

一种改进的模型算法控制*

王 剑

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110005)

摘 要 通过在指标函数中引入系统输出误差的微分项, 提出一种改进的模型算法控制(MAC), 由于采用了增量式的脉冲响应预测模型, 因此更适用于工业过程控制。理论分析及计算机仿真研究表明, MAC 比模型算法控制(MAC)具有更好的动态调节特性。

关键词 模型算法控制, 预测控制, 自适应控制

分类号 TP 273

An Improved Model Algorithmic Control

Wang Jian

(Northeastern University)

Abstract An MAC (Improved Model Algorithmic Control) via introducing differential item of system output errors in index function is presented. Because pulse response predictive model of the increment is adopted, MAC is more suitable for industry process control. The study of theory analysis and computer simulation shows that dynamics adjust characteristic of MAC is better than that of MAC (Model Algorithmic Control).

Key words model algorithmic control, predictive control, adaptive control

1 引 言

预测控制对模型失配、非最小相系统、负载扰动以及随机噪声具有较强的鲁棒性, 因此在工业过程控制方面具有广泛的应用前景。迄今为止, 国内外学者已提出多种预测控制算法, 如 MAC, DMC, E-HAC, GPC 等^[1-3]。所有这些算法都是通过将一段时域内由系统输出误差平方和与控制信号平方和构成的指标函数的最小化得到的。当将这些算法用于实际控制时, 闭环系统的稳定性通过适当选取加权因子(或加权多项式)及预测时域来保证, 而控制系统的稳态误差则采用增量式的预测模型, 并在指标函数中对控制信号增量进行加权的方法来消除。

对于大多数复杂的工业过程, 参数模型一般比非参数模型更难获取, 且受扰动影响大。因此, 基于脉冲响应表达式的 MAC 更适用于工业过程控制, 因为脉冲响应系数的辨识要相对简单一些。以往的实际应用和仿真研究都表明 MAC 能给出令人满意

的控制效果。本文通过在指标函数中引入对预测误差微分的约束项, 提出一种改进的模型算法控制, 理论分析和仿真研究表明 MAC 的动态控制效果比 MAC 好。

2 改进的模型算法控制

设被控系统由如下的脉冲响应模型描述

$$y(k) = \sum_{j=1}^N h_j u(k-j) = H(z)u(k-1) \quad (1)$$

其中, $H(z) = h_1 + h_2 z^{-1} + \dots + h_N z^{-N+1}$, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示系统的输入和输出, $h_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 是系统的脉冲响应系数。如果系统的延迟不为零, 则 $H(z)$ 中首一的相应系数为零。由于只能考虑有限项(N 项), 因此要求被控系统是开环稳定的。对于大多数工业过程控制, 控制器的主要任务是补偿系统所固有的非平稳随机扰动(如漂移和不可测负载变化等)。为了消除闭环系统的稳态误差, 考虑如下增量模型

$$y(k) = y(k-1) + \sum_{j=1}^N h_j \Delta u(k-j) \quad (2)$$

* 1999-08-23 收稿, 1999-10-05 修回

其中 Δ 是微分算子, 而

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$$

利用 (2) 式可得到系统输出的 i 步向前预测值 $y(k + i/k)$ 为

$$y(k + i/k) = y(k) + \sum_{m=1}^i \sum_{j=1}^N h_j \Delta u(k + m - j) \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, L$

即 $Y(k) = Y_0(k) + AU(k) + BU_0(k)$ (4)
其中

$$Y(k) = [y(k + 1/k) \quad y(k + 2/k) \quad \dots \quad y(k + 3/k)]^T_{1,L}$$

$$U(k) = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k + 1) \quad \dots \quad \Delta u(k + L)]^T_{1,L}$$

$$Y_0(k) = [y(k) \quad y(k) \quad \dots \quad y(k)]^T_{1,L}$$

$$U_0(k) = [\Delta u(k - N + 1) \quad \Delta u(k - N + 2) \quad \dots \quad \Delta u(k - 1)]^T_{1,N-1}$$

$$A = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 + h_1 & h_1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_L + \dots + h_1 & h_{L-1} + \dots + h_1 & \dots & h_1 \end{bmatrix}_{L,L}$$

$$B = \begin{bmatrix} h_N & h_{N-1} & \dots & h_2 \\ h_N & h_{N-1} + h_N & & h_2 + h_3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_N & h_{N-1} + h_N & \dots & h_2 + h_3 + \dots + h_{L+1} \end{bmatrix}_{L,N-1}$$

控制器的目标是使下列指标

$$J = \sum_{i=1}^N \{e^2(k + i) + \beta[e(k + i) - e(k + i - 1)]^2 + \lambda \Delta u^2(k + i - 1)\} \quad (5)$$

取最小值。这里 β 和 λ 是加权因子。(5) 式也可以写成

$$J = [Y_0(k) + AU(k) + BU_0(k) - W(k)]^T \times [Y_0(k) + AU(k) + BU_0(k) - W(k)] + \beta[HU(k) + GU_0(k) - W(k) + W(k - 1)]^T \times [HU(k) + GU_0(k) - W(k) + W(k - 1)] + \lambda U^T(k)U(k) \quad (6)$$

其中

$$W(k) = [w(k + 1) \quad w(k + 2) \quad \dots \quad w(k + L)]^T_{1,L}$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & h_1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_L & h_{L-1} & \dots & h_1 \end{bmatrix}_{L,L}$$

$$G = \begin{bmatrix} h_N & h_{N-1} & \dots & h_2 \\ 0 & h_N & \dots & h_3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_{L+1} \end{bmatrix}_{L,N-1}$$

假定控制信号不受任何约束, 则使性能指标

(6) 取最小值的最优控制向量为

$$U(k) = [A^T A + \beta H^T H + \lambda]^{-1} [A^T + \beta H^T] W(k) - \beta H^T W(k - 1) - A^T Y_0(k) - (A^T B + \beta H^T G) U_0(k) \quad (7)$$

为了能顾及由模型失配、参数时变及扰动等因素引起的不确定性, 采取滚动优化方案, 即只将控制向量的第一个分量施加到被控系统, 下一个控制周期重新计算控制信号。为此定义

$$D^T = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0][A^T A + \beta H^T H + \lambda]^{-1}$$

则控制律为

$$\Delta u(k) = D^T A^T [W(k) - Y_0(k) - BU_0(k)] + \beta H^T [W(k) - W(k - 1) - GU_0(k)] \quad (8)$$

将(8)式代入(1)得

$$P(z)y(k) = z^{-1} H(z) D^T [A^T + \beta H^T (1 - z^{-1})] W(k) \quad (9)$$

其中 $P(z)$ 是系统的闭环特征多项式, 即

$$P(z) = D [1 + P_1(z)] + P_2(z) \quad (10)$$

$$P_1(z) = D^T (A^T B + \beta H^T G) \times [z^{-N+1} \quad z^{-N+2} \quad \dots \quad z^{-1}]^T$$

$$P_2(z) = z^{-1} H(z) D^T A^T [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T$$

将控制律(8)与MAC^[1]相比较可以看出, MAC不仅具有积分控制作用, 而且还具有微分控制作用, 这从闭环方程(9)可以清楚地看到。在指标函数中引入预测误差变化率的约束项, 相当于在闭环系统中引入附加的零点, 因此适当选取零点位置, 可起到降低超调和缩短调节时间的作用。

如果被控系统的脉冲响应系数是未知的, 则可采用递推最小二乘法在线辨识系统参数

$$\theta(k) = \theta(k - 1) + M(k) \Phi(k) \times [y(k) - \Phi(k) \theta(k - 1)] \quad (11)$$

$$M(k) = M(k - 1) - \frac{M(k - 1) \Phi(k) \Phi(k) M(k - 1)}{1 + \Phi(k) M(k - 1) \Phi(k)} \quad (12)$$

其中

$$\theta(k) = [h_1(k) \quad h_2(k) \quad \dots \quad h_N(k)]^T_{1,N}$$

$$\phi(k) =$$

$$[u(k-1) \quad u(k-2) \quad \dots \quad u(k-N)]^T_{1,N}$$

(8) 式与 (11) 及 (12) 式一起构成了预测自适应控制算法。

3 仿真研究

为了说明 MAC 的控制性能, 并与 MAC 进行比较, 本文对两种方法进行计算机仿真研究, 限于篇幅仅给出一个例子。

$$y(k) + 0.36y(k-1) + 0.24y(k-2) = 0.5u(k-1) + 0.25u(k-2)$$

参考序列设定为阶跃信号, 系统初始输入输出设定为零, 初始参数向量设定为单位向量, 即采用自适应算法。将 MAC 和 MAC 施加到被控对象时, 系统输出响应如图 1 和图 2 所示。这是通过调节加权因子 λ 折衷考虑超调量和调节时间的最佳结果。显然, MAC 的动态控制效果比 MAC 好。

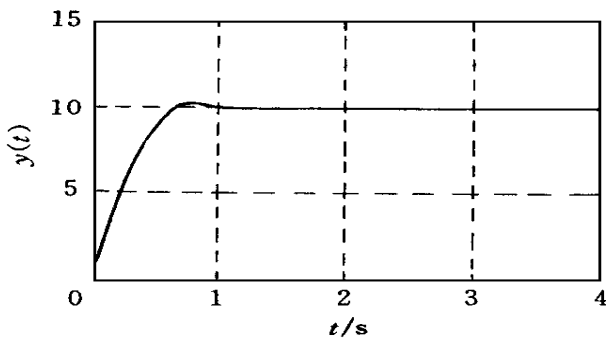


图 1 采用 MAC 时的系统响应
($N = 5, L = 4, \lambda = 1, \beta = 1$)

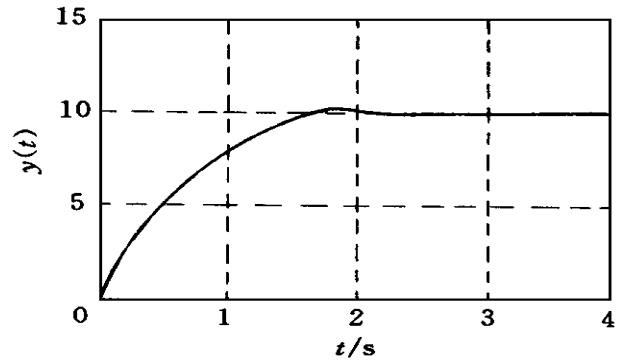


图 2 采用 MAC 时的系统响应
($N = 5, L = 4, \lambda = 0.8$)

4 结 论

本文提出的改进的模型算法控制不仅具有积分控制作用, 而且还具有微分控制作用, 因此可通过适当选取加权因子 β 来改善系统的动态性能。仿真研究表明 MAC 比 MAC 具有更好的动态调节效果。

参 考 文 献

- 1 De Keyser, R M C. A comparative study of self- adaptive long- range predictive control methods Automatica, 1988, 24: 149- 163
- 2 Clarke D W. Generalized predictive control—Part I & II Automatica, 1987, 23: 137- 160
- 3 顾兴源, 毛志忠 一种简单适用的预测自适应控制算法 信息与控制, 1992, 21: 120- 123

作 者 简 介

王 剑 男, 1957 年生。1990 年在东北大学自动化系获硕士学位, 现为东北大学信息科学与工程学院自控系主任, 副教授。研究方向为综合自动化, 智能控制理论及应用。

(上接第 244 页)

参 考 文 献

- 1 Geoff Bennett Designing TCP/IP internetworks New York: Int Thomson Publishing Inc, 1995
- 2 Siemens Specifications of computer control system. AG: Siemens, 1976
- 3 蔡皖东 计算机网络技术 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998
- 4 刘有信 网络互联技术 北京: 人民邮电出版社, 1998

作 者 简 介

吴庆洪 男, 1967 年生。1989 年毕业于鞍山钢铁学院,

现为东北大学信息科学与工程学院控制仿真中心博士研究生。研究方向为轧钢计算机过程控制系统及数学模型。

徐心和 男, 1940 年生。1964 年毕业于东北工学院自控系, 现为东北大学教授, 博士生导师。长期从事控制理论教学和科研工作, 主要学术方向为离散事件动态系统, 混杂系统, 计算机控制仿真等。

张 颖 女, 1966 年生。1989 年毕业于杭州电子工业学院, 现为鞍山钢铁学院讲师。研究方向为图象识别和多媒体通信。