

多功能分析仪温度控制系统设计

岑旭东¹ 宋成桥² 朱蕴璞¹

(1. 南京理工大学机械工程学院测试计量技术及仪器系 南京 210094; 2. 江苏英诺华医疗技术有限公司 南京 210094)

摘要:多功能生化分析仪温度控制的精确度和稳定性将影响生化、血凝、特定蛋白测试的准确性。本文设计的温度控制系统,在硬件上采用 Cortex-M3 控制器,结合温度采集、A/D 转换、按键设置、显示屏等外围电路;在软件上,利用常规 PID 算法实现对温育槽的温度控制。针对常规 PID 算法不能适应外界环境变化的缺点,基于 BP 神经网络的 PID 控制器完成对温度的智能化控制。通过温度测试实验表明,所涉及的基于 BP 神经网络的 PID 控制器实现仪器在不同地域、国家环境下,可自动调整 PID 算法相关参数的功能,达到自整定控温目的,在设定目标处实现 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的重复性指标。

关键词:多功能分析仪;温度控制;BP 神经网络;PID;智能化控制

中图分类号: TP3 TN91 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520 . 604

Design of temperature control system for multi function analyzer

Cen Xudong¹ Song Chengqiao² Zhu Yunpu¹(1. Department of Technology of Measurement and Instrument, School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jiangsu Yingnuohua
Medical Technology Co., Ltd, Nanjing 210094, China)

Abstract: The accuracy and stability of the temperature control of the multifunctional biochemical analyzer will affect the accuracy of the biochemical, blood coagulation and specific protein test. In this paper, the design of temperature control system, the Cortex-M3 controller is adopted in the hardware, combining the temperature acquisition, A/D conversion, set the key, display and so on peripheral circuit, the software using conventional PID algorithm to achieve the incubation tank temperature control. According to the conventional PID algorithm can't adapt to changes in the external environment of the shortcomings, designed in this paper based on PID neural network BP controller of intelligent temperature control. Through the experiment of temperature test showed that involved based on BP neural network PID controller to realize the instrument in the environment of different areas and countries, can automatically adjust the parameters of the PID algorithm, achieve the repeatability of the self-tuning control target, in setting target realizes $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ index.

Keywords: multifunction analyzer; temperature control; BP neural network; PID; intelligent control

1 引言

多功能分析仪是集生化、血凝、特定蛋白检测为一体的微型分析仪^[1-2],由于其成本低廉、适用范围广泛、功能齐全,因此适用于小型医院。温度控制系统的好坏将直接影响到样本检测的精度和准确性。针对市场上的 PID 控制器存在着价格高,仪器出厂后 PID 参数不可调的问题,本论文在多功能生化分析仪温度控制系统的研究基础上,提出一种基于 STM32F207 的 PID 温度控制方案,利用电流型温度传感器 AD590 对温育槽的温度进行检测,通过

电阻丝进行温度的控制。通过实验,将温育槽的温度控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,其温度重复性在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 内,基本满足仪器的设计要求。

然而,PID 在实际使用中存在耗时长且容易超调,抗干扰能力差等缺点^[3],另外该仪器在实际使用过程中发现,国内的仪器销售到国外后,其环境温湿度的变化会影响仪器的 PID 参量。因此,相关学者针对传统的 PID 参数试凑法确定常规 PID 参数的不足提出先进的智能温度控制方法,如模糊 PID、小波神经网络和粒子群优化算法等^[4-5]。本文基于 BP 神经网络的 PID 控制器,通过自学习

能力,自动调节 PID 参数,以满足仪器在不同环境温度下使用时温控参量的自适应调整。

2 系统设计

系统的温度设定可以用按键进行设置,温度的显示通过液晶屏显示,利用 EEPROM 来存储温度传感器的标定值和温度设定值,蜂鸣器提供报警功能,USB 接口用来程序的烧写和数据的传输,CAN 总线和 RS-232 接口用来和主控板通信,另外通过打印机把测试数据进行打印。

其总体设计如图 1 所示。

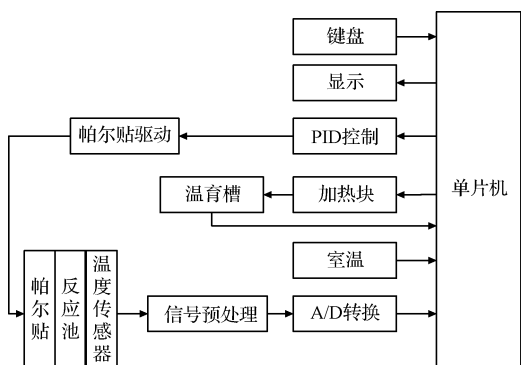


图 1 系统总体设计

3 硬件设计

硬件部分主要包括电源模块、MCU 最小系统、温度检测模块、A/D 转换电路、加热驱动电路、存储电路和通信接口等。电源部分是系统必不可少的部分,主要采用 TPS5430DDA 稳压芯片,输入范围 5.5~36 V,输出电流可达 3 A,转换效率高达 95%。MCU 最小系统主要采用 STM32F207 芯片,其片上资源多,主频达到 120 MHz, PWM 的占空比调节主要靠内部的定时器中断实现。A/D 转换电路主要采用 LTC1867 芯片,由于该芯片是多通道 A/D 转换芯片,降低了产品价格,提高了转换效率。电源电路设计的稳定性,将影响到 A/D 转换数据的准确性,如果 LTC1867 的供电不稳定,会产生误码。硬件电路设计的时候,还考虑到 EMC 电磁干扰问题^[6],在仪器出厂前应做相应的测试。

温度检测采用 AD590。AD590 是电流输出型温度传感器,灵敏度为 $1 \mu\text{A}/\text{K}$ ^[7]。由于其两端电压随着电流的增大而减小,因此需要对其进行标定,标定结果的好坏将决定测量的准确性。AD1 接入后续 A/D 转换电路, LTC1867 选择单通道、单极性转换方式。其电路如图 2 所示。

4 软件设计

系统的软件设计主要包括常规 PID 控制算法和神经网络 PID 控制算法。

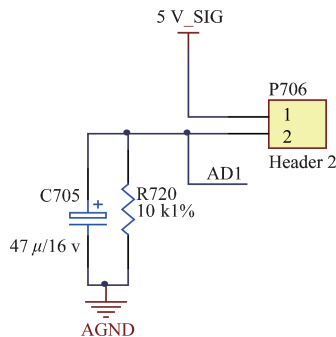


图 2 AD590 测温电路

PID 本质是利用系统的误差,利用比例项、积分项、微分项计算出控制量的方式进行控制^[8]。在实际运用时候往往采用增量式 PID 控制算法,其算法如下:

$$\Delta u(k) = k_p[e(k) - e(k-1)] + ke(k) + k_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

式中: K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数, $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 是当前及前两时刻的实际温度和设定温度偏差,该式子结果影响加热的时间。考虑温控对象的加热温度和结构设计,设计 2 s 进行一次 PID 计算。其算法流程如图 3 所示, T 为当前采集的温度, T_0 是设定的温度。

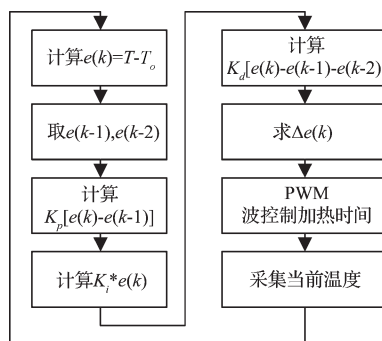


图 3 PID 控制算法

当前温度低于设定温度 5°C 时,全速加热;当前温度高于设定温度 1°C 时,停止加热。在设定范围内,每 2 s 进行一次 PID 计算,得到其 2 s 内加热的时间,对系统进行相应操作。

根据试凑法和大量实验得到温育槽的 PID 参量为: $K_p=7$, $K_i=0.0183$, $K_d=30$ 。

由于温育槽是个挖空的大铁块,其加热电阻丝在铁块的底部,加热速度不容易控制,冷却是通过自然冷却,冷却速度较慢。在不同的环境室温下,冬天或者夏天,海南或者东北,仪器使用前可能需要重新设计 PID 参数,这给仪器销售和使用带来了极大的不便,因此,需要设计一种智能 PID 算法。

BP 神经网络在近年来发展迅猛,应用广泛,在人工智能方面有了突破性进展^[9]。基于 BP 神经网络的 PID 控

制器在近年来的应用也日益广泛。其核心思想是通过偏差改变隐含层的权系数,进而改变整个网络的性能。

该控制对象较为复杂,由于受热情况,加热速度,环境温度等方面无法进行准确预计,但被控对象是单一的温度,不存在学习时间过长,响应过慢的情况,因此,对BP神经网络进行下位机的编程,并选择合适的学习速率和惯性系数,使得系统能够在较快的时间达到稳定。基于BP神经网络的PID控制器结构如图4所示。

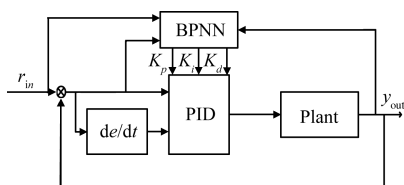


图4 基于BP神经网络PID控制系统的结构

BP神经网络的核心公式:

$$\Delta w_{ij}^{(a)}(k) = -\eta \frac{\partial e(k)}{\partial w_{ij}^{(a)}} + \alpha \Delta w_{ij}^{(a)}(k-1) \quad (2)$$

学习速率 η 能够提高网络性能,动量项 α 一般取0~1之间的数。上式表示输出层权值在 k 时刻的偏差,动量项 α 的系数表示前一时刻输出层权值偏差,学习速率 η 的系数表示 $E(k)$ 对加权系数的负方向进行搜索调整,其目的是该值输出最小。同理可得隐含层的权值。

下位机编程思路如图5所示。

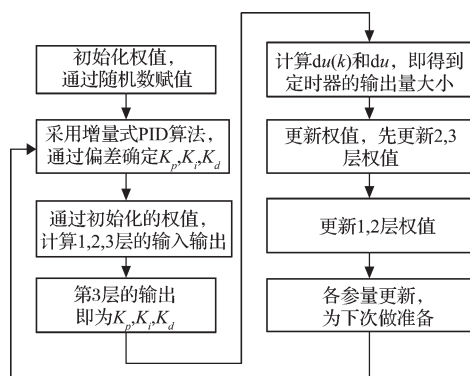


图5 BP神经算法下位机编程实现

5 实验测试

实验主要分3个部分:AD590的标定、温育槽的常规PID温度控制、温育槽的BP神经网络PID控制。

由于AD590两端电压随着电流输出的增大而减小,采样电阻为高精度10 K Ω 电阻,本身也存在着误差,另外,不同厂家的不同种类传感器的温度因子不同,因此需要进行标定,标定结果的好坏将影响测量精度和控制效果。仪器的设计目标是将温度控制在37 $^{\circ}\text{C}$,其重复性在0.1 $^{\circ}\text{C}$ 内。其标定的结果如图6所示,横坐标为温度,纵坐标为A/D采样的数值,由图可知,在该温度范围内,

AD590的线性度非常好。

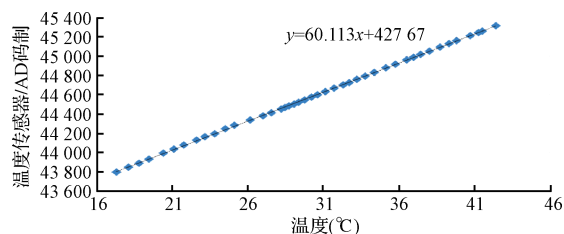


图6 AD590的标定曲线

常规PID调节的调节过程如下:先仅进行 K_p 比例调节,温度将在37 $^{\circ}\text{C}$ 左右振荡,从而求出其振荡周期,然后根据典型常规计算表,得到 K_i 、 K_d 系数,然后进行简单微调,使得温度稳定在37 $^{\circ}\text{C}$,其重复性为0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。其效果如图7、8所示,横坐标为时间,纵坐标为温度。

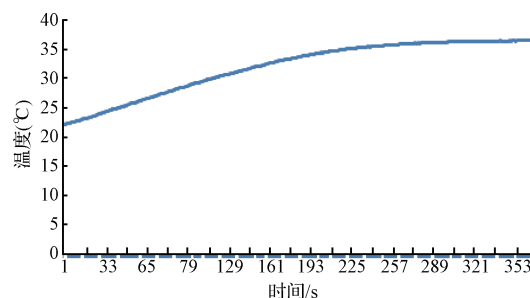


图7 PID控制曲线整体

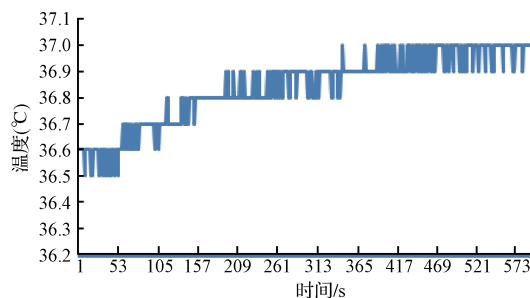


图8 PID控制曲线局部

BP神经网络的主要难点在于对其算法的理解和编程,STM32F207有着12.5 MHz的主频,计算速度快,完全能够实现该算法的运行,其实验数据如图9、10所示,横坐标为时间,纵坐标为温度,选用0.2的学习速率,0.05的惯性系数。

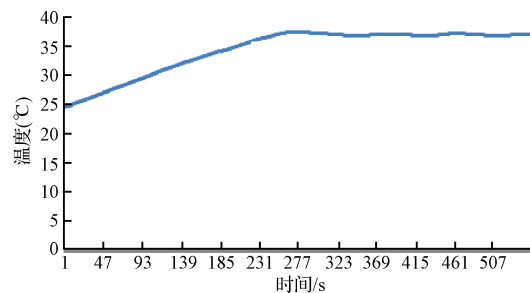


图9 神经网络PID控制曲线整体

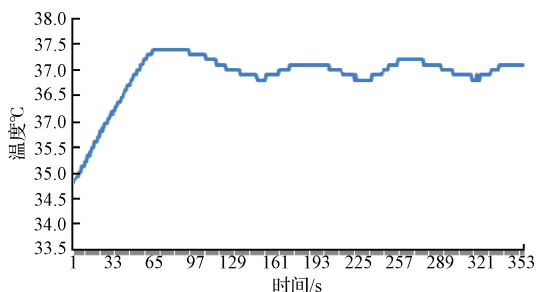


图10 神经网络PID控制曲线局部

由图7、9可知常规PID达到稳定是时间要大于智能PID算法,且当外界温度改变,智能PID的适应性要远好于常规PID。

当外界温度不低于20℃,不高于40℃时,以及湿度、空气对流情况和产品调试情况相近时,温育槽和空气的散热能力基本一致,从图8、10可知常规PID的控制效果和智能PID控制效果相近,此时两者的重复性指标都能满足 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

当外界环境变化较大时,常规PID控制器的偏差能达到 $\pm (0.3\sim 0.5)^{\circ}\text{C}$,而BP神经网络可以通过调节权值,对 K_p 、 K_i 、 K_d 进行修正,使得温度在37℃的振荡较小,其偏差基本保持在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

其实验产品如图11所示,右下部分就是温育槽,将存放反应液,仪器对其进行加热温育;右上部分是按键和显示屏,可以实现人机交互功能;左上部分是微信打印机,能够实现检测数据的实时打印;左下部分是反应池,通过吸管对反应液的吸取,可以减少试剂的含量,降低成本。



图11 产品效果

温度控制的重复性指标将影响测试结果的重复性,比如仪器对血液样本进行10次测量,然后计算其重复性,如图12所示。

检测医疗仪器重复性指标可以用变异系数CV,它是标准差和样本平均值的比值,从测试结果可知CV均值满足3%指标。

	PLT	MPU	RBC	MCU
1	257	11.55	3.79	85
2	256	11.78	3.79	86
3	252	11.58	3.85	85
4	243	11.34	3.64	86
5	253	11.51	3.90	85
6	251	11.39	3.74	86
7	240	11.03	3.84	85
8	253	11.42	3.80	86
9	256	11.67	3.81	86
10	240	11.05	3.81	86
CV	2.6	2.1	1.8	0.6

cleaning 重复性测试

图12 样本重复性测试

6 结论

温控系统是仪器的重要组成部分,其温控效果的好坏将决定仪器的使用精度。智能PID的研究,特别是基于BP神经网络的研究从20世纪80年代开始得到了较为广泛的应用,前人有较为深入的理论支持和相应仿真,而针对多功能分析仪的温度智能PID控制文献较少,特别是针对国内外使用的反馈情况,设计相应的智能算法,解决了仪器在国外使用时温度异常的问题。本文对传统PID控制效果和BP神经网络的温度控制效果进行了对比,并且在实际产品上进行了应用。实际项目应用和测试结果表明,该温度控制系统切实可行,稳定可靠。在后续的研究中,将设计更为先进、参数调整响应更快的算法,对仪器的可靠性进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 冷雪,周九飞,付金宝,等. 基于DSP的生化分析仪温控系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4):360-365.
- [2] 肖洞. PID算法在温控系统中的应用[J]. 电子世界, 2012(24):97-98.
- [3] 邓丽,黄炎,费敏锐,等. 改进的广义预测控制及其在温度系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1057-1064.
- [4] XING H, ZHANG Q, CHUNXIA L U. Adaptive stochastic resonance method for weak signal detection based on particle swarm optimization[J]. Instrumentation, 2015, 2(2):3-10.
- [5] 徐海峰,孔建. 热处理炉加热温度控制系统的PID控制的粒子群优化[J]. 热加工工艺, 2013, 42(14): 212-214.
- [6] 刘尚合,刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高压电技术, 2014, 40(6):1605-1613.
- [7] 李东玲,温志渝,冯小飞. 微型生化分析仪样品室温

度控制系统研究[J]. 信息技术, 2008(4):30-32.

- [8] 郭红霞, 刘磊. 基于PID控制算法的自动取暖控制器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2):29-32.
- [9] 邵婷婷, 樊延虎, 林开东. 基于RBF神经网络的电子罗盘误差补偿研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 36-38.
- [10] 谢宇, 韩保红, 段云龙. 基于神经网络PID控制的颗粒物料称量系统[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9):15-17.

作者简介

岑旭东, 1991年出生, 在读研究生, 主要研究方向为嵌入式系统应用、仪器仪表工程。

E-mail: cenxudong1@163.com

宋成桥, 高级工程师, 主要研究方向为医疗仪器开发、嵌入式系统应用。

E-mail: scq@sinnowa.com

(上接第62页)

- [3] 靖立新, 关永春, 郑文菊. 神经源性膀胱的临床X线分析[J]. 牡丹江医学院学报, 2008, 29(3):73-74.
- [4] 郭启勇. 实用放射学[M]. 第三版. 北京: 人民卫生出版社, 2007:983-939.
- [5] BURNEY T L, SENOPATI M, DESAI S, et al. Acute cerebrovascular accident and lower urinary tract dysfunction: a prospective correlation of the site of brain injury with urodynamic findings [J]. Journal of Urology, 1996, 156(6):1748-1752.
- [6] 吴阶平. 吴阶平泌尿外科学[M]. 第二版. 济南: 山东科学技术出版社, 2005:1251-1277.
- [7] ARAKI I, KITAHARA M, OIDA T, et al. Voiding dysfunction and Parkinson's disease: urodynamic abnormalities and urinary symptoms[J]. Journal of Urology, 2000, 164(5):1640-1643.

- [8] SAKAKIBARA R, HATTORI T, UEHIYAMA T, et al. Videourodynamic and sphincter motor unit potential analyses in Parkinson's disease and multiple system atrophy[J]. Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry, 2001, 71(5):600-603.
- [9] WELD K J, DMOCHOWSKI R R. Association of level of injury and bladder behavior in patients with post-traumatic spinal cord injury[J]. Urology, 2000, 55(4):490-492.

作者简介

董悦, 1968年出生, 硕士, 副主任医师, 主要研究方向为医学影像, 从事医学影像诊断工作25年。

E-mail: dongy_mr@aliyun.com

(上接第79页)

- [12] HE X C, YUNG N H C. Corner detector based on global and local curvature properties[J]. Optical Engineering, 2008, 47(5): 057008-057008-12.
- [13] DAUGMAN J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics & Image Science, 1985, 2(7): 1160-1169.
- [14] SHEN L, BAI L. A review on Gabor wavelets for facerecognition[J]. Pattern analysis and applications, 2006, 9(2-3): 273-292.
- [15] WECHSLER H. Gabor feature based classification using the enhanced fisher linear discriminant model for facerecognition[J]. IEEE Transactions on Image processing, 2002, 11(4): 467-476.
- [16] JIANG W, LAM K M, SHEN T Z. Efficient edge detection using simplified Gabor wavelets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2009, 39(4): 1036-1047.

- [17] ZHANG W C, WANG F P, ZHU L, et al. Corner detection using Gabor filters[J]. Image Processing, IET, 2014, 8(11): 639-646.
- [18] PELLEGRINO F A, VANZELLA W, TORRE V. Edge detection revisited[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2004, 34(3): 1500-1518.
- [19] TAI S L. Image representation Using 2D Gabor wavelet [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(10): 959-971.

作者简介

田子怡, 1992年出生, 男, 河北石家庄人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、信号与信息处理。

E-mail: lanber1@126.com

李云红, 1974年出生, 女, 满族, 辽宁省锦州市人, 博士, 教授, 主要研究方向为红外热像技术、数字图像处理、信号与信息处理。