



基于预测模型的分段模糊控制系统设计

卢佩, 宋华, 高彤彤

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 针对加速量热仪需要按照材料的特性设定温度变化规律, 温度精确控制困难的问题, 通过研究电加热功率与温度变化的关系, 采用调整脉冲宽度调制方波(PWM)占空比的方式来控制加热功率. 针对系统的非线性、时变性、变结构、多层次和滞后等缺点, 提出分段、分级和基于预测模型的模糊控制策略. 采用上位机(IPC) + 下位机(PLC)的测控系统结构, 并编写 PLC 程序完成模糊控制. 实验结果表明, 本方案实现了以固定升温速率加热, 定点温度保持的功能.

关键词: 分段模糊控制; 预测模型; 加速量热仪; 可编程逻辑控制器

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2012)01-0062-04

Design of Dynamic Sectional Fuzzy Control System Based on Prediction Mode

LU Pei, SONG Hua, GAO Tongtong

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300222, China)

Abstract: Due to the demand of accelerating rate calorimeter (ARC), the heating rate should be varied according to the characteristics of the testing materials, and the temperature control should be precise, but difficult, the method of changing the duty cycle of pulse width modulation (PWM) was used to change the power of the heating system based on the research of the relationship between the electrical heating power and temperature variation. Taking into consideration the characteristics of nonlinearity, time-varying, variable structure, multi-level and long time delays, a temperature control system was developed which combined the dynamic sectional fuzzy control with fuzzy control strategies generalized from the prediction mode. The hardware of the control system was designed with Industrial Personal Computer (IPC) and Programmable Logic Controller (PLC) and the fuzzy algorithm programs were compiled by PLC. Testing results show that the control system meets the demand.

Key words: dynamic sectional fuzzy; prediction mode; accelerating rate calorimeter; PLC

电加热精确控制的难点包括两个方面. 一方面, 由于电加热是一个具有惯性、滞后、非线性的时变系统, 加热腔(炉)内热工状态复杂, 有热辐射、热传导、热对流, 加上工艺参数的频繁波动, 给建立加热系统的数学模型造成了很大困难, 为此, 研究人员进行控制策略研究, 如模糊 PID 算法、动态矩阵法、预测函数法等控制策略^[1-3]; 另一方面, 电加热的控制手段是改变电加热输出功率, 采用变压器方法在大量加热器功率需要单独调节的场合就无法完成. 另外, 采用在

运行中改变加热器的电阻这种方式来调节功率, 在硬件上难以实现. 为此, 研究人员致力于研究输出功率的控制手段^[4-5], 如基于固态继电器(SSR)原理、基于脉宽调制(PWM)等原理.

加速量热仪是一种能够模拟潜在失控反应和量化某些化学品和混合物(如电池材料、不同黏度的油等)的热、压危险性信息的仪器. 利用加速量热仪研究物质的热分解过程, 不仅可以得到绝热条件下的初始分解温度, 而且还能够详细了解热分解过程中温

度和压力的变化,并计算出一定温度范围内的动力学参数,这些数据对于物质的安全储存、运输和生产都具有重要的意义^[6]。然而,加速量热仪一般采用电加热控制方式,其温度对象具有非线性、时变、滞后、不对称等特点,实现温度的精确控制成为难题。本文结合加速量热仪温控系统的特点,进行了电加热控制策略研究,并采用 PLC 控制实现了预期的控制目的。

1 加速量热仪测控系统特性

1.1 非线性、纯滞后、多阶惯性加热系统

图 1 所示为加速量热仪温度场的基本结构。5 组(每组 3 根)电加热棒嵌入铝制外壳内,其中顶盖上嵌入 1 组,环壁四周均匀分布 4 组。实验材料被放置在样品室中,加热棒作用的直接对象是铝制外壳(加热棒本身加热会带来一定的滞后),经过加热棒→铝制外壳→加热腔→样品室的传递过程,在各过程中传递的参数不同,同时加热腔空间场还会存在辐射和对流传热。这就使其成为非线性、纯滞后、多阶惯性加热系统,精确控制温度困难。

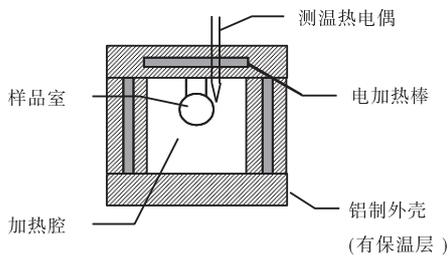


图 1 量热仪结构

Fig.1 Basic structure of ARC

1.2 控制要求

通常的加热系统是要求温度稳定于某一设定值,而加速量热仪要求温度在某一范围内按一定的升温速率升温—保持—升温…。不同实验材料的升温速率、保持温度点和保持时间不同,其化学和物理特性也具有不确定性,在加热中随时可能发生自放热现象,在很短的时间内释放出大量的热量,此时要求系统跟踪自放热的温度变化,迅速提升系统的加热升温速度。要捕捉到自放热现象,就需要系统具有慢速稳定的温度控制方法(0.5~1℃)和准确的判断(捕捉)能力。

2 分段模糊控制策略

根据加速量热仪加热对象的特性,以及其温度控制是升温—保持—升温…的特点,常规控制算法无法

达到预期的控制效果。针对系统的非线性、时变性、变结构、多层次和滞后等缺点,将控制策略分为升温段、保持段和过渡段,根据实验建立各段的模糊温度控制策略。

2.1 升温段

建立离散论域: $\Delta T_r \{0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$ 表示升温速率设定值,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $T_z(t)$ 表示下一时刻的预测温度值, $T_y(t)$ 表示当前时刻的实际温度值,单位为 $^{\circ}\text{C}$,两者均为时间 t 的函数; $U \{4\ 500, 4\ 275, 4\ 050, 3\ 825, \dots, 0\}$ 表示加热功率,单位 W(采用改变固态继电器的占空比实现)。其中 ΔT_r 、 $T_z(t)$ 、 $T_y(t)$ 为模糊输入变量, U 为决策控制信号。

通过实验数据和理论分析,根据“如果 ΔT_r 、 $T_z(t)$ 、 $T_y(t)$,则 U ”的模糊推理规则,实现模糊辨识建模。

2.2 保持段

建立离散论域: $e_d \{0, 0.2, 0.4, 0.6\}$ 表示温度设定值 T_{sd} 与温度测量值 T_{zd} 之差,单位为 $^{\circ}\text{C}$,此段 T_{sd} 为常数; $\Delta e_d \{-0.2, 0, 0.2\}$ 表示 e_d 的变化; $U_d \{450, 360, 270, 180, 90, 0\}$ 表示补偿加热功率,单位为 W。当散热等影响使测量温度达不到要求时,补偿加热,保证温度的准确控制。其中 e_d 、 Δe_d 为模糊输入变量, U_d 为决策控制信号。

在保持段实际温度变化范围较小,以误差级别控制,采用正态分布函数作为隶属函数。由于无冷却控制,因此,实际温度应严格控制在设定温度及以下,成为固态继电器控制的难点,本文采用加热棒分组控制的方式实现。

2.3 过渡段

过渡段包括两种情况,一是指升温即将到达保持段,二是由保持段进入升温段(包括实验刚开始进入升温段)。

在升温即将到达保持段的过渡段,为了抑制超调,考虑电加热的热惯性,在保持点附近系统自动切断升温段模糊控制输出,改为输出持续一定时间的一个固定控制量,直到温度差 0.5°C 至保持点时自动切换到保持段模糊控制输出。

保持段进入升温段的过渡段(包括实验刚开始进入升温段),为防止加热棒的滞后,先给一个较短时间的大功率输出,然后切换至升温模糊控制输出方式。

3 基于预测模型的升温段模糊控制策略

预测模型的基本功能是根据对象的历史信息和

未来输入预测其未来输出. 预测模型只强调其功能, 而非其结构形式, 只要能够实现预测对象未来输出的功能即可. 对于非线性系统, Hammerstein 模型、模糊逻辑模型、神经网络模型、支持向量机模型等智能模型结构等有着广泛的应用.

3.1 模糊预测模型

加热棒加热是利用存在温差的两物体之间会产生热传递的原理. 但当被加热物体温度升高时, 加热棒和被加热对象之间的温度差减小, 二者之间的热传递就会减少. 另外, 散热、环境温度等影响, 导致被加热对象的非线性特性. 本文采用预测模型的机理是, 通过滚动优化参数, 用不同参数的线性曲线拟合整体的非线性特性.

将输出功率 U 、预测温度值 T_z 、实际温度值 T_Y 3 个变量进行模糊划分, 模糊推理规则为:

$$R^{ij}: \text{If } U_i \text{ is } E_i \text{ and } T_{Yj} \text{ is } T_j \text{ then } T_{Zij} = aU_i + bT_{Yj} + c$$

其中, a, b, c 为 3 个待辨识量.

设实验数据为: $\{(U_i, T_{Yj}, T_{Zij}) | i, j = 1, 2, \dots, N\}$. 则

辨识目标函数为: $J = \sum_{k=1}^N (T_{zk} - T_{zk})^2$. 其中 T_{zk} 为系统实际输出, T_{zk} 为模型输出.

定义如下变量:

$$P = [a_{11}, a_{21}, \dots, a_{n1}; b_{12}, b_{22}, \dots, b_{n2}; c_{13}, c_{23}, \dots, c_{n3}]^T \quad (1)$$

$$Y = [T_{Z1}, T_{Z2}, \dots, T_{Zn}]^T \quad (2)$$

$$X = [U, T_Y, 1]^T \quad (3)$$

$$Y = PX \quad (4)$$

由式 (1) 一式 (4) 可写出关于 U, T_Y, T_z 的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} T_{Z1} \\ T_{Z2} \\ \vdots \\ T_{Zn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & b_{12} & c_{13} \\ a_{21} & b_{22} & c_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & b_{n2} & c_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ T_Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 模型参数辨识

利用 ARC 在 50 ~ 110 °C 温度段的升温实验数据进行模型参数辨识. 由于待辨识方程 $T_{zij} = aU_i + bT_{Yj} + c$ 中包含 3 个待辨识变量, 至少需要 8 组实验数据才能辨识出模型. 为了提高模型拟合的精确度, 选用 12 组的数据进行拟合运算.

同时, 由于变量 U 与 T_Y, T_z 单位不同, 造成它们在数值上相差太大 (功率最高可达数千瓦, 而温度最高也只有 400 °C). 为了使这 3 变量在方程拟合时能够在同一个权重评价标准下, 需要对变量进行规范化处理, 将数据进行归一化和平移处理使之能够进行正

确的拟合计算.

数据处理方程如下:

$$Q_i = \frac{U_i - \frac{(U_0 + U_n)}{2}}{1000}$$

式中: Q_i 为 U_i 处理后的取值, $i = 0, 1, \dots, N$; U_0, U_n 为系统功率的上下限. 所以矩阵方程 (5) 改写为

$$\begin{bmatrix} T_{Z1} \\ T_{Z2} \\ \vdots \\ T_{Zn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & b'_{12} & c'_{13} \\ a'_{21} & b'_{22} & c'_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a'_{n1} & b'_{n2} & c'_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ T_Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

则拟合出来的模型方程为

$$Z = 0.2569Q + 0.9916T_Y + 1.2368$$

模型拟合效果如图 2 所示. 在 99.6 °C 处误差最大, 为 0.45 °C, 相对误差为 0.46%, 模型的拟合效果较好.

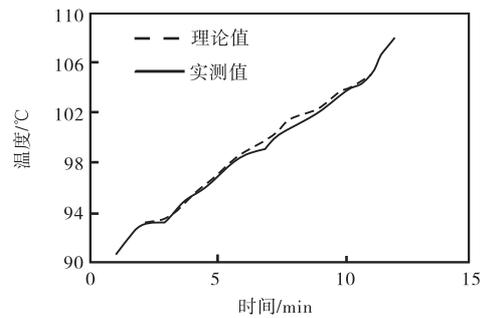


图 2 理论值与实测值比较

Fig.2 Comparison between theoretical value and actual value

3.3 基于参数辨识的加热功率求解

在实时控制中, PLC 首先由已知的升温速率 ΔT_t 和当前时刻的采样温度值 $T_Y(t)$ 计算出下一时刻的理论温度值 $T_z(t)$, 然后根据当前采样温度选择合适的模型方程. 同样以 50 ~ 110 °C 为例, 则反推出的系统输出功率表达式为

$$U = \frac{T_z - 1.2368 - 0.9916T_Y}{0.2569} \times 1000 + \frac{U_0 + U_n}{2}$$

式中: $U_0 = 0 \text{ W}$; $U_n = 4500 \text{ W}$; T_z 为在 0.7 °C/min 的速率下, 下一次采样应该到达的理论温度值; T_Y 为当前时刻采样温度值; U 为系统应采用的功率大小.

4 控制策略的实现

4.1 基于 SSR 的输出控制的实现

加速量热仪测控系统采用改变固态继电器的

PWM 方波的占空比来调节加热功率. 由于供电电源为交流电, 电压值以正弦波周期性变化, 且供电幅值会在 $220(1 \pm 10\%)V$ 的范围变化, 因此在固态继电器的通断控制中, 为了达到供电的准确度, PWM 方波的周期要以正弦波的整数倍为基准.

交流电的频率是 50 Hz, 即周期为 0.02 s. 本系统中设定 PWM 方波的周期为 100 个正弦波的周期, 同时占空比以一个正弦波周长的时间长度为基准的增减幅度. 即 PWM 方波的周期为 2 s, 将其分为 100 等份, 0.02 s 为一等份, 与正弦波的周期相对应. 所以如果在一个 PWM 方波的周期内只导通 0.02 s, 那么加热丝的输出功率就占整个加热器功率的 1%.

采用占空比控制, 在输出较大功率时可以达到比较满意的控制效果; 但在小功率控制, 即在保持段模糊控制中, 以补偿加热方式控制, 需要更细化的功率输出, 这里采用加热棒分组控制方式. 例如: 5 组加热棒, 就可将原加热功率细化为 5 级.

4.2 基于 PLC 的模糊控制实现

采用西门子 S7-300 可编程控制器构建的量热仪模糊控制系统程序架构如图 3 所示. 包括启动程序 OB100、循环执行的主程序 OB1 和定时中断程序 OB35.

启动程序 OB100 除设置启动方式、上电自检测外, 还在执行主程序前设置 CPU 开始运行的初值和 I/O 端初值(初始化设置).

主程序 OB1 中, 温度采集子程序 FB1 采集输入模块 (PIW) 的数据并存入 DB1 中; 采样数据处理子程序 FB3 将数据 (DB1 中) 进行滤波、变换等处理, 处理后数据存入 DB2 中, 由 FB5 和上位机读取; PWM 生成子程序 FB4 根据 DB4 中的脉冲频率和占空比数据 (由 FB5 给出) 输出控制信号, 控制固态继电器的通/断.

定时中断程序 OB35 用于每隔一定时间(与电源频率成倍数关系)完成模糊控制算法的计算和决策. 首先离线辨识模糊模型, 将不同时刻和状态下辨识出的模型保存到 FB5 的背景数据块 DB5 中, 构成模糊控制总算法. 实时运行中根据读取 DB2 模块中的温度值、温度设定值及上一次的温度值, 获取温度所属段(升温、保持和过渡)、所属区域范围(分级), 确定所要采取的控制策略, 并根据 ΔT_r 、 $T_z(t)$ 、 $T_y(t)$ 等计算出输出控制值 (U 值), 最终计算出 PWM 占空比, 存入 DB4 模块中, 由 PWM 生成子程序调用.

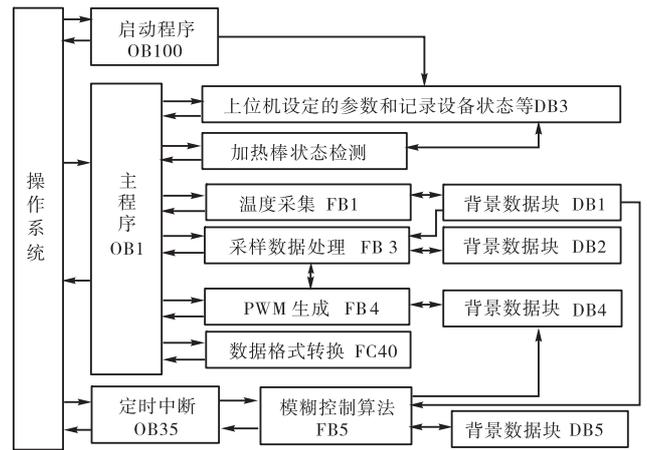


图 3 控制系统结构

Fig.3 Structure of control system

4.3 实验

本文构建了上位机 (IPC)+下位机 (PLC) 的测控系统结构. 温度范围、升温速率、步长、等待时间等参数由上位机设定并下载至 PLC, 上位机采集 PLC DB2 数据块中的温度变化数据, 进行数据显示、趋势曲线显示, 并存档.

设定升温范围为 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 、升温速率 $1.2^\circ\text{C}/\text{min}$, 在保持点 77°C 保温 20 min, 图 4 为实验数据. 从图 4 可以看出, 采用本方案进行温度控制, 很好地实现了以固定升温速率加热, 并且能够做到使温度在保持点恒定 20 min 之后再继续加热, 从而达到升温—保持—升温的控制要求, 最大误差为 0.4°C .

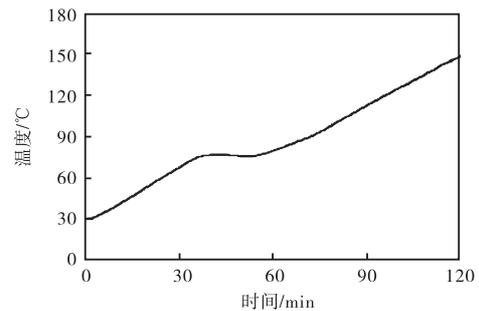


图 4 系统加热实时曲线

Fig.4 Real time curve of heating process

5 结 语

本文通过建立分段、分级和基于预测模型的模糊控制策略, 克服了加速量热仪加热系统的非线性、时变性、变结构、多层次和滞后等缺点, 不仅在恒温阶段能够达到与 PID 控制同样的效果, 更重要的是在

(下转第 78 页)