

文章编号:1000-582X(2006)06-0067-04

# 零极点配置自校正温度控制的建模与仿真\*

欧阳奇<sup>1,2</sup>, 谢志江<sup>2</sup>, 伍成波<sup>1</sup>, 刘步高<sup>1</sup>  
(重庆大学 1. 材料科学与工程学院; 2. 机械工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**在模型参数估计的基础上,根据电阻炉温度控制要求所确定的闭环系统极点分布,设计了一种基于最小相位自校正零极点配置算法,给出了电阻炉温控对象的数学模型,模型参数的辨识方法,控制量的计算公式和仿真结果.仿真和实际应用表明:该算法收敛速度快,对时变的温控对象,特别是对具有低电压大电流发热元件的温度控制具有较好的控制效果.该系统已经成功应用于某钢研所的智能炉渣性能测试仪发热元件的温度控制.

**关键词:**系统辨识;零极点配置;电阻炉;计算机仿真

**中图分类号:**TP273.2

**文献标识码:**A

对高温电阻炉温度实时控制要求所设计的控制系统应具有较强跟踪温度信号的能力,良好的稳定性及平稳的动态性能,即要求温度控制算法能够满意地跟踪设定的温度曲线.实践证明,对于炉温动态特性具有容积滞后大、温度上升和下降严重不对称,被控对象的增益、容积滞后时间及纯滞后时间等都与温度有关,采用常规PID控制,在实际应用中存在许多问题,例如只能在工作点附近的小范围内改变给定值,否则,控制器难以适应,需要重新整定PID参数<sup>[1]</sup>.为此,笔者建立了基于零极点配置自校正PID控制算法,该模型结构简单,控制精度高,特别适用于具有低电压大电流发热元件的温度控制器的设计.

## 1 系统硬件构成

本系统由计算机、温度检测电路、可控硅、A/D转换电路组成.热电偶温度信号经补偿放大后,其输出电压为0~5V,该电压经采样保持和12位A/D转换电路后得到与炉温相对应的数字量,经数字滤波,线性化处理、标度变换后,显示炉温.当采样周期到达时,与设定温度进行比较,再作模型运算,根据运算结果,通过I/O口改变控制脉冲宽度,从而改变可控硅在一个固定控制周期内的导通时间.即改变被控对象的平均输入功率,以达到控温的目的.系统原理框图如图1

所示.

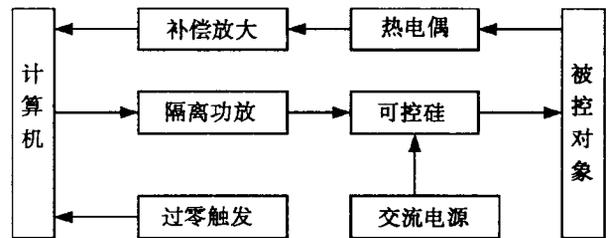


图1 系统原理框图

## 2 零极点配置算法

考虑受控过程由CARMA模型来描述,设对象为线性时变参数模型为<sup>[2]</sup>:

$$A(Z^{-1})y(k) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(k) + C(Z^{-1})e(k), \quad (1)$$

式中: $y(k)$ ,  $u(k)$ ,  $e(k)$ 分别为被控变量,操作变量和零均值白噪声序列; $d$ 为纯滞后; $z^{-1}$ 为后移算子.

其中:

$$A(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i Z^{-i}; B(Z^{-1}) = b_0 + \sum_{i=1}^{n_b} b_i Z^{-i},$$

( $b_0 \neq 0$ );  $C(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i Z^{-i}$ . PID控制器的数字结构形式为增量式,即:

\* 收稿日期:2006-02-10

基金项目:重庆大学大学生创新基金资助(20040207)

作者简介:欧阳奇(1971-),男,湖南隆回人,重庆大学讲师,博士研究生,主要从事钢铁冶金、计算机测控等方面的研究.

$$G_r(Z^{-1}) = \frac{g_0 G'(Z^{-1})}{1 - Z^{-1}}, \quad (2)$$

式中:  $G'(Z^{-1}) = 1 + \frac{g_1}{g_0} Z^{-1} + \frac{g_2}{g_0} Z^{-2}$ , 为保证闭环稳定, 加滤波环节系统  $F'(Z^{-1}) = 1 + f_1 Z^{-1}$ . 其结构原理如图 2 所示.

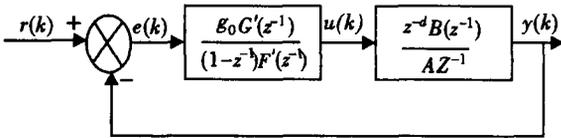


图 2 自校正 PID 控制算法原理图

由于对象是开环稳定的最小相位系统, 故可对图 2 中的前后通道传递函数作零极点抵消处理, 即令:

$$F'(Z^{-1}) = B'(Z^{-1}), \quad (3)$$

式中:  $B'(Z^{-1}) = 1 + \frac{1}{b_0} \sum_{i=1}^{n_b} b_i Z^{-i}$ , 对于许多的工业控制系统, 模型阶次可取  $n_a = 2, n_b = 1$ , 这样可以方便地利用 PID 控制参数  $g_0, g_1, g_2$  来配置极点, 即令:

$$\frac{g_1}{g_0} = a_1, \quad \frac{g_2}{g_0} = a_2, \quad f_1 = \frac{b_1}{b_0},$$

于是闭环传递函数简化为:

$$G(Z^{-1}) = \frac{b_0 g_0 Z^{-d} / (1 - Z^{-1})}{1 + b_0 g_0 Z^{-d} / (1 - Z^{-1})} = \frac{b_0 g_0 Z^{-d}}{1 - Z^{-1} + b_0 g_0 Z^{-d}},$$

则 PID 控制器变为:

$$G_r'(Z^{-1}) = \frac{g_0(1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2})}{(1 - Z^{-1})(1 + b_2/b_0 Z^{-1})}.$$

令  $b_0$  为常数 ( $0 < b_0 < 1$ ), 不参加辨识, 则模型的待估参数为  $a_1, a_2, b_1$ , 采用递推最小二乘法 (带遗忘因子) 估计, 得自校正 PID 控制器的控制规律:

$$u(k) = u(k-1) + g_0 [e(k) + a_1 e(k-1) + a_2 e(k-2)] + \frac{b_1}{b_0} [u(k-2) - u(k-1)]. \quad (4)$$

### 3 模型工程应用

#### 3.1 建立被控对象的传递函数

采用零阶保持器得到被控对象的差分方程, 利用递推最小二乘法进行参数辨识. 在参数已知的基础上, 导出最小相位系统自校正 PID 控制算法的极点配置控制规律, 并对控制算法进行数字仿真. 无论被控对象是线性系统还是非线性系统, 在其工作点附近可近似用二阶纯滞后环节的线性系统来描述, 因此温控对象一般采用二阶系统加纯滞后环节来描述<sup>[3]</sup>. 即:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (5)$$

为了实现电阻炉的温度控制, 首先要求该系统广义控制对象的数学模型. 将调节器调到手动, 断开反馈通道, 利用调压器给电阻炉输入电压  $U_0$ , 经过一定时间后, 炉温处于稳定, 记录稳态数据  $T(0) = 170^\circ\text{C}$ , 然后改变调压器的输出电压, 使  $U_1 = +\Delta U_0, \Delta U = 10\text{V}$ . 当炉温经过一定时间后又重新处于稳定状态, 记录稳态温度数据  $T(\infty) = 200^\circ\text{C}$ , 增益  $K = \frac{T(\infty) - T(0)}{\Delta u} = 3$ ,

根据阶跃响应曲线确定时间纯延迟  $\tau = 6\text{s}$ . 截去纯延迟部分并化为无量纲的阶跃响应  $y^*(t) = y(t)/Y(\infty)$  曲线. 将式(5)截去纯延迟并化为无量纲形式后, 对应的传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad T_1 \geq T_2, \quad (6)$$

与上式对应的阶跃响应为:

$$1 - y^*(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\nu T_1} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\nu T_2}. \quad (7)$$

根据式(7)可利用无量纲响应曲线图的 2 个数据点  $[t_1, y^*(t_1)]$  和  $[t_2, y^*(t_2)]$  确定参数  $T_1$  和  $T_2$ , 得到被控对象的传递函数:

$$G(s) = \frac{3e^{-6s}}{(20s + 1)(11s + 1)}. \quad (8)$$

采用带零阶保持器的广义对象脉冲传递函数推导法, 得离散模型:

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-7}(1.83 + 1.74z^{-1})}{1 - 1.87z^{-1} + 0.87z^{-2}}. \quad (9)$$

#### 3.2 模型参数辨识

在数字系统中, 采用带数字滤波器的 PID 控制器算法进行 Z 变换, 得 PID 调节器的离散模型<sup>[4]</sup>:

$$D(Z^{-1}) = \frac{0.19 - 1.87Z^{-1} + 0.87Z^{-2}}{(1 - Z^{-1})(1 - 1.74Z^{-1})}. \quad (10)$$

实现零极点对消后, 系统的开环脉冲传递函数:

$$W_k(Z)' = \frac{0.348Z^{-2}}{1 - Z^{-1}}, \quad (11)$$

式中:  $Z = e^{j\omega T}$ ,  $\omega$  为角频率,  $T$  为采样周期.

令  $\Omega = \omega T$ , 代入式(11), 得:

$$W_k(j\Omega) = \frac{-0.348je^{2.5\omega T}}{2\sin \frac{\omega T}{2}}, \quad (12)$$

式(12)开环频率特性的相角为<sup>[5]</sup>:

$$\angle W_k(j\omega T) = -\frac{\pi}{2} + 2.5\omega T. \quad (13)$$

若要使系统有  $60^\circ$  的稳定相位裕度, 则根据式(13), 相位裕度为:

$$r^3(\theta) = \pi + \angle W_k(j\omega T) = \pi/3. \quad (14)$$

自校正 PID 控制规律<sup>[6]</sup>:

$$u(k) = u(k-1) + 0.19[e(k) - 1.46e(k-1) + 0.53e(k-2)] + 0.95[u(k-2) - u(k-1)].$$

## 4 仿真研究

应用以上计算,针对前面的温控数学模型,用 Matlab6.5 进行仿真研究并整定 PID 参数.为了和常规 PID 算法进行比较,对常规 PID 算法进行了仿真研究,仿真曲线如图 3 所示.

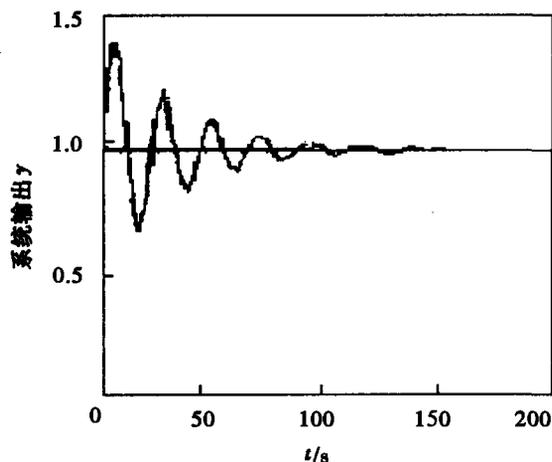


图3 常规 PID 输出仿真曲线

为了验证系统的抗干扰性,在控制系统输入中加入白噪声干扰,仿真结果如图 4 所示.

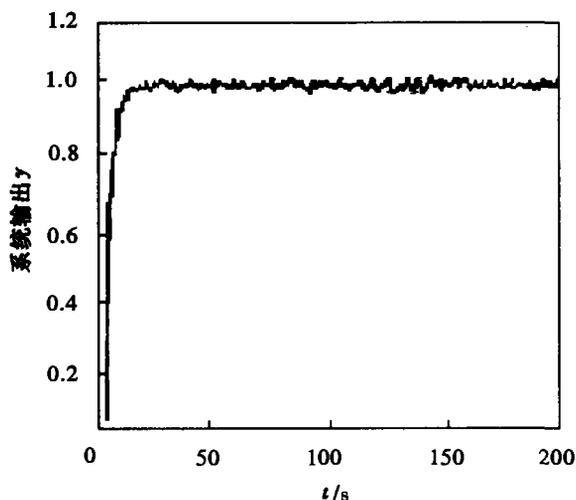


图4 加白噪声系统输出仿真曲线

基于最小相位系统自校正 PID 控制的零极点配置模型仿真结果如图 5 所示.仿真结果可知,系统控制的静差为 0,对外界干扰具有较好的适应性,其控制效果明显优于常规 PID 控制算法.该算法已成功应用某钢研所智能炉渣性能测试仪的温度控制单元,对 1300 °C

定值控温,控制余差为  $\pm 1$  °C.

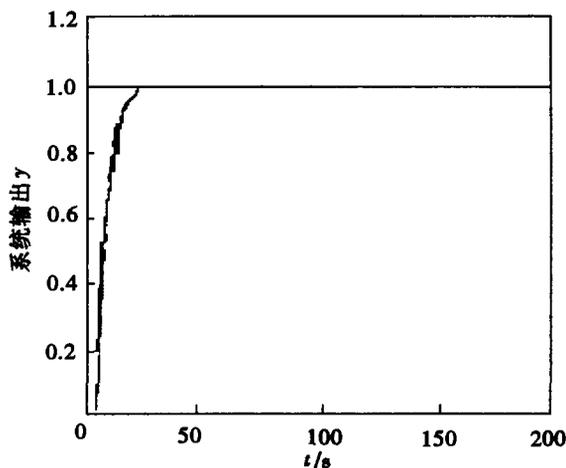


图5 自适应 PID 控制输出仿真曲线

## 5 结论

该系统已应用于某钢研所的炉渣性能测试系统发热元件的温度控制.仿真结果和工程应用表明,该控制算法具有如下特点:

- 1) 自校正调节在过程控制中的应用,提高了系统的自适应能力,能提高系统调节品质的综合指标.
- 2) 系统计算简单,收敛快,鲁棒性好.
- 3) 控制精度高(实际温度与设定的温度在  $\pm 1$  °C 范围之内).

## 参考文献:

- [1] 李平. 热处理电阻炉温度的自适应零极点配置控制[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(4): 405-407.
- [2] 黄显林,周建锁. 一个基于极点配置的自校正 PID 温度控制器[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(4): 70-73.
- [3] 盛占石,谭延良. 一种零极点配置自校正温度控制器的设计方法[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2000, 6(4): 61-64.
- [4] 单剑锋,杨立军. 极点配置自校正 PID 调节器[J]. 抚顺石油学院学报, 2002, 22(1): 59-62.
- [5] 陶永华,尹怡欣,葛芦生,等. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1998. 45-54.
- [6] 唐永哲. 自校正 PID 调节器的极点配置设计法[J]. 工业仪表与自动化装置, 1995, (1): 3-5.

## Modeling and Simulation Based on Pole-zero Placement Self-adaptive Temperature Control System

OUYANG Qi<sup>1,2</sup>, XIE Zhi-jiang<sup>2</sup>, WU Cheng-bo<sup>1</sup>, LIU Bu-gao<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Based on model parameters estimating, a kind of algorithm of pole-zero placement self-adaptive temperature control is put forward according to closed loop apices distribution of resistance furnace temperature control. The mathematic model is presented by discursion for the controlled object, at the same time, the algorithm is illustrated identification method of model parameters, compute formula and simulation result of controlled parameters. Simulations and practices of the model proved that the algorithm is of rapid constringency speed, satisfactory effect on the object with time changing especially for the controlled objects of the high current and low voltage characteristics. The algorithm has been applied in the temperature control of intelligent slag measurement equipment of a iron-steel graduate school.

**Key words:** system identification; pole-zero placement; resistance furnace; simulation

(编辑 李胜春)

(上接第 32 页)

表 1 环境试验设备不同校准方案性能对比表

校准方案	自动化程度	适用范围	可扩展性	经济性
手工校准	低	广	好	较好
专用校准	较高	窄	差	差
柔性校准	高	广	好	好

### 参考文献:

- [1] FLUKE CORPORATION. 校准——理论与实践[M]. 北京:中国计量出版社,2000. 16-18.
- [2] FLUKE CORPORATION. Fluke 2640A/2645A Net DAQ Users Manual[EB/CD]. Rev2. Fluke 2640A/2645A NetDAQ CD,1996.
- [3] JJF1101-2003 环境试验设备温度、湿度校准规范[S].
- [4] 马红武. 应用 Excel 处理生化过程数据(II)动力学方程参数估值[J]. 计算机与应用化学,1999,16(1):67-70.
- [5] DELBOY H. A Non-linear Fitting Program in Pharmacokinetics with Microsoft Excel Spreadsheet[J]. Int J Biomed Comput,1994,37(1):23-25.
- [6] 刘福君. 存储过程和 OLE 技术在报表设计中的应用[J]. 计算机与现代化,2003,21(3):73-75.
- [7] 于宏文. 在程序中利用 EXCEL 的模板和名字制作灵活和便于修改的报表[J]. 微型电脑应用,2002,18(7):58-59.
- [8] 罗泽文,罗钧,等. 利用 Excel 实现柔性测试校准系统[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):257-260.

## Flexible Field Calibration Solution of Environmental Test Equipment

LUO Jun, YANG Da-zhi, LIAO Hong-wei

(KEY Laboratory of Opto-electronic Technology under the State Ministry Education,

Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In accordance with the shortage on the application of the traditional calibration Solution of environmental test equipment, this paper proposes a solution of flexible field calibration, which can be applicable to all sorts of environmental test equipments widely. The frame of system hardware and software is presented firstly through the system requirement analysis, then the key matter -- flexible calibration is analyzed and expatiated more deeply. Through actual test, it is shown that the solution put forward in this paper have notable applied values and spread significances.

**Key words:** environmentd test equipment; flexible calibration; calibration template

(编辑 成孝义)