

基于模糊目标和模糊约束的满意控制*

李少远 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 200030)

摘要 研究在预测控制框架下进行模糊决策问题,提出一种基于模糊目标和模糊约束的预测控制方法。其目标函数以决策者的控制要求和最终控制的满意度来表示,比传统的加权方差具有更多的自由度;与基于二次型性能指标的预测控制相比,该方法可使系统设计更加灵活。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词 模糊预测控制,模糊目标,模糊约束,优化

分类号 TP 273

Satisfactory Control Based on Fuzzy Goals and Fuzzy Constraints

Li Shaoyuan, Xi Yugeng

(Shanghai Jiaotong University)

Abstract The problem of fuzzy decision making in predictive control is investigated. Fuzzy goals and constraints are translated into predictive control. The final decision can be explained in terms of partial decisions and degree of satisfaction for the criteria. The use of fuzzy goals and fuzzy constraints in predictive control allows for 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. The simulation results demonstrate the effectiveness of the method.

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

1 引言

工业过程的对象一般很难用精确的数学模型加以描述,这使得基于精确数学模型的控制方法在应用上受到很大限制,尤其是对复杂非线性或部分未知的工业系统控制问题。随着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,从而构成了在动态不确定性环境下的满意控制问题^[1]。

上述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优化控制问题。由于工业过程控制中的许多不确定性,如控制参数、约束、控制目标等,都是随着生产条件的变化而表现出的不确定性,这种不确定性不是随机的,而是模糊的。我们把这类问题称为模糊动态环境下复杂系统的满意控制问题。

预测控制本质上是在有限时间内的优化控制算法,并通过滚动优化机制克服系统不确定性因素的影响。在现有模糊预测控制文献中^[2~5],大多是先通过模糊推理建立全局系统的模型,然后利用这一模型对系统的输出进行预测,利用预测控制算法得到

* 国家自然科学基金重点项目(60004001)和国家 863 计划重大关键技术攻关项目(863-511-830-002)

控制量。然而,这一做法与预测控制的初衷是不一致的,因为预测控制是以滚动优化机制来降低对控制模型的要求,而用模糊推理建立非线性系统的全局模型是很复杂的,再结合预测控制算法反而增加了复杂性。另外,在现有模糊预测控制研究中,也没有考虑多目标和多约束的实际控制问题。

本文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,将系统约束和控制目标模糊化,并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控制的方法。

2 模型预测控制

模型预测控制的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 $y(k+i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 是由系统当前时刻 t 的信息和未来的控制信号 $u(k+i)$ ($i=1, 2, \dots, N-1$) 得到的,其中 N 为系统的预测时域。为使优化问题简化,一般取控制时域 $M < N$,即 $u(k+i) = u(k+M-1)$, $i=M, \dots, N-1$ 。优化目标为

$$J = \sum_{i=1}^N \alpha (\hat{e}(k+i))^2 + \sum_{i=1}^M \gamma_i (\Delta u(k+i-1))^2 \quad (1)$$

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, α 和 γ_i 分别为对预测误差和控制增量的加权系数。

在式(1)所示的二次型性能指标优化问题中,系统的控制性能依赖于加权系数的调整,而这种调整又缺乏有效的方法。文献[6]讨论了在 GPC 算法中, γ_i 对系统性能和系统稳定性的影响;文献[7]利用神经网络训练 γ_i ,增加了预测控制算法的复杂性。

3 预测控制中的模糊决策

在复杂工业过程控制中,控制目标和系统约束分别为 G_1, \dots, G_p 和 C_1, \dots, C_q ,目标是在满足控制约束的前提下,控制目标应尽量得到满足。当控制目标受到系统约束不能满足时,需要兼顾控制目标和系统约束,以保持系统的稳定和性能优化,此时称为有约束多目标多自由度优化控制(CMMO)^[8]。由于系统的高度复杂性,系统约束和控制目标往往是用模

糊语言变量表述的,因而上述问题可以扩展为多目标的模糊决策问题。

设 $\mu_{c_1}, \dots, \mu_{c_p}$ 表示控制目标的模糊隶属度, $\mu_{c_1}, \dots, \mu_{c_q}$ 表示系统约束的模糊隶属度,则有

$$\mu_{G_i(x)} = \begin{cases} 0, & g_i(x) > g_i^{\max} \\ -\frac{g_i(x) - g_i^{\min}}{g_i^{\max} - g_i^{\min}}, & g_i^{\min} < g_i(x) < g_i^{\max} \\ 1, & g_i(x) < g_i^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mu_{G_i(x)}: R^n \rightarrow [0, 1]$ 表示控制目标 $G_i(x)$ 满足的隶属度, $[g_i^{\min}, g_i^{\max}]$ 表示模糊论域,且 $g_i^{\min} \triangleq \min_i g_i(X^*)$, $g_i^{\max} \triangleq \max_i g_i(X^*)$, X^* 为隶属度取最大值的向量空间;

$$\mu_{c_j(x)} = \begin{cases} 0, & c_j(x) > b_j + d_j \\ 1 - \frac{c_j(x) - b_j}{d_j}, & b_j < c_j(x) < b_j + d_j \\ 1, & c_j(x) < b_j \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mu_{c_j(x)}: R^n \rightarrow [0, 1]$ 表示系统约束 $c_j(x)$ 满足的隶属度, $[b_j, d_j]$ 表示第 j 个约束的域, $\mu_{c_j(x)} = 1$ 表示系统受到最小约束, $\mu_{c_j(x)} = 0$ 表示系统受到最大约束。

通过定义模糊隶属度函数,控制目标和系统约束均变换到 $[0, 1]$ 上。最后的决策是在模糊信息下寻找满意的控制策略 v , 满足

$$\mu_v(X^*) = \Psi(\mu_{c_1}, \dots, \mu_{c_p}, \mu_{c_1}, \dots, \mu_{c_q}) = \max_v \mu_v(X) \quad (4)$$

其中 $\Psi(\bullet)$ 为模糊运算。

3.1 目标函数

在时域中,系统的控制目标一般直观表示为系统的上升时间、超调量、调整时间及稳定误差等;而在模型预测控制中,由于采用了基于二次型目标函数的优化技术,系统的控制目标常表示为预测误差和控制增量的二次型加权,如式(1)所示。这样做的目的在于形成凸优化问题,便于问题求解。更进一步,如要使系统的变化平稳,则目标函数可写成

$$J = \sum_{i=1}^{N_1} \alpha (\hat{e}(k+i))^2 + \sum_{i=1}^{N_2} \beta (\Delta y(k+i))^2 + \sum_{i=1}^M \gamma_i (\Delta u(k+i-1))^2 \quad (5)$$

系统设计的灵活性主要表现在加权系数的选择上;当然,在预测控制中,预测时域 N 和控制时域 M 对系统稳定性和性能也有一定影响,文献[6]中已有有关结论。另外,当系统受到约束,或对于非线性系统的预测控制,这样的性能指标往往导致非凸优化。在这种情况下,可借助于上述模糊化的隶属度函数,将模糊目标和模糊约束通过模糊 t -范数^[9]运算进行综合,得到如下性能指标

$$\mu_v = \prod_{i=1}^{N_1} [\bar{\mu}_c(\hat{e}(k+i))]^p + \prod_{i=1}^{N_2} [\bar{\mu}_y(\Delta y(k+i))]^p + \prod_{i=1}^M [\bar{\mu}_u(\Delta u(k+i-1))]^p \quad (6)$$

其中, $\bar{\mu}(\cdot)^p \in R^n (p > 0)$ 表示归一化的 t -范数模糊运算。优化就是在一定时域内寻找一控制策略,使得

$$\mu_v^* = \max(0, 1 - \mu_v^{1/p}), \quad p > 0 \quad (7)$$

3.2 模糊预测控制中的优化

非线性系统的优化问题一般可表示为

$$\begin{cases} \min_x f(x) \\ \text{s.t. } c_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ c_i(x) \leq 0, \quad i = r+1, \dots, R \end{cases} \quad (8)$$

其中,目标函数 $f(x)$ 和约束函数 $c_i(x)$ 均为实函数。如果 $f(x)$ 是凸函数,等式约束是线性的,且不等式约束是凸的,则上述问题为凸优化问题。在模糊多目标决策中,由于控制目标和系统约束均已表示为模糊隶属度,在式(6)所示的优化问题中,已将有约束多目标的满意控制问题转化为无约束的优化问题,系统的控制性能取决于式(4),因此优化的凸性只取决于 $f(x)$ 的凸性。

控制目标和系统约束的隶属度函数可按式(2), (3)求取,在给定的论域上,保证 μ_v 非空。则有如下定理:

定理1 控制目标和系统约束分别为 G_1, \dots, G_p 和 C_1, \dots, C_q 的系统,其满意的隶属度分别按(2), (3)定义,在有限预测时域内优化目标如式(4),则有约束多目标多自由度优化控制为一凸优化问题。

证明 通过定义控制目标和系统约束的模糊隶属度,对系统控制性能的满意程度已在优化目标(4)中得到反映,CMMO问题转化为无约束的优化问题,其凸性取决于优化目标的凸性。

通过模糊隶属度加权实现的,只要每一部分都是凸性的,则整个目标函数就是凸性的。以预测误差的隶属度为例,预测误差的隶属度取三角形,即

$$\mu(r(i) - y(i)) = \max\left\{1 - \frac{|r(i) - \hat{y}(i)|}{K}, 0\right\} \quad (9)$$

对照式(6),目标函数取为

$$\left\{ \prod_{i=1}^{N_1} 1 - \bar{\mu}_c(\hat{e}(k+i)) \right\}^{1/p} \quad \min \quad (10)$$

$$\text{而} \quad 1 - \bar{\mu}_c(\hat{e}(k+i)) = \frac{|e(k+i)|}{K} \quad (11)$$

为一凸函数, t -范数满足凸运算,则式(8)为凸函数。由此可证CMMO为一凸优化问题。

4 仿真结果

根据上述结果,在MATLAB环境下建立了模糊约束目标模块Fuzzy Constraints和多目标优化模块CMMO,组成系统仿真结构如图1所示。

例1 对系统 $\frac{s-1.2}{s^3+s^2+1}$ 在各种约束情况下进行仿真,结果如图2和图3所示。

图2中,系统的输出约束为1,模糊软约束宽度为0.2。仿真中Display数据框表示系统约束的满意度总为1,即系统没有受到约束;而系统输出受到约束时,Display数据框表示系统约束和控制目标的满意度在优化过程中逐渐趋于1。如果系统的输出受到硬约束,没有一定的模糊区间时,该系统没有可行解。

图3中,系统的控制量约束为-0.7,模糊软约束宽度为0.2。此时系统控制目标不能达到设定值,Display数据框表示系统约束和控制目标的满意度在优化过程中逐渐趋向最大值,但由于受到系统输入的硬约束,最大值只能达到0.912。

例2 对文献[10]中的水箱温度控制问题,其被控对象是一个有约束的非线性系统,应用本文算法对此进行仿真,结果如图4所示。温度设定值为50,在上升阶段系统受到约束,按本文算法不断对约束进行软化, y 为系统输出, μ 为模糊隶属度,在优化过程中不断趋向大的方向。

以上算例表明,本文算法能够直观地反映出系统约束和控制目标的满意度,并可根据系统要求直观修改。

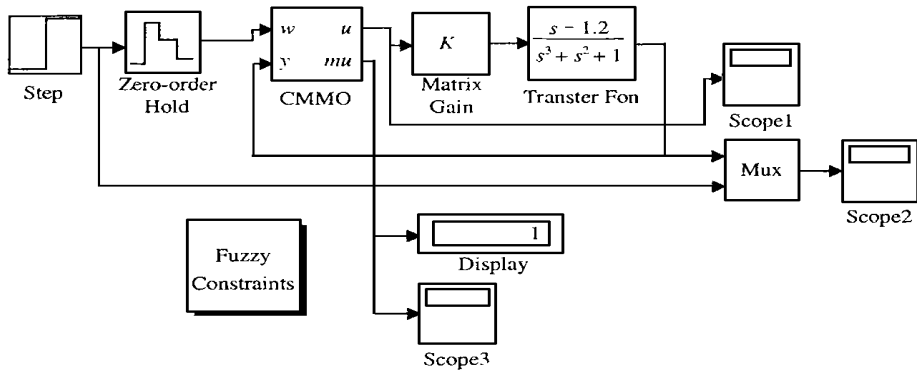


图 1 仿真系统结构

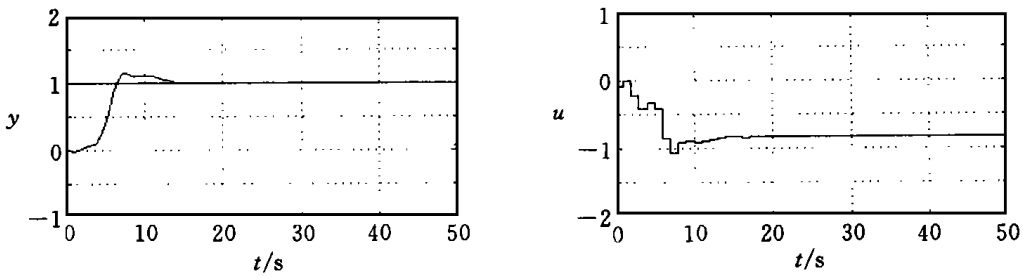


图 2 系统输出约束为 1.2

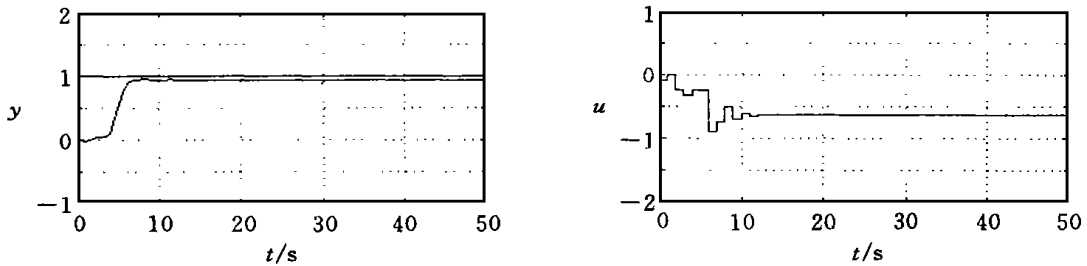


图 3 系统控制量约束为 - 0.7

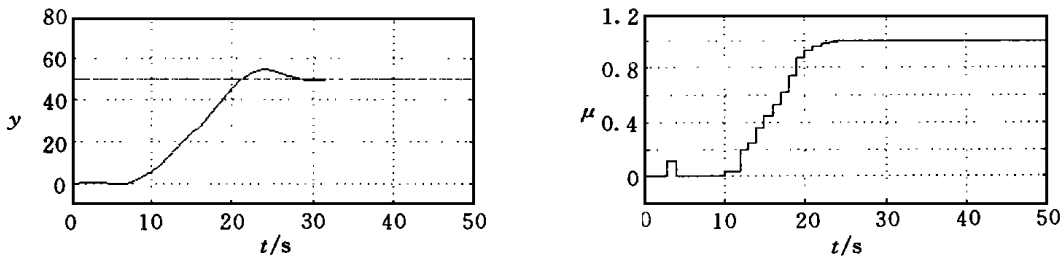


图 4 系统控制量约束为 - 0.7

5 结 论

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, 并保证求得解为全局最优解。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, 使设计者对控制目标和系统约束的控制经验通过语言变量的模糊推理而加以利用, 从而对控制性能的影响有更直观的理解。

性干扰产生的轨迹误差任意小。两关节直接驱动机器人的实验研究,证明了本文方法的有效性和对模型不确定性的鲁棒性。

参考文献

- 1 J J Slotine, W Li. On the adaptive control of manipulators. *Int J of Robotics Research*, 1987, 6(3): 49 ~ 59
- 2 J Craig, P Hsu, S Sastry. Adaptive control of robot manipulators. *Int J of Robotics Research*, 1987, 6(2): 16 ~ 28
- 3 N Sadegh, R Horowitz. An exponentially stable adaptive control law for robot manipulators. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1990, 6(4): 491 ~ 497
- 4 M W Spong. On the robust control of robot manipulators. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1782 ~ 1786
- 5 J Imura, T Sugie, T Yoshikawa. Adaptive robust control of robot manipulators-theory and experiment. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1994, 10(5): 705 ~ 709
- 6 F Alonge, F D Ippolito, F M Raimondi. An adaptive

control law for robotic manipulator without velocity feedback. In: *Proc of the 14th World Congress of IFAC*. Beijing: Int Convention Center, 1999. B: 239 ~ 244

- 7 D S Bayard, J T Wen. New class of control laws for robotic manipulators. *Int J of Control*, 1988, 47(5): 1387 ~ 1406
- 8 H Berghuis, R Ortega, H Nijmeijer. A robust adaptive robot controller. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1993, 9(6): 825 ~ 830
- 9 陈启军. 宏-微机器人系统及其轨迹控制研究. 上海: 同济大学博士学位论文, 1999

作者简介

陈启军 男, 1966年生。1999年在同济大学获博士学位, 现为该校副教授。主要研究方向为机器人控制与智能控制。

王月娟 女, 1935年生。1958年毕业于西安交通大学, 现为同济大学教授, 博士生导师。主要研究方向为机器人控制与智能控制。

陈辉堂 男, 1933年生。1953年毕业于上海交通大学, 现为同济大学教授, 博士生导师。主要研究方向为机器人控制与智能控制。

(上接第 677 页)

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 Jeffrey T Spooner, Kevin M Passino. Adaptive predictive using fuzzy systems and neural networks. In: *Proc of ACC 97*. Albuquerque, 1997. 1266 ~ 1270
- 3 Kim Jin-Hwan, Huh UK-Youl. Fuzzy model based predictive control. In: *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Anchorage, 1998. 405 ~ 409
- 4 Fischer M Martin, Nelles Oliver, Isermann Rolf. Predictive control based on local linear fuzzy models. *Int J Systems Science*, 1998, 29(7): 679 ~ 697
- 5 张化光, 吕剑虹, 陈来九. 模糊广义预测控制及其应用. *自动化学报*, 1993, 19(1): 9 ~ 17
- 6 Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control. *Automatica*, 1989, 25(6): 859 ~ 875
- 7 王群仙, 陈增强, 袁著祉. 基于 BP 网络的 PID 型预测自

校正控制器. *控制与决策*, 1998, 13(2): 185 ~ 188

- 8 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
- 9 Yager R R. On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 1980, 4: 235 ~ 242
- 10 Bordons C, Camacho E F. A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1998, 6(3): 372 ~ 387

作者简介

李少远 男, 1965年生。上海交通大学自动化所教授。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 男, 1946年生。上海交通大学自动化研究所教授, 博士生导师。主要研究方向为复杂系统控制理论, 智能机器人等。