

文章编号 1004-924X(2017)03-0648-08

## 基于新型模糊 PID 控制单元的 LD 精密温控研究

张克非<sup>1\*</sup>, 蒋涛<sup>2</sup>, 邵龙<sup>2</sup>, 苏良闯<sup>2</sup>, 叶涛<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**为改善温度波动对光通信用半导体激光器性能的影响,设计了基于三维语言变量的高精度跟踪误差温度控制系统。为减小系统成本,利用运算放大器 AD620 和 OP07 等器件设计了温度采集系统,并采用最小二乘法拟合温度数据,从而建立温度—电阻关系模型,预测温度变化趋势;加入第三维模糊语言变量,结合窄域论以适当压缩 E、EC、ECC 的论域,采用模糊规则设定方法,建立新型三维模糊 PID 规则表并求解得出模糊查询表。结果表明:当预设温度为 25 °C 时,温控系统超调量为 0.97 °C,最大下冲量出现在第 17 s,其值为 0.69 °C;工作 51 s 后,LD 系统进入稳定状态,温度保持为 25±0.05 °C;在第 150~210 s 内,其温度值标准差为 0.020 4 °C。同时,该系统实现了对半导体激光器 0~75 °C 的大范围精密温控,温控精度为±0.05 °C。该系统能够实现对半导体的高效制冷、加热控制,具有响应时间快和系统开销小的优势,能对控制参数实现自整定。

**关键词:**光通信;半导体激光器;模糊 PID;温度控制

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0648

## Research on precision temperature control of laser diode based on the novel fuzzy-PID control unit

ZHANG Ke-fei<sup>1\*</sup>, JIANG Tao<sup>2</sup>, SHAO Long<sup>2</sup>, SU Liang-chuang<sup>2</sup>, YE Tao<sup>2</sup>

(1. School of Computer and Technology,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangkefeijike@163.com

**Abstract:** To improve the impact of temperature fluctuation on performance of diode laser used for optical communication, a high-precision temperature control system by tracking error based on 3D linguistic variable was designed. To lower the system cost, at the same time, a temperature acquisition system was also designed under the help of operational amplifier AD620 and OP07, and least square method was used to fit the temperature data, thus establishing a temperature-resistance relationship model to predict the temperature variation trend; then a third-dimension fuzzy linguistic variable was added, and after properly compressing the domain of E, EC and ECC in accordance with the narrow field theory, a new-type fuzzy-PID rule table was created by adopting the method for fuzzy

**收稿日期:**2016-11-14;**修订日期:**2016-12-22.

**基金项目:**四川省科技厅科技服务业示范重点资助项目(No. 2016GFW0144);四川省大学生创新创业训练计划资助项目(No. 201510619044);西南科技大学大学生创新基金资助项目(No. CX16-061)

rule setting, thus working out the fuzzy query table. The results indicate that when the specified temperature is 25 °C, overshoot of the temperature control system will be 0.97 °C, with a maximum impulse of 0.69 °C occurring at 17 s; after 51 s, LD system enters into a stable state, with a temperature maintained at 25±0.05 °C; during the time period of 150~210 s, standard deviation of temperature value is kept at 0.020 4 °C. The system, at the same time, achieves high precision temperature control over the diode laser within a large range of 0~75 °C, with a temperature control precision of ±0.05 °C. In addition, the system can achieve high-efficiency cooling and heating control over the diode laser, with such advantages as short response time, low cost and self-tuning parameters.

**Key words:** optical communication; laser diode; fuzzy PID; temperature control

## 1 引言

在超高速率、长距离的激光通信中,半导体激光器(Laser Diode,LD)的高输出功率会造成通信模块温度升高,导致信号传输失真和激光器寿命减短<sup>[1]</sup>。目前,工程界普遍采用比例-积分-微分(Proportion-Integration-Differentiation, PID)控制算法对激光器的温度进行控制。

Lai 等人<sup>[2]</sup>采用二维模糊控制器,输入变量为温度偏差  $E$  和偏差变化  $EC$ ,输出变量为 PID 参数的修正量,构成一个双输入三输出的模糊控制器。相比于三维模糊控制器,具有较高的响应速度,适用于中小型功率 LD 温度控制系统中,但在稳定性上要差于三维模糊控制器。宋荣荣等人<sup>[3]</sup>考虑了模糊温度的差值及其差值变化率之间的模糊关系,在系统运行中通过不断检测差值及其变化率,根据模糊控制原理对 PID 的 3 个参数进行实时修改,以满足不同阶段对控制参数的不同要求,从而使被控对象有良好的动态特性和静态特性。陈晨等人<sup>[4]</sup>采用 Z-N 式 PID 控制算法对分布式反馈激光器进行了温控设计,精度达 0.05 °C,但温控为 5~60 °C,对于工业级应用尚存在限制。戴俊珂等人<sup>[5]</sup>设计的控温模块通过负温度系数热敏电阻(Negative Temperature Coefficient, NTC)采集温度值,通过三维自整定模糊 PID 算法,并利用反馈回路实现闭环、实时控温,短期稳定度达 0.008 °C,短期稳定度达 0.015 °C,但其系统成本较高,尤其是在测温电路中采用了更为精密的元器件,不利于产业化发展。

Kim 等人<sup>[6]</sup>提出一种基于自适应近似控制法的非线性反馈系统,实现了高效的跟踪性能。该方法主要从数学角度进行大量公式化推导以优化传统控制方案,但缺少在实际系统中的应用。

综上,传统的二维模糊 PID 控制,难以实现超高速率长距离激光二极管跟踪误差的准确控制<sup>[7-8]</sup>,而三维模糊控制的时间复杂度较高,并且需要利用实际数据建立模型,通过降阶等方法求出偏差变化的变化率 ECC,以得到全部的输入变量<sup>[9]</sup>。本文针对当前 LD 跟踪误差控制的特点,基于窄域论和模糊控制原理,提出近似三维语言变量跟踪误差控制模型,进行 PID 控制参数理论推导,并对参数进行优化整定,实现对半导体激光器温度的控制,控制精度达 ±0.05 °C,温控范围 0~75 °C。

## 2 温度采集系统

### 2.1 测温电路

图 1 所示为温度采集系统,主要由惠斯通电桥、高精度运算放大器 AD620 以及 OP07 等器件设计实现,其中  $R_6$  为 NTC 电阻。通过调节电阻  $R_2$  和  $R_3$  的大小,即可由稳压二极管 TL431 向惠斯通电桥提供一个恒定的电压。由于惠斯通电桥中 4 个电阻较大,可不考虑微小的电流变化对电路造成的影响,故当 NTC 电阻发生变化时,则  $a$  和  $b$  两点之间的电压差的变化值为  $\Delta U_{ab}$ :

$$\Delta U_{ab} = \frac{V_{out}(R_6^2 + R_6 R_4 + \Delta R R_6)}{2(R_4 + R_6)(R_4 + R_6 + \Delta R)}, \quad (1)$$

式中: $V_{out}$  为 10 V,  $\Delta R$  为  $R_6$  变化的值。

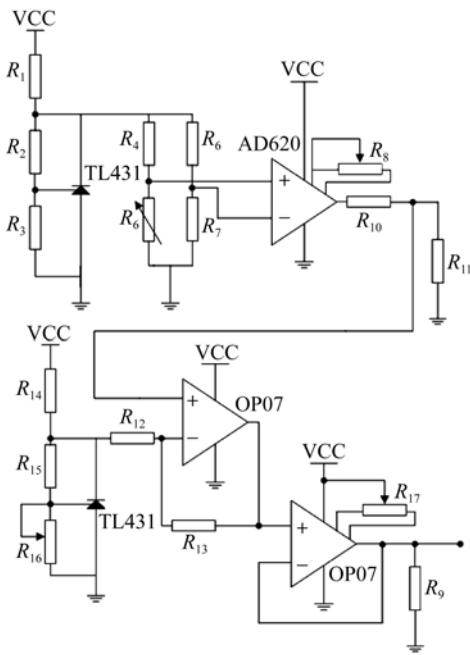


图 1 温度采集系统

Fig. 1 Temperature acquisition system

当电压差  $\Delta U_{ab}$  输入到运算放大器 AD620 后,通过调节  $R_8$  的阻值大小即可达到想要的放大倍数  $G$ ,根据其产品说明书可知:

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_8} + 1. \quad (2)$$

在利用较大电平传导小信号的时候,为除去共模信号的干扰来放大差模信号,选用 OP07 作为差模放大器。信号经过差模放大器后,在输出端利用 OP07 作为电压跟随器,避免输出信号受其他因素干扰。最后通过测量  $R_9$  电阻上的电压即可得到信号的输出电压。为方便 A/D 转换器数据转换,可以通过调节电路中的  $R_8, R_{16}, R_{17}$  这 3 个电位器,控制输出电压为  $0 \sim 5 \text{ V}$ 。

## 2.2 温度-电阻的拟合

由于测温电路输出为电压值,经过 A/D 转换器后,最终显示的仅是温度值,而不能直接得出相应温度下的电阻,因此需要对温度-电阻关系建立合适的参考模型,将离散量变成线性量,便于推测温度或者电阻的变化趋势<sup>[10]</sup>。对电阻进行了 2 次实验,经数据采集和利用 Matlab 软件对数据进行最小二乘法拟合得出结果如图 2 所示。

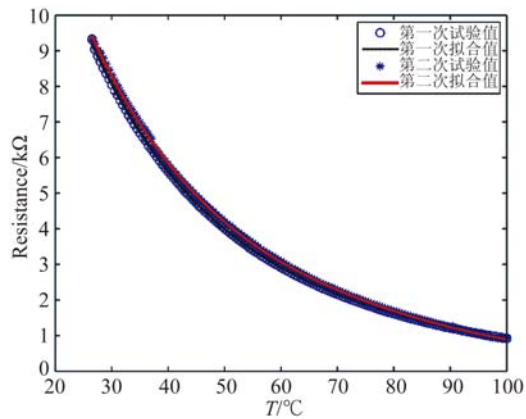


图 2 电阻与温度关系曲线

Fig. 2 Curve of resistance against temperature

第一次试验和第二次试验对应的拟合函数分别为式(3)和式(4),两组实验数据值的均值拟合函数如式(5)所示:

$$y_1(x) = -0.0001x^3 + 0.0140x^2 + 0.8807x + 24.5756, \quad (3)$$

$$y_2(x) = -0.0001x^3 + 0.0128x^2 + 0.8867x + 24.2422, \quad (4)$$

$$y_3(x) = -0.0001x^3 + 0.0130x^2 + 0.8430x + 24.1767, \quad (5)$$

式中:  $x$  为温度值,  $y$  为电阻值。

将数据拟合值与样本平均值差的最大值和样本值与样本平均值差的最大值相比,比值的平方为数据拟合的相似程度。由此可知,试验一和试验二模型相似度分别为 0.9999 和 1.0000,相似程度较高,表明了该拟合方法的准确性。

## 3 PID 参数调整规则

PID 控制中主要考虑到恒温控制过程为非线性时变过程,但通过对温控数据的最小二乘法拟合,可将该过程转变为基本线性和动态特性时不变系统,此时数据就可由 PID 控制<sup>[11]</sup>。其次, PID 参数  $K_p, T_i$  和  $T_d$  可以根据过程的动态特性即时整定,如果过程的动态特性变化, PID 参数即可重新整定。

为实现 PID 控制率,采用逼近法<sup>[12]</sup>,当采样周期较短时,可以用求和代替积分,用差商代替微商,即可使 PID 控制离散化。描述离散时间 PID 算法的差分方程为:

$$u_n = K_p \left\{ e_n + \frac{1}{T_I} \sum_{k=1}^n e_k T + T_D \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \right\} + u_0. \tag{6}$$

对式(6)变换可得到 PID 调节算法的另一种实用形式:

$$\Delta u_n = K_p \left[ (e_n - e_{n-1}) + \frac{T}{T_I} e_n + \frac{T_D}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right], \tag{7}$$

式中:  $T$  为比例采样周期,  $u_0$  为控制量的基值,  $e$  为测量值与给定值的偏差,  $T_d$  为微分时间,  $T_i$  为积分时间,  $K_p$  为调节器的放大系数。

PID 的控制对象为热源温度,输入数据是系统的实时温度采样结果,经过 PID 控制器之后,输出的控制量是 TEC 的驱动电压值,用来调节 TEC 温度范围,达到稳定热源温度目的。

## 4 新型模糊 PID 控制器设计

### 4.1 模糊化设计

为能够进行模糊控制,首先要对确定数值的输入、输出变量进行模糊化处理,使之成为模糊语言变量值<sup>[13]</sup>。除了 ECC 论域外,对所有输入、输出变量均采用 5 个等级量化:PB(正大)、PS(正小)、ZE(零)、NS(负小)、NB(负大)。由于隶属函数的形状对模糊控制的控制效果影响较小,采用三角集合的模糊隶属函数。

为确定输入,输出的变化范围以及对应语言变量的论域,接口模糊化设计如下:

#### 4.1.1 E 论域的量化

设  $E$  的基本论域为  $[0.008\ 0, 0.282\ 0]$ ,选定偏差语言变量  $E$  的论域为  $x = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ,可得  $E$  论域的量化表和模糊子集隶属函数表,如表 1 和 2 所示。

表 1 E 论域量化表

Tab. 1 Quantization table of E domain

量化等级	变化范围
-2	0.008 0~0.030 0
-1	0.023 0~0.034 0
0	0.040 0~0.056 0
1	0.061 0~0.107 0
2	0.115 0~0.282 0

表 2 E 的模糊子集隶属函数表

Tab. 2 Membership function table of E Fuzzy subset

等级	E				
	-2	-1	0	1	2
-2	0	0	0	0.8	1
-1	0	0	0.6	1	0.8
0	0	0.8	1	0.8	0
1	0.8	1	0.6	0	0
2	1	0.8	0	0	0

#### 4.1.2 EC 论域的量化

设  $EC$  基本论域为  $[0.016\ 0, 0.564\ 0]$ ,选定偏差语言变量  $EC$  的论域为  $x = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ,可得  $EC$  论域的量化表和模糊子集隶属函数表,如表 3 和 4 所示。

表 3 EC 论域量化表

Tab. 3 Quantization table of EC domain

量化等级	变化范围
-2	0.016 0~0.040 0
-1	0.036 0~0.060 0
0	0.058 0~0.130 0
1	0.110 0~0.192 0
2	0.182 0~0.564 0

表 4 EC 的模糊子集隶属函数表

Tab. 4 Membership function table of EC fuzzy subset

等级	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
-2	0	0	0.4	0.6	1
-1	0	0.4	0.6	1	0.8
0	0	0.8	1	0.8	0
1	0.8	1	0.6	0.4	0
2	1	0.8	0	0	0

#### 4.1.3 第三维语言变量 ECC 的引入与量化

如图 3 所示,传统三维模糊 PID 控制复杂度较高,控制算法复杂,因此采取折中的方法,作近

似的三维处理,即利用二维模糊控制法,在建立二维模糊控制表基础上,引入窄域论和第三维语言变量,这样既在算法上提高了温度控制器的控制精度又降低了控制系统的系统开销。即将模糊集合 ECC 的论域和模糊语言变量档次数取少一些,以减少计算。为尽量减少模糊规则数量,可对检测和控制精度要求比较高的变化量划分多的模糊度,反之则划分较少的模糊度,从而建立起新型模糊 PID 控制模型,如图 4 所示。

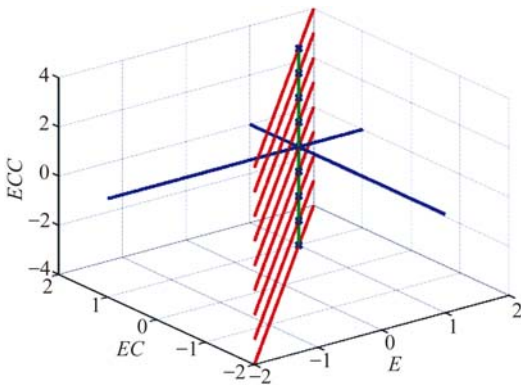


图 3 传统三维模糊 PID 控制模型

Fig. 3 Traditional fuzzy-PID control module

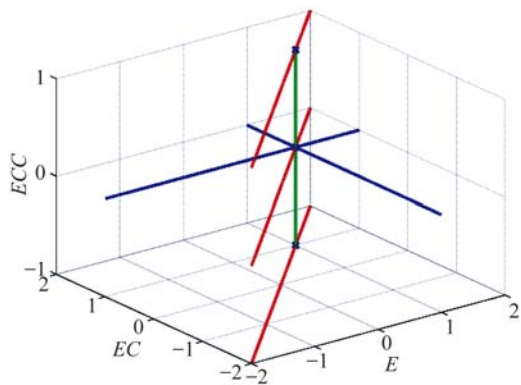


图 4 新型模糊 PID 控制模型

Fig. 4 Novel fuzzy-PID control module

在对 ECC 论域的量化方面,将 ECC 的量化等级缩小为 3 个,设 ECC 的基本论域为  $[0.034\ 0, 0.340\ 0]$ ,选定偏差语言变量 ECC 的论域为  $x = \{-1, 0, 1\}$ ,对 ECC 选取 3 个语言变量值: B(大)、Z(零)、S(小),可得 ECC 论域的量化表和模糊子集隶属函数表,如表 5 和 6 所示。

表 5 ECC 论域量化表

Tab. 5 Quantization table of ECC domain

量化等级	变化范围
-1	0.034 0~0.100 0
0	0.106 0~0.238 0
1	0.232 0~0.340 0

表 6 ECC 的模糊子集隶属函数表

Tab. 6 Membership function of ECC fuzzy subset

等级 $\mu(E)$	ECC		
	B	Z	S
-1	0	0.6	1
0	0.4	1	0.6
1	1	0.4	0

## 4.2 模糊控制规则

### 4.2.1 规则设定方法

根据温度采集系统获得温度与电阻数据,采用最小二乘法拟合实验数据,经多次测量,发现 E、EC、ECC 的变化曲线基本相同,因此模糊控制规则的改进,只需在相应的区间对原来的  $K$ ,  $\Delta T_i$ ,  $\Delta T_d$  调节强度的基础上加强。

在处于误差较大的区间时:应把  $K$  放在较小的档次,以减小其他物理量初始变化时的影响,避免系统非线性现象所产生的积分饱和; $\Delta T_i$  应取较小值,提高控制性能; $\Delta T_d$  应调大,使系统超调变小。

在处于误差中等大小的区间时:加大  $K$  值,提高系统动态精度和调节速度; $\Delta T_i$  值应适中,避免对动态稳定性造成影响; $\Delta T_d$  应取较小值,并尽可能保持不变。

在接近设定值时:应减小  $K$  值,使系统具有更好的稳态性能;减小  $\Delta T_i$  值,以减小系统静态,提高控制精度;减小  $\Delta T_d$  值,以增强抗干扰能力。

建立的新型模糊控制规则如下:

(1)  $K$  的模糊规则

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	NB	PS	PS	NS	NS
PS	NB	PS	PS	NS	NS
ZE	NB	PS	ZE	NS	NS
NS	NB	PS	NS	NS	ZE
NB	NS	NS	NS	NB	ZE

(2)  $\Delta T_i$  的模糊控制规则

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	PB	NB	NS	NS	PS
PS	PB	NB	NS	ZE	PS
ZE	PB	NB	ZE	ZE	PS
NS	PB	NS	NS	ZE	PS
NB	PB	NS	PS	ZE	PS

(3)  $\Delta T_d$  的模糊控制规则

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	PB	PB	PS	PS	NS
PS	PB	PB	PS	NS	NS
ZE	PB	PB	ZE	NS	NB
NS	PB	PS	PS	ZE	ZE
NB	PB	PS	NS	NB	NB

基于过程模糊模型,根据模糊控制规则及输入变量,可计算输出量,最终建立的模糊查询表如下:

(1)  $K$  的查询表

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	0	0	-1	-1	-1
PS	0	4	4	-1	-1
ZE	0	2	2	1	-2
NS	-1	0	1	-2	-2
NB	-1	0	1	-2	-2

(2)  $\Delta T_i$  的查询表

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	0	0	1	0	0
PS	-1	0	1	-1	0
ZE	-1	-1	1	3	1
NS	-1	-1	2	1	2
NB	-2	-1	1	0	0

(3)  $\Delta T_d$  的查询表

E	EC				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	2	3	1	0	1
PS	2	0	1	1	1
ZE	1	1	0	-1	2
NS	-1	-2	0	-1	0
NB	0	-1	0	1	1

## 5 实验分析

为测试半导体激光器内温控系统的鲁棒性,对激光器进行高低温测试,其中 PID 3 个参数初始值分别设定为  $K_P=40.00$ ,  $K_I=0.05$ ,  $K_D=0.00$ 。环境温度为  $21.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,对 LD 激光器预设温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,经测试得出的温控数据及局部数据放大曲线如图 5 所示。系统超调量为  $0.97\text{ }^\circ\text{C}$ ,在第  $17\text{ s}$  时出现了最大下冲量,其值为  $0.69\text{ }^\circ\text{C}$ ;在工作  $51\text{ s}$  后,LD 系统进入稳定状态,温度维持在  $25\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ ;在第  $150\sim 210\text{ s}$  内,其温度值标准差为  $0.0204\text{ }^\circ\text{C}$ ,满足设计要求。

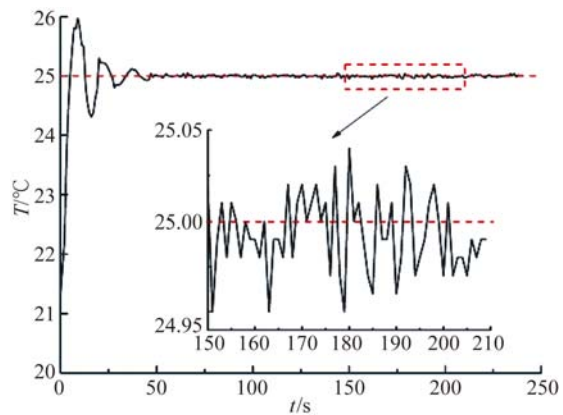


图 5 25 °C 时的 LD 温控实验曲线

Fig. 5 Curve of LD temperature control experiment at 25 °C

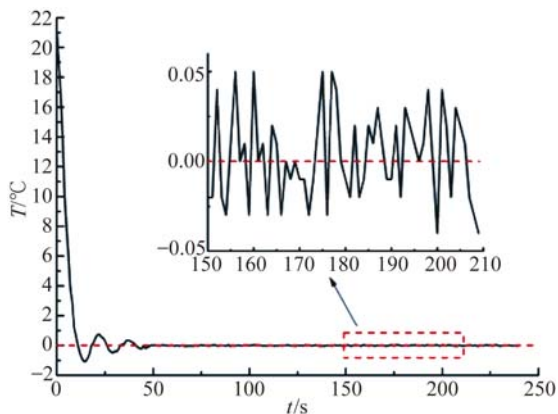


图 6 0 °C 时的 LD 温控实验曲线

Fig. 6 Curve of LD temperature control experiment at 0 °C

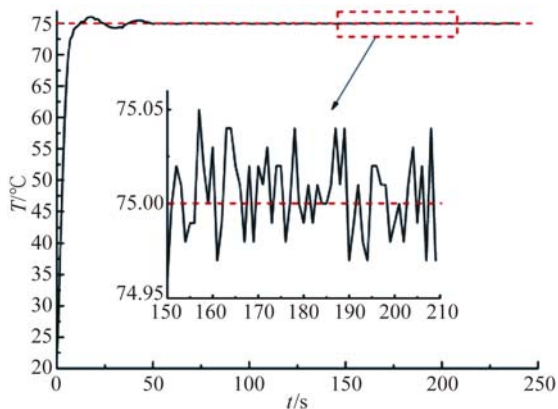


图 7 75 °C 时的 LD 温控实验曲线

Fig. 7 Curve of LD temperature control experiment at 75 °C

为进一步测试系统对 LD 温度控制范围,将预设温度分别调至 0 和 75 °C,得出温控数据曲线如图 6 和图 7 所示。温控系统在 0 和 75 °C 时的超调量分别为 1.05 和 1.06 °C,在 150~210 s 内,温度值标准差分别为 0.025 2 和 0.022 1 °C。由此可知,温控系统在 0~75 °C 内能够实现对 LD 的精密温控,但当预设温度过低或过高时,由于电路中的温漂效应和散热特性等因素,温控系统受到限制,导致温度在预设温度附近波动较大,在此可通过优化元器件或电路板特性来得到改善。

## 6 结 论

本文提出并设计了一种基于窄域论的新型模糊 PID 控制系统。通过低成本的温度采集系统,结合最小二乘法,建立了温度-电阻模型,利用近似三维整定方法,实现了对光通信用的 LD 温度的精密控制。实验结果表明:对 LD 激光器预设温度为 25 °C 时,系统超调量为 0.97 °C,在第 17 s 时出现了最大下冲量,其值为 0.69 °C;在工作 51 s 后,LD 系统进入稳定状态,温度维持在  $25 \pm 0.05$  °C;在第 150~210 s 内,其温度值标准差为 0.020 4 °C。进一步地,温控系统在 0~75 °C 内,温控精度可达  $\pm 0.05$  °C。该方法可降低系统开销,显著减少时间复杂度,提升高速率光通信模块的鲁棒性,为激光器温度精密温控提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 全伟,李光慧,陈熙,等.一体化半导体激光器的 ANSYS 热仿真及结构设计[J].光学精密工程,2016,24(5):1080-1086.  
QUAN W, LI G H, CHEN X, et al.. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5):1080-1086. (in Chinese)
- [2] LAI J, ZHOU H, HU W. A new adaptive fuzzy PID control method and its applicance in FCBTM [J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2016, 11(3):394-404.
- [3] 宋荣荣,马卫华.模糊 PID 控制在磁悬浮系统中的应用[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2014,28(5):1-6.  
SONG R R, MA W H. Application of fuzzy PID controller in the magnetic levitation system [J]. *Journal of Chongqing University of Technology*, 2014, 28(5):1-6. (in Chinese)
- [4] 陈晨,党敬民,黄渐强,等.高稳定、强鲁棒性 DFB 激光器温度控制系统[J].吉林大学学报:工学版,2013,43(4):1004-1010.  
CHEN CH, DANG J M, HUANG J Q, et al.. DFB laser temperature control system with high stability and strong robustness [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2013, 43(4):1004-1010. (in Chinese)
- [5] 戴俊珂,姜海明,钟奇润,等.基于自整定模糊 PID 算法的 LD 温度控制系统[J].红外与激光工程,2014,43(10):3287-3291.  
DAI J H, JIANG H M, ZHONG Q R, et al.. LD temperature control system based on self-tuning fuzzy PID algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10):3287-3291. (in Chinese)

- [6] KIM B S, YOO S J. Approximation-based adaptive control of uncertain non-linear pure-feedback systems with full state constraints [J]. *Iet Control Theory & Applications*, 2014, 8(17):2070-2081.
- [7] WANG Y J, DONG X Y, QU Z W. Research on Fuzzy-PID temperature control system for double helix resistor [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 738-739:1022-1025.
- [8] TANAKA M. A total power control technology on PID temperature controllers [J]. *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan C*, 2016.
- [9] SONG J L, CHENG W L, XU Z M, *et al.*. Study on PID temperature control performance of a novel PTC material with room temperature Curie point [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 95(3):1038-1046.
- [10] 黄峰,汪岳峰,顾军,等.模糊参数自整定PID控制器的设计与仿真研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2):235-239.  
HUANG F, WANG Y F, GU J, *et al.*. Design and simulation study of fuzzy parameter self-tuning PID controller [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):235-239. (in Chinese)
- [11] 王耿,官春林,张小军,等.应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其PID控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):709-716.  
WANG G, GUAN CH L, ZHANG X J, *et al.*. Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):709-716. (in Chinese)
- [12] KHUBALKAR S, CHOPADEV A, JUNGHARE A, *et al.*. Design and realization of stand-alone digital fractional order PID controller for buck converter Fed DC motor [J]. *Circuits Systems & Signal Processing*, 2016, 35(6):2189-2211.
- [13] 崔宁,陈兴林,曹开锐,等.空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1394-1400.  
CUI N, CHEN X L, CAO K R, *et al.*. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1394-1400. (in Chinese)

#### 作者简介:



张克非(1968—),男,四川绵阳人,副教授,硕士生导师,1991年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事计算机网络、光通信工程等方面的研究。  
E-mail:zhangkefeijike@163.com



蒋涛(1995—),男,江苏溧阳人,主要从事于光纤通信器件及系统等方面的研究。E-mail:jiangtao7811@163.com