文章编号: 1001-0920(2004)08-0847-05

预测控制可行性与约束优先级的混杂处理

王宇红[1,2], 黄德先[1], 高东杰[2], 金以慧[1]
(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2. 中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘　要: 针对预测控制约束不可行和优先级问题, 提出了利用混合逻辑动态(MLD)框架处理的混杂方法, 并将该方法从状态模型推广到输入输出模型, 使得该方法具有更加广泛的适用性. 通过将约束优先级表示为命题逻辑, 并将命题逻辑转化为整数不等式, 可将约束不可行和优先级问题集成在控制器中. 通过对 Wood-Berry 塔的仿真, 验证了该方法的有效性. MLD 框架为解决预测控制约束不可行和约束优先级问题提供了新途径.

关键词: 预测控制; 可行性; MLD; 优先级; 混杂系统
中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Hybrid method to handle feasibility and constraint prioritization issues in predictive control

WANG Yu-hong[1,2], *HUANG De-xian*[1], *GAO Dong-jie*[2], *JIN Yi-hui*[1]
(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China. Correspondent: WANG Yu-hong, E-mail: yuhongwang@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A hybrid method using mixed logical dynamical (MLD) framework to handle infeasibility and constraint prioritization issues in MPC is introduced and then extended from state model to input-output model. By expressing constraint priority as propositional logic and by translating propositional logic into inequalities, infeasibility and constraint prioritization issues are integrated into predictive controller. The method is implemented successfully for the first time in control simulation, especially in a Wood-Berry column simulation.

Key words: MPC; feasibility; MLD; prioritization; hybrid system

1 引　　言

预测控制技术能将约束条件引入控制器, 并作为滚动优化的组成部分. 但干扰、模型失配等因素可能导致约束条件无法满足, 使得在线优化控制器找不到可行解. 因此, 系统处理约束不可行问题是化工过程预测控制器设计中的一个重要方面.

在化工过程控制系统中, 预测控制的不可行解主要是由输出或状态变量约束引起的, 这类约束称为软"约束". 解决方法有两种, 即最短时间法和松弛变量法[1,2]. 最短时间法可使约束在最短时间 $\kappa(x)$ 后得到满足, 但 $\kappa(x)$ 时刻以前的状态可能超出约束范围; 松弛变量法将无法满足状态和输出约束松驰, 在目标函数中对松弛变量进行惩罚, 以使约束超出范围最小.

根据输出变量和状态变量的重要性, 可赋予软约束不同的优先级. 方法之一是依次放弃优先级别

收稿日期: 2003-07-17; **修回日期**: 2003-09-26.
基金项目: 国家 863 计划项目(AA413130); 国家 973 计划资助项目(2002CB312203); 中科院知识创新工程重大项目(KGCX-SW-15).
作者简介: 王宇红(1970—), 男, 河北新乐人, 博士, 从事混杂系统、预测控制等研究; 高东杰(1943—), 男, 辽宁丹东人, 研究员, 博士生导师, 从事系统辨识、过程控制等研究.

较低的约束, 直到优化求解可行, 但它可能导致输出或状态变量较大幅度地超出约束范围 文献[3]提出通过求解一系列QP 或LP 解决约束优先级问题, 但却无法保证使最大数目的低级别约束得到满足

约束的不同优先级可利用命题逻辑表示 文献[4]对含有命题逻辑的动态控制系统提出了新的系统建模与控制的框架 —— 混合逻辑动态系统MLD 框架 在MLD 系统中, 逻辑规则可通过不等式集成在控制器中, 通过统一求解可取得更好的控制性能

本文首先介绍了MLD 系统的概念和原理; 然后将文献[5]中软约束的混杂处理方法从状态模型推广到输入输出模型, 因输入输出模型更易得到, 所以本文方法具有更广泛的适用性; 最后对软约束的混杂处理方法进行仿真验证, 仿真对象为一个Wood-Berry 塔, 其结果表明该方法可有效地提高系统的控制性能

2 混合逻辑动态系统(MLD)

混杂系统指同时存在相互作用的连续动态特性和离散动态特性的系统. 其控制特征是将系统的离散事件动态特性和连续过程动态特性集成在一个框架内进行分析、综合与优化设计.

MLD 系统[4]是一种新的分析混杂系统框架, 从MLD 系统的角度看, 一个混杂控制系统如图 1 所示 它由相互作用的连续部分和离散、逻辑部分组成, 这两部分通过A/L (模拟/逻辑) 和L/A (逻辑/模拟) 连接 MLD 系统建模的思想是将A/L 和L/A 转换部分用混合整数不等式表示, 并与连续系统的动态描述相结合, 形成混合逻辑动态系统

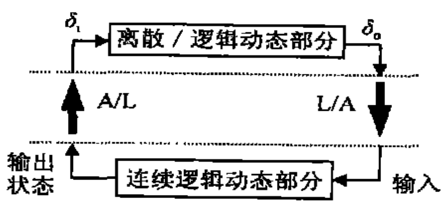


图1 混杂控制系统结构

MLD 系统框架的关键在于将命题逻辑用混合整数不等式表示 例如, 如果 $X \in (F, T)$, $\delta \in \{0, 1\}$, 则可用以下方法将命题逻辑转化为整数不等式:

$$\begin{cases} X_1 \vee X_2 \Leftrightarrow \delta_1 + \delta_2 \geq 1, \\ X_1 \wedge X_2 \Leftrightarrow \delta_1 = 1, \delta_2 = 1. \end{cases} \tag{1}$$

由此, 线性动态系统可利用一组带有不等式约束的线性动态方程描述, 而在不等式约束中, 会同时出现实型的连续变量和整型的二进制逻辑变量 MLD 系统模型的一般形式为[4]

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t), \tag{2a}$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t), \tag{2b}$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5. \tag{2c}$$

其中: $x = [x_c \quad x_l]^{\mathrm{T}}$, $x_c \in R^{n_c}$, $x_l \in \{0, 1\}^{n_l}$, $n = n_c + n_l$ 为系统状态变量; $y = [y_c \quad y_l]^{\mathrm{T}}$, $y_c \in R^{p_c}$, $y_l \in \{0, 1\}^{p_l}$, $p = p_c + p_l$ 为系统输出变量; $u = [u_c \quad u_l]^{\mathrm{T}}$, $u_c \in R^{m_c}$, $u_l \in \{0, 1\}^{m_l}$, $m = m_c + m_l$ 为系统控制输入; x_c, y_c 和 u_c 为连续变量; x_l, y_l 和 u_l 为 0-1 二进制变量; $\delta \in \{0, 1\}^{r_l}$ 为辅助逻辑变量; $z \in R^{r_c}$ 为辅助连续变量

应注意的是 x_l, y_l, u_l 为表示系统状态、输出和输入中的离散二进制变量, 而由命题逻辑转化所引入的二进制变量包含在 δ 中, 由于二进制变量的引入, 将相应地出现一些辅助连续变量 z.

混合逻辑动态模型具有一般性, 适用于许多类型的动态系统描述, 包括线性混杂系统、序惯逻辑系统、部分离散事件系统、带约束的线性系统、可用分段线性化函数近似的非线性系统等 利用MLD 模型可在一个集成的框架下比较方便地对混杂系统进行分析和综合

3 不可行问题约束优先级的混杂处理

3.1 约束预测控制的不可行问题描述

预测控制技术具有实时预测、优化、反馈校正的特点 预测控制器通过在 k 时刻对下列性能指标的优化进行控制

$$\min_{\substack{\Delta u(k), \Delta u(k+1), \\ \cdots, \Delta u(k+L-1)}} \sum_{j=1}^{M} \| \Delta u(k+j-1|k) \|_R^2 + \sum_{i=1}^{P} \| y^S(k+i) - \hat{y}(k+i|k) - y(k) + \hat{y}(k|k-P-1) \|_Q^2,$$

s.t.

$$\begin{aligned} & u_{\min} \leq u(k+j) \leq u_{\max}, j = 0, \cdots, M-1; \\ & \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{\max}, j = 0, \cdots, M-1; \\ & y_{\min} \leq y(k+i) \leq y_{\max}, i = 1, \cdots, P. \end{aligned} \tag{3}$$

其中: P 为预测时域; M 为控制时域; Q 和 R 为加权矩阵; $\Delta u(k), \cdots, \Delta u(k+M-1)$ 为优化变量; y^S 为参考输入; $\hat{y}$ 为预测输出; y 为系统的实际输出

在 k 时刻对该性能指标进行优化, 以获得控制作用序列 $\Delta u(k), \cdots, \Delta u(k+L-1)$, 取 $\Delta u(k)$ 作用

于系统. 在 k 以后时刻重复上述过程进行滚动优化.

如果系统为线性系统, 并将优化变量记为 $\Delta U(k) = [\Delta u(k), \cdots, \Delta u(k+M-1)]^{\mathrm{T}}$, 则优化指标可表示为

$$\min_{\Delta U(k)} \Delta U^{\mathrm{T}}(k) H \Delta U(k) + f^{\mathrm{T}}(k+1) \Delta U(k);$$
$$\text{s.t.}\quad C_y \Delta U(k) \le l_y, C_u \Delta U(k) \le l_u,$$
$$\Delta U_{\min} \le \Delta U(k) \le \Delta U_{\max}. \tag{4}$$

由于有约束限制, 预测控制器求解时可能存在不可行解. 对于输出约束不可行问题, 采用松弛变量法对输出约束进行松弛, 同时在优化目标中对松弛变量进行惩罚, 优化指标变为

$$\min_{\Delta U(k), \epsilon \ge 0} \Delta U^{\mathrm{T}}(k) H \Delta U(k) + f^{\mathrm{T}}(k+1) \Delta U(k) + \epsilon^{\mathrm{T}} S_\epsilon \epsilon;$$
$$\text{s.t.}\quad C_y \Delta U(k) \le l_y + C_\epsilon \epsilon, C_u \Delta U(k) \le l_u,$$
$$\Delta U_{\min} \le \Delta U(k) \le \Delta U_{\max}. \tag{5}$$

其中 ϵ 为松弛向量. 如果每个输出约束都对应一个松弛变量, 则 ϵ 的维数为 s 维, $s = P^* n_y$, n_y 为输出的维数.

引入二进制变量 δ, 定义命题逻辑

$$[\delta = 0] \leftrightarrow [\epsilon_i = 0, \forall i = 1, \cdots, s]. \tag{6}$$

同时目标函数变为

$$\min_{\Delta U(k), \epsilon \ge 0, \delta} \Delta U^{\mathrm{T}}(k) H \Delta U(k) + f^{\mathrm{T}}(k+1) \Delta U(k) + \epsilon^{\mathrm{T}} S_\epsilon \epsilon + M_\delta \delta. \tag{7}$$

通过将式(6) 转化为不等式, 并结合式(5) 和(7), 可将预测控制的不可行求解问题写成MLD 的形式进行分析和求解[4].

3.2　预测控制中约束优先级的混杂处理

在 3.1 节没有考虑约束的优先级问题, 松弛变量法无法将约束的优先级集成在控制器中, 而利用 MLD 框架则可以方便清晰地将约束的优先级集成在控制器中进行求解.

规定输出约束有 r 级, 引入 r 个 0-1 二进制变量 δ_j, $j = 1, \cdots, r$. 其中: r 为最低级别, 1 为最高级别. 根据各个约束的优先级, 将约束对应的松弛变量 ϵ 归入相应的级别; 然后定义下面的逻辑命题:

$$[\delta_1 = 0] \leftrightarrow [\epsilon_{11} = \cdots = \epsilon_{1c_1} = 0],$$
$$[\delta_2 = 0] \leftrightarrow [\delta_1 = 0] \wedge [\epsilon_{21} = \cdots = \epsilon_{2c_2} = 0],$$
$$\vdots$$
$$[\delta_r = 0] \leftrightarrow [\delta_1 = \cdots = \delta_{r-1} = 0] \wedge [\epsilon_{r1} = \cdots = \epsilon_{rc_r} = 0],$$
$$\sum_{i=1}^{r} c_1 + \cdots + c_r = s. \tag{8}$$

通过上面的命题逻辑可将约束的优先级描述为 $\delta = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \cdots \quad \delta_r]^{\mathrm{T}}$, 取优化指标为

$$\min_{\Delta U(k), \epsilon \ge 0, \delta} \Delta U^{\mathrm{T}}(k) H \Delta U(k) + f^{\mathrm{T}}(k+1) \Delta U(k) + \epsilon^{\mathrm{T}} S_\epsilon \epsilon + \rho M_\delta \sum_{i=1}^{r} \delta_i, \tag{9}$$

其中 $\epsilon = [\epsilon_{11} \quad \cdots \quad \epsilon_{1c_1} \quad \epsilon_{21} \quad \cdots \quad \epsilon_{rc_r}]^{\mathrm{T}}$.

将式(8) 的命题逻辑转化为逻辑不等式后, 结合式(5) 和(9), 约束优先级即可集成在控制器中. 式(5), (8) 和(9) 组成一个混合整数规划(MIQP) 问题, 通过求解该问题, 控制器将尽量使优先级别较低的约束得到松弛, 优先级别较高的约束得到满足.

在将命题逻辑组(8) 转化为不等式时, 需要引进新的二进制变量和连续辅助变量, 得到的不等式数目也要成倍增长. 为了降低MIQP 问题的复杂程度, 可通过指标函数中二进制变量的加权系数实现对约束的优先级调整[5]. 将式(8) 中的等价关系"↔"改为蕴含关系"→", 重写式(8) 如下:

$$[\delta_1 = 0] \to [\epsilon_{11} + \cdots + \epsilon_{1c_1} = 0],$$
$$[\delta_2 = 0] \to [\epsilon_{21} + \cdots + \epsilon_{2c_2} = 0],$$
$$\vdots$$
$$[\delta_r = 0] \to [\epsilon_{r1} + \cdots + \epsilon_{rc_r} = 0],$$
$$\sum_{i=1}^{r} c_1 + \cdots + c_r = s. \tag{10}$$

同时将优化指标重写为

$$\min_{\Delta U(k), \epsilon \ge 0, \delta} \Delta U^{\mathrm{T}}(k) H \Delta U(k) + f^{\mathrm{T}}(k+1) \Delta U(k) + \epsilon^{\mathrm{T}} S_\epsilon \epsilon + \rho M_\delta^{\mathrm{T}} \delta. \tag{11}$$

式(10) 中 ϵ_{ij} 表示在第 i 个优先级上第 j 个约束的松弛量, 第 i 个优先级共有 c_i 个约束. 如果 $\delta_i = 0$, 则第 i 个优先级上所有 c_i 个约束都能得到满足, 不需要松弛. 由式(10) 的命题逻辑转化为不等式, 其复杂程度要远远低于式(8) 的命题逻辑转化为不等式.

在优化指标(11) 中, 取二进制变量 δ 的加权系数

$$M_\delta = [2^{r-1} \quad 2^{r-2} \quad \cdots \quad 2^0]^{\mathrm{T}}. \tag{12}$$

通过式(12) 定义 M_δ, 高级别约束的满足引起优化指标减少量, 要大于满足所有低级别约束所引起的减少量. 因此, 通过式(12) 可巧妙地解决约束优先级问题, 并将约束优先级集成在控制器中.

3.3　约束满足数目的最大化

在 3.2 节中, 虽然利用MLD 框架将约束的优先级集成在控制器的求解中, 但根据式(10) 的定义, 只要在某个级别上任何一个约束不满足, 就会导致该级别上的所有约束都不满足. 为保证有最大数目

的约束得到满足, 对每个松弛变量 ϵ_j 指定一个二进制变量 δ_{ij}, 则定义逻辑命题

$$[\delta_{ij}=0]\rightarrow[\epsilon_{ij}=0],\quad i=1,\cdots,r,\ j=1,\cdots,c_i. \tag{13}$$

定义二进制向量

$$\delta=[\delta_{11}\ \cdots\ \delta_{1c_1}\ \delta_{21}\ \cdots\ \delta_{rc_r}]^{\mathrm{T}},\quad \delta\in\{0,1\}^s. \tag{14}$$

由于二进制变量数目增多, 重新定义二进制变量 δ 的加权系数

$$M_\delta=[m_1\ \cdots\ m_1\ \cdots\ m_i\ \cdots\ m_i\ \cdots\ m_r\ \cdots\ m_r]^{\mathrm{T}}=[m_1 1_{c_1}\ \cdots\ m_i 1_{c_i}\ \cdots\ m_r 1_{c_r}]^{\mathrm{T}}. \tag{15}$$

式(15) 表示第 i 个优先级对应的 c_i 个二进制变量都具有相同的加权系数 m_i, 1_{c_i} 是 c_i 维单位列向量. 为了通过 M_δ 实现约束的优先级, m_i 的选择原则是在第 i 级约束满足时, 引起的性能指标的减少要大于从 $i+1$～r 级所有约束都满足时引起的性能指标的减少. m_i 的一种定义如下:

$$m_i=1+\sum_{j=i+1}^{r}c_j m_j,\ m_r=1. \tag{16}$$

将式(13) 转化为不等式, 有

$$\epsilon\le M_\epsilon\delta, \tag{17}$$

其中 M_ϵ 为 ϵ 的最大值.

3.4 约束优先级问题的MLD 形式及求解

综合式(5), (11), (15)～(17), 含有约束优先级的预测控制可写成如下形式:

$$\begin{aligned}&\min_{\Delta U(k),\epsilon\ge 0,\delta}\Delta U^{\mathrm{T}}(k)H\Delta U(k)+f^{\mathrm{T}}(k+1)\Delta U(k)+\epsilon^{\mathrm{T}}S_\epsilon\epsilon+\rho M_\delta^{\mathrm{T}}\delta,\\ &\mathrm{s.t.}\ \ C_y\Delta U(k)\le l_y+C_\epsilon\epsilon,\\ &\quad C_u\Delta U(k)\le l_u,\\ &\quad \Delta U_{\min}\le\Delta U(k)\le\Delta U_{\max},\ \epsilon\le M_\epsilon\delta,\\ &\quad M_\delta=[m_1 1_{c_1}'\cdots m_i 1_{c_i}'\cdots m_r 1_{c_r}']^{\mathrm{T}},\\ &\quad m_i=1+\sum_{j=i+1}^{r}c_j m_j,\ m_r=1.\end{aligned} \tag{18}$$

上面优化问题是一个MIQP 问题, 定义 $\theta(k)=[\Delta U^{\mathrm{T}}(k)\ \ \epsilon^{\mathrm{T}}\ \ \delta^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 优化变量, 同时定义

$$H_1=\mathrm{diag}(H\ \ S_\epsilon\ \ 0), \tag{19a}$$

$$f_1(k+1)=[f^{\mathrm{T}}(k+1)\ \ 0\ \ \rho M_\delta^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, \tag{19b}$$

$$C=\begin{bmatrix}C_y & -C_\epsilon & 0\\ C_u & 0 & 0\\ 0 & I_\epsilon & -M_\epsilon\end{bmatrix},\ l=\begin{bmatrix}l_y\\ l_u\\ 0\end{bmatrix}. \tag{19c}$$

定义优化变量的上下限

$$\theta_{\min}=\begin{bmatrix}\Delta U_{\min}\\ 0\\ 0\end{bmatrix},\ \theta_{\max}=\begin{bmatrix}\Delta U_{\max}\\ M_\epsilon\\ 1\end{bmatrix}. \tag{19d}$$

则得到统一形式如下:

$$\begin{aligned}&\min_{\Delta U(k),\epsilon\ge 0,\delta}\theta^{\mathrm{T}}(k)H_1\theta(k)+f_1^{\mathrm{T}}(k+1)\theta(k),\\ &\mathrm{s.t.}\ \ C\theta(k)\le l,\\ &\quad \theta_{\min}\le\theta(k)\le\theta_{\max},\\ &\quad M_\delta=[m_1 1_{c_1}'\cdots m_i 1_{c_i}'\cdots m_r 1_{c_r}']^{\mathrm{T}},\\ &\quad m_i=1+\sum_{j=i+1}^{r}c_j m_j,\ m_r=1.\end{aligned} \tag{19e}$$

对于输入输出模型, 利用MLD 混杂方法处理约束不可行和优先级问题, 其标准形式如式(19) 所示.

由于混合整数规划问题的复杂性, 将其用于预测控制时, 必须考虑在线计算. 对于流程工业, 考虑到过程状态不会发生突变, 文献[6] 提出了一种Outside First 策略, 可有效地求解混合整数规划问题.

4 Wood-Berry 塔约束预测控制不可行问题的MLD 处理

Wood-Berry 精馏塔是典型的两输入两输出过程, 其传递函数矩阵形式的模型表达式为

$$\begin{bmatrix}y_1(s)\\ y_2(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \dfrac{-18.9e^{-3s}}{21.0s+1}\\ \dfrac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \dfrac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}u_1(s)\\ u_2(s)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{3.8e^{-8s}}{14.9s+1}\\ \dfrac{4.9e^{-3s}}{13.2s+1}\end{bmatrix}d(s). \tag{20}$$

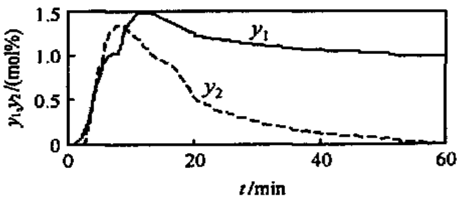
其中: y_1 和 y_2 为塔顶和塔底酒精的摩尔百分比, 稳态值分别为96.25和0.5; u_1 和 u_2 为塔顶冷回流和塔底蒸汽量, 稳态值分别为 1.95 lb/min 和 1.71 lb/min; d 是进料量, 稳态值为 2.45 lb/min. 以下均采用相对稳态值的偏差.

对输入和输出进行约束

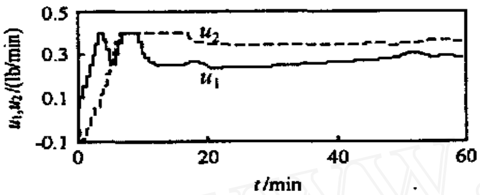
$$\begin{aligned}&0.7\le u_1(k+i)\le 0.4,\ i=0,\cdots,M-1;\\ &-1\le u_2(k+i)\le 0.4,\ i=0,\cdots,M-1;\\ &-0.5\le y_1(k+i)\le 1.2,\ i=1,\cdots,P;\\ &-0.5\le y_2(k+i)\le 1.2,\ i=1,\cdots,P;\\ &0.1T_s\le\Delta u(k)\le 0.1T_s.\end{aligned}$$

取采样周期 $T_s=0.5$ min, 预测时域 $P=12$, 控制时域 $M=4$. 控制目标是控制 y_1 维持在1, y_2 保持不变, 系统同时受阶跃扰动 $d=1$ 的影响.

由于受输出的约束, 利用QDMC 无法找到可行解. 为此将输出约束松弛, 利用松弛变量法可找到可行解. 控制效果如图 2 所示.



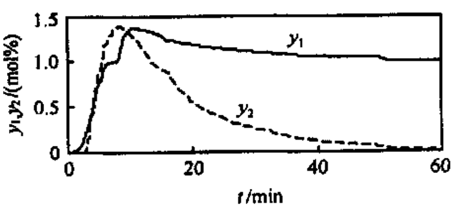
(a)　被控变量响应



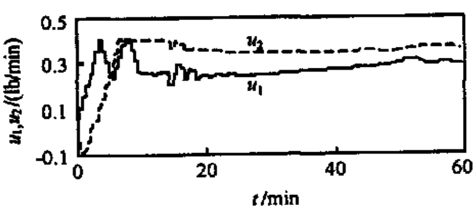
(b)　操作变量响应

图 2　松弛变量法的控制效果

利用MLD 框架解决Wood-Berry 塔的约束不可行和约束优先级问题. 取两个约束优先级, y_1 和 y_2 在 P 个预测时域内的测量分别处于第 1 和第 2 优先级. 利用 3.4 节的MLD 框架, 求解含有约束优先级的预测控制器, 控制效果如图 3 所示.



(a)　被控变量响应



(b)　操作变量变化曲线

图 3　MLD 法的控制效果

松弛变量法与MLD 方法的比较结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 与松弛变量方法相比,MLD 方法使得优先级高的变量 y_1 最大超出约束量减小, 优先级低的变量 y_2 最大超出约束量增大, 控制作用的饱和周期缩短, 系统能较快地从"瘦"变"方", 可更早地获得更多的控制自由度, 控制性能得到了改善.

表 1　松弛变量法与MLD 方法性能比较

	松弛变量法	MLD 方法	性能改善
y_1 最大超出约束量	0.5	0.39	↓ 0.11
y_2 最大超出约束量	0.15	0.19	↑ 0.04
u_1 饱和周期数	6	3	↓ 3
u_2 饱和周期数	21	15	↓ 7

5　结　　论

本文针对预测控制求解约束不可行和优先级问题, 介绍了混合逻辑动态系统处理方法, 并将该方法推广到输入输出模型. 由于输入输出模型更容易得到, 该方法具有更广泛的适用性.

当约束预测控制求解不可行时, 利用MLD 建模方法可同时将输出约束的松弛和约束的优先级集成在控制器中求解, 约束优先级通过对二进制变量的加权系数来解决, 在保证满足高优先级的约束的同时, 能最大化低优先级约束的满足数目.

通过对Wood-Berry 塔的约束预测控制进行仿真, 表明MLD 方法能有效地改善控制性能, 高优先级变量的最大约束超出量变小, 控制作用处于饱和状态的周期变短, 并增加了控制系统的自由度. MLD 混杂框架为解决预测控制约束不可行和约束优先级问题提供了一种新的有效途径.

参考文献(References):

[1] Scokaert P O M, Rawlings J B. Feasibility issues in model MPC[J]. *AIChE J*, 1999, 45(8): 1649-1659.

[2] Qin S J, Badgwell T A. An overview of industrial model MPC technology[A]. *Proc of Chemical Process Control-CPC V*[C]. Tahoe City, 1996. 232-256.

[3] Slupphaug Vada J O, Johansen T A. Efficient infeasibility handling in linear MPC subject to prioritized constraints[A]. *Proc of the European Control Conf*[C]. Karlsruhe, 1999.

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

[5] Kerrigan E C, Bemporad A, Mignone D, et al. Multi-objective prioritisation and reconfiguration for the control of constrained hybrid systems[A]. *Proc of the 2000 American Control Conf*[C]. Chicago, 2000. 1694-1698.

[6] Bemporad A, Mignone D, Morari M. An efficient branch and bound algorithm for state estimation and control of hybrid systems[A]. *Proc of the European Control Conf*[C]. Karlsruhe, 1999.