

# 自适应 Smith 预估极点配置自效正 PI 控制器\*

董秀成\*\* 杨光 雷霖

(四川工业学院 成都 610039)(华光集团 无锡 214000)(电子科技大学高能电子所 成都 610054)

**【摘要】** 对具有大惯性、大纯时延、变参数的过程控制对象,提出了一种带有自适应 Smith 预估的极点配置的自效正 PI 控制方案,以 10 t/h 链条炉作为控制对象,通过数字仿真,并与常规 PI 比较,证明了该方案比常规 PI 有更好的控制性能。

**关键词** 控制器; 链条炉; Smith 预估器; PI 控制

**中图分类号** TP273<sup>+</sup>.2

由于很多工业过程存在着纯时延,控制系统的设计比没有纯时延系统的设计要困难得多,对带有大纯时延的过程,这个问题更加突出。目前,用于解决大纯时延系统的控制方法主要有预估控制法、最优控制法、自适应控制法和有限谱配置法等,其中预估控制法应用最广。

PID(比例、积分、微分)调节器在工业过程中得到了广泛应用,这是因为 PID 的控制原理简单,且有较强的适应性。对线性时不变系统,只要适当地调整参数,一般能够获得比较满意的控制性能。然而在工业领域中存在着大量带有纯时延的时变过程,一组按过程模型某些参数整定好的 PID 调节器并不能适应整个过程变化的需要,往往导致控制性能的下降,而且整定参数需较长的时间<sup>[1]</sup>。

自适应控制与 PID 调节器相结合,形成了自适应或自效正 PID 控制技术,能够自动辨识被控过程参数、自动整定控制器参数、适应被控过程参数的变化,而且具有常规 PID 调节器原理简单、鲁棒性较强等特点。

极点配置自适应控制算法由 Wellstard 等人提出,继后经 Astrom 和 Wittenmark 等人研究和改进,成为自适应控制中的一个重要组成部分。Isermann 提出极点配置自效正 PID 控制算法, Wittenmark 作了深入地研究,其基本原理是:系统闭环传递函数的分母多项式与根据性能指标设计的多项式相等,可以计算出 PID 中参数值<sup>[2-4]</sup>。

## 1 Smith 预估控制器

O.J.M.Smith 提出的预估器从理论上成功地解决了纯时延系统的设计问题。人们称这种控制器为 Smith 预估器(简称 SP)。这种方法是利用过程的数学模型以内反馈方式包围常规的控制(如 PI, PID),构成 Smith 预估控制器。离散形式的 Smith 预估控制器如图 1 所示。其中  $G_c(Z)$  是常规控制器,  $G(Z)Z^{-d}$  是过程的脉冲传递函数,  $d$  是纯时延,  $G'(Z)(1-Z^{-d})$  是 Smith 预估算式,当  $G'(Z)=G(Z)$ ,  $d=d$  时,系统的闭环传递函数为

$$\frac{G_c(Z)G(Z)Z^{-d}}{1+G_c(Z)G(Z)}$$

由于  $Z^{-d}$  不出现在闭环传递函数的分母中,只是输出部分延时  $d$ ,这样,一个纯时延系统的设计已转化为无纯时延系统的设计。

从理论上分析 Smith 预估,可以得出如下的结论: 1) 时延系统的设计可转化为无时延系统的设计; 2) 当  $G_c(Z)$  中有积分作用时,系统无论对系统的参考输入还是外扰输入的稳态误差都为零; 3) 可以采用一般工程实用系统的品质指标; 4) 要求有一个精确描述过程的数学模型,否则由于过程参数与 Smith 预估算式的参数不匹配,导致闭环系统性能下降,甚至会出现不稳定。

1999年7月4日收稿

\* 四川省重点科研基金资助项目

\*\* 男 36岁 硕士 副教授

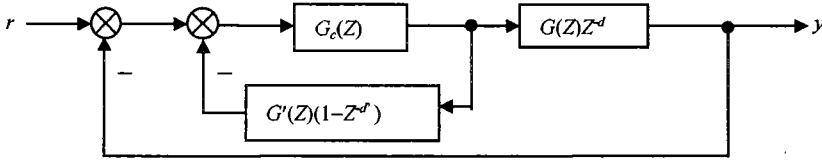


图1 离散 Smith 预估控制框图

## 2 常规 PID 控制器

连续常规 PID 控制器可描述为

$$U(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中  $K_p$  为增益系数;  $T_i$  为积分时间;  $T_d$  为微分时间;  $U(t)$  是控制器的输出;  $e(t)$  是控制器的输入, 也是偏差。

对小采样周期  $T_0$ , 可以用一阶差分代替式(1)中的导数, 用矩形求和代替连续积分, 得到离散时间的常规 PID 控制器, 称为 PID 的位置算法, 如

$$U(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2)$$

可以容易地推出

$$U(k) = U(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (3)$$

$$\text{式中 } q_0 = K_p \left( 1 + \frac{T_0}{T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) \quad q_1 = -K_p \left( 1 + 2 \frac{T_d}{T_0} \right) \quad q_2 = K_p \frac{T_d}{T_0}$$

在实时控制中, 式(3)所描述的离散 PID 算法应用更为方便, 其脉冲传递函数为

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (4)$$

对大采样周期, 如果用式(4)作为控制算式, 那么只需满足  $q_0 > 0$ ,  $q_0 > q_2 > -(q_0 + q_1)$ ,  $q_0 + q_1 < 0$ , 就能保证具有 PID 性质。

如果  $q_2 = 0$ , 可得到 PI 控制器的脉冲传递函数为

$$G_R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (5)$$

式中  $q_0$  和  $q_1$  必须满足  $q_0 > 0$ ,  $q_0 + q_1 > 0$ 。

## 3 自适应 Smith 极点配置自校正 PI 控制器原理及特点

设图 1 中的脉冲传递函数为

$$\begin{cases} G_c(z) = (q_0 + q_1 Z^{-1}) / (1 - Z^{-1}) \\ G(z) = bZ^{-1} / (1 + aZ^{-1}) \\ G'(Z) = G(Z) \quad d' = d \end{cases} \quad (6)$$

则系统的闭环特征方程为

$$1 + (a + q_0 b - 1)Z^{-1} + (q_1 b - a)Z^{-2} = 0 \quad (7)$$

设所需的闭环特征方程为

$$1 + P_1 Z^{-1} + P_2 Z^{-2} = 0 \quad (8)$$

式中  $P_1$  和  $P_2$  是给定参数。令式(7)与式(8)相等, 可以确定 PI 中的参数

$$\begin{cases} q_0 = (P_1 + 1 - a) / b \\ q_1 = (P_2 + a) / b \end{cases} \quad (9)$$

式中  $P_1 = -2e^{-\xi\omega_n T} \cos(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} T)$ ,  $P_2 = e^{-2\xi\omega_n T}$ ;  $\omega_n$  和  $\xi$  分别是二阶连续系统传递函数  $\frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2}$  ( $0 < \xi < 1$ ) 的自然频率和阻尼比;  $T$  是采样周期。这样可以按照连续二阶系统近似的确定离散系统的闭环极点, 并且可以按所期望的指标确定。

自适应 Smith 预估极点配置自校正 PI 控制器通过辨识过程模型参数和纯时延, 得到  $a, b, c$  的估计值  $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$ , 用来修正 Smith 预估算式和极点配置 PI 算式, 使得 Smith 预估算式和 PI 控制算式中的参数  $q_0$  和  $q_1$  为

$$\begin{cases} G'(Z) = \hat{b}z^{-1} / (1 + \hat{a}z^{-1}) \\ d' = \hat{d} \\ q_0 = (P_1 + 1 - \hat{a}) / \hat{b} \\ q_1 = (P_2 + \hat{a}) / \hat{b} \end{cases} \quad (10)$$

其优点是不会因为 Smith 预估算式与过程模型参数不匹配造成系统控制性能下降, 根据设置 PI 中的参数, 能够适应过程模型参数经常变化的被控对象。

### 4 控制方案的数字仿真及结果分析

以 10 t/h 链条炉作为研究对象, 测得燃烧过程的连续动态数学模型如图 2 所示, 其数学模型作为设计控制方案和数字仿真的依据。  $x_1$  和  $x_2$  表示给煤和送风,  $y_1$  和  $y_2$  表示蒸汽压力和烟气含氧,  $f_1$  是蒸汽负荷扰动<sup>[5]</sup>。对该连续数学模型进行 Z 变换, 可得到锅炉燃烧过程的近似离散数学模型为

$$(1 - 0.974Z^{-1})y_1(k) = 0.011 6Z^{-1}x_1(k-9) + 0.011 7Z^{-1}x_2(k-5) + 0.024 4Z^{-1}f_1(k-2) \quad (11)$$

$$(1 - 0.904 8Z^{-1})y_2(k) = 0.036 3Z^{-1}x_1(k-6) + 0.095 2Z^{-1}x_2(k-4) \quad (12)$$

式(11)和式(12)的采样周期分别为 20 s 和 0.5 s。

以图 2 所示模型作为数字仿真对象, 在微型计算机上进行数字仿真。为了进行分析比较, 特选取 PI、带 Smith 预估的极点配置 PI (SPAPI) 和自适应 Smith 预估的极点配置 PI (ASPAPI), 分别与该模型组成控制系统进行仿真。

用  $G_{mp}(S)$  表示给煤-蒸汽压力通道的传递函数。当  $G_{mp}(S) = 0.448e^{-180S} / (1 + 760S)$  时, 由于燃煤种类、质量等变化引起燃烧过程模型参数发生变化, 即  $G_{mp}(S)$  从  $0.448e^{-180S} / (1 + 760S)$  到  $0.537 6e^{-220S} / (1 + 608S)$  时, 其仿真结果如表 1 所示。

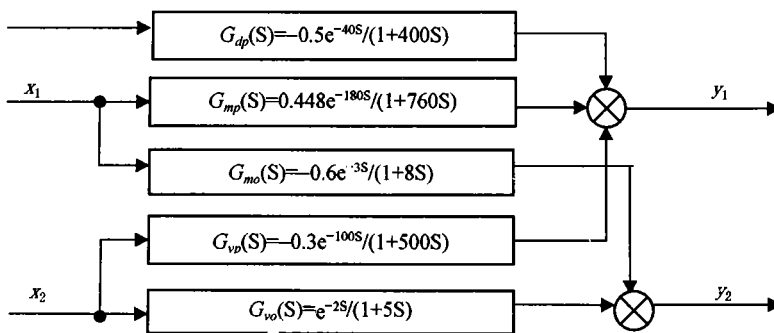


图 2 锅炉燃烧对象数学模型

表 1 蒸汽压力给定值单位阶跃响应性能指标比较

方案	动态指标		静态指标	动态指标		静态指标	动态指标		静态指标
	超调	调节时间	稳态误差	超调	调节时间	稳态误差	超调	调节时间	稳态误差
	$\delta\%$	$t_s/s$		$\delta\%$	$t_s/s$		$\delta\%$	$t_s/s$	
PI	17	1 200	0	70	>2 000	0	30	1 400	0
SPAP I	17	480	0	100	>2 000	0	50	1 000	0
ASPA PI	18	460	0	17	500	0	18	480	0
模型	$0.448e^{-180s}/1+760S$			$0.5376e^{-220s}/1+608S$			$0.448e^{-220s}/1+760S$		

仿真结果表明：在超调量基本相同的情况下，SPAPI 和 ASPAPI 的调节时间大大少于 PI 的调节时间。由此说明，加入 Smith 预估能够缩短调节时间。由于模型参数的变化，按原来模型整定的常规 PI 控制器和 SPAPI 控制器的性能变差，而 ASPAPI 的控制性能良好。这是由于，ASPAPI 系统采用了过程辨识技术，依靠辨识过程模型参数来修正控制器的参数，具有自适应能力。ASPAPI 系统采用了纯时延辨识方法，当纯时延发生变化后，能够很快地辨识出纯时延，系统的控制性能几乎不受纯时延变化的影响。

### 参 考 文 献

- 1 王月娟, 万百五. 大纯时延过程的控制方法. 控制理论与应用, 1986, 3(3): 23~26
- 2 蒋新华. 自适应 PID 控制. 信息与控制. 1988, 6(5): 22~27
- 3 Woack Amin. Application of the multi-output one-step-ahead adaptive controller to a power plant boiler. Proc of Acc IEEE, 1985, 20(3): 133~139
- 4 Anakna W K N. Boiler plant control using a minimum order dynamic pole placement compensator. IEEE Trans-IE, 1988, 35(1): 253~258
- 5 启 敏. 实用工业锅炉自动控制概论. 自动化仪表, 1984, 6(3): 6~10

## Controller of Pole Assignment Self-tuning PI with Adaptive Smith Predictor

Dong Xiucheng

(Sichuan University of Science and Technology Chengdu 610039)

Yang Guang

(Hua Guang Group Wuxi 214000)

Lei Lin

(Inst. of High Energy Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper develops the control schemes of pole assignment self-tuning PI with adaptive Smith predictor to control the object of large dead-time and varying parameter. It is simulated with a 10 t/h chain boiler model. The results show that it has much better control performances than normal PI.

**Key words** controller; chain boiler; Smith predictor; PI control