



模糊动态环境下复杂系统的 满意优化控制¹⁾

李少远 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)

(E-mail: syli@mail.sjtu.edu.cn)

摘要 提出一种在满意控制框架下进行模糊决策的方法,将控制目标和系统约束模糊化,形成多目标的优化问题,通过模糊规划方法求解,与基于二次型性能指标的预测控制相比,该方法可使得系统设计更灵活.

关键词 模糊预测控制,模糊目标,模糊约束,优化

中图分类号 TP273

SATISFACTORY OPTIMIZATION CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS IN FUZZY DYNAMIC ENVIRONMENT

LI Shao-Yuan XI Yu-Geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(E-mail: syli@mail.sjtu.edu.cn)

Abstract This paper investigates the use of fuzzy decision making in predictive control. The use of fuzzy goals and fuzzy constraints in predictive control allows of a more flexible aggregation of the control objectives than the usual weighting sum of squared errors. Compared to the standard quadratic objective function, with the fuzzy decision making approach, the designer has more freedom in specifying the desired process behavior.

Key words Fuzzy predictive control, fuzzy goals, fuzzy constraints, optimization

1 引言

工业过程的对象一般很难以精确的数学模型描述,基于精确数学模型的控制方法在应

1) 国家自然科学基金(60074004,69934020)和上海市曙光计划资助

收稿日期 1999-08-09 收修改稿日期 2000-04-11

用上受到很大限制,尤其对复杂非线性或部分未知的工业系统控制问题,经典的线性控制理论往往受到限制或只能应用于局部线性的情况,不能得到全局工况的满意控制.此外,工业环境中存在着各种扰动,对过程动态带来很大影响.由于机构、能量、工艺条件以及安全性等方面的考虑,工业过程中的物理量受到形式多样的约束,使得控制器的控制动作受到限制.复杂工业过程的规模日益庞大,生产者已不可能对生产全部过程参数提出控制要求,转而根据生产要求提出不同指标,并尽可能综合考虑这些指标的优化,从而构成了在动态环境下的满意控制问题^[1,2].

本文针对复杂工业过程在模糊环境中存在生产约束时的满意控制问题,将系统约束和控制目标模糊化,将模糊环境中有限时域的优化问题转化为等价的确定性规划问题,提出一种解决复杂工业过程在模糊动态环境下的满意优化控制方法.

2 问题的描述

在传统的约束规划中,约束条件本身是不能逾越、不能改变的,但在满意控制的优化问题中,部分约束具有可调整性,称为“软约束”.这样,每一个约束变量都具有在一定范围内可调整的性质,并且用一个函数反映用户对于约束变量界域的模糊性.我们可以用模糊变量来描述这一特性,对于模糊变量 \bar{b} 可以定义隶属度函数 $\mu(\bar{b})$ ($0 \leq \mu \leq 1$) 来反映该变量隶属于某一集合的程度.一种模糊约束边界的隶属度函数取为线性函数,可用式

$$\mu(\bar{b}) = \begin{cases} 0, & b_k < b_{\min} - p_1 \\ 1 - \frac{b_{\min} - b_k}{p_1}, & b_{\min} - p_1 \leq b_k < b_{\min} \\ 1, & b_{\min} \leq b_k \leq b_{\max} \\ 1 - \frac{b_k - b_{\max}}{p_2}, & b_{\max} < b_k \leq b_{\max} + p_2 \\ 0, & b_{\max} + p_2 < b_k \end{cases} \quad (1)$$

来表示.这里 p_1, p_2 称为模糊宽度或容忍宽度; b_{\min}, b_{\max} 均称为模糊量 \bar{b} 的期望界限.显然,模糊宽度等于零的情况就对应于“硬约束”.

我们可以先设定一系列模糊变量,在满意控制问题中通常是需要调整的约束边界、控制算法参数等.实际在线运算时,需要解决的是边界条件模糊时的滚动优化问题,也就是模糊约束优化问题.

3 满意控制中系统约束的模糊化处理

3.1 模型预测控制

满意控制是基于模型的预测控制,其本质是利用系统的预测信息,在有限时域内对某一性能指标进行优化.为了克服系统的不确定性,在预测控制中采用滚动优化策略.系统的预测输出 $\hat{y}(k+i)$ ($i = N_1, \dots, N_2$) 是由系统当前时刻 t 的信息和未来的控制信号 $u(k+i)$ ($i = 1, \dots, N_u$) 得到的,其中 $[N_1, N_2]$ 为系统的预测时域,优化目标为

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} (\hat{e}(k+i))^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda_i (\Delta u(k+i-1))^2 \quad (2)$$

其中 $\hat{e}(k+i)$ 为系统的预测误差, $\Delta u(k+i-1)$ 为系统控制增量, λ_i 为控制增量的加权系数.

对于用 CARIMA 模型描述的系统

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})\xi(t)}{\Delta} \quad (3)$$

系统的预测方程为 $\hat{y} = G\tilde{u} + f$, 其中 $\hat{y} = [\hat{y}^T(t+1|t), \dots, \hat{y}^T(t+N_2/t)]^T$, $(1 \times N_2 p)$, $\tilde{u} = [\Delta u^T(t), \dots, \Delta u^T(t+N_u)]^T$, $(1 \times N_u m)$, $f = [f_1^T(t), \dots, f_{N_2}^T(t)]^T$, $(1 \times N_2 p)$. 其控制律为

$$u(t) = u(t-1) + g^T(w - f) \quad (4)$$

其中 g^T 是矩阵 $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$ 的前 m 行, 其参数的意义参见文献[3].

3.2 模糊约束的处理

本节具体讨论如何解模糊边界优化问题. 首先考虑到约束方程中的控制变量 u 和输出变量 y 在 GPC 算法^[4]滚动优化的求解过程中都是由控制变量的变化率 Δu 决定的. 边界条件可表示为

$$A\Delta u \leq B(t) \quad (5)$$

$$\text{其中 } A = [C_1^T \quad -C_1^T \quad C_2^T \quad -C_2^T \quad C_3^T \quad -C_3^T]^T \quad (6)$$

$$B(t) = [B_1(t) \quad B_2(t) \quad B_3(t) \quad B_4(t) \quad B_5(t) \quad B_6(t)]^T \quad (7)$$

$$\Delta u = [\Delta u^T(t+1), \dots, \Delta u^T(t+N_u)]^T \quad (8)$$

这里各矩阵定义如下:

$$C_1 = I, \quad (mN_u \times N_u);$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ I & \dots & \dots & I \end{bmatrix}, \quad (mN_u \times mN_u);$$

$$C_3 = G, \quad (p(N_2 - N_1 + 1) \times mN_u);$$

$$B_1(t) = [u_{\max}^T, \dots, u_{\max}^T]^T, \quad (mN_u \times 1);$$

$$B_2(t) = [-u_{\min}^T, \dots, -u_{\min}^T]^T, \quad (mN_u \times 1);$$

$$B_3(t) = [(\Delta u_{\max} - u(t-1))^T, \dots, (\Delta u_{\max} - u(t-1))^T]^T, \quad (mN_u \times 1);$$

$$B_4(t) = [(-\Delta u_{\min} + u(t-1))^T, \dots, (-\Delta u_{\min} + u(t-1))^T]^T, \quad (mN_u \times 1);$$

$$B_5(t) = [(y_{\max} - f_{N_1}(t))^T, \dots, (y_{\min} - f_{N_2}(t))^T]^T, \quad (p(N_2 - N_1 + 1) \times 1);$$

$$B_6(t) = [(-y_{\min} + f_{N_1}(t))^T, \dots, (-y_{\min} + f_{N_2}(t))^T]^T, \quad (p(N_2 - N_1 + 1) \times 1).$$

注意到, 对于控制量和控制量变化率的约束应考虑将来 N_u 个周期, 而对于输出量的约束则应考虑在将来第 N_1 个周期到第 N_2 个周期. 从计算角度来看, 解有约束的最优化问题的计算复杂度与约束条件的个数有很大关系. 因此, 有些情况下可只考虑最近几个周期的约束, 以减少计算量.

另外, 因为式(5)中的 $B(t)$ 是由原先的边界条件(1)转换而来的, 而且转换只是一系列的平移和取反, 所以如果从模糊边界条件出发, 得到的 $\tilde{b}(t)$ 从形式上仍与非模糊约束一样, 而且各模糊量的模糊宽度不加改变, 用下式来表达

$$A\Delta u(t) \leq \tilde{b}(t) \quad (9)$$

4 基于模糊规划的优化算法

首先,由式(1)注意到

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & a_i\Delta u(t) \leq b_i(t) \\ 1 - \frac{a_i\Delta u(t) - b_i(t)}{p_i}, & b_i(t) < a_i\Delta u(t) \leq b_i(t) + p_i \\ 0, & b_i(t) + p_i < a_i(t)\Delta u(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中 a_i 是矩阵 A 的第 i 行向量, b_i 是模糊向量 \tilde{b} 的第 i 个元素的期望值, μ_i 是相应的隶属度. 优化变量可定义为

$$\mu = \min_{\alpha} \mu_i \quad (11)$$

优化问题表示为

$$\max \tilde{J} = \mu, \quad \mu \leq \mu_i, \quad \forall b_i \quad (12)$$

从 $b_i(t) < a_i\Delta u(t) \leq b_i(t) + p_i$ 区间入手,代入消去 μ_i ,上面的不等式可以化为

$$\mu \leq 1 - \frac{a_i\Delta u(t) - b_i(t)}{p_i}, \quad \forall b_i \quad (13)$$

也就是

$$a_i\Delta u(t) + p_i\mu \leq b_i(t) + p_i \quad (14)$$

定义矩阵 $\bar{A}, \bar{B}(t)$ 为

$$\bar{A} = [A \quad P], \quad \bar{B}(t) = B(t) + P \quad (15)$$

并定义优化变量 x 为

$$x = [\Delta u(t)^T \quad \mu]^T \quad (16)$$

则模糊规划问题就可非模糊化为以下标准规划问题

$$\max \tilde{J} = \mu, \quad \bar{A}x \leq \bar{B} \quad (17)$$

该算法的核心思想是针对复杂工业过程在模糊不确定性环境中存在生产约束时的满意控制问题,在预测控制的框架下把具有模糊边界约束的有限时域的优化问题转化为等价的确定性规划问题.

5 仿真结果

根据上述分析,在 MATLAB 环境下建立系统仿真结构,取控制系统传递函数为 $\frac{s-0.5}{s^3+s^2+1}$ 的 SISO 对象,它是一个非最小相位开环不稳定对象,参考输入为阶跃输入,仿真结果如图 1 所示.

系统的控制量约束为 $[-1.7, 0]$,控制增量约束为 $[-1, 1]$,输出量约束为 $[0, 1.2]$,它们对应的模糊宽度均为 0.3. 图 1(a)是系统的阶跃响应,图 1(b)是系统的满意度,在此组约束条件下,系统的输出和控制量没有受到限制,在优化过程中,系统的满意度逐渐增大,最终达到 1. 系统在另外一组约束条件下,控制量约束为 $[-1.5, 0]$,控制增量约束为 $[-1, 1]$,

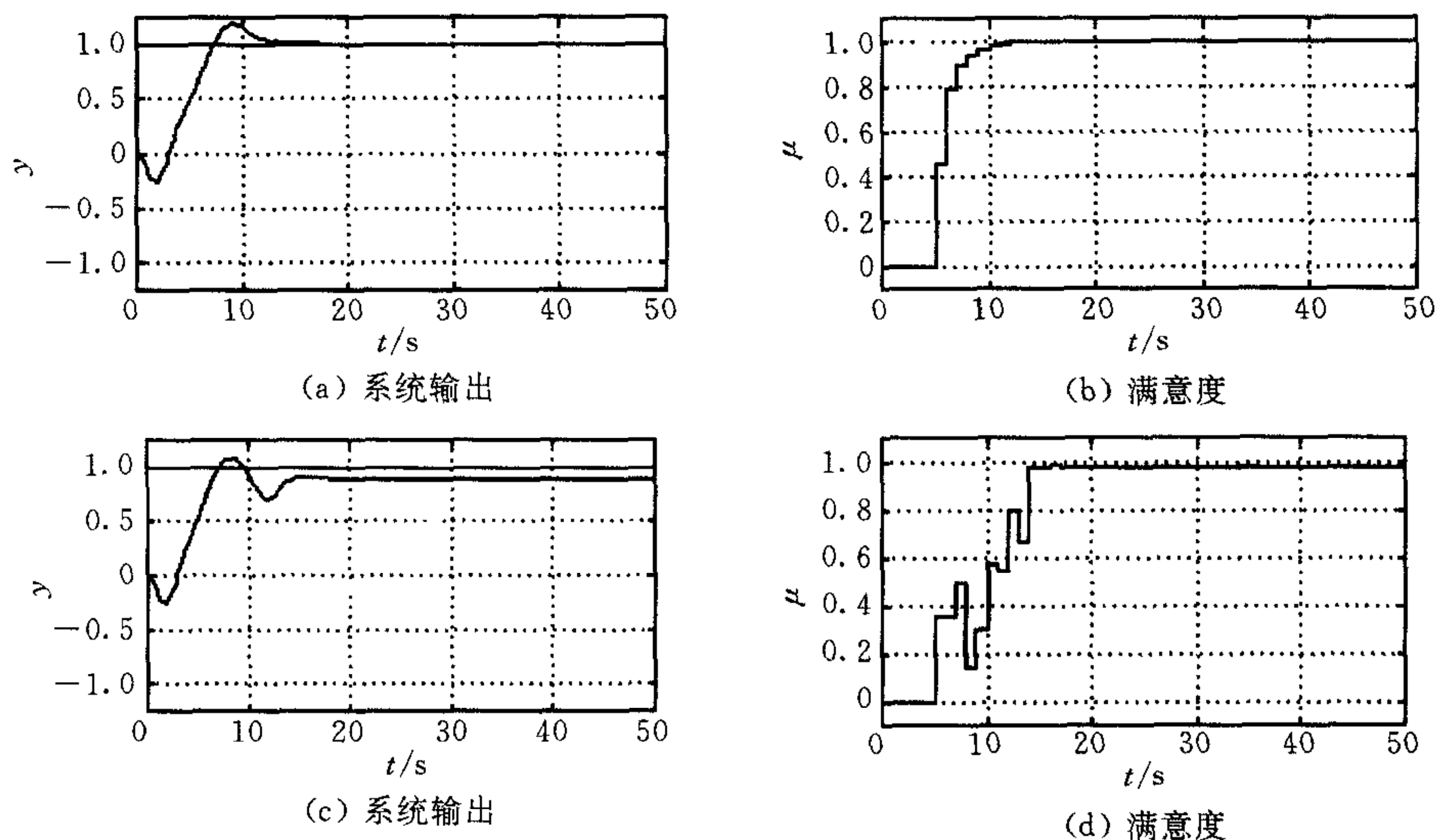


图 1 仿真结果

输出量约束为 $[0, 1.5]$,它们对应的模糊宽度均为 0.5,系统的控制量在 -1.5 处受到硬的约束,如果没有模糊宽度,系统没有解.按照本文算法,对系统的约束边界进行了模糊化处理,在优化求解过程中,逐渐放松系统的硬约束,优化的方向是模糊隶属度最大,图 1(c)是系统的输出,图 1(d)表示系统的模糊满意度.可以看出,系统的满意度在优化过程中不断调整,向着逐渐大的方向对系统的控制量进行求解,说明本文方法的有效性.

6 结束语

通过定义控制目标和系统约束的模糊隶属度,并利用模糊推理运算,将有约束多目标多自由度优化控制(CMMO)转化为凸优化问题,便于用有效的优化算法进行求解,并保证了求得的解为全局最优解.更重要的是,可以通过调整与控制目标和系统约束直接有关的模糊隶属度的参数而增加控制的自由度,设计者对控制目标和系统约束的控制经验可以通过语言变量的模糊推理而加以利用,对控制性能的影响有更直观的理解.

参 考 文 献

- 1 席裕庚. 复杂工业过程的满意控制. 信息与控制, 1995, **24**(1):14~20
- 2 席裕庚,谷寒雨. 有约束多目标多自由度优化的可行性分析及软约束调整. 自动化学报, 1998, **24**(6):727~732
- 3 陈增强,袁著祉. PI型广义预测平均控制器及其仿真. 控制与决策, 1996, **11**(6):702~706
- 4 Richalet J. Industrial application of model-based predictive control. *Automatica*, 1993, **29**(10):1251~1274
- 5 Masatoshi S, Kosuke K. Interactive decision making for large-scale multiobjective linear programs with fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **88**:161~172

李少远 1997年7月在南开大学计算机与系统科学系获得博士学位,现为上海交通大学自动化研究所教授、博士生导师.研究领域为预测控制、模糊控制、自适应控制理论与应用.

席裕庚 简介见本期.