

文章编号: 1001-0920(2009)03-0330-05

对角 CARIMA 模型多变量自适应约束广义预测控制

李奇安, 李平

(辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 为了简化约束存在时多变量广义预测控制算法的设计与实现, 依据对角 CARIMA 模型的结构特点, 将多输入多输出对象的参数辨识和模型预报问题转化为一系列多输入单输出子对象的参数辨识和模型预报问题. 推导了输入输出的约束形式及优化求解过程, 简化了多变量对象的参数辨识、模型预报、目标函数和约束条件系数矩阵的计算. 在由 DCS 控制的非线性液位装置上的对比实验结果表明了该方法的有效性.

关键词: 广义预测控制; 自适应控制; CARIMA 模型; 多变量; 约束控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Constrained multivariable adaptive generalized predictive control for diagonal CARIMA model

LI Qi-an, LI Ping

(School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China.

Correspondent: LI Qi-an, E-mail: liqian@lnpu.edu.cn)

Abstract: A constrained multivariable generalized predictive control algorithm (CMGPC) for CARIMA model with diagonal matrices A and C is developed to simplify the design and implementation of CMGPC when considering of input and output constraints. The identification and model output prediction problems of the multivariable process with m inputs and n outputs are transformed into that of a series of subprocesses with m inputs and single output by utilizing the structure characteristic of the diagonal CARIMA model. The input and output constraints and optimization problem are analyzed in detail. This method simplifies system identification, output prediction and the computation of the objective function coefficients and constraint matrices. Comparative experiment results obtained from a nonlinear liquid system controlled by DCS show the effectiveness of the method.

Key words: Generalized predictive control; Adaptive control; CARIMA model; Multivariable; Constrained control

1 引言

多变量自适应约束广义预测控制^[1]在精馏^[2]、聚乙烯^[3]、热电厂^[4]、电力系统^[5]、加热炉^[6]、飞行控制^[7]、医药制药^[8]等领域都有广泛的应用和研究. 但 CMGPC 推导复杂, 计算量大, 在线实现困难, 因此研究人员对其提出了一些改进方法. 文献^[9]针对一类输入变量幅值及其变化率受约束的非线性系统, 利用 T-S 模糊模型对广义预测控制算法提出了改进方案, 在一定程度上降低了在线计算负担. ^[10]对局部动态线性化模型进行对角解耦, 削弱了变量之间的耦合程度. ^[11]将 CMGPC 的解转化为一个 Tank-Hopfield 优化电路网络的稳态解, 通过硬件

电路或龙格-库塔数值方法进行求解. ^[12]利用双重神经网络求解 CMGPC 的多步优化问题, 由于双神经网络具有结构简单、运行速度快和易于实现等特点, 可以提高 CMGPC 的实时性. ^[13]基于小波变换的多分辨分析功能, 对 CMGPC 的预测和控制时域在小波域进行分块压缩, 降低了约束维数, 提高了计算效率. ^[2]利用矩阵正交分解法求解 CMGPC 的优化问题, 奇异值分解法不但提高了解的数值完整性, 而且有利于改进闭环系统的鲁棒性能. ^[14]利用推广上对角分解辨识方法, 将多输入多输出系统分解成多个多输入单输出子系统进行模型辨识, 达到了改进多变量自适应约束广义预测控制算法的目的.

收稿日期: 2008-01-25; 修回日期: 2008-05-29.

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA04Z162); 辽宁省科学技术计划项目(2006219013); 辽宁省高校创新团队计划项目(2006T089).

作者简介: 李奇安(1971—), 男, 湖南华容人, 教授, 博士, 从事预测控制、优化控制等研究; 李平(1964—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、自适应控制等研究.

对于非约束形式的多变量广义预测控制算法, 文献[15]将 CARIMA 模型的 A 和 C 矩阵构造成对角形式, 以简化模型参数的辨识和多变量广义预测控制器的分析设计. 预测控制算法的最大优点是能以自然的方式来处理系统的各种约束条件, 在不违背约束的情况下尽可能实现系统的最优化. 事实上, 所有物理系统都存在一定的约束, 而文献[15]提出的改进算法没有考虑控制系统的约束条件, 因此还不能说是真正意义上的优化控制. 本文在引入对角 CARIMA 模型的基础上, 考虑了控制系统的输入输出约束, 对自适应 CM GPC 算法作进一步简化.

2 算法推导

2.1 模型输出预测^[15]

对于物理可实现的多输入 m 输出 n 的多变量对象的 CARIMA 模型

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (1)$$

其中: $A(z^{-1}) = \text{diag}\{A_{11}(z^{-1}), \dots, A_{mm}(z^{-1})\}$ 和 $C(z^{-1}) = \text{diag}\{C_{11}(z^{-1}), \dots, C_{nn}(z^{-1})\}$ 为 $n \times n$ 维首一多项式矩阵, $\text{diag}\{ \cdot \}$ 表示以括号中的元素为对角元素的矩阵; $B(z^{-1})$ 为 $n \times m$ 维多项式矩阵, 其第 (i, j) 个元素为 $z^{-d_{ij}}B_{ij}(z^{-1})$, d_{ij} 是第 i 个输出对于第 j 个输入的纯滞后; $A_{ii}(z^{-1}) = 1 + \sum_{k=1}^{na_{ii}} a_{ii,k} z^{-k}$, $B_{ij}(z^{-1}) = \sum_{k=0}^{nb_{ij}} b_{ij,k} z^{-k}$, $C_{ii}(z^{-1}) = 1 + \sum_{k=1}^{nc_{ii}} c_{ii,k} z^{-k}$, na_{ii} , nb_{ij} 和 nc_{ii} 分别为多项式 $A_{ii}(z^{-1})$, $B_{ij}(z^{-1})$ 和 $C_{ii}(z^{-1})$ 的阶次; $y(t) = [y_1(t), \dots, y_n(t)]^T$, $u(t) = [u_1(t), \dots, u_m(t)]^T$, $e(t) = [e_1(t), \dots, e_n(t)]^T$ 分别为 t 时刻的输出向量、输入向量和噪声向量, 假设噪声为零均值白噪声; $\lambda = 1 - z^{-1}$; $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$.

如果选择第 i 个输出的参考轨迹 w_i 为 $y_i(t)$ 向着 t 时刻设定值 $r_i(t)$ 的一阶光滑近似, 则有

$$W = T_y y(t) + T_r r(t) \quad (2)$$

其中: $W = [w_1^T, w_2^T, \dots, w_n^T]^T$, $T_y = \text{diag}\{T_{y_1}, T_{y_2}, \dots, T_{y_n}\}$, $T_r = \text{diag}\{T_{r_1}, T_{r_2}, \dots, T_{r_n}\}$, $r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]^T$; $w_i = [w_i(t + N_{1_i}), \dots, w_i(t + N_{2_i})]^T$, $T_{y_i} = [I^{N_{1_i}}, I^{N_{1_i}+1}, \dots, I^{N_{2_i}}]^T$, $T_{r_i} = 1 - T_{y_i}$; N_{1_i} 和 N_{2_i} 分别为第 i 个输出的最小和最大预测时域, 一般取 $N_{1_i} = d_i + 1$, $d_i = \min_j d_{ij}$ 是第 i 个输出对于所有输入的最小时滞; $\alpha_i \in [0, 1]$ 为第 i 个输出的柔化因子.

于是可得到输出变量的预测表达式

$$Y = GU_{N_3} + f \quad (3)$$

其中: $Y = [Y_{N_1}^T, Y_{N_2}^T, \dots, Y_{N_n}^T]^T$, $Y_{N_i} = [\hat{y}_i(t + N_{1_i} / t), \dots, \hat{y}_i(t + N_{2_i} / t)]^T$, $\hat{y}_i(t + j / t)$ 为第 i 个输出 $t + j$ 时刻的期望值; $U_{N_3} = [U_{N_{3_1}}^T, U_{N_{3_2}}^T, \dots, U_{N_{3_m}}^T]^T$, $U_{j_{N_{3_j}}} = [u_j(t), \dots, u_j(t + N_{3_j})]^T$, $u_j(t + k)$ 为第 j 个输入 $t + k$ 时刻的增量; G 为 $n \times m$ 维方块阵, 其第 (i, j) 个元素为 $G_{ij_{N_{3_j}}}$, $G_{ij_{N_{3_j}}}$ 为 G_{ij} 前 $N_{3_j} + 1$ 列元素构成的子矩阵, G_{ij} 为 $N_i (N_i = N_{2_i} - d_i)$ 为第 i 个输出的预测时域) 阶下三角矩阵, 其第 (k, h) 个元素为 $g_{ij,k,h} (k \geq h)$, $g_{ij,k,h}$ 为多项式 $G_{ij_k}(z^{-1}) = \sum_{h=0}^{k-1} g_{ij,k,h} z^{-h}$ 的系数; $f = [f_1^T, f_2^T, \dots, f_n^T]^T$, $f_i = [f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_n}]^T$, $f_{i_k} = \sum_{j=1}^m G_{p_{ij_k}}(z^{-1}) u_j(t-1) + [N_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) + M_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) F_{i_{k+d_i}}(z^{-1})] y_i(t)$; $G_{ij_k}(z^{-1}) + z^{-k} G_{p_{ij_k}}(z^{-1}) = M_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) E_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) B_{ij}(z^{-1})$, $z^{-d_{ij}} B(z^{-1}) = z^{-d_i} B_{ij}(z^{-1})$; $M_{i_{k+d_i}}(z^{-1})$ 和 $N_{i_{k+d_i}}(z^{-1})$ 分别为 $k + d_i - 1$ 阶和 $nc_{ii} - 1$ 阶多项式, $E_{i_{k+d_i}}(z^{-1})$ 和 $F_{i_{k+d_i}}(z^{-1})$ 分别为 $k + d_i - 1$ 阶和 $na_{ii} - 1$ 阶多项式, 且分别满足如下两个 Diophantine 方程:

$$1 = C_{ii}(z^{-1}) M_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) + z^{-(k+d_i)} N_{i_{k+d_i}}(z^{-1}),$$

$$C_{ii}(z^{-1}) = E_{i_{k+d_i}}(z^{-1}) A(z^{-1}) + z^{-(k+d_i)} F_{i_{k+d_i}}(z^{-1}).$$

2.2 输入输出约束

系统约束最简单的形式是输入输出变量的幅值约束和输入变量的速率约束.

令 $\bar{y}_i(t+k)$ 和 $\underline{y}_i(t+k)$ 分别为 $t+k$ 时刻输出期望值 $\hat{y}_i(t+k/t)$ 的上下限值. 由于引入了最小时域 $N_{1_i} = d_i + 1$, 只需考虑 $t + d_i + 1$ 到 $t + d_i + N_i$ 时刻输出预测值的幅值约束. 令

$$Y_{N_i} = [\underline{y}_i(t + N_{1_i}), \dots, \underline{y}_i(t + N_{2_i})]^T,$$

$$Y = [Y_{N_1}^T, Y_{N_2}^T, \dots, Y_{N_n}^T]^T,$$

$$\bar{Y}_{N_i} = [\bar{y}_i(t + N_{1_i}), \dots, \bar{y}_i(t + N_{2_i})]^T,$$

$$\bar{Y} = [\bar{Y}_{N_1}^T, \bar{Y}_{N_2}^T, \dots, \bar{Y}_{N_n}^T]^T.$$

则所有输出期望值的约束为

$$Y \leq Y \leq \bar{Y} \quad (4)$$

对于第 j 个输入, 由于引入了控制时域 $N_{3_j} + 1$, 则 $u_j(t+k) = 0 (k \leq N_{3_j} + 1)$, 只需考虑 t 到 $t + N_{3_j}$ 时刻的输入速率约束. 令 $\underline{u}_j(t+k)$ 和 $\bar{u}_j(t+k)$ 分别为第 j 个输入增量 $u_j(t+k)$ 在 $t+k$ 时刻的上下限值, 并令

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{jN_{3j}} &= [\mathbf{u}_j(t), \dots, \mathbf{u}_j(t + N_{3j})]^T, \\ \mathbf{U}_{N_3} &= [\mathbf{U}_{N_{31}}^T, \mathbf{U}_{N_{32}}^T, \dots, \mathbf{U}_{N_{3m}}^T]^T, \\ \bar{\mathbf{U}}_{jN_{3j}} &= [\bar{u}_j(t), \dots, \bar{u}_j(t + N_{3j})]^T, \\ \bar{\mathbf{U}}_{N_3} &= [\bar{\mathbf{U}}_{N_{31}}^T, \bar{\mathbf{U}}_{N_{32}}^T, \dots, \bar{\mathbf{U}}_{N_{3m}}^T]^T. \end{aligned}$$

则所有输入变量的速率约束为

$$\mathbf{U}_{N_3} \mathbf{U}_{N_3} \bar{\mathbf{U}}_{N_3}. \quad (5)$$

相应地,第 j 个输入变量也只考虑 t 到 $t + N_{3j}$ 时刻的幅值约束. 令 $\bar{u}_j(t + k)$ 和 $\underline{u}_j(t + k)$ 分别为 $u_j(t + k)$ 的上下限值,并令

$$\begin{aligned} -j_{N_{3j}} &= [\underline{u}_j(t), \dots, \underline{u}_j(t + N_{3j})]^T, \\ j_{N_{3j}} &= [\bar{u}_j(t), \dots, \bar{u}_j(t + N_{3j})]^T, \\ j_{N_{3j}} &= [u_j(t), \dots, u_j(t + N_{3j})]^T, \\ e_{jN_{3j}} &= [1, 1, \dots, 1]^T, \end{aligned}$$

$I_{jN_{3j}}$ 为下三角全 1 矩阵. 则有

$$j_{N_{3j}} = I_{jN_{3j}} \mathbf{U}_{jN_{3j}} + e_{jN_{3j}} u_j(t - 1). \quad (6)$$

令

$$\begin{aligned} -N_3 &= [-1_{N_{31}}^T, -2_{N_{32}}^T, \dots, -m_{N_{3m}}^T]^T, \\ N_3 &= [1_{N_{31}}^T, 2_{N_{32}}^T, \dots, m_{N_{3m}}^T]^T, \\ I_{N_3} &= \text{diag}\{ I_{N_{31}}, I_{N_{32}}, \dots, I_{N_{3m}} \}, \\ e_{N_3} &= \text{diag}\{ e_{1N_{31}}, e_{2N_{32}}, \dots, e_{mN_{3m}} \}. \end{aligned}$$

则所有输入变量的幅值约束为

$$\begin{aligned} -N_3 - e_{N_3} \mathbf{u}(t - 1) &\leq I_{N_3} \mathbf{U}_{N_3} \\ N_3 - e_{N_3} \mathbf{u}(t - 1) &\leq \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{u}(t - 1) = [u_1(t - 1), \dots, u_m(t - 1)]^T$.

2.3 目标函数

考虑如下有限时域二次目标函数:

$$\min_{\mathbf{U}_{N_3}} J = (\mathbf{Y} - \mathbf{W})^T R (\mathbf{Y} - \mathbf{W}) + \mathbf{U}_{N_3}^T Q \mathbf{U}_{N_3}. \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} R &= \text{diag}\{ r_1, r_2, \dots, r_n \}, \\ i &= \text{diag}\{ i_1(N_{1i}), \dots, i_1(N_{2i}) \}, \\ Q &= \text{diag}\{ q_1, q_2, \dots, q_m \}, \\ j &= \text{diag}\{ j_j(1), \dots, j_j(N_{3j}) \}, \\ i &= 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, \end{aligned}$$

$i(k)$ 和 $j(k)$ 为加权系数.

2.4 优化求解

根据式(2)和(3),目标函数(8)可改写成如下形式:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{U}_{N_3}} J &= \\ \mathbf{U}_{N_3}^T &[G^T R G + Q] \mathbf{U}_{N_3} + 2[f^T R G - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(t)^T T_y^T R G - r(t)^T T_r^T R G] \mathbf{U}_{N_3} + f^T R f - \\ 2y(t)^T T_y^T R f - 2r(t)^T T_r^T R f + \\ y(t)^T T_y^T R T_y y(t) + 2y(t)^T T_y^T R T_r r(t) + \\ r(t)^T T_r^T R T_r r(t). \end{aligned} \quad (9)$$

令

$$\begin{aligned} &= 2[G^T R G + Q], \\ T^T &= 2[f^T R G - y(t)^T T_y^T R G - r(t)^T T_r^T R G], \\ &= f^T R f - 2y(t)^T T_y^T R f - 2r(t)^T T_r^T R f + \\ & y(t)^T T_y^T R T_y y(t) + 2y(t)^T T_y^T R T_r r(t) + \\ & r(t)^T T_r^T R T_r r(t), \\ &= [G^T, I^T, I_{N_3}^T]^T, \quad = [\quad, \quad, \quad], \\ \bar{\boldsymbol{\mu}} &= [\bar{\mathbf{Y}}^T - f^T, \bar{\mathbf{U}}_{N_3}^T, \bar{\mathbf{N}}_{N_3}^T - \mathbf{u}^T(t - 1) \mathbf{e}_{N_3}^T]^T, \\ \boldsymbol{\mu} &= [f^T - \mathbf{Y}^T, -\mathbf{U}_{N_3}^T, \mathbf{u}^T(t - 1) \mathbf{e}_{N_3}^T - \mathbf{N}_{N_3}^T]^T, \\ \mathbf{v} &= [\bar{\boldsymbol{\mu}}, \boldsymbol{\mu}], \end{aligned}$$

I 为 $\sum_{j=1}^m (N_{3j} + 1)$ 阶单位矩阵.

由于 f 是输出变量的自由响应项,则在 t 时刻的值可由已知数据计算得出,与优化变量 \mathbf{U}_{N_3} 无关. 故在 t 时刻控制律的求解可转换为如下标准的二次规划问题:

$$\min_{\mathbf{U}_{N_3}} J = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{N_3}^T \mathbf{U}_{N_3} + T^T \mathbf{U}_{N_3}, \quad (10)$$

满足 $\mathbf{U}_{N_3} \mathbf{v}$.

二次规划问题在一般的优化计算方法论著中都有详细介绍^[16,17],并有一些成型的优化软件包,在此不再赘述.

根据对角 CARIMA 模型的结构特点,多变量过程的参数辨识问题可转换成 n 个 m 输入单输出对象的参数辨识问题. 参数辨识方法可参阅文献[15].

3 实验研究

文献[15]的理论推导和实验结果证明,对角 CARIMA 模型多变量自适应广义预测控制算法的非约束形式是有效而可行的. 在引入系统输入输出约束后,从理论上讲算法的控制品质会有所提升.

下面用实验的方法来检验本文算法的可行性,并与文献[15]的方法进行对比. 为了叙述方便,把文献[15]方法记为 MGPC,把本文方法记为 CMGPC. 对比实验在一个由 DCS 控制的非线性多容液位系统上进行. 实验装置的详细描述参阅文献[18].

3.1 实验对象模型

实验中取被控对象的 CARIMA 模型结构为:

$$\begin{aligned} na_{11} &= na_{22} = 6, nb_{11} = nb_{12} = nb_{21} = nb_{22} = 5, nc_{11} \\ &= nc_{22} = 6. \text{ 当控制周期选为 } 5 \text{ s 时, } d_{11} = d_{12} = d_{21} \\ &= d_{22} = 0. u_1 \text{ 和 } u_2 \text{ 分别为泵 1 和泵 2 的控制量, } y_1 \end{aligned}$$

和 y_2 分别为液位高度. 受物理条件的制约, u_1 和 u_2 的实际取值限定在 50% ~ 100%.

用伪随机激励信号进行模型测试, 所得的模型参数平均值作为模型参数辨识的初值.

3.2 控制系统参数选择

依据控制周期和预测控制算法参数选择的一般原则, 采样周期为 1 s, 控制周期为 5 s, 预测时域 $N_{1_1} = N_{1_2} = 73$, 控制时域 $N_{3_1} = N_{3_2} = 18$. 实验中参考轨迹取设定值的一阶光滑近似, 柔化因子 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$. R 和 Q 为常值对角阵, 对角元素分别为 5000 和 0.01. 模型参数初值取实验平均值, 辨识方法采用带遗忘因子的最小二乘法, 遗忘因子为 0.98, 协方差矩阵初值 $P_0 = 10^4 I$ (I 为单位矩阵).

假设系统输入输出满足如下约束条件:

$$\begin{aligned} &0.255 \leq \hat{y}_1(t+i/t) \leq 0.295, \\ &i = 1, 2, \dots, N_{2_1}; \\ &0.245 \leq \hat{y}_2(t+i/t) \leq 0.285, \\ &i = 1, 2, \dots, N_{2_2}; \\ &-10\% \leq u_j(t+i) \leq 10\%, \\ &i = 0, 1, \dots, N_{3_j}, j = 1, 2; \\ &50\% \leq u_j(t+i) \leq 100\%, \\ &i = 0, 1, \dots, N_{3_j}, j = 1, 2. \end{aligned}$$

当采用无约束控制模式时, 如果输入变量的幅值和速率不满足假设条件, 则采用 cut-off 方法, 直接剪除超越约束边界的部分.

3.3 实验结果

实验分为两组: 第 1 组为 MGPC, 第 2 组为 CMGPC. 为了模拟生产中自适应控制器的在线投运过程, 在 1 ~ 600 s, 泵 1 和泵 2 输入伪随机二进制序列控制信号, 让辨识器运行起来; 在 601 ~ 900 s, 让系统平稳下来; 在 901 ~ 3000 s, 系统投入自动控制.

输出变量的实时曲线如图 1 和图 2 所示. 其中实线、点线、虚线、点划线分别为 y_1, y_2, y_1 的设定值 r_1, y_2 的设定值 r_2 的实时曲线. 输出实时曲线表明, 无论是有约束的 CMGPC 算法, 还是无约束的

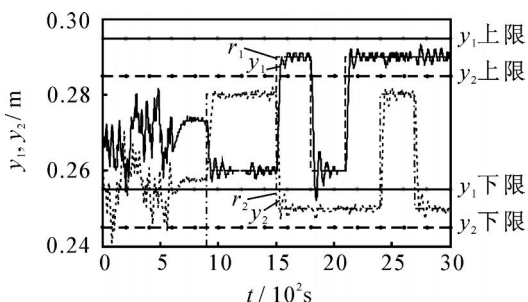


图 1 自适应 MGPC 输出

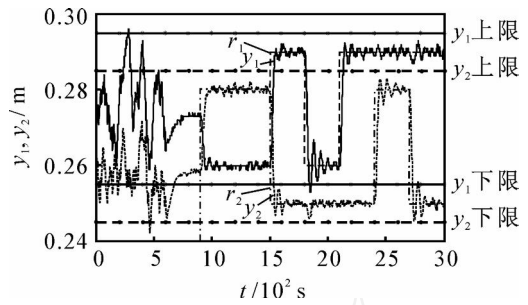


图 2 自适应 CMGPC 输出

MGPC 算法, 都取得了较为满意的控制效果.

表 1 统计了各算法中输出变量跟踪设定值的误差绝对值和与误差平方和. 统计公式分别为

$$\begin{aligned} e_{ASE_i} &= \frac{1}{k=1200} \sum_{k=1200}^{3000} |r_i(k) - y_i(k)|, \\ e_{SSE_i} &= \frac{1}{k=1200} \sum_{k=1200}^{3000} |r_i(k) - y_i(k)|^2, i = 1, 2. \end{aligned}$$

表中数据表明, MGPC 和 CMGPC 在跟踪性能方面基本一致.

表 1 输出变量跟踪设定值的误差

算 法	e_{ASE_1}	e_{ASE_2}	e_{SSE_1}	e_{SSE_2}
MGPC	3.4640	2.7230	0.0505	0.0413
CMGPC	3.4170	3.2750	0.0469	0.0479

图 3 和图 4 给出了 901 ~ 3000 s 之间输入变量的实时曲线. 其中实线、点线、点划线和虚线分别为 u_1, u_2, u_1 和 u_2 的上下限值. 图 3 中对应于被控变量设定值发生跃变的时刻, 控制变量的计算量往往超出了其上下限值; 图 4 中的所有实时曲线都在输入变量的约束范围之内, 说明有约束的控制方法能有

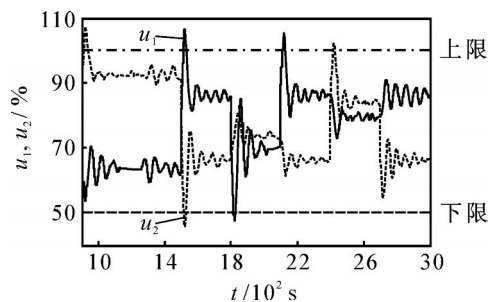


图 3 自适应 MGPC 输入

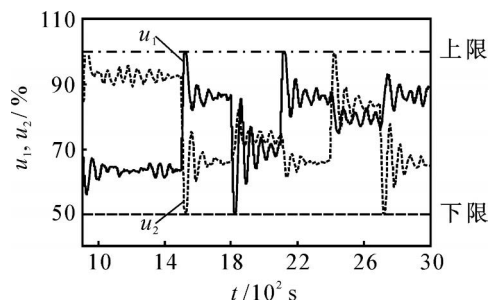


图 4 自适应 CMGPC 输入

效处理输入幅值约束问题.

图 5 和图 6 给出了 901 ~ 3000 s 之间控制增量的变化情况. 其中实线和点线分别为 u_1 和 u_2 实时变化曲线, 点划线和虚线分别为 u_1 和 u_2 的上下限. 从图 5 的实时曲线可以看出, 当被控变量设定值发生跃变时, 控制增量的计算量往往超出其上下界限; 图 6 的控制增量实时曲线都落在约束边界之内, 说明有约束的控制方法能有效处理输入变量速率约束问题.

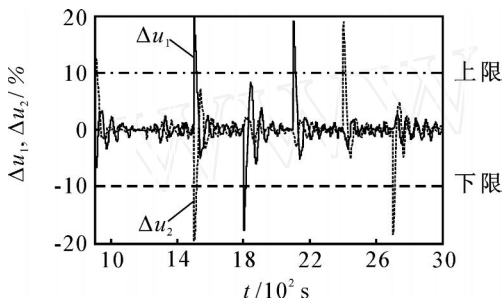


图 5 自适应 MGPC 控制增量 u_1 和 u_2

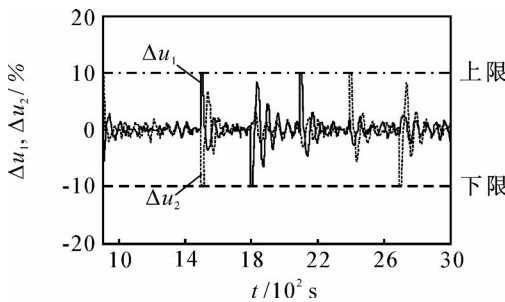


图 6 自适应 CMGPC 控制增量 u_1 和 u_2

对于有约束的算法, 当预测到输出变量在预测时域内有可能越界时, 优化求解算法将找不到可行解. 此时可采用无约束的相应算法来求解当前时刻的控制增量, 也可采用输出变量的软约束来避免此类现象的发生.

受篇幅所限, 此处没有列出参数辨识的实时变化曲线, 但表 2 统计了系统在 1200 ~ 3000 s 之间辨识模型输出预报误差绝对值和与误差平方和. 统计公式分别为

$$E_{ASE_i} = \frac{1}{t=1200} \sum_{t=1200}^{3000} |y_i(t) - \hat{y}_i(t|t-1)|,$$

$$E_{SSE_i} = \frac{1}{t=1200} \sum_{t=1200}^{3000} |y_i(t) - \hat{y}_i(t|t-1)|^2, \quad i = 1, 2.$$

表 2 辨识模型输出预报误差

算 法	E_{ASE_1}	E_{ASE_2}	E_{SSE_1}	E_{SSE_2}
MGPC	0.9570	0.8293	0.0010	0.0010
CMGPC	0.9723	0.9604	0.0012	0.0012

表 2 中的统计数据比表 1 中的统计数据小很

多, 说明辨识得到的模型能很好地描述系统的动态特性; 同时也说明, 把多输入多输出对象的辨识问题分解为多个多输入单输出对象的辨识问题, 这种策略是可行的.

4 结 论

根据对角 CARIMA 模型的结构特点, 可以极大地简化模型输出预报的计算, 从而可简化控制律的求解. 当考虑系统存在的约束时, 这种形式的模型结构进一步简化了二次规划中目标函数系数和约束条件系数的计算. 在多容液位系统上的对比实验结果表明, 无论是有约束的 CMGPC, 还是无约束 MGPC, 都能取得满意的控制效果, 但在处理输入输出约束方面, 有约束的控制算法具有明显的优势.

参考文献(References)

- [1] Dion J M, Dugard L, Nguyen Minh Tri. Multivariable adaptive control with input-output constraints[C]. 26th IEEE Conf on Decision and Control. Los Angeles, 1987: 1233-1238.
- [2] Wilkinson D J, Morris A J, Tham M T. Multivariable constrained predictive control with application to high performance distillation[J]. Int J of Control, 1994, 59 (3): 841-862.
- [3] Embirucu M, Fontes C. Multirate multivariable generalized predictive control and its application to a slurry reactor for ethylene polymerization[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61 (17): 5754-5767.
- [4] Peng H, Ozaki T, Toyoda Y, et al. Exponential ARX model-based long-range predictive control strategy for power plants[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9 (12): 1353-1360.
- [5] Ordys A W, Kock P. Constrained predictive control for multivariable systems with application to power systems [J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1999, 9 (11): 781-797.
- [6] Icev Z A, Zhao J, Stankovski M J. Supervisory-plus-regulatory control design for efficient operation of industrial furnaces [J]. Istanbul University J of Electrical & Electronics Engineering, 2004, 4 (2): 1199-1218.
- [7] Shi J J, Kelkar A G, Doloway D. Stable reconfigurable generalized predictive control with application to flight control[J]. J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2006, 128(2): 371-378.
- [8] Škrjanc. Self-adaptive generalized predictive control of batch reactor[J]. Chemical Engineering J, 2008, 136 (3): 312-319.

(下转第 341 页)

- (8): 878-882.)
- [2] 徐章艳, 刘作鹏, 杨炳儒, 等. 一个复杂度为 $\max(O(|C| \times |U|), O(|C|^2|U/C|))$ 的快速属性约简算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(3): 391-399.
(Xu Z Y, Liu Z P, Yang B R, et al. A quick attribute reduction algorithm with complexity of $\max(O(|C| \times |U|), O(|C|^2|U/C|))$ [J]. Chinese J of Computers, 2006, 29(3): 391-399.)
- [3] 杨明. 一种基于改进差别矩阵的属性约简增量式更新算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 815-822.
(Yang M. An incremental updating algorithm for attribute reduction based on improved discernibility matrix[J]. Chinese J of Computers, 2007, 30(5): 815-822.)
- [4] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets: Theory and applications[M]. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.
- [5] 雷英杰, 王宝树. 基于直觉模糊逻辑的近似推理方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 305-310.
(Lei Y J, Wang B S. Techniques for approximate reasoning based on intuitionistic fuzzy logic[J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 305-310.)
- [6] Dubois D, Prade H. Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets[J]. Int J of General Systems, 1990, 17(2): 191-209.
- [7] Radzikowska A M, Kerre E E. A comparative study of fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 126(2): 137-155.
- [8] Chris C, Cock M D, Kerre E E. Intuitionistic fuzzy rough sets: At the crossroads of imperfect knowledge [J]. Expert Systems, 2003, 20(5): 260-270.
- [9] Jensen R, Shen Q. Fuzzy-rough attribute reduction with application to web categorization [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 141(3): 469-485.
- [10] Jensen R, Shen Q. Fuzzy-rough sets assisted attribute selection[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2007, 15(1): 73-89.
- [11] Szmidi E, Kacprzyk J. Entropy for intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 118(3): 467-477.
- [12] 刘震宇, 郭宝龙, 杨林耀. 一种新的用于连续值属性离散化的约简算法[J]. 控制与决策, 2002, 17(5): 545-549.
(Liu Z Y, Guo B L, Yan L Y. A new reduction algorithm for discretization of continuous features[J]. Control and Decision, 2002, 17(5): 545-549.)

(上接第 334 页)

- [9] Su B L, Chen Z Q, Yuan Z Z. A novel algorithm of constrained multivariable fuzzy generalized predictive control for non-linear systems[J]. Int J of Modeling, Identification and Control, 2007, 2(2): 120-129.
- [10] 苏佰丽, 陈增强, 袁著祉. 多变量非线性系统的有约束模糊预测解耦控制[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 546-550.
(Su B L, Chen Z Q, Yuan Z Z. Constrained fuzzy predictive control for multivariable nonlinear systems [J]. J of Systems Engineering, 2007, 22(5): 546-550.)
- [11] 陈增强, 赵天航, 袁著祉. 基于 Tank-Hopfield 神经网络的有约束多变量广义预测控制器[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 847-852.
(Chen Z Q, Zhao T H, Yuan Z Z. The constrained multivariable predictive controller based on Tank-Hopfield neural network [J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(6): 847-852.)
- [12] Cheng L, Hou Z G, Tan M. Constrained multivariable generalized predictive control using a dual neural network [J]. Neural Computing & Applications, 2007, 16(6): 505-512.
- [13] 李少远, 席裕庚, 王群仙. 小波变换在有约束广义预测控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 166-170.
(Li S Y, Xi Y G, Wang Q X. Applications of wavelet to constrained generalized predictive control [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(2): 166-170.)
- [14] Maniar V M, Shan S L, Fisher D G, et al. Multivariable constrained adaptive GPC: Theory and experimental evaluation[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 1997, 11(4): 343-365.
- [15] 李奇安, 褚健. 对角 CARIMA 模型多变量广义预测控制[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(1): 541-545.
(Li Q A, Chu J. Multivariable generalized predictive control for diagonal CARIMA model [J]. J of Zhejiang University, 2006, 40(1): 541-545.)
- [16] Jorge Nocedal, Stephen J Wright. Numerical optimization[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [17] Fletcher R. Practical methods of optimization [M]. New York: Wiley, 1987.
- [18] 李奇安. 广义预测控制算法简化实现方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
(Li Q A. Study on simplified implementation of generalized predictive control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.)