广义预测控制的直接算法*

胡耀华　　贾欣乐
(大连海事大学信息工程学院 116026)　(大连海事大学轮机工程研究所)

摘 要 采用三个辨识器分别辨识开环系统、闭环系统和控制器的参数, 利用开环系统参数计算预测输出和参考轨迹, 通过辨识闭环系统参数得到广义输出, 用于辨识控制器的参数, 并给出一种广义预测控制的直接算法。仿真结果表明该算法是有效可行的。

关键词 广义预测控制, 直接算法, 参数辨识
分类号 TP 27

A Direct Generalized Predictive Control Algorithm

Hu Yaohua, Jia Xinle
(Dalian Maritime University)

Abstract A direct generalized predictive control (GPC) algorithm is presented. It uses three identifiers to estimate the parameters of the open-loop system, close-loop system and the controller respectively. The parameters of the open-loop system are used to predict the output and to calculate the desired trajectory. The parameters of the close-loop system are used to get the generalized output that is used to identify the parameters of the controller. The simulation results show its efficiency.

Key words generalized predictive control (GPC), direct algorithm, parameter identify

1 引　言

广义预测控制(GPC)[1]具有预测模型、滚动优化和反馈校正等基本特征, 呈现出优良的控制性能和鲁棒性, 已广泛应用于工业过程控制。目前GPC算法可分为间接算法和直接算法。间接算法通过辨识被控对象的参数, 进行多步预测和在线滚动优化来设计控制律, 其缺点是需要求解逆矩阵, 计算量很大。为此, 文献[2]在性能指标中引入下三角加权矩阵, 以避免矩阵求逆, 减少了计算量。文献[3]根据待求逆矩阵中元素排列的特殊性进行矩阵分解, 并给出递推求逆算法, 将计算量减少了2/3。直接算法则根据某种规律直接辨识控制器的参数, 避免了在线求逆。文献[4]通过引入等价性能指标, 先采用最小二乘法辨识被控对象的参数得到广义输出, 然后再辨识控制器参数, 并给出一种隐式GPC算法。文献[5, 6]在被控对象阶跃响应前N项已知的条件下, 给出一种直接算法, 并进行了全局收敛性分析。

本文分析了广义预测控制的开环系统方程、闭环系统方程和控制器参数之间的关系, 提出一种直接算法。在算法中采用三个辨识器, 通过辨识开环系统的参数递推计算预测输出和参考轨迹, 通过辨识闭环系统的参数得到系统的广义输出, 利用广义输出直接辨识控制器的参数。

2 广义预测控制算法

参考文献[7]的推导, 考虑如下CARMA模型

$$y(t+1)=\sum_{i=1}^{n}a_{1,i}y(t+1-i)+\sum_{i=0}^{m}b_{1,i}\Delta u(t-d-i)+\sum_{i=0}^{r}c_{1,i}e(t+1-i) \tag{1}$$

* 教育部博士点专项基金项目(9415101)和辽宁省自然科学基金项目(962047)
1998-10-29收稿, 1998-12-08修回

经递推，系统将来时刻输出的最小方差预报器 Y 和预测输出 Y_m 之间的关系为

$$Y = Y_m + Gu \tag{2}$$

其中

$$Y = [y(t+d+1|t), y(t+d+2|t), \cdots, y(t+d+p|t)]^T$$

$$Y_m = [y_m(t+d+1), y_m(t+d+2), \cdots, y_m(t+d+p)]^T \tag{3}$$

$$\begin{cases} y_m(t+k) = A_k Y_t + B_k \tilde{u} + C_k e \\ k = 1, 2, \cdots, p+d \end{cases} \tag{4}$$

式中

$$A_k = [a_{k,1}, a_{k,2}, \cdots, a_{k,n}]$$

$$B_k = [b_{k+1-d,0}, \cdots, b_{k,0}, b_{k,1}, \cdots, b_{k,m}]$$

$$C_k = [c_{k,1}, c_{k,2}, \cdots, c_{k,r}]$$

$$Y_t = [y(t), y(t-1), \cdots, y(t+1-n)]^T$$

$$\tilde{u} = [\Delta u(t-1), \Delta u(t-2), \cdots, \Delta u(t-d-m)]^T$$

$$e = [e(t), e(t-1), \cdots, e(t+1-r)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} b_{1,0} & & & 0 \\ & \cdots & \ddots & \\ b_{p,0} & b_{p-1,0} & \cdots & b_{1,0} \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \vdots \\ \Delta u(t+p-1) \end{bmatrix}$$

$p+d$ 为预测长度，$a_{k,i}$, $b_{k,i}$ 和 $c_{k,i}$ 的计算参见文献[7]。系统当前时刻的控制增量为

$$\Delta u(t) = [1, 0, \cdots, 0](G^TG + \lambda I)^{-1}G^T(Y_r - Y_m) = g(Y_r - Y_m) \tag{5}$$

其中 $g = [g_1, \cdots, g_p]$ 为 $(G^TG+\lambda I)^{-1}G^T$ 的首行。参考轨迹向量为

$$Y_r = [y_r(t+d+1), y_r(t+d+2), \cdots, y_r(t+d+p)]^T = \begin{bmatrix} \alpha \\ \vdots \\ \alpha^p \end{bmatrix} y_m(t+d) + \begin{bmatrix} 1-\alpha \\ \vdots \\ 1-\alpha^p \end{bmatrix} y_s(t+d) = K_r y_m(t+d) + T y_s(t+d) \tag{6}$$

其中，$y_s(t+d)$ 为 d 步之后的期望输出值，α 为柔化系数，λ 为对控制增量的加权系数。

3 广义预测控制的直接算法

由(4)式得

$$y_m(t+d) = A_d Y_t + B_d \tilde{u} + C_d e \tag{7}$$

将(3)，(4)，(6)，(7)代入(5)式，经整理得

$$\Delta u(t) = g(K_rA_d - A)Y_t + g(K_rB_d - B)\tilde{u} + g(K_rC_d - C)e + gTy_s(t+d) = K_yY_t + K_u\tilde{u} + K_e e + k_s y_s(t+d) \tag{8}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{d+1} \\ \vdots \\ A_{d+p} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{d+1} \\ \vdots \\ B_{d+p} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{d+1} \\ \vdots \\ C_{d+p} \end{bmatrix}$$

其中 K_y, K_u, K_e 分别为 n 维，$d+m$ 维和 r 维行向量，k_s 为标量。由(2)式得

$$(G^TG+\lambda I)^{-1}\lambda u + (G^TG+\lambda I)^{-1}G^T(Y - Y_m) = u \tag{9}$$

令 $(G^TG+\lambda I)^{-1}\lambda$ 的第一行元素为 $f = [f_1, f_2, \cdots, f_p]$。取(9)式的首行，得

$$fu + g(Y - Y_m) = \Delta u(t) \tag{10}$$

将式(8)，(10)写成最小二乘的形式，令 $\varphi(t) = fu + g(Y - Y_m)$，有

$$\varphi(t) = \Psi_1^T(t)\Theta_1 \tag{11}$$

$$\Theta_1^T = [k_{y,1}, \cdots, k_{y,n}, k_{u,1}, \cdots, k_{u,d+m}, k_{e,1}, \cdots, k_{e,r}, k_s]$$

$$\Psi_1^T(t) = [y(t), \cdots, y(t+1-n), \Delta u(t-1), \cdots, \Delta u(t-d-m), e(t), \cdots, e(t+1-r), y_s(t+d)]$$

为了辨识(11)式中的参数，需知道行向量 f 和 g 的值。由(10)式可得闭环系统的方程为

$$fu + g(Y - Y_r) = \Delta u(t) - g(Y_r - Y_m) = 0 \tag{12}$$

写成最小二乘的形式，后退 $p+d$ 步，得

$$\Psi_2^T(t)\Theta_2 = 0 \tag{13}$$

$$\Theta_2^T = [f_1, \cdots, f_p, g_1, \cdots, g_p]$$

$$\Psi_2^T = [\Delta u(t-p-d), \cdots, \Delta u(t-d-1), y(t+1-p) - y_r(t+1-p), \cdots, y(t) - y_r(t)]$$

上述两个辨识器需要参考轨迹和预测输出值，为此辨识开环系统(7)中的系数，由(6)式计算参考轨迹，由(4)式计算预测输出。将(7)式写成最小二乘的形式，后退 d 步，得

$$y(t) = \Psi_3^T(t)\Theta_3 \tag{14}$$

$$\Theta_3^T = [a_{d,1}, \cdots, a_{d,n}, b_{1,0}, \cdots, b_{d,0}, b_{d,1}, \cdots, b_{d,m}, c_{d,1}, \cdots, c_{d,r}]$$

$$\Psi_3^T = [y(t-d), \cdots, y(t+1-d-n), \Delta u(t-d-1), \cdots, \Delta u(t-2d-m), e(t-d), \cdots, e(t+1-d-r)]$$

由过程辨识的有关结论[8], 白噪声是开环系统辨识的有效激励; 当控制器时变时, 闭环系统是结构性可辨识的; 若反馈通道上存在噪声, 或其阶次不低于前向通道的阶次时, 参数辨识是唯一的; 若闭环系统稳定、可辨识、存在纯滞后, 则参数估计一致收敛。

综上所述, 广义预测控制的直接算法可总结如下:

Step 1: 置模型阶次、预测长度、柔化系数及待辨识参数的初值;

Step 2: 采样系统的输出, 辨识开环系统(14) 的参数;

Step 3: 由(6) 式计算过去时刻的参考轨迹, 辨识闭环系统(12) 中的参数;

Step 4: 由(4) 式计算过去时刻的预测输出, 计算 $\varphi(t-d-p)$, 辨识(11) 中控制器的系数;

Step 5: 由(8) 式计算控制量;

Step 6: t 增加 1, 返回 Step 2。

4　仿真实例

取系统的实际模型为

$$y(t+1) = 1.2y(t) - 0.5y(t-1) + \Delta u(t-5) - 0.7\Delta u(t-6) + 0.3\Delta u(t-5) + e(t+1) + 0.1e(t) - 0.05e(t-1)$$

设对象的阶次已知, 取柔化系数为 0.85, p = 15。输出设定值按 4, 1, 5, 2 顺序, 每 100 步变化一次。采用UD 分解法辨识开环系统、闭环系统和控制器的参数, 利用计算机中的随机函数产生方差为 0.5 的随机序列作为对象的测量白噪声。由于对象的参数未知, 为保证控制对象不发散, 仿真前 30 步限定控制增量的变化小于 0.1。采用本文的直接算法得出的控制量和输出曲线如图 1 所示。结果表明, 该算法是可行的。

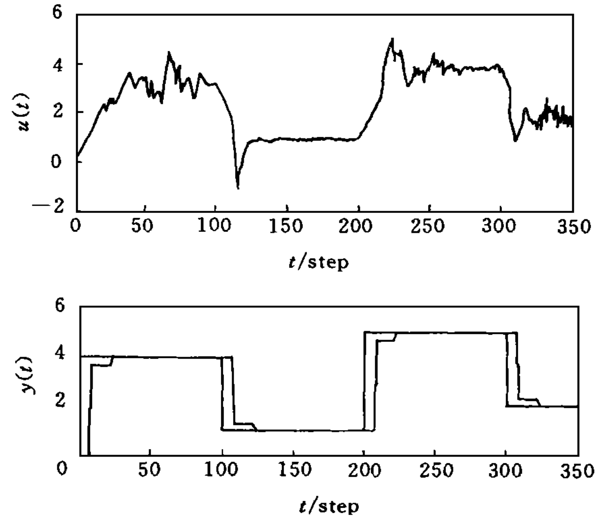

图 1　仿真输出和控制量曲线

5　结　　论

本文根据开环系统、闭环系统与控制器参数之间的关系, 通过辨识开环系统来计算参考轨迹和预测输出, 辨识闭环系统参数得到广义输出, 用于辨识控制器的参数。本文给出的直接算法不需已知对象的阶跃响应, 同时避免了间接算法中矩阵求逆计算量大的缺点。仿真结果表明, 该算法是有效和可行的。

参 考 文 献

1　Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control. Automatica, 1987, 23(1): 137- 160

2　金元郁. 一种新型的自适应广义预测控制. 自动化学报, 1992, 18(3): 353- 357

3　郭庆鼎, 金元郁, 胡耀华. 求解 GPC 中逆矩阵的递推算法. 控制与决策, 1996, 11(4): 510- 513

4　舒迪前, 石中锁. 隐式自校正广义预测控制器及其全局收敛性分析. 自动化学报, 1995, 21(5): 545- 554

5　王伟. 广义预测自适应控制的直接算法及全局收敛性分析. 自动化学报, 1995, 21(1): 57- 62

6　王伟. 一种广义预测自适应控制的直接算法. 自动化学报, 1996, 22(3): 270- 275

7　金元郁, 顾兴源. 改进的广义预测控制算法. 信息与控制, 1990, 19(3): 8- 13

8　方崇智, 萧德云. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1988

作 者 简 介

胡耀华　男, 1972 年生。1999 年在大连海事大学获博士学位, 现为大连海事大学副教授。研究方向为生存理论, 预测控制和轮机自动化。

贾欣乐　男, 1932 年生。1959 年毕业于清华大学工程力学研究班, 现为大连海事大学教授, 博士生导师。研究方向为控制理论在船舶上的应用, 复杂动力系统建模与仿真等。