

文章编号: 1001-3806(2015)06-0789-05

基于热电制冷器温控系统数学建模和参量辨识

王选择^{1,2}, 侯洪洋¹, 翟中生^{1,2}, 杨练根^{1,2}, 刘文超^{1,2}

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 湖北省现代制造质量工程重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 为了实现对半导体激光器温度的高精度控制, 利用热电制冷器、温度传感器与相应的散热装置, 设计了一套半导体激光器温度控制的实验系统。首先采用热力学分析方法, 对实验系统进行了理论分析, 建立了该温控实验系统数学模型与相应的传递函数; 其次, 在取得了半导体激光器温度数据的条件下, 根据模型参量的特点, 提出了一种结合阶跃响应的实验曲线, 应用非线性曲线最小二乘拟合进行模型参量的辨识; 最后利用该模型参量进行了系统仿真和实验验证。结果表明, 仿真曲线、拟合曲线与实验曲线结果一致, 拟合的模型参量具有较高的预测精度。这些结果对优化调整温度控制实验是有帮助的。

关键词: 激光器; 温控系统模型; 阶跃响应和参量辨识; 实验装置

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.012

Mathematical modeling and parameter identification of temperature control systems based on thermoelectric coolers

WANG Xuanze^{1,2}, HOU Hongyang¹, ZHAI Zhongsheng^{1,2}, YANG Lianggen^{1,2}, LIU Wenchao^{1,2}

(1. Mechanical Engineering College, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to achieve high precision temperature control of a semiconductor laser, an experimental temperature control system was designed by using a thermoelectric cooler, a temperature sensor and corresponding radiators. Firstly, the mathematical model and the corresponding transfer function of temperature control were established by utilizing thermodynamic analysis method after theoretical analysis. Secondly, after obtaining the temperature data of the semiconductor laser, according to the characteristics of model parameters, an empirical curve of step response was presented and model parameters were identified by nonlinear curve least square fitting. Finally, the system was simulated based on the model parameters and experimental verification was carried out. The results show that the fitting curve and emulation curve is consistent with experimental curve and the fitting model parameters have better prediction accuracy. The result is helpful for optimizing temperature control.

Key words: lasers; temperature control model; step response and parameter identification; experiment setup

引言

在干涉测量中, 半导体激光器 (laser diode, LD) 作为干涉测量系统的光源, 半导体激光器的输出功率与波长等受温度的影响较大。一般温度变化 1℃ 导致输出波长的改变为 0.2nm ~ 0.3nm, 这会严重影响干涉测量误差, 因此对半导体激光器温度控制很重要。目前一般采用半导体热电制冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 作为温度控制执行元件, 而常用温度控制的方法

是用脉冲宽度调制技术控制 TEC 端电压和比例-积分-微分控制器^[1-5] 对热响应进行调整。但实验中发现 TEC 热惯性非常小, 制冷制热速度很快, 同时由 TEC、温度传感器、模组 (安装着激光二极管) 和散热装置组成的实验系统^[6-7], 温度传感的时间常数也很小, 精度要求高, 因此在温度控制之前, 亟待需要解决的问题是建立合理的热分析数学模型, 在此模型的基础上进行系统热响应分析, 这对温度的预测和温度控制显得尤为重要。而对于装有激光二极管模组温度的实时监控, 运用基于相差识别的温度传感原理^[8]。

为了在实际运用中实现温度的有效控制。作者在建立温控系统热分析数学模型的基础上, 重点研究了在输入电压恒定的条件下, 基于 TEC 温控系统输入与输出特性, 仿真^[9] 与实验验证此模型的合理性, 并应用非线性曲线拟合最小二乘法对模型中的特性参量进

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175154; 51275157); 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助项目 (PIL1209)

作者简介: 王选择 (1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测量、光电检测方面的研究。

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2015-01-15

行辨识。

1 实验装置

实验结构模块如图 1 所示,由散热片、TEC、模组构成,圆槽内嵌入激光二极管,带条纹的小方槽装上热敏电阻,分别检测散热片和模组温度,且模组上的小方槽与圆槽在同一高度,保证激光头和热敏电阻在同一温度梯度上。实验中使用 QSI 系列 50mW,650nm 激光二极管、CP 系列 12mm × 12mm × 3mm 的 TEC 和表面贴装器件(surface mount decices, SMD)封装负温度系数热敏电阻。另外,激光二极管与模组连接处涂覆导热硅脂,热敏电阻^[10]、模组、TEC、散热片连接处用导热绝缘的环氧树脂粘接固定。由于在上实际制造出的模组与 TEC 接触面尺寸大小相等,因此可以忽略 TEC 与环境的热交换及 TEC 与模组进行热传递的热损耗。

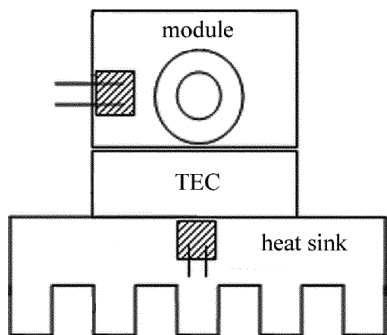


Fig. 1 Structure module of experimental setup

2 实验系统数学模型的建立

2.1 热力学分析

TEC 制冷制热原理利用了珀尔帖效应,将冷面的热量不断转移到热面。由能量守恒定律可知,从冷面失去的热能与热面得到的热能相等,因此系统的总热能可认为电流通过 TEC 内阻产生的内能。分别用 P_r 和 P_e 表示内阻热功率和转移热功率。此外在 TEC 对结构模块进行温度调节的同时,散热片与模组不断地与环境进行热能交换,主要为散热片释放到环境的热功率 P_1 和装有激光二极管模组吸收到环境的热功率 P_4 ,分别满足如下关系:

$$\begin{cases} P_1 = (T_h - T) \times K_1 \\ P_4 = (T - T_w) \times K_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_h 为散热片温度, T_w 为模组温度, T 为环境温度, K_1 为散热片散热系数, K_4 为模组吸热系数。

在实际的温度测量中发现,TEC 刚通电时,冷面和热面的温度变化得最快,随着冷热面温差的加大,热面温度的上升和冷面温度的下降都逐渐缓慢,由此可见,

温差越大,阻止热量向冷面转移的能力越大,在温差达到最大时,TEC 制冷功率为 0,热量不再从冷面转移到热面,冷面温度不再下降。那么,用 P_e 表示抑制热能转移功率,它与冷热面温差 ΔT 关系为:

$$P_e = \Delta T \times K_e \quad (2)$$

式中, K_e 为温度抑制系数。

2.2 数学模型的建立

根据 TEC 热量的转移特性,可以认为内阻产生的热量 P_r 全部释放到 TEC 的热端面,为了能够清楚表达热传递的过程,建立了如图 2 所示的等效热传递模型,可以知道,散热片净热功率 ΔP_1 和装有激光二极管模组的净热功率 ΔP_2 满足关系如下:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P_c + P_r - P_1 - P_e \\ \Delta P_2 = P_e - P_c + P_4 \end{cases} \quad (3)$$

那么,散热片温度 T_h 、模组温度 T_w 分别满足如下关系:

$$\begin{cases} T_h = K_2 \cdot \int \Delta P_1 dt + T_h(0) \\ T_w = K_3 \cdot \int \Delta P_2 dt + T_w(0) \end{cases} \quad (4)$$

式中, K_2, K_3 分别为散热片、模组的质量与其比热容的乘积的倒数, $T_h(0), T_w(0)$ 分别为散热片和模组的初始温度, t 为时间变量。

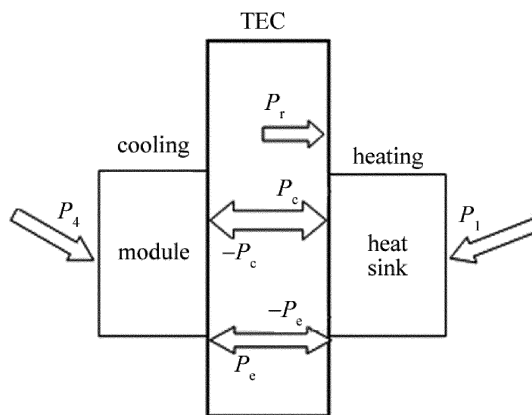


Fig. 2 Equivalent model of heat transfer

依据以上分析,结合数学表达式和图 2 的等效热

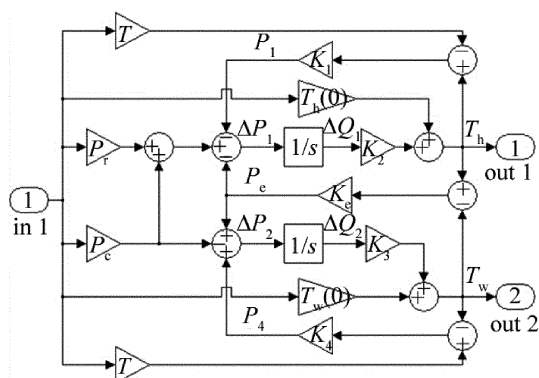


Fig. 3 Mathematical model of the system

传递模型建立了系统数学模型,如图 3 所示。图中, $\frac{1}{s}$ 为积分环节, s 为复变量。为了进行仿真分析和理论分析,使用阶跃信号作为系统输入,根据阶跃信号的特性,零时刻之前的系统阶跃响应没有意义,只有在零时刻之后,散热片和模组才具有初始温度,同时系统有了环境温度。

3 系统模型参量的确定

考虑到系统数学模型中参量太多,在进行参量辨识时,不能完全依靠求解整个系统最优来进行辨识,因此采用分步进行的方法。首先对系统的局部进行辨识,给出一个参量的范围值,然后在这个范围内寻找全系统最优值,保证所求的最优解稳定性好,能反映实际系统的传热过程。

3.1 特性参量 K_1, K_2, K_e, K_3, K_4 的确定

按照上述分步方案,首先进行了确定 K_1, K_2, K_e, K_3 和 K_4 参量的实验。先让 TEC 通电,调整通电方向,对装有激光二极管的模组制冷,检测到模组与散热片到达合适的温差后,让 TEC 断电。同时采集到散热片和模组温度特性曲线如图 4 所示,依据热力学定律,热

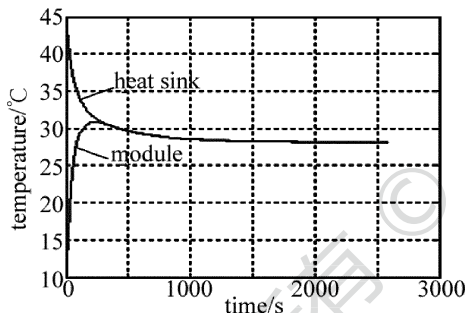


Fig. 4 Temperature vs. time of K_1, K_2, K_e, K_3, K_4 experiment

量不断自发从热面转移到冷面,两者温度相等后,一起下降至室温。在 TEC 断电情况下,分析数学模型(见图 3),冷面转移到热面的热功率 P_c 和内阻产生的热功率 P_r 都为 0,系统输入为单位阶跃信号,零时刻之后,散热片和模组才具有初始温度 $T_h(0), T_w(0)$,同时系统有了环境温度 T ,输出为散热片温度 T_h ,模组温度 T_w 。

在 TEC 断电的条件下,列出系统输入 X_i 与输出 X_o 的关系式:

$$\begin{cases} X_{o,1} = [(TX_i - X_{o,1})K_1 - (X_{o,1} - X_{o,2})K_e] \cdot \frac{1}{s}K_2 + T_h(0)X_i \\ X_{o,2} = [(TX_i - X_{o,2})K_4 + (X_{o,1} - X_{o,2})K_e] \cdot \frac{1}{s}K_3 + T_w(0)X_i \end{cases} \quad (5)$$

分别消除 $X_{o,1}, X_{o,2}$ 可得单输出与单输入传递函数 $G_1 = \frac{X_{o,1}}{X_i}$ 和 $G_2 = \frac{X_{o,2}}{X_i}$,在环境温度不变的条件下,认为系统输出为经过其传递函数,输入 X_i 为一常数阶跃响应,为了便于非线性曲线拟合,对其阶跃响应数学表达式进行归一化简化处理,输出可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{X_{o,1}(t) - T}{T - T_h(0)} = a_1 \exp(s_1 t) + a_2 \exp(s_2 t) \\ \frac{X_{o,2}(t) - T}{T - T_w(0)} = b_1 \exp(s_1 t) + b_2 \exp(s_2 t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, s_1 和 s_2 为方程 $s^2 + Es + F = 0$ 的根。 E 和 F 为方程系数。显然 a_1, a_2 不独立,且 b_1, b_2 也不独立,根据拉斯变换初值定理可知, $a_1 + a_2 = -1, b_1 + b_2 = -1$,同时它们满足如下的关系:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{-s_1 - [T - T_h(0)] \cdot (K_2 K_e + K_3 K_4 + K_3 K_e) + [T_w(0) - T_h(0)] \cdot K_2 K_e}{s_1 - s_2} \\ a_2 = \frac{s_2 + [T - T_h(0)] \cdot (K_2 K_e + K_3 K_4 + K_3 K_e) - [T_w(0) - T_h(0)] \cdot K_2 K_e}{s_1 - s_2} \\ b_1 = \frac{-s_1 - [T - T_w(0)] \cdot (K_1 K_2 + K_2 K_e + K_3 K_e) + [T_h(0) - T_w(0)] \cdot K_3 K_e}{s_1 - s_2} \\ b_2 = \frac{s_2 + [T - T_w(0)] \cdot (K_1 K_2 + K_2 K_e + K_3 K_e) - [T_h(0) - T_w(0)] \cdot K_3 K_e}{s_1 - s_2} \end{cases} \quad (7)$$

调用 MATLAB 的非线性最小二乘法曲线拟合函数,按照最小二乘法原理,要求实验曲线 $X_{o,1}$ 与拟合曲线 $X_{o,1}'$ 满足如下关系:

$$M = \min[\sum (X_{o,1} - X_{o,1}')^2 + (X_{o,2} - X_{o,2}')^2] \quad (8)$$

按照(6)式同时对模组和散热片数据进行归一化处理,也就是对 TEC 断电条件下的系统输出 $X_{o,1}, X_{o,2}$ 进行归一化处理。然后按照最小二乘法原理对归一化

实验曲线进行特征辨识。拟合结果为: $a_1 = -0.4339, a_2 = -0.5483, b_1 = 0.4484, b_2 = -1.4744, s_1 = -0.0029, s_2 = -0.0170$,归一化实验拟合曲线如图 5 所示。再将拟合的结果代入(7)式的 4 个方程,同时由(4)式可以知道, K_3 为模组质量与其比热容的乘积的倒数,且模组是为铝制材料,质量为 2.9g,先确定 $K_3 = 0.392$ 的条件下,求解 K_1, K_2, K_e, K_4 这 4 个未知数: $K_1 = 0.021$,

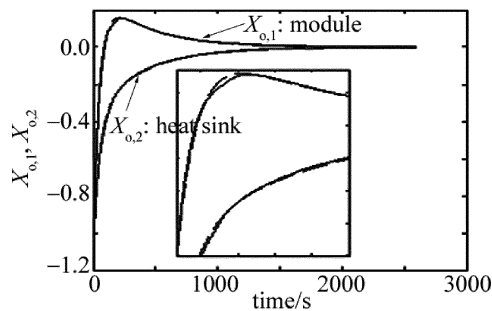


Fig. 5 The normalized experimental curve and fitting curve of X_o .

$K_2 = 0.14169, K_e = 0.0265, K_4 = 0.0066$.

3.2 参量 P_r, P_c 的确定

在确定了 K_1, K_2, K_e, K_3, K_4 参量后,进行了优化参量 P_r, P_c 的实验。让 TEC 通电,对模组制冷,采集到装有激光二极管模组温度下降和散热片温度上升温度曲线,如图 6 所示。系统输入为单位阶跃信号,零时刻之后,散热片和模组初始温度为 $T_h(0), T_w(0)$,系统环境温度为 T ,在环境温度不变的情况下,模组和散热片初始温度与环境温度相等,即 $T = T_h(0) = T_w(0)$,输出为散热片温度 T_h ,模组温度 T_w 。根据图 3 中的数学模型列出系统输入 X_i 与输出 Y_o 的关系:

$$\begin{cases} Y_{o,1} = [(TX_i - Y_{o,1})K_1 - (Y_{o,1} - Y_{o,2})K_e + (P_r + P_c)X_i] \frac{1}{s} K_2 + T_h(0)X_i \\ Y_{o,2} = [(TX_i - Y_{o,2})K_4 + (Y_{o,1} - Y_{o,2})K_e - P_c X_i] \frac{1}{s} K_3 + T_w(0)X_i \end{cases} \quad (9)$$

式中, $Y_{o,1}, Y_{o,2}$ 表示模组和散热片初始温差和环境温度相等、以及 TEC 通电条件下的系统输出。分别消除 $Y_{o,1}, Y_{o,2}$, 可得单输出与单输入传递函数 $H_1 = Y_{o,1}/X_i$ 和 $H_2 = Y_{o,2}/X_i$, 那么 TEC 通电条件下的阶跃响应为:

$$\begin{cases} Y_{o,1} = T + \frac{B_1}{F} + \frac{FA_1 - B_1(s_1 + E)}{F(s_1 - s_2)} \cdot \exp(s_1 t) - \frac{FA_1 - B_1(s_2 + E)}{F(s_1 - s_2)} \exp(s_2 t) \\ Y_{o,2} = T + \frac{D_1}{F} + \frac{FC_1 - D_1(s_1 + E)}{F(s_1 - s_2)} \cdot \exp(s_1 t) - \frac{FC_1 - D_1(s_2 + E)}{F(s_1 - s_2)} \exp(s_2 t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} A_1 = (P_r + P_c)K_2 \\ B_1 = (P_r + P_c)K_2 K_3 K_4 + P_r K_2 K_3 K_e \\ C_1 = -K_3 P_c \\ D_1 = P_r K_2 K_3 K_e - K_1 K_2 K_3 P_c \\ E = K_1 K_2 + K_3 K_4 + K_2 K_e + K_3 K_e \\ F = K_1 K_2 K_3 K_4 + K_1 K_2 K_3 K_e + K_2 K_3 K_4 K_e \end{cases} \quad (11)$$

将 $s_1, s_2, K_1, K_2, K_e, K_3, K_4$ 代入 (11) 式,调用 MATLAB 的非线性曲线拟合 lsqcurvefit 函数,按照 (10) 式对 P_r 和 P_c 进行特征辨识,要求拟合曲线 $Y_{o,1}', Y_{o,2}'$ 与实时曲线 $Y_{o,1}, Y_{o,2}$ 平方和最小,得到参量的值为: $P_r = 0.986W, P_c = 1.3214W$ 。最后用 SIMULINK 建立如图 3 所示的仿真模型,再用拟合参量值进行仿真,在 MATLAB 中分别用实线、长虚线、短虚线绘制了实验曲线、拟合曲线和仿真曲线,如图 6 所示。这 3 条曲线所反映的热电制冷器的制冷制热特性和规律是一致的,在冷面与热面温差最大时,TEC 的制冷功率就小于抑制热能转移功率,模组温度开始上升,散热片温度跟随上升。

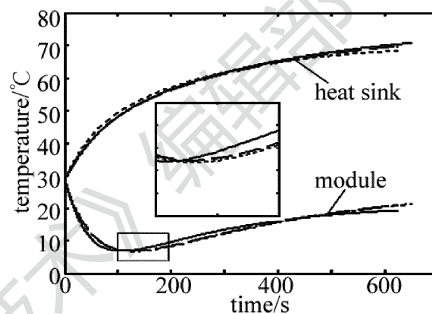


Fig. 6 Temperature curve with experiment simulation and fitting of P_r, P_c experiment

4 结论

提出了半导体激光器温控系统结构模块的数学模型,运用时域分析的方法计算了模组和散热片的阶跃响应,对比数学模型的仿真分析,验证了模型仿真分析与理论分析的一致性,在基于相差识别温度采集系统基础上,利用非线性曲线拟合最小二乘法对数学模型的各个参量进行特征辨识,此方法为进一步半导体激光器温度控制奠定了基础。

参考文献

- [1] 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).
- [2] CHEN W, YANG Zh, ZHANG W. Design of high precision laser temperature control circuit [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 669-674 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] ZHANG Y N, TAN Y D, ZHANG Sh L. Temperature control system for frequency stabilization of total internal cavity microchip laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 101-106 (in Chinese).
- [5] YIN Zh Y, WANG Y F, LI G, et al. Design of high performance temperature controlling system based on TEC [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(6): 1296-1297 (in Chinese).
- [6] AYAN R, AMITAVA B O, SANKAR D, et al. A simple scanning

- semiconductor diode laser source and its application in wavelength modulation spectroscopy around 825nm. [J]. Optics and Laser Technology, 2007,39(2):359-367.
- [7] LIU Y, PAN H T, ZHAO Sh M, *et al.* Optimization design of structure of TEC temperature control system for microfluidic PCR [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(9): 85-88 (in Chinese).
- [8] WANG X Z, ZENG Zh X, ZHONG Y N, *et al.* Precise measurement and control of temperature in semiconductor laser base on phase recognition [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(2): 239-245 (in Chinese).
- [9] CHENG X L, DENG Zh M. Simulation analysis of thermal smart structure for composite with TEC [J]. Computer Simulation, 2008, 25(4): 16-21 (in Chinese).
- [10] GUAN F W, LIU J, YU Sh M, *et al.* Calibration and $R-T$ characteristics of NTC thermistor [J]. OME Information, 2011, 28(7): 69-73 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©