

具有未知或时变纯滞后过程的极点配置自校正PID控制算法

吴献春 王士杰

(中国纺织大学自动化系, 上海)

摘 要

本文在用广义模型描述被控过程的基础上, 提出了一种适合未知或时变纯滞后过程的极点配置PID自校正自适应控制算法。该算法兼有PID和自校正控制的特点。仿真结果表明这种广义模型和算法对描述和在线控制具有未知或时变纯滞后过程是非常有效的。

一、问题的提出

控制理论在过去几十年中, 取得了很大进展。然而, 在工业过程控制领域, 常规PID控制仍起着主导作用^[1]。与此同时, 自校正控制引起了人们广泛的兴趣^[2]。可是对未知或时变纯滞后过程的辨识和控制一直是一个棘手的问题^[1]。Wittemark和Kurz已经证明, 如果模型与过程的纯滞后不一致, 闭环系统可能变为不稳定。针对这一情况, 文中提出了一种以广义二阶加纯滞后为模型, 适合具有未知或时变纯滞后过程的极点配置自校正PID自适应控制算法。它兼有PID和自校正算法的优点。

二、PID自校正控制算法

在文献[3]假定过程纯滞后 d 为已知常数的控制算法基础上, 笔者把被控过程表示成二阶广义模型

$$A(z)y(k) = B^*(z)u(k) + \varepsilon(k), \quad (1)$$

式中, $A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}$, $B^*(z) = b_{d_{\min}+1}^* z^{-(d_{\min}+1)} + b_{d_{\min}+2}^* z^{-(d_{\min}+2)} + \dots + b_{d_{\max}+2}^* z^{-(d_{\max}+2)}$, $u(k), y(k)$ 分别为被控过程的输入和输出, $\varepsilon(k)$ 为噪声。 $d_{\min}$, $d_{\max}$ 分别为过程纯滞后变化的上限和下限, 且有 $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ 。同时假定 $A(z)$ 的零点在单位圆内, 且 $A(z)$, $B^*(z)$ 无公因子。

与连续PID算法相对应的离散型表示为^[4]

$$G_c'(z) = \frac{p_0 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{P(z)}{1 - z^{-1}}. \quad (2)$$

为使极点配置简单, 取 $P(z) = p_0 A(z) = p_0 + p_0 a_1 z^{-1} + p_0 a_2 z^{-2}$.

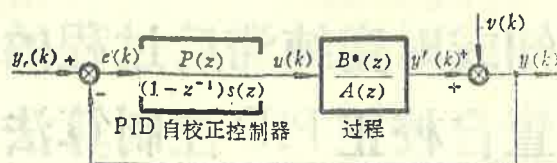


图 1 闭环系统框图

自校正 PID 控制器由式 (2) 表示的 PID 算式和一个滤波器 $\frac{1}{S(z)}$ 串联而成。 $S(z)$ 是为保证闭环极点可任意配置和闭环可辨识而引入的^[5]。系统框图如图 1 所示。闭环传递函数为

$$G(z) = \frac{Y(z)}{Y_r(z)} = \frac{p_0 B^*(z)}{(1-z^{-1})S(z) + p_0 B^*(z)}. \quad (3)$$

令 $[(1-z^{-1})S(z) + p_0 B^*(z)]$ 等于希望的闭环传递函数的分母多项式

$$(1-z^{-1})S(z) + p_0 B^*(z) = 1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}, \quad (4)$$

$$\text{式中, } S(z) = 1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_{d_{\max}+1} z^{-(d_{\max}+1)}. \quad (5)$$

由图 1 和式 (5), 控制作用 $u(k)$ 可计算得到

$$u(k) = (1-s_1)u(k-1) + (s_1-s_2)u(k-2) + \dots + (s_{d_{\max}} - s_{d_{\max}+1})u(k-d_{\max}-1) \\ + s_{d_{\max}+1}u(k-d_{\max}-2) + p_0 e(k) + p_1 e(k-1) + p_2 e(k-2). \quad (6)$$

由式 (3)、(4) 得到闭环传递函数为

$$G(z) = \frac{1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}}{\sum_{i=d_{\min}+1}^{d_{\max}+2} b_i^*} \cdot \frac{B^*(z)}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}}. \quad (7)$$

从而达到了极点任意配置的目的。同时由式 (4)、(5) 可获得式 (6) 的各系数, 这为计算 $u(k)$ 提供了方便。表 1 是当 $d_{\min} = 0$, $d_{\max} = 2$ 时 ($d_{\min}$, $d_{\max}$ 为其它值时类推) 各系数的值。由表 1

表 1 模型参数 $a_1, a_2, b_i^*, \alpha_1, \alpha_2$ 与 p_0, s_i 的关系 ($d_{\min} = 0, d_{\max} = 2$)

p_0	$1-s_1$	s_1-s_2	s_2-s_3	s_3
$(1+d_1+d_2)/(b_1^*+b_2^*+b_3^*+b_4^*)$	$p_0 b_1^* - \alpha_1$	$p_0 b_2^* - \alpha_2$	$p_0 b_3^*$	$p_0 b_4^*$

$$\text{得到 } u(k) = (p_0 b_1^* - \alpha_1)u(k-1) + (p_0 b_2^* - \alpha_2)u(k-2) + p_0 b_3^* u(k-3) + p_0 b_4^* u(k-4) \\ + p_0 e(k) + p_0 a_1 e(k-1) + p_0 a_2 e(k-2), \quad (8)$$

控制算法的计算步骤为:

1) 根据被控对象的纯滞后变化范围给定 $d_{\min}$, $d_{\max}$, 然后用递推最小二乘法在线估计参数 a_1 , a_2 , $b_{d_{\min}+1}^*$, $\dots$, $b_{d_{\max}+2}^*$. 若 $\varepsilon(k)$ 不是白噪声, 用广义最小二乘法辨识上述参数^[5].

递推最小二乘法为^[5]

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + P(k) x(k+1) [\lambda + x^T(k+1) P(k) x(k+1)]^{-1} [y(k+1) - x^T(k+1) \hat{\theta}(k)], \quad (9a)$$

$$P(k+1) = \{P(k) - P(k) x(k+1) x^T(k+1) P(k) [\lambda + x^T(k+1) P(k) x(k+1)]^{-1}\} / \lambda, \quad (9b)$$

式中, $\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \hat{b}_{d_{\min}+1}^*, \hat{b}_{d_{\min}+2}^*, \dots, \hat{b}_{d_{\max}+2}^*]^T$,

$$x(k+1) = [-y(k), -y(k-1), u(k-d_{\min}), u(k-d_{\min}-1), \dots, u(k-d_{\max}-1)]^T,$$

λ 为指数遗忘因子, 一般取 $0.90 \sim 0.99$.

2) 用1) 步中参数估计值 $\hat{a}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_{d_{\min}+1}^*$, $\dots$, $\hat{b}_{d_{\max}+2}^*$ 代替其真值利用类似表1中的表达式计算式(6)的各系数.

3) 用2) 步中的结果代入(6), 即得到控制作用 $u(k)$.

上述1)、2)、3) 步骤每个采样周期重复一次.

当过程的纯滞后时间为常数 d 时, 且当采样步数 $K \rightarrow \infty$ 时,

有 $\hat{b}_i^* \rightarrow 0, i = d_{\min} + 1, d_{\min} + 2, \dots, d$

$$\hat{b}_j^* \rightarrow b_{j-d}, j = d+1, d+2$$

$$b_l^* \rightarrow 0, l = d+3, d+4, \dots, d_{\max} + 2.$$

即当 $K \rightarrow \infty$ 时, $B^*(z) \rightarrow z^{-d} B(z)$, 且 $\hat{b}_i^* (i = d_{\min} + 1, \dots, d)$ 和 $\hat{b}_l^* (l = d+3, \dots, d_{\max} + 2)$

与 $\hat{b}_j^* (j = d+1, d+2)$ 相比要小得多. 这里 $B(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}$. 从而说明用广义模型式(1)表示一类时变或未知纯滞后对象是合适的, 且文献[3]中的算法是此算法的特例.

关于 α_1 、 α_2 的选取, 可通过对选取对应连续系统的阻尼比 ξ 和自然角频率 ω_n 进行(对连续系统离散化后得到):

$$\alpha_1 = -2e^{-\xi\omega_n T_s} \cos(\omega_n T_s \sqrt{1-\xi^2}), \quad (10a)$$

$$\alpha_2 = e^{-2\xi\omega_n T_s}, \quad (10b)$$

式中, T_s 为采样周期. α_1 和 α_2 的选取对系统的动态响应及参数辨识的收敛速度有一定影响, 因此 α_1 , α_2 也可通过仿真试验获得.

三、仿 真 试 验

根据上面提出的控制算法, 对不同过程进行了仿真, 仿真结果证实了这种算法是行之有效的。下面把对过程

$$y(k) - 1.5y(k-1) + 0.7y(k-2) = 1.0u(k-d-1) + 0.5u(k-d-2) + \varepsilon(k). \quad (11)$$

进行数字仿真结果叙述如下。上式中假定 $\{\varepsilon(k)\} \sim N(0, 0.1)$, 且为白噪声, d 是时变的, 取值为 0, 1。

对应式 (11) 的广义模型选取为

$$y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) = b_1^*u(k-1) + b_2^*u(k-2) + b_3^*u(k-3) + \varepsilon(k), \quad (12)$$

其中, $A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}$, $B^*(z) = b_1^*z^{-1} + b_2^*z^{-2} + b_3^*z^{-3}$, $d_{\min} = 0$, $d_{\max} = 1$ 。

对式 (11) 表示的过程, 用式 (12) 的广义模型, 在 IBM-PC/XT 计算机上进行了数字仿真, 仿真结果如图 2 所示, 仿真结果与理论推导完全吻合, 每一次的计算时间在 300ms 以内。

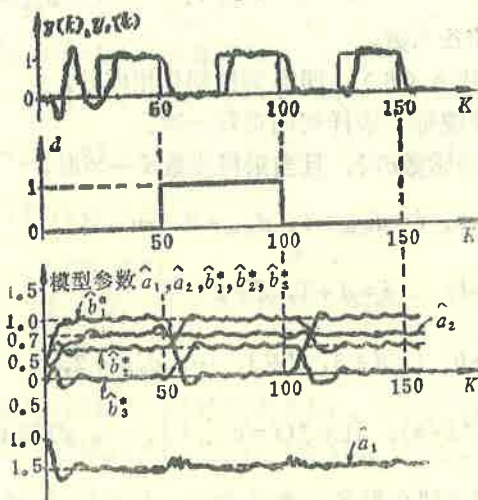


图 2 自校正PID极点配置调节器仿真结果

(取 $\lambda = 0.98$, $\xi = 0.707$, $\omega_n = 0.34$, $T_s = 1.0$)

四、结 论

本文提出的极点配置自校正PID自适应算法, 对在线控制未知或时变纯滞后、时变参数过程尤为有效。它的结构简单, 在操作人员对过程不甚了解的情况下, 也能方便使用。因此这种自适应算法有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Kurz, H. and W. Goedecke, Digital Parameter—Adaptive Control of Process with Unknown Dead-time, Automatica, 17: 1, (1981), 245—255.
- [2] Åstrom, K. J. and B. Wittemark, Theory and Applications of Self-tuning Regulator, 13:1, (1977), 457—476.
- [3] 王伟, 自校正PID算法, 中国研究生首届计算机及其应用学术会议文集, 中国计算机学会与北京工业学院, 北京, (1984), 402—402.
- [4] R. Iserman 著, 王振淮等译, 数字调节系统, 机械工业出版社, 北京, (1983), 63—67.
- [5] 韩曾晋, 自适应控制系统, 机械工业出版社, 北京, (1982), 49—54, 104—107, 116—117.

Pole Assignment Self-tuning PID Control Algorithm for Process with Unknown or Time-varying Time Delay

Wu Xianchun, Wang Shijie

(Department of Automation, China Textile University, Shanghai)

Abstract

In this paper, Simultaneous estimation of process parameter and process time delay is achieved by applying a general model. On this base, pole assignment self-tuning PID control algorithm that adapted for the process with unknown or time-varying time delay is proposed. The algorithm has not only PID control features, but also self-tuning control features. Simulation results indicate that the general model and algorithm are very effective in on-line identification and control,