

文章编号: 1001-0920(2002)06-852-04

基于模糊满意度的广义预测控制器参数的在线调整

李少远, 杜国宁

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 广义预测控制器(GPC)中控制量的加权系数 λ 直接影响着控制系统的调节品质, 调整 λ 值对调节系统的超调量和调节时间的作用是相矛盾的。为此提出调节品质满意度的概念, 形成基于模糊满意度的多目标决策问题, 动态地调整 GPC 目标函数中的加权系数 λ 。仿真结果表明, 该方法能够同时满足系统的多种控制品质的要求。

关键词: 预测控制; 模糊满意度; 多目标决策

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

Online parameter tuning of generalized predictive controller based on fuzzy satisfying degree function

LI Shao-yuan, DU Guo-ning

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

Abstract: A new tuning approach is presented based on the fuzzy satisfying degree function, hence the weighting coefficient in the objective function of generalized predictive controller (GPC) can be tuned dynamically via fuzzy multi-objective decision making. Multiple system performance is met by using the proposed approach and its effectiveness is shown by the simulation results.

Key words: predictive control; fuzzy satisfying degree function; multi-objective decision making

1 引言

由于预测控制器基于对系统的多步向前预测和滚动优化的策略实现对系统的控制, 因而具有对不确定性环境良好的适应能力和较强的鲁棒性^[1], 成为当今具有广泛应用价值和良好应用前景的先进控制策略, 引起控制界和工业界的共同兴趣。如同其它控制策略一样, 控制系统的品质和控制器的参数整定有很大的关系, 如在广义预测控制(GPC)中, 目标函数中对控制量的加权系数 λ 的选取关系到控

制器的控制增量问题, 它的作用是限制控制增量 Δu 的剧烈变化, 减小对系统的过大冲击, 但随着 λ 的增大, 系统的控制作用减弱, 不易得到满意的动态响应, 这两方面的要求对 λ 的调整是相互矛盾的。解决方法之一是将 λ 设为一个可调参数, 不断对其进行调整。文献[2]提出了基于BP神经网络的参数调整学习算法, 但由于BP网络需要大量的样本训练, 不适合在线对 λ 值进行调整, 难以在实际控制中得到应用。

预测控制算法在控制时域 M 内所求得的 N_u 个

收稿日期: 2001-06-15; 修回日期: 2001-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074004); 上海市曙光计划资助项目

作者简介: 李少远(1965—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 从事模糊智能控制、预测控制等研究; 杜国宁(1977—), 男, 河北井陘人, 博士生, 从事模糊预测控制等研究。

控制量,大都把第一个控制作用 $\Delta u(k)$ 加到系统输入端,作为第 k 时刻的优化结果,在 $k+1$ 时刻重复进行形成滚动优化,但没有充分利用剩余的 $N_u - 1$ 个已得到的控制量及系统的输出、系统调整时间等,而这些变化量中包含着许多系统特性的信息。作者在文献[3,4]中提出了基于模糊目标和模糊约束的满意控制,基本思想是针对一些控制品质具有模糊的性质,通过定义控制的满意度,以使原来相互矛盾而不易调整的控制参数可以通过模糊推理形成多目标的优化决策问题,在系统运行中动态地调整控制器的参数,同时满足系统多种控制品质的要求,总体上达到系统满意优化的目的。

2 广义预测控制的基本算法

在广义预测控制算法中^[1],采用受控自回归积分滑动平均(CARMA)模型来表示一个具有非平稳噪声的实际过程

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})\zeta(t)/\Delta \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 和 $y(t)$ 为过程输入和输出, $\zeta(t)$ 是一个不相关的白噪声序列, $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为差分算子, $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$ 是后移算子 z^{-1} 的多项式。这里考虑 SISO 系统,并假设 $C(z^{-1}) = 1$ 。优化目标为

$$J = E \left\{ \sum_{j=1}^N [y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (2)$$

其中, N 为预测时域, N_u 为控制时域, λ 为控制量的加权因子。

预测方程为

$$\hat{Y} = GU + F \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= [y(t+1|t), \dots, y(t+N|t)]^T \\ U &= [\Delta u(t), \dots, \Delta u(t+N_u-1)]^T \\ F &= [f_1(t), \dots, f_N(t)]^T \\ G &= \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ & \ddots & & \\ \vdots & & g_1 & 0 & \vdots \\ & & \vdots & \ddots & 0 \\ g_N & \dots & & g_{N-N_u+1} \end{bmatrix}_{(N \times N_u)} \end{aligned}$$

将目标函数(2)极小化后得到其最优解为

$$U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - F) \quad (4)$$

最优控制量为

$$u(t) = u(t-1) + g^T (W - F) \quad (5)$$

其中, $W = [w(t+1) \dots w(t+N)]^T$, g^T 是矩阵 $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$ 的第 1 行。

式(3)~式(5)中的符号定义参考文献[1]。

3 控制目标的模糊化处理

在实际的生产过程中,往往对系统的控制性能(诸如上升时间、超调量等)提出一定的要求。这些要求一般可在一定范围内调整,即对于某控制目标在一定范围内是要求严格限制的,超过了这一范围则具有一定的满意度。对于这种形式的控制目标,可用模糊变量来描述这一特性,即根据模糊变量的模糊隶属度来描述系统满足控制目标的满意程度。引入一个一般的模糊变量 \tilde{v} , 其隶属度函数 $\mu(\tilde{v})$, $0 \leq \mu(\tilde{v}) \leq 1$, 可用梯形隶属度 $\{v_{\min} - p_1, v_{\min}, v_{\max}, v_{\max} + p_2\}$ 来表示(其中 p_1 和 p_2 称为模糊宽度),如图 1 所示。

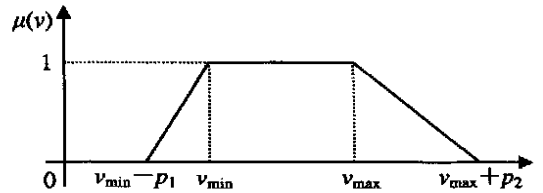


图 1 梯形模糊隶属度函数

显然,当 $v_{\min} = v_{\max}$ 时对应三角形隶属度, p_1 和 p_2 同时为零时说明对系统控制目标的要求是严格的。模糊变量 \tilde{v} 的隶属度函数为

$$\mu_{\tilde{v}}(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{\min} - p_1 \\ 1 + \frac{v - v_{\min}}{p_1}, & v_{\min} - p_1 \leq v < v_{\min} \\ 1, & v_{\min} \leq v < v_{\max} \\ 1 - \frac{v - v_{\max}}{p_2}, & v_{\max} \leq v < v_{\max} + p_2 \\ 0, & v \geq v_{\max} + p_2 \end{cases} \quad (6)$$

根据系统响应的性能指标选用控制目标

$$\begin{cases} 0 & e(t) & e_{\max} \\ t_{S_{\min}} & t_S(t) & t_{S_{\max}} \\ y_{\min} & y(t+i) & y_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

其中, $e(t) = |y(t) - y_r(t)|$ 表示当前实际输出 $y(t)$ 与设定值 $y_r(t)$ 的绝对偏差。由式(6)定义其隶属度函数为

$$\mu_e = \mu_{\tilde{e}(t)}(e(t)) = \begin{cases} 1, & 0 \leq e(t) < e_{\max} \\ 1 - \frac{e(t) - e_{\max}}{p_2}, & e_{\max} \leq e(t) < e_{\max} + p_2 \\ 0, & e(t) \geq e_{\max} + p_2 \end{cases} \quad (8)$$

$t_s(t)$ 表示基于当前绝对误差 $e(t)$ 变化率的输出达到设定值的时间, 如

$$t_s(t) = \begin{cases} e(t)/|\dot{e}(t)|, & \dot{e}(t) < 0 \\ 0, & \dot{e}(t) = 0, e(t) = 0 \\ M, & \dot{e}(t) > 0, e(t) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\dot{e}(t) = d(e(t))/dt$, M 为一个很大的常数。

定义 $t_s(t)$ 的隶属度函数为

$$\mu_{t_s} = \begin{cases} \frac{t_{s_{\min}} - t_s(t)}{p_1}, & t_{s_{\min}} - p_1 \leq t_s(t) < t_{s_{\min}}, \dot{e}(t) < 0 \\ 0, & t_{s_{\min}} \leq t_s(t) < t_{s_{\max}}, \dot{e}(t) < 0 \\ \frac{t_s(t) - t_{s_{\max}}}{p_2}, & t_{s_{\max}} \leq t_s(t) < t_{s_{\max}} + p_2, \dot{e}(t) < 0 \\ 1, & t_s(t) < t_{s_{\min}} - p_1, \dot{e}(t) < 0 \\ 1, & t_s(t) > t_{s_{\max}} + p_2, \dot{e}(t) < 0 \\ 0, & \dot{e}(t) = 0, e(t) = 0 \\ 1, & \dot{e}(t) > 0, e(t) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$\hat{y}(t+i)$ 表示优化时域中 $t+i$ 时刻的预测输出值。根据式(6) 定义其隶属度函数为

$$\mu_{\hat{y}}(i) = \mu_{\tilde{y}(t+i)}(\hat{y}(t+i)) = \begin{cases} 0, & \hat{y}(t+i) < \hat{y}_{\min} - p_1 \\ 1 + \frac{\hat{y}(t+i) - \hat{y}_{\min}}{p_1}, & \hat{y}_{\min} - p_1 \leq \hat{y}(t+i) < \hat{y}_{\min} \\ 1, & \hat{y}_{\min} \leq \hat{y}(t+i) < \hat{y}_{\max} \\ 1 - \frac{\hat{y}(t+i) - \hat{y}_{\max}}{p_2}, & \hat{y}_{\max} \leq \hat{y}(t+i) < \hat{y}_{\max} + p_2 \\ 0, & \hat{y}(t+i) \geq \hat{y}_{\max} + p_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

由上述对控制目标的描述可知, 指标 $t_s(t)$ 包含了对系统上升时间的预测量, 指标 $e(t)$ 和 $\hat{y}(t+i)$ 则描述了当前的和预测的系统输出与设定值之间的偏差量, 这样可将系统上升时间和超调量的控制性能目标要求等效为对式(7) 中 $t_s(t)$, $e(t)$ 和 $\hat{y}(t+i)$ 的约束。假设系统属于正作用系统, 即对于系统中的被控对象, 控制输入量增大时对象输出量随着增大, 反之控制输入量减小时对象输出量随着减小。由式(9)~(11) 并根据模糊推理的定义, t 时刻系统对控制目标的满意度为

$$\mu_{\min} = \mu_e \mu_{t_s} (\min\{\mu_{\hat{y}}(1), \mu_{\hat{y}}(2), \dots, \mu_{\hat{y}}(N)\}) \quad (12)$$

4 控制加权系数 λ 的调整

在预测控制器的设计中, 设计参数的整定是很重要的, 它关系到控制器的稳定性和鲁棒性, 对控制器的控制效果有很大的影响。Clarke^[5] 对预测控制目标函数中的控制量加权系数 λ 进行了详细的研究, 得出 λ 的选取关系到控制器的增益问题, 它的作用是限制控制增量 Δu 的剧烈变化, 减少系统的冲击, 保证实际生产过程的稳定性和安全性。 λ 增大, 系统控制作用减少, 系统动态响应变慢, 不易得到满意的动态响应; λ 减少, 系统控制作用增强, 系统动态响应的速度加快。如果 λ 太小, 则可能使系统输出产生振荡, 影响系统的稳定性。所以将 λ 设计为一个可调参数, 根据系统对控制目标的满意度 μ_{\min} 来调节 λ 的值。

对于一个正作用系统, 由式(12) 定义了系统对控制目标的满意度 μ_{\min} 。借鉴文献[3] 对目标函数中控制加权系数 λ 的讨论, 由此给出一种调节 λ 的直观方法, 即根据 μ_{\min} , 在 λ_{\min} 和 λ_{\max} 之间按一定指数规律调整 λ , 改变控制量的加权, 如图2所示。

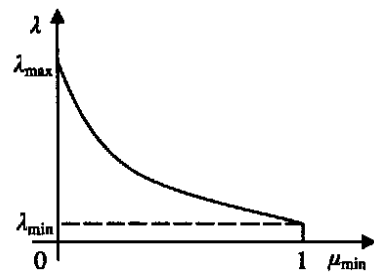


图2 λ 的调整曲线

其代数式为

$$\lambda = \lambda_{\max} \times \exp(\mu_{\min} \times \lg(\lambda_{\min}/\lambda_{\max})) \quad (13)$$

$$\lambda_{\max} > \lambda_{\min} > 0$$

该调节规律可以理解为: 系统为正作用时, 满意度 μ_{\min} 反映出影响满足控制目标的最主要因素, 满意度 μ_{\min} 减小说明超调量太大, 上升时间短, 则增大 λ , 系统控制作用减小, 抑制超调; 满意度 μ_{\min} 增大说明系统响应超调量较小, 上升时间长, 则可减小 λ , 系统控制作用增强, 加快系统响应速度。

5 仿真结果

根据以上讨论, 用 MATLAB 软件中的 SMULNK 建立系统仿真结构, 控制对象选用 Rohrs 模型^[6], 如

$$G(s) = \frac{458}{(s + 1)(s^2 + 30s + 229)}$$

参考输入为单位阶跃输入。广义控制算法中的参数取值如表 1 所示, 模糊控制目标的梯形隶属度函数的参数如表 2 所示。对于 Rohrs 模型 GPC 取表 1 参数, 通过手动修改控制量加权系数 λ 以满足表 2 所示的控制目标。当 λ 分别取 1~ 3 时, 得到系统的仿真结果分别如图 3 中曲线 ①, ②, ③ 所示。可以看出, 图 3 中响应曲线在手动调节 λ 的过程中很难同时满足对超调量和上升时间的要求。对于 Rohrs 模型取表 1 参数, 并施加如表 2 所示参数的控制目标, $\lambda \in [0.001, 3]$, 仿真输出曲线如图 4 所示。可以看出, 图 4 中的响应曲线在满足控制目标的同时具有较短的稳定时间, 此时隶属度 μ_{\min} 和控制加权系数 λ 的仿

真曲线如图 5 所示。显然, 后者的控制性能较前者优越, 说明在具有模糊控制目标环境下该算法具有一定的优越性。图中 u 和 y 为标么化值, $\mu_{\min} \in [0, 1]$, λ 为标量值。

表 1 GPC 参数

参数名称	N	N_u	α
参数取值	5	2	0.85

表 2 模糊目标隶属参数

\tilde{v}	v_{\min}	v_{\max}	p_1	p_2
$\tilde{e}(t)$	0	0	0	1
$ts(\tilde{t})$	0.1	1	0.1	0.19
$\tilde{y}(t+i)$	0	1	0	0.1

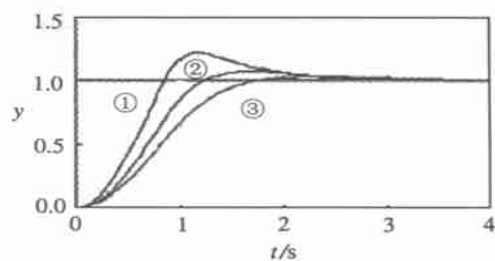
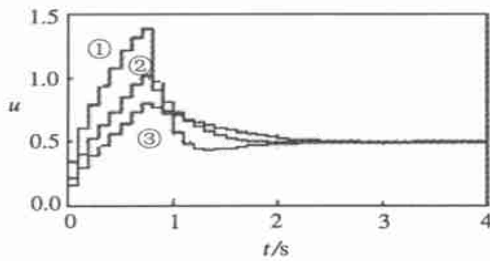


图 3 λ 为固定常数时的仿真曲线

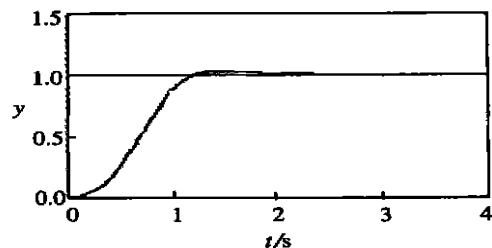
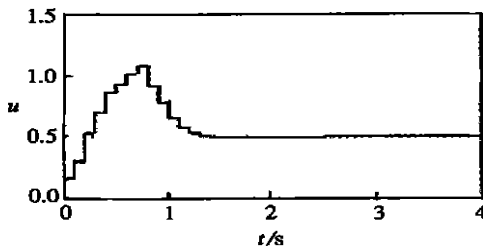


图 4 本文方法在线调整 λ 的仿真结果

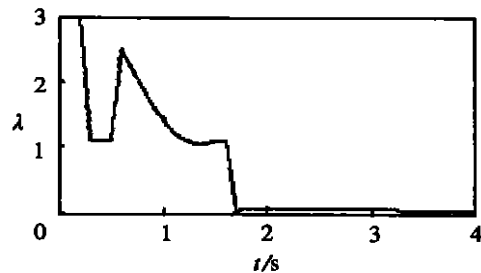
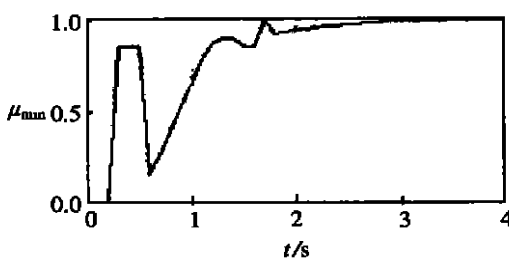


图 5 满意度与 λ 值的变化曲线

6 结 语

本文针对预测控制算法中预测模型具有预测系统在未来时刻的动态行为的特性, 充分利用控制过

程中的历史信息 and 预测输出序列, 事先预测系统输出对控制目标的满意度, 通过多目标模糊决策预先调整控制器的参数, 提高了控制性能品质。对系统的控制目标采用了模糊的描述方法, 提高了系统设计的灵活性和直观性。 (下转第 862 页)

$$S(z^{-1}) = 2.7505 - 11.5437z^{-1} + 15.5506z^{-2} - 6.7823z^{-3}$$

绘制 $G^*(z)$ 的奈奎斯特曲线如图 2 所示。

从图中可见 $\tilde{R} = 4$, 由 $A(z^{-1})$ 和 $T(z^{-1})$ 可知 $\tilde{P} = 4$, 于是 $\tilde{P} = \tilde{R}$, 由定理 2 可知闭环系统稳定。

6 结 语

为了克服 GPC 稳定性定量分析的难点和参数设计的盲目性, 本文推导了 GPC 的闭环反馈系统, 采用频率特性方法来表示控制系统的性质, 指导 GPC 的参数设计。所获得的设计方法具有重要的工程实际意义, 为 GPC 的推广与应用开辟了一条有效的途径。

参考文献(References):

[1] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized pre-

- dictive control[J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 137-160
- [2] Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 859-875
- [3] Rawlings J B, Muske K B. The stability of constrained receding horizon control[J]. *IEEE Trans on A C*, 1993, 38(10): 1512-1516
- [4] 席裕庚, 张峻. 广义预测控制系统闭环特性研究[J]. *中国科学(E 辑)*, 1996, 26(6): 519-527.
(Xi Yugeng, Zhang Jun. The closed-loop properties of generalized predictive control[J]. *Science in China(E)*, 1996, 26(6): 519-527.)
- [5] 孙明玮, 陈增强, 袁著祉. 典型工业过程的无超调预测控制设计[J]. *控制与决策*, 2000, 15(2): 213-216
(Sun Mingwei, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. Non-overshoot predictive control design for typical industrial process[J]. *Control and Decision*, 2001, 15(2): 213-216.)

(上接第 855 页)

参考文献(References):

- [1] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
- [2] 王群仙, 陈增强, 袁著祉. 基于 BP 网络的 PD 型预测自校正控制器[J]. *控制与决策*, 1998, 13(2): 185-188
(Wang Qunxian, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. PD structure predictive self-tuning controller based on BP neural network[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2): 185-188.)
- [3] 李少远, 席裕庚. 具有模糊约束模拟的广义预测控制[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(11): 1631-1634
(Li Shaoyuan, Xi Yugeng. Parameters tuning of generalized predictive control with fuzzy constraints simula-

- tion[J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(11): 1631-1634.)
- [4] 李少远, 席裕庚. 基于模糊目标和模糊约束的满意控制[J]. *控制与决策*, 2000, 15(6): 674-677.
(Li Shaoyuan, Xi Yugeng. Satisfactory control based on fuzzy goals and fuzzy constraints[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(6): 674-677.)
- [5] D W Clark, C Mohtadi. Properties of generalized predictive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 859-875
- [6] C E Rohrs, M Athans. Some design guidelines for discrete-time adaptive controllers[J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 653-660

(上接第 858 页)

参考文献(References):

- [1] Li Shu, Tang Tom, Collins Donald W. Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication[J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1996, 9(1): 145-149
- [2] Lu Steve C H, Ramaswamy D, Kumar P R. Efficient scheduling policies to reduce mean and variance of cycle-time in semiconductor manufacturing plants[J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1994, 7(3): 373-388
- [3] Harrison J M, Wein L M. Scheduling networks of queues: Heavy traffic analysis of a two-station closed network[J]. *Oper Res*, 1990, 38(6): 1052-1064

- [4] Little J D. A proof for the queueing formula: $N = \lambda W$ [J]. *Oper Res*, 1961, 9(3): 383-387.
- [5] Wein L M. On the relationship between yield and cycle-time in semiconductor wafer fabrication[J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1992, 5(2): 156-158
- [6] Yugeng X. Satisfactory control of complicated industrial process[J]. *Information and Control*, 1995, 24(1): 14-20
- [7] Yaron K, Gideon L. Multi-criteria scheduling optimization using fuzzy logic[A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics*[C], 1998. 445-450