

文章编号: 1002-0411(2001)05-434-06

# 模糊滑模控制研究综述

傅 春 谢剑英

(上海交通大学自动化系 上海 200030)

**摘 要:** 本文介绍了 90 年代以来将模糊逻辑和滑模控制相结合的研究工作,着重描述了模糊控制和滑模控制的相似性、启发式模糊滑模控制、直接和间接自适应模糊滑模控制、模糊神经网络在滑模控制中的应用等方面的原理和方法,分析了它们的特点和联系,本文最后还展望了这一领域的研究方向。

**关键词:** 滑模控制; 模糊逻辑; 模糊滑模控制; 模糊神经网络

中图分类号: TP13

文献标识码: A

## A SURVEY OF RESEARCH ON FUZZY SLIDING MODE CONTROL

FU Chun XIE Jian-ying

(The Department of Automation of Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** This paper introduces the research work which combines the fuzzy logic and the sliding mode control since 1990's, emphasizes on describing the similarity between fuzzy logic control and sliding mode control, the principles and methods of the heuristic fuzzy sliding mode control, the direct and indirect adaptive fuzzy sliding mode control, the application of fuzzy neural networks in sliding mode control in addition to the relationship among them. Further more, research tendencies in this field are discussed.

**Keywords:** sliding mode control, fuzzy logic control, fuzzy sliding mode control, fuzzy neural network

### 1 引言(Introduction)

模糊控制(Fuzzy Logic Control, FLC)以 60 年代 Zadeh 的模糊数学为基本理论基础,从 70 年代起进入实际工程应用阶段。在过去的四分之一世纪中,模糊控制作为一种有别于传统控制理论的控制方法,充分发挥其不需对象数学模型、能充分运用控制专家的信息及具有相当鲁棒性的优点,在具有相关特点的控制领域表现出其优势。另一方面,虽然模糊控制已经初步获得了 T-S 模糊模型从而可将线性系统理论作为控制系统的分析综合工具这样一个新视界,但一般的实用的模糊控制——Mamdani 模糊控制仍有其需要面对的问题,即模糊控制器参数须经反复试凑才能确定,缺少稳定性分析等系统化的分析和综合方法。

滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是从 50 年代发展起来的一种强鲁棒性的变结构控制方法。滑模控制能充分运用对象的模型,但其对模型的要求很低即无需对象的精确模型,只要模型中参数和扰动不确定性的上界可知就能设计出渐进稳定的控

制器。具体而言,预先定义一个关于跟踪误差及其各阶导数的线性集,称为滑模函数  $s$ , 其系数满足 Hurwitz 条件。使  $s$  为零的误差向量的集合在相空间中形成滑动面。滑模控制律一般包括两个部分,一是等效控制  $u_{eq}$ , 它使  $s$  保持不变,二是趋近律  $u_h$ ,  $u_h$  与滑模函数本身(特别是其符号)相关。当系统远离滑动面时二者的联合作用使系统的运动总能朝向滑动面  $s=0$ , 而一旦到达滑动面,只有前者作用,系统将在滑动面上滑动直至误差零点。但滑模控制面临抖振的不利影响,抖振来自于对不确定性及扰动的保守估计、趋近律在滑动面两侧的符号切换、控制执行器件有限的切换频率和时滞等因素。

模糊控制和滑模控制,各有优缺点,有某种相似之处,又有互补之处。90 年代以来,专家学者就结合二者进行了很多研究工作,在很多方面得到了于理论和实践上都非常有意义的成果,本文将对这些方面作简单的介绍。

### 2 模糊控制与滑模控制的相似性(Similarity between FLC and SMC)

除了上文提到的模糊控制和滑模控制的共同优点外, 还可从控制目的转换上观察二者的相似之处, 这种相似之处更具本质性. 文[1, 2]针对应用于二阶系统的以跟踪误差  $e$  及其变化  $\dot{e}$  为输入的二维模糊控制规则表指出, 在这些规则表中, 当  $e$  和  $\dot{e}$  具有相反意义的语言值(如正大与负大)或皆为零时控制输出往往为零(ZE), 这些“ZE”在规则表所表示的语言相空间中形成一条离散的对角线, 在对角线的上方和下方模糊控制器输出符号相反, 且离线越远, 控制输出幅度越大, 如表 1 所示. 只要能施加控制使系统到达此对角线, 控制器即无输出, 系统将在相空间中运动到误差零点. 可见, 这种模糊控制器具有与滑模控制相似的思想, 控制的目的是使系统到达目标线.

模糊控制和广义的变结构控制亦有联系<sup>[3, 4]</sup>. 二文指出, 若确定作为控制器的模糊逻辑系统各参数, 则模糊系统的输出可写成输入变量的分区函数, 也就是说, 根据输入变量在输入空间中所处的区域不同, 模糊控制律具体的输出表达即不同, 具有变结构的特征. 不仅如此, 文献把模糊系统的参数皆作为待定量, 然后基于滑模控制的原理, 给定滑模, 由李亚普洛夫原理确定模糊系统参数从而获得稳定的模糊控制系统.

表 1 典型的模糊控制规则表

Tab. 1 rules for FLC

U		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	PB	ZE	NS	NS	NB	NB
	PS	PS	ZE	NS	NS	NB
	ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
	NS	PB	PS	PS	ZE	NS
	NB	PB	PB	PS	PS	ZE

### 3 常规模糊控制和滑模控制的扩展——模糊滑模控制(The extension of conventional FLC and SMC——Fuzzy sliding mode control)

Hwang G C 等人<sup>[5]</sup>起点性的工作提出了全新的实施模糊控制和滑模控制的方法, 这种方法把二者的优点紧密结合起来了. 考虑(1)所示的  $n$  阶 SISO 非线性不确定系统

$$\ddot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(\ddot{x}, \dot{x}, \dots,$$

$$x^{(n-1)})u + d(t) \quad (1)$$

控制目标为  $x$  跟踪  $x_d$ , 跟踪误差  $e = x - x_d$ . (1) 中  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$  为不确定的连续函数,  $d(t)$  为外界扰动. 定义滑模函数  $s$  并求其导数

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \cdot e \triangleq \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i-1)} + e^{(n-1)}$$

$$\dot{s} = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u + d(t) - \dot{x}_d^{(n)}$$

其中  $\lambda > 0$ . 针对(1)设计的模糊滑模控制中, 模糊控制器的输入不再是  $(e, \dot{e})$  而是  $(s, \dot{s})$ , 在  $g(\cdot)$  非零不变号的条件下可得到决定控制输出增量  $\Delta u$  的启发式规则. 不失一般性, 设  $g(\cdot) > 0$ , 由(2)可得形如“if  $s$  is PB(正大) and  $\dot{s}$  is PB(正大) then  $\Delta u$  is NB(负大)”的规则. 完成  $(s, \dot{s})$ 、 $\Delta u$  各自论域上的模糊子集隶属函数和输入输出比例因子参数配置后, 一个完整的 PI 型模糊滑模控制器(Fuzzy Sliding Mode Controller, FSMC)就最终形成了. FSMC 相对于常规模糊控制的变化具有两个方面的重要意义, 一是控制目标从跟踪误差转为滑模函数, 只要施加控制使  $s$  为零, 则由(2)中系数  $(c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1)$  的 Hurwitz 特性, 跟踪误差将渐进到达零点; 二是对于  $n > 2$  的高阶系统, 在常规模糊控制中输入应为  $(e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})$ ,  $(e, \dot{e})$  是不完全的, 而 FSMC 的输入  $(s, \dot{s})$  始终是二维的,  $s$  已经将  $e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}$  包含在其中, 而且这种“信息融合”是按照滑模原理而不是其他什么主观原则进行的, 总之, 在  $n > 2$  的特定情况下, 模糊滑模控制具有简化模糊控制系统结构复杂性的作用. 对滑模控制而言, FSMC 的意义则在于它柔化了控制信号, 减轻或避免了一般滑模控制的抖振现象.

FSMC 在整个 90 年代得到充分的注意、研究和应用. 文[6]在[5]的基础上采取了输入比例因子  $G_s$  和  $G_{\dot{s}}$  随  $s$  取值不同而不同的策略, 其输出比例因子  $G_{\Delta u}$  更是取为  $s$  的连续指数函数. 比例因子的自适应处理把系统动态响应的快速性和优良的稳态性能统一起来了. 文[7]研究了由 PM 同步伺服电机驱动的 toggle 机构滑块位置的滑模控制问题, 仿真和实验都表明, 与文[6]相似的比例因子自适应模糊滑模控制在控制效果上丝毫不逊于传统的带边界层的滑模控制, 而前者的优点是不管系统参数是否具有不确定性及是否受到外界扰动, 在控制器设计中不需对系统模型和不确定上界作任何估计. 文[8]在感应电机转速控制的外环控制回路中应用了 FSMC-PLL

(锁相环)联合控制, PLL 具有优良的稳态性能, 而 FSMC 的动态性能很好. 仿真表明, 组合 FSMC-PLL 的外环控制在全局性能上都优于常规的 PI 外环控制.

关于 FSMC, 除了 [5] [6] [7] [8] 所展示的优点外仍有一个值得注意的问题. 上文指出, 对阶数大于 2 的受控系统, FSMC 具有天然的降低模糊控制系统结构复杂性的作用, 但对于普遍存在的二阶系统, 这种结构简单的优势消失了, 此时 FSMC 还要比常规的 FLC 多出计算  $s$  和  $\dot{s}$  的任务. 为了进一步简化控制器结构以及消除组合爆炸问题, 文 [9] 运用了模糊并推理 (Fuzzy Union Reasoning) 方法, 将“AND”连接的双前件的 FSMC 规则分解成单独以  $s$  或  $\dot{s}$  为输入的单前件的规则, 于是规则空间的复杂度可由  $n^2$  降为  $2n$ . [10] 则在建立 FSMC 的基础上, 将比例化的  $s$  和  $\dot{s}$  通过加法运算融合成一个新的变量  $s^*$  并在其论域上形成模糊子集, 然后以穷举的方式列表建立原 FSMC 规则前件模糊子集的组合与新的单一输入变量模糊子集的对应关系, 从而将双输入的规则改造为单输入的规则, 成功简化了控制器结构. 当然, 欲简化 FSMC 的结构, 还有一种方法, 即只以滑模函数  $s$  为输入 [11], 文献推导了控制器的形式化描述, 针对二阶振荡环节, 基于闭环传递函数研究了稳态误差和稳定性问题并得到了积极结果.

#### 4 自适应模糊滑模控制 (Adaptive fuzzy sliding mode control)

FSMC 的设计仍然是基于经验的, 系统参数在控制过程中没有自适应和自学习能力, 而且在很多情况下有效经验的获取并不是容易的事. 作为在这一方面所取得的重大改进, 自适应模糊滑模控制应运而生 [12~18].

[12] 使用一个以滑模函数  $s$ 、状态变量以及一个辅助函数为输入的模糊系统  $\hat{u}_{eq}(\cdot)$  来等价滑模等效控制  $u_{eq}$ , 在控制过程中, 基于  $s$  最小化用梯度下降法实施模糊规则后件参数的自适应, 自适应律与滑模函数值和规则触发度相关. 除了  $\hat{u}_{eq}$  以外, 跟常规滑模控制一样用  $u_h$  补偿模糊系统逼近误差和扰动, 而其中的切换增益比常规滑模控制要小.

文 [13] 中的控制律亦为  $u = \hat{u}_{eq} + u_h$ , 只是将输出等效控制  $\hat{u}_{eq}$  的模糊系统的输入降为一维即  $s$ , 模糊系统形式化为

$$\hat{u}_{eq} = \theta^T P(s) \quad (3)$$

其中  $P(s)$  是模糊基函数 (Fuzzy Basis Function,

FBF),  $\theta$  是自适应的规则后件参数向量. 引入作为常量的最优参数  $\theta^*$  并记  $\varphi = \theta - \theta^*$ , 于是  $\hat{\varphi} = \hat{\theta}$ . 定义包含  $s$  及  $\varphi$  的扩展的李亚普洛夫函数

$$V = \frac{1}{2}(s^2 + \frac{1}{\gamma}\varphi^T\varphi) \quad (4)$$

其中  $\gamma > 0$ . 根据 (4) 求  $\dot{V}$ , 令  $\dot{V} < 0$ , 从中可以很容易地根据代数项对消策略确定  $\dot{\varphi}$  从而得到  $\theta$  的自适应律, 且自适应律一般可写成

$$\dot{\theta} = \gamma s P(s) \quad (5)$$

[14] 将 [13] 推广到了 MIMO 系统. 对于有  $m$  个受控变量和控制输入的情况, 每一等效控制分量

$$u_{eq,j} = \sum_{j=1}^m \text{fuzzy}_{i,j}(s_j, \dot{s}_j) = \sum_{j=1}^m \theta_{i,j}^T p_{i,j}(s_j, \dot{s}_j) \quad (1 \leq i, j \leq m)$$

, 因此在滑模控制中共有  $m^2$  个自适应模糊系统. 在自适应策略中, 不仅规则后件参数向量  $\theta_{i,j}$  以  $\theta_{i,j} = \eta_{i,j} p_{i,j} s_i$  的方式实行自适应变化, 而且对决定模糊基函数  $p_{i,j}(s_j, \dot{s}_j)$  的参数——输入变量的比例因子和隶属函数参数也按相似的方式自适应变化, 很显然, 在控制系统运行中由于参数自适应的要求造成的运算量是比较大的. [15] 提出了一种大大简化的自适应模糊控制方案, 预先确定输入变量 ( $s, \dot{s}$ ) 和输出变量  $\hat{u}_{eq}$  的论域, 形成参数固定不变的模糊子集并按顺序规律编号, 用  $\rho$  作为由输入变量模糊子集编号映射输出变量模糊子集编号的参数, 与  $s$  有关的自适应律仅作用在参数  $\rho$  上. 在 [16] 中, 等效控制表示为关于状态变量的反馈控制, 反馈控制增益向量  $K$  在控制过程中自适应变化, 等效控制和趋近律控制的共同作用使滑模渐进稳定. [17] 在 PM 同步电机伺服控制中同样用状态反馈控制来构造等效控制, 与 [16] 不同的是, 这里自适应的参数不是反馈控制增益, 而是趋近律中的切换增益. [18] 在两个方面与 [12]~[17] 不同, 一是以状态变量为输入的自适应模糊系统逼近的不是滑模等效控制律或趋近律, 而是能使系统符合特定滑模产生条件的一个理想控制, 二是本文考虑了最优参数模糊系统的逼近误差  $\epsilon$ , 控制律中的补偿项之一就是包括其估计值  $\hat{\epsilon}$ , 且  $\hat{\epsilon}$  同样按自适应律变化.

[12]~[18] 所采用的方法是直接自适应控制的方法, 同样的思想可用于间接自适应控制方法的获得, 即用模糊系统来等价系统动力学特性的不确定性, 然后在此基础上按照滑模控制的方法形成控制律 [19~23]. [19] 在万能逼近原理的基础上, 在预知控制增益  $g(\cdot)$  下界的条件下, 运用规则后件参数向量自适应的模糊系统  $\hat{f}(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$  来等价 (1)

中不确定的  $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$ , 然后同样基于定义扩展李亚普洛夫函数的方法得到参数自适应律并构造完全的控制律. [20] 所采用的方法与 [19] 基本相同, 但其优势之处在于控制律中包含了对具有最优参数的最优模糊系统逼近误差的估计, 这个估计亦按与  $s$  有关的自适应律在线变化. 这类方法在 [21] 中得到了进一步发展, 这里不仅  $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$  由模糊系统  $\hat{f}(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$  等价, 而且控制增益函数  $g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$  也用同样的策略进行处理. [22] 的出发点也是  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$  由两个自适应的模糊系统  $\hat{f}(s)$  和  $\hat{g}(s)$  逼近, 但本文采取了一种简化方法. 两个模糊系统输出变量论域的划分方案是固定不变的, 模糊子集参数只随一维论域的大小变化而线性缩放, 模糊规则的“if-then”描述也固定不变, 在控制中自适应变化的只是表征论域大小的两个值. [24] 证明, 基于若干假设条件, 当系统状态处于滑动面某邻域时, 以  $(s, \dot{s})$  为输入的自适应模糊系统就能逼近系统的非线性动力学特性. [24] 的工作也为 [13]~ [18] 及 [22] 用  $(s, \dot{s})$  或  $s$  作为模糊系统的输入提供了部分合理性佐证.

不管采用自适应模糊系统的直接目的是等价动力学特性抑或是控制律, [13]~ [24] 的基本思想都是一致的. 对于参数  $\theta$ , 基于模糊系统的万能逼近原理确定最优的  $\theta^*$  的存在, 控制律中使用  $\theta^*$  的实时估计  $\hat{\theta}$ . 定义扩展的李亚普洛夫函数从而寻求使系统稳定的控制律和参数自适应律. 另外, [12] 中自适应律的获得与 [13]~ [24] 所采取的策略截然不同, 但形式和内容却基本一致, 即参数自适应律皆与滑模函数  $s$  和规则触发强度密切相关, 这反映了在滑模控制中处于中心地位的  $s$  的反馈对形成参数自适应律的决定性作用.

基于万能逼近原理、定义包含自适应的参数与其最优值之差的扩展李亚普洛夫函数来寻求自适应律和控制律, 这种策略和方法的某些性质有必要再次考察. 推导表明, 在参数自适应律和控制律作用下, 李亚普洛夫函数渐进稳定, 于是不仅滑模是渐进稳定的, 而且自适应的参数能够收敛到其最优值从而精确地逼近全局的动力学特性、等效控制律或理想控制律, 但实际情况并不是这样. 当系统到达滑动面  $s=0$  后, 自适应的参数停止变化, 但不能确定此时的值即为万能逼近原理所指出的  $\theta^*$ , 而只是一个局部最优逼近参数. 如果保留这个参数并开始新的控制进程,  $s \neq 0$ , 则此参数将继续变化, 不表现出收

敛性. 另一方面, 自适应策略是针对滑模控制这种特定情况的, 滑模渐进稳定结论的获得是基于李亚普洛夫意义上的和严格的, 这已经足够了, 只是想依靠建立模糊滑模控制系统并依赖这种自适应机制以建立最优模糊系统的努力是不现实的.

## 5 基于模糊神经网络的滑模控制(SMC based on fuzzy neural networks)

人工神经网络同样具有自学习和自适应的能力, 它和模糊系统的结合有助于扩大二者在滑模控制领域内的应用<sup>[25-30]</sup>. 模糊神经网络(Fuzzy Neural Networks, FNN)指用神经网络表示模糊系统的逻辑结构和信息处理机制, 利用神经网络的学习功能为模糊系统提供学习能力; 另一方面, 在可能时由专家信息确定初始模糊系统, 为神经网络的学习提供初始可行解, 亦有助于增强神经网络的学习效果.

[25] 用 T-S 模糊神经网络(如图 1)等价系统不确定的动态特性  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$ , 再按一般滑模控制的方法形成控制律, 控制过程中 FNN 的参数根据实际系统的输入输出数据在线自学习. [26] 应用以  $(s, \dot{s})$  为输入的标准模糊神经网络实时估计系统动态不确定性的上界, 以此与状态反馈相结合构造滑模控制并应用于感应电机位置伺服控制中. [27] 应用了结构自组织的广义参数学习的模糊径向基函数网络(GP-RBFN)完成系统动态不确定性的等价, 在此基础上构造离散系统的滑模控制律. 采用这种模糊神经网络的一个重要优点是只有一个参数是自适应的. [28] 在滑模控制律的构造中应用了模糊小脑模型神经网络(FCMAC). [29] 直接用以  $(s, \dot{s})$  为输入的标准模糊神经网络构造滑模控制律, 基于  $s, \dot{s}$  最小化用梯度下降方法完成 FNN 的参数自适应; 为了保证滑模产生条件存在, 文章还构造了带符号函数的监督控制律, 当关于系统状态的李亚普洛夫函数值进入零的一个邻域时, 监督律作用撤消, 于是从总体上保证了滑模产生条件的满足和稳态时的无抖振. [30] 建立了两个 FNN, 一个是作为控制器的 FNN( $e, \dot{e}$ ), 一个则作为对象模型的由辨识器, 其参数由其输出与对象的实际输出间的偏差来反向调节. 在控制过程中, 得到滑模函数及其变化后, 考察滑模产生条件是否满足, 并据此产生符号修正函数  $m(s)$ , 利用  $m(s)$  和对象辨识器产生在控制输入端应加的控制增量  $\Delta u$ , 再以此  $\Delta u$  来反向传播调节 FNN( $e, \dot{e}$ ) 的参数, 整个控制策略如图 2 所示.

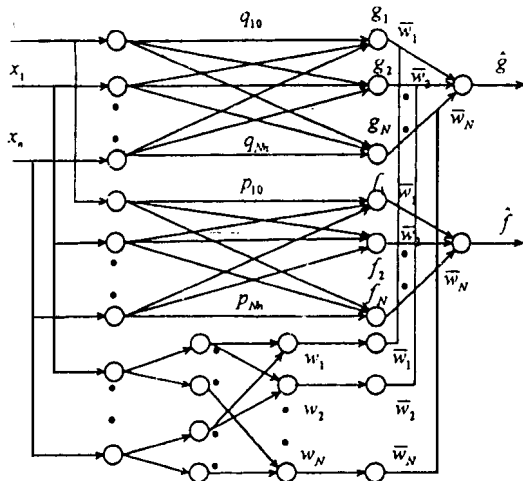


图1 T-S 模糊神经网络

Fig. 1 T-S fuzzy neural networks

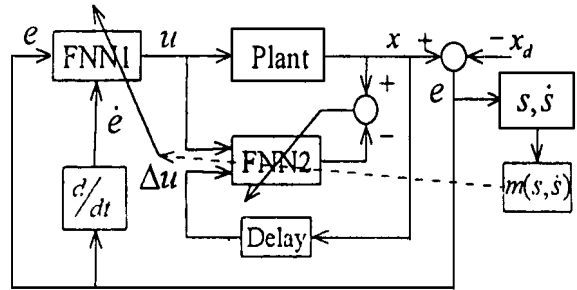


图2 一种基于模糊神经网络的滑模控制策略

Fig. 2 A SMC scheme based on fuzzy neural networks

### 6 关于模糊滑模控制的其他问题 (Other topics of fuzzy sliding mode control)

除了以上所描述的问题之外,关于模糊逻辑和滑模控制相结合还有其他诸多方面的内容,它们体现了控制理论的交叉融合。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)作为一种优化算法,在模糊滑模控制中亦得到较多应用.[9][10]为了因应减少规则可能带来的不利影响,采用了GA算法以优化输入输出比例因子等参数以获取更好的控制效果.当然,如果用全过程仿真方法计算GA中有关个体的适应度函数,则需要较准确的系统动力学模型,这在某种程度上和采用模糊滑模控制的动机之一——对模型的不依赖性有不一致之处,但考虑到即使在模型可得情况下模糊滑模控制在削弱抖振上相对于常规SMC的优势,GA的应用还是有一定意义的。

在常规滑模控制中参数的自适应对改善控制性能具有重要意义.[31]在同步磁阻电机转速的滑模控制中,使用一个模糊系统来实时调节滑模函数的唯一参数——坡度,相对于一般滑模而言,改进的滑模控制具有更快的响应、对扰动更强的鲁棒性以及更好的稳态性能.[32]在电液伺服系统控制中的策略亦与此类似.[33]将SMC和PI集成在一起,根据系统状态利用模糊系统达成二者的平滑切换,这样把SMC良好的动态性能和PI良好的稳态性能结合在了一起。

[34]引入了预测思想,文章使用灰色模型(Grey Model, GM)作为不确定系统模糊滑模控制中滑模函数s和相关参数(α, b)的一步预测器,将当前控制

和预测所得的未来的(ŝ, α̂, b̂)作为模糊逻辑系统的输入从而得到控制量的改变。

[35]在感应电机转速的模糊控制中,利用滑模原理构造了负载力矩观测器,基于观测器确定的前馈控制补偿可加快系统响应。

### 7 关于模糊滑模控制的展望(Prospect for fuzzy sliding mode control)

根据对已有研究成果的描述和分析,我们可以对该研究领域的进一步发展作出一些预测.模糊控制和滑模变结构控制的相似性,已经提供了一种新的模糊控制系统参数设计的策略和方法,在今后研究中可基于这种策略,发展已有方法,为常规模糊控制一直面临的稳定性分析乃至完全系统化的设计、分析与综合问题提供解决手段。

模糊滑模控制FSMC具有启发式特征,其结构和运算简单,把模糊控制对模型的完全不依赖性和滑模控制的鲁棒性结合在一起,按照滑模控制原理巧妙地实现了控制目标的转换,是控制工程中很有前途的实用控制方法.关于其前进和发展方向,可以看到,FSMC的设计仍然是基于经验的,在控制结构和设计策略上对于常规模糊控制有较强的继承性,它表现出的鲁棒稳定性并没有真正按滑模控制理论获得严格的证明,因此形式化地加以证明是一项重要工作.对于控制对象为低阶时控制器结构的简化,文[10]的工作具有积极意义,它已经初步展示了在以滑模方式进行“信息融合”的基础上继续运用这种方法从而形成高层滑模和信息融合的思想。

参数自适应模糊滑模控制特别是模糊规则后件参数自适应的研究已较为成熟,但仍有两个问题值

得研究. 一是以 $(s, \dot{s})$ 或 $s$ 作为模糊系统输入, 利用输出等价动力学特性或控制律时, 万能逼近原理的应用在理论上有所须斟酌之处, 虽然[24]已得到了相关结论, 目前这种处理策略的合法性值得研究. 二是基于系统动力学自适应建模的间接模糊滑模控制中, 在构造控制律时仍然须就某种动力学特性作出估计, 如控制增益函数的最小值估计. 总之, 彻底摆脱在鲁棒性和总体控制性能特别是稳态性能之间寻求妥协的困境仍须假以时日.

应用模糊神经网络具有重要意义, 它不仅具有模糊系统的多点建模思想, 由于神经网络的自学习功能, 它又摒弃了静态的建模方式, 而代之以动态的面向控制的建模策略. 针对不同的模糊神经网络, 在有效的自学习方法作用下, 有理由将模糊神经网络表示的模型看作系统的真实描述, 从而使基于模型的控制理论和方法在模糊滑模控制中大行其道, 除发展一般的滑模控制外, 还可以考虑最优控制、预测控制等控制方法. 关于模糊神经网络本身, 则可以引进业已得到研究的结构自组织和自适应方法.

注意研究基于 T-S 模糊模型的滑模控制. 从系统的输入输出数据出发, 按照结构辨识和参数辨识的两步方法建立 T-S 模糊模型, 这已得到充分研究, 因此本课题的研究不需要从头开始, 可估计研究重点为考察 T-S 模糊模型的应用在减小不确定性上界估计上的真实效力.

将已有的成果更多地应用于离散系统的模糊滑模控制, 分析和解决离散情况下的特殊问题. 注意研究状态不完全可测的情况, 进一步研究状态观测器在模糊滑模控制中的构造和应用. 注意研究量测噪声情况下的模糊滑模控制, 尝试多传感器信息融合的应用.

## 参 考 文 献 (References)

- 1 Palm R. Robust Control by Fuzzy Sliding Mode, *Automatica*, 1994, **30**(9): 1429~ 1437
- 2 Nowacki Z, *et al.* On the Robustness of Fuzzy Control of an Overhead Crane, *IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, 1996, 1: 433~ 437
- 3 Wu J C, Liu T S. Fuzzy Control Stabilization with Applications to Motorcycle Control, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 1996, **26**(6): 836~ 847
- 4 Wang W J, Lin H R. Fuzzy Control Design for the Trajectory Tracking on Uncertain Nonlinear Systems, *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, 1999, **7**(1): 53~ 62
- 5 Hwang G C, Cheng S. A Stability Approach to Control Design for Nonlinear Systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, **48**(3): 279~ 287
- 6 Kung C C, Liao C C. Fuzzy-Sliding Mode Controller Design for Tracking Control of Non-linear System, *Proc. of American Control Conference*, 1994, 180~ 184
- 7 Lin F J, Fung R F, *et al.* Sliding Mode and Fuzzy Control of Toggle Mechanism Using PM Synchronous Servomotor Drive. *IEE Proc. Control Theory Application*, 1997, **144**(5): 393~ 402
- 8 吴捷, 钱来, 杨金明. 感应电动机锁相及模糊滑动模控制, *控制理论与应用*, 2000, **17**(2): 198~ 203
- 9 Kung C C, Chen T H. Fuzzy Sliding Mode Controller Design Based on Fuzzy Union Reasoning, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 1999, 3: 320~ 325
- 10 Kung C C, Lai W C. GA-Based Design of a Region-Wise Fuzzy Sliding Mode Controller, *Proc. of IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, 1999, 971~ 976
- 11 李少远, 席裕庚. 模糊滑动模态控制系统的性质分析, *控制理论与应用*, 2000, **17**(1): 14~ 18
- 12 Lu Y S, Chen J S. A Self-Organizing Fuzzy Sliding-Mode Controller Design for a Class of Nonlinear Servo Systems, *IEEE Trans. on Industrial Electronic*, 1994, **41**(5): 492~ 502
- 13 Lin S C, Chen Y Y. Design of Adaptive Fuzzy Sliding Mode for Nonlinear System Control, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1994, 1: 35~ 39
- 14 Hsu Y C, Malki H A. Fuzzy Variable Structure Control for MIMO Systems, *Proc. of Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1998, 1: 280~ 285
- 15 Chen J Y. Rule Adaptation of Fuzzy Sliding Mode Controller Design, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1998, 1: 504~ 509
- 16 Chen J Y. Design of a SMC-Based Fuzzy Controller for Nonlinear Systems, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1997, 1: 377~ 382
- 17 Lin F J, Chiu S L. Adaptive Fuzzy Sliding - Mode Control for PM Synchronous Servomotor Drives, *IEE Proc., Control Theory Application*, 1998, **145**(1): 63~ 72
- 18 Piao Y G, Zhang H G *et al.* A Simple fuzzy Adaptive Control Method and Application in HVAC, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 1998, 1: 528~ 532
- 19 Kim Y T, Akbarzadeh-T M R *et al.* Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of a Direct Drive Motor, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, 1997, 2: 1668~ 1673
- 20 Yoo B, Jeoung S *et al.* Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Nonlinear System: the First Control Scheme, *IECON Proc.*, 1996, 1: 590~ 595
- 21 Jeoung S, Han J. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Nonlinear System: the Second Control Scheme, *IECON Proc.*, 1996, 1: 269~ 274
- 22 Chen J Y. Fuzzy Sliding Mode Controller Design: Indirect Adaptive Approach, *Cybernetics and Systems*, 1999, **30**(1): 9~ 27
- 23 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的自适应模糊滑模控制, *自动化学报*, 1997, **23**(2): 361~ 369