

快速递推广义预测控制*

赵怀彬 王诗宓

(清华大学自动化系·北京, 100084)

摘要: 本文利用反向递推方法对广义预测控制(GPC)的准则函数进行变换, 得出一种递推的快速 GPC 算法. 该算法对预测长度为 N 的 n 阶系统的计算量仅为 $O(N \cdot n)$, 优于传统的求解 Diophantine 方程或矩阵求逆的算法. 仿真结果表明了算法的有效性.

关键词: 广义预测控制; 计算方法; 快速递推算算法

1 引言

70 年代末以来, 预测控制有了引人注目的发展. 而 Clarke 等人提出的广义预测控制(GPC)由于适用于开环不稳定系统和非最小相位系统, 更受到人们的重视.

文[1]在 $C(q^{-1}) = 1$ 的特殊条件下, 推导出 GPC 算法, 文[2]讨论了 $C(q^{-1})$ 是 q^{-1} 的多项式情况下的 GPC 算法, 但这些算法都基于 Diophantine 方程的求解, 计算比较复杂. 为避免在线求解 Diophantine 方程, 文[3]利用辨识结果直接求解控制器, 减少了计算量, 但仍需要对矩阵在线求逆. 以上 GPC 算法, 均需求出控制矩阵, 其计算量至少为 $O(N^2 \cdot n)$ 或 $O(N \cdot n^2)$. 文[4]吸取反向递推的思想, 推导出一种不需求解整个控制矩阵, 而直接通过递推得出最优控制量的新算法, 但该算法的准则函数中未考虑输出期望值的影响, 仅适用于调节问题. 本文在文[4]的基础上, 在准则函数中引入输出期望值, 推导出适于跟踪问题的快速广义预测控制(FG-PC)算法, 并分别给出了控制长度与预测长度相等和不等时详细的计算步骤, 其算法复杂度仅为 $O(N \cdot n)$. 仿真结果表明, 该算法切实有效, 对开环不稳定非最小相位系统也可以达到满意的控制效果, 并对无色和有色噪声均有良好抑制作用; 与传统 GPC 相比, 具有更快的计算速度.

2 问题描述

给定被控对象如下:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta}e(t), \quad (1)$$

其中 $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n}$, $B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_nq^{-n}$, $C(q^{-1}) = c_0 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_nq^{-n}$, $e(t)$ 为零均值不相关白噪声, $\Delta = 1 - q^{-1}$ 为差分算子.

为表示方便, 下文有时省略 q^{-1} 的书写, 如用 A 代替 $A(q^{-1})$ 等等. 首先研究 $C(q^{-1}) = 1$ 的情形. 而 $C(q^{-1}) \neq 1$ 的情形只是 $C(q^{-1}) = 1$ 问题的简单推广, 可参见文[6].

在 $C(q^{-1}) = 1$ 时, 可将对象方程改写为

$$\hat{A}(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})\Delta u(t-1) + e(t), \quad (2)$$

其中 $\hat{A}(q^{-1}) = A(q^{-1})\Delta = 1 + \hat{a}_1q^{-1} + \hat{a}_2q^{-2} + \dots + \hat{a}_nq^{-n}$.

不失一般性, 预测模型选为

$$\hat{A}(q^{-1})y(t+k|t) = B(q^{-1})\Delta u(t+k-1), \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目(69535010).

本文于 1995 年 12 月 1 日收到. 1997 年 4 月 2 日收到修改稿.

$y(t+k|t)$ 为在时刻 t 对 $t+k$ 时的输出预测值, $k=1 \sim N$, N 为预测长度.

记 $y_k = y(t+k|t)$, $\Delta u_{k-1} = \Delta u(t+k-1)$, 则预测模型可简记为

$$\hat{A}(q^{-1})y_k = B(q^{-1})\Delta u_{k-1}. \quad (4)$$

再定义准则函数为

$$J = \sum_{k=1}^N [p(y_k - w_k)]^2 + \sum_{k=0}^{M-1} (\lambda \Delta u_k)^2, \quad (5)$$

其中, M 为控制步程, w_k 为 $t+k$ 时刻的期望输出, 是预先确定的值, 为推导方便, 取 $w_k = w_r$ 为常值. 输出加权 p 与控制加权 λ 分别为 q^{-1} 的多项式.

为实现广义预测控制, 要选择合适的输入 $u_k (k=0 \sim M-1)$ 使 J 达到最小. 根据 GPC 滚动优化的原则, 实际实施的只是下一时刻的控制量 $u_0 = u_{-1} + \Delta u_0$.

3 快速 GPC 算法

为方便以后推导过程的表述, 先定义几种归一化运算:

定义 1 给定多项式 W, X, Y, Z , 且 $X(0) \neq 0$, 定义符号

$$(\bar{W}, \bar{Y}) = \phi_+(W, X; Y, Z) \quad (6)$$

为 $q^{-1}\bar{W} = W - \alpha X$, $\bar{Y} = Y + \alpha Z$, 其中 $\alpha = W(0)/X(0)$.

在以后的推导中, 也以 $\bar{W} = \phi_+(W, X)$ 代表 $q^{-1}\bar{W} = W - \alpha X$.

定义 2 给定多项式 $K_1, K_2, P_1, P_2, R_1, R_2$, 定义符号

$$(\bar{K}_1, \bar{K}_2; \bar{P}_1, \bar{P}_2; \bar{R}_1, \bar{R}_2) = \varphi_+(K_1, K_2; P_1, P_2; R_1, R_2) \quad (7)$$

代表如下运算:

$$\begin{bmatrix} q^{-1}\bar{K}_1 & \bar{P}_1 & \bar{R}_1 \\ \bar{K}_2 & \bar{P}_2 & \bar{R}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & -\gamma \\ \gamma & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 & P_1 & R_1 \\ K_2 & P_2 & R_2 \end{bmatrix},$$

其中 $\beta = K_2(0)/\sqrt{K_1^2(0) + K_2^2(0)}$, $\gamma = K_1(0)/\sqrt{K_1^2(0) + K_2^2(0)}$.

将根号中的十号改为一号, 则可定义算法 φ_- .

3.1 $N=M$ 时的控制算法

首先定义:

$$\begin{aligned} J(k) = & \sum_{i=1}^k [P_k(q^{-1})y_i - R_k(q^{-1})w_r + K_k(q^{-1})\Delta u_{i-1}]^2 \\ & + \sum_{i=1}^k [L_k(q^{-1})y_{i-1} - S_k(q^{-1})w_r + Q_k(q^{-1})\Delta u_{i-1}]^2, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $P_k(q^{-1}), R_k(q^{-1}), K_k(q^{-1}), L_k(q^{-1}), S_k(q^{-1}), Q_k(q^{-1})$ 均为 q^{-1} 的多项式, 以下简记为 $P_k, R_k, K_k, L_k, S_k, Q_k$. 且有: $P_N = p, R_N = p, K_N = 0, L_N = 0, S_N = 0, Q_N = \lambda$, 从而可以算得 $J(N) = J$.

$J(N)$ 中, 与 $(t+N)$ 时刻的输入增量 Δu_{N-1} , 输出 y_N 有关的量仅为 $P_N(0)y_N$ 和 $Q_N(0)\Delta u_{N-1}$. 先消除 $J(N)$ 对 y_N 的依赖. 按照定义 1, 令:

$$(\bar{P}_N, \bar{K}_N) = \phi_+(P_N, \hat{A}; K_N, B), \quad (9)$$

利用式(4), 可得

$$J(N) = \sum_{i=1}^N [\bar{P}_N y_{i-1} - R_N w_r + \bar{K}_N \Delta u_{i-1}]^2 + \sum_{i=1}^N [L_N y_{i-1} - S_N w_r + Q_N \Delta u_{i-1}]^2.$$

此时, $J(N)$ 对 Δu_{N-1} 的依赖仅出现在 $\bar{K}_N(0)\Delta u_{N-1}$ 和 $Q_N(0)\Delta u_{N-1}$ 中. 按照定义 2, 继续作归一

化处理,定义如下变换

$$(K_{N-1}, Q_{N-1}; P_{N-1}, L_{N-1}; R_{N-1}, S_{N-1}) = \varphi_+ (\bar{K}_N, Q_N; \bar{P}_N, L_N; R_N, S_N). \quad (10)$$

以上述变换代入 $J(N)$, 并进行推导, 可得

$$J(N) = J(N-1) + (P_{N-1}y_0 - R_{N-1}w_r + K_{N-1}\Delta u_{-1})^2 + (L_{N-1}y_{N-1} - S_{N-1}w_r + Q_{N-1}\Delta u_{N-1})^2.$$

其中, $y_0, \Delta u_{-1}$ 是 t 时刻可测的输出与输入. 上式右侧第二项为常值, 可记为 C_N , 所以

$$J(N) = J(N-1) + (L_{N-1}y_{N-1} - S_{N-1}w_r + Q_{N-1}\Delta u_{N-1})^2 + C_N. \quad (11)$$

显然, 要使 $J(N)$ 达到最小, 必需 $(L_{N-1}y_{N-1} - S_{N-1}w_r + Q_{N-1}\Delta u_{N-1})^2$ 和 $J(N-1)$ 同时达到最小. 因而, $(t+N)$ 时刻的最优控制增量 Δu_{N-1} 应当满足 $Q_{N-1}\Delta u_{N-1} = S_{N-1}w_r - L_{N-1}y_{N-1}$, 即 $(t+N)$ 时刻最优控制增量是其过去的输入和输出、以及期望输出的线性组合. 依此类推, 可以得到最优控制增量 Δu_0 应满足

$$Q_0\Delta u_0 = S_0w_r - L_0y_0. \quad (12)$$

算法 3.1 (FGPC1 算法) 由式(9), (10), (11)可得算法如下:

1) 初始化: 令 $P_N = p, R_N = p, K_N = 0, L_N = 0, S_N = 0, Q_N = \lambda$.

2) 取 $k = (N-1), \dots, 1$, 计算:

$$(\bar{P}_k, \bar{K}_k) = \psi_+ (P_{k+1}, \hat{A}; K_{k+1}, B),$$

$$(K_{k-1}, Q_{k-1}; P_{k-1}, L_{k-1}; R_{k-1}, S_{k-1}) = \varphi_+ (\bar{K}_k, Q_k; \bar{P}_k, L_k; R_k, S_k).$$

3) 计算最优控制增量 $\Delta u_0 = (S_0w_r - L_0y_0)/Q_0$.

4) 计算最优控制量 $u_0 = u_{-1} + \Delta u_0$.

3.2 $N > M$ 时的控制算法

由于过程控制中的系统都是因果系统, 因而, $(t+k)$ 时刻的输出只受过去时刻输入的影响, 所以 GPC 中都选取 $N \geq M$. 此时对控制量的限制为

$$\Delta u_N = \Delta u_{N-1} = \dots = \Delta u_M = 0. \quad (13)$$

即在 $(t+M)$ 时刻后, 控制量不再改变(控制增量为零).

仍定义:

$$J(N) = \sum_{i=1}^N [P_N y_i - R_N w_r + K_N \Delta u_{i-1}]^2 + \sum_{i=1}^N [L_N y_{i-1} - S_N w_r + Q_N \Delta u_{i-1}]^2, \quad (14)$$

而且 $P_N = p, R_N = p, K_N = 0, L_N = 0, S_N = 0, Q_N = \lambda$, 且 $i = M+1 \sim N$ 时, $\Delta u_{i-1} = 0$.

仿照 3.1 中的推导, 先利用定义 1 和定义 2 消除 $J(N)$ 对 y_N 的依赖, 作变换

$$(\bar{P}_N, \bar{K}_N) = \psi_+ (P_N, \hat{A}; K_N, B), \quad (15)$$

$$(K_{N-1}, \bar{Q}_{N-1}; P_{N-1}, \bar{L}_{N-1}; R_{N-1}, S_{N-1}) = \varphi_+ (\bar{K}_N, Q_N; \bar{P}_N, L_N; R_N, S_N). \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned} J(N) = & (\bar{L}_{N-1}y_{N-1} + \bar{Q}_{N-1}\Delta u_{N-1} - S_{N-1}w_r)^2 \\ & + \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{L}_{N-1}y_{i-1} + \bar{Q}_{N-1}\Delta u_{i-1} - S_{N-1}w_r)^2 \\ & + \sum_{i=1}^{N-1} (P_{N-1}y_i + K_{N-1}\Delta u_{i-1} - R_{N-1}w_r)^2 + C_N. \end{aligned}$$

此时, 由于 $\Delta u_i (i \geq M)$ 受到限制, 所以不能再象 3.1 中那样任选 Δu_{N-1} , 使 $(\bar{L}_{N-1}y_{N-1} - S_{N-1}w_r + \bar{Q}_{N-1}\Delta u_{N-1})^2$ 趋近于零, 进而使 $J(N)$ 趋于最小.

由式(13), 可以进行如下变换

$$\hat{Q}_{N-1} = \psi_+ (\bar{Q}_{N-1}, 1), \quad (17)$$

$$(L_{N-1}, Q_{N-1}) = \varphi_+ (\bar{L}_{N-1}, \hat{A}; \hat{Q}_{N-1}, B), \quad (18)$$

则

$$J(N) = J(N-1) + \sum_{i=1}^M [(\bar{L}_{N-1}y_{i-1} + \bar{Q}_{N-1}\Delta u_{i-1} - S_{N-1}w_r)^2 + (\bar{L}_{N-1}y_{i-1} + \hat{Q}_{N-1}\Delta u_{i-2} - S_{N-1}w_r)^2] + C_{N-1}, \quad (19)$$

其中, $C_{N-1} = (P_{N-1}y_0 - R_{N-1}w_r + K_{N-1}\Delta u_{-1})^2 + (L_{N-1}y_{-1} - S_{N-1}w_r + Q_{N-1}\Delta u_{-1})^2$ 是只与 $(t+N)$ 时刻以前的输入、输出有关的常数。

重复上述推导过程, 可得

$$J(N) = J(N-2) + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^M [(\bar{L}_{N-i}y_{i-1} + \bar{Q}_{N-i}\Delta u_{i-1} - S_{N-i}w_r)^2 - \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^M (\bar{L}_{N-i}y_{i-1} + \hat{Q}_{N-i}\Delta u_{i-2} - S_{N-i}w_r)^2] + C_{N-2}, \quad (20)$$

$$C_{N-2} = C_{N-1} + (P_{N-2}y_0 + K_{N-2}\Delta u_{-1} - R_{N-2}w_r)^2 + (L_{N-2}y_{-1} + Q_{N-2}\Delta u_{-1} - S_{N-2}w_r)^2.$$

经过适当推导(见文[6]附录 1), 可得

$$J(N) = J(N-2) + C_{N-2} + \sum_{i=1}^M [(L_{N-2}^+y_{i-1} + Q_{N-2}^+\Delta u_{i-1} - S_{N-2}^+w_r)^2 - (L_{N-2}^+y_{i-1} + \tilde{Q}_{N-2}^+\Delta u_{i-2} - S_{N-2}^+w_r)^2], \quad (21)$$

其中

$$(*, L_{N-2}^+; *, Q_{N-2}^+; *, S_{N-2}^+) = \varphi_+ (\bar{L}_{N-2}, \bar{L}_{N-1}; \bar{Q}_{N-2}, \bar{Q}_{N-1}; S_{N-2}, S_{N-1}), \quad (22)$$

$$\tilde{Q}_{N-2}^+ = \Psi_+ (Q_{N-2}^+, 1), \quad (23)$$

式中 * 代表某些不需要计算的量。

重复以上过程, 可得

$$J(N) = J(M) + \sum_{i=1}^M [(L_M^+y_{i-1} + Q_M^+\Delta u_{i-1} - S_M^+w_r)^2 - (L_M^+y_{i-1} + Q_M^+\Delta u_{i-2} - S_M^+w_r)^2] + C_M, \quad (24)$$

式中, $C_M = \sum_{i=M}^{N-1} [(P_i y_0 + K_i \Delta u_{-1} - R_i w_r)^2 + (L_i y_{-1} + Q_i \Delta u_{-1} - S_i w_r)^2]$ 是由 t 时刻以前已知的输入、输出决定的常数。此时, $J(N)$ 仅与 $t+M+1$ 时刻以前的输入、输出有关。为表示方便, 记

$$J'(M) = J(M) + \sum_{i=1}^M [(L_M^+y_{i-1} + Q_M^+\Delta u_{i-1} - S_M^+w_r)^2 - (L_M^+y_{i-1} + \tilde{Q}_M^+\Delta u_{i-2} - S_M^+w_r)^2]. \quad (25)$$

仿照 3.2 节的思路, 拟把 $J'(M)$ 写成 $J'(M) = J'(M-1) + f(y_M, \Delta u_{M-1}) + C_{M-1}$ 的形式。经适当推导(详见文[6])得,

$$\begin{aligned} J'(M) &= J'_1(M) + J'_2(M) + J'_3(M) \\ &= J'(M-1) + (\hat{L}_{M-1}y_{M-1} + \hat{Q}_{M-1}\Delta u_{M-1} + \hat{S}_{M-1}w_r)^2 + C'_{M-1}. \end{aligned} \quad (26)$$

依此类推, 可得

$$J'(M-1) = J'(M-2) + (\hat{L}_{M-2}y_{M-2} + \hat{Q}_{M-2}\Delta u_{M-2} + \hat{S}_{M-2}w_r)^2 + C'_{M-2},$$

$$J'(1) = J'(-1) + (\hat{L}_0 y_0 + \hat{Q}_0 \Delta u_0 - \hat{S}_0 w_r)^2 + C'_0.$$

由递推公式可以看出,当最优控制增量 Δu_i 满足 $\hat{Q}_i \Delta u_i = -\hat{L}_i y_i + \hat{S}_i w_r, i = 0, \dots, M-1$ 时, $J(i)$ 取得最小值,进而使 $J = J(N)$ 达到最小。于是,可得实际实施的最优控制增量 Δu_0 满足:

$$\hat{Q}_0 \Delta u_0 = -\hat{L}_0 y_0 + \hat{S}_0 w_r \quad (27)$$

为 $t+1$ 时刻以前的输入、输出的线性组合。

算法 3.2 (FGPC2 算法) 总结以上推导,可得适合于 $N > M$ 的快速 GPC 算法如下:

1) 初始化. 设定 N, M , 令 $P_N = p, R_N = p, K_N = 0, L_N = 0, S_N = 0, Q_N = \lambda, S_N^+ = 0, L_N^+ = 0, Q_N^+ = 0$.

2) 取 $k = N-1, \dots, M$, 计算:

$$\begin{aligned} (\bar{P}_k, \bar{K}_k) &= \psi_+ (P_{k+1}, \hat{A}; K_{k+1}, B), \\ (K_k, \bar{Q}_k; P_k, \bar{L}_k; R_k, S_k) &= \varphi_+ (\bar{K}_k, Q_{k+1}; \bar{P}_k, L_{k+1}; R_{k+1}, S_{k+1}), \\ (*, Q_k^+; *, L_k^+; *, S_k^+) &= \varphi_+ (Q_{k+1}^+, \bar{Q}_k; L_{k+1}^+, \bar{L}_k^+; S_{k+1}^+, S_k), \\ \hat{Q}_k &= \psi_+ (\bar{Q}_k, 1), \\ (L_k, Q_k) &= \varphi_+ (\bar{L}_k, \hat{A}; \hat{Q}_k, B). \end{aligned}$$

3) 取 $L_M^- = L_M^+, Q_M^- = \psi_+ (Q_M^+, 1), S_M^- = S_M^+$.

4) 取 $k = M-1, \dots, 0$ 计算:

$$\begin{aligned} (\bar{P}_k, \bar{K}_k) &= \psi_+ (P_{k+1}, \hat{A}; K_{k+1}, B), \\ (K_k, \bar{Q}_k; P_k, \bar{L}_k; R_k, \bar{S}_k) &= \varphi_+ (\bar{K}_k, Q_{k+1}; \bar{P}_k, L_{k+1}; R_{k+1}, S_{k+1}), \\ (\bar{Q}_k^+, \hat{Q}_k; \bar{L}_k^+, \hat{L}_k; \bar{S}_k^+, \hat{S}_k) &= \varphi_+ (Q_{k+1}^+, \bar{Q}_k; L_{k+1}^+, \bar{L}_k^+; S_{k+1}^+, \bar{S}_k), \\ (L_k^+, Q_k^+) &= \psi_+ (\bar{L}_k^+, \hat{A}; \bar{Q}_k^+, B, S_k^+ = \bar{S}_k^+, \\ (\bar{L}_{k+1}^-, \bar{Q}_{k+1}^-) &= \psi_+ (\bar{L}_{k+1}, \hat{A}; Q_{k+1}, B), \quad \bar{S}_{k+1}^- = S_{k+1}^-, \\ (Q_k^-, Q_k; L_k^-, L_k; S_k^-, S_k) &= \varphi_- (\bar{Q}_{k+1}^-, \hat{Q}_k; \bar{L}_{k+1}^-, \hat{L}_k; \bar{S}_{k+1}^-, \hat{S}_k). \end{aligned}$$

5) 求: $\Delta u_0 = (\hat{S}_0 w_r - \hat{L}_0 y_0) / \hat{Q}_0$.

3.3 FGPC 算法的复杂度分析

在 FGPC1 和 FGPC2 算法中进行 $\psi_+, \varphi_+, \varphi_-$ 所示变换的次数如表 1 所示。

表 1 FGPC 算法的计算复杂度

算法	ψ_+	φ_+	φ_-
FGPC1	N	N	0
FGPC2	$2.5N + 0.5M$	$1.5N + 0.5M$	M

其中 φ_- 的定义如下: 给定多项式 $K_1, K_2, P_1, P_2, R_1, R_2$, 则

$$(\bar{K}_1, \bar{K}_2; \bar{P}_1, \bar{P}_2; \bar{R}_1, \bar{R}_2) = \varphi_- (K_1, K_2; P_1, P_2; R_1, R_2) \quad (28)$$

表示

$$\begin{bmatrix} q^{-1} \bar{K}_1 & \bar{P}_1 & \bar{R}_1 \\ \bar{K}_2 & \bar{P}_2 & \bar{R}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & -\gamma \\ -\gamma & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 & P_1 & R_1 \\ K_2 & P_2 & R_2 \end{bmatrix},$$

其中

$$\beta = K_2(0) / \sqrt{|K_1^2(0) - K_2^2(0)|},$$

$$\gamma = K_1(0) / \sqrt{|K_1^2(0) - K_2^2(0)|}.$$

由 $\psi_+, \varphi_+, \varphi_-$ 的定义知道, 变换 (6), (7), (28) 进行乘法的次数均为 $O(n)$. 显然, FGPC1 的算法复杂度为 $O(Nn)$. 而传统的 GPC 算法, 对预测步程为 N 的 n 阶系统, 其算法复杂度一般为

$O(N^2 \cdot n)$ 或 $O(N \cdot n^2)^{[4]}$. FGPC1 的运算速度显然要快得多. 而对于 FGPC2 算法, 由于 $N > M$ 实际上影响了 GPC 优化问题的时不变结构, 其计算量会有一定增加. 但注意到式(12) 和 (27), 可知 FGPC 最终得到一个时不变控制律, 若不需在每一时刻都对对象模型参数进行辨识, 则可以利用已知的输入、输出, 一步得到最优控制量, 而不必象传统 GPC 那样计算预测输出, 从而大大节省了控制过程中的计算量.

4 仿真示例

例 1 给定不稳定、非最小相位对象

$$(1 - 1.5q^{-1} + 1.5q^{-2})y(t) = (1 + 2q^{-1})u(t - 1) + \frac{1 + q^{-1} + 0.5q^{-2}}{\Delta}e(t).$$

选取控制参数: $N = 4, M = 2, p = 1, \lambda = 1$. 利用 Matlab 软件工具进行仿真, 仿真结果如图 1 所示.

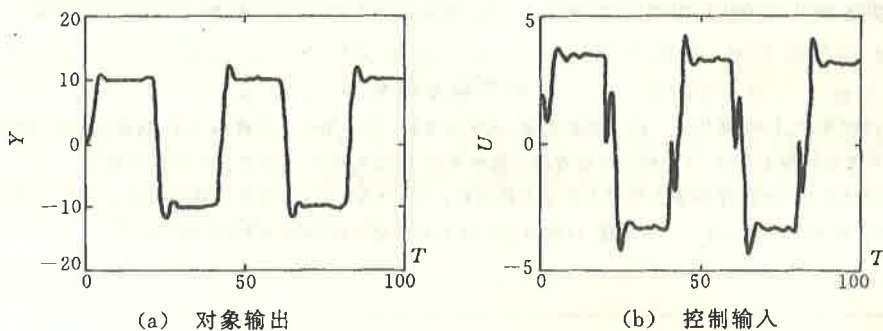


图 1 不稳定非最小相位对象仿真结果

仿真结果表明, 该算法有很好的控制效果(即使是对不稳定、非最小相位系统); 文[6]对变时滞、模型失配等各种情况进行了进一步仿真, 表明了 FGPC 对复杂噪声, 有较好的抑制作用; 对动态性能影响小, 且对模型失配(阶次、延迟失配)有较好的适应性.

5 结 论

本文算法不需求解 Diophantine 方程, 不需求逆, 只需根据已知参数进行简单的加、减法递推. 选取特殊参数 p, λ , 可使本算法与[1, 3]给出 GPC 算法的模型、准则完全一致, 因而可得出完全一致的最佳控制量, 进而具有一致的稳态、动态特性^[5]. 但本文算法大大节省了计算量, 特别适于需在线辨识的自适应控制, 有利于实现快速采样过程的在线控制. 另外, 本文得出了控制律直接的闭环形式, 有可能给进一步分析闭环系统的稳态动态性能提供方便. 对于有色噪声、预编程设定轨迹及预测开始步程 $N_1 \neq 1$ 等各种情况的 FGPC 算法及参数 p 和 λ 的选取的进一步讨论, 可参见文[6].

参 考 文 献

- 1 Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S. . Generalized predictive control, Part 1, the basic algorithm. Automatica, 1987, 23(2): 137-148
- 2 Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S. . Generalized predictive control, Part 2, extensions and interpretations. Automatica, 1987, 23(2): 149-160
- 3 金元郁, 顾兴源. 改进的广义预测控制算法. 信息与控制, 1990, 3: 8-13
- 4 Chisci, L., Garulli, A. and Zappa, G. . Fast algorithms for generalized predictive control. System & Control Letter. 1994,

23:339—348

- 5 Clarke, D. W. and Mohtadi, C. . Properties of generalized predictive control. Automatica, 1989, 25(6): 859—875
- 6 赵怀彬. 广义预测控制快速算法及性能分析. 清华大学硕士论文, 1996

Fast Recursive Generalized Predictive Control

ZHAO Huaibin and WANG Shifu

(Department of Automation, Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

Abstract: In this paper, the fast recursive algorithms of Generalized Predictive Control (GPC) are proposed by transforming the performance function with a backward recursion approach. The algorithms are recursively performed with $O(n \cdot N)$ computations for an n -th order plant and N -step prediction horizon, and are faster than the traditional GPC algorithms. The simulation results show their effectiveness.

Key words: generalized predictive control; computational method; fast recursive algorithm

本文作者简介

赵怀彬 1972年生. 1993年毕业于西安交通大学, 获学士学位. 1996年毕业于清华大学, 获硕士学位. 现在美国德克萨斯大学奥斯汀分校攻读博士学位. 目前感兴趣的方向为预测控制, 神经网络, 非线性及多维信号处理.

王诗宓 1944年生. 1967年毕业于清华大学动力机械系, 1981年和1983年在英国曼彻斯特大学理工学院获理学硕士和哲学博士学位. 现为清华大学自动化系教授. 目前研究领域为多变量控制, 预测控制, 容错控制等.

Invitation to IFAC'99

Congress Dates

Monday-Friday, July 5—9, 1999

Pre-Congress Tutorials: Saturday-Sunday,

July 3—4

Congress Venue

International Convention Center, Beijing, P. R. China.

Important Dates

- June 15, 1998

Draft paper submissions, Invited Sessions and Panel Discussion proposals must reach the IPC Secretariat

- November 30, 1998

Notification of acceptance of submissions and proposals for Invited Sessions and Panel Discussion Sessions

- February 1, 1999

Deadline for receiving final camera-ready manuscripts