

# 一种克服模型参数失配的广义预测控制算法\*

吴夏来, 楼赣菲, 陈超, 樊盛婉

(丽水学院 自动控制技术应用研究所, 浙江 丽水 323000)

**摘要:** 针对模型参数失配对广义预测控制输出的影响, 提出了一种输出增量反馈的广义预测控制简化算法。该算法通过引入一个输出增量速度函数, 设计了输出增量参考序列, 以控制输出增量的方式间接控制系统输出; 同时利用阶梯控制方式, 对输入增量引入柔化系数矩阵进行约束, 既避免了传统预测控制律中逆矩阵的求解, 减少了计算量, 又防止了控制量的剧烈变化; 最后引入控制增量增益, 利用这个自由度提高了系统的鲁棒稳定性。仿真结果表明: 该预测控制简化算法能有效克服模型参数失配带来的影响, 抑制系统输出调整过程中的输出波动, 缩短调整时间, 提高系统的动态特性, 并抑制系统控制输入的剧烈变化。

**关键词:** 广义预测控制算法; 输出增量反馈; 模型参数失配

中图分类号: TP13 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1232-03

## Generalized predictive control algorithm overcoming model parametric mismatch

WU Xia-lai, LOU Gan-fei, CHEN Chao, FAN Sheng-wan

(Department of Automation, Lishui University, Lishui 323000, China)

**Abstract:** Aiming at the effect of model parametric mismatch to generalized predictive control, an output increment feedback generalized predictive control algorithm was presented. A speed function of output increment was introduced to design an output increment reference sequence and the system output was indirectly controlled by directly controlling output increment. The input increments were constrained by softness coefficient matrix to obtain smoothing input based on stepped control, and the computation of inverse matrix was avoided. Stability of system robustness was improved by using a factor to multiply the control increment. The simulation results indicate that the effect of model parametric mismatch is overcome successfully by simplified predictive control algorithm. The output fluctuation during output adjusting process is offset, the adjusting time of dynamic response is reduced and the input is smoothed.

**Key words:** generalized predictive control algorithm; output increment feedback; model parametric mismatch

## 0 引言

在工业生产过程当中, 面对复杂的控制对象, 研究者往往难以建立其精确的数学模型。特别是过程控制中常见的参数时变系统, 由于存在系统参数的不确定性, 采用常规控制方法不易得到良好的控制效果。Clark 等人<sup>[1-2]</sup>于上世纪 80 年代提出的广义预测控制方法在预测模型的基础上, 采用多步预测、滚动优化、反馈校正的策略, 降低了对被控对象建模精度的要求, 适用于不易建立精确数学模型的复杂控制系统。但如果由于模型参数失配, 其预测模型的输出与

系统实际对象的输出存在较大的误差时, 势必影响其控制的精度和鲁棒性, 甚至是稳定性。李东侠等<sup>[3]</sup>基于 BP 神经网络对系统的建模误差进行预测, 并用其补偿模型输出, 抑制了模型失配的影响, 但神经网络的调节困难, 计算量也很大。翟永杰等<sup>[4]</sup>利用最小二乘支持向量机对建模误差进行补偿, 抑制模型失配的影响, 但同样存在计算量大、训练困难的问题。高钦和等<sup>[5-6]</sup>采用隐式广义预测控制, 利用输入输出数据直接辨识控制器参数来求解最优控制量, 提高了系统对模型参数变化的适应能力, 但不断的在线辨识需要付出很大的计算开销。孙明玮等<sup>[7]</sup>提出了一个中间程序

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 丽水学院科研资助项目(KY201109)

作者简介: 吴夏来(1985-), 男, 浙江丽水人, 主要从事预测控制技术方面的研究。E-mail: b03330219@126.com

速度概念,通过间接控制输出增量的方式实现控制目标,其控制思想的机理与变结构控制有一定的相似之处,有较好的鲁棒稳定性。

本研究在此基础上,提出一种克服模型参数失配的输出增量反馈广义预测控制简化算法。

### 1 克服模型参数失配的广义预测控制简化算法

为推导方便,本研究取被控对象数学模型为CARIMA模型,可表示为:

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

式中:  $y(k)$ ,  $u(k)$ —系统输出,输入;  $\xi(k)$ —零均值的随机噪声序列;  $\Delta$ —差分算子。

并且:

$$\begin{cases} \Delta = 1 - z^{-1}, \\ A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}, \\ B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}. \end{cases}$$

对式(1)作简单数学处理,用差分算子  $\Delta$  乘两边后,有:

$$A(z^{-1}) \cdot \Delta y(k) = B(z^{-1}) \cdot \Delta u(k-1) + \xi(k) \quad (2)$$

为了预测向前  $j$  步的输出增量值  $\Delta y(k+j/k)$ ,引入多番图方程:

$$1 = E_j A + q^{-j} F_j \quad (3)$$

其中:

$$E_j = 1 + \sum_{i=1}^{j-1} F_{j,i} z^{-i}, \quad F_j = \sum_{i=0}^{n_a} s_{j,i} z^{-i}.$$

把多番图方程代入式(2),忽略随机噪声序列,可得向前  $j$  步最优输出增量预测值为:

$$\Delta y(k+j/k) = G_j \Delta u(k+j-1) + F_j \Delta y(k) + H_j \Delta u(k+j-1) \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} G_j = g_{j,0} + g_{j,1} z^{-1} + \dots + g_{j,j-1} z^{-(j-1)}, \\ H_j = z^{-j} (g_{j,j} + g_{j,j+1} z^{-1} + \dots + g_{j,n_b+j-1} z^{-(n_b-1)}), \\ j = 1, 2, \dots, P. \end{cases}$$

为了克服模型参数失配,设计目标函数为:

$$J_p = E \left\{ \sum_{j=1}^p [\Delta y(k+j/k) - w(k+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^M [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\} \quad (5)$$

式中:  $\lambda$ —控制增量的加权因子,  $\lambda > 0$ ;  $M$ —控制时域;  $P$ —预测时域;  $\{w(k+j)\}$ —输出增量参考序列。

可由以下方法产生:

$$\begin{cases} w(k) = \Delta y(k), \\ w(k+j) = \alpha w(k+j-1) + (1-\alpha) \cdot \theta_r(y(k)), \\ j = 1, 2, \dots, P. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta y(k)$ —输出增量,  $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ ;  $\theta_r(y(k))$ —输出增量速度函数,  $\theta_r(y(k)) = (st - y(k))/st \cdot \theta$ ;  $st$ —输出设定值;  $\theta$ —设定的最大输出增量;  $\alpha$ —柔化系数,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

把式(5)写成向量形式,然后最小化  $J_p$ ,可得控制向量为:

$$\Delta U(k) = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T \times [W - F \Delta y(k) - H \Delta U(k-1)] \quad (7)$$

式中:  $I$ —单位矩阵。

且:

$$\begin{cases} \Delta U(k) = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T, \\ W = [w(k+1), \dots, w(k+P)]^T, \\ G = \begin{bmatrix} g_{1,0} & & & \\ g_{2,1} & g_{1,0} & & \\ \vdots & \vdots & & \\ g_{P,P-1} & g_{P-1,P-2} & \dots & g_{P-M+1,P-M} \end{bmatrix}_{P \times M}, \\ H = \begin{bmatrix} g_{1,n_b} & g_{1,n_b-1} & \dots & g_{1,1} \\ g_{2,n_b+1} & g_{2,n_b} & \dots & g_{2,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{P,n_b+P-1} & g_{P,n_b+P-2} & \dots & g_{P,P} \end{bmatrix}_{P \times n_b}, \\ \Delta U(k-1) = [\Delta u(k-n_b), \dots, \Delta u(k-1)]^T, \\ F = [F_1, F_2, \dots, F_P]^T. \end{cases}$$

观察式(7)可知,研究者在求取控制向量  $\Delta U(k)$  的计算过程中,需要进行逆矩阵的求解,计算量大。为此,这里引入阶梯控制方式,事先对控制增量序列进行离线约束,这样既符合常规执行机构的控制规律,减少因控制量变化过大所带来的磨损,也保证了控制算法的可行性<sup>[8-9]</sup>。设输入柔化系数为  $\tau \in (0, 1)$ ,可得到:

$$\Delta u(k+j) = \sum_{i=0}^j \tau^i \Delta u(k) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta U(k) &= \left[ 1, 1 + \tau, \dots, \sum_{i=0}^{M-1} \tau^i \right]^T \times \Delta u(k) \\ &= h \cdot \Delta u(k) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $h = \left[ 1, 1 + \tau, \dots, \sum_{i=0}^{M-1} \tau^i \right]^T$ 。

把式(9)代入式(5),再对  $J_p$  求最小化,可得当前控制增量为:

$$\Delta u(k) = \frac{g_1^T (W - \Delta Y_0)}{g_1^T g_1 + \lambda} \quad (10)$$

式中:  $g_1 = G \times h$ ,  $\Delta Y_0 = F \Delta y(k) + H \Delta U(k-1)$

由式(10)可知,引入阶梯控制后,当前控制增量的计算避免了逆矩阵的运算。同时,为进一步提高控制算法的鲁棒稳定性,参考 $\beta$ 增量型广义预测控制,将 $\beta \cdot \Delta u(k)$ 设为当前的控制增量<sup>[10-11]</sup>,可得当前控制量如下:

$$u(k) = u(k-1) + \beta \cdot \Delta u(k) \quad (11)$$

式中: $\beta$ —调节因子,取常量。

## 2 仿真研究

本研究选取如下的三阶参数时变控制系统:

$$\Delta y(t) = 1.5\Delta y(t-1) - [0.7 + 0.1 \sin(\pi t/20)]\Delta y(t-2) + 0.1\Delta y(t-3) + \Delta u(t-1) + [1.5 + 0.7 \sin(\pi t/40)]\Delta u(t-2)$$

其近似模型取为:

$$\Delta y(t) = 1.5\Delta y(t-1) - 0.7\Delta y(t-2) + 0.1\Delta y(t-3) + \Delta u(t-1) + 1.5\Delta u(t-2)$$

为便于比较,本研究分别采用基本广义预测控制和本研究提出的算法对该系统进行控制,两者控制参数为 $P=5, M=3, \lambda=0.5, \alpha=0.5$ ,最大输出增量 $\theta=2.5$ ,输入柔化系数 $\tau=0.2$ ,调节因子 $\beta=1.2$ ,采样时间设为1 s,控制目标 $st$ 设为10。

其仿真结果如图1、图2所示。

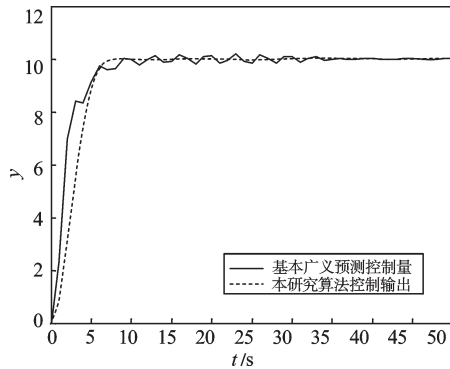


图1 控制对象输出

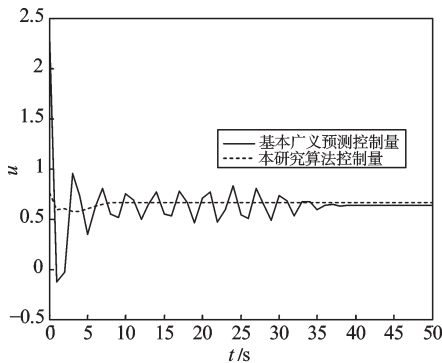


图2 控制器输出

从仿真结果曲线可以看出,当对象模型参数时变、建模存在误差时,采用本研究提出的控制算法得到了较好的控制效果,有效抑制了输出调整过程中的

输出波动,缩短了调整时间,提高了动态性能,克服了模型参数失配带来的不良影响。同时,控制输出也较平稳,实际使用中可减少执行机构的磨损。

为方便应用,笔者将以上内容进行归纳,可以得到本研究算法步骤如下:

- (1) 设定控制器参数 $P, M, \lambda, \alpha, \theta, \tau, \beta$ ;
- (2) 用阶梯式预测控制式(10)算出 $\Delta u(k)$ ;
- (3) 将求出的 $\Delta u(k)$ 代入式(11),得到最终控制量 $u(k)$ 。

## 3 结束语

针对模型参数时变对广义预测控制的不利影响,本研究提出了一种输出增量反馈的广义预测控制简化算法。该算法通过设定输出增量速度函数,抑制了由于模型失配引起的输出调整过程中的波动,缩短了调整时间,提高了动态性能;同时,利用阶梯控制避免逆矩阵运算,减少计算量,并对控制增量做了改进,提高了系统的鲁棒稳定性。

经过多次的仿真研究表明,与基本的广义预测控制相比,该算法能有效克服模型参数失配的影响,抑制输出调整过程中波动的产生,提高了系统的动态性能,控制效果良好。

## 参考文献(References):

- [1] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFTS P. Generalized predictive control. Part I & II [J]. *Automatic*, 1987, 23(2): 137-160.
- [2] 王晓枫,余世明,熊小华,等. 基于广义预测控制算法的水槽液位控制系统[J]. *机电工程*, 2009, 26(3): 35-37.
- [3] 李东侠,李平,丁淑艳. 基于改进的BP网络误差修正的广义预测控制[J]. *计算机仿真*, 2004, 21(12): 143-145.
- [4] 翟永杰,李海丽,王东风,等. LS-SVM误差补偿的广义预测控制[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(3): 192-194.
- [5] 高钦和,王孙安,黄先祥. 参数时变系统的广义预测控制研究[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(2): 181-182.
- [6] 李国勇. 输入受限的隐式广义预测控制算法的仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(7): 1533-1535.
- [7] 孙明玮,陈增强,袁著祉. 输出增量反馈思想[J]. *信息与控制*, 2002, 31(1): 5-8.
- [8] 李颀,杨洁明. 广义预测控制中对控制增量的研究[J]. *机械工程与自动化*, 2007(5): 45-48.
- [9] 慈宇红,杨华,李英辉. 输入平稳的快速无超调预测控制算法[J]. *控制工程*, 2006, 13(5): 407-412.
- [10] 麻文斗,王诗宓. 输入受限的增量型模型算法控制[J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(Z1): 114-116.
- [11] 孙明玮,陈增强,袁著祉. 增量型广义预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(2): 166-168.

[编辑:李辉]