

文章编号: 1001-0920(2009)10-1597-04

一种改进的区间二型模糊控制器设计

曹江涛¹, 李 平², 刘洪海³

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院,
辽宁 抚顺 113001; 3. 朴茨茅斯大学 工业研究所, 朴茨茅斯 PO1 3QL)

摘 要: 针对二型模糊控制器设计中出现的降型计算方法损失不确定性信息的问题, 提出一种改进的区间二型模糊控制器. 该控制器在充分利用二型模糊推理结果的前提下, 对区间模糊输出进行再次优化, 其优化指标可直接与被控系统性能相关, 由此可得到更有利于提高系统整体性能的准确输出量. 最后, 将改进的控制器用于汽车非线性悬架系统的控制, 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 二型模糊逻辑; 区间推理; 模糊控制器; 再次优化

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Improved interval type-2 fuzzy logic controller

CAO Jiang-tao¹, LI Ping², LIU Hong-hai³

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 3. Institute of Industrial Research, University of Portsmouth, Portsmouth PO1 3QL, UK. Correspondent: LI Ping, E-mail: liping@lnpu.edu.cn)

Abstract: In this paper, an improved interval type-2 fuzzy logic controller is proposed to deal with the problem of losing uncertain information in the type-2 fuzzy type reduction process. By fully using the type-2 fuzzy reasoning results, the interval fuzzy outputs are re-optimized. The optimal performance can be directly related with the controlled system. Based on this, the crisp control outputs are obtained to improve the whole system performance. Simulations on the non-linear vehicle active suspension system are given, and the results show the effectiveness of proposed method.

Key words: Type-2 fuzzy logic; Interval reasoning; Fuzzy logic controller; Further optimization

1 引 言

二型模糊集合的概念最早是由 Zadeh 教授^[1]在 1975 年的文章中提出的, 在近十年间得到了快速发展, 并逐渐成为模糊理论的一个新兴研究领域. 二型模糊系统是在传统模糊系统的基础上进行了扩维处理, 使一个单一的模糊变量由两个或多个不同层次的隶属度函数进行描述. 由此, 其推理及设计自由度得到了扩展, 从而在处理不确定性复杂系统问题上有着潜在的优势. 基于近几年来发表的研究成果, 二型模糊系统已在模糊聚类、自主机器人控制、模式识别、无线通信等领域得到了研究和应用^[2-4].

本文主要集中讨论二型模糊系统的一个分支, 那就是区间二型模糊控制系统. 这类控制系统既体现了二型模糊系统处理不确定性问题的推理能力, 又避免了一般二型模糊系统运算量过大的问题, 因

此在近几年取得了一些理论及应用的研究成果. 文献[2]将区间二型模糊控制器应用于自主机器人控制中, 取得了优于传统模糊控制的结果; [3]将其应用在信号处理和轮式机器人控制上, 也取得了较好的结果; [4]则将其应用于无线传感器网络生命周期分析系统; [5]则在区间推理和隶属度函数选择等理论问题上展开研究, 并对二型模糊系统的硬件实现进行了实验; [6]对最近关于二型模糊系统的研究进行了综述.

区间二型模糊控制系统提高了对模糊推理和模糊描述本身具有的不确定性的处理能力, 但同时在降型处理方法和系统化设计上还存在一些问题. 本文针对降型处理方法中存在的系统信息损失问题, 提出了一种基于再次优化的降型处理算法, 由此改进了原有二型模糊推理信息的完整性, 同时还利用

收稿日期: 2008-12-13; 修回日期: 2009-03-17.

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA04Z162); 辽宁省高校创新团队支持计划项目(2006T089).

作者简介: 曹江涛(1978—), 男, 山东郯城人, 讲师, 博士生, 从事智能控制方法的研究; 李平(1964—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士生导师, 从事工业过程的先进控制及优化的研究.

反馈结构将优化指标与被控系统的性能建立关联, 以此改善系统整体性能。

2 区间二型模糊控制器原理

2.1 区间二型模糊集

区间二型模糊集是广义二型模糊集合的一个特例, 其隶属度函数如图 1 所示. 其中: UMF 为上界隶属度函数, LMF 为下界隶属度函数, EMF 为嵌入隶属度函数。

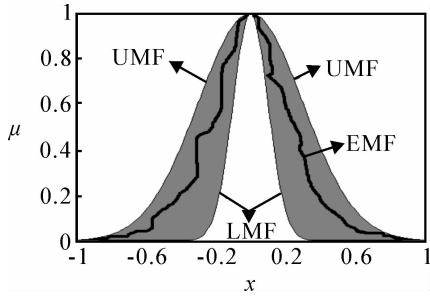


图 1 区间二型模糊集及其隶属度函数

区间二型模糊集可一般性地描述为

$$\tilde{A}_2 = \{((x, u), \mu_{\tilde{A}_2}(x, u)) \mid \forall x \in X,$$

$$\forall u \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}_2}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}_2}(x)] \subseteq [0, 1]\}. \quad (1)$$

其中: $\underline{\mu}_{\tilde{A}_2}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}_2}(x)$ 均为传统模糊隶属度函数, 分别对应于区间二型模糊隶属度函数的下界 (LMF) 和上界 (UMF). 由此可见, 区间二型模糊集是以传统模糊隶属度函数为约束界, 并能够表述隶属度函数不确定性的一种模糊集合. 其最终的隶属度函数可体现为上下边界之间的任意嵌入隶属度函数 (EMF).

为便于描述, 在此将所有体现在上下边界之间的第 1 隶属度函数统一称为 FOU (footprint of uncertainty), 其表达式为

$$\text{FOU}(\tilde{A}_2) = \bigcup_{x \in X} J_x = \bigcup_{x \in X} [\underline{\mu}_{\tilde{A}_2}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}_2}(x)]. \quad (2)$$

假设 $\hat{A}_2, \hat{B}_2$ 为两个区间二型模糊集合, 则 3 种主要集合运算 (交, 并和补) 可表示为

$$\hat{A}_2 \cap \hat{B}_2 =$$

$$1 / \bigcup_{x \in X} [\underline{\mu}_{\hat{A}_2}(x) * \underline{\mu}_{\hat{B}_2}(x), \bar{\mu}_{\hat{A}_2}(x) * \bar{\mu}_{\hat{B}_2}(x)], \quad (3)$$

$$\hat{A}_2 \cup \hat{B}_2 =$$

$$1 / \bigcup_{x \in X} [\underline{\mu}_{\hat{A}_2}(x) \vee \underline{\mu}_{\hat{B}_2}(x), \bar{\mu}_{\hat{A}_2}(x) \vee \bar{\mu}_{\hat{B}_2}(x)], \quad (4)$$

$$\bar{\hat{A}}_2 = 1 / \bigcup_{x \in X} [1 - \underline{\mu}_{\hat{A}_2}(x), 1 - \bar{\mu}_{\hat{A}_2}(x)]. \quad (5)$$

基于以上的基本运算, 可对区间二型模糊集进行各种复杂的推理运算。

2.2 区间二型模糊控制器

利用区间二型模糊集合设计的控制器被称为区

间二型模糊控制器, 其结构如图 2 所示。

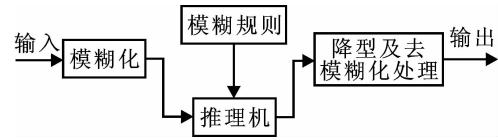


图 2 区间二型模糊控制器结构图

整个区间二型模糊控制器包括模糊化, 模糊推理机及模糊规则, 降型和去模糊化处理几个部分. 其运算可描述为: 首先, 将精确输入模糊化为区间二型模糊变量; 然后, 根据之前给出的模糊运算, 结合模糊规则, 在推理机内对模糊变量进行区间二型模糊推理, 由此得到区间二型模糊输出. 这些输出量包含了模糊化和模糊推理过程中体现的区间二型模糊控制信息, 并且隶属于区间二型模糊集, 此时需要进行降型处理, 使其转化为传统模糊变量; 最终, 利用去模糊化方法得到精确的控制量. 由该运算过程可看出, 如何将二型模糊推理得到的控制信息有效地转变为精确的控制量 (即降型处理方法) 对体现区间二型模糊控制器的有效性具有重要的作用。

对于已有区间二型模糊系统, 降型处理方法有很多, 在此主要介绍两类方法: 一类是由 Karnik 和 Mendel^[6] 提出的递推方法 (K-M 算法); 另一类是由 Wu 和 Mendel^[6] 提出的基于不确定界的直接计算方法 (W-M 算法). 第 1 类方法计算精度高, 且利用并行算法可提高计算效率, 但由于递推计算带来的时间上的滞后, 使其在实时应用上会遇到计算瓶颈问题; 第 2 类方法为近似计算方法, 其最终的精确值取决于 4 个不确定度边界值和对这 4 个边界值的均值算法, 所得结果基本不损失精度, 且计算量小, 可用于实时环境. 但最近的研究结果表明, 这种降型处理方法会损失一部分信息, 特别是原来体现在二型模糊推理过程中的系统信息. 本文将基于第 2 类方法, 设计一种改进的区间二型模糊控制器, 通过再次寻优的方法来充分利用二型模糊推理结果所含的信息, 改进整个控制系统的性能。

3 改进的区间二型模糊控制器设计

3.1 W-M 降型算法

在此, 首先给出 W-M 算法的运算公式如下:

$$\begin{aligned} \bar{y}_l(x) &= \\ \min \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i y_l^i / \sum_{i=1}^M \bar{f}^i, \sum_{i=1}^M \bar{f}^i y_l^i / \sum_{i=1}^M \bar{f}^i} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \underline{y}_r(x) &= \\ \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i y_r^i / \sum_{i=1}^M \bar{f}^i, \sum_{i=1}^M \underline{f}^i y_r^i / \sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\underline{y}_l(x) = \bar{y}_l(x) - \left[\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{f}^i - \underline{f}^i)}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i \sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \times \right]$$

$$\left. \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i(y_l^i - y_l^1) \sum_{i=1}^M \bar{f}^i(y_l^M - y_l^i)}{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i(y_l^i - y_l^1) + \sum_{i=1}^M \bar{f}^i(y_l^M - y_l^i)} \right], \quad (8)$$

$$\bar{y}_r(x) = \underline{y}_r(x) + \left[\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{f}^i - \underline{f}^i)}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i \sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \times \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i(y_r^i - y_r^1) \sum_{i=1}^M \bar{f}^i(y_r^M - y_r^i)}{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i(y_r^i - y_r^1) + \sum_{i=1}^M \bar{f}^i(y_r^M - y_r^i)} \right]. \quad (9)$$

其中: M 为模糊规则数, y_l^i 和 y_r^i ($i = 1, 2, \dots, M$) 为第 i 个模糊规则对应的中心模糊后件左右边界值, $\bar{f}^i$ 和 $\underline{f}^i$ 为第 i 个规则对应的上下隶属度值, 其计算方法见文献[6].

基于以上 4 个不确定度边界值 ($\underline{y}_l(x)$, $\bar{y}_l(x)$, $\underline{y}_r(x)$, $\bar{y}_r(x)$), 控制量的精确输出值可计算如下:

$$y(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\underline{y}_l(x) + \bar{y}_l(x)}{2} + \frac{\underline{y}_r(x) + \bar{y}_r(x)}{2} \right]. \quad (10)$$

3.2 改进的控制器结构

考虑到以上降型计算方法是一种均值输出, 在一定程度上损失了区间二型模糊推理过程中包含的对不确定性动态的控制信息. 为此, 提出一种基于再次优化的降型运算方法, 将降型过程和系统性能优化结合起来. 所提出的控制器结构如图 3 所示.

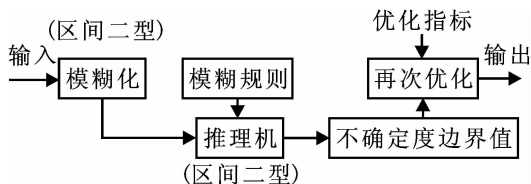


图 3 改进的区间二型模糊控制器结构

改进的降型 (TR) 运算描述如下:

$$\underline{y}_c^* = \min\{\underline{y}_l, \underline{y}_r, \bar{y}_l, \bar{y}_r\}, \quad (11)$$

$$\bar{y}_c^* = \max\{\underline{y}_l, \underline{y}_r, \bar{y}_l, \bar{y}_r\}, \quad (12)$$

$$\Gamma = f(\bar{y}(x)), \quad (13)$$

$$\bar{y}(x) \in (\underline{y}_c^*, \underline{y}_c^* + \Delta, \underline{y}_c^* + 2\Delta, \dots, \bar{y}_c^*), \quad (14)$$

$$\Delta = (\bar{y}_c^* - \underline{y}_c^*)/n. \quad (15)$$

其中: $\underline{y}_l(x)$, $\bar{y}_l(x)$, $\underline{y}_r(x)$, $\bar{y}_r(x)$ 可直接由式 (6) ~ (9) 求出; Γ 为基于系统性能的优化目标; f 为待优化目标函数; n 为重采样点数. 最终的控制器输出量为利用优化算法所得解.

在改进的降型算法中, 如果将待优化目标函数定义为均值函数, 则其可退化为 W-M 算法. 因此, 改

进的算法不仅可体现原有算法性能, 更能利用再次优化, 求出一个在给定优化指标下较优的控制输出. 优化算法可根据所需要优化的性能指标和具体优化问题进行选择.

4 仿真研究

为进一步分析所设计的区间二型模糊控制器的性能, 将其用于汽车 1/4 非线性悬架系统仿真研究, 具体悬架模型为麦弗逊式独立主动悬架系统^[8]. 悬架的基本物理参数为: 簧上质量 (m_b) 为 897 kg; 簧下质量 (m_w) 为 86 kg; 弹簧的弹性系数 (K_s) 为 66 824 N/m; 非线性弹性力多项式系数 K_0 , K_1 和 K_2 分别为 -236, -403 和 104, 阻尼器的阻尼系数 (c_1) 为 1190 Nm/s, 非线性阻尼力二次项系数 (c_2) 为 426. 轮胎弹性系数 (K_t) 为 101 115 N/m, 其非线性模型的数学描述如下:

$$m_b \ddot{x}_b = f_c + c_1 \Delta \dot{x}_b + c_2 \Delta \dot{x}_b^2 + K_0 + K_s \Delta x_b + K_1 \Delta x_b^2 + K_2 \Delta x_b^3, \quad (16)$$

$$m_w \ddot{x}_w = -f_c - c_1 \Delta \dot{x}_b - c_2 \Delta \dot{x}_b^2 - K_0 - K_s \Delta x_b - K_1 \Delta x_b^2 - K_2 \Delta x_b^3 - K_t \Delta x_t. \quad (17)$$

其中: 车体垂直震动加速度为 $\ddot{x}_b$, 车体垂向速度变化为 $\dot{x}_b$, 车体垂向位移变化为 Δx_b , 悬架垂直震动加速度为 $\ddot{x}_w$, 轮胎垂向位移变化为 Δx_t . 所设计的区间二型模糊控制器有 3 个输入量, 1 个输出量, 输入量为: 车体垂直震动位移 (x_b), 速度 ($\dot{x}_b$) 以及悬架自身行程 ($x_b - x_w$); 输出量为主动悬架执行器的控制力 (f_c). 变量的隶属度函数均采用区间二型高斯模糊隶属度函数.

再次优化的性能指标函数为

$$\Gamma = f(f_c, x_b, x_w) = \min_{f_c \in (\underline{y}_c^*, \bar{y}_c^*)} \left[\frac{1}{m_b} f_c^2 + \frac{K_s^2}{m_b^2} (x_b - x_w)^2 \right]. \quad (18)$$

优化目的为: 改善乘坐舒适性的同时, 降低悬架自身行程, 减少机械磨损. 考虑到优化目标的非线性和悬架控制的实时性, 使用 PSO 算法^[9] 进行再次优化.

为验证在不同路面上汽车悬架控制性能, 选择按照 ISO8608 规定的 C 级随机路面进行仿真, 其控制结果分别如图 4, 图 5 所示.

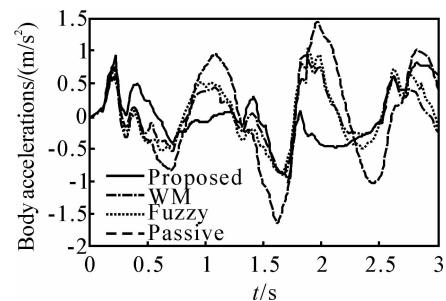


图 4 随机路面输入下车体垂向加速度比较图

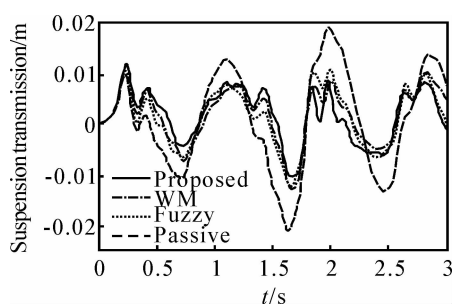


图5 随机路面输入下悬架自身行程比较图

仿真结果表明,基于改进的控制器取得了较好的垂向震动抑止效果,而悬架的自身位移较W-M算法小,体现了再次优化的作用。

5 结 论

随着对复杂系统研究的深入,各种针对复杂系统的控制策略也在不断改进.二型模糊系统作为模糊理论的一个新分支,在处理复杂系统和不确定性上有着优于传统模糊系统的能力.本文对区间二型模糊控制器进行改进,并利用汽车非线性悬架控制系统进行仿真,其结果验证了所提出方法的有效性。

考虑到二型模糊系统在教育方面的研究刚刚起步,今后的工作将集中研究如何将区间推理与模糊推理更好地结合,并由此引申出更加实用的二型模糊控制器。

参考文献(References)

[1] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its

application to approximate reasoning-1[J]. Information Science, 1975, 8(3): 199-249.

[2] Hagrass H. A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 2004, 12(4): 152-539.

[3] Sepulveda R, Castillo O, Melin P, et al. Experimental study of intelligent controllers under uncertainty using type-1 and type-2 fuzzy logic[J]. Information Science, 2007, 177(10): 2023-2048.

[4] Shu H, Liang Q, Gao J. Wireless sensor network lifetime analysis using interval type-2 fuzzy logic systems[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 2008, 16(2): 416-427.

[5] Coupland S, John R I. A fast geometric method for defuzzification of type-2 fuzzy sets[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 2008, 16(4): 929-941.

[6] Mendel J. Advances in type-2 fuzzy sets and systems[J]. Information Science, 2007, 117(1): 84-110.

[7] Mendel J, Wu H. New results of an interval type-2 fuzzy set, including the centroid of a fuzzy granule[J]. Information Science, 2007, 177(2): 360-377.

[8] Hrovat D. Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications[J]. Automatica, 1997, 33(10): 1781-1817.

[9] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer, evolutionary computation proceedings[C]. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998: 69-73.

(上接第1596页)

[7] 张井岗, 刘志远, 裴润. 一类非自衡对象的二自由度PID控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(6): 886-889.

(Zhang J G, Liu Z Y, Pei R. Two-degree-of-freedom PID control for integrator and dead time process[J]. Control and Decision, 2002, 17(6): 886-889.)

[8] 刘涛, 张卫东, 顾诞英. 双重积分时滞的最优抗干扰设计[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(9): 1572-1576.

(Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Optimal disturbance rejection design for doubly integrating plants with time delay[J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(9): 1572-1576.)

[9] Rao A Seshagiri, Rao V S R, Chidambaram M. Set point weighted modified smith predictor for integrating and double integrating processes with time delay[J]. ISA Trans, 2007, 46(1): 59-71.

[10] Shamsuzzoha M, Moonyong Lee. Analytical design of enhanced PID filter controller for integrating and first order unstable processes with time delay[J]. Chemical

Engineering Science, 2008, 63(10): 2717-2731.

[11] Tan W, Horacio J Marquez, Chen T W. IMC design for unstable processes with time delays[J]. J of Process Control, 2003, 13(3): 203-213.

[12] Rao A Seshagiri, Chidambaram M. Analytical design of modified smith predictor in a two-degrees-freedom control scheme for second order unstable processes with time delay[J]. ISA Trans, 2008, 47(4): 407-419.

[13] 刘涛, 张卫东, 顾诞英. 化工不稳定时滞过程鲁棒控制的解析设计[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 575-578. (Liu T, Zhang W D, Gu D Y. Analytical design of robust control for unstable chemical and industrial processes with time delay[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 575-578.)

[14] Lu X, Yang Y S, Wang Q G, et al. A double two-degree-of-freedom control scheme for improved control of unstable delay processes[J]. J of Process Control, 2005, 15(5): 605-614.