

# 活性炭焦油温度的 PID 自整定方法研究

杨 喆<sup>1</sup>, 虎恩典<sup>1</sup>, 刘甘露<sup>1</sup>, 杨志光<sup>1</sup>, 戎真真<sup>2</sup>

(1. 北方民族大学 电气信息工程学院, 银川 750021;

2. 北方民族大学 计算机科学与工程学院, 银川 750021)

**摘要:** 针对活性炭制备过程中焦油温度使用传统的 PID 人工整定耗时长、效率差、自动化程度低等问题, 设计了一种 PID 自整定方法; 利用基于 MATLAB 的描述函数法获取系统自持振荡的幅值和频率, 结合扩充临界比例度法, 通过调节非线性继电环节的滞环宽度和高度使系统在一定超调下快速性达到最优, 在 PLC 中编程实现; 经测试, 达到了预期的效果; 通过自整定, 改善了系统的调节速度, 提高了活性炭制备过程的自动化程度和生产效率, 对活性炭焦油温度的时滞系统 PID 自整定有着一定的应用价值。

**关键词:** 描述函数法; MATLAB; 活性炭; PID 自整定

## Research of PID Self-tuning Method of Tar Temperature in Activated Carbon

Yang Zhe<sup>1</sup>, Hu Endian<sup>1</sup>, Liu Ganlin<sup>1</sup>, Yang Zhiguang<sup>1</sup>, Rong Zhenzhen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, North University of Ethnicity, Yinchuan 750021, China;

2. School of computer science and Engineering, North University of Ethnicity, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** For the problems of time-consuming, low efficiency, low degree of automation using the traditional PID artificial tuning in the temperature of coal tar in the preparation of activated carbon, designed a PID self-tuning method. Using describing function method based on MATLAB to acquire system amplitude and frequency of self-sustained oscillation, combined with the expanded critical proportion degree method, by regulating hysteresis width and height of nonlinear relay link can make the system rapidly optimal under certain overshoot, programming and realization in PLC. After the test, the anticipated effect has achieved. Through the self-tuning, the adjusting speed of system has been improved, the automation and production efficiency of the preparation process of activated carbon has been improved, and has a certain application value in PID self-tuning in system with time delay of tar temperature in activated carbon.

**Keywords:** describing function method; MATLAB; activated carbon; PID self-tuning

## 0 引言

活性炭是一种高比表面积的炭质吸附材料, 应用面极其广泛, 其需求量呈逐年增高的趋势。混捏成型是活性炭制备过程中的一个工段, 要想使制备出的棒状炭料品质更好, 必须控制黏合剂焦油的温度。随着季节不同, 要求将焦油温度控制在 90~100℃, 使原料在搅拌箱内充分混合, 同时要保证焦油的流动性, 因为温度过高焦油太稀, 温度过低焦油凝固成块状, 均不适于捏合<sup>[1]</sup>。并且, 针对活性炭混捏成型的自动控制系统改造, 目的是将原先采用的人工操作以自动方式实现, 因此对于焦油温度, 除了采用传统的 PID 控制, 还需设计一个 PID 参数自整定, 来替代手动调整 PID 参数的人工经验方法, 从而提高整个控制系统的自动化程度。

目前工程应用的常规 PID 自整定方法很多, 包括 Z-N 经验公式、改进 Z-N、临界比例度、继电器反馈、PM 法等。本文 PID 自整定依据系统的数学模型, 采用控制理论中的描述函数法, 利用 MATLAB 图解法获取临界信息, 结合计算机控制技术中的扩充临界比例度法确定控制参数, 通过编程实现

PID 的自整定。

## 1 基于 MATLAB 的描述函数法

1940 年英国的 P. J. Daniel 提出了描述函数法, 即利用系统线性部分良好的低通滤波性能, 滤掉非线性产生的高次谐波, 仅用基波来近似描述其非线性特性。

非线性控制系统如图 1 所示, 图中  $N(X)$  为非线性部分的描述函数, 系统产生自持振荡的条件是  $G(j\omega) = -1/N(X)$ ,  $-1/N(X)$  称为描述函数的倒负特性<sup>[3]</sup>。

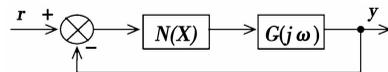


图 1 非线性控制系统结构图

可在复平面上绘出被控对象  $G(j\omega)$  的奈奎斯特曲线与  $-1/N(X)$  曲线, 根据其相对位置直观的判断非线性系统的稳定性及是否存在自激振荡。自持振荡的幅值和频率由交点处的  $-1/N(X)$  轨迹上的  $X$  值和  $G(j\omega)$  曲线上的  $\omega$  值来表示。但对于线性部分带有延迟环节的时滞系统, 在两曲线的交点处, 令  $G(j\omega)$  曲线的  $\varphi(\omega) = -180^\circ$  通常难以直接得到  $\omega$  的值, 从而难以得到系统自持振荡的幅值, 而利用数学工具 MATLAB, 通过图解法则可以直观便捷的使问题得到解决, 步骤如下:

1) 系统非线性部分  $N(X)$  选取一个带滞环的继电环节, 与标准继电相比, 其优点是能够克服测量噪声的影响<sup>[4]</sup>。描述

$$\text{函数 } N(X) = \frac{4M}{\pi X} e^{-j\arcsin \frac{h}{X}}, X \geq h$$

收稿日期: 2014-11-10; 修回日期: 2015-01-09。

**作者简介:** 杨 喆 (1989-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事电路与系统、计算机控制方向的研究。

**通讯作者:** 虎恩典 (1956-), 男, 河南密县人, 教授, 硕士生导师, 主要从事检测、机电系统自动控制、计算机控制等方向的研究。

$$\text{负倒特性} - \frac{1}{N(X)} = - \frac{\pi X}{4Me^{-j\arcsin \frac{h}{X}}}, X \geq h$$

式中,  $X$  为振荡幅值,  $h$  为滞环宽度的一半,  $M$  为滞环正输出。

2) 线性部分被控对象是焦油温度, 当焦油罐夹层通入蒸汽后, 其温度逐渐升高, 而大容量焦油罐存在一定的滞后时间; 另外用 Pt100 热电阻测量温度时, 温度信号转换为电信号具有一定的纯滞后; 其余环节均可视为比例环节。该系统近似为一个一阶惯性环节附加一个滞后环节, 其模型具有  $G(s) = \frac{k}{T_s + 1} e^{-\tau s}$  的形式<sup>[2]</sup>。利用工控机记录焦油温度飞升曲线法作大致估计, 得到线性部分的传递函数并转换到频域为  $G(j\omega) = \frac{1}{60j\omega + 1} e^{-30j\omega}$ 。

3) 利用 MATLAB 绘制  $G(j\omega)$  的奈奎斯特曲线与  $-1/N(X)$  曲线, 程序如下:

```
G=tf(1,[60 1]);
G.ioDelay=30;
nyquist(G)
hold
j=(-1)^(1/2);
h=input(' h=' );
M=input(' M=' );
X=h;0.001;100;
z=-pi * X ./ (4 * M * exp(-j * asin(h./X)));
plot(real(z),imag(z))
```

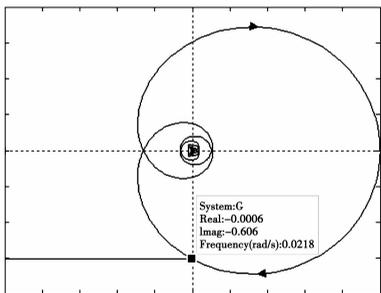


图 2  $h = 2, M = 2.6$  时  $G(j\omega)$  与  $-1/N(X)$  曲线

运行程序, 在命令窗口输入  $h$  和  $M$  的具体数值, 得到负倒特性曲线和奈奎斯特曲线绘制在同一坐标系中, 如图 2 所示, 改变  $h$  和  $M$ , 将使负倒特性曲线平行于负实轴上下移动。从图中读出  $G(j\omega)$  曲线与虚轴的交点坐标,  $\text{Im}: -0.606$ , 可知两曲线有交点的条件为  $\frac{\pi h}{4M} \leq 0.606$ 。

4) 任取一组满足上式关系时的  $h, M$  值:  $h = 2, M = 4$ , 此时  $G(j\omega)$  与  $-1/N(X)$  两曲线交于一点, 得到的图形相对于图 2,  $-1/N(X)$  曲线平行于负实轴向上移动了一段。可以判断此时两曲线交点处产生的自持振荡是稳定的, 读出交点频率  $\omega = 0.0329 \text{ rad/s}$ ; 由  $|-1/N(X)| = |G(j\omega)|$  可求得振荡幅值  $X = 2.3$ 。

5) 任取一组满足  $\frac{\pi h}{4M} = 0.606$  时的  $h, M$  值, 作为两曲线有交点的临界值:  $h = 2, M = 2.6$  (即图 2 的情形),  $G(j\omega)$  曲线与  $-1/N(X)$  轨迹的最右端交于一点  $(0, -j \frac{\pi h}{4M})$ , 是系统能产生自持振荡的临界点。在实际中考虑扰动, 为了能使系统

输出产生持续自持振荡, 应尽量选取  $\frac{\pi h}{4M} < 0.606$  时的  $h, M$  值。从图中读出振荡频率  $\omega = 0.0218 \text{ rad/s}$ , 此时振荡幅值  $X = h = 2$ 。

## 2 扩充临界比例度法整定 PID 参数

计算机控制系统中采样周期的选择因素很多, 在满足采样定理的前提下, 一般来说, 采样周期  $T$  选的小对于连续信号的保真是有利的。然而用不同的采样周期  $T$  对连续控制器  $D(s)$  离散化后的  $D(z)$  系数(零极点)是不同的, 计算机的量化效应直接受其影响<sup>[7]</sup>, 为了保证控制算法的实现, 采样周期  $T$  也不能选的太小, 因为可能使误差量的前后两次采样数据反映不出, 还可能使积分项不起作用。

考虑到采样周期的存在, PID 参数的整定采用扩充临界比例度法, 它是以模拟调节器中使用的临界比例度法为基础的一种 PID 数字控制其参数的整定方法。取  $h = 2, M = 2.6$ , 通过查整定参数表<sup>[6]</sup>, 求出  $T, K_P, T_I, T_D$  的值。

$$\text{临界振荡周期 } T_s = \frac{2\pi}{\omega} = 288 \text{ s. 临界振荡增益 } K_s =$$

$$|N(X)| = \frac{4M}{\pi X} = 1.66$$

$$\text{采样周期 } T = 0.014 T_s = 4 \text{ s, } K_P = 0.63 K_s = 1.05$$

$$T_I = 0.49 T_s = 141 \text{ s, } K_I = K_P T / T_I = 0.03$$

$$T_D = 0.14 T_s = 40.32 \text{ s, } K_D = K_P T_D / T = 10.6$$

在 MATLAB 中调用 Simulink 工具箱建立仿真<sup>[5]</sup> 如图 3 所示, 控制器采用上述  $K_P, K_I, K_D$  参数。

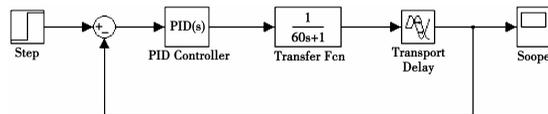


图 3 Simulink 仿真框图

在单位阶跃输入下的系统输出响应曲线如图 4 所示。

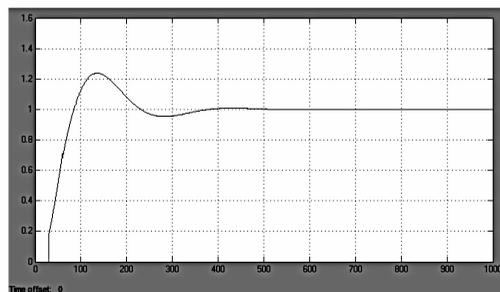


图 4 Simulink 输出响应曲线

可以看出系统输出超调 24%, 调节时间 341 s (偏离稳态值误差范围取 2%)。在满足两曲线有交点  $\frac{\pi h}{4M} \leq 0.606$  的前提下, 通过改变多组  $h, M$  值得到的 PID 参数进行仿真, 观察系统输出响应曲线, 在表 1 中列出部分具有代表性的数据, 得出以下结论:

在两曲线有交点的临界处 (图 2) 取任意一组  $h, M$ , 得到的  $K_s$  相等, 此时系统输出超调最小, 快速性最差; 调整  $h, M$ , 即  $h$  不变  $M$  逐渐增大或  $M$  不变  $h$  逐渐减小, 使  $-1/N(X)$  平行于负实轴向上移动, 会使  $K_s$  和超调逐渐增大, 而快速性逐渐变好。可见, 若限定超调范围让快速性达到最优, 那么令  $h$  不变  $M$  逐渐增大, 是可以实现的。

表 1 不同  $h$ 、 $M$  值对应的动态性能指标

$h$	$M$	$K_s$	超调 (%)	调节时间/s
2	2.6	1.66	24	341
1	1.3	1.66	24	341
2	3	1.86	25.5	321
2	4	2.2	30.7	287
1	2	2.2	30.7	287
1	2.6	2.49	34	265

### 3 自整定的 PLC 编程与实现

1) 编程思路: 利用基于 MATLAB 的图解法得到临界  $h$ 、 $M$ 、 $\omega$ 、 $T_s$ , 算出 PID 参数, 令系统 PID 运行, 不断增加  $M$  使  $y$  超调增大到给定超调, 由此时的  $h$ 、 $M$  得到快速性最优的 PID 参数, 主程序的流程图如图 5 所示。

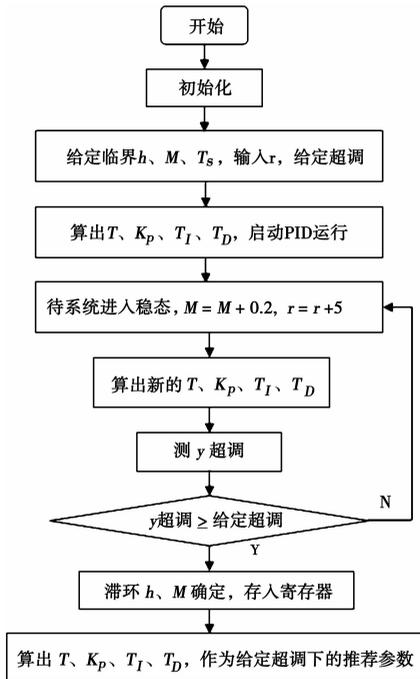


图 5 主程序流程图

与常规 PID 自整定相比, 这种方法在给定超调下使系统的快速性达到了最优, 在一定程度上提高了控制效果。另外本系统中对焦油的蒸汽加热和用传感器对温度的测量本身存在一定的滞后时间, 因此选择合适的  $h$ 、 $M$  使系统调节时间减少将有利于提高生产效率。

2) 将上述程序流程使用三菱的 FX<sub>2N</sub> 系列 PLC 编程实现<sup>[8]</sup>, PID 采用定时中断, 子程序包括计算  $T$ 、 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  子程序以及测  $y$  超调子程序, 另外程序中加入手动切换, 供操作人员手动修改 PID 参数。下面给出部分程序, 如图 6 所示。

3) 被控对象部分由焦油储罐温度传感器测得控制焦油温度的模拟量信息 (90~100 °C), 用 FX<sub>2N</sub> 的模拟量输入模块 FX<sub>2N</sub>-4AD-PT 将铂温度传感器 (PT100, 3 线, 100 Ω) 的输入信号放大, 并将数据转换成 12 位的数字量送给 CPU。模拟量输出模块 FX<sub>2N</sub>-2DA 完成数模转换, 利用其输出 0~10 V 电压信号控制焦油加热蒸汽管道的电磁阀。通过在学院过程控制实验室的 AE2000B 型实验台上, 利用锅炉内胆水温来模

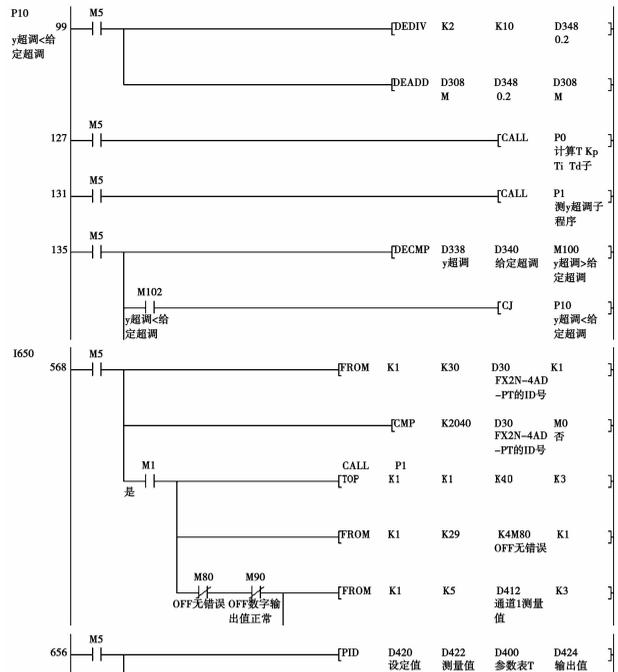


图 6 PLC 部分程序

拟现场焦油罐温度进行了 PID 自整定, 在 MCGS 组态软件上定义相关软元件建立与 FX<sub>2N</sub> 的连接, 经调试, 运行良好, 界面如图 7 所示。

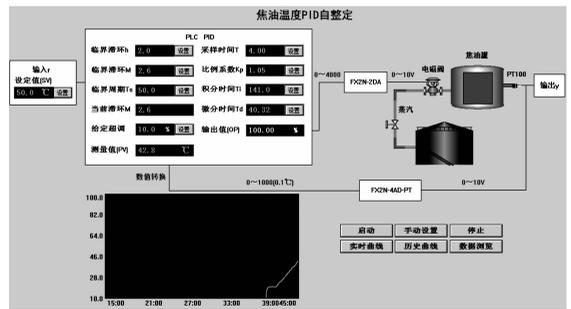


图 7 运行界面

4) 自整定过程: 将输入  $r$  设为 50 °C, 给定超调设为 10.0%,  $h$  设为 2,  $M$  设为 2.6, 按下启动键自整定开始, 程序自动计算出对应的 PID 参数, 锅炉水温逐渐上升。待测量值跟随设定值开始趋于平衡 (检测到  $y \leq r$  时), 程序中  $M$  增加 0.2,  $r$  增加 5 作为阶跃信号, 系统在新的 PID 参数下运行。此后测量值曲线每到波峰, 由程序计算出当前超调与给定超调对比, 并且在系统进入稳态时更新  $M$ 、 $r$  和系统的 PID 参数, 如图 8 所示。直到  $h = 2, M = 4.0, r = 85$  °C 时检测到超调 10.2% > 10.0%, 此时系统选取上一组  $h = 2, M = 3.8$  的参数作为推荐参数并在组态面板上显示:  $T = 2.77$  s,  $K_p = 1.36$ ,  $K_i = 0.039$ ,  $K_D = 13.6$ , 到此自整定结束。

5) 用以上自整定的 PID 推荐参数投入运行, 将设定值设为 50 °C, 待测量值稳定在 50 °C 后将设定值设为 60 °C, 观察此引起阶跃响应的过程参数。之后选取  $h = 2, M = 3$  的一组  $K_p = 1.17, K_i = 0.033, K_D = 11.7$ , 以及  $h = 2, M = 2.6$  的一组  $K_p = 1.05, K_i = 0.03, K_D = 10.6$  作为参照, 做同一试验, 如图 9 所示, 三者超调均小于 10.0%, 但  $h = 2, M = 3.8$  参数

(下转第 2426 页)