

基于 MSP430 单片机的晶化监控系统设计与实现

张万宏¹, 王晓兰², 王伟冬²

(1. 青海大学 化工学院, 青海 西宁 810016;

2. 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对非晶材料晶化过程的电特性, 提出了晶化温度控制和电阻率测试的总体设计方案, 介绍了监控系统硬件和软件设计, 并具体设计了以 MSP430 单片机为核心的智能温度控制和电阻率测试装置。试验结果表明该系统既提高了控制精度和可靠性, 降低了开发成本, 又能准确及时地实现非晶材料晶化过程电特性的在线动态研究。

关键词:晶化监控; 组合自校正; MSP430

中图分类号: TP368 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0682(2008)06-0023-03

The design and implementation of a crystallization monitoring control system based on the MSP430 single-chip microprocessor

ZHANG Wan-hong¹, WANG Xiao-lan², WANG Wei-dong²

(1. School of Chemical Engineering under Qinghai University, Qinghai Xining 810016, China;

2. State Key Lab of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract: According to the electric property of the crystallization process of an amorphous material, the paper presents the design of a temperature monitor and a resistivity meter as well as the configuration of the hardware and software based on the MSP430 single-chip microprocessor. The result from its application shows that this system has not only improved the control accuracy and reliability, but also reduced its development cost and offered an occasion for bringing about in time an on-line dynamic study of the electric property of the crystallization process.

Key words: crystallization monitor; combined self-tuning; MSP430

0 引言

非晶材料具有超高强度和一定的韧性, 而且价格低廉, 具有广阔的应用前景, 是有色金属新材料的研发方向之一。由于非晶材料在晶化过程中表现出明显的电特性, 而电特性是表征晶化过程晶核组织结构的一项重要指标, 所以通过电阻率与温度的关系来研究非晶材料的晶化动力学过程, 是一种实用

有效的方法。为完成对非晶材料晶化过程电特性测试, 即电阻率在晶化突变点及亚稳相各特征点的测试, 需要对晶化过程的温度进行精确控制, 而且需要依据不同的材料样品对温度进行灵活设置, 所以需要设计出一个通用的温度控制器。基于此该文提出了非晶材料晶化过程温度控制和电阻率测试的设计方案, 并具体设计了以 MSP430 单片机为核心的智能温度控制和电阻率测试装置。同时采用 MSP430F413 单片机定时器实现信号采样和 PWM 控制, 不仅降低了开发成本, 而且为非晶材料晶化过程电特性的研究提供了实时有效的途径。

1 监控系统组成

系统由上位机和下位机两部分组成: 上位机为

收稿日期: 2007-10-31

基金项目: 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室开放基金自洽项目(SKL05010); 甘肃省自然科学基金资助项目(ZS022-A25-039)。

作者简介: 张万宏, 青海大学化工机械系讲师, 研究方向为计算机控制与智能控制。

PC 机,拥有数据通信和数据库链接,具有对数据进行显示、分析、存储和打印的功能。下位机由两部分构成,一部分为智能温度控制系统,精确控制晶化箱电阻炉的温度及温度上升速率;另一部分为智能电阻率测试系统,完成测量量程的自动切换、运算及相应控制。系统结构示意图如图 1 所示。

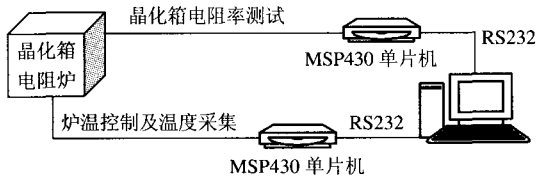


图 1 晶化箱监控系统示意图

2 温控系统

2.1 硬件设计

针对监控系统设计了通用的智能温度控制装置,其硬件原理如图 2 所示。利用 TI 公司推出的新型单片机 MSP430F413 为核心,利用其定时器 Timer_A 实现采样,并采用脉冲宽度调节 PWM 方法实现温度控制^[1]。该温控系统由单片机、键盘/显示器、温度测量放大、负载驱动及电源控制、低电压检测和报警等外围电路组成^[2]。

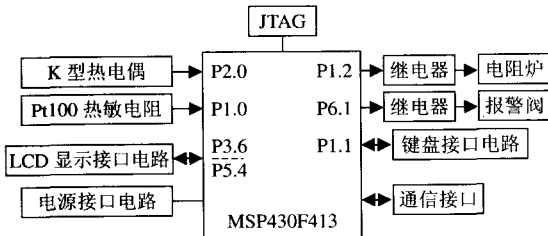


图 2 温度控制硬件框图

LCD 用于温度设定值、炉温及装置工作状态显示,键盘用于设定值、升温速率、保温时间和降温速率等工艺参数的输入。首先由温度值测量电路将温度值转化为电压值,同时单片机产生的 50 Hz 方波经电容充放电电路变换得到同频率的三角波,然后由电压切割这三角波,从而将温度值转化为相应宽度的脉冲送入单片机。

2.2 控制策略

由于电阻炉温度变化过程是在一个封闭的空间中,常常表现出大滞后、大惯性、时变性等难于控制的特点。所以在 MSP430F413 单片机中采用组合自校正与分段积分控制相结合的控制策略解决上述问题。电阻炉温控系统如图 3 所示。

炉温与电源电压之间可建立电阻炉离散数学模型^[3],考虑电源电压波动,有 $U = 220V + \Delta U$,并把热

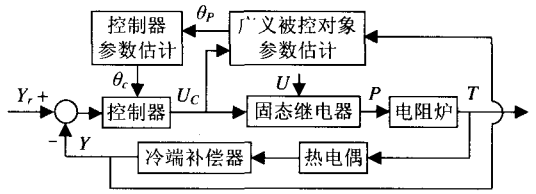


图 3 电阻炉温控系统

电偶看作一阶惯性环节,就可得到测温信号 Y 与控制信号 U_c 之间的广义被控对象数学模型,其 CAR-MA 模型为:

$$A(z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})U_c(k) + C(z^{-1})\Delta U(k)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}$$

$$B(z^{-1}) = bz^{-3}$$

$$C(z^{-1}) = cz^{-3} \quad (1)$$

其中 a_1, a_2, a_3, b, c 是广义被控对象数学模型参数,与炉温、炉结构、炉材料、采样周期、热电偶时间常数等有关。

在自校正控制设计方法中,极点配制方法具有工程意义直观、鲁棒性能良好等优点,因而在工程应用中越来越受到重视。但由于一般极点配置方案不能保证伺服跟踪性能和随机调节性能均优,而组合自校正是按照伺服跟踪和随机调节性能分别设计控制器参数,不相互影响,可使这两种性能达到均优,并能保存现有极点配置自校正控制的特点^[4,5]。根据组合自校正的推理步骤可得调节性能和跟踪性能均优的控制策略:

$$U_c(k) = H_1 U_c(k-1) - H_2 U_c(k-2) + \frac{1}{b} Y_r(k) + \frac{c}{b} Y_r(k-1) - \frac{E_0}{b} Y(k) - \frac{E_1}{b} Y(k-1) - \frac{E_2}{b} Y(k-2) \quad (2)$$

其中: Y_r 表示设定值。

$$H_1 = -a_1$$

$$H_2 = a_1^2 - a_2$$

$$E_0 = c - a_3 - a_1^2 + 2a_1a_2$$

$$E_1 = a_2^2 - a_1^2a_2 + a_1a_2$$

$$E_2 = a_2a_3 - a^2a_3 \quad (3)$$

由于对象参数 a_1, a_2, a_3, b, c 是未知时变,故选择最小二乘遗忘因子递推算法进行参数辨识,采用增量变换法以突出参数间的差别,最小二乘遗忘因子递推算法如下:

$$\theta_p(k) = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{b}]^T$$

$$\Phi(k) = [-\Delta y(k-1), -\Delta y(k-2), -\Delta y(k-3), \Delta u_c(k-3)]^T$$

$$\theta_c(k) = [H_1, H_2, E_0, E_1, E_2]^T \quad (4)$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - \Phi^T(k)\theta(k-1)]$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\Phi(k)}{[\Phi^T(k)P(k)\Phi(k) + \mu]} \quad (5)$$

$$P(k) = \frac{[I - K(k)\Phi^T(k)]P(k-1)}{\mu}$$

由增量变换可得增量式广义被控对象的模型为

$$(1 + \hat{a}_1^* z^{-1} + \hat{a}_2^* z^{-2} + \hat{a}_3^* z^{-3}) \Delta y = \hat{b}^* z^{-3} \Delta u_c(k) + \hat{c}^* z^{-3} \Delta u(k) \quad (6)$$

$$\hat{a}_1^* = \hat{a}_1 - 1$$

$$\hat{a}_2^* = \hat{a}_2 - \hat{a}_1$$

式中: $\hat{a}_3^* = \hat{a}_3 - \hat{a}_2$ (7)

$$\hat{b}^* = \hat{b}$$

$$\hat{c}^* = \frac{2\hat{b}}{220} U_c(k-3)$$

其中 $\hat{a}_1^*, \hat{a}_2^*, \hat{a}_3^*, \hat{b}^*, \hat{c}^*$ 表示增量式广义被控对象的参数估计, Δu 为波动值, \hat{a}_i 表示参数 a_i 的估计值, 依次类推。

一般遗忘因子 $\mu = 0.996$, 以期达到克服“数据饱和”现象为目的。通过参数辨识得到 θ_p 参数估计, 然后计算得到 θ_c , 这样就得到系统的组合自校正控制策略。

为了消除大干扰条件下组合自校正的大偏差, 系统根据偏差分区及偏差的变化趋势, 采用变化积分系数的分段积分控制来改变控制强度, 从而达到更好的控制效果。积分的作用主要用于消除静差, 提高系统的无差度, 控制系统对积分的要求是: 系统偏差大时, 积分作用减弱以至全无, 以免积分作用过大产生超调, 甚至出现积分饱和。偏差较小时, 则应加强积分作用, 有利于消除静差。

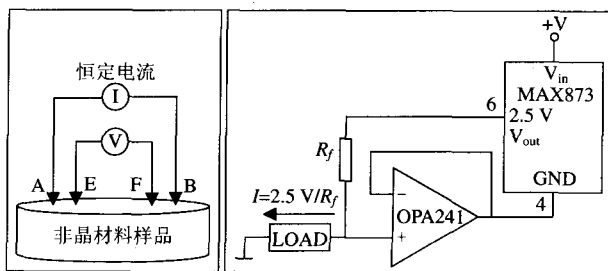
3 电阻率测试

由于非晶材料晶化过程中材料形状是变化的, 而且对电阻率的测量精度有很高的要求, 因此拟采用四探针电阻率测试法, 测试原理如图 4a 所示。用 4 根高导电、耐高温的金属探针排成一条直线, 使其压非晶材料样品上, 通过 A、B 探针为样品提供恒定的电流 I_{AB} , 在 E、F 探针之间测得电位差 V_{EF} , 于是得到材料电阻率:

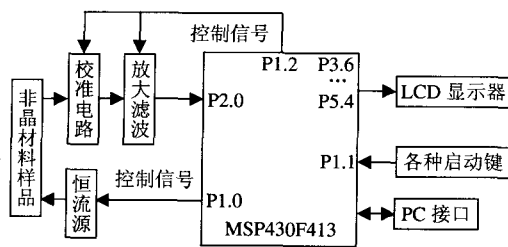
$$\rho = K \frac{V_{EF}}{I_{AB}} (\mu\Omega \times \text{cm}) \quad (8)$$

其中, K 为校正系数(体积修正系数), 由探针间距、样品厚度、样品形状等因素决定。在恒流源电路设计中, MAX873 是精密电压参考源, R_f 为选择高精度、低温漂系数的精密电阻, OPA241 精密运算放大

器为电压跟随器, 使得 MAX873 的 GND 端与运放的同相输入端电压相等, 则流过负载的电流由 R_f 决定, 可用差分放大电路完成对电压信号放大与滤波, 校准电路包括零点校准和满刻度校准。



(a) 四探针测试及恒流源电路



(b) 电阻率测试系统硬件框图

图 4 电阻率测试系统原理图

电阻率测试系统硬件框图如图 4b 所示, 在测试过程中, 首先将探针采集到的电位差信号传输给信号处理系统, 再送到 MSP430F413 单片机, 并利用单片机内的定时器 Time_A 实现采样, 同时单片机对采样值进行判断, 自动切换到最佳量程, 进行数字滤波与运算, 最后将电阻、电阻率与选用的量程显示在 LCD 屏上。经过处理后把数据传入到 PC 机, 然后 PC 机完成对电阻率测试数据的显示、分析、存储和打印处理。由于这种测试方法恒流源电流稳定, 数字电压表输入阻抗大, 因此能克服接触电阻和引线电阻的影响。

4 系统软件设计

主程序中包括系统初始化、定时器的初始化、温度和电位差采样值的读入、负载驱动和显示等。整个系统进行温度值、电位差值的采样和 PWM 的输出均在定时中断内完成, 脉冲宽度调节输出脉冲的占空比则由控制算法得到。温控系统主程序流程图如图 5 所示。

温控系统对 3 kVA 箱式电阻炉进行温控试验。在给定温度分别为 400℃, 600℃ 和 800℃, 电源波动为 10% 时, 在恒温控制中最大偏差 ±3℃, 基本偏

(下转第 56 页)

调整规则:

(1) 在偏差 $e(k)$ 较大时,为使系统具有良好的快速跟踪性能,要尽量消除偏差,提高响应速度, K_p 值取大一些, K_d 取较小值,同时为了避免系统响应出现较大的超调,因而对积分作用加以限制, K_i 值可取零。

(2) 在偏差 $e(k)$ 中等大小时,为继续消除偏差,并防止超调过大而产生振荡, K_p 值取小一些, K_d 的取值对系统响应的影响较大,取值适中, K_i 值可以取小值。

(3) 当偏差 $e(k)$ 很小时,为使系统能够具有较好的稳态性能,消除静差,克服大超调,使系统尽快稳定, K_p 值应取较大, K_i 值稍取大一些。

根据以上分析,把 $e(k)$ 、 $e_c(k)$ 和 C_p 的论域分为 15 个等级,分别记作 $-7, -6, -5, \dots, +6, +7$;把语言变量 $e(k)$ 、 $e_c(k)$ 和 C_p 的取值分为负大(NL)、负中(NM)、负小(NS)、正大(PL)、正中(PM)、正小(PS)和零(Z)等 7 个语言值。隶属函数根据上述规则和经验由主观确定,推理规则采用“IF A AND B THEN C”的形式,模糊关系表示为:

$$R_p = \bigcup_k R_{pk} = \bigcup_k (M_{ek}^T M_{eck})_i M_{cpk}$$

式中 R_p 为模糊关系矩阵; k 为规则号; R_{pk} 为第 k 条

规则对应的模糊关系矩阵; M_{ek} 为第 k 条规则中偏差取值的模糊向量; M_{eck} 为第 k 条规则中偏差变化取值的模糊向量; $(\quad)_i$ 为将矩阵转化一维后的值;由此可以计算出在一组模糊输入下的模糊输出,再利用加权平均的方法得到实际的修正系数 $C_p, C_p = (\sum_{i=1}^{15} \mu_i C_{pi}) / (\sum_{i=1}^{15} \mu_i)$,积分修正系数的计算过程与此类似,不再赘述。最后根据修正系数计算出实际的 PID 控制参数,使整个系统稳定、可靠地运行。

3 结论

该文以摩托罗拉公司 MC68HC908GP32 MCU 为核心设计了 Fuzzy - PID 半导体制冷片温度控制系统。Fuzzy - PID 控制器在 PID 参数预设定的基础上,利用模糊规则实时在线修正 PID 控制器的 3 个参数 K_p, K_i, K_d ,实现对温度的优化控制。该控制系统能发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间短、超调小的优势,同时具有 PID 控制器的动态跟踪品质好和稳态精度高的特点。

参考文献:

[1] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

(上接第 25 页)

差 $\pm 1.3^\circ\text{C}$ 。在升温过程中最大偏差为 $\pm 4^\circ\text{C}$,基本偏差 $\pm 1.5^\circ\text{C}$,最大超调量 7°C 。试验表明,该温度控制系统具有较高的控制精度和良好的跟踪性。

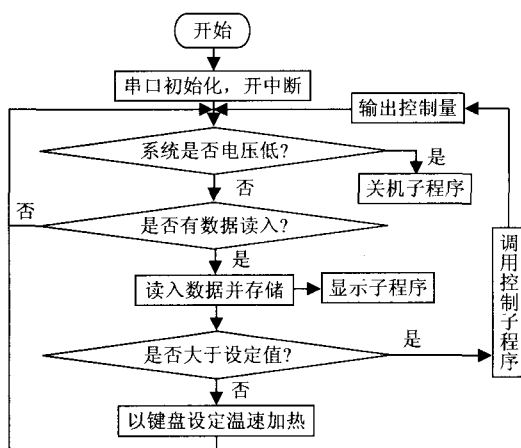


图 5 温控系统主程序流程图

5 结束语

在提出非晶材料晶化过程温度控制和电阻率测试的总体设计方案的基础上,对温控系统和电特性测试系统的硬件和软件进行了具体设计。采用四探

针电阻率测试方法,克服了接触电阻和引线电阻的影响;在温度控制中采用了组合自校正算法实现调节和伺服跟踪两个功能;同时整个系统利用单片机定时器实现信号采样和 PWM 控制。试验表明这既能提高整个监控系统的控制精度和可靠性,降低开发成本,又能准确及时地实现非晶材料晶化过程电特性的在线动态研究,为非晶材料的组织和性能预测控制提供了有效的技术解决方案。

参考文献:

[1] 李江,汪燕. 利用单片机定时器实现信号采样和 PWM 控制[J]. 微型机与应用,2004,(7):15-17.

[2] 陈惠明,扬灿军,陈鹰. 利用 MAX6675 组建测温网络[J]. 工业仪表与自动化装置,2004,(1):48-50.

[3] 李平. 热处理电阻炉温度的预测控制[J]. 冶金自动化,1996,(5):12-15.

[4] 蔡秀珊,阮荣耀. 非最小相位系统的自适应跟踪 I: 单输入单输出情况[J]. 华东师范大学学报,2000,(3):26-31.

[5] 方宁. 基于鲁棒性的空调自控系统设计[J]. 机电设备,2005,24(4):29-31.

[6] 胡大可. MSP430 系列 FLASH 型超低功耗 16 位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.