第 20 卷 第 2 期 控 制 与 决 策 2005 年 2 月
Vol. 20 No. 2 Control and Decision Feb. 2005

文章编号: 1001-0920(2005)02-0203-04

带有输出区域控制目标特性的多变量预测控制算法

邹 涛, 李少远
(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 针对实际过程控制系统中某些被控变量没有设定值要求只有区域目标约束要求这一特点, 提出一种带有输出区域目标特性的多变量预测控制算法(ZMMPC). 该算法根据区域目标约束条件的满足情况, 将控制器的目标函数及约束条件划分为两种工作状态, 使用基于逻辑的方法完成动态控制过程中目标与约束条件的切换. 仿真实例结果表明 ZMMPC 不仅可以增加控制系统的自由度, 而且可根据被控变量的优先权进行灵活设计, 使复杂控制系统具有更好的动态和稳态控制品质.

关键词: 多变量预测控制; 区域目标; 切换控制; 混合逻辑
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Multi-variable predictive control with output zone goals

ZOU Tao, LI Shao-Yuan
(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: LI Shao-yuan, E-mail: ykzoutao@sjtu.edu.cn)

Abstract: A multi-variable model predictive control algorithm with output zone goals (ZMMPC) is proposed as some controlled variables have no set-point requests but only a zone constraint goal in the practical process control systems. ZMMPC partitions the cost function and constraint condition of controller into set-point control mode and zone control mode based on the satisfaction of the zone objective constraint condition, and fulfills the switching of the cost function and constraint condition by introducing logic indicator variables. Simulation results show that ZMMPC can not only increases the freedom of the control system but also is propitious to improve the dynamic control quality of the complex industrial system.

Key words: multi-variable predictive control; zone goals; switching control; mixed logic

1 引 言

随着复杂工业过程规模的日益庞大, 生产者对系统的控制要求往往是多方面和冲突的, 甚至是相互矛盾的, 这就要求生产工艺条件应存在一定的柔性. 即将某些被控变量的设定点要求弱化为约束条件(带状区域), 从而形成了以约束条件作为系统控制目标的优化控制问题. 作为过程工业中处理复杂约束多变量控制问题的公认标准, 预测控制算法在石油、化工等工业过程中的成功应用, 显示出预测控制强大的生命力. 然而, 预测控制无法有效地处理以约束条件为控制目标的优化问题, 只能将区域控制目标转化为系统约束条件来处理. 文献[1]给出了一种带有带状目标的预测控制算法, 该算法直接将系统带状目标转化为约束条件, 并使用带状目标约束条件代替原有的约束条件, 导致优化控制器的可行集缩小, 控制器不能处理被控变量初始点不在目标约束区域内的情况. 文献[2]给出了带有"漏斗"形状输出目标的方法, 实际上是带状目标的变形, 但同文献[1]的方法一样, 该方法同样存在可行集小的问题.

本文提出一种带有输出区域控制目标特性的多变量预测控制算法(ZMMPC). ZMMPC 在控制器

收稿日期: 2004-04-12; **修回日期**: 2004-06-22.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60474051); 国家 863 计划项目(2002AA412130).
作者简介: 邹涛(1975—), 男, 辽宁营口人, 博士生, 从事约束预测控制、非线性控制的研究; 李少远(1965—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、智能控制等研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设计过程中引入了逻辑指示变量, 将基于逻辑命题[3]的目标函数以约束条件的形式集成到预测控制优化目标和约束条件的框架下. ZMM PC 可以根据控制系统的自由度和变量的优先权, 灵活设计控制器参数, 使控制系统具有更好的动态和稳态品质.

2 带有区域目标的预测控制问题描述

本文中使用基于状态空间模型描述的预测控制算法. 假设某线性多变量系统的操作变量、状态变量和被控变量分别为 $u \in R^m, x \in R^r, y \in R^n$, 系统动态方程使用状态空间方程 Σ 表示, 则

$$\Sigma: \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \tag{1}$$

系统受到的约束为 $x \in X, u \in U, y \in Y$. 这里假设由 x, u, y 构成的约束集合定义为 Ω.

在复杂工业环境中, 性能指标和约束条件的区别趋于淡化, 某些被控变量并没有设定值. 但为了保证生产的安全运行, 只要求这些变量尽量不超出指定的安全区间(约束条件) 即可. 本文将这种被控变量记作 ZCV, 如图 1 所示.

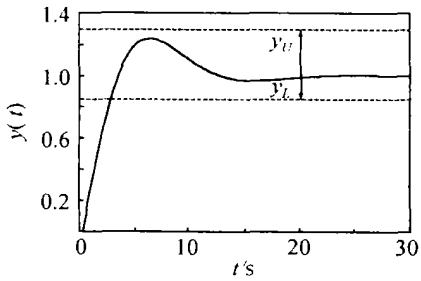


图 1 区域控制目标示意图

假设控制系统中含有 P_p 个 ZCV, 分别是 $y_{P_1}, y_{P_2}, \cdots, y_{P_p}$ $(1 \le P_1 < P_2 < \cdots < P_p < n, P_x (x = 1, 2, \cdots, p)$ 是正整数, n 是系统被控变量数目), 它们的区域控制目标为 $y_{P_xL} \le y_{P_x}(k) \le y_{P_xU}$. 为了说明 ZCV 给预测控算法带来的影响, 将MM PC 的性能指标函数按照多变量形式展开, 即

$$V(k) = \sum_{i=1}^{H_p}\sum_{j=1}^{n} \| y_j(k+i/k) - r_j(k+i/k) \|_Q^2 + \sum_{i=1}^{H_u} \| \Delta u(k+i/k) \|_R^2. \tag{2}$$

为方便起见, 将 $k+i/k$ 简记为 $k+i$.

当控制系统中含有 ZCV 时, 控制器的目标是将非 ZCV 被控变量控制到其设定点处, 而将 ZCV 控制到指定的目标区间内. 当 ZCV 满足指定的区域目标要求时, 性能指标函数(2) 中与 ZCV 相关的函数项 $V_{P_x} = \| y_{P_x}(k+i) - r_{P_x}(k+i) \|$ 取值为 0; 当超出这个区间时, V_{P_x} 不为 0, 从而对 ZCV 起到调节作用, 使其回到目标区域内. 当所有的 ZCV 都位于指定的区域内时, 性能指标函数可写作

$$V(k) = \sum_{i=1}^{H_p}\sum_{j=1, j\ne P_x}^{n} \| y_j(k+i) - r_j(k+i) \|_Q^2 + \sum_{i=1}^{H_u} \| \Delta u(k+i) \|_R^2. \tag{3}$$

ZCV 的约束条件转变为 $y_{P_xL} \le y_{P_x}(k+i) \le y_{P_xU}$, 设在此情况下系统的约束集合为 $\bar{\Omega}$. 由式(3) 可知, 由于目标函数中不再含有 y_{P_x} 项, 可认为被控变量由原来的 n 转变为 $n-p$. 因为与 ZCV 相关的函数项 V_{P_x} 取值与目标约束条件有关, 故定义 $\mathrm{V}_{P_x}(y, u)$ 为

$$\mathrm{V}_{P_x}(y, u) = \theta(y) V_{P_x}(y, u). \tag{4}$$

其中

$$\theta(y) = \begin{cases} 0, y_{P_xL} \le y_{P_x}(k+i) \le y_{P_xU}; \\ 1, \text{otherwise}. \end{cases} \tag{5}$$

3 基于逻辑目标和逻辑约束条件的 ZMM PC 算法

将 $y_{P_x}(k)$ 当前时刻或未来时刻所在位置作为切换条件, 如果 $y_{P_xL} \le y_{P_x}(k) \le y_{P_xU}$ 为真, 则相应的目标函数为(3), 约束条件为 $\bar{\Omega}$; 如果当 $y_{P_xL} \le y_{P_x}(k) \le y_{P_xU}$ 为假, 则相应目标函数为式(2), 约束集合为 Ω. 本文根据目标约束条件的满足情况给出逻辑切换条件定义, 将逻辑变量引入控制器[4] 的设计, 使得 ZMM PC 算法可根据逻辑条件在线切换控制器的目标和约束条件.

在 k 时刻, 定义逻辑指示变量 $\delta_{P_x}(k)$, 满足条件

$$[\delta_{P_x}(k) = 1] \leftrightarrow [y_{P_xL} \le y_{P_x}(k) \le y_{P_xU}]. \tag{6}$$

由于 $Y_{P_xL} \le y_{P_x}(k) \le y_{P_xU}$ 无法直接与 $\delta_{P_x}(k)$ 关联, 需引入辅助逻辑变量 $\delta_{P_{x1}}(k)$ 和 $\delta_{P_{x2}}(k)$, 即

$$\begin{aligned} &[y_{P_x}(k) > y_{P_xU}] \to [\delta_{P_{x2}}(k) = 1], \\ &[y_{P_x}(k) < y_{P_xL}] \to [\delta_{P_{x1}}(k) = 1], \\ &[y_{P_x}(k) < y_{P_xU}] \to [\delta_{P_{x2}}(k) = 0], \\ &[y_{P_x}(k) > y_{P_xL}] \to [\delta_{P_{x1}}(k) = 0]. \end{aligned} \tag{7}$$

定义 $M_y \triangleq \max\{y_{P_x}(k)\}, m_y \triangleq \min\{y_{P_x}(k)\}$, 则式(7) 可表示成如下不等式:

$$\begin{aligned} &y_{P_x}(k) - (M_y - y_{P_xU})\delta_{P_{x2}}(k) \le y_{P_xU}, \\ &-y_{P_x}(k) - (m_y + y_{P_xL})\delta_{P_{x1}}(k) \le y_{P_xL}, \\ &-y_{P_x}(k) - (m_y - y_{P_xU})(1 - \delta_{P_{x2}})(k)) \le -y_{P_xU}, \\ &y_{P_x}(k) - (M_y - y_{P_xL})(1 - \delta_{P_{x1}}(k)) \le y_{P_xL}. \end{aligned} \tag{8}$$

此外, $\delta_{P_{x1}}(k)$ 和 $\delta_{P_{x2}}(k)$ 还应满足下列逻辑关系:

$$\delta_{P_{x1}}(k) - (1 - \delta_{P_{x2}}(k)) \le 0,$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\delta_{P_{x2}}(k) - (1 - \delta_{P_{x1}}(k)) \leq 0. \tag{9}$$

由式(6) 和(7), 可进一步给出 $\delta_{P_x}(k)$ 与 $\delta_{P_{x1}}(k)$ 和 $\delta_{P_{x2}}$ 的关系, 即

$$\begin{aligned} &\delta_{P_{x1}}(k) + \delta_{P_{x2}}(k) + \delta_{P_x}(k) \geq 1, \\ &\delta_{P_x}(k) - \delta_{P_{x1}}(k) \leq 1, \\ &\delta_{P_x}(k) - \delta_{P_{x2}}(k) \leq 1. \end{aligned} \tag{10}$$

ZMMPC 的约束和目标函数由相应的逻辑条件决定, 可通过定义辅助变量 $z_{P_x}(k)$ 替代原目标函数中的 $\| y_{P_x}(k) - r_{P_x}(k) \|$, 使之与命题逻辑相关, 即

$$z_{Px}(k) = \begin{cases} 0, \delta_{P_x}(k) = 1; \\ y_{P_x}(k) - r_{P_x}(k), \delta_{P_x}(k) = 0. \end{cases} \tag{11}$$

式(11) 可进一步表示成线性整数不等式约束条件, 其中 M_z 和 m_z 分别为 $z_{Px}(k)$ 的上界和下界.

$$\begin{aligned} &m_z(1 - \delta_{P_x}) - \epsilon \leq z_{Px}(k) \leq M_z(1 - \delta_{P_x}), \\ &m_z\delta_{P_x}(k) - \epsilon \leq z_{P_x}(k) - (y_{P_x}(k) - r_{P_x}) \leq \\ &M_z\delta_{P_x}(k). \end{aligned} \tag{12}$$

目标函数(3) 可重新写作

$$\begin{aligned} V(k) = &\sum_{i=1}^{H_p}\sum_{j=1}^{n} \| y_j(k+i) - r_j(k+i) \|_{Q_1}^2 + \\ &\sum_{i=1}^{p} \| z_i(k+i) \|_{Q_2}^2 + \sum_{i=1}^{H_u} \| \Delta u(k+i) \|_R^2. \end{aligned} \tag{13}$$

基于逻辑的约束条件为

$$\begin{aligned} &y_{P_xL} + (1 - \delta_{P_x}(k))(y_{P_x\min} - y_{P_xL}) \leq \\ &y_{P_x}(k) \leq \\ &y_{P_xU} + (1 - \delta_{P_x}(k))(y_{P_x\max} - y_{P_xU}). \end{aligned} \tag{14}$$

由于控制系统中既含有连续量又含有逻辑变量, 本文采用混合逻辑动态系统的预测控制[3,4]进行控制器设计. ZMMPC 的目标函数为

$$\begin{aligned} V(k) = &\sum_{i=1}^{H_p}\sum_{j=1, j\neq Px}^{n} \| y_j(k+i) - r_j(k+i) \|_{Q_1}^2 + \\ &\sum_{i=1}^{H_p} \| z_i(k+i) \|_{Q_2}^2 + \sum_{i=1}^{H_p} \| \delta(k+i) - 1 \|_{Q_3}^2 + \\ &\sum_{i=1}^{H_u} \| \Delta u(k+i) \|_R^2. \end{aligned} \tag{15}$$

受到的约束为

$$\begin{cases} x(k+1|k) = Ax(k|k) + B_1u(k|k) + \\ \qquad B_2\delta(k|k) + B_3z(k|k); \\ y(k/k) = Cx(k|k) + D_1u(k|k) + \\ \qquad D_2\delta(k|k) + D_3z(k|k); \\ E_2\delta(k|k) + E_3z(k|k) \leq \\ E_1u(k|k) + E_4x(k|k) + E_5. \end{cases} \tag{16}$$

该优化问题是一个混合整数二次规划问题(MIQP), 可通过MIQP[4] 求解. ZMMPC 相对于文献[1,2] 的方法扩大了约束集合, 提高了优化解的可行性. 但是, ZMMPC 本身存在大量的约束条件, 因此存在优化可行性问题, 原因在于最小化开环目标性能指标可导致闭环系统位于可行集之外. 文献[5] 采用引入松弛变量将硬约束条件软化的方法来确保约束预测控制算法的优化可行性, 得到了广泛的应用. 本文提出的ZMMPC 可通过简单的变化, 在算法中引入软约束以确保解的可行性. 另一方面, 由于 ZMMPC 的设计过程中引入了逻辑变量, 从而形成了MIQP. 该问题是典型的NP-hard 问题, 随着逻辑变量的增多, 计算量将按指数增长, 所以 ZMMPC 的计算复杂性明显高于MMPC. 但文献[6] 提出一种将MIQP 转变为多参数MIQP 的方法, 从而达到了通过离线计算降低在线计算量的目的. 当多变量系统的维数较高且 ZCV 较多时, ZMMPC 可通过文献[6] 的方法进行求解.

4　仿真研究

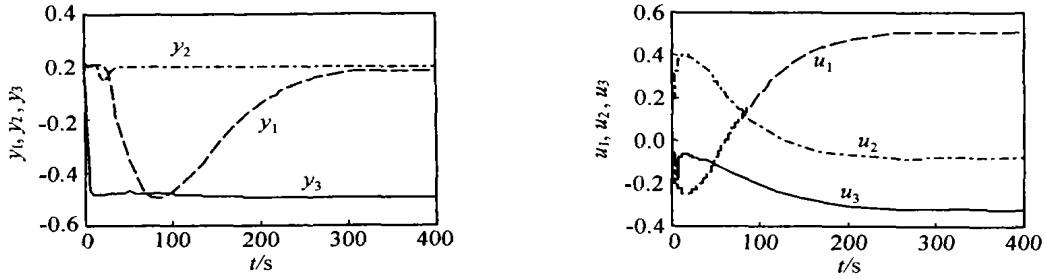
壳牌石油公司重油分馏器过程控制问题是一个标准问题[7], 重油分馏器的过程模型为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \dfrac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \dfrac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \dfrac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \dfrac{5.72e^{-14s}}{60s+1} & \dfrac{6.90e^{-15s}}{40s+1} \\ \dfrac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \dfrac{4.42e^{-22s}}{44s+1} & \dfrac{7.20}{19s+1} \end{bmatrix},$$

被控变量和操纵变量的约束范围为[-0.5, 0.5]. 系统的被控目标为: y_1 要求控制在[-0.2, 0.2], y_2 要求控制在[-0.005, 0.005], y_3 要求保持在-0.5, 系统的优先权由高到低的顺序为 y_3, y_2, y_1. 首先给出常规预测控制器的控制效果, 预测时域 $P = 8$, 控制时域 $M = 3$, 被控变量的权系数分别为 1, 2, 3, 操纵变量的权系数为 1, 1, 1. 选取 y_3, y_2, y_1 的设定值分别为 -0.5, 0, 0, 控制效果如图 2 所示. 可以看出, 尽管控制过程的稳态效果满足控制器的目标要求, 但被控变量 y_1 的动态特性较差, 原因在于 y_1 的权系数很小. 本文使用 ZMMPC 方法在控制器参数相同的情况下进行仿真, 效果如图 3 所示.

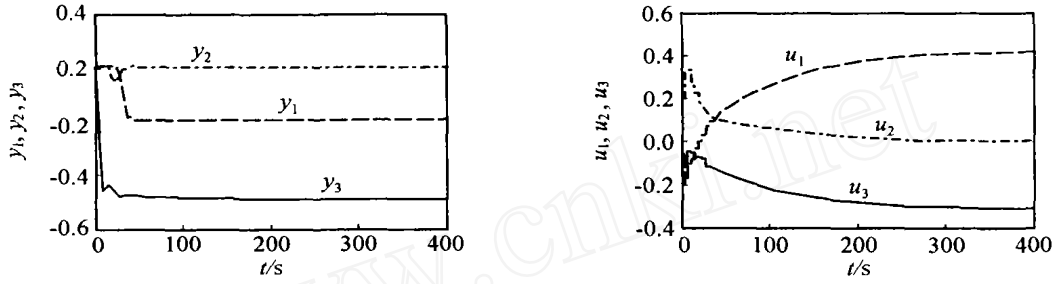
由图 2 和图 3 可见, y_1, y_2, y_3 都满足控制要求, 而且因为 ZMMPC 能够根据系统的运行状况, 动态地转化系统的目标与约束条件, 提高了系统整体的动态与稳态性能.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 被控变量曲线 (b) 操作变量曲线

图 2 MMPC 的控制效果



(a) 被控变量曲线 (b) 操作变量曲线

图 3 ZMMPC 的控制效果图

5 结 论

本文针对实际过程控制系统中某些变量没有设定值要求只有区域目标要求这一特点, 提出一种带有输出区域目标特性的 ZMMPC 算法 ZMMPC 根据区域目标约束条件的满足情况, 将控制器的目标函数及约束划分为定值控制模式和区域控制模式, 并采用基于逻辑的方法完成动态控制过程中目标与约束条件的切换 ZMMPC 在某种程度上增加了系统的自由度, 有利于提高复杂工业系统动态控制的品质 本文对一个 3×3 的系统进行仿真研究, 结果表明 ZMMPC 算法具有良好的稳态和动态性能

参考文献(References)

[1] Maciejowski J M. *Predictive Control with Constraints* [M]. London: Prentice Hall, 2002: 156-158.

[2] Qin S J, Badgwell T A. An overview of industrial model predictive control technology [A]. *Fifth Int Conf on Chemical Process Control*, CACHE: AIChE [C]. New York, 1997: 232-256.

[3] Tyler M L, Morari M. Propositional logic in control and monitoring problems [J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 565-582.

[4] Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 407-427.

[5] Scokaert P O, Rawlings J B. Feasibility issues in linear model predictive control [J]. *AIChE J*, 1999, 45(8): 1649-1659.

[6] Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Piecewise linear optimal controllers for hybrid systems [A]. *Proc of American Control Conference* [C]. Chicago, 2000: 1190-1194.

[7] Prett D M, Morari Manfred. *The Shell Process Control Workshop* [M]. Boston: Butterworths, 1987: 20-31.

(上接第 202 页)

[6] Branko Ristic, Sanjeev Arulampalam, Christian Musso. The influence of communication bandwidth on target tracking with angle only measurements from two platforms [J]. *Signal Processing*, 2001, 81(9): 1801-1811.

[7] Farina A. Target tracking with bearings only measurements [J]. *Signal Processing*, 1999, 78(1): 61-78.

[8] Fogel E, Gavish M. *N*th-order dynamics target observability from angle measurements [J]. *IEEE Trans on AES*, 1988, 24(3): 305-308.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net