

自校正预估PID控制器

罗宗虔 戴劲

(华中工学院自控系, 武汉)

摘 要

本文将 Clarke 和 Gawthrop^[2]提出的自校正 k 步前向预估器代替 Smith 预估控制器, 导出自校正预估 PID 控制器算法, 并通过仿真实验验证了算法的有效性。

一、引 言

PID 控制器仍然是目前最广泛的一种控制器。但是, 对于具有纯滞后的工业过程, 常规 PID 控制器则显得软弱无力。1959 年 Smith^[1] 提出了一种预估控制器, 使控制品质有很大提高。但是, 这种方法要求对过程模型有精确的了解且是确定的。这个条件对工业过程过于苛刻, 因而难于应用。1975 年 Clake 和 Gawthrop 提出的自校正控制器, 具有控制随机扰动、参数时变和时滞的能力, 然而, 算法中的权多项式 P 、 Q 、 R 的选择很棘手, 鲁棒性也不太强。本文从研究 Smith 预估器入手, 将 Clarke 和 Gawthrop 的 k 步前向预估器引入其中, 并把 PID 和自校正控制的各自的优点结合起来导出了一种能控制滞后的自校正预估 PID 控制器算法。仿真结果表明, 这种算法不但克服了 Smith 预估器和自校正控制器的不足, 而且保留了控制随机扰动、参数时变和时滞的能力。

二、 k 步前向预估器

Clarke 和 Gawthrop 在推导自校正控制器时, 导出了 k 步前向预估器。现简述如下:

考虑用一个 CARMA 模型描述的对象

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-h}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})\xi(t) + d, \quad (1)$$

其中 $\xi(t)$ 是独立随机变量, d 表示恒值干扰项, $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$, $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$, $b_0 \neq 0$, $C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_rz^{-r}$, z^{-1} 是后移算子且假定 $C(z^{-1})$ 的根在 z 平面的单位圆内。

利用恒等式

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-h}F(z^{-1}), \quad (2)$$

则可得 k 步前向预估器

$$C(z^{-1})y^*(t+k/t) = E(z^{-1})B(z^{-1})u(t) + F(z^{-1})y(t) + E(1)d. \quad (3)$$

假定 $C(z^{-1}) = 1$, 令 $G = E(z^{-1})B(z^{-1})$, 则可得

$$y^*(t+k/t) = Gu(t) + Fy(t) + rd, \tag{4}$$

预估模型为

$$y(t+k) = Gu(t) + Fy(t) + rd + E\xi(t+k), \tag{5}$$

其中 $E \triangleq E(z^{-1})$ 为 $k-1$ 阶多项式, $F \triangleq F(z^{-1})$ 为 $n-1$ 阶多项式, $G \triangleq G(z^{-1})$ 为 $m+k-1$ 阶多项式 $r = E(1)$.

三、自校正预估PID控制器算法

我们先看 Smith 预估器是怎样工作的。图 1 中对象具有 k 步滞后, L 是常规控制器

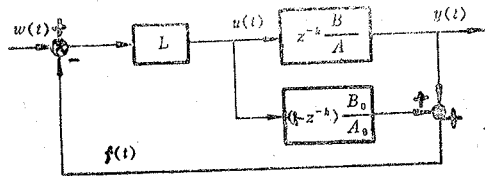


图 1 Smith 预估制控制器原理图

$$f(t) = (1 - z^{-k}) \frac{B_0}{A_0} u(t) + z^{-k} \frac{B}{A} u(t). \tag{6}$$

若 $A_0 = A, B_0 = B$, 则 $f(t) = \frac{B}{A} u(t)$ 不含滞后因子, 这相当于 $u(t)$ 直接通过一个消除了滞后的对象。从另一角度来考虑, 那就意味着 $f(t)$ 是对 $y(t)$ 的 k 步前向估计。据此, 将 Clarke 和 Gawthrop 的 k 步前向预估器引入, 便有

$$y^*(t+k/t) = f(t) = y(t) + (1 - z^{-k}) \frac{B_0}{A_0} u(t), \tag{7}$$

控制量 $u(t)$ 可写成

$$u(t) = L(w(t) - f(t)) = L(w(t) - y^*(t+k/t)). \tag{8}$$

根据 (4) 式和 (8) 式便可得到自校正预估控制器如图 2 所示。

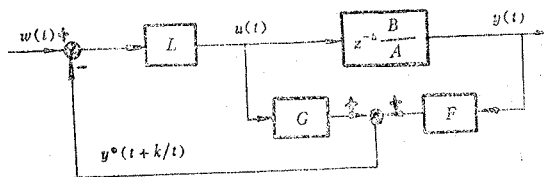


图 2 自校正预估控制器原理图

比较图 1 和图 2 我们可以看出, 当过程参数发生变化即 $A_0 \neq A, B_0 \neq B$, 或存在随机扰动时, 则 Smith 预估控制器将不能正常工作。而用 $y^*(t+k/t)$ 代替 $f(t)$ 后, 由于能得到很好的估计值, 使控制器保持最佳状态。

选择 L 为 PID 控制, 便可得到具有 PID 结构的预估控制器。我们知道, 常规 PID

可表为

$$\begin{aligned} u(t) &= u(t-1) + K_C[e(t) - e(t-1)] + K_I e(t) \\ &\quad + K_D[e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \\ &= u(t-1) + K_1 e(t) + K_2 e(t-1) + K_3 e(t-2), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $K_1 = (K_C + K_I + K_D)$, $K_2 = K_C + 2K_D$, $K_3 = K_D$, K_C 是比例系数, $K_I = \frac{K_C T}{T_I}$ 是

积分系数, $K_D = \frac{K_C T_D}{T}$ 是微分系数, T 是采样周期。

根据图 2 我们可得

$$u(t) = L(w(t) - y^*(t+k/t)) = \frac{L(w(t) - Fy(t))}{1 + LG}. \quad (10)$$

令 $e(t) \triangleq w(t) - Fy(t) - Gu(t),$ (11)

$$G \triangleq g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{m+k-1} z^{-m-k+1} = g_0 + z^{-1} G'(z^{-1}), \quad (12)$$

则 $e(t) = w(t) - Fy(t) - G'(z^{-1})u(t-1) - g_0 u(t) = e'(t) - g_0 u(t),$ (13)

其中 $\begin{cases} e'(t) = w(t) - Fy(t) - G'(z^{-1})u(t-1), \\ G(z^{-1}) = g_1 + g_2 z^{-1} + \dots + g_{m+k-2} z^{-m-k+2}. \end{cases}$ (14)

将 (13) 代入 (9) 经整理后得自校正预估 PID 控制律:

$$u(t) = \frac{u(t-1) + K_1 e'(t) + K_2 e(t-1) + K_3 e(t-2)}{1 + K_1 g_0}. \quad (15)$$

现将自校正预估 PID 算法步骤归纳如下:

- 1) 由预估模型 (5) 式辨识多项式 $F(z^{-1})$ 、 $G(z^{-1})$ 的参数;
- 2) 由 (13)、(14) 式可求得 $e'(t)$, $e(t-1)$, $e(t-2)$;
- 3) 按 (15) 求 $u(t)$;
- 4) 回到 1) 重复进行。

四、仿真结果

为了验证上述算法的正确性, 作者在 Apple-II 上作了仿真实验。现以其中两种对象来说明。

对象 I: $y(t) = 1.5y(t-1) - 0.7y(t-2) + u(t-2) + 0.5u(t-3) + \xi(t)$, 是最小相位系统。

对象 II: $y(t) = 0.618y(t-1) + 0.36y(t-2) + 0.09u(t-2) + 0.1166u(t-3) + \xi(t)$, 是非最小相位系统。

设 PID 参数选为 $K_1 = 0.9$, $K_2 = 0.7$, $K_3 = 1.3$, 参考输入是周期为 100 步的方波。图 3 是对象 I 的参数辨识情况, 图 4 是对象 I 的控制情况, 图 5 是对象 II 的控制情况。从图中可看出, 在辨识参数未收敛前的 5~10 个采样周期, $u(t)$ 和 $y(t)$ 均有大幅

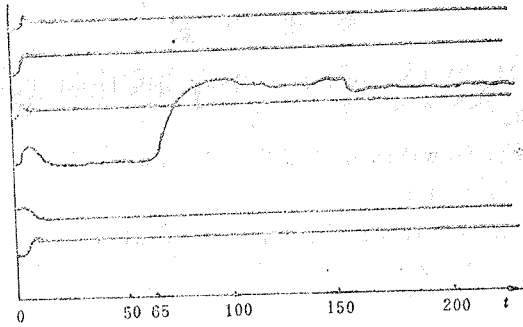


图 3 F、G 的六个参数的辨识

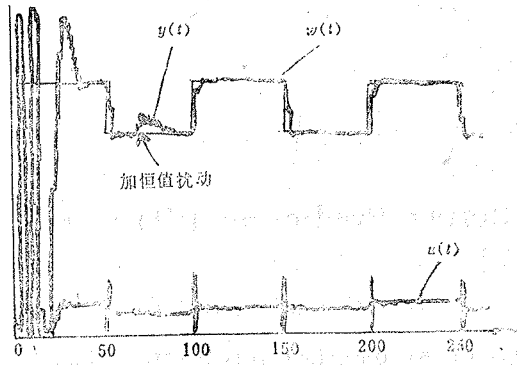


图 4 对象 I 的响应曲线

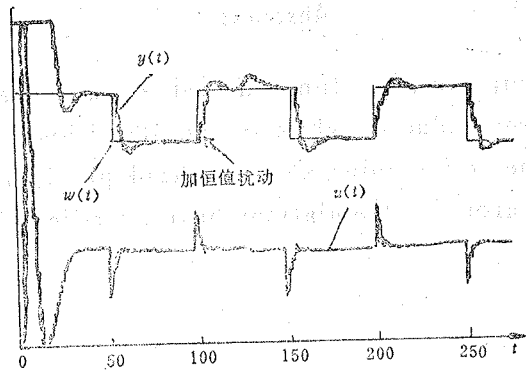


图 5 对象 II 的响应曲线

度变化。当参数收敛后，两种对象的动态和稳态响应都非常好。在加入恒值扰动后，由于具有积分作用，偏差也能很快消除。

为了克服开始阶段过大的振荡，可先用常规 PID 进行控制，等参数辨识收敛后再切换到自校正预估 PID 控制。仿真表明，初始阶段的过大振荡得到了克服（仿真曲线从略）。

参 考 文 献

- [1] Smith, O. J. M., A Controller to Overcome Dead Time, ISA, J. 6, 2, (1959), 28-33.
- [2] Clarke, D. W., Gawthrop, P. J., Self-tuning Controller, Proc. IEE, 122, 9, (1975), 929-934.
- [3] Clarke, D. W., Gawthrop, P. J., Self-tuning Control, Proc. IEE, 126, 6, (1979), 633-640.

Self-tuning Predictive PID Controller

Luo zhongqian, Dai Jin

(Department of Automatic Control, Huazhong University
of Science and Technology, Wuhan)

Abstract

In this paper, an algorithm of self-tuning predictive PID controller has been deduced, while in the algorithm, Smith predictor is replaced by the self-tuning k -step ahead predictor proposed by Clarke and Gawthrop^[1]. Simulations have verified the algorithm's effectiveness.