

红外瞄具温度应力可靠性检测系统研究

柳 鸣¹, 李丹妮¹, 张国玉¹, 孙向阳², 赵 昭³, 段 洁¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 北方光电股份有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了检测红外瞄具在高低温恶劣环境下对不同波长的红外目标成像可靠性, 利用黑体和并行光管组成的光学系统模拟无穷远红外目标, 红外瞄具置于高低温环境下, CCD采集红外瞄具对红外目标所成的像, 从而判定高低温下红外瞄具成像质量。所设计的平行光管视场大, 各波长对应焦平面处在 20 lp/mm 空间频率下的 MTF 均高于 0.2。同时为了实现快速准确地检测系统中提供稳定的 -55~70 °C 的高低温实验条件, 采用一种基于自适应模糊 PID 温度控制技术。采用自适应因子将模糊推理器和 PID 控制器相结合, 通过在线自调整控制参数, 进一步提高了 PID 控制器的性能和系统的控制精度。实验表明该方法提高了常规 PID 控制的动态响应过程并保持无静态误差, 其控制精度可达 ±0.05 °C。

关键词: 红外瞄具; 可靠性检测; 红外平行光管; 温度控制; 自适应模糊 PID

中图分类号: TH745; TH39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2938-06

Temperature stress reliability testing system for infrared aiming device

Liu Ming¹, Li Danni¹, Zhang Guoyu¹, Sun Xiangyang², Zhao Zhao³, Duan Jie¹

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China;

3. North Electro-Optic CO., LTD., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to detect the imaging reliability of infrared target with difference wavelength at high & low temperature, black body and IR collimator are adopted to simulate infinite target, IR aiming device is located in high & low temperature and image of IR target is captured by CCD so as to judge the imaging quality of IR aiming device. The designed collimator was with wide-field and its MTF at 20 lp/mm spatial frequency was higher than 0.2 in corresponding focal plane of different wavelength. Meanwhile in order to provide an stable -55 °C~70 °C high & low temperature testing condition rapidly and accurately, a self-adaption fuzzy PID temperature control technology was provided. Adaptive factor was adopted to combine fuzzy inferior and PID controller. By adjusting control parameters on-line, the performance of PID controller was further improved and system control accuracy was raised up. The

收稿日期: 2015-02-04; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 吉林省重大专项(20100610)

作者简介: 柳鸣(1988-), 男, 博士生, 主要从事精密仪器与检测技术的研究。Email: liuming2525775@126.com

通讯作者: 李丹妮(1982-), 女, 助理研究员, 主要从事精密仪器与检测技术的研究。Email: ldn@cust.edu.cn

experimental results show that this method not only improves the dynamic response process but also guarantee no static error. The temperature control precision is $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: IR aiming device; reliability detection; IR collimator; temperature control; self-adaption fuzzy PID

0 引言

随着国内轻武器装备新技术以及红外技术的发展,红外瞄具现已成为轻武器的一个重要的发展方向^[1-2]。红外瞄具在战场的各种环境下要能够稳定使用,但使用环境中的温度高低,不同景别的红外目标等因素都影响着红外瞄具使用的可靠性,能够在实际使用环境条件下提供准确的瞄准精度并保证其使用性能,是检测其可靠性的重要依据。红外瞄具可靠性检测系统提供可控高低温变化环境,瞄具性能随着温度的变化便可反应被试品内在的缺陷。

对于大时滞系统的温度控制领域,基于常规 PID 控制算法又衍生出多种算法,如自整定 PID 控制、Smith 预估控制、Dahlin 算法等^[3-7]。以上算法均需要一个精确的过程数字模型,当模型误差较大时,控制质量将大大恶化,甚至系统会变得不稳定^[8-9]。文中采用的控制算法在常规的 PID 调节基础上,结合了模糊推理处理未知信息能力和人工智能在线学习优点,为模糊控制器内部引入一个软反馈,即由软件实现对控制器自身性能的反馈,通过这个反馈不断地调整和改善控制器的控制性能,以使对被控过程的控制效果达到最佳的状态,能够有效地处理控制系统的非线性和不确定性。

1 可靠性检测系统的组成及工作原理

系统主要由大视场平行光管、黑体、红外靶标、被测瞄具、CCD 像机、高低温箱和计算机组成。常温黑体发出的红外辐射通过红外靶标为被测瞄具提供无限远红外辐射目标,通过大视场透视式平行光管投射到被测瞄具的入瞳处。辐射目标经过平行光管后的衰减系数可通过标定仪器测出,通过黑体控制器改变黑体温度进行补偿。红外目标源就为被测瞄具提供了模拟自然景物不同温差的红外辐射温差。红外焦平面

阵列将红外图像转化为可见的视频信号在 OLED 显示屏中显示。高低温箱为被测瞄具提供所需 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度。CCD 摄像机位于红外瞄具出瞳处,经图像处理计算机显示图像信息(如屏上出现闪光、亮点、黑斑、忽明忽暗等故障现象),通过分析评价软件进行识别和处理。图 1 为红外瞄具可靠性检测系统工作原理示意图。

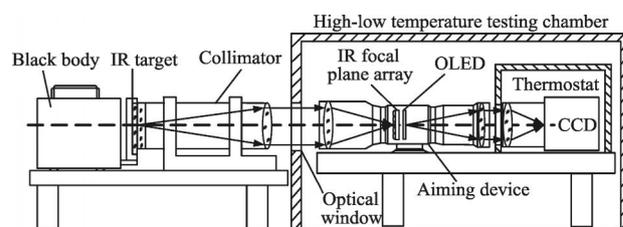


图 1 可靠性检测系统工作原理

Fig. 1 Principle diagram of temperature stress reliability testing system of IR aiming device

2 大视场透射式红外平行光管设计

文中采用非球面技术,选用三片式望远型透射式结构作为大视场红外平行光管的的光学结构。设计指标为:工作波长 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$;半视场 12° ;各相差指标均满足指标要求。为达到良好的像质要求,在传统望远型物镜结构基础上引入了非球面进行了优化,如图 2 所示。

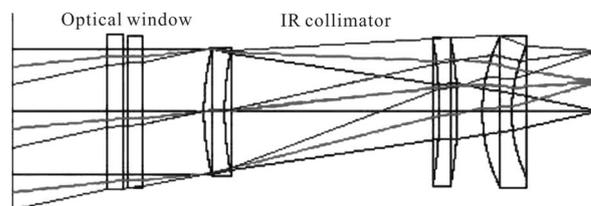


图 2 红外平行光管系统光路图

Fig. 2 Diagram of infrared collimator system optical path

优化后视场内光斑均方根半径都小于红外瞄准镜的像元尺寸,大部分能量都集中在高斯像点附近

如图 3 所示。在 20 lp/mm 空间频率下系统的 MTF 不低于 20% 如图 4 所示。大视场红外平行光管物镜的成像质量优良，像差值完全符合红外平行光管的设计指标。

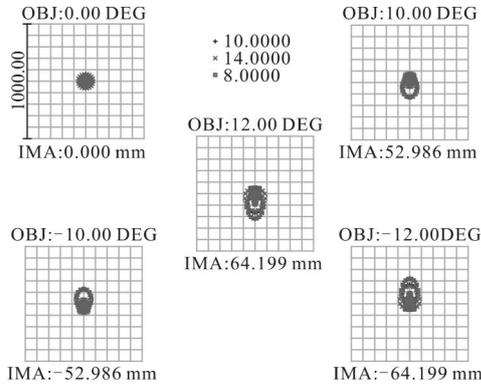


图 3 点列图

Fig.3 Spot diagram

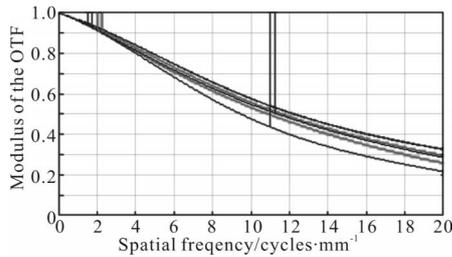


图 4 红外平行光管的调制传递函数

Fig.4 MTF curves of IR collimator

3 温控箱的基本工作原理

温度控制系统采用加热器和压缩机对恒温箱实现加热和制冷。控制器结合自适应模糊 PID 算法完成对温度测量信号接收处理,使恒温箱控制系统达到使用要求。实现温控箱中温度在 -55~70 °C 量程范围内的温度控制,保持设定的温度在 ±0.05 °C 范围内波动。系统采用 DS18B20 温度传感器进行温度采集,中央控制器首先从温度传感器模块中读取温度数据同时将实际测量温度与设定温度进行比较,根据比较结果进行温度调节。若实测温度与设定温度差值大于 2 °C,则对温控箱进行全速加热或者制冷;若实测温度与设定温度差值小于 2 °C,则调用自适应模糊 PID 子程序,对恒温箱温度进行微调达到使用要求。系统主程序流程图如图 5 所示。

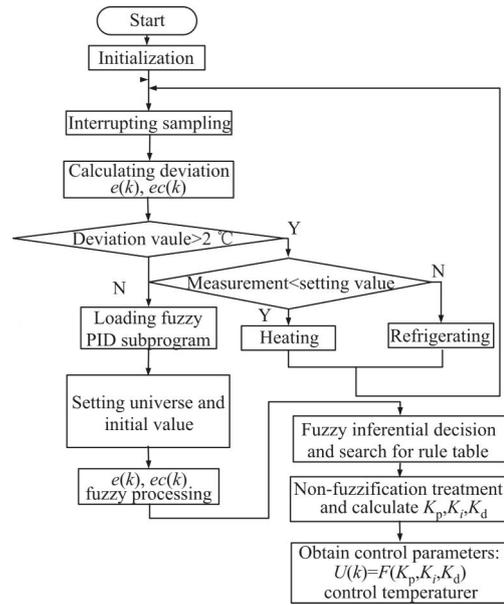


图 5 主程序流程

Fig.5 Flow chart of main program

4 自适应模糊 PID 控制器算法

为了对温控箱内温度实现精确控制,采用自适应模糊 PID 控制算法,通过自适应因子,将模糊推理器和 PID 控制器相结合使温度波动范围在 ±0.05 °C 范围内。根据给出的控制量的控制效果,对控制器的控制决策进一步改进以获得更好的控制效果。

PID 控制器根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成的控制偏差:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1)$$

将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制。其控制规律为:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2)$$

公式(2)PID 控制器的输入输出量均为模拟量,而使用单片机实现控制算法时,其输入输出必须为数字离散量。PID 控制器算法的离散形式为:

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

则增量式 PID 算法的输出量为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p \{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{K_i} e(k) + \frac{K_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \} \quad (4)$$

式中: $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 分别为第 k 次、 $k-1$ 次和

$k-2$ 次的偏差值; K_p 为比例系数; $K_i=K_pT/T_i$ 为积分系数; $K_d=K_pT_d/T$ 为微分系数; T 为采样周期。对于被控对象温度控制系统而言, $\Delta u(k)$ 为输入量。

当温度偏差小于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 时调用模糊 PID 控制器, 且保持设定的温度在 $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内波动, 故温度最大偏差值 $|e_{\max}|=2\text{ }^\circ\text{C}$, 最大变化率 $|ec_{\max}|=0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 。设 $|K_p|=0.3$, $|K_i|=0.06$, $|K_d|=3$, 将 e 、 ec 、 K_p 、 K_i 和 K_d 量化为七个等级: NB、NM、NS、Z、PS、PM 和 PB。则模糊集为 $\{NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB\}$, e 和 ec 的论域为 $[-2, 2]$, K_p 的论域为 $[-0.3, 0.3]$, K_i 的论域为 $[-0.06, 0.06]$, K_d 的论域为 $[-3, 3]$ 。文中采用三角形和正态形隶属函数如图 6 所示(其中纵坐标表示隶属度, 横坐标表示模糊控制器的输入和输出量, x 表示变量的最大绝对值), 在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集, 在误差较小的区域选用较高分辨率的模糊集, 在误差接近于零时选用高分辨率的模糊集, 这样才能达到控制精度高而稳定性好的控制效果。

当 e 较大时, 为了加快系统的响应速度、避免较大的超调和防止引起微分溢出, 取较大的 K_p 和较小

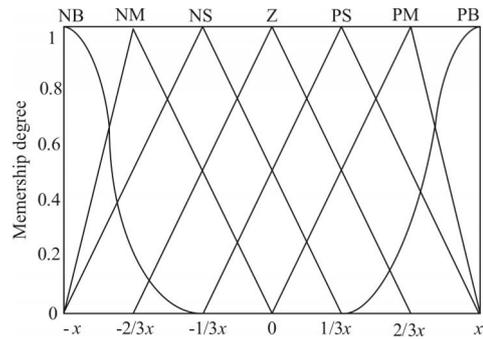


图 6 隶属函数分布图

Fig.6 Distribution graph of membership function

的 K_d , K_i 为 0; 当 e 中等大小时, K_p 应较小, 使超调较小; 当 e 较小时, 为了拥有好的稳态性能, 取较大的 K_p 和 K_i , 通常取中等 K_d 以保证系统的抗干扰性能。根据控制规则总结出模糊控制规则见表 1。

最大隶属度法能够突出主要信息, 而且计算简单, 所以在模糊自适应 PID 推理机的解模糊采用最大隶属度法。即在输出模糊集中选取隶属度最大的论域元素作为判决结果, 如果在多个论域元素上同时出现隶属度最大值, 则取它们的均值作为判决结果。

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Rule table of fuzzy controller

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PM NM NB	PS NS NB	Z Z NM	Z Z PM
NM	PB NB PS	PB NB NS	PM NM NB	PS NS NM	PS NS NM	Z Z NS	NS Z Z
NS	PM NB Z	PM NM NS	PM NS NM	Z NS NS	Z Z NS	NS PS NS	NS PS Z
Z	PM NM Z	PM NM NS	PS NS NS	NS PS NS	NS PS NS	NM PM NS	NM PM Z
PS	PS NM Z	PS NS Z	Z Z Z	NS PS NS	NS PS Z	NM PM Z	NM PB Z
PM	PS Z PB	Z Z NS	NS PS PS	NM PM Z	NM PM PS	NM PB PS	NB PB PB
PB	Z Z PB	Z Z PM	NM PS PM	NM PM PS	NM PM PS	NB PB PS	NB PB PB

5 控制器算法仿真

模糊 PID 控制系统的 Simulink 仿真模型如图 7 所示。系统由两个控制器组成, 即模糊控制器和 PID 控制器。系统的控制对象由 incubator(恒温箱)模块组成, 通过控制 temp controller 模块调节恒温箱的温度。系统中的 Signal Generator 模块和的 Constant 模块经求和模块相加后代表设定的温度值。这个温度设定值和反馈回来的实测温度值经求差模块相减

后, 形成温度偏差 e 。合成模块 MUX1 把温度偏差 e 和偏差率 ec (经 derivative 模块微分处理)作为两个分量, 构成一个向量输入到模糊控制器中, 模糊控制器通过以上两个分量推理出 PID 控制器的三个输入系数, 最后由 PID 控制器控制 temp controller 模块运行, 从而精确控制 incubator 模块温度。

按照文中设计的自适应模糊 PID 控制算法对恒温箱内的温度控制在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 以及 $-55\text{ }^\circ\text{C}$ 进行仿真控制, 系统的阶跃响应曲线如图 8 所示。

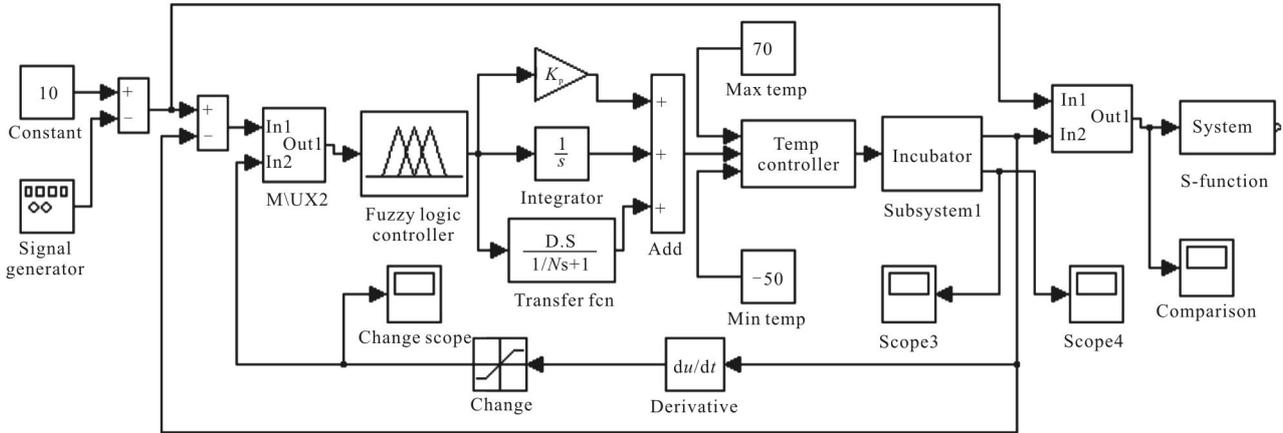


图 7 模糊 PID 控制系统仿真模型图

Fig. 7 Model diagram of control system simulation on fuzzy PID controller

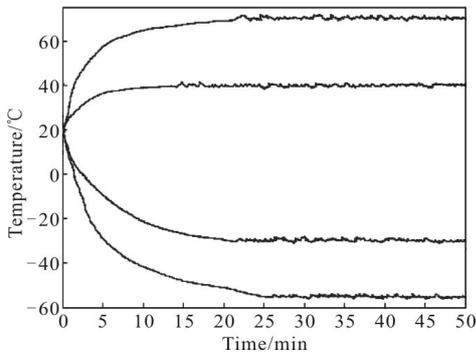


图 8 温度跟踪阶跃响应曲线图

Fig. 8 Step response curve of temperature tracking

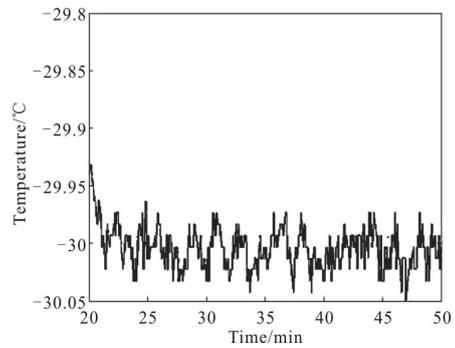


图 9 自稳定阶跃响应曲线图

Fig. 9 Step response curve of self temperature stabilization

从图中可以看出，文中提出的模糊自适应 PID 控制的响应时间最长不超过 25 min。将 -30 °C 阶跃响应曲线图局部放大如图 9 所示，其阶跃响应基本保持稳定，波动上限不超过 ±0.05 °C，具有迅速的响应时间、很高的控制精度。

6 实验验证

经调试和现场运行，在高低温试验箱内放置

YORK TTI-22 温度测温仪对高低温箱温控精度进行测量，温度调节范围在 -55~70 °C 之间，待控制系统连续工作 30 min 后，对同一目标温度实行多次等精度重复测量，高低温箱检测记录如表 2 所示。

将光学瞄具放置在高低温试验箱内，对红外瞄准镜图像进行实时采集、故障判断，实验装置如图 10 所示。施加不同的温度应力后，实时记录故障图像。图 11 为施加 40 °C 温度应力 30 min 后的图

表 2 温控试验箱检测记录

Tab.2 Detection record of temperature chamber

Temperature/°C	Measured temperature every 10 min (after 30 min)	Maximum temperature deviation	Average value	Temperature deviation/°C
70	70.03、70.05、70.02、69.98、70.00	+0.05	70.007	0.007
	70.03、70.00、69.98、69.97、70.01	-0.03		
40	39.98、40.00、40.02、39.97、39.96	+0.04	39.993	-0.007
	40.00、39.98、40.02、40.04、39.96	-0.04		
-30	-30.00、-29.98、-30.04、-29.99、-29.97	+0.03	-30.005	-0.005
	-30.00、-30.02、-30.05、-29.99、-30.01	-0.05		
-55	-55.00、-55.05、-55.04、-54.98、-55.01	+0.04	-55.01	-0.01
	-54.96、-54.99、-55.05、-55.03、-54.99	-0.05		

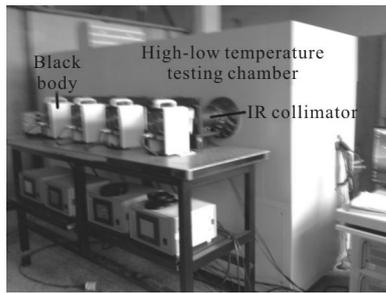


图 10 可靠性检测系统装置图

Fig.10 Experimental device of reliability testing system of infrared aiming device

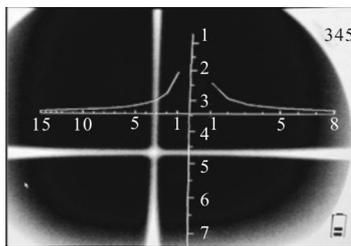


图 11 施加 40 °C 的温度应力靶标图像

Fig.11 Target image by 40 °C temperature stress applied

像,图 12 为施加-55 °C 温度应力 30 min 后的图像。检测清晰稳定,这也验证了可检测系统可以为可靠性检测提供稳定的红外目标以及稳定可靠的高低温实验条件。

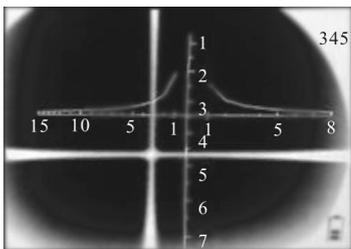


图 12 施加-55 °C 的温度应力靶标图像

Fig.12 Target image by -55 °C temperature stress applied

7 结论

研制的红外瞄具可靠性检测系统对红外瞄具生产、研制以及检测具有重要的意义。同时这种模糊自适应 PID 算法对于非线性、时变性、不确定性、大滞后特性的实际系统具有很好的控制效果,也同样可以应用到其他控制领域中。

参考文献:

[1] Yang Ruining, An Zhiyong, Cao Weiguo, et al. Research on

the modern testing system of exit pupil diameter, distance and magnification of optical sighting telescope [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 38(4): 1142-1144. (in Chinese)

杨瑞宁, 安志勇, 曹维国, 等. 光学瞄具出瞳直径、出瞳距离与放大率现代测试技术研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 38(4): 1142-1144.

[2] Wang Jinsong, An Zhiyong, Li Hailan. Research on the measuring method to the IR aiming sight's sight line alteration of reflection type collimator[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(11): 1142-1425. (in Chinese)

王劲松, 安志勇, 李海兰. 反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(11): 1422-1425.

[3] Dai Junke, Jiang Haiming, Zhong Qirun, et al. LD temperature self-tuning control system based on fuzzy PID algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3277-3291. (in Chinese)

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): 3277-3291.

[4] Li Jiangan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 3287-3291. (in Chinese)

李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 3287-3291.

[5] Ma F. An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system[C]//2014 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), 2014: 587-591.

[6] Yusoff Z M, Muhammad Z, Taib M N, et al. Implementation of hybrid fuzzy plus PID controller in real time steam temperature control[C]//2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology(ICSET), 2013: 356-360.

[7] Ma F. An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system[C]//2014 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), 2014: 587-591.

[8] Dong Chaoyi, Chen Xiaoyan, Li Jian. Design of temperature adaptive control system for coal sample burning point detection instrument [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9): 2114-2120. (in Chinese)

董朝轶, 陈晓艳, 李健. 煤样燃点检测仪温度自适应控制系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9): 2114-2120.

[9] Tang Hongcheng, Li Zhuxin. The use of Matlab in fuzzy PID servo system control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 595-602. (in Chinese)

汤红诚, 李著信. Matlab 在模糊 PID 伺服系统控制中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 595-602.