

# 复合智能控制测定温度的新型水分测定天平

邓宇, 雷小军

(长沙矿山研究院检测中心, 湖南长沙 410012)

**摘要:**基于 DSP, 利用其 PWM 输出接口, 设计了一种新的水分测定天平。该测定天平采用烘干失重法, 将模糊控制和传统的 PID 控制等相结合。实验结果表明, 采用复合智能控制的水分测定天平, 具有响应时间快, 精度高等特点, 提高了测试的可靠性。

**关键词:**水分测定天平; 温度; DSP; PID; 模糊控制

目前粮油、食品、烟草、化工等诸多行业水分测定的标准方法为烘干失重法, 即 105℃ 恒重法和 130℃ 定温定时烘干法。不管是 105℃ 恒重法还是 130℃ 定温定时烘干法, 都必须保证干燥箱温度的准确性和稳定性。过低的温度会影响样品水分的散失, 延长仪器测定的时间; 过高的温度会使样品炭化、爆裂, 不仅损坏样品, 而且影响水分测定结果的准确性。因此, 水分测定天平干燥箱温度的准确性与稳定性是影响水分测定天平性能优劣的重要因素。本文所设计的水分测定天平以 DSP TMS320LF2407 为 CPU, 将电子天平和干燥箱结合在一起, 采用一种温度复合智能控制方法, 利用 DSP

的 PWM 控制功能, 实现了干燥箱温度的精确、稳定控制。

## 1 仪器的工作原理

水分测定天平的系统框图如图 1 所示。主要包括电子天平、干燥箱、LCD、键盘、打印机、通信接口等。以 DSP 作为整个系统的核心, 完成干燥箱温度采集和温度控制、样品质量称量、样品水分含量计算、LCD 显示、打印控制、与 PC 机通信及自检、自校正和故障自诊断等。CPLD 是整个系统的逻辑电路。系统设有 150℃ 超温保护电路, 当干燥箱温度超过 150℃ 时, 保护电路工作, 断开加热电源。

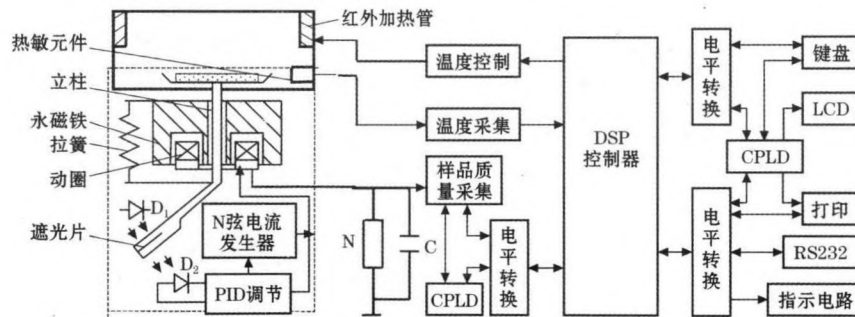


图 1 水分测定天平系统的组成

水分测定天平采用烘干失重法, 将重量为  $W_1$  的样品在恒温干燥箱内按规定温度或时间烘干。若干燥后的重量为  $W_\infty$ , 则样品水分含量  $M$  为:

$$M = \frac{W_1 - W_\infty}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

被测样品的质量称量信号由电磁力平衡传感器转换为直流电压信号, 送 A/D 转换器将模拟电压信号转换成数字信号, 经 DSP 做进一步处理。

干燥箱的温度信号经温度采集电路和 DSP 内

部的 A/D 电路转换为数字信号, DSP 利用干燥箱目标温度、实际温度、温度变化率等参数, 通过复合智能控制算法确定 PWM 控制信号, 控制红外加热管在一个 PWM 控制周期内导通时间的长短, 实现温度的精确、稳定控制。

## 2 复合智能控制干燥箱温度模型

Fuzzy 控制具有响应较快、鲁棒性较好、对系统数学模型依赖性小等优点<sup>[1,2]</sup>。文献[2]中所述的

模糊控制器考虑到实现的简易性和快速性,采用二维结构形式,即以系统误差和误差变化率为输入变量,具有类似常规 PD 控制器的作用,因而无法消除系统静差;PID 控制由于算法简单、稳定性好、可靠性高,被广泛应用于控制领域<sup>[3]</sup>,但单纯的 PID 控制存在调节时间长、控制效率低等缺点。本仪器将分段判决、Fuzzy 控制和 PID 控制有机结合在一起,以实现升温快、超调小、无静差的温度控制。

设  $c(e)$  为干燥箱温度复合智能控制的输出,  $P$  为红外加热管全功率加热时的功率,干燥温度误差为  $e(e = T_i - T_d, T_i$  为干燥箱实际温度,  $T_d$  为目标温度,如  $105^\circ\text{C}$ ),则干燥箱温度控制策略为:

$$c(e) = \begin{cases} P & \text{当 } e \leq -25^\circ\text{C} \\ P/2 & \text{当 } -25^\circ\text{C} < e < -9^\circ\text{C} \\ f(e) & \text{当 } 3^\circ\text{C} \leq |e| \leq 9^\circ\text{C} \\ pid(e) & \text{当 } |e| < 3^\circ\text{C} \\ 0 & \text{当 } e > 9^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $c(e) = P$  时红外加热管全功率加热;  $c(e) = P/2$  时红外加热管半功率加热;  $c(e) = 0$  时红外加热管不加热; Fuzzy 控制  $f(e)$  采用 if...and...then 控制规则,以温度误差  $e$  和温度误差变化率  $\Delta e (\Delta e = e_i - e_{i-1})$  为输入,模糊控制规则如图 2 所示。其中,  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$  表示为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 模糊控制规则表存于 CPU 中,通过查表,得到相应的控制量  $c(e)$ ;  $pid(e)$  为数字 PID 控制,其控制方式为<sup>[4]</sup>:

$$c(e) = c(e_{n-1}) + \{k_p[e(n) - e(n-1)] + k_i e(n) + k_d[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)]\} \quad (3)$$

$u$	$e$							
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
$\Delta e$	-3	+3	+2	+2	+1	0	-1	-1
	-2	+3	+2	+1	+1	0	-1	-2
	-1	+2	+2	+1	0	0	-1	-2
	0	+2	+1	+1	0	-1	-1	-2
	1	+2	+1	0	0	-1	-2	-2
	2	+2	+1	0	-1	-1	-2	-3
	3	+1	+1	0	-1	-2	-2	-3

图 2 干燥箱模糊控制规则

式(3)中,  $c(e_{n-1})$  为上一次的控制量;  $e(n)$  为温度误差值;  $K_p, K_i, K_d$  分别为比例增益系数、积分系数和微分系数,适当调整  $K_p, K_i, K_d$ <sup>[5]</sup>,可实现控制量  $c(e)$  的在线修改。复合智能温度控制结构如图 3 所示。

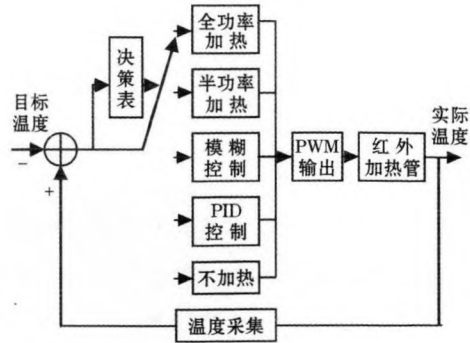


图 3 干燥箱温度复合智能控制结构

### 3 基于 DSP 的温度复合智能控制的实现

#### 3.1 温度控制接口

水分测定天平的 CPU 采用 TI 公司的 DSP TMS320LF2407,片内有 16 路 PWM 输出(包括 12 路比较 PWM 和 4 路 16 位通用定时器 PWM),能很方便实现温度的 PWM 控制;16 路 10 位 A/D 转换,转换时间为 500 ns,适合于仪器干燥箱温度的采集<sup>[5]</sup>。设计采用 DSP 的 EVA 通用定时器  $T_1$  的 PWM 输出。定时器  $T_1$  具有 16 位的周期寄存器  $T_1PR$  和比较寄存器  $T_1CMPR$ ,  $T_1PR$  用于设置 PWM 的周期,  $T_1CMPR$  用于设置 PWM 的占空比。将 DSP 的 PWM 控制功能与复合智能控制方法相结合,通过 PWM 的周期恒定不变,在线修改 PWM 的占空比(即  $T_1PR$  值恒定,在线修改  $T_1CMPR$  的值),改变红外加热管在一个 PWM 周期内的导通时间,以达到温度的精确控制。干燥箱温度采集与温度控制电路原理框图如图 4 所示。

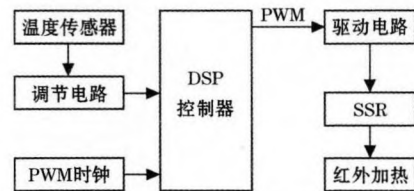


图 4 温度采集与温度控制原理

利用 DSP 内部的 10 位 A/D 转换器,配合温度传感器、信号调节电路,完成干燥箱温度采集;经 DSP 分段判决、模糊推理和 PID 调整的 PWM 控制信号,通过驱动放大和 SSR(固态继电器),控制红外加热管的加热时间,实现干燥箱温度精确控制。PWM 周期时钟信号发生器给 DSP 的定时器  $T_1$  提供计数时钟,以产生周期为 1 s 的 PWM 信号。

图 5 为温度采集与控制的电路原理图。AD590

为两端集成温度传感器,它与  $U_{1A}$ 、 $U_{1B}$ 、 $U_{2A}$  及外围元件组成温度采集和调节电路,  $W_1$ 、 $W_2$  分别为偏置调节电位器和增益调节电位器,以实现温度采集系统在  $0^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$  时,其 A/D 转换结果分别为 0 和 100。

DSP 作为仪器的 CPU,利用干燥箱目标温度、实际温度、温度变化率等参数,经分段判决、Fuzzy 控制和 PID 控制,结合 DSP 内部的 PWM 功能,从 DSP 的

$T_1$  PWM 端口输出 PWM 控制信号。三极管  $Q_1$ 、固态继电器 SSR 及其外围元件组成信号驱动和温度控制电路, PWM 控制信号经  $Q_1$ 、SSR 控制红外加热管加热时间,从而实现干燥箱温度的精确控制。Y3 为有源振荡器,产生 4 MHz 的时钟信号,经由 CPLD (ISPLH1032E) 构成的 8 分频器分频后产生 500 kHz 的方波信号,作为 DSP 计数器  $T_1$  的计数时钟,使 PWM 信号的周期为 1 s。

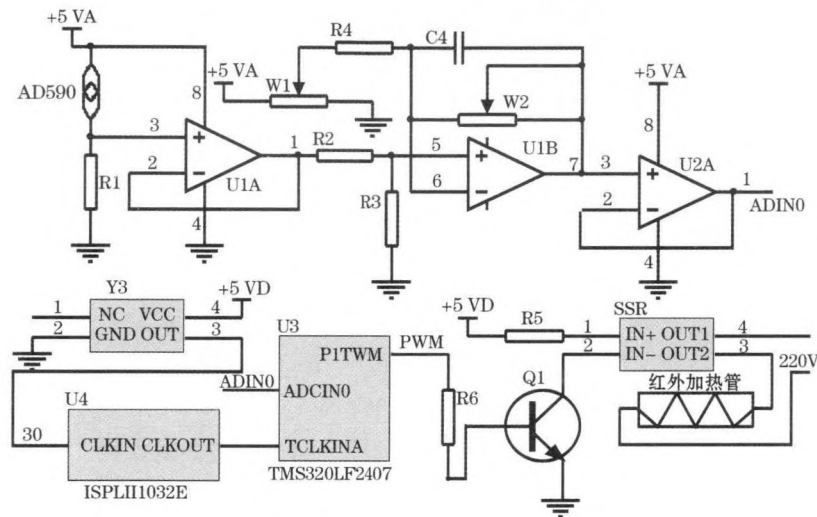


图5 温度采集与温度控制电路

设 PWM 周期  $t$  为 1 s (一个 PWM 周期内可通过 50 个工频波), 定时器  $T_1$  的时钟输入频率为  $f_{T1}$ ,  $T_1$  设置的分频系数为  $k$ , 则  $T_1$  的周期寄存器值为:

$$T_1 PR = \frac{1}{1/(f_{T1}/k)} \quad (4)$$

当  $f_{T1} = 500 \text{ kHz}$ ,  $t = 1 \text{ s}$ ,  $k = 32$  时,  $T_1 PR = 15625$ ; 当  $T_1 CMPR = T_1 PR$  时, PWM 占空比为 1, 红外加热管在整个 PWM 周期内都加热, 即全功率加热; 当  $T_1 CMPR = T_1 PR/2 = 7813$  时, PWM 的占空比为 1/2, 红外加热管在半个 PWM 周期内加热, 即半功率加热; 当  $T_1 CMPR = 0$  时, 即 PWM 的占空比为 0, 红外加热管整个 PWM 周期内都不加热; 当目标温度  $T_d = 105^\circ\text{C}$  时, 由于 Fuzzy 控制采用 7 级, 根据式(2)中 Fuzzy 的条件, 每级对应的  $T_1 CMPR$  值为  $n = [f(96^\circ\text{C}) - f(114^\circ\text{C})]/6 = 1302$ , 那么式(2)可改写为:

$$T_1 CMPR = \begin{cases} T_1 PR = 15625 & \text{当 } e \leq -25^\circ\text{C} \\ T_1 PR/2 = 7813 & \text{当 } -25^\circ\text{C} < e < -9^\circ\text{C} \\ f(e) & \text{当 } 3^\circ\text{C} \leq |e| \leq 9^\circ\text{C} \\ pid(e) & \text{当 } |e| < 3^\circ\text{C} \\ 0 & \text{当 } e > 9^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中,

$$f(e) = \begin{cases} 7813 & \text{当 } -9^\circ\text{C} < e < -6^\circ\text{C} \\ 6511 & \text{当 } -6^\circ\text{C} < e < -3^\circ\text{C} \\ 2604 & \text{当 } 3^\circ\text{C} < e < 6^\circ\text{C} \\ 1302 & \text{当 } 6^\circ\text{C} < e < 9^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

$$pid(e) = pid(e_{n-1}) + \{k_p[e(n) - e(n-1)] + k_i e(n) + k_d[e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)]\} \times 1302 \quad (7)$$

其中,  $pid(e_{n-1})$  为前一时刻 PID 输出值,  $e(n)$  为温度误差值。式(5)、(6)、(7)即为基于 DSP 温度复合智能控制算法模型。

### 3.2 温度复合智能控制的软件设计

干燥箱温度复合智能控制软件包括干燥箱温度采集、温度数据预处理、温度判决、模糊控制规则表的在线查询、PID 控制量的在线计算、PWM 控制输出等。

DSP 内部的 A/D 转换器每隔 1 s 连续采样 200 点干燥箱温度信号, 采样间隔由 DSP 内部定时器 2 实现。温度数据预处理采用中值滤波和均值滤波, 以减少因外界干扰产生的测量误差, 为温度的智能

(3) 应对掘进工进行一次掘进爆破教育,特别是装药联线的规范操作培训,减少人为错误操作的发生,确保爆破成功。

利用凿岩台车施工的深孔进行掘进爆破,改善了巷道施工的工程质量,提高了掘进循环进尺,改善了凿岩工的作业条件,减轻了工人劳动强度。

凿岩台车深孔掘进爆破参数设计结合矿山的生产实际,借鉴了国内其他矿山的经验,较好解决了炮孔布置参数、装药方式,起爆顺序等方面的问题,解决了生产难题,对其他矿山的掘进爆破也有很大的参考意义。

参考文献:

[1] 谢本贤. 铜绿山铜铁矿深孔凿岩问题与改进方案[J]. 矿业研究与开发,2006,(4).

[2] 关义尧,韦树武. 芸红岭矿逐孔爆破试验及深孔爆破参数的改进[J]. 采矿技术,2006,(3).  
 [3] 李 龙,黄吉宏. 中深孔爆破快速掘进的试验与应用[J]. 采矿技术,2006,(3).  
 [4] 许 畅,彭建谋,孙越英. 浅议中深孔爆破技术在非煤矿山开采中的应用[J]. 采矿技术,2006,(3).  
 [5] 林浙宁,翟国锋,郭迎春,刘国宏. 大断面坑道开挖中深孔掏槽参数的选定[J]. 爆破器材,2002,(3).  
 [6] 郭海兵. 湘潭锰矿推广应用深孔爆破掘进平巷的探讨[J]. 矿业研究与开发,2001,(S1).  
 [7] 邵 武,郭 立,马东霞. 复杂岩体内的深孔爆破成井[J]. 矿业研究与开发,2001,(1).

(收稿日期:2008-05-31)

付水法(1973-),男,工程师,主要从事采矿工程技术管理, E-mail: fshf@hxks.com。

(上接第 117 页)

控制提供可靠的数据。程序流程如图 6 所示。

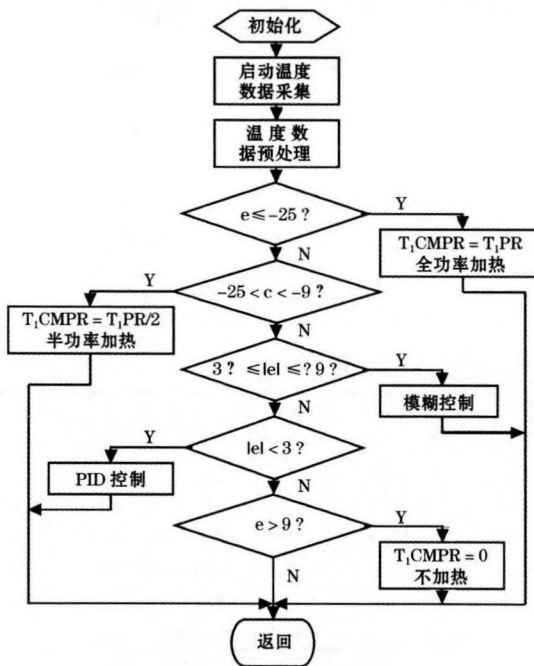


图 6 温度复合智能控制程序流程

4 实验结果

图 7 为基于 DSP 干燥箱温度模糊控制的实际响应曲线与复合智能控制实际响应曲线(参数设定: $k_p=5, k_i=0.1, k_d=0.2$ )。由图 7 可以看出,采取温度复合智能控制策略的干燥箱,其动态响应快、超调小、温度稳定,静差小于 1℃,达到了控制要求。实验表明,采用此温度控制方法的水分测定天平,测定结果准确、可靠。

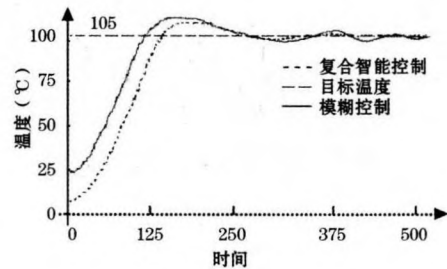


图 7 干燥箱温度实际响应曲线

5 结 论

这种基于复合智能温度控制水分测定天平的称重量程为 50 g,分辨率为 1 mg,水分测量分辨率为 0.01%。大量的对比实验表明,基于 DSP 的水分测定天平的测量误差小于 0.1%,重复性误差优于《GB/T 5497-85 粮食、油料检验 水分测定法》中规定的标准值。

参考文献:

[1] Wen-June Wang, Leh Luoh. Stability and stabilization of fuzzy large-scale systems[J]. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2004, 12(3): 309~315.  
 [2] 龚华军. Fuzzy-PID 控制在高精度数字伺服系统中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(5): 624~629.  
 [3] 孙传友,孙晓斌,汉泽西,等. 测控系统原理与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002, 162~164.  
 [4] Åström K J, Hägglund T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice, 2001, 20(9): 1163~1175.  
 [5] 刘和平,王维俊,等. TMS320LF240X DSP C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003, 126~158.

作者简介:邓 宇(1982-),男,湖南湘乡人,助理工程师,主要从事测控技术研究工作, Email: closs@163.com。