优化TEC模块的响应,将对PID网络进行调整。

与其它控制环路一样,稳态精度与直流环路增益有关。由于激光器组件具有较大的热质量,为了优化TEC的响应特性,希望直流增益很高,但系统会产生振荡和过冲,必须有积分环节,在满足稳态精度的条件下,积分常数尽可能大。图2中 C_2 为积分电容,为了匹配第1个极点,在 C_2 处串联的电阻 R_2 相当于插入一个零点,以保持系统的稳定性,消除产生振荡的条

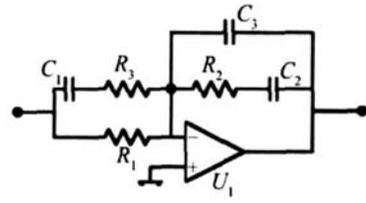


Fig 2 PID circuit regulated

件。 C_1 与 R_3 构成PID的微分环节,它又增加了一个零点以取消TEC模块的第2个极点,以补偿相位裕量^[7]。为了防止噪音进入环路,用 C_3 构成补偿电路,使环增益在较大的频率处开始衰减。调整后的PID控制网络如图2所示,网络器件参数可根据转角频率、相位裕量以及对积分器、微分器的要求等条件计算出来,几个特殊频率的计算公式如下:

$$F_1 = \frac{1}{2\pi C_1 R_2}, F_2 = \frac{1}{2\pi C_1 R_1},$$

$$F_3 = \frac{1}{2\pi C_1 R_3}, F_c = \frac{1}{2\pi C_3 R_2} \quad (2)$$

式中, F_1 是插入零点的转角频率, F_2 为取消TEC第2个极点并且要得到所需要的相位裕量所插入的零点的转角频率, F_3 为终止插入的第2个极点所需的转角频率, F_c 为衰减频率(中心频率),一般地, $F_c \geq 2F_3$ 。

3.2 控制系统模型

要保证LD稳定在设定的温度上,将温度控制系统设计成自动调节系统。系统的调节对象为热电致冷器,设定的温度值 $E_i(s)$ 为输入量(s 为拉普拉斯变换中的复变量,以下公式或符号中出现的 s 含义相同),输出量为LD组件温度,用 $U(s)$ 表示,因为系统中被控对象、测温传感器等器件具有热惯性,故它们可以作为一阶惯性环节建立数学模型,其传递函数为 $G(s) = 1/(\tau_s + 1)$;根据前面对优化TEC模块响应的讨论,TEC模块的传递函数可看作是: $K_0 / [(s + a_1)(s + a_2)]$, K_0 为比例系数,整个系统的数学模型方框图如图3所示。

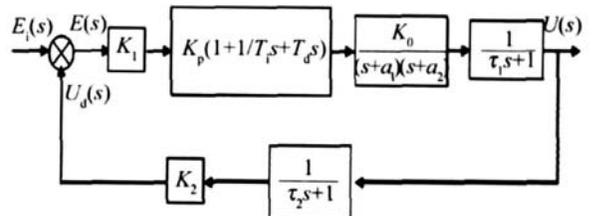


Fig 3 Model of control system

其中, K_1, K_2 为信号放大系数, $1/(\tau_1 s + 1)$ 为LD的热传递函数,反映的是LD的温度与流过热电致冷器的电流之间函数关系, $1/(\tau_2 s + 1)$ 为温度传感器的传递函数。从图2可得到整个系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E_i(s)} = \frac{K_1 K_p K_0 (T_i T_d s^2 + T_i s + 1) (\tau_2 s + 1)}{T_i s (\tau_1 s + 1) (\tau_2 s + 1) (s + a_1) (s + a_2) + K_1 K_p K_0 (T_i T_d s^2 + T_i s + 1)} \quad (3)$$

式中, K_1, K_2 是由具体的信号调理放大电路决定, K_p, T_i, T_d 分别为 PD 的比例、积分、微分增益, TEC 模块的传递函数是由 TEC 自身、热沉、工作环境温度等参数决定, τ_1, τ_2 分别是由半导体激光器和温度传感器的特性决定。

4 系统稳定性分析

4.1 稳态误差

由图 2 可得调整后的 PID 控制网络传递函数为

$$G'(s) = -\frac{1}{R_1} \frac{(C_2 R_2 s + 1) [(C_1 R_1 + C_1 R_3) s + 1]}{s(C_2 C_3 R_2 s + C_1 + C_2)(C_1 R_3 s + 1)}, \text{ 令:}$$

$$T_1 = C_2 R_2, T_2 = C_1 R_1 + C_1 R_3, \beta T_1 = C_2 C_3 R_2, \alpha T_2 = C_1 R_3, \gamma = (C_2 + C_3), \text{ 则上式变为:}$$

$$G'(s) = -\frac{1}{R_1} \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)} \quad (4)$$

在 PID 网络后加一个反相器如图 4 所示, 用以调节 PID 网络的增益, 因此, 图 4 所示电路具有的传递函数为:

$$\frac{U(s)}{E_i(s)} = \frac{KK_0(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{R_1 s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(s + a_1)(s + a_2) + KK_2 K_0(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (7)$$

系统误差信号 $e(t)$ 与输入信号 $e_i(t)$ 之间的传递函数

$$\text{为: } \frac{E(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)}, \text{ 根据终值定理, 系统的稳态}$$

误差:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sE_i(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (8)$$

若有一个单位阶跃输入信号^[8], 系统的稳态误差为:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1 + G(s)H(s)} \quad (9)$$

$$\text{即: } e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ \frac{s}{s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(s + a_1)(s + a_2)} \right\} / \left\{ \frac{1}{R_1 s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(s + a_1)(s + a_2) + KK_2 K_0(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \right\} = 0, \text{ 即系统对阶跃输入的稳态误差为 } 0$$

4.2 系统稳定性

由 (7) 式可以写出系统的特征方程:

$$b_0 s^7 + b_1 s^6 + b_2 s^5 + b_3 s^4 + b_4 s^3 + b_5 s^2 + b_6 s + b_7 = 0 \quad (10)$$

式中, $b_0 = R_1 \alpha \beta T_1 T_2 \tau_1 \tau_2, b_1 = \alpha \beta T_1 T_2 [(\tau_1 + \tau_2) + \tau_1 \tau_2 \times (a_1 + a_2)] + (\beta T_1 + \alpha T_2) \tau_1 \tau_2, b_2 = \alpha \beta T_1 T_2 [(\tau_1 a_2 + 1)(\tau_2 a_1 + 1) + \tau_1(a_1 + a_2)] + \tau_1 \tau_2 \gamma + (\beta T_1 + \alpha T_2) \times [(\tau_1 + \tau_2) + \tau_1 \tau_2(a_1 + a_2)], b_3 = \alpha \beta T_1 T_2 [a_1 a_2 (\tau_1 + \tau_2) + a_1 + a_2] + (\beta T_1 + \alpha T_2) [(\tau_1 a_2 + 1)(\tau_2 a_1 + 1) + \tau_1(a_1 + a_2)] + \gamma [\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2(a_1 + a_2)], b_4 = \alpha \beta T_1 T_2 a_1 a_2 + (\beta T_1 + \alpha T_2) [a_1 a_2 (\tau_1 + \tau_2) + a_1 + a_2] \times$

$$G'(s) = \frac{R_5}{R_1 R_4} \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)} \quad (5)$$

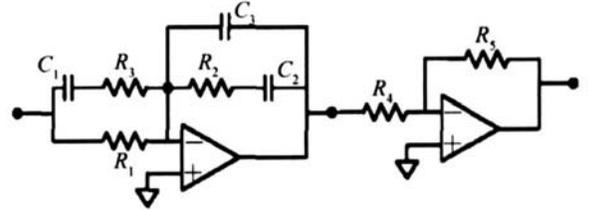


图 4 PID control network with NOT circuit

将调整后的 PID 控制网络放入图 2 所示的控制模型中, 系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_1 K_0 R_5}{R_1 R_4} \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)} \times \frac{1}{(\tau_1 s + 1)} \frac{1}{(s + a_1)(s + a_2)} \quad (6)$$

整个系统的闭环传递函数为: $\frac{U(s)}{E_i(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$,

$$\text{令 } K = \frac{K_1 R_5}{R_4}, \text{ 即:}$$

$$\frac{U(s)}{E_i(s)} = \frac{KK_0(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{R_1 s(\beta T_1 s + \gamma)(\alpha T_2 s + 1)(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(s + a_1)(s + a_2) + KK_2 K_0(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

$$[(\tau_1 a_2 + 1)(\tau_2 a_1 + 1) + \tau_1(a_1 + a_2)] + \gamma[(\tau_1 a_2 + 1) \times (\tau_2 a_1 + 1) + \tau_1(a_1 + a_2)], b_5 = (\beta T_1 + \alpha T_2) a_1 a_2 + \gamma[a_1 a_2 (\tau_1 + \tau_2) + a_1 + a_2] + KK_2 K_0 T_1 T_2, b_6 = \gamma a_1 a_2 + KK_2 K_0(T_1 + T_2), b_7 = KK_2 K_0$$

由上面论述可知, 特征方程的各阶系数均大于 0 而且不缺项, 根据劳斯稳定判据, 系统是稳定的。

5 系统设计与仿真

根据前面的介绍, 为了消除 TEC 模块在第 2 个极点处所引起的振荡, 从 0.3Hz 开始增加相位, 在 12Hz 处结束, 即 $F_2 = 0.3\text{Hz}, F_3 = 12\text{Hz}$ 积分电容 C_2 由 F_1 确定, 这里 R_2 应尽可能大, C_2 就可以取得较小, 为了匹配第 1 个极点, 取 $F_1 = 0.07\text{Hz}, R_2 = 250\text{k}\Omega$ 。环增益在 F_c 处开始衰减, 取 $F_c = 30\text{Hz}$ 由此可以得到 PID 网络相关参数。 a_1, a_2 的由 TEC 模块的两个极点确定, $\tau_1 = 0.5, \tau_2 = 2$ 由温度传感器和激光器的特性决定, 放大电路的放大倍数取 1Q 通过数据处理, 利用 MATLAB 进行仿真^[9], 如图 5 所示, 图 5b 是 PD 调整过后的系统响应曲线, 图 5a 是同样条件下但未加 R_3, C_3 的系统响应曲线。从图中可看出, 调整后 PID 控制系统, 其超调量明显减少, 调节时间也明显缩短, 振荡次数减少到只有一次, 系统稳定性和瞬态特性得到很好的改善。若要使得系统更快地稳定, 可以增加放大倍数, 并利用齐格勒-尼柯尔斯调整法则调整 PID 相关参数就可以, 这里不再详细讨论。

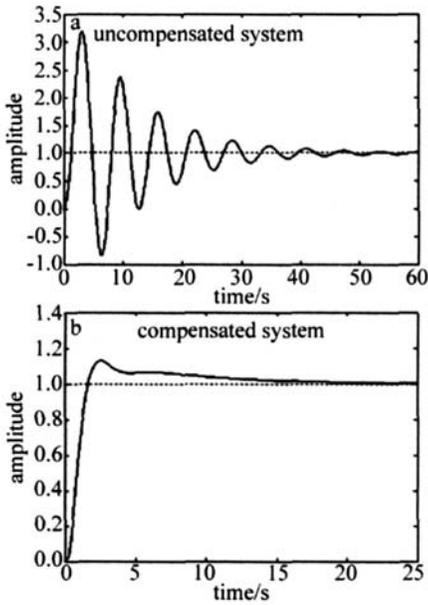


Fig 5 System unit step input response curve

6 结论

设计了一种高稳定的 LD 温度控制系统。通过对 PID 控制网络的调整,优化了 TEC 模块的响应,并根据给出的系统数学模型,分析了系统的稳态误差和稳定性,最后采用 MATLAB 仿真软件进行仿真比较,结果表明,调整后的控制系统具有很好的稳定性和瞬态特性。

(上接第 407 页)

3 结论

理论分析和实验结果表明:具有一定预倾角 $\Delta\epsilon < 0$ 的手性液晶结构,当沿着螺旋轴方向的外加交变电场达到一定的阈值后,手性液晶螺距沿螺旋轴方向形成了梯度变化,造成了手性液晶布喇格反射带宽随外加电场的增加而加宽,可以制成带宽可调式滤光片。

参考文献

- [1] COLLINGS P J, PATEL J S. Handbook of liquid crystal research [M]. New York: Oxford University Press, 1997: 29~30.
- [2] KHOO I C, WU S T. Optics and nonlinear optics of liquid crystals [M]. Singapore: World Scientific, 1993: 231~232.
- [3] BAHADUR B. Liquid crystals application and uses [M]. Singapore: World Scientific, 1990: 24~26.

通过适当地选择 TEC 模块的驱动部件和 PID 控制网络等各参数,温度的控制精度可达到 $\pm 0.01^\circ\text{C}$,完全能保证半导体激光器输出特性的稳定。

参考文献

- [1] LIU Z J, ZHOU Y Y, HU L L *et al*. Fiber communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 52~80 (in Chinese).
- [2] LAWRENCE A. Johnson controlling temperatures of diode lasers and detectors thermoelectrically [EB/OL]. <http://www.iklightwave.com/appnotes/2006-01-11>.
- [3] HAN X J, LI Z J, ZHU C H. Temperature control of medical laser diode appliance [J]. Laser Technology, 1998, 22(4): 250~253 (in Chinese).
- [4] ZHANG N, YU Y, 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] ZENG H L, JIANG P F, XIE F Z. Temperature control of semiconductor laser for interferometry [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(5): 339~346 (in Chinese).
- [6] QU J, LIM D. Numerical simulation on performance of thermoelectric refrigerator elements [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(4): 373~376 (in Chinese).
- [7] ZHONG M, ZHANG Y, SOCKOLOV S. How to design high performance thermoelectric cooler [EB/OL]. <http://www.ednc.com.cn/txt/021105.htm>, 2002-10-30.
- [8] KATSUHIKO O. Modern control engineering [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 215~253 (in Chinese).
- [9] XUE D Y, CHEN Y Q. System emulation and application based on MATLAB/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 224~228 (in Chinese).

- [4] ZHANG D Y, LI J F, LIU C L. Study of cholesteric liquid crystals filter [J]. Applied Laser, 2005, 25(5): 316~318 (in Chinese).
- [5] ZHANG D Y, LI J F, LIU C L. Analysis of Bragg reflection of cholesteric liquid crystals using dynamical reflection theory [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, 20(2): 107~110 (in Chinese).
- [6] LI L, LI J F, FAN B S. Reflective cholesteric liquid crystal polarizers and their applications [J]. Modern Displays, 1998, 18(4): 29~36 (in Chinese).
- [7] QI H. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method [J]. Liquid Crystals, 2003, 30(3): 367~375.
- [8] LI L. Single layer reflective super broadband circular polarizer & method of fabrication therefor [P]. U.S. Patent 5691789, 1997-11-25.
- [9] FAN B S. Controllable bandwidth polarizer [P]. U.S. Patent 6697133, 2004-02-24.
- [10] WANG W, LI G H. Experimental study of electric thermo-optic effect of nematic liquid crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 275~277 (in Chinese).