

文章编号: 1000-8152(2002)04-04-0607

## 一种新的模糊内模预估控制器及应用

刘瞰东<sup>1</sup>, 杨智<sup>2</sup>, 方廷健<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230026; 2. 中山大学 信息科学与技术学院, 广州 510275;  
3. 中国科学院 合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 对不确定时滞系统, 提出了一种新的模糊内模预估控制方法. 它的最大特点是采用智能化的模糊模型预估器作为被控过程的内部模型, 对实际输出起预测作用, 从而克服时滞对系统带来的不利影响. 同时, 根据预测误差建立一模糊内模控制器, 在线修正、补偿被控过程的模型失配. 数字仿真和电阻炉温度实时控制结果表明, 这种控制方法优于常规控制方法; 有一定的实用前景.

**关键词:** 模糊控制; 内模结构; 时滞系统; 实时控制

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## New predictive controller based on fuzzy internal model and its applications

LIU Tun-dong<sup>1</sup>, YANG Zhi<sup>2</sup>, FANG Ting-jian<sup>3</sup>

(1. Department of Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China;

2. College of Information Science & Technology, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

3. Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A predictive control method based on fuzzy internal model has been proposed to overcome the disadvantages of dead time of process to be controlled. Its main feature is to introduce an intelligent fuzzy model predictor into control system so as to forecast the output of process in time; thereby it can reduce the influence of dead time. At the same time the controller based on fuzzy internal model would modify and compensate the change of model according to the predictive error. It is shown in the simulations that the proposed control method has better control results than other common control methods. Furthermore, the experiment of electrical-resistance stove indicates that it has a perfect practical outlook.

**Key words:** fuzzy control; internal model structure; dead time systems; real-time control

### 1 引言(Introduction)

内模控制结构不仅控制精度高、鲁棒性和抗干扰能力强, 同时还具有预测功能, 可克服时滞<sup>[1,2]</sup>. 但由于内模控制器设计时必须已知被控对象的数学模型; 且控制器由内部模型的逆构成, 通常实现较困难, 正是这些因素制约了内模控制的广泛应用. 而模糊控制对被控过程的数学模型要求不高, 1992 年, R. Gorez 及其合作者提出一种基于将模糊控制与内模控制结构相结合的控制方法<sup>[3,4]</sup>, 1997 年, W. F. Xie 等人在此基础上提出了一种混合型模糊内模控制方法<sup>[5]</sup>, 他们虽然在仿真上取得了较好的控制效果, 但大多没有进行工业过程的实时控制. 本文用模糊规则实现一阶预估模型作为被控对象的内部模型; 同时, 用模糊规则实现了内模控制器; 最后将该

控制方法运用于电阻炉温的实时控制, 结果看出, 该种控制策略增强了系统的鲁棒性, 消除了静态偏差及提高了系统的动态品质.

### 2 模糊内模预估控制系统(Predictive control systems based on fuzzy internal model)

#### 2.1 内模控制结构的提出(Proposal of internal model structure)

本文把内模控制结构看成一种 SISO 广义模型, 如图 1 所示.

其中,  $G_p$  为被控对象,  $G_m$  为被控对象模型,  $M_p, M_m$  为主控回路,  $C_p, C_m$  为校正环节,  $y_p$  为过程输出,  $y_m$  为模型输出,  $r$  为参考输入信号,  $d$  为干扰量. 过程输出  $y_p$  与参考输入量  $r$  及作用于被控过程的干扰量  $d$  有如下关系

$$\begin{cases} y_p = G_p \frac{1 + G_m(C_p + C_m)}{\Delta} \\ \quad [M_u \cdot r + (1 - F) \cdot d], \\ \Delta = 1 + G_p(M_p + C_p) + G_m(M_m + C_m) + \\ \quad G_p G_m(M_p + M_m)(C_p + C_m), \\ F = \frac{G_m(C_p - M_m)}{1 + G_m(C_p + C_m)}. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\Delta$  是系统的特征多项式;  $F$  可看作滤波器, 对外界干扰起抑制作用.

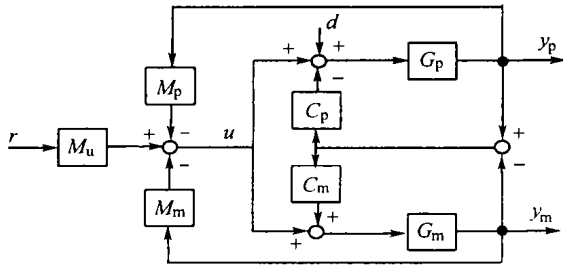


图1 SISO广义模型控制系统

Fig. 1 SISO generalized model-based control systems

当  $C_p = -C_m = M_u$  且  $M_p = M_m = 0$  时, SISO 广义模型控制系统结构等价于基本的内模控制结构, 如图2所示; 式(1)变形为式(2).

$$y_p = \frac{G_p}{1 + C(G_p - G_m)} [u + (1 - CG_m)d]. \quad (2)$$

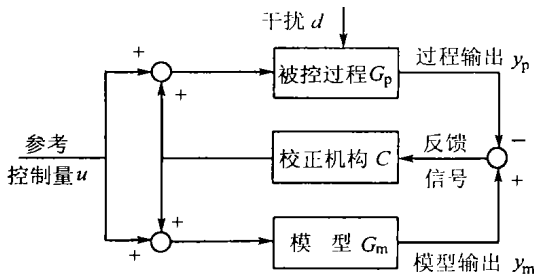


图2 内模控制结构

Fig. 2 Control structure of internal model

内模控制结构由被控过程、模型校正机构和过程内部模型三部分组成, 反馈信号是过程输出信号和模型输出信号之差. 显然, 当模型与过程完全匹配且无外界干扰影响, 反馈信号为零; 反之, 如果模型失配且有外界干扰作用于被控过程, 则可通过模型校正机构来调整被控过程和模型的输入量, 以修正、补偿模型失配所造成的影响.

### 2.2 模糊内模预估控制系统 (Predictive control systems based on fuzzy internal model)

基于上述分析, 本文用模糊规则表实现一阶预估模型作为被控对象内部模型, 形成模糊模型预估器; 同样用模糊规则表实现内模控制器, 形成模糊内模控制器; 从而提出一种模糊内模预估控制系统, 其

结构如图3所示.

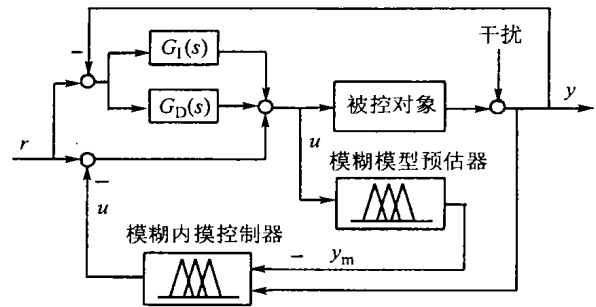


图3 模糊内模预估控制系统

Fig. 3 Predictive control systems based on fuzzy internal model

#### 2.2.1 模糊模型预估器 (Fuzzy model predictor)

通常被控过程的内部模型可用一阶预估器近似表示<sup>[6]</sup>, 其传递函数为

$$M = \frac{(1 - \lambda)z^{-1}}{1 - \lambda z^{-1}}. \quad (3)$$

式中  $\lambda \in [0, 1]$ , 上式可用差分方程描述为

$$y_m(k) = \lambda y_m(k - 1) + (1 - \lambda)u(k - 1). \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为加权因子, 它的大小由过程响应的上升时间决定,  $y_m(k - 1)$  是前一时刻被控过程模型的输出. 原则上, 高阶预估器更接近被控过程的内部模型, 但其复杂程度也相应增加, 一般很少采用. 其模糊形式表示为

$$Y_m(k) \leftarrow F_m(Y_m(k - 1), U(k - 1)), \quad (5)$$

上式  $Y_m, U$  为模糊变量, 模糊子集为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 本文隶属度函数曲线为三角形, 在每一采样时刻, 一阶预估器根据控制量当前值和模型当前值, 预估下一时刻模型的输出值. 值得注意的是加权因子  $\lambda$  并不是取一固定值,  $\lambda$  的选取将根据  $u(k - 1)$  和  $y_m(k - 1)$  的变化有所差别, 具体取值如表1所示.

表1 加权因子  $\lambda$  的取值

Table 1 The election of parameter  $\lambda$

| 加权因子<br>$\lambda$ | 输入量 $U(k - 1)$ |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|
|                   | 负大             | 负中   | 负小   | 零    | 正小   | 正中   | 正大   |
| 正大                | 0.67           | 0.8  | 0.75 | 0.67 | 0.5  | 0    | 0    |
| 正中                | 0.8            | 0.75 | 0.67 | 0.5  | 0    | 0    | 0    |
| 正小                | 0.75           | 0.67 | 0.5  | 0    | 0    | 0    | 0.5  |
| 零                 | 0.67           | 0.5  | 0    | 0    | 0    | 0.5  | 0.67 |
| 负小                | 0.5            | 0    | 0    | 0    | 0.5  | 0.67 | 0.75 |
| 负中                | 0              | 0    | 0    | 0.5  | 0.67 | 0.75 | 0.8  |
| 负大                | 0              | 0    | 0.5  | 0.67 | 0.75 | 0.8  | 0.67 |

正是这一点体现出模糊模型预估器的智能化特性,对应的模糊模型预估器控制规则如表 2 所示.当然,在实际控制中,可根据被控对象的不同有所调整.

表 2 模型的模糊预估规则表

Table 2 Rule base of fuzzy predictive model

| 输出量<br>$Y_m(k)$   |    | 输入量 $U(k-1)$ |    |    |    |    |    |    |
|-------------------|----|--------------|----|----|----|----|----|----|
|                   |    | 负大           | 负中 | 负小 | 零  | 正小 | 正中 | 正大 |
| 输入量<br>$Y_m(k-1)$ | 正大 | 正小           | 正中 | 正中 | 正中 | 正中 | 正中 | 正大 |
|                   | 正中 | 正小           | 正小 | 正小 | 正小 | 正小 | 正中 | 正大 |
|                   | 正小 | 零            | 零  | 零  | 零  | 正小 | 正中 | 正中 |
|                   | 零  | 负小           | 负小 | 负小 | 零  | 正小 | 正小 | 正小 |
|                   | 负小 | 负中           | 负中 | 负小 | 零  | 零  | 零  | 零  |
|                   | 负中 | 负大           | 负中 | 负小 | 负小 | 负小 | 负小 | 负小 |
|                   | 负大 | 负大           | 负中 | 负中 | 负中 | 负中 | 负中 | 负小 |

2.2.2 模糊内模控制器 (Controller based on fuzzy internal model)

模糊内模控制器将根据模糊模型预估器输出和实际过程输出的偏差产生反馈信号,进而修正模型失配、提高抗干扰能力及增强系统的鲁棒性,其作用相当于图 2 中模型校正机构的功能,它的控制规则由表 3 所示,主要是依靠内模控制原理及人工经验总结得出的.

表 3 模糊内模控制器控制规则

Table 3 Rule base of controller based on fuzzy internal model

| 输出量<br>$U_a$ |    | 输入量 $Y_m$ |    |    |    |    |    |    |
|--------------|----|-----------|----|----|----|----|----|----|
|              |    | 负大        | 负中 | 负小 | 零  | 正小 | 正中 | 正大 |
| 输入量<br>$Y$   | 正大 | 负大        | 负大 | 负大 | 负中 | 负中 | 负小 | 零  |
|              | 正中 | 负大        | 负大 | 负中 | 负中 | 负小 | 零  | 正小 |
|              | 正小 | 负大        | 负中 | 负中 | 负小 | 零  | 正小 | 正中 |
|              | 零  | 负中        | 负中 | 负小 | 零  | 正小 | 正中 | 正大 |
|              | 负小 | 负中        | 负小 | 零  | 正小 | 正中 | 正中 | 正大 |
|              | 负中 | 负小        | 零  | 正小 | 正中 | 正中 | 正大 | 正大 |
|              | 负大 | 零         | 正小 | 正中 | 正中 | 正大 | 正大 | 正大 |

2.2.3 积分、微分控制环节 (Integral and differential control loops)

Fuzzy 控制器尽管鲁棒性好、响应快,但容易引起系统的稳态误差.积分控制环节的引入能够消除这种静态误差.积分控制器可以表示为下面形式:

$$G_1(s) = \frac{1}{K_I s} \quad (6)$$

其中  $K_I$  为积分时间常数.  $K_I$  的选择对控制系统的响

应特性影响很大.通常,  $K_I$  的选择与被控过程的滞后时间有关:滞后时间越大,则  $K_I$  越大.应当注意,引入积分作用使系统开环特性的相位滞后增加,导致闭环系统振荡倾向加强,稳定性下降.

微分控制环节  $G_D(s)$  的引入使闭环系统阻尼系数增大而使闭环响应受到更大的阻尼,因此,衰减比增大、稳定性提高.通常微分起着超前作用,微分时间常数有时也称为超前时间,对减小系统的超调有一定的作用.

3 仿真及实时控制研究 (The research on simulations and real-time control)

选择工业过程中常见的一阶时滞系统,使用 Matlab 语言对本文提出模糊内模预估控制系统进行了数字仿真研究;并与 Z-N PID 整定法控制、纯内模控制 IMC 及常规模糊控制 Fuzzy 的数字仿真结果进行对比.

被控过程:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

其中  $K$  分别为被控对象的增益,  $\tau$  为纯滞后时间,  $T$  为被控对象的时间常数.设过程模型的参数为:  $K = 3.5$ ,  $\tau = 3$ ,  $T = 10$ .图 4 显示出模糊内模预估控制和其它三种控制方法的阶跃响应曲线.仿真时间  $t_f$  为 200 秒,步长  $t_s$  为 0.1 秒.图中看出本文所提的控制方法具有较满意的动态响应和鲁棒性.

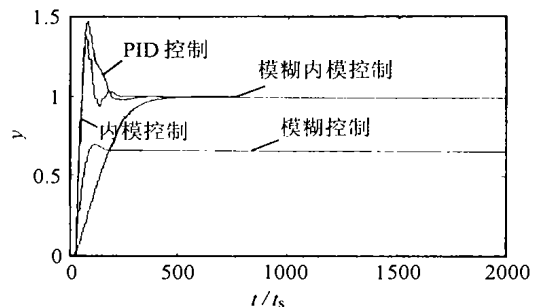


图 4 4 种控制方法的阶跃响应曲线  
Fig. 4 Step responses of process by four control methods

针对 2kW 实验电阻炉进行了温度实时控制实验,电阻炉内的温度场为非均匀分布,且随时间连续变化,因此,严格的讲电阻炉是一个非线性、时变时滞系统;选择这样的被控对象有一定的代表性.这里采用研华 IPC-610 工控机及其组态软件 Genie3.0 进行实时控制,采样周期取 20 秒,温度设定值为 150°C,六个小时的炉温输出曲线如图 5 所示;炉温输出有  $\pm 1^\circ\text{C}$  的稳态偏差.图中可以看出,该控制算法的实时控制效果是令人满意的.

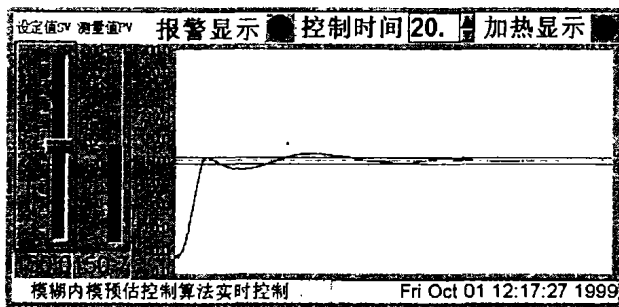


图5 实时炉温控制输出

Fig. 5 Real time temperature control of electrical-resistance stove

#### 4 结论(Conclusion)

本文提出的模糊内模预估控制系统由模糊模型预估器、模糊内模控制器和积分微分控制环节三部分组成,由于该控制方法引入了模糊模型预估器,对内部模型的要求降低了,对克服系统时滞具有明显的作用;模糊内模控制器具有较强的抗干扰性和鲁棒性;积分控制环节可自动消除静态偏差;微分控制环节可减小超调、缩短调节时间.由仿真研究及对电阻炉的温度实时控制可以看出:与其它一些常规控制方法相比,基于内模结构的模糊预估控制方法具有更强的鲁棒性、更好的动态特性和抗干扰能力.但针对各种被控过程模糊规则表的建立可能还需调整,这是需要进一步研究的方面.

#### 参考文献(References)

[1] Carlos E. Garcia, Manfred Morari. Internal model control. 1. A un-

ifying review and some new results [J]. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 1982, 21(2): 308 - 323

- [2] Yang Zhi, Liu Xiyuan. An optimal prediction algorithm of self-tuning pole assignment PID controller for systems with time-varying fractional delay [J]. Control Theory and Applications, 1992, 9(3): 292 - 295 (in Chinese)
- [3] Gorez R, Galardini D, Zhu K Y. Model based control systems [A]. Mathematics of the Analysis and Design of Process Control [M]. North-Holland: Elsevier Science Publishers B. V., 1992, 70: 223 - 232
- [4] Gorez R, M De Neyer, Barreto J. Model based fuzzy control systems [A]. Mathematics of the Analysis and Design of Process Control [M]. North-Holland: Elsevier Science Publishers B. V., 1992, 613 - 623
- [5] Xie W F, Rad A B, Wang Y K. Evaluation of a hybrid fuzzy internal model control [J]. Control and Computers, 1997, 25(3): 65 - 72
- [6] Gorez R, M De Neyer, Barreto J. Fuzzy internal model control [A]. Tzafestas S G, ed. Engineering Systems with Intelligence [M]. Boston, MA: Kluwer Academic Publisher, 1991, 415 - 422

#### 本文作者简介

刘敏东 1970年生. 2000年甘肃工业大学获硕士学位, 现为中国科学技术大学自动化系博士生. 目前研究方向为智能信息控制.

杨智 1961年生. 1988年在甘肃工业大学获硕士学位. 现为中山大学信息科学与技术学院教授. 目前研究领域为计算机过程控制, 智能控制及大时滞系统控制等.

方廷健 1939年生. 博士生导师. 中国科学院合肥智能机械研究所研究员, 中国科学技术大学兼职教授. 目前研究方向为智能信息处理与智能控制.