

时变分数时滞系统 最优预报自校正极点配置PID控制算法*

杨 智 刘希远

(甘肃工业大学自动控制系·兰州, 730050)

摘要: 本文在广义模型描述被控过程的基础上, 利用广义预测理论克服时滞, 增强控制系统的鲁棒性, 提出一种最优预报自校正极点配置PID控制新算法, 仿真结果表明这种控制策略对具有未知或时变分数时滞系统是很有效的。

关键词: 时滞系统; 自校正控制; 多步预报; 极点配置; 分数时滞

1 引言

分数时滞在计算机过程控制中是一普遍现象, 由于被控过程的时滞是随时间连续变化的, 时滞时间通常不是采样周期的整数倍。它的出现, 可能使得在连续系统里是最小相位系统, 在离散系统中变成非最小相位系统。但是迄今为止所发表的时滞系统的自适应控制算法^[1~3], 对分数时滞系统还未得到很好控制。作者进一步在文[3]基础上, 引入最优预测理论, 利用多步预测就有可能获得模型失配的近似信息, 从而克服建模误差的影响, 增强控制系统的鲁棒性, 并使得闭环特征方程中无时滞项。为了提高辨识收敛的快速性, 修改了描述被控过程的广义模型, 得出一种克服未知或时变分数时滞最优预报自校正极点配置PID控制算法。仿真结果证实了这点。

2 分数时滞基本定理

分数时滞系统脉冲传递函数与整数时滞比较有一定理:

定理 如果分数时滞存在, 则时滞系统脉冲传递函数分子阶次较整数拍时滞增高一阶, 且分子系数与分数时滞有关, 分母的系数与分数时滞无关, 只与极点和采样周期有关。

证 由留数定理知, 若被控过程 $G(s)e^{-\tau s}$ 及其全部极点 p_i 为已知, 时滞时间 $\tau = dT_s$, d 是整拍时滞, T_s 为采样周期, 则 $G(s)e^{-\tau s}$ 加零阶保持器的 z 变换为

$$G(z^{-1}) = (1 - z^{-1})z^{-d} \sum_{i=1}^{n+1} \text{res} \left(\frac{G(p_i)}{p_i} \frac{1}{1 - e^{p_i T_s} z^{-1}} \right). \quad (1)$$

式中 $\text{res}(\cdot)$ 是 $\frac{G(s)}{s} \frac{1}{1 - e^{sT_s} z^{-1}}$ 在 $s = p_i$ 之留数。按 $G(s)$ 的单极点和重复极点分别求留数代入式(1)中化简得

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-d}(b'_1 + \dots + b'_{n+1}z^{-n})}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}. \quad (2)$$

式中 a_i, b'_i 与极点 p_i, T_s 有关。

如果 $\tau = (d+f)T_s$, 分数时滞 $0 < f < 1$, 这时

* 甘肃省自然科学基金资助项目。

本文于1990年8月25日收到, 1991年3月16日收到修改稿。

2 期

$$G(z^{-1}, f) = z^{-d-1}(1 - z^{-1}) \sum_{i=1}^{n+1} \text{res} \left(\frac{G(p_i)}{p_i} \frac{e^{(1-f)T_s}}{1 - e^{p_i T_s} z^{-1}} \right). \quad (3)$$

当 $G(s)$ 具有一阶单极点 $s=p$ 时, 留数 R 为

$$R = \frac{be^{(1-f)T_s}}{1 - e^{pT_s} z^{-1}}. \quad (4)$$

式中 $b = \lim_{s \rightarrow p} (s-p) \frac{G(s)}{s}$.

若 $G(s)$ 具有 q 阶重极点, 则相应的留数为

$$R = \frac{B_q(z^{-1}, f)}{1 - e^{pT_s} z^{-1}}. \quad (5)$$

式中 $B_q(z^{-1}, f) = b_{11} + b_{12}z^{-1} + \dots + b_{1q}z^{-q+1}$, b_{1i} ($i=1, \dots, q$) 与分数时滞有关. 将式(4)和(5)代入式(3)中得分数时滞系统脉冲传递函数

$$G(z^{-1}, f) = \frac{z^{-d-1}(b_1 + \dots + b_{n+1}z^{-n})}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}}. \quad (6)$$

比较式(6)和式(2), 我们证明了定理的正确性.

3 分数时滞系统的最优预报与时滞辨识

3.1 时滞系统的最优预报

根据分数时滞定理, 时滞系统用下式描述

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d-1) + C(z^{-1})e(k). \quad (7)$$

其中 $y(k)$, $u(k)$ 为输出和输入, $e(k)$ 是白噪声干扰, $A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}$, $B(z^{-1}) =$

$\sum_{i=1}^{n+1} b_i z^{-i+1}$, $C(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n c_i z^{-i}$, a_i 和 c_i 与分数时滞无关, b_i 与分数时滞有关.

文[3]推出使预报误差方差最小的最优 d 步预报输出为

$$\hat{y}^*(k+d|k-1) = \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})}y(k-1) + \frac{B(z^{-1})F(z^{-1})}{C(z^{-1})}u(k-1). \quad (8)$$

式中 $F(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^d f_i z^{-i}$, $G(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n-1} g_i z^{-i}$ 满足 Diophantine 方程

$$C(z^{-1})/A(z^{-1}) = F(z^{-1}) + z^{-d-1}G(z^{-1})/A(z^{-1}). \quad (9)$$

3.2 时滞辨识

被控过程表示成 n 阶广义模型^[3]

$$A(z^{-1})y(k) = B^*(z^{-1})u(k) + \varepsilon(k). \quad (10)$$

为提高辨识速度, $B^*(z^{-1})$ 从 $d_{\min}+1$ 项开始, 即

$$B^*(z^{-1}) = b_{d_{\min}+1}z^{-(d_{\min}+1)} + \dots + b_{d_{\max}+n+1}z^{-(d_{\max}+n+1)}.$$

$\varepsilon(k)$ 为白噪声, $d_{\min}$, $d_{\max}$ 是被控过程时滞变化整数拍的上限和下限. 被控过程 $A(z^{-1})$, $B^*(z^{-1})$ 和时滞 d 可用递推的最小二乘法辨识, 当采样步数 $k \rightarrow \infty$ 时, 如果被控过程的时滞为整数拍时, 时滞估计值 $\hat{d}$ 以概率 1 收敛于真值, 即 $B^*(z^{-1}) \rightarrow z^{-d-1}B(z^{-1})$.

定义误差函数 $F(d)$ 为 $F(d) = |\hat{B}^*(1) - \hat{B}_d^*(1)|$. (11)

式中 $\hat{B}^*(1) = \sum |b_i|$, $i = d_{\min} + 1, \dots, d_{\max} + n + 1$,

$$\hat{B}_d^*(1) = \sum_{i=1}^{n+1} |\hat{b}_{i+d}|, \quad d = d_{\min}, \dots, u_{\max}.$$

于是整数拍时滞的估计值为 $\hat{d} = d|_{T(d)=\min}$.

4 时变分数时滞最优预报自校正极点配置 PID 算法

4.1 极点配置的 PID 控制器

将控制律设计成不完全微分型 PID 形式:

$$\begin{aligned} & (y_r - \hat{y}^*(k + d|k - 1))R(z^{-1}) \\ & = S(z^{-1})u(k). \end{aligned} \tag{12}$$

式中 $R(z^{-1}) = r_0 + r_1z^{-1} + r_2z^{-2}$, $S(z^{-1}) = (1 + s_1z^{-1} + s_2z^{-2})(1 - z^{-1})$, $(1 - z^{-1})$ 表示积分项, s_1, s_2 是不完全微分系数, y_r 是设定值.

文[3]已推导出闭环系统的特征方程为

$$\begin{aligned} & S(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})R(z^{-1}) \\ & = T(z^{-1}). \end{aligned} \tag{13}$$

式中 $T(z^{-1})$ 是配置的期望特征多项式, 可通过选取对应二阶连续系统的阻尼比 ξ 和自然振荡频率 ω_n 进行, 将闭环系统的极点配置在 z 平面单位圆内右半平面上, 这时控制性能较好, 振荡频率低, 不难证明此时 ξ, ω_n 的选取应满足下式

$$\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} < \frac{1}{4} \frac{2\pi}{T_s}. \tag{14}$$

计算步骤可参考文[3]中有关整数时滞的算法步骤.

4.2 仿真试验

本文用新算法在计算机上进行了数字仿真, 结果表明对时变分数时滞系统的控制是行之有效的. 被控过程是无自衡合成氨 H_2/N_2 时变大时滞系统^[3] $G(s)e^{-\tau s} = \frac{k_p e^{-\tau s}}{s(1 + T_p s)}$.

写成差分方程

$$\begin{aligned} y(k) = & -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \\ & + b_1 u(k-d-1) + b_2 u(k-d-2) \\ & + b_3 u(k-d-3). \end{aligned}$$

a_1, a_2 与分数时滞无关, $b_1 \sim b_3$ 与分数时滞有关, 当 $f=0$ 时, $b_3=0$, 即文[3]的算法是本文的特例. 仿真时取 $k_p=1.3, T_p=40\text{min}, \tau=7\sim 18\text{min}, T_s=4\text{min}$, 显然这是一分数时滞问题. b_1, b_3 随分数时滞 f 的变化曲线见图 1, 看出分数时滞对

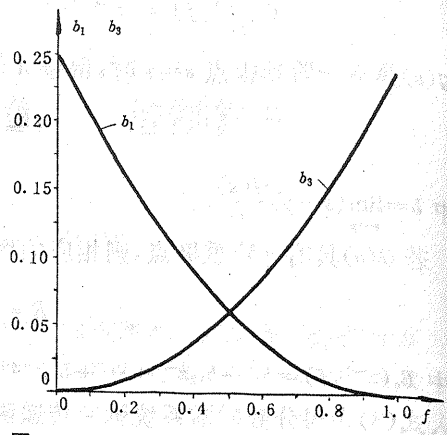


图 1 过程参数 b_1, b_3 随分数时滞 f 的变化过程

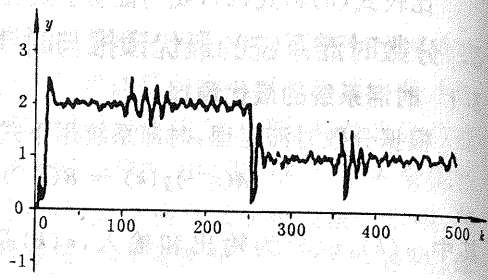


图2(a) 新算法作用下的输出响应

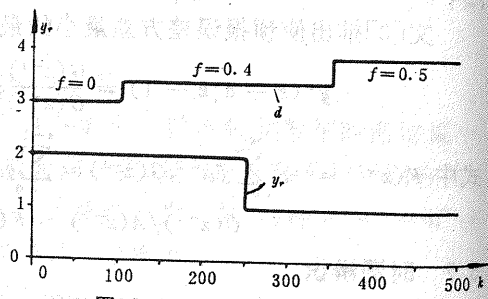


图2(b) 给定值 y_r 与时滞的变化过程

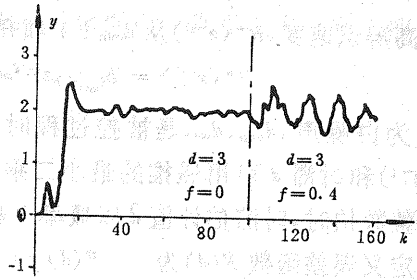


图 3 本文算法作用下的动态响应

过程参数影响较大。

图 2 表明不论分数时滞时变, 还是给定值变化, 本文提出的算法, 动态响应很好。

图 3 表明 $k=100$ 拍时, $f=0 \rightarrow 0.4 (d=3)$, 动态过程比文[3]得出的结果鲁棒性强。

5 结 论

综上所述:

1) 本文提出的算法对未知或时变的分数时滞系统的控制都是行之有效的, 由于用了极点配置, 不存在文[4]对 $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ 有互质要求的条件, 能对付非最小相位系统。

2) 该算法克服时滞的能力及鲁棒性优于文[1~3]的自适应算法。它的结构简单, 有一定的实用及推广价值。

参 考 文 献

- [1] 吴献春, 王士杰. 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. 控制理论与应用, 1989, 6(增刊 2), 97-101
- [2] Teng Fong Chwee, et al.. Self-Tuning PID Controllers for Dead Time Process. IEEE Trans. on Industr. Electr., 1988, 35(1), 119-125
- [3] 刘希远, 杨智. 时变大时滞极点配置最优预报自校正 PID 控制器. 控制与决策, 1990, 5(5): 19-23
- [4] 徐宏跃. 鲁棒保护-时滞跟踪自适应控制及在球磨机上的应用. 自动化学报, 1989, 15(1): 55-59

An Optimal Prediction Algorithm of Self-Tuning Pole Assignment PID Controller for Systems with Time-Varying Fractional Delay

YANG Zhi and LIU Xiyuan

(Department of Automatic Control, Gansu University of Technology • Lanzhou, 730050, PRC)

Abstract: The estimation of process parameters and process time delay can be achieved simultaneously by applying a general model and a general prediction theory. On this basis, an optimal prediction algorithm of self-tuning pole assignment PID controller that overcomes time-varying fractional delay is presented in this paper. Computer simulation shows that the proposed algorithm possesses better robustness. Using this algorithm, the influence of time-varying parameters and fractional time delay can be reduced.

Key words: delay system; self-tuning control; multistep prediction; pole assignment; fractional delay

本文作者简介

杨 智 1961 年生. 1988 年毕业于甘肃工业大学自动控制系, 获工学硕士学位, 现在是该校讲师. 近年来主要从事时滞系统的稳定性理论及控制策略, 鲁棒自适应控制, 控制系统的计算机辅助设计和工业过程的智能及神经网络控制问题的研究.

刘希远 1931 年生. 教授. 1961 年毕业于西安交通大学电机系, 同年 9 月以后一直在甘肃工业大学执教. 1982 年至 1985 年在瑞士苏黎世联邦理工大学 (ETH) 自动化及工业电子学研究所进修, 从事时滞控制系统、大系统理论等方面的研究工作, 并获工学博士学位. 目前研究兴趣为人工智能专家系统及电力系统自动化.