

文章编号:1001-9081(2007)06-1508-02

## 基于 IGPC 的时变大时滞系统自适应控制

高钦和<sup>1,2</sup>, 王孙安<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710029;  
2. 西安第二炮兵工程学院 机械工程系, 陕西 西安 710025)  
(gao202@yahoo.com.cn)

**摘要:** 针对工业过程中常见的参数时变和大时滞问题, 研究了广义预测控制算法在其中的应用问题。为了克服普通广义预测控制算法计算复杂的缺点, 采用隐式广义预测控制算法(IGPC)通过直接辨识控制器参数求解最优控制增量, 具有计算量小、计算速度快的特点。仿真结果表明, 在不需要关于被控对象的先验知识的情况下, 隐式广义预测自校正控制器能很好地跟踪设定值的变化, 当参数时变时仍具有很好的控制性能, 适合于实现时变大时滞系统的自适应控制。

**关键词:** 时变系统; 大时滞系统; 广义预测控制; 自适应控制

**中图分类号:** TP273<sup>+</sup>.2    **文献标识码:**A

## Adaptive control of time-varying delay system based on generalize predictive control

GAO Qin-he<sup>1,2</sup>, WANG Sun-an<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710029 China;  
2. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China)

**Abstract:** In this paper, the algorithm of Implicit Generalized Predictive Control (IGPC) was studied and applied to the industry process with time-varying delay. In order to overcome the disadvantage of the traditional GPC: complexity, the algorithm of IGPC can identify the controller parameters directly by the system input-output data and compute the optimal control signal increment faster than traditional GPC. The simulation results show that the IGPC controller can rapidly adapt to the change of setting value even without any prior information of the controlled system, and give a better control performance for the system with time-varying parameters. The controller proposed in this paper is suitable for the time-varying delay system control.

**Key words:** time-varying system; delay system; generalize predictive control; adaptive control

## 0 引言

工业过程控制中的大时滞系统是比较常见的, 常规控制器不能获得很好的控制品质。目前, 随着智能控制理论和技术的飞速发展, 将模糊控制和神经网络技术引入自适应 PID 控制中, 对于一些机理较复杂的被控过程产生了较好的控制品质<sup>[1]</sup>。这些控制器虽然鲁棒性强, 但没考虑时滞变化对系统的影响, 而时滞变化可能会使系统不稳定。

模型预测控制(MPC)是近年发展起来的一种新型计算机控制算法, 它以预测模型为基础, 采用二次在线滚动优化性能指标和反馈校正的策略, 实现具有自适应能力和强鲁棒性的高品质控制。利用预测控制方法具有预报能力, 能够有效地克服纯滞后环节对系统稳定性的影响, 减小闭环系统的滞后时间, 可以显著加快系统响应速度, 减小调节时间, 适合控制有扰动, 参数时变及存在大时滞的生产过程<sup>[2]</sup>。

本文针对工业过程计算机控制中常见时变大滞后系统的特点, 研究隐式广义预测控制算法在其中的应用问题。

## 1 隐式广义预测控制原理

基于参数模型的广义预测控制(GPC)是第三代的模型预

测控制算法<sup>[3]</sup>, 它以受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)为预测模型:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (1)$$

式中:  $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$ ,

$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$ ,

$C(z^{-1}) = c_0 + c_1z^{-1} + \dots + c_lz^{-l}$

差分因子  $\Delta = 1 - z^{-1}$ ,  $y(k)$ 、 $u(k)$  分别为系统输出、输入序列,  $\xi(k)$  是均值为零的白噪声序列。通常设  $C(z^{-1}) = 1$ , 若系统时滞大于零, 则  $B(z^{-1})$  多项式开头的一项或几项系数等于零。

为了系统的预测超前  $j$  步输出  $\hat{y}(k+j)$ , 引入丢番图(Diophantine)方程, 可得:

$$\hat{Y} = G\Delta U + f \quad (2)$$

式中  $\hat{Y} = [\hat{y}(k+1) \ \hat{y}(k+2) \ \dots \ \hat{y}(k+n)]^T$  为未来  $n$  个时刻系统的输出预测值矩阵;  $\Delta U = [\Delta u(k) \ \Delta u(k+1) \ \dots \ \Delta u(k+n-1)]^T$ , 为未来  $n$  个时刻的控制增量矩阵;  $G$  为系统动态矩阵, 由被控对象的单位阶跃响应系数  $g_0, g_1, \dots, g_{n-1}$  决定, 反映了被控对象的动态特性。 $f$  为系统开环预测向量, 是在  $k$  时刻预测的未来  $n$  个时刻未加控制增量  $\Delta u(k)$  时的系统输

收稿日期: 2006-12-25

作者简介: 高钦和(1968-), 男, 山东曲阜人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 机电系统检测与控制; 王孙安(1957-), 男, 浙江平阳人, 教授, 博士, 主要研究方向: 机电系统与工业过程的计算机智能监控。

出量。

系统的模型预测是根据动态响应系数和控制增量来决定的,而控制增量是通过使目标函数值最小来确定的。设输出值到设定值的参考轨迹  $w(k+j)$  由下式确定:

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1 - \alpha^j) y_r, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$y(k)$ 、 $y_r$  分别为输出、设定值;  $\alpha$  为柔化系数,  $0 < \alpha < 1$ 。

取目标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^n [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (4)$$

式中,  $n$  为预测长度,  $m$  为控制长度 ( $m \leq n$ ),  $\lambda$  为控制加权系数。

令  $W = [w(k+1), w(k+2), \dots, w(k+n)]^T$ , 则式(4)可表示为矩阵形式:

$$J = (Y - W)^T (Y - W) + \lambda \Delta U^T \Delta U \quad (5)$$

根据式(2)用  $Y$  的预测值  $\hat{Y}$  代替  $Y$ , 并令  $\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0$ , 可得:

$$\Delta U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - f) \quad (6)$$

可见, 广义预测控制问题可以归结为求  $\Delta u(k)$ ,  $\Delta u(k+1)$ ,  $\dots$ ,  $\Delta u(k+m-1)$ , 使得目标函数式达到最小值。实际控制中, 每次仅将第一个分量加入系统, 即当前时刻  $k$  的控制增量只用  $\Delta u(k)$  一步, 这样优化过程是反复在线进行的。

普通的 GPC 算法要先辨识对象模型参数, 然后利用 Diophantine 方程作中间运算, 最后得到控制律参数; 由于要作多步预测, 就必须在线递推求解 Diophantine 方程, 计算工作量非常大, 影响控制系统的实时性。为此, 采用隐式算法, 不辨识对象模型参数, 而是利用输入 / 输出数据, 根据式(6)直接辨识控制器参数矩阵  $G$  和  $f$ , 以减少计算工作量<sup>[4]</sup>。令:

$$\theta(k) = [g_{n-1} \ g_{n-2} \ \dots \ g_0 \ f(k+n)]^T$$

由式(2)可得  $k$  时刻  $n$  步估计值:

$$\hat{\theta}(k+n/k) = \hat{X}(k) \hat{\theta}(k) \quad (7)$$

式中,  $\hat{X}(k) = [\Delta u(k) \ \Delta u(k+1) \ \dots \ \Delta u(k+n-1)]$ , 其中  $\Delta u(k)$ ,  $\Delta u(k+1)$ ,  $\dots$ ,  $\Delta u(k+n-1)$  用上一步计算得到的相应点上的控制增量代替;  $\hat{\theta}(k)$  为  $\theta(k)$  的估计值, 采用递推最小二乘法参数估计公式进行计算:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \hat{X}(k-n)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = P(k-1)\hat{X}^T(k-n)[\lambda_1 + \hat{X}(k-n)P(k-1) \\ \hat{X}^T(k-n)]^{-1} \\ P(k) = [I - K(k)\hat{X}(k-n)]P(k-1)/\lambda_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\lambda_1$  为遗忘因子,  $0 < \lambda_1 < 1$ 。根据估计值  $\hat{\theta}(k)$  就可以得到矩阵  $G$  中的元素  $g_0$ ,  $g_1$ ,  $\dots$ ,  $g_{n-1}$  和  $f(k+n)$ 。

可以证明 GPC 与 DMC 具有等价性<sup>[5]</sup>, GPC 中的  $f$  相当于 DMC 中的  $Y_0$ , 即表示  $k$  时刻基于以往数据对未来输出的预测, 因此可得到下一时刻的预测向量  $f$  为:

$$f = \begin{bmatrix} f(k+1) \\ f(k+2) \\ \vdots \\ f(k+n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+2/k) \\ \hat{y}(k+3/k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+n+1/k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} e(k+1) \quad (9)$$

求得  $G$  和  $f$  后, 就可以利用式(6)计算控制量, 在计算的每一步, 都能得到此步到以后  $n$  步各点上的  $n$  个控制序列。为及时利用反馈信息决定控制量, 每次仅将序列中的第一个控制量作用于系统, 其后的  $n-1$  个控制量不直接作用于系统,

而只用于  $\hat{Y}$  的计算。

## 2 仿真实验

设一时变大时滞的工业控制过程可以用一个一阶惯性环节加纯滞后环节来描述:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-ts}}{1 + T_p s} \quad (10)$$

其中, 比例系数  $K_p$  在  $1.0 \sim 1.5$  间取值, 惯性时间常数  $T_p$  在  $2.8 \sim 3.0$  间取值, 系统时滞时间  $\tau$  在  $10 \sim 20$  间取值。

在 Matlab6.5 下编程实现隐式广义预测控制算法, 取广义预测控制算法初始值: 预测长度  $n = 8$ , 控制长度  $m = 4$ , 控制加权系数  $\lambda = 0.8$ , 柔化系数  $\alpha = 0.5$ ; 最小二乘法参数估计公式的初始值: 遗忘因子  $\lambda_1 = 0.9$ , 矩阵  $P = 10^5 I$ 。进行仿真实验, 研究控制器对设定值的跟踪性能及过程参数变化时的控制品质。

取参数  $K_p = 1.12$ ,  $T_p = 2.85$ ,  $\tau = 10$ , 采样周期  $T = 5$  s 时, 采用三角形保持器, 将连续模型离散化为差分方程后, 利用隐式广义预测控制算法进行仿真, 仿真结果如图 1 所示, 其中上图所示为系统输出  $y$  (虚线) 对设定值  $y_r$  (实线) 的跟踪曲线, 下图所示为控制增量  $\Delta u$  的变化曲线。仿真结果表明, 在递推估计参数时未不用任何关于对象参数的先验知识的情况下(初始值设为 0), 系统输出  $y$  除了在启动段有过度超限外, 都可以很好地跟踪设定值的变化。在实际控制中, 为改善启动阶段的估计和控制, 可以首先测出被控对象的单位阶跃响应系数, 以此作为初始参数。

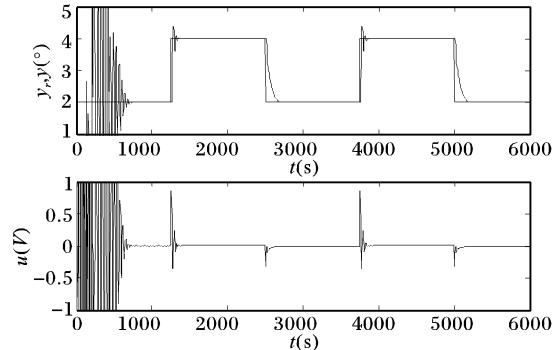


图 1 控制器对设定值的跟踪仿真曲线

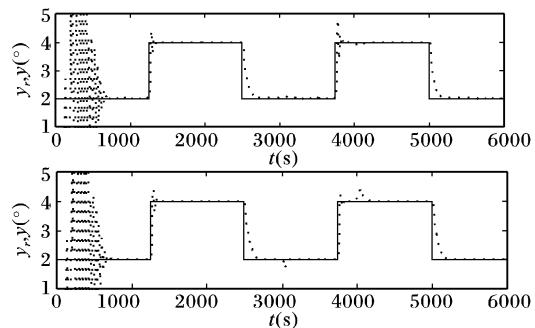


图 2 过程参数时变时控制器对设定值的跟踪仿真曲线

考虑过程参数时变对控制器性能的影响, 进行仿真实验, 图 2 给出了系统输出  $y$  (虚线) 对设定值  $y_r$  (实线) 的跟踪曲线。图 2 上图为过程参数  $K_p$  和  $T_p$  变化时的仿真结果, 其中, 第 600 步时,  $K_p$  由 1.12 增大为 1.32,  $T_p$  由 2.85 增大为 2.95; 第 800 步时,  $K_p$  由 1.32 减小为 1.22,  $T_p$  由 2.95 减小为 2.80。图 2 下图为时滞参数  $\tau$  变化时的仿真结果, 其中, 第 600 步时,  $\tau$  由 10 增大为 14; 第 800 步时,  $\tau$  由 14 减小为 12。

DOA, 仿真结果表明, 利用该方法获得的波达方向与实际值非常接近。

图 4 为用 3 种方法获得的 DOA: 常规波束形成法 (Conventional), MUSIC 波束形成法和利用 FastICA 的波束形成法。利用 FastICA 估计的结果为  $32.1^\circ$ , 与利用 MUSIC 估计法的结果非常近似, 与实际波达方向角相符, 但是 MUSIC 估计的结果取决于阵列的有关参数, 而且在 ICA 数据模型下, FastICA 收敛速度非常之快, 是 3 次 (或至少是 2 次的)<sup>[9]</sup>。

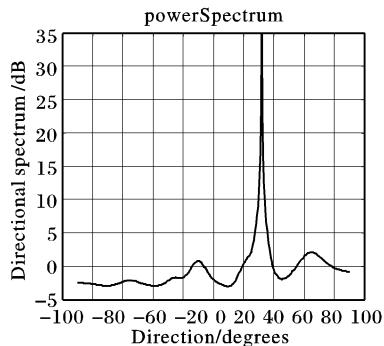


图 3 FastICA 单目标 DOA 估计

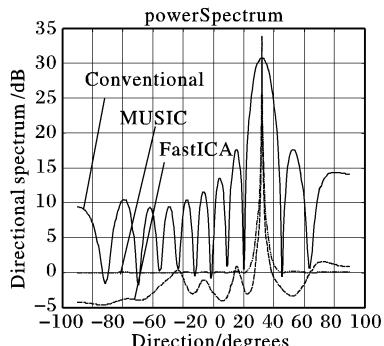


图 4 3 种方法 DOA 估计

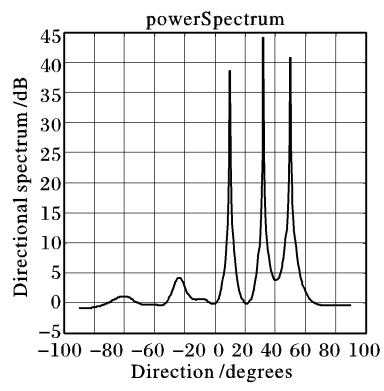


图 5 三个目标 DOA 估计

(上接第 1509 页)

仿真结果表明, 控制器可以很好地跟踪设定值的变化, 并对过程参数的变化具有良好的自适应能力和鲁棒性。

### 3 结语

本文针对工业过程中常见的参数时变和大时滞问题, 研究了广义预测控制理论在其中的应用问题。采用隐式广义预测控制算法通过直接辨识控制器参数求解最优控制增量, 无需递推求解 Diophantine 方程及进行矩阵求逆运算, 因而计算量小、实时性高。仿真结果表明, 在不需要关于被控对象的先验知识的情况下, 隐式广义预测自校正控制器仍具有很强的

利用 ICA 对多信号处理, 依然可以获得较好的结果。假设有 3 个独立源, 它们分别是正弦波, 方波和一随机波形, DOA 依次为  $10^\circ$ ,  $32^\circ$  和  $50^\circ$ , 信噪比均为 20dB, 采样快拍数为 100 次。图 5 为仿真结果:  $9.8^\circ$ ,  $32.1^\circ$  和  $49.8^\circ$ , 与实际方向吻合。

通过分析比较, 得知利用 FastICA 可以获得信号的波达方向, 并且有较高的稳定性和精确度 (本实验方位角分辨率为  $2^\circ$ )。

### 5 结语

本文通过实验和分析, 使用独立分量分析算法估计出阵列流型矩阵, 可以得到 DOA 的一种简单估计, 仿真结果也表明了 FastICA 算法能够有效地实现波达方向的盲估计, 性能稳定。当然, 独立分量分析的方法还不够成熟, 而且, 这一方法在声呐系统的研究才刚刚开始, 相信随着这一理论的进一步完善, 可以取得更好的估计效果。

#### 参考文献:

- [1] NIELSON RO. Sonar Signal Processing (Acoustic and Signal Processing Library) [M]. London: Artech House, 1991.
- [2] WONG KT, ZOLTOWSKI MD. Extended-Aperture Underwater Acoustic Multisource Azimuth/Elevation Direction-Finding Using Uniformly but Sparsely Spaced Vector Hydrophones [J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 1997, 22(4): 659 – 672.
- [3] 李小军, 张贤达, 保铮. 基于独立矢量基的波达方向估计 [J]. 电子与信息学报, 2002, 24(10): 1297 – 1302.
- [4] COMON P. Independent Component Analysis, A New Concept [J]. Signal Processing, Special Issue on Higher Order Statistics (S0165 – 1684). 1994, 36(3): 287 314.
- [5] HYVÄRINEN A, OJA E. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications [J]. Neural Networks (S0893 – 6080) 2000, 13(4 – 5): 411 – 430.
- [6] GIANNAKOPOULOS X, KARHNNEN J, OJA E. Experimental Comparison of Neural ICA Algorithms [A]. In: Proc. Int. Conf. on Artificial Neural Networks (ICANN'98) [C]. Sk vde, Sweden, 1998. 651 – 656.
- [7] HYVÄRINEN A. Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis [J]. IEEE Trans. on Neural Networks (S1045 – 9227), 1999, 10(3): 626 – 634.
- [8] 李贵斌. 声呐基阵设计原理 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [9] BLANCO Y, ZAZO S. New Gaussianity Measures Based on Order Statistics: Application to ICA [J]. Neurocomputing (S0925 – 2312). 2003, 51: 303 – 320.

适应能力和良好的控制性能, 当参数摄动时, 有较强的鲁棒性, 在时变大时滞系统的自适应控制中有很好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 蔡自兴. 智能控制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [2] 诸静. 智能预测控制及其应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [3] CLARKE DW, MOHTADI C, TUFFS PS. Generalized Predictive Control [J]. Automation, 1989, 25(6): 859 – 875.
- [4] 李国勇. 智能控制及其 Matlab 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.