

延迟时间未知的时延系统 Fuzzy - Gray 预测控制

王军平¹, 王安¹, 李教¹, 敬忠良²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 上海交通大学 电子信息学院, 上海 200030)

摘要:提出了一种带智能积分的参数自调整 Fuzzy - Gray 预测控制算法。该算法综合 Fuzzy 控制、Gray 预测的长处,同时利用神经网络辨识延迟系统的延迟时间来在线调整灰色预测控制器的参数。仿真结果表明这种控制策略具有很好的控制效果,它是大延迟控制中克服延迟时间变化的很有希望的方法,并能较好地兼顾系统的动、静态特性,超调小、响应快,稳态精度高。

关键词:灰色预测;模糊控制;神经网络;时滞系统;延迟时间的辨识;智能积分

中图分类号:TP13 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2002)01 - 0071 - 04

滞后是工业过程中固有的特性,大滞后大大降低了系统的稳定性,容易导致较大的超调量和较长的调节时间,严重影响生产过程的控制品质^[1]。对于大滞后系统的控制,人们作了不少研究,有些补偿方法从理论上讲是可以克服纯滞后所产生的影响,但需要准确地掌握对象的数学模型。文献[2]提出了一种新的思路,即把预测控制和模糊控制有机地结合,形成优势互补。实际上,许多工业过程是灰色系统,即其内部信息不完全。灰色预测模型能够根据大量信息进行计算和推测,不需要掌握关于被控对象模型结构的先验信息,具有很强的自适应性。通常采用的 GM(1,1)模型仅根据系统实际输出的离散值进行预测,且仅需辨识和修正,特别适合于工业过程的实时控制^[3-4]。但该控制方法假定延迟时间为已知的,因此延迟时间的变化可能会引起控制品质的恶化,甚至使系统不稳定。本文提出了 Fuzzy - Gray 预测控制,较好地解决了这一问题。

1 延迟时间未知的时延系统 Fuzzy - Gray 预测控制结构

对于时滞为 d 的系统, k 时刻的控制量 u_k 到 $k + d$ 时刻才起作用。要想克服滞后对系统的影响, k 时刻的控制量 u_k 应由 $k + d$ 时刻的偏差 $e(k + d)$ 及其变化量 $e(k + d)$ 决定。本文提出的带智能积分的参数自调整 Fuzzy - Gray 预测控制器以灰色系统理论为基础,以系统行为代替系统的数学模型, $k + d$ 时刻的预测值由灰色预测算法求得,但系统的时滞 d 是未知的或变化的,神经网络具有很强的非线性辨识能力,因而时滞 d 可由神经网络辨识得到,利用神经网络辨识延迟系统的延迟时间

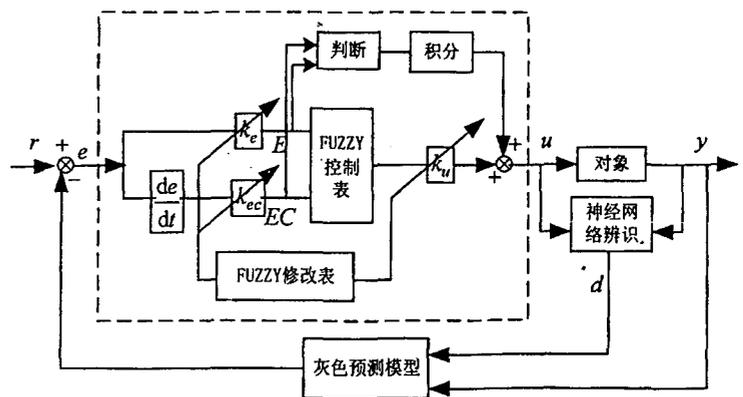


图1 延迟时间未知的时延系统 Fuzzy - Gray 预测控制

时间来在线调整灰色预测控制器的参数。而用系统的预测误差参与对 Fuzzy 控制器参数的在线调整。利用这种综合控制策略克服大延迟控制中延迟时间变化给控制品质带来的恶劣影响,提高控制精度及动态品质。系统结构框图如图 1 所示。图中虚线框内为带智能积分的参数自调整 Fuzzy 控制器。

收稿日期:2001 - 04 - 25

基金项目:国家教育部留学回国人员基金和跨世纪优秀人才培养计划基金资助

作者简介:王军平(1974 -),男,陕西合阳人,博士生,主要从事高性能控制及应用、智能控制研究。

2 延迟时间的神经网络辨识方法

设线性延迟系统离散化方程为:

$$\mathbf{A}(z^{-1})y(t) = z^{-d}\mathbf{B}(z^{-1})u(t) \quad (1)$$

其中 d 为系统的时间延迟。对于线性延迟系统延迟时间的辨识,由于 d 隐含在差分方程的系数中,可以采用两层自适应线性单元网络。网络的权重与离散化后差分方程的系数一一对应,找到第一个不为零的权重,它所对应的后移步数即为系统的延迟 d 。但大多数系统本身都是非线性的,对于非线性的延迟系统,当前输出 $y(k)$ 是以前输出 $y(k-1), \dots, y(k-n)$ 以及 d 步延迟以前的输入 $u(k-d), \dots, u(k-m-d)$ 的函数:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-d), \dots, u(k-m-d)) \quad (2)$$

当用线性网络来表征非线性系统时,网络权重与系统参数无一一对应关系,因而不能用线性系统延迟时间辨识法。研究表明:用三层反向传播网络,采用不同的输入采样区间的采样集对网络的训练结果有很大的影响。从输入采样区间不包含第一个延迟输入量 $h = d + 1$ 到包含第一个延迟输入量 $h = d$ 时,网络的训练结果(即期望输出与网络输出的误差平方和)产生突变,由此可以来辨识非线性对象的时间延迟。

以系统 $y(k) - 0.778y(k-1) = 0.442u^2(k-5)$ 为例。网络输入为 $y(k-1), u(k-h), \dots, u(k-h-6)$ 共 9 个输入,网络输出为 $y(k)$, 则网络结构采用(9,5,1)三层网络。用 100 个样本训练集对网络进行训练,对于不同的 h 值求出期望输出网络输出的误差平方和。计算结果如图 2 所示,误差平方和对 h 值很敏感。在 $h = 5$ 和 $h = 6$ 之间网络的逼近效果有突变,而实际的延迟时间就是 $d = 5$,所以可利用网络的训练效果产生突变来辨识非线性系统的时间延迟。

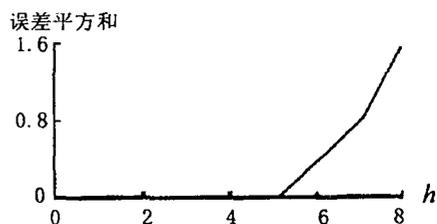


图 2 延迟步数 $h-5$ 误差平方和关系

3 灰色预测算法

灰色系统是指那些信息部分明确又部分不明确的系统。对于那些难于精确建立数学模型的系统都属于灰色系统的范畴。在灰色系统理论中,GM(1,1)模型是根据关联度,生成数的灰导数以及灰微分等观点建立起来的微分方程。灰色预测就是建立在 GM(1,1)模型基础上。本文即利用 GM(1,1)模型来对系统 $k+d$ 时刻的输出进行预测。

3.1 GM(1,1)建模方法

设系统输出的数据列向量为:

$$\mathbf{Y}_m = (y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), \dots, y^{(0)}(m))^T \quad (3)$$

$$Y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.5(y^{(1)}(1) + y^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(y^{(1)}(2) + y^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(y^{(1)}(m-1) + y^{(1)}(m)) & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则待辨识参数列为:

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_m \quad (6)$$

从而 GM(1,1)模型的解析解为:

$$\begin{cases} \hat{y}^{(1)}(k+1) = (y^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \\ \hat{y}^{(0)}(k+1) = \hat{y}^{(1)}(k+1) - \hat{y}^{(1)}(k) \end{cases} \quad (7)$$

GM(1,1)模型的精度与用来建模的原始数据列 $Y^{(0)} = (y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(m))$ 的取舍有关。为了不断把相断进入系统的扰动考虑进去,GM(1,1),重新预测,这便是新息模型。但这种新息模型随着时间

的推移,信息越来越多,存贮量不断增大,运算量也不断增加。这既不适合工业过程控制对实时性、快速性的要求,而且老数据的信息会随时间地推移而降低,甚至淹没新的有效信息。因此,在每补充一个新信息的同时去掉一个老信息,以便在滚动建模时维持数据个数不变,这就是等维新息滚动模型。

3.2 等维新息滚动预测算法

设系统 h 时刻的采样值为 $y^{(0)}(h)$, 并与此前的 $m-1$ 个采样数据形成序列:

$Y^{(0)} = (y^{(0)}(h-m+1), y^{(0)}(h-m+2), \dots, y^{(0)}(h))$, 由此 $m-1$ 个数据经由式(3)至式(7)得到超前一步预测式:

$$\hat{y}^{(1)}(h+1) = (y^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a})e^{-am} + \frac{b}{a} \tag{8}$$

$$k_1 \text{ 步预测为: } \hat{y}^{(1)}(h+k_1) = (y^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a})e^{-a(m+k_1-1)} + \frac{b}{a} \tag{9}$$

$$k_1 - 1 \text{ 步预测为: } \hat{y}^{(1)}(h+k_1-1) = (y^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a})e^{-a(m+k_1-2)} + \frac{b}{a} \tag{10}$$

则:

$$\begin{aligned} \hat{y}^{(0)}(h+k_1) &= \hat{y}^{(1)}(h+k_1) - \hat{y}^{(1)}(h+k_1) \\ &= (y^{(0)}(h-m+1) - \frac{b}{a})(e^{-a(m+k_1-1)} - e^{-a(m+k_1-2)}) \end{aligned} \tag{11}$$

上式即为等维新息滚动预测算法。式中, h 为采样时刻, m 为建模维数, a, b 为 h 时刻辨识所得参数, k_1 为预测步数。

在预测控制时,只有选取适当的预测步数及建模维数才能比较准确地预测系统行为的发展变化,使灰色预测控制起到超前的作用,提高控制的准确性、实时性。一般来说,系统滞后越大,预测步数越大,建模维数选取 $m=5$ 即可^[1]。本文中令预测步数等于系统延迟时间,即 $k_1=d$,其值由神经网络辨识后在线调整。

4 带智能积分的参数自调整模糊控制器

为了提高 Fuzzy 控制器的稳态性能,必须加入积分控制作用。但积分的比例系数的选取难度较大,过大使系统振荡,过小体现不出积分作用。为解决这一问题,在 Fuzzy 控制器中引入智能积分,以典型的二阶系统的动态响应(如图 3)为例。

在图 3 中, (a, b) 段、 (c, d) 段系统误差趋势增大,此时应引入积分作用;在 (b, c) 段、 (d, e) 段系统误差趋势减小,应取消积分作用。由图 3 可知,在 (a, b) 、 (c, d) 段内系统动态信息 $E \cdot EC > 0$,而在 (b, c) 段、 (d, e) 段 $E \cdot EC < 0$ 。所以可以利用对特征信息 $E \cdot EC$ 的在线识别决定积分作用的切换,再根据边界条件,带智能积分的模糊控制器的控制算法为:

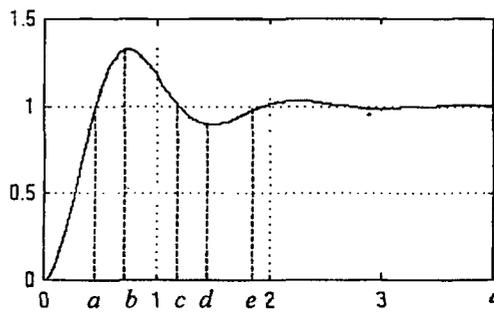


图 3 典型二阶系统的阶跃响应

$$u = \begin{cases} \text{Fuzzy 控制} & E \cdot EC < 0 \text{ 或 } E = 0 \\ \text{Fuzzy 控制} + k_o \sum_{i=1}^k e_i & E \cdot EC > 0 \text{ 或 } EC = 0, E \neq 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中 k_o 为积分控制因子。

k_e 为 e 的模糊量化因子, k_{ec} 为 $e \cdot c$ 的模糊量化因子, k_u 为输出的比例因子。量化因子和比例因子的大小及其不同因子之间大小的相关关系对模糊控制器的性能影响极大。采用模糊集合理论解决模糊控制参数的自调整问题,实现控制器参数的在线动态修改。

设 k_e, k_{ec}, k_u 的放大倍数的语言变量 N 为模糊子集:

$$N = \{PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB\} \tag{13}$$

其中, $PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB$ 分别表示高放,中放,低放,不变,小缩,中缩,大缩。

N 的论域定义为:

$$N = \{0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8\} \tag{14}$$

据此可写出 N 的隶属赋值表,误差 e 和误差变化量 \dot{e} 的模糊子集及其隶属度赋值表。依照和 Fuzzy 控制器同样的推理合成办法计算出参数自调整 Fuzzy 参数修改表。则该控制器的工作过程为:用原来的 k_e 、 k_{ec} 对 e 和 \dot{e} 进行量化,查 Fuzzy 修改表得出参数应放大或缩小的倍数 n ,以计算得到的 $k'_e = k_e \cdot n$, $k'_{ec} = k_{ec} \cdot n$, $k'_u = k_u/n$ 作为 Fuzzy 控制器的新参数进行控制运算。

5 仿真研究

设一阶纯滞后系统的模型为: $G(s) = \frac{4e^{-4s}}{4s+1}$

将该系统离散化后利用图 1 所示控制策略。在 $t = 200$ s 时令系统的延迟时间 $\tau = 5$ s,仿真结果如图 4 所示。结果显示,采用本文所提出的控制策略可以克服延迟时间变化引起的控制效果的恶化。

带智能积分的参数自调整 Fuzzy - Gray 预测控制不一定要十分精确的数学模型,因而自适应性和鲁棒性强,并且较好地兼顾了动静态特性,具有超调小,响应快,稳态精度高优点。神经网络具有很强的非线性辨识能力,将二者的结合用于有变化参数或者不确定性延迟时间的大延迟系统的控制具有很好的控制效果,它是大延迟控制中克服延迟时间变化的很有希望的方法。

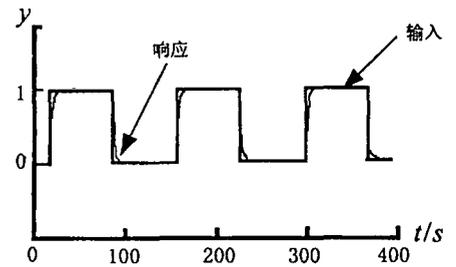


图 4 时延变化时的仿真曲线

参考文献:

- [1] 王永初. 滞后过程的预估与控制[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [2] 章卫国,高季雍,肖顺达. 带达化修正函数模糊控制规则自调整方法研究[J]. 西北工业大学学报,1996,14(增刊):160-162.
- [3] 毕效辉,姚琼荟. 灰色预测在过程控制中的应用[J]. 西南工学院学报,1997,(3):11-16.
- [4] 陆燕,杜继宏,李春文. 延迟时间未知的时延系统神经网络补偿控制[J]. 清华大学学报(自然科学版),1998,38(9):67-69.
- [5] Chen S B, Wu L. Fuzzy neural networks for control of uncertain systems with time delay[A]. IEEE conference on NN[C]. San Francisco,1996. 1171-1177.

(编辑:门向生)

Fuzzy - Gray Predicative Control for Systems with Unknown Time Delay

WANG Jun - ping¹, WANG An¹, LI Jiao¹, JING Zhong - liang²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Institute of Aerospace Information and Control School of Electronics and Information Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The variations in the delayed time in time delay systems will worsen control quality. For the control of this kind of system, a parameter self - adapting Fuzzy - Gray predicative control algorithm with intelligent integration is presented. It synthesizes the advantages both of the fuzzy control and of the gray predication. The delayed time is identified by neural network to adjust the parameter of the gray predication online. Simulation result shows that this control strategy can overcome the variation in the delayed time and is in response both to the dynamic and the static characteristic of time delay system. What is more, it features a small overshoot, quick response and high static precision.

Key words: gray predicative; fuzzy control; neural network; time delay system; identification of delayed time; intelligent integration