

文章编号: 1001-0920(2005)04-0388-04

## 复杂系统 CMMO 问题的软约束调整与目标协调

邹涛, 李少远

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

**摘要:** 系统地研究了在约束条件可调整的情况下 CMMO 问题中可行性与目标协调的关系, 论述了当系统优化不可行时, 在进行软约束调整的过程中要兼顾系统的期望目标, 以获得满意的优化结果。运用混合逻辑的方法描述了软约束调整的优先级, 并将多目标协调问题转化为逻辑约束满足问题, 从而系统地解决了稳态优化中软约束调整与目标协调问题。以壳牌重油分馏塔标准问题为例进行了仿真, 仿真结果表明了该算法的有效性。

**关键词:** 满意控制; 约束优先级; 目标优先级; 软约束; 混合逻辑

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Constraints adjustment and objectives coordination of CMMO problem for complex system

ZOU Tao, LI Shao-yuan

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

**Abstract:** The relationship between feasibility and objectives coordination of CMMO problem under flexible constraint conditions is discussed. That soft constraints adjustment and objective relaxation are required to get satisfying result when the optimization problem is infeasible. The mixed logic method is introduced to describe the priority of the constraints and objectives, thereby the soft constraints adjustment and objectives coordination are solved systematically in real-time dynamic optimization. Simulation is processed with the example of the shell heavy oil fractionators benchmark problem, and the result shows the validity of the algorithm.

**Key words:** satisfactory control; constraint priority; objective priority; soft constraint; mixed logic

### 1 引言

随着企业规模的扩大, 工业过程更加复杂, 复杂工业过程优化问题的目标与约束条件也越来越多, 因此优化的可行性问题已成为复杂系统优化应解决的首要问题。导致优化问题不可行的原因有很多, 主要原因之一是在传统的约束规划中, 约束条件本身是不可逾越、不可改变的, 一旦这些“硬约束”条件的交集不存在, 优化问题就不可行。但在满意控制<sup>[1]</sup>的优化问题中, 部分约束具有可调整性, 称为“软约束”; 若系统约束的边界条件可在一定的范围内取值, 将降低优化问题不可行的概率。因此, 如何利用

系统约束条件的可调整性来获得令操作者满意的优化结果, 已成为复杂系统优化亟待解决的问题。这类问题可归结为复杂工业过程在动态不确定环境下且存在约束时的多目标优化控制问题(CMMO)<sup>[2,3]</sup>。

文献[2]讨论了CMMO的可行性问题, 给出了可行性的判断及调整软约束的统一算法; 文献[3]在优化问题可行的前提下, 给出了基于灵敏度分析的目标协调方法。虽然, 文献[2,3]已经分别解决了CMMO问题的软约束调整与目标协调问题, 但二者之间的关系是单方向、不可逆的。即优化问题的可行性与目标协调问题被划分为上、下两个层面。系统自

收稿日期: 2004-06-04; 修回日期: 2004-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074004); 高等学校博士点专项科研基金项目(20020248028)

作者简介: 邹涛(1975-), 男, 辽宁营口人, 博士生, 从事复杂系统优化与控制的研究; 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

上而下地判定系统的可行性,若系统优化不可行,通过软约束调整方法构造可行集,当优化问题可行后,在可行集内寻优,而实际上,优化问题的结果与其可行集有着本质、必然的联系,因此,非常有必要在软约束的调整过程中兼顾系统期望目标。近年来,基于逻辑的方法广泛应用于复杂系统的优化和控制中<sup>[4,5]</sup>。因为该方法能够将系统的定性信息引入到优化问题中,可系统地反映系统优化问题中目标与约束之间的内在关系<sup>[5]</sup>。综上所述,本文着重研究了当系统优化不可行时的CMMO优化可行性与目标协调问题,将软约束调整方法与目标协调问题有机地结合起来,在进行系统优化可行集构造的同时,兼顾了系统的期望目标。

## 2 稳态优化的可行性与目标的关系

为了说明系统可行性与目标之间的关系,以一个多输入多输出过程为例进行说明。系统目标和其约束条件如下:

$$\begin{aligned} \min J &= \left( u_s - u_d \right)^2 / R + \left( y_s - y_d \right)^2 / Q; \\ \text{s.t. } & u_{\min} \leq u_s \leq u_{\max}, y_{\min} \leq y_s \leq y_{\max}, \\ & y_s = H u_s \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $u_s, u_d \in U \subset R^m$  为控制量;  $y_s, y_d \in Y \subset R^n$  为输出量;  $u_s, y_s$  为稳态控制量和输出量;  $H = [h_{ij}]_{n \times m}$ ;  $u_d, y_d$  为对控制量和输出量的期望值。

由系统目标  $J$  与优化可行域的关系可知,在处理复杂系统优化控制时,系统优化可行性是系统优化控制的必要条件,但对于CMMO问题,在进行系统优化可行域的设计同时,还应兼顾目标满意。因为若系统优化可行,则通过文献[3]算法可得到满足一定优先级条件的最优解。但当系统可行域远离期望目标点时,由式(1)所得的目标  $J$  的值将变得很大,从而可能导致优化结果无法令用户满意。由文献[2]可知,当优化问题不可行时,若要进行目标协调,必须使优化问题变得可行。利用[2]中人机交互的方法进行软约束调整,可通过软约束调整使系统变得可行,但该方法只能通过边界满意得出一个可行空间。对于一个多维的优化问题来说,即使一个有丰富经验的专家也很难知道通过这种人机交互的方法得到的可行空间在多位空间中到底与目标点处于何种位置关系。所以,应将期望目标点作为一种附加条件对可行性空间加以进一步的限制,即引进“目标”约束。

## 3 基于优先级策略的软约束调整

采用带有优先级策略的软约束调整方法不同于文献[2]的加权方法,它更强调优先级的思想。正如文献[1]提到在工业生产中约束调整具有优先级

的情况:当优化问题的约束可行域不存在,需要放宽某个变量,若这个变量完全放开后,仍不能满足要求,再放宽其他变量。

### 3.1 软约束调整的数学描述

文献[2]给出了一般意义下约束可调整性的数学描述,在该方法中系统输入和输出均可作为系统的可调整量。而对于工业过程的稳态优化问题,可放宽输出约束,将输入约束作为不能软化的硬约束。所以,稳态优化情况下,系统受到的等式约束、不等式约束及约束可调整性可描述如下:

$$\begin{aligned} y_s &= H u_s, u_{\min} \leq u_s \leq u_{\max}, \\ y_{\min} - \Delta y_{\min} &\leq y_s \leq y_{\max} + \Delta y_{\max}, \\ \Delta y_{\min} &\leq 0, \Delta y_{\max} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

而且对于同一变量,不可能同时违反约束的上界和下界,因此可用一个  $\epsilon$  代表  $[\Delta y_{\min}, \Delta y_{\max}]$ , 式(3)也可进一步简化为

$$\begin{aligned} y_s &= H u_s, u_{\min} \leq u_s \leq u_{\max}, \\ y_{\min} - \epsilon &\leq y_s \leq y_{\max} + \epsilon, \epsilon \in \Omega \end{aligned} \quad (3)$$

通过变量替换,式(3)可最终简化为下列形式:

$$\Omega \theta = \omega + C \epsilon \quad (4)$$

其中:  $\theta = u_s, \Omega = \begin{bmatrix} - & H \\ & H \end{bmatrix}, \omega = \begin{bmatrix} - & y_{\min} \\ & y_{\max} \end{bmatrix}, \epsilon$  与  $\omega$  同维。

### 3.2 基于优先级的可行性判定与软约束调整方法

将  $y_s = H u_s$  带入目标函数(1),并展开,则稳态优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min_{\theta} & (1/2) \theta^T \Phi \theta \\ \text{s.t. } & \Omega \theta = \omega \end{aligned} \quad (5)$$

罚函数法是处理约束不可行的一种理想方法<sup>[6]</sup>。该方法在原优化问题的目标函数上增加一个约束违反的罚函数项,优化问题形如

$$\begin{aligned} \min_{\theta} & (1/2) \theta^T \Phi \theta + \epsilon^T C \epsilon \\ \text{s.t. } & \Omega \theta = \omega + C \epsilon, \epsilon \in \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $\epsilon$  为一个与  $\omega$  同维非负向量;  $C$  为由0或1组成的向量;0代表该项约束不能软化;1代表该约束可以软化;  $\Phi$  为相应的惩罚加权矩阵,目的是要尽量小地破坏初始约束集合。

为了能更加清晰地反映出操作者调整软约束的意向,将根据操作者的意愿,设定最愿意接受的待调整约束的优先权为最高,最不愿意接受的约束的优先权为最低,然后使用逻辑变量表征可调约束的优先权,将其转化为线性整数不等式,作为优化问题附加约束。设软约束调整的优先权级别为  $p$  级,相应地,引进  $p$  个逻辑变量  $\delta_i$  和松弛变量  $\epsilon_i, i = 1, 2, \dots, p$ 。  $\delta_i$  是表征优先权为  $i$  的约束是否被破坏的0-1指

示变量,  $\delta_i = 1$  表示约束被破坏,  $\delta_i = 0$  表示该约束满意. 下式以逻辑命题的形式说明了上述逻辑关系:

$$\begin{cases} [\delta_i = 0] \leftrightarrow [\epsilon_i = 0], \epsilon_i > 0; \\ [\delta_{i+1} = 0] \leftrightarrow [\delta_i = 0] \end{cases} \quad (7)$$

综合松弛变量的逻辑描述与约束界, 可得出下列线性混合逻辑不等式:

$$\begin{cases} \epsilon_i - M_i \delta_i \leq \epsilon_i - m_i \delta_i, \\ y_i - y_{\max} - \epsilon_i - M_i(1 - \delta_i), \\ -y_i + y_{\min} - \epsilon_i - m_i(1 - \delta_i), \\ \delta_{i+1} - \delta_i \leq 0, \epsilon_i \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

这里  $M_i \triangleq \max \epsilon_i, m_i \triangleq \min \epsilon_i$

$$M_i \triangleq \max (y_i - y_{\max} - \epsilon_i),$$

$$m_i \triangleq \min (y_i - y_{\min} + \epsilon_i).$$

相应的优化问题转变为

$$\begin{aligned} \min_{\epsilon, \delta} (1/2) \theta^T \Phi \theta + \epsilon^T \quad \epsilon + N \sum_{i=1}^p \delta_i, \\ \text{s.t. 式(3)和式(8)}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $N$  为常数, 一般  $N > \max (1/2) \theta^T \Phi \theta$

文献[6]提出对二次规划的罚函数加权项的下界进行判定的方法. 当加权项大于这个界就能保证在优化问题可行时, 使用罚函数法与不带惩罚项的优化问题具有相同的解. 如果仅考虑优化问题的可行性, 则可去掉目标函数(9)中的  $(1/2) \theta^T \Phi \theta$ , 留下剩余的两项. 其意义可理解为按照优先级的策略进行软约束调整, 并最小地破坏初始约束条件. 即形成如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\epsilon, \delta} \epsilon^T \quad \epsilon + N \sum_{i=1}^p \delta_i, \\ \text{s.t. 式(3)和式(8)}. \end{aligned} \quad (10)$$

若优化问题(10)有最优解  $w = 0$ , 则CMMO问题是可行的. 因为  $\epsilon_i > 0, \delta_i$  为一个逻辑变量, 值为0或1, 所以当目标函数的值为0时,  $\epsilon_i = 0$  且  $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_p = 0$ , 就说明CMMO问题是可行的.

用户可根据自己的意愿设定优先级和判断解的优劣, 不断地进行调整, 直至用户满意为止; 若所有的可调整约束均变成硬约束, 原问题仍得不到可行解, 则可认为该问题的自由度不够, 不能满足控制的要求, 需要增加自由度<sup>[2]</sup>.

#### 4 基于优先级策略的目标约束满足问题

工业环境下的优化问题, 其性能和约束的区别已经淡化并在一定条件下可相互转化<sup>[2,3]</sup>. 性能指标的最小化可理解为取值为0的“软”约束, 反之, 也可将各种约束看作控制必须满足或尽可能满足的目标. Tyler提出利用将目标转化为约束的方法解决多目标优化问题<sup>[5]</sup>, 正是CMMO思想的具体表现形式.

首先可采用该方法将目标转化为约束, 以实现基于优先级策略的目标满足问题.

如式(1)中的二次目标函数

$$\min J = (u_s - u_d)^2 / k + (y_s - y_d)^2 / \rho,$$

其目的是为了极小化  $u_s$  与  $u_d, y_s$  与  $y_d$  之间的差, 这种目标可转化为不等式约束形式<sup>[5]</sup>, 并可根据实际的要求设定目标的优先级. 设第  $i$  级优先权的目标  $y_{si}$  应等于它的期望值  $y_{di}$ , 利用逻辑变量  $\delta_i = 1$  表示; 第  $i + 1$  级优先权的目标  $y_{s(i+1)}$  应等于它的期望值  $y_{d(i+1)}$ , 利用逻辑变量  $\delta_{i+1} = 1$  表示.  $i$  高于  $i + 1$  代表的优先级, 可将上述多目标问题表述如下:

$$\min_{\eta, \delta} \begin{cases} [\delta_i = 1] \quad [-\eta_i \quad y_{si} - y_{di} \quad \eta_i], \\ [\delta_{i+1} = 1] \\ [-\eta_{i+1} \quad y_{s(i+1)} - y_{d(i+1)} \quad \eta_{i+1}], \\ [\delta_{i+1} = 1] \quad [\delta_i = 1] \end{cases} \quad (11)$$

这里  $\eta$  为很小的常数. 通过混合逻辑线性变换, 可将式(11)转化为相应的实、整数不等式条件. 将系统目标转化为系统的一组约束条件. 一般地, 随着约束不等式条件的增加, 系统的可行性将随之下降, 即解空间变小. 可能出现在现有约束域内不能满足目标的情况, 解决该问题采用在约束条件上增加松弛变量  $\epsilon$  的方法. 引入松弛变量的实质是对系统目标进行软化, 以实现基于优先级策略的目标约束满足问题.

$$\min_{\eta, \delta} \begin{cases} [\delta_i = 1] \\ [-\eta_i - \epsilon_i \quad y_{si} - y_{di} \quad \eta_i + \epsilon_i], \\ [\delta_{i+1} = 1] \quad [-\eta_{i+1} - \epsilon_{i+1} \\ y_{s(i+1)} - y_{d(i+1)} \quad \eta_{i+1} + \epsilon_{i+1}], \\ [\delta_{i+1} = 1] \quad [\delta_i = 1] \end{cases} \quad (12)$$

#### 5 基于优先级策略的软约束调整与目标约束的组合排序

本文已分别给出基于优先级策略的软约束调整和目标约束满足问题, 但它们只是稳态优化算法的两个独立的部分, 不能解决实时优化问题. 稳态优化问题需要考虑系统的目标与约束之间的关系, 广义地说, 可将它们均看作是优化问题的要求, 但要求重要程度不同. 因此, 软约束调整和目标约束满足问题需要根据系统的实际情况, 判断各个约束与目标处于系统的要求等级, 按照要求等级分配优先级, 并根据优先级定义整数变量, 从而形成了一个混合整数规划问题. 该问题的数学描述如下:

$$\text{目标: } \min \epsilon^2 + N \sum_{i=1}^p \delta_i, \quad (13)$$

其约束条件包括: 系统硬约束、软约束和目标转化约

束 该问题是一个混合整数二次规划问题, 可使用 M Q P<sup>[7]</sup> 工具箱进行计算

### 6 算 例

石油公司的重油分馏塔过程控制问题是一个标准的多变量约束优化控制问题<sup>[8]</sup>。分馏塔设备有 3 个产品抽取出口, 3 个返塔循环回流。经济性能和操作条件将决定分馏塔顶部和侧线抽出产品的性能要求, 底部抽取液无性能要求, 但分馏塔底部有温度操作约束。3 个流通回路进行换热以达到产品分离的目的。这些回路通过换热器的取热作用完成对分馏塔其他部分的加热沸腾作用。所以, 它们有变热负荷的要求。底部回路有一个焓控制器, 可以通过调整流量来达到调节热交换的目的。热负荷可作为分馏器的一个控制变量。其他两个回路的热负荷作为系统的扰动。

文献[8] 给出了重油分馏塔的过程稳态模型

$$y_s = \begin{bmatrix} 4.05 & 1.77 & 5.88 \\ 5.39 & 5.72 & 6.90 \\ 4.38 & 4.42 & 7.20 \end{bmatrix} u_s + \begin{bmatrix} 1.20 & 1.44 \\ 1.52 & 1.83 \\ 1.14 & 1.26 \end{bmatrix} d$$

其中: 过程的输入包括: 分馏塔的塔顶产品提取率  $u_1$ , 分馏塔侧线抽出率  $u_2$ , 分馏器底的回流热负荷  $u_3$ 。过程的输出包括: 分馏塔塔顶产品的提出成分  $y_1$ , 分馏塔侧线抽出成分  $y_2$ , 分馏器底的回流温度  $y_3$ ;  $d_1$  和  $d_2$  为系统扰动。附加条件: 系统各个变量已进行归一化处理, 系统输入约束和输出约束均为  $[-0.5, 0.5]$ , 系统采样时间为 4 m in。

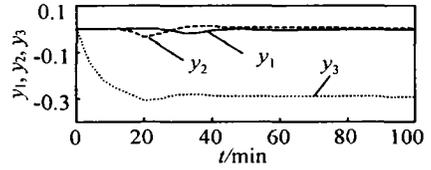
下面通过两个例子说明稳态优化时可能出现的情况

1) 假设系统的当前状态都位于原点, 系统的期望控制目标分别为  $y_1 = y_2 = 0$  和  $y_3 = -0.3$ 。这种期望控制目标满足系统稳态方程要求及系统的约束条件, 可直接作为系统的设定值进行控制。系统控制级采用预测控制算法进行多变量控制, 相应的控制效果如图 1 所示。

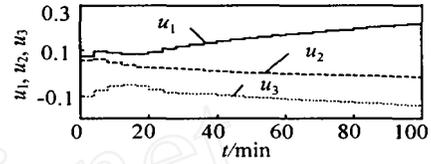
2) 以第 1 种情况的系统稳态值作为系统的初始状态, 假设系统的期望控制目标为  $y_1 = y_2 = 0.3$  和  $y_3 = -0.3$ , 且系统存在阶跃扰动  $d = [0.6 \ 0.5]^T$ , 通过可行性分析可知, 系统的优化问题不可行, 需重新进行稳态优化。

根据分馏塔生产工艺的特点, 控制目标的优先级一般设定为塔顶产品质量目标  $y_1$ , 分馏塔侧线抽出产品质量  $y_2$ , 塔底部问题  $y_3$ , 即

- 1)  $|y_1 - 0.3| \quad \eta$
- 2)  $|y_2 - 0.3| \quad \eta$
- 3)  $|y_3 + 0.3| \quad \eta$



(a) 分馏塔输出曲线



(b) 分馏塔控制输入曲线

图 1 第 1 种情况下的控制效果

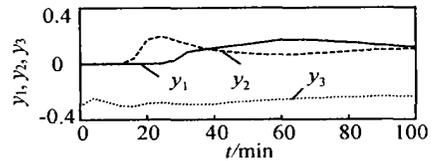
将目标与约束软化按用户的意愿进行优先级排序, 假设设定优先级次序如下:

- 1)  $|y_1 - 0.3| \quad \eta$
- 2)  $|y_2 - 0.3| \quad \eta$
- 3)  $y_1$ ; 4)  $y_2$ ; 5)  $y_3$ ;
- 6)  $|y_3 + 0.3| \quad \eta$

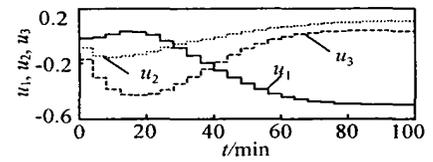
设  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$  表示优先级的满意情况。优化结果为

$$u_s = [-0.5 \ 0.05 \ 0.1]^T, \quad y_s = [0.1037 \ 0.1083 \ 0.0661]^T$$

可见, 操作变量  $u$  满足系统硬约束, 被控变量  $y$  也接近用户要求。由第 1 种情况的系统稳态值过渡到新的被控目标控制效果如图 2 所示。



(a) 分馏塔输出曲线



(b) 分馏塔控制输入曲线

图 2 第 2 种情况下的动态优化控制效果

### 7 结 论

本文针对复杂系统优化控制 CMMO 的软约束调整与目标协调问题, 给出了当系统出现优化不可行情况时的软约束调整与目标协调算法。将多目标协调问题转化为逻辑约束满足问题, 并运用混合逻辑的方法表示软约束调整的优先级, 从而系统地解决了稳态优化中软约束调整与目标协调的问题。

(下转第 397 页)

- triple inverted pendulum [J]. *Int J of Control*, 1984, 39 (6): 1351-1365
- [2] Zhang H X, Ma X W, Xu W. Design fuzzy controllers complex systems with an application to 3-stage inverted pendulums [J]. *Information Sciences*, 1993, 72: 271-284
- [3] 张乃尧, Ebert C, Belschner R, 等. 倒立摆的双闭环模糊控制[J]. *控制与决策*, 1996, 11(1): 85-88  
(Zhang N Y, Ebert C, Belschner R, et al Fuzzy cascade control of an inverted pendulum [J]. *Control and Decision*, 1996, 11(1): 85-88)
- [4] 肖军, 张石, 徐心和. 四级倒立摆系统的模糊控制方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2001, 13(6): 752-755  
(Xiao J, Zhang S, Xu X H. Fuzzy control of the four level inverted pendulum [J]. *System Simulation*, 2001, 13(6): 752-755)
- [5] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制[J]. *中国科学(E 辑)*, 2002, 32(1): 65-75  
(Li H X, Miao Z H, Wang J Y. Variable universe adaptive fuzzy control on the quadruple inverted pendulum [J]. *Science in China (Ser E)*, 2002, 32(1): 65-75)
- [6] Anderson C W. Learning to control an inverted pendulum with neural networks [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1989, 9(3): 31-36
- [7] 张明廉, 郝健康, 何卫东, 等. 拟人智能控制与三级倒立摆[J]. *航空学报*, 1995, 16(6): 654-661  
(Zhang M L, Hao J K, He W D, et al Human-imitating intelligent control and triple inverted pendulum [J]. *Acta Aeronautica and Astronautica Sinica*, 1995, 16(6): 654-661)
- [8] Cheng F Y, Zhong G M, Li Y S. Fuzzy control of a double-inverted pendulum [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 79: 315-321
- [9] 王加银. 基于变论域自适应模糊控制的倒立摆仿真与实物实现[D]. 北京: 北京师范大学, 2002
- [10] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. *中国科学(E 辑)*, 1998, 28(3): 259-267.  
(Li H X. Interpolation mechanism of fuzzy control [J]. *Science in China (Ser E)*, 1998, 28(3): 259-267.)

(上接第 391 页)

### 参考文献(References)

- [1] 李少远, 席裕庚. 模糊动态环境下复杂系统的满意优化控制[J]. *自动化学报*, 2002, 28(3): 408-412  
(Li S Y, Xi Y G. Satisfactory optimization control in fuzzy dynamic environment for complex systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3): 408-412)
- [2] 席裕庚, 谷寒雨. 有约束多目标多自由度优化控制的可行性分析及软约束调整[J]. *自动化学报*, 1998, 24(6): 726-731.  
(Xi Y G, Gu H Y. Feasibility analysis and soft constraints adjustment of CMMO [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(6): 726-731.)
- [3] 席裕庚, 谷寒雨. CMMO 中基于灵敏度分析的目标协调[J]. *中国科学(E 辑)*, 1998, 28(5): 417-424  
(Xi Y G, Gu H Y. Sensitivity analysis based objective coordination of constrained multi objective multi degree of freedom optimization [J]. *Science in China*, 1998, 28(5): 417-424)
- [4] Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 407-427.
- [5] Tyler M L, Morari M. Propositional logic in control and monitoring problems [J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 565-582
- [6] Kerrigan E C, Maciejowski J M. Soft constraints and exact penalty functions in model predictive control [A]. *Proc UKACC Int Conf [C]*. Cambridge, 2000
- [7] Raman R, Grossmann I E. Relation between MLP modeling and logical inference for chemical process synthesis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1991, 15(2): 73-84
- [8] Prett D M, Morari M, Manfredi M. *The shell process control workshop* [M]. Boston: Butterworths, 1987: 20-31.