文章编号:1006-544X(2005)01-0119-04

偏光显微镜热台温度控制系统的研制

邹自明，陆绮荣

（桂林工学院 电子与计算机系，广西 桂林 541004）

摘 要：针对现有热台存在着人工控温劳动强度高、控温精度低等问题，设计了一个基于AT89C51的自动温度控制系统. 给出了系统设计实现方法，包括温度的测量、热电偶的冷端温度补偿、变速积分PID控制算法及参数自整定的实现方法. 实际使用证明，该系统具有较高的测控精度和稳定性，能较好地满足热台的温度控制要求.

关键词：单片机；温度控制；变速积分；参数自整定

中图分类号：TP273 **文献标识码**：A①

某型偏光显微镜热台可用于抛光磨片、烧结金属、矿物和耐火工业品等材料的结构构造和相变的显微研究，可将材料在受控加热和冷却的条件下进行观察. 因该型设备是20世纪90年代从德国进口的，虽然性能较优越，但热台温度主要靠人工现场手动调节变压器进行控制，不但增加了操作人员的劳动强度，而且温度控制精度不高，限制了该设备的使用范围. 为此研制了一个温控系统以实现自动温度控制，在200 ℃以上时控制精度在±2 ℃左右，并具有温升率可调、在线修改参数、数据显示、自动报警等功能.

1 系统结构及原理

系统以AT89C51作为核心控件，通过键盘/显示可编程控制芯片8279、A/D转换芯片7135、看门狗、掉电保护电路MAX705及外部扩展2 k字节RAM（6116）等外围元件构成应用系统（图1）.

工作原理：系统工作在闭环状态，炉温T经信号转换电路获得模拟电压，经A/D转换及数字滤波得到与T相应的数字信号，再经标度变换、线性化自校正后得到相应的温度值. 一路送显示器显示，另一路从单片机P0口输入，与设定温度值比较后，将误差e送PID控制器，经运算后得到调整量N. 此调整量控制SCR调功器在一个控制周期内导通的半波数，即控制了输出功率，从而控制热台的温度（图2）.

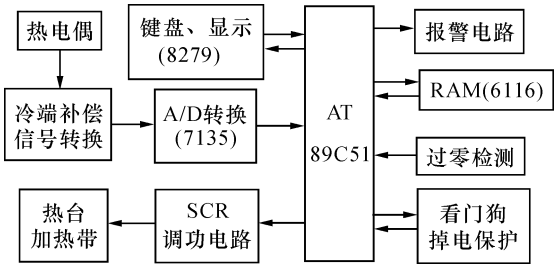

图1 系统结构
Fig. 1 Frame of system

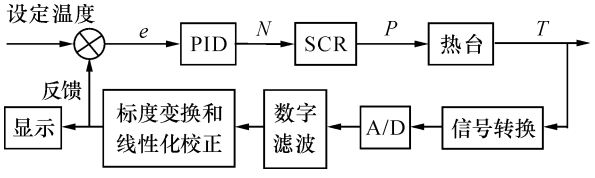

图2 控制原理图
Fig. 2 Control theory

① **收稿日期**：2004-08-24
基金项目：广西区科技厅资助项目（桂科攻0428002-1）
作者简介：邹自明（1966-），男，工程师，研究方向：仪器自动化. E-mail：zouziming1@163.com

2 系统所采用的技术措施

(1)选用双积分型 A/D 芯片 7135 进行 A/D 转换. 该型 A/D 具有转换精度高、抗周期干扰能力强、价格低廉等优点. 其分辨率为 0.006%,为提高系统测控精度提供了必要条件.

(2)由于热电偶信号和温度之间呈非线性关系,因此在标度变换时须进行线性化自校正. 本系统采用非等距分段线性插值法校正,即根据函数曲线形状变化率的大小来修正插值点间的距离. 该方法占用存储空间较少,处理后的最大误差在系统设计所允许的范围内.

(3)为滤除随机干扰成分,除了在信号转换电路中采用必要的低通滤波器外,还通过软件实现 RC 数字低通滤波,通频带选择在 25 Hz,以有效滤除包括 50 Hz 的噪声.

(4)采用硬、软件多种抗干扰措施,使得程序在发生紊乱时,能够恢复程序的功能,确保程序正常运行. 软件方面采用指令冗余、软件陷阱及软件看门狗等技术,可以使"跑飞"的程序恢复正常. 硬件方面采用系统监控器 MAX705,实现系统复位、看门狗定时输出、电源电压监测等多种功能.

3 主要硬件电路设计

(1) 信号转换电路设计[1,2] (图 3). AD590 作为 K 型热电偶冷端补偿元件, 反相放大器 A_2 用于消除冷端补偿产生的误差. R_2、C_1 组成 RC 一阶滤波电路滤除高频干扰, 电压跟随器 A_1 起阻抗匹配作用, 放大器 A_3 将小信号放大 120 倍, 使 0 ~1 010 ℃的温度对应电压输出为 0 ~5 V.

电路采用低温漂的精密电阻及高精度运放 OP07, C_1 为漏电小的聚丙乙烯电容, 以提高电路放大精度和稳定性.

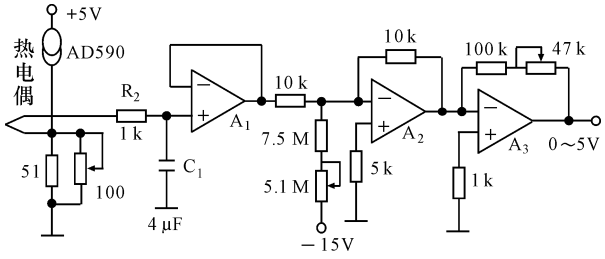

图 3 信号转换电路

Fig. 3 Signal conversion circuit

(2) SCR 调功电路设计[3] (图 4). 图中 89C51 外部中断口的 2 个计数器 T_0 和 T_1 分别对电源电压的零点数进行计数. T_0 以计算 1 500 个电压零点数 (本系统采样周期为 15 s) 来确定采样周期的时间间隔. T_1 根据 PID 控制器运算后得到的调整量确定导通半波的时间间隔, 并结合电压零点将控制脉冲平均分配到整个控制周期中去, 以尽可能保持加热均匀.

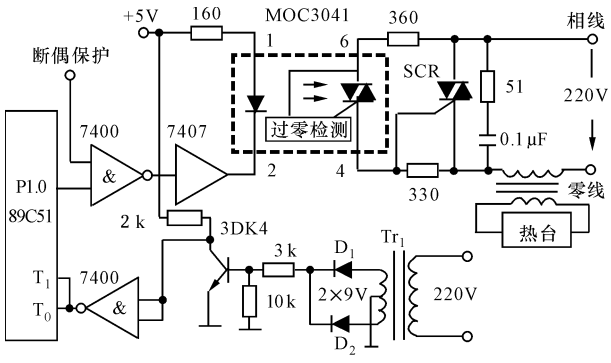

图 4 SCR 调功电路

Fig. 4 Circuit of adjusting power

断偶保护信号和从 P1.0 口输出的控制脉冲信号控制触发可控硅导通. 光电耦合器 MOC3041 除了具有隔离作用, 还具有过零检测功能, 使晶闸管能够在电源接近零点时触发.

4 系统软件设计

系统软件采用模块化结构设计, 主要包括初始化、数据采集及数字滤波、显示、PID 控制运算、定时中断、故障诊断报警等 (图 5).

为增强系统适应能力,改善调节品质,实现较高的控制精度和稳定性, 本系统选用变速积分 PID 算法. PID 控制运算及参数自整定程序为软件的核心.

4.1 变速积分 PID 算法

普通 PID 算法的输出增量为

$$\Delta U_n = k_p[(e_n - e_{n-1}) + (T/T_i)e_n + T_d/T(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})]. \quad (1)$$

式中: e_n, e_{n-1}, e_{n-2} 分别为第 $n, n-1, n-2$ 次目标温度与测量温度的偏差值; k_p— 比例系数; T_i — 积分时间; T_d— 微分时间; T— 采样周期.

积分环节主要用于消除静差, 提高系统的无差度. 系统对积分要求是: 系统偏差大时, 积分作用减弱以致全无, 以免积分作用过大产生超调,

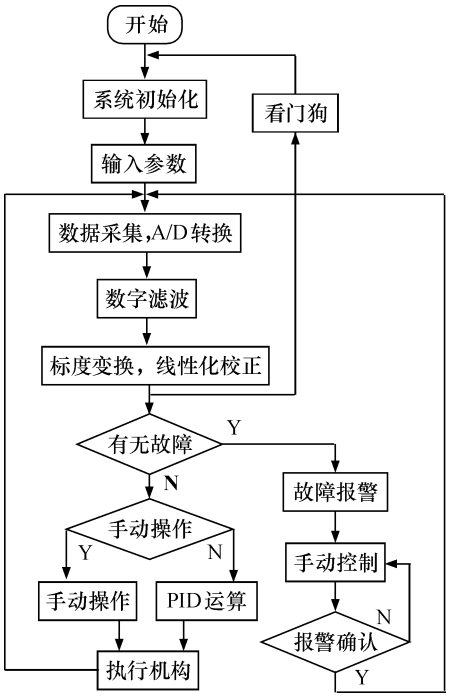

图 5　系统流程图

Fig. 5　Flow program of software of control system

甚至出现积分饱和；系统偏差较小时，则应加强积分作用，有利于消除静差. 因此，采用如下变速积分算法

$$u_{\mathrm{in}}^{*} = k_{\mathrm{p}}(T/T_i)\left(\sum_{j=0}^{n-1} e_j + e_n f(e_n)\right). \qquad (2)$$

式中：u_{in}^{*} 为变速积分的输出值，f 是 e_n 的函数，可以是线性的或高阶的. 本系统采用如下关系式[4]

$$f(e_n) = \begin{cases} 1, & |e_n| \leqslant B, \\ (A + B - |e_n|)/A, & B < |e_n| < A + B, \\ 0, & |e_n| \geqslant A + B. \end{cases} \qquad (3)$$

f 值在[0,1] 区间内变化，当偏差 $|e_n|$ 大于所给分离区间 $A+B$ 后，$f=0$，不再对当前值 e_n 进行累加；$|e_n| \leqslant (A+B)$ 后，f 随偏差的减少而增大，累加速度加快，直至偏差小于 B 后，累加速度达到最大值 1.

从(1)、(2) 和(3) 式容易得出如下变速积分 PID 算法输出增量表达式

$$\Delta U_n = k_{\mathrm{p}}[(e_n - e_{n-1}) + (T/T_i)(e_{n-1} + e_n f(e_n) - e_{n-1} f(e_{n-1})) + T_{\mathrm{d}}/T(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})]. \qquad (4)$$

这种算法对 A，B 两参数要求不高，通过初步整定，确定 A，B 分别取 3 和 1，取得了较好的效果.

4.2　基于自寻最优的 PID 参数自整定

要整定（4）式中 k_{p}，T_i，T_{d} 和 T 4 个参数的工作量很大，因此采用 Robets P D 提出的简化临界比例度整定法[5]，这种方法只需整定 1 个参数，可用程序的方法进行在线参数自整定，从而大大提高了参数整定效率. 根据 Zigler - Nichle 条件，令 $T = 0.1\ T_{\mathrm{k}}$，$T_i = 0.5\ T_{\mathrm{k}}$，$T_{\mathrm{d}} = 0.125\ T_{\mathrm{k}}$（$T_{\mathrm{k}}$ 为临界比例振荡周期），将该条件代入(4) 式

$$\Delta U_n = k_{\mathrm{p}}[2.25e_n - 3.3e_{n-1} + 1.25e_{n-2} + 0.2e_n f(e_n) - 0.2e_{n-1} f(e_{n-1})]. \qquad (5)$$

$f(e_n)$ 的值由(3) 式中 A，B 参数值决定，这样只需要整定 1 个参数 k_{p}，自整定控制算法中采用 ITAE 准则，即性能指标为 $J = \int_0^{\infty} t|e_t|\,\mathrm{d}t$，当 J 最小时，即为最优.

假设在计算 J 前后，系统是稳定的，则可得出离散化性能指标（推导过程省略）$J^{*} = T^2 \sum_{k=0}^{N} k e_k$，由于 T 为采样周期，是常数，对于性能指标而言，可以不计算，因此采用性能指标为 $J^{**} = \sum_{k=0}^{N} k e_k$.

参数整定方法：每次计算 J_n^{**} 后与上次计算得到的 J_{n-1}^{**} 值比较，根据 J^{**} 的变化趋势对(5) 式中的 k_{p} 经 N 个采样周期调整 1 次，根据本系统实际情况，N 取 5，具体调整方案为：

①$J_n^{**} < J_{n-1}^{**}$ 时，若 $k_{\mathrm{p}n} < k_{\mathrm{p}n-1}$，则 $k_{\mathrm{p}n} = k_{\mathrm{p}n-1} - C$；$k_{\mathrm{p}n} > k_{\mathrm{p}n-1}$，则 $k_{\mathrm{p}n} = k_{\mathrm{p}n-1} + C$.

②$J_n^{**} > J_{n-1}^{**}$，若 $k_{\mathrm{p}n} < k_{\mathrm{p}n-1}$，则 $k_{\mathrm{p}n} = k_{\mathrm{p}n-1} + C$；$k_{\mathrm{p}n} > k_{\mathrm{p}n-1}$，则 $k_{\mathrm{p}n} = k_{\mathrm{p}n-1} - C$.

③$J_n^{**} = J_{n-1}^{**}$ 时，$k_{\mathrm{p}n} = k_{\mathrm{p}n-1}$.

式中 C 是常数，相对 k_{p} 较小，本系统调整时取 $C = 0.1k_{\mathrm{p}}$，以提高抗干扰能力. 若想进一步提高控制精度，在保证系统稳定的前提下，可取 $C = 0.01\ k_{\mathrm{p}}$. 限于篇幅，其算法子程序省略.

5　结果与讨论

应用本系统对额定功率为 450 W 的热台进行实际温度控制实验（图 6），原热台配备的调压器和测温仪（经计量单位校正，测温精度为 0.1 ℃）分别作为图中变压器和基准测温仪，保留热台中原有的热电偶，并在其附近另安装相同规格的热电偶分别作为基准和控温热电偶，在测控过程中将两者互换使用，以消除因位置差异引起的误差.

为了检验系统抗干扰能力，在实验过程中，电网电压通过一个大功率变压器控制供电电压在 175 ~ 250 V 之间变化，以对系统施加扰动.

运行试验表明，该温控系统具有较好的测控效果(表1)，不仅控温精度高、稳定性好，当温度发生漂移时基本上能够自动达到最优，具有较好的自适应性，完全达到设计要求.

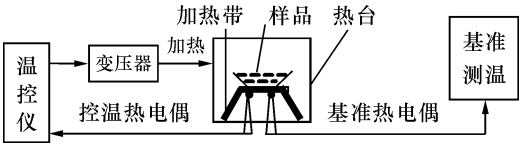

图6 实验原理图

Fig. 6 Experiment principle diagram

表1 运行结果

Table 1 Result of experiment t/℃

恒温范围	最大超调	精度		无误差率/%
		无扰动	有扰动	
<200	±3.0	±2.2	±2.6	67
200 ~ 500	±2.5	±1.0	±1.4	78
500 ~ 850	±1.8	±1.0	±1.3	84
850 ~ 1010	±1.6	±1.0	±1.2	80

无误差率 = (无误差时间/恒温时间) × 100%

微机测控系统工作环境比较恶劣，会遇到各种各样的干扰. 尽管本系统在抑制干扰方面发挥了较好作用，但供电电压的波动会对本系统的精度和稳定性造成一定的影响，需要在电源系统和 I/O 通道等的抗干扰设计方面作进一步完善.

参考文献

[1] 张靖，刘少强. 检测技术与系统设计 [M]. 北京：中国电力出版社，2001.

[2] 吴金戎，沈庆阳，郭庭吉，等. 8051 单片机实践与应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2001.

[3] 刘光斌，刘冬，姚志成. 单片机系统实用抗干扰技术 [M]. 北京：人民邮电出版社，2003.

[4] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京：电子工业出版社，2003.

[5] 何克忠，李伟. 计算机控制系统 [M]. 北京：清华大学出版社，1998.

Design of Temperature Control System of Microscope Heating Stage for High-Temperature Microscopy

ZOU Zi-ming, LU Qi-rong

(*Department of Electronics and Computer Science*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541004, *China*)

Abstract: To solve the problem of high labor intensity and low accuracy of temperature control in the application of artificial temperature control in the existing heating stage, an automatic temperature control system based on AT89C51 is designed. An executing method for the system design, including temperature measurement, temperature automatic compensate of the cold junction of the thermocouple, algorithm for gearshift integral PID control and parameter self-setting are proposed. It is proved from experiments and practical application that the system possesses high tracking accuracy and stability and can satisfy the demands for the temperature control of heating stage.

Key words: monolithic computer; temperature control; gearshift integral; parameter self-tuning