

基于 PID 分段式温度控制系统

李丙旺¹, 张友照¹, 陈文建²

(1. 华东光电集成器件研究所工艺部, 安徽 蚌埠 233042; 2. 南京理工大学光电学院, 南京 210000)

摘要: 针对工业电阻炉温度控制的非线性、大惯性和大滞后等问题, 设计一种基于 PID 分段式温度控制系统。在分析传统 PID 控制技术的基础上, 对其进行改进, 为验证温控系统控制性能, 对电阻炉进行基本 PID 和位置式 PID 分段控制实验。结果表明: 与常规 PID 控制相比, PID 位置式控制算法能实现多通道和分段式温度控制, 具有超调小、精度高和稳定性好等优点。

关键词: PID; 位置式; 分段温控

中图分类号: TP306.6 **文献标志码:** A

Step-Shaped Temperature Control System Based on PID

Li Bingwang¹, Zhang Youzhao¹, Chen Wenjian²

(1 Dept. of Technology, East China Photoelectric IC Research Institute, Bengbu 233042, China;

2. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In view of nonlinear, strong inertia and heavy delay questions of industry fuzzy temperature control system, a step-shaped temperature control system based on PID was designed. Based on analysis of conventional PID control technology, we make the improvement to it and carry on basic PID and the step-shaped position type PID control experiments with the fuzzy to confirm the systems control performance. The result indicated that compares with the conventional PID control, the control algorithm of position PID can realize the multichannel and the step-shaped temperature control, has the little over modulation, the high precision and good stability and so on merits.

Keywords: PID; position mode; step-shaped temperature control

0 引言

温控技术无论是在工业生产, 还是日常生活中都起着非常重要的作用。在冶金、电子、石油、化工等行业, 温度是极为重要而又普遍的热工参数之一, 在家庭里就有热水器、电饭煲、电烤箱等依赖于温控技术的家电设备, 在工业中电阻炉是极具代表性的温控设备。可以说温度控制技术无处不在。

电阻炉被广泛地应用在工业生产中, 它的温度控制效果直接影响到生产效率和产品质量, 因而对温度控制系统的要求很高。目前工业电阻炉通常采用常规 PID 控制, 但是工业电阻炉的温度控制具有非线性、大惯性、大滞后等特点, 难以对其建立精确的数学模型, 因而常规 PID 控制难以取得良好的控制效果。因此, 设计一个控制精度高、运行稳定的电阻炉温度控制系统具有很高的应用价值。

1 PID 控制技术^[1]

传统的控制技术是以经典控制理论或现代控制理论为基础发展起来的, 具有原理简单、实现容易、技术成熟等优点, 在工业控制中具有重要作用。传统的控制技术是基于被控对象的精确数学模型的控

制方式, 采用固定的控制算法, 控制系统由于依赖于数学模型而缺乏灵活性和应变能力。PID 控制是传统控制中的经典控制方式之一。其原理如图 1。

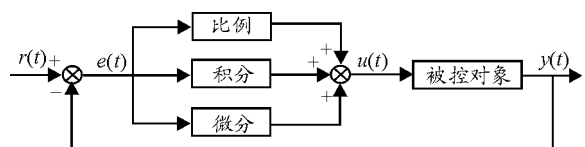


图 1 PID 控制系统原理框图

PID 控制是在连续生产过程控制中, 将偏差的比例 (Proportional)、积分 (Integral) 微分 (Derivative) 通过线形组合构成控制量, 对控制对象进行控制。比例作用的引入是为了及时成比例地反应控制系统的偏差信号 $e(t)$, 以最快速度产生控制作用, 使偏差向减小的趋势变化。积分作用的引入, 主要是为了保证被控量在稳态时对定值的无静差跟踪。微分作用通常与比例作用或积分作用联合作用, 构成 PD 控制或者 PID 控制, 微分作用的引入, 主要是为了改善闭环系统的稳定性和动态特性, 如使超调量较小, 调节时间缩短, 允许加大比例控制, 使稳态误差减小, 提高控制精度。

在常规 PID 的应用中 P、I、D 3 个参数往往根

收稿日期: 2011-04-28; 修回日期: 2011-06-14

作者简介: 李丙旺 (1971—), 男, 安徽人, 学士, 高级工程师, 从事半导体及特种器件的封装、测试技术及相关设备的维修研究。

据现场设备情况或调试经验人工设定的，通过调试参数以改变控制性能。PID 控制是最早发展起来的控制策略之一，由于其算法简单、易于实现和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制，尤其适用于可建立精确数学模型的确定性温控系统。

2 PID 算法改进

PID 一般算式及模拟控制规律如式 (1) 所示：

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中： $u(t)$ 为控制器的输出； $e(t)$ 为偏差，即设定值与反馈值之差； K_C 为控制器的放大系数，即比例增益； T_I 为控制器的积分常数； T_D 为控制器的微分时间常数。PID 算法的原理即调节 K_C 、 T_I 、 T_D 3 个参数使系统达到稳定。

在计算机控制系统中，使用比较普遍的也是 PID 控制策略。此时，数字调节器的输出与输入之间的关系为：

$$u(kT) = K_c \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(jT) + \frac{T_D}{T} [e(kT) - e(kT - T)] \right\} \quad (2)$$

其中： T 为采样周期； k 为采样序号($k=0, 1, 2, \dots$)； $u(kT)$ 为第 k 次采样时刻的计算机输出值； $e(kT)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值； $e(kT - T)$ 为第 $e(K-1)$ 次采样时刻输入的偏差值。如果采样周期足够小，该算式可以很好的逼近模拟 PID 算式，因而使被控过程与连续控制过程十分接近。

若在式 (2) 中，令：

$$K_I = \frac{K_p T}{T_I} \quad (\text{称为积分系数})$$

$$K_D = \frac{K_p T_D}{T} \quad (\text{称为微分系数})$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k - 1)] \quad (3)$$

式 (3) 即为离散化的位置式 PID 控制算法的编程表达式。可以看出，其计算复杂，因此推导了计算较简单的递推算式。位置式 PID 控制算法框图如图 2。

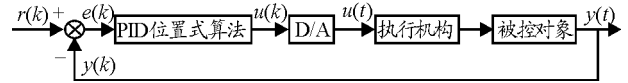


图 2 位置式 PID 控制算法框图

考虑到第 $(k-1)$ 次采样时有

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (4)$$

使式 (3) 两边对应减去式 (4)，得

$$u(k) - u(k-1) = K_p \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (5)$$

整理后得：

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} = \\ &u(k-1) + K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T} \right) e(k-1) + \\ &K_p \frac{T_D}{T} e(k-2) = u(k-1) + a_0 e(k) - a_1 e(k-1) + a_2 e(k-2) \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) 就是 PID 位置式的递推形式。

3 分段式温控系统

图 3 是分段式温度控制系统的系统框图^[2]，温控系统采用位置式 PID 控制，从式 (6) 中可以看出，由比例环节产生的控制量只与第 k 次采样的偏差有关，由微分环节产生的控制量也只与第 k 次和 $k-1$ 次采样的偏差量有关，而由积分环节产生的控制量则与前 k 次采样的偏差量都有关^[3]。在过程的开始、结束或者大幅度的增减设定值时，有可能导致较大的积分累积，使得控制量超过执行机构的允许动作范围对应的极限控制量，引起系统较大的超调或震荡。因此必须对积分环节产生的控制量加以限制，这就是积分分离式 PID 控制(响应方式如图 4)。积分分离式 PID 控制(或称 IPD 控制)就是人为设定一个值，当误差值超过这个设定值时，采用 PD 控制，这样既避免产生超调，又保证系统有较快的响应。当偏差小于设定值时，又采用 PID 控制，保证了控制的精度。其控制规律为：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \beta \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

当 $e(k) > \varepsilon$ 时， $\beta=0$ ；当 $e(k) \leq \varepsilon$ 时， $\beta=1$ 。

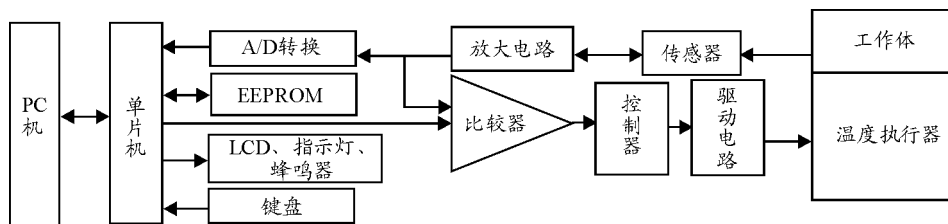


图 3 分段式温控系统框图

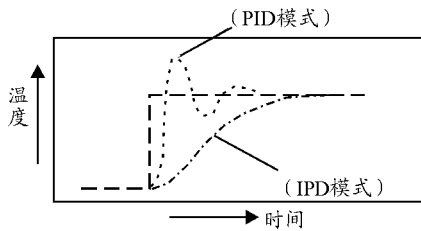


图 4 PID 与 IPD 模式控制响应方式示意图^[3]

微分先行 PID 控制只对输出量进行微分, 而对给定值不作微分。这样在改变给定值时, 输出不会改变, 而被控量的变化通常是比较缓和的。运用微分先行 PID 控制避免了在进行升降温控制过程中由于温度给定值的升降而引起系统的震荡。通常采用凑试法确定 PID 调节参数。凑试法是通过闭环运行观察系统的响应曲线, 根据各调节参数对系统响应的影响程度, 反复调试参数, 直到满意的系统响应为止。因为 PID 控制是对某温度点进行的, 所以需要根据温控精度将整个温控过程分为 n 个微小时段 (从理论上讲, 时段越小, 控温精度越高, 当然这要受到诸如数据存储位大小等因素的限制), 计算出每个时段的设定温度, 即可实现对每个微小时段进行 PID 控制, 从而达到分阶段温控的目的^[4-6]。

4 实验测试

为了验证温控系统控制性能, 笔者对电阻炉进行了基本 PID 控制实验和位置式 PID 分段控制实验。

基本 PID 温控实验: 先将温度设定值取 850°C , 采样时间为 3 s , 控制方法是当温度误差 $e > 100^{\circ}\text{C}$ ($e = T - R$) 时, 电阻炉为全控即电阻丝一直为导通状态; 当 $-30^{\circ}\text{C} \leq e \leq 100^{\circ}\text{C}$ 时, 采用 PID 控制; $e < -30^{\circ}\text{C}$ 时, 电阻炉交流电流断开, 即电阻丝为断开状态, 在该实验中, 经过反复实验选择 K_p 为 3 、 T_i 为 220 、 T_d 为 5 , 其温度控制曲线如图 5。实验发现, 采用基本 PID 时超调量较大, 温度设定值为 850°C 时, 温度最大值为 865°C 。

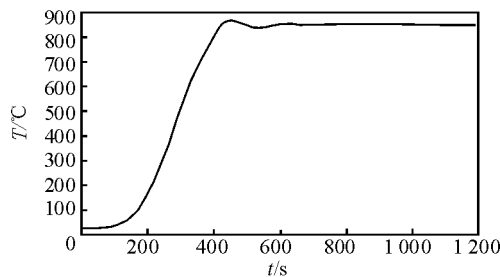


图 5 850°C 时 PID 控制温度曲线图

位置式 PID 分段温控实验: 为了进一步确定分段温控的具体参数设置, 经过反复实验, 温度设定

为 850°C , 采样时间为 3 s 时, PID 控制方法如下: 当温度误差 $e \geq 200^{\circ}\text{C}$ ($e = T - R$) 时, 电阻炉为全控即电阻丝一直为导通状态; 当 $150^{\circ}\text{C} \leq e \leq 200^{\circ}\text{C}$ 时, 采用 PD 控制; 当 $-30^{\circ}\text{C} \leq e < 150^{\circ}\text{C}$ 时, 采用位置式 PID (式 (6)) 控制; $e < -30^{\circ}\text{C}$ 时, 电阻炉交流电流断开, 即电阻丝为断开状态, PD 控制的作用是防止积分饱和, 在该实验中, 经过反复实验选择 K_p 为 0.9 、 T_i 为 40 、 T_d 为 8 , 其温度控制曲线如图 6。

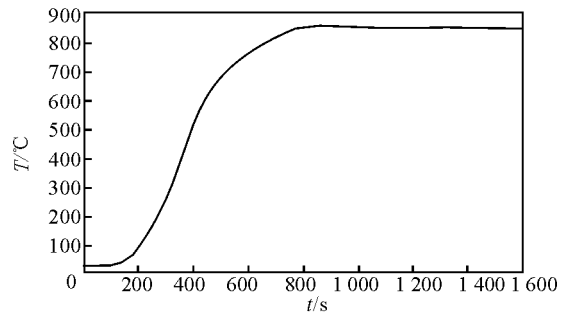


图 6 850°C 时分段控制温度曲线图

由温度控制曲线可知, 其最高温度为 855°C , 超调量为 0.6% , 峰值时间为 9 min , 当差带取 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 时, 温度从最大值下降后就趋于稳定, 调节时间为 15 min , 稳定后稳态误差 2°C 。与基本 PID 控制相比, 位置式 PID 分段控制具有超调小、精度高、稳定性好等优点, 缺点是调节时间增长。在控制系统的实际应用中, 超调是最重要的性能指标和设计指标之一, 为了减小超调允许适当的增大调节时间。

5 结束语

笔者针对控制对象进行了系统控制算法分析研究, 在深入阐述常规 PID 控制算法的基础上, 采用了 PID 位置式控制算法, 并实现了多通道、分段式温度控制; 与常规 PID 控制相比, 该算法及分段温控方式具有超调小、精度高、稳定性好等优点, 当然, 调节时间较长也是其较为明显的缺点。

参考文献:

- [1] 陶永华, 尹怡欣. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 6.
- [2] 王家桢. 调节器与执行器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 14.
- [3] 张菁. 单片机温度控制系统方案的研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 14(1): 144.
- [4] 张普光. 基于 51 单片机温度控制系统的硬件设计[J]. 软件导刊, 2008(1): 19.
- [5] Astrom K J, Haggglund T. PID Control: Theory, Design and Tuning[M]. Malden, Instrument Society Of America, 1995: 16-39.
- [6] Voda, A.A. and Undau LD. A method for the auto-calibration of PID controllers[J]. Automatic, 1995, 31(1): 41-53.