

热处理炉炉温单片机控制系统

韩丰田 白国长

(郑州工业大学机械系)

摘要 介绍一种采用单片机构成的热处理炉炉温控制系统,对系统的控制算法、硬件设计及软件实现进行了较详细的论述。现场试验证明该温控系统具有较好的控制效果。

关键词 炉温控制;单片机;控制算法

中图分类号 TP368.1

1 概述

热处理电炉的发热体为电阻丝,一般由三相交流电供电,为调节其温度,常规方式大都使用模拟式控制仪表测量温度,并通过控制交流接触器的通断时间比例来达到改变加热功率的目的。但由于仪表本身测温精度差,并受到交流接触器的寿命限制,通断频率很低,故温度控制精度低,且无法实现按程序设定曲线升温及故障自诊断等功能。

本文提出的炉温控制系统就是为了克服模拟式温控仪的缺陷而研制的。系统采用高精度放大器及高分辨率 V/F 转换器以获得较高的测温精度;热电偶的冷端补偿采用热电阻温度传感器,测量冷端温度准确,克服了常规方法补偿误差大的缺点;采用 8031 单片机实现控制算法、程序升温、键盘输入、显示打印等功能;使用双向可控硅实现加热功率的控制,由于采用无触点功率开关,故通断频率可设置得很高,显著提高了控温精度。

2 控制算法

本系统采用时间最优控制 (*Bang - Bang* 控制) 与积分分离 *PID* 控制的双模控制算法^[1],时间最优控制可加快动态过程,*PID* 控制则可提高跟踪精度,保证稳态误差满足要求。

2.1 时间最优控制模式

$$\text{当 } |R(k) - Y(k)| = |e(k)| \begin{cases} \geq E_1 & \text{时间最优控制模式} \\ < E_2 & \text{积分分离 PID 模式} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{时间最优控制模式} \begin{cases} e(k) > 0 & U(k) = U_{max} \\ e(k) \leq 0 & U(k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 E_1 —— 时间最优控制偏差极限值
 $R(k)$ —— 第 k 次采样时刻的设定值
 $Y(k)$ —— 第 k 次采样时刻的反馈值

收稿日期: 1997-09-04

第一作者 男 1967 年 12 月生 硕士学位 讲师

$e(k)$ ——第 k 次采样时刻的偏差值

$U(k)$ ——第 k 次采样时刻的计算机输出值

U_{max} ——计算机输出的最大值

2.2 积分分离式 PID 控制

积分分离式 PID 控制可显著抑制积分饱和,防止产生超调和振荡。

$$\text{当 } |e(k)| \begin{cases} \geq E_2 & PD \text{ 控制} \\ < E_2 & PID \text{ 控制} \end{cases} \quad (3)$$

式中 E_2 为积分分离门限值,并且有 $E_2 < E_1$ 。

$$\text{在 } PD \text{ 控制时其调节规律为 } U(t) = K_P \left[e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

离散化后其差分方程为

$$U(k) = U_P(k) + U_D(k) = K_P * e(k) + K_D * (e(k) - e(k-1)) \quad (5)$$

$$\text{在 } PID \text{ 控制时,调节规律为 } U(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

其差分方程为

$$\begin{aligned} U(k) &= U_P(k) + U_I(k) + U_D(k) \\ &= K_P * e(k) + U_I(k-1) + K_I(e(k) + e(k-1)) + K_D(e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 K_P ——调节器的比例系数

T_I ——调节器的积分时间

T_D ——调节器的微分时间

$e(t)$ ——调节器的偏差信号

$U(t)$ ——调节器的输出信号

$e(k-1)$ ——第 $k-1$ 次采样时刻的偏差值

K_I ——调节器的积分系数

K_D ——调节的微分系数

T ——采样周期

式(7)中积分项采用梯形法对偏差进行数值积分,与一般位置式 PID 中采用矩形法相比可使积分项更加精确。

与积分项对应的差分方程为

$$\begin{aligned} U_I(k) &= K_P \frac{1}{T_I} \left[\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} T(e(i) + e(i-1)) + \frac{1}{2} T(e(k-1) + e(k)) \right] \\ &= U_I(k-1) + K_I(e(k-1) + e(k)) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $U_I(k)$ 为第 $k-1$ 次采样之前各次积分项之和

$$U_I(k-1) = \sum_{i=1}^{k-1} K_I(e(i) + e(i-1)) \quad \text{且} \quad K_I = \frac{K_P T}{2 T_I} \quad (9)$$

2.3 按设定控温曲线控温时的算法

输入设定控温曲线如图 1 所示。每个曲线段包括段序号、升温时间及设定温度三个部分,系统中每个控温曲线允许最多包含 99 个曲线段。

(1)在等速升温时,每采样一次,按设定升温曲线计算一次设定值 $R(k)$,并根据与温度传感器测得的反馈量 $Y(k)$ 之差求得偏差 $e(k)$,计算出在等速升温时的输出量 $U(k)$ 。

(2)恒温阶段, 设定值 $R(k)$ 恒等于保温温度, 根据 $R(k)$ 与温度传感器测得的反馈量 $Y(k)$ 之差求得偏差 $e(k)$, 算出在恒温时的输出量 $U(k)$, 由于恒温阶段偏差很小, 控制算法为一般为 PID 方式。

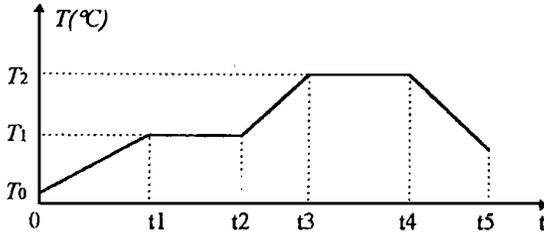


图 1 设定控温曲线示例

2.4 Bang—Bang 控制/PD 控制/PID 控制之间的切换

在每一次采样周期中, 首先根据采集的热电偶输出信号计算出炉温值 $Y(k)$ 并与设定曲线中相应时刻的设值 $R(k)$ 进行比较, 如果其差值 $|e(k)| > E_1$, 则系统转入 Bang—Bang 控制, 如果 $|e(k)| > 0$, 系统全速加温, 可控硅在整个采样周期内全时间导通。否则, 系统输出为零, 可控硅在当前采样周期内关断。

如果偏差值 $|e(k)| < E_1$, 则系统进入 PD 或 PID 控制, 这时系统控制程序要做两种判断:

(1) 如差值 $|e(k)| \geq E_2$, 则只用 PD 控制, 令积分项为零, 以防止过大的偏差积累使系统出现超调和振荡。

(2) 如差值 $|e(k)| < E_2$, 则系统转入 PID 控制, 由于积分项的作用, 在恒温段可使控制温误差很小。

3 系统硬件设计

系统的硬件框图如下页图 2。

3.1 数据采集和 V/F 转换

用作热电偶冷端补偿用的室温信号、热电偶输出的炉温信号及基准源通过多路开关 CD5051, 经限幅处理后加到 V/F 转换 LM331 上转换成与模拟电压成正比的频率信号, 采用闸门控制计数并经 8031 处理, 一方面显示温度值, 另一方面作为反馈信号。

3.1.1 对室温信号的采集

系统中对热电偶的冷端补偿采用了铜电阻作为测温元件。铜电阻的电阻值与被测温度之间呈如下关系:

$$R(t) = R(0) * (1 + At + Bt^2)$$

式中, $R(0) = 100 \Omega$ (0°C 时的电阻值), A 、 B 为铜电阻的一次和二次温度系数。

室温测量部分见图 3。电桥采用 +5V 电源供电, 放大电路输出电压 V_t 与桥臂交点电压 V_A 、 V_B 的关系为:

$$\text{与积} \quad \text{应的} V_t = V_A * \left[1 + \frac{R_{19}}{R_{18}} \right] - V_B * \left[1 + \frac{R_{17}}{R_{16}} \right] * \frac{R_{19}}{R_{18}}$$

电路中取 $R_{16} = R_{19} = 100 \text{K}\Omega$, $R_{17} = R_{18} = 1 \text{K}\Omega$, 故有: $V_t = 101 * (V_A - V_B)$

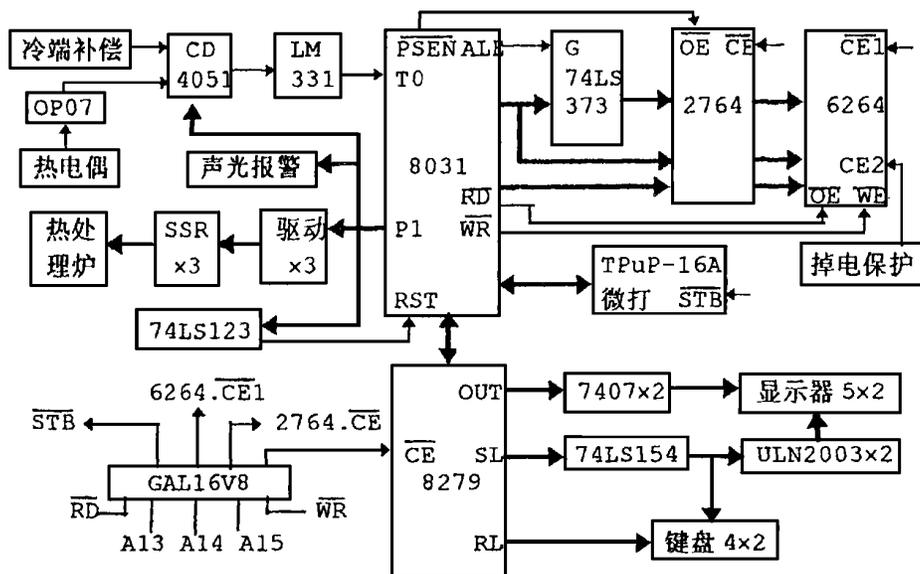


图2 系统硬件结构框图

3.1.2 信号放大及 V/F 转换电路

热电偶测温电路中,采用镍铬—镍铝热电偶做感温元件,热电势信号经低通滤波送入放大器,为减小漂移采用 $OP07$ 低失调运算放大器,图中的 T 型反馈网络结构可提高输入阻抗。

图中的电路结构,其放大倍数为: $A_v = 1 + \frac{R_7}{R_6}$

系统中 R_6 取 $3\text{K}\Omega$, R_7 取 $240\text{K}\Omega$,故放大倍数为 81。

多路开关采用 $CD4051$,输入通道中除热电偶、热电阻信号外,还有一路对基准源分压后的信号用于对热电阻信号进行校正,并实现对前向通道的自诊断;运放 $OP4$ 为电压跟随器,以增加带负载能力;运放 $OP5$ 实现热电偶断线保护,正常状态下,二极管 $D2$ 不导通;当热电偶断线时,基准源经分压后加到运放 $OP1$ 的输入端,致使 $OP1$ 的输出电压超过保护电压 4.3V ,通过数据采集,便可判定热电偶的断线故障,从而转入故障处理并提示操作人员; V/F 转换器采用性能价格比较高的 $LM331$ ^[2], V/F 转换器输出的频率信号及自 8031 的 $P1$ 口来的通道选择信号均采用光电隔离以提高系统的抗干扰能力。

3.2 单片机系统

本系统采用 8031 单片机已能够满足控制及运算任务。键盘显示接口芯片 8279 实现键盘扫描及显示输出任务。键盘由编程键、增一键、减一键、移位键、参数设置键运行/停止键、切换显示键、手动/自动切换键等组成。通过编程键,可由数字键输入加温曲线的各段参数,参数设置键可设置打印周期、年月日、时分秒、 PID 参数、上下偏差报警值、测量修整值及运行方式等参数。按下运行键系统开始控温,显示器上排四位显示当前测量温度,下排四位显示根据设定温度曲线计算出的当前时刻的温度设定值,左面两位显示当前程序段号。用户可根据工艺要求输入多条加温曲线,输入加温曲线保存在 RAM 中(本系统有掉电保护电路),在需要时可直接调出相应的曲线参数使用,以节省曲线输入时间和简化操作。

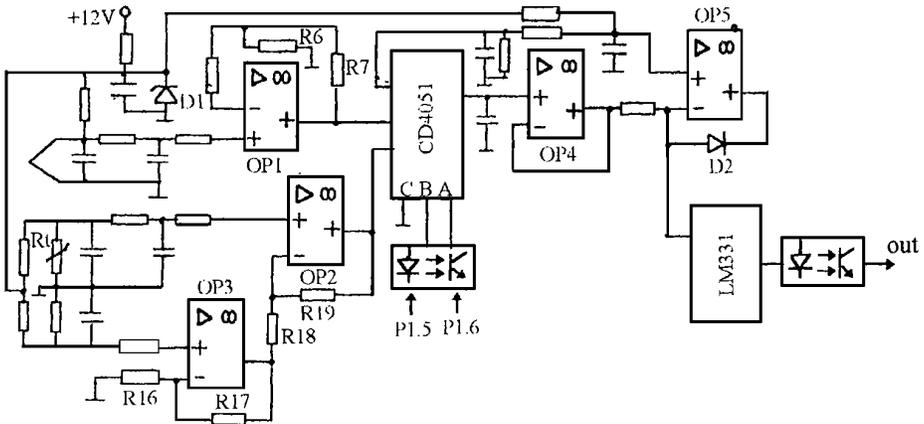


图 3 信号放大及 V/F 转换

打印部分由微型打印机及其接口电路组成,可打印出设定的加温曲线及其参数,并按键入的打印周期在线打印出时间值及当时的炉温值。

由掉电保护电路对 6264 进行掉电保护^[2],系统运行时每一采样周期均将 8031 内各寄存器的内容存入 6264 中。在发生偶然掉电再来电后,可根据 RAM 中保存的参数恢复运行。

为了提高系统的抗干扰能力,系统除包含丰富的软硬件自诊断能力外,采用 74LS123 实现系统失控自复位功能。当测量温度超过设定的上、下偏差值时还可采用声光报警方式提醒操作人员采取措施。

3.3 控温电路

由 8031 的 P1 口输出三个触发脉冲信号,经反相器光电隔离,功率放大后加到双向可控硅上。由于采用 Z 型交流固态继电器(SSR),其内部有过零检测电路,只有当负载交流电源到达过零区时,SSR 才导通,所以负载工作电流近似正弦波,可减少高次谐波对电网的干扰。

这种控制方法为过零触发型交流调功器^[3],通过控制采样周期 T 内的导通的周波个数,即 n 值,就可控制电阻丝的加热功率。其关系式为:

$$P = \frac{n}{N} * I^2 * R$$

式中: P ——负载输入功率

N ——采样周期 T 内的周波数,若 $T=2$ 秒,则 $N=100$

n ——采样周期 T 内导通的周波数

R ——负载电阻

I ——在采样周期内电流全导通时流过 R 的电流有效值

4 系统软件

系统软件由主程序、时钟模块、升温曲线预置模块、参数设置模块、读键盘及键处理模块、显示模块、数据采集及处理模块、打印模块及控制输出模块等组成。

在主程序中首先设堆栈,对 8279 初始化,设置各标志位和对 8031 内部 RAM 及各寄存器初始化。然后,显示开机初始状态,读键盘,散转到各键的处理程序,在按下启动键后系统开始运行,检测热电阻、基准源及热电偶的输入值,再进行数字滤波、查表及插值作非线性校正,计算出炉温。在显示器上显示该温度值,根据当时的时间计算出该采样周期设定温度值及炉温之差由的大小按控制算法公式计算出计算机的输出值,对可控硅在本采样周期导通的时间长短进行调节。

由于热电偶的输出特性具有较大的非线性,所以必须加以校正,本文采用实测和插值的方法,即从 0℃起每隔 16℃按热电偶 mV 输出手册中的标称值输入该温度下的 mV 数代替热电偶的输出,同时用高精度数字表监视。通过单片机进行数据采集可获得与输入的 mV 值对应的数字量,然后作出温度数字量表,将此表固化于 EPROM 中,以后即可根据此表用插值的方法,由 V/F 转换器输出的数字量计算出对应的任一温度值,其公式为^[1]

$$y = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1) + y_1$$

式中 x —— 经 V/F 转换后所得的数字量

y —— 与 x 对应的温度值,即炉温

x_2, x_1 —— 表中与相邻的高、低数字量

y_2, y_1 —— 表中与 x_2, x_1 对应的温度值

本系统曾在 30 KW 及 45 KW 等多台电阻炉上可靠运行,使用结果证明控制系统控制具有方式灵活方便、控温精度高、保护措施完善可靠等一系列优点。

参 考 文 献

- 1 江秀汉等. 计算机控制原理及应用; 西安电子科技大学出版社. 1995. 8
- 2 何立民编著. 单片机应用系统设计; 北京航空航天大学出版社. 1994. 6
- 3 陈粤初编. 单片机应用系统设计与实践; 北京航空航天大学出版社. 1992

The Temperature Control System of the Heat Treating Furnace by Using 8-bit Single Chip Computer

Han Fengtian Bai Guochang

(Zhengzhou University of Technology)

Abstract A kind of resistance-heated furnace temperature control system with single chip computer is introduced in this paper. The paper presents the control algorithm, hardware design and software composition of the system. Satisfactory control results have been obtained by application in industrial fields.

Keywords furnace temperature control; single chip computer; control algorithm