

一种简化的区间二型模糊系统辨识方法

王 哲

(天津现代职业技术学院 天津 300350)

摘 要 KM 降阶算法是目前区间二型模糊集合常用的降阶算法,针对其效率低、难以用于实时辨识与控制的缺点,提出了一种简化的区间二型模糊系统辨识方法。该方法采用二型 T-S 模糊模型,前件参数为区间二型模糊集合,后件参数为普通 T-S 模糊模型形式。二型 T-S 模糊模型的解模糊化采用简化的降阶算法,提高了模型的辨识效率,可用于实时辨识与控制。仿真实例表明,所提算法在不降低辨识精度的情况下能够有效提高辨识效率。

关键词 区间二型模糊集合, KM 降阶算法, T-S 模糊系统, 模糊辨识

中图分类号 TP273+.4 **文献标识码** A

Interval Type 2 Fuzzy System Identification Using NT Type Reduction Algorithm

WANG Zhe

(Tianjin Modern Vocational Technology College, Tianjin 300350, China)

Abstract KM is a commonly used algorithm for interval type 2 fuzzy sets type reduction, which has the weakness of low efficiency, thus it is difficult to be used for online identification and control. A simplified interval type 2 fuzzy system identification method was proposed in this article. The method uses type 2 T-S fuzzy model, the premise fuzzy set of which is interval type 2 fuzzy sets and the consequent parameter is the same as type 1 T-S fuzzy model. A simplified type reduction algorithm was used in this article instead of KM algorithm. The simulation shows that the simplified method can improve identification efficiency without reducing identification accuracy and can be used for real time identification and control.

Keywords Interval type 2 fuzzy sets, KM type reduction, T-S fuzzy system, Fuzzy identification

1 引言

1965 年, Zadeh 将模糊集合的思想应用于传统的集合理论, 这种应用使传统的集合得到了极大的拓展。将该应用提炼成的理论就是模糊集合理论。该理论引进了一种新的标志(隶属度值)来对原来的集合进行重新模糊化, 经过重新处理的集合称为模糊集合, 也即传统模糊集合。模糊集合与模糊逻辑理论在控制领域, 尤其在模糊系统的辨识方面, 得到了广泛的应用, 常见的模糊模型系统包括 madani 和 T-S 模糊模型。但在实际中存在着诸多不确定性, 如模糊前后件的描述不确定、专家知识的不确定、测量过程中的噪声等, 这些不确定性都会导致模糊隶属度函数的不确定性。而传统模糊系统的隶属度函数是精确的, 在处理上述不确定性的过程中, 传统模糊集合存在一定的缺陷。

针对该缺陷, Zadeh^[1]于 1975 年又提出了二型模糊集合, 该模糊集合的特点是隶属度本身也是模糊的, 从而增强了二型模糊集合描述不确定性的能力。但在很长的时间内, 二型模糊集合由于运算的复杂性, 其研究与应用较少。随着二型模糊集合理论的发展, Mendel^[2]和他的团队提出了一种更为先进的概念, 即区间二型模糊集合的概念, 该概念将所有的二型集合用固定的隶属度“1”简化成为一个区间模糊集合, 其思想的优势十分明显, 它极大地简化了理论计算过程, 加强了工程实用性。

区间二型模糊逻辑系统与传统模糊系统的重要区别在于

其存在降阶过程, 即先将二型模糊集合降阶为一型模糊集合, 然后在上一步降阶后的计算结果上再进行一轮模糊化操作, 最终得到实际的输出, 其中使用较多的是 KM 降阶算法^[3]。但 KM 算法本身属于迭代运算, 其搜索效率较低, 因此更多高效的降阶算法被提出, 如 EKM^[4], IASC^[5], EIASC^[6]等。

尽管上述算法的搜索效率高于 KM 算法, 但他们都是搜索算法, 不可避免地会进行迭代运算, 在实时辨识与控制中难以运用。本文给出一种简化的区间二型模糊系统, 在降阶部分不采用 KM 等传统降阶算法, 而采用一种简化降阶过程, 提高了降阶算法的实时性。仿真实例表明, 本文简化的区间二型模糊系统的辨识精度变化不大, 并且提高了二型模糊逻辑系统辨识的实时性。

2 区间二型模糊集合

根据二型模糊集合的定义, 给定论域 X 及其元素 $x \in X$, 二型模糊集合为^[2]:

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\}$$

其中, u 是首隶属函数, $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ 是次隶属度函数, $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ 。若次隶属度函数都为 1, 则定义区间二型模糊集合 $\tilde{A}$ 为^[8-9]:

$$\tilde{A} = \{(x, u), 1 \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\}$$

若论域 X 为连续的, 区间二型模糊集合 $\tilde{A}$ 也可表示为:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u), J_x \subseteq [0, 1]$$

将传统模糊逻辑系统的前件或者后件参数替换成二型模糊集合, 从而产生二型模糊逻辑系统, 其与传统模糊逻辑系统

的不同在于需增加降型操作。

3 KM 降阶算法

根据 KM 算法, 区间二型模糊集合的降阶结果为实数区间 $[c_l, c_r]$ 。两个端点的计算公式如式(1)、式(2)所示:

$$c_l = \frac{\sum_{i=1}^L x_i \bar{f}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^L \bar{f}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N f(x_i)} \quad (1)$$

$$c_r = \frac{\sum_{i=1}^R x_i f(x_i) + \sum_{i=R+1}^N x_i \bar{f}(x_i)}{\sum_{i=1}^R f(x_i) + \sum_{i=R+1}^N \bar{f}(x_i)} \quad (2)$$

其中, $f(x_i)$ 和 $\bar{f}(x_i)$ 分别为首隶属度函数的上限和下限, L 和 R 分别为 KM 算法求出的左切换点和右切换点。KM 算法如下所示。

算法 1 KM 算法

计算 c_l :

Step1 将 $x_i (i=1, \dots, N)$ 按照从小到大的顺序排列, x_i 的首隶属度函数的上、下限也对应着排列;

Step2 初始化:

$$f(x_i) = \frac{\bar{f}(x_i) + \bar{f}(x_i)}{2}$$

计算:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)}$$

Step3 从 1 到 $N-1$, 寻找 L , 使得 $x_L \leq y < x_{L+1}$;

Step4 计算:

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^L x_i \bar{f}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^L \bar{f}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N f(x_i)}$$

Step5 若 y 与 y' 的差值小于某一阈值, 则停止, 得到 $c_l = y'$, 否则设 $y = y'$, 转 Step3。

计算 c_r :

Step1 将 $x_i (i=1, \dots, N)$ 按照从小到大的顺序排列, x_i 的首隶属度函数的上限和下限也对应着排列;

Step2 初始化:

$$f(x_i) = \frac{\bar{f}(x_i) + f(x_i)}{2}$$

计算:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)}$$

Step3 从 1 到 $N-1$, 寻找 R , 使得 $x_R \leq y < x_{R+1}$;

Srep4

计算:

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^R x_i f(x_i) + \sum_{i=R+1}^N x_i \bar{f}(x_i)}{\sum_{i=1}^R f(x_i) + \sum_{i=R+1}^N \bar{f}(x_i)}$$

Step5 若 y 与 y' 的差值小于某一阈值, 则停止, 得到 $c_r = y'$, 否则设置 $y = y'$, 转 Step3。

从 KM 算法的过程可以看出, 其运算效率较为低, 尤其是搜索过程, 该过程难以用于实时辨识或控制。

4 简化降阶算法

文献[9]提出了 3 类常用的二型 T-S 模糊模型, 假设有 M 条规则, 第 l 条规则的表示如下。

1) R^l : if x_1 is $\tilde{A}_1^l$ and x_2 is $\tilde{A}_2^l$ and $\dots$ and x_p is $\tilde{A}_p^l$, then

$$y^l = C_0^l + C_1^l x_1 + C_2^l x_2 + \dots + C_p^l x_p$$

其中, 后件参数 C_i^l 为一型模糊集合; y^l 是第 l 条规则的输出, 也为二型模糊集合; 前件参数 $\tilde{A}_i^l$ 为二型模糊集合。

2) R^l : if x_1 is $\tilde{A}_1^l$ and x_2 is $\tilde{A}_2^l$ and $\dots$ and x_p is $\tilde{A}_p^l$, then

$$y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + c_2^l x_2 + \dots + c_p^l x_p$$

其中, 后件参数 c_i^l 为精确值; y^l 是第 l 条规则的输出, 也为精确值; 前件参数 $\tilde{A}_i^l$ 为二型模糊集合。

3) R^l : if x_1 is A_1^l and x_2 is A_2^l and $\dots$ and x_p is A_p^l , then

$$y^l = C_0^l + C_1^l x_1 + C_2^l x_2 + \dots + C_p^l x_p$$

其中, 后件参数 C_i^l 为一型模糊集合; y^l 是第 l 条规则的输出, 也为二型模糊集合; 前件参数 A_i^l 为一型模糊集合。

本文采用第 2 类 T-S 模糊模型, 在模糊推理部分采用取小操作。

本文采用文献[10]的简化降阶算法, 避免了 KM 算法的迭代运算, 直接得到降阶结果, 如式(3)、式(4)所示。

$$c_l = \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i y^i}{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \quad (3)$$

$$c_r = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i y^i}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i} \quad (4)$$

其中, $[\underline{f}^i, \bar{f}^i]$ 为第 i 条规则的上隶属度和下隶属度, y^i 为第 i 条规则的输出。最终的二型模糊系统的输出(即解模糊化结果)如式(5)所示:

$$y_{\cos} = \frac{c_l + c_r}{2} \quad (5)$$

5 仿真实例

5.1 仿真实例 1

选取如下的非线性系统^[11]:

$$y(t+1) = \frac{y(t)}{1+y(t)} + u(t)^3$$

其中, $u(t) = \sin(2\pi t/100)$, $t=1-400$, 本例的模糊系统的输入为 $u(t)$ 和 $y(t)$, 输出为 $y(t+1)$ 。

该区间二型模糊系统采用的前件参数和后件参数可参考文献[11]中规则数为 6 条时的参数, 文献[11]的后件参数也进行了模糊化处理, 将本文的后件参数进一步简化为确定值。

辨识精度通过均方误差平方根(RMSE)来描述:

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y^i - \hat{y}^i)^2}{N}}$$

其中, $N=400$ 。

图 1 给出了利用简化降阶算法的二型模糊系统和非线性系统的输出曲线, 实线为二型模糊系统输出, 点化线为非线性系统输出。图 2 给出了利用 KM 算法和简化降阶算法的二型系统的输出曲线。图 3 给出了利用 KM 算法和简化降阶算法的二型系统的输出误差曲线。

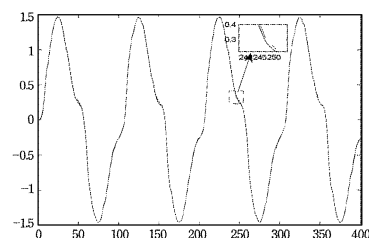


图 1 二型模糊系统和非线性系统的输出曲线

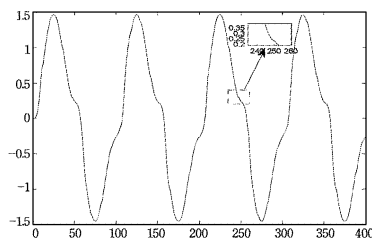


图 2 KM算法和简化降阶算法的二型系统的输出曲线

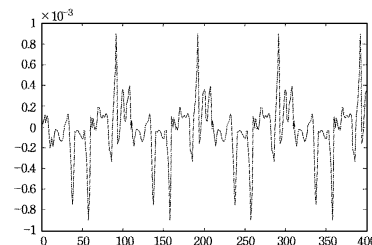


图 3 KM算法和简化降阶算法的二型系统的误差曲线

KM算法和简化降阶算法的 RMSE 都为 0.0101。

5.2 仿真实例 2

选取如下的非线性系统^[12]:

$$y(t+1)=0.3y(t)+0.6y(t-1)+f(u(t))$$

其中, $f(u(t)) = 0.6\sin(\pi u(t)) + 0.3\sin(3\pi u(t)) + 0.1\sin(5\pi u(t))$, $u(t) = \sin(2\pi t/200)$, $t=1-1000$, 本例的模糊系统的输入为 $u(t)$, $y(t)$ 和 $y(t-1)$, 输出为 $y(t+1)$ 。

该区间二型模糊系统采用的前件参数和后件参数可参考文献[11]中规则数为 7 条时的参数, 文献[11]的后件参数也做了模糊化处理, 本文的后件参数同样简化为确定值。

辨识精度通过均方误差平方根(RMSE)来描述:

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y^i - \hat{y}^i)^2 / N}$$

其中, $N=1000$ 。

图 4 给出了利用简化降阶算法的二型模糊系统和非线性系统的输出曲线, 实线为二型模糊系统输出, 点化线为非线性系统输出。图 5 给出了利用 KM 算法和简化降阶算法的二型系统的输出曲线。图 6 给出了利用 KM 算法和简化降阶算法的二型系统的输出误差曲线。

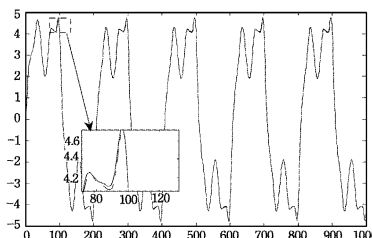


图 4 二型模糊系统和非线性系统的输出曲线

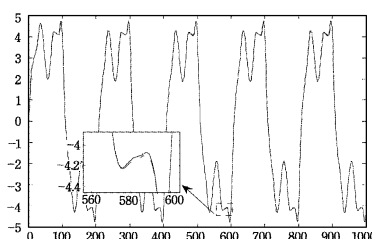


图 5 KM算法和简化降阶算法的二型系统的输出曲线

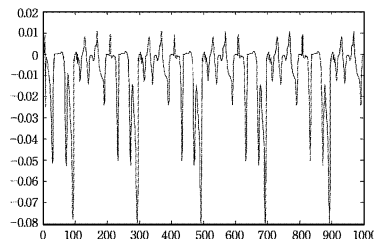


图 6 KM算法和简化降阶算法的二型系统的误差曲线

KM算法和简化降阶算法的 RMSE 为 0.0313 和 0.0253。

结束语 二型模糊系统降阶运算的复杂性制约了其实际应用, 即使区间二型模糊系统在很大程度上降低了降阶运算的复杂性, 但常用的降阶算法都需要不断搜索来得到两个区间点, 对在线辨识与实时控制的要求还有一定的距离。

本文利用一种简化的降阶算法进行区间二型模糊系统的辨识, 该简化的降阶算法直接得到区间二型模糊系统的解模糊化结果, 避免了 KM 算法中每个采样点都需要进行迭代搜索操作, 大幅度地减少了运算时间。本文算法可进一步用于区间二型模糊系统的在线辨识与实时控制。

参考文献

- [1] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I[J]. Information Sciences, 1975, 8(1):199-249.
- [2] MENDEL J M. Uncertain Rule Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions [M]. Upper-Saddle River NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [3] KARNIK N N, MENDEL J M. Centroid of a type-2 fuzzy set [J]. Information Sciences, 2001, 132:195-220.
- [4] WU D, MENDEL J M. Enhanced Karnik-Mendel algorithms [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(4):923-934.
- [5] MELGAREJO M. A Fast Recursive Method to Compute the Generalized Centroid of an Interval Type-2 Fuzzy Set[C]// Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society-NAFIPS, 2007:190-194.
- [6] WU D, NIE M. Comparison and practical implementation of type-reduction algorithms for type-2 fuzzy sets and systems[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2011:2131-2138.
- [7] LIANG Q, MENDEL J M. Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(5):535-550.
- [8] MENDEL J M, JOHN R I, LIU F. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(6):808-821.
- [9] LIANG Q, MENDEL J M. An introduction to type-2 TSK fuzzy logic systems[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1999:1534-1539.
- [10] CASTILLO O. Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications[M]. Studies in Fuzziness & Soft Computing, 2012.
- [11] 陈洪杰. 二型模糊系统的设计及其在非线形系统辨识中的应用[D]. 上海:华东理工大学, 2015.
- [12] DE J R J. SOFMLS: Online Self-Organizing Fuzzy Modified Least-Squares Network[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(6):1296-1309.