

# 模糊 PID 控制技术研究发展回顾 及其面临的若干重要问题<sup>1)</sup>

胡包钢<sup>1</sup> 应 浩<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> (中国科学院自动化研究所 模式识别国家重点实验室 北京 100080)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

<sup>2)</sup> (Dept. of Electrical & Computer Engineering, Wayne State University, Detroit, Michigan 48202, U.S.A.)

(E-mail: hao.ying@wayne.edu, <http://ece.eng.wayne.edu/~hying/>)

**摘 要** 简要回顾了模糊 PID 控制器的研究发展状况. 系统地归纳了模糊 PID 控制器的基本形式. 讨论了阻碍模糊控制技术发展的几个重要理论问题. 包括系统化设计方法, 控制性能优于传统 PID 控制器的模糊控制器设计, 模糊控制器非线性逼近能力及其量化指标, 模糊系统的规则爆炸. 文中试图对有关问题的内涵进行重新定义, 以及探求解决难题的关键. 如将模糊系统中的“规则爆炸”问题更正为“参数效率”问题. 最后, 提出了对模糊控制理论与技术发展的思考, 其中特别强调应把“简单性”作为智能控制器设计中的基本策略.

**关键词** 智能控制, 模糊控制, PID 控制器, 设计方法, 非线性逼近.

## 1 引言

模糊控制已成为智能自动化控制研究中最活跃而又富有成果的领域. 其中, 模糊 PID 控制技术扮演了十分重要的角色, 并且仍将成为未来研究与应用的点技术之一. 这完全可以从过去的传统与现代控制技术的应用发展历史来理解. 到目前为止, 现代控制理论在许多控制应用中获得了大量成功的范例. 然而, 在工业过程控制中, PID 类型的控制技术仍然占有主导地位<sup>[1]</sup>. 特别是在化工、冶金过程控制中, 众多量大面广的控制过程如温度、流量、压力、液位等, 基本上仍然是应用着 PID 类型的控制单元. 虽然未来的控制技术应用领域会越来越宽广、被控对象可以是越来越复杂, 相应的控制技术也会变得越来越精巧, 但是, 以 PID 为原理的各种控制器将是过程控制中不可或缺的基本控制单元.

近年来, 模糊控制研究与应用已经得到了迅猛地发展<sup>[1~4]</sup>. 然而, 在众多新的模糊控制技术方法不断涌现之后, 人们更清楚地认识到模糊控制研究中面临的许多理论问题已经成为模糊控制技术广泛应用的严重障碍. 例如模糊控制技术并未在工业过程控制中得到如同家电产品一样的推广, 其中就包含有如何解决“控制性能优于传统 PID 控制器的模糊控制器设计”问题. 本文将围绕模糊 PID 控制技术的发展进行回顾. 对于这样一个活跃的研究领域进行全面、及时地论述是不容易的. 我们采取了“面对问题 (problem-oriented)”的方式进行回顾与讨论, 并将问题限于四个. 该文在介绍前人研究工作的同时, 将侧重于对各个理论问题的进一步定义. 因为正确地提出并定义问题是推动学术发展的重要前提. 这也是本文的主要目的.

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金资助项目 (69874041).

收稿日期 2000-09-04 收修改稿日期 2000-10-20

本文各节内容如下. 第 2 节对目前已经发展的各种模糊 PID 控制器方法进行介绍. 第 3 至 6 节针对模糊 PID 型控制技术研究面临的四个理论问题分别进行讨论. 然而除了这四个问题外, 还有许多重要问题有待解决, 如稳定性或鲁棒性、自学习或自适应、多输入多输出系统等. 文章最后一节阐述了作者对于模糊控制以及智能控制研究发展的一些看法.

2 模糊 PID 控制器的基本形式

模糊控制研究发展经历了“理论 - 应用 - 理论”的交替热潮过程. 1965 年 Zedeh 开创了模糊数学研究, 之后又发展了模糊系统与模糊控制的基本概念及理论基础<sup>[5,6]</sup>. Mamdani 于 1974 年建立的第一个模糊控制器导致了模糊控制应用技术的发展<sup>[7]</sup>. 到目前为止, 大量的模糊技术产品已经在工业及民用方面得到应用. 由于 Mamdani 发展的模糊控制器被以后的研究工作者广泛应用, 该控制器一般被称为传统模糊控制器. 其典型的构成方法为: A. 二维输入 (误差及误差率变量输入)、一维输出; B. 模糊规则前件与后件为模糊语言变量; C. 交规则方式 (Intersection-Rule Configuration, 或 IRC); D. “Zadeh-Mamdani 最大 - 最小”模糊推理; E. “重心法”解模糊.

1987 年, Ying 在模糊控制理论中首次严格地建立了模糊控制器与传统控制器的分析解关系, 其中特别重要的是证明了 Mamdani 模糊 PI(或 PD) 型控制器是具有变增益的非线性 PID 控制器<sup>[8]</sup>. 这些工作<sup>[4,8~10]</sup> 为模糊控制理论与传统 PID 控制理论相结合建立了桥梁. 开拓了模糊控制非线性理论研究的新途径——“分析解方法 (analytical approach)”<sup>[11]</sup>. 应用结构极限分析 (Limiting Structure Theorem) 可以定性表明, 简单地增加规则并不一定会给控制过程带来益处<sup>[12]</sup>.

为了便于讨论, 根据控制原理本文将模糊控制器分为两大类型: 模糊 PID 型 (fuzzy PID) 和模糊非 PID 型 (fuzzy non-PID). 如果模糊控制器的推理计算是限于比例——积分——微分三个控制分量或增益范围以内的控制作用量, 则属于模糊 PID 控制器类型. 否则, 属于模糊非 PID 型, 如 Tong 发展的模糊模型 (fuzzy model) 控制器<sup>[13]</sup>, 或者应用 TSK 模型<sup>[14]</sup> 建立的状态空间式模糊控制系统<sup>[15]</sup> 等. 根据模糊推理机输出量的直接物理含义, 模糊 PID 型控制器可进一步分成: 直接控制量型 (Direct-action), 增益调整型 (Gain-scheduling) 和混合型 (Hybrid). 图 1 显示了控制器的分类<sup>[16]</sup>. 星号表示在同一层次类别中最为通用. 当然, 这种分类有时本身就会存在模糊性. 以下对各种形式模糊 PID 控制器进行讨论, 其目的也是为了理解它们之间的本质差异.

增益调整型 (Gain-scheduling) 模糊 PID 控制器

该类模糊控制器中推理机输出的物理量直接对应增益参数, 通过应用模糊规则实现对三个增益参数进行调整. 一种是基于性能监督 (performance-supervised) 的增益调整型模糊 PID 控制器<sup>[17]</sup> 如

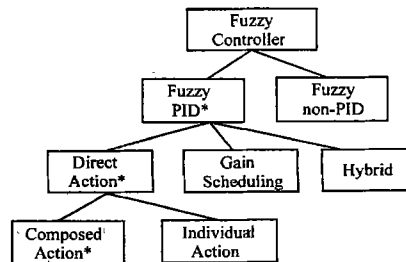


图 1 模糊控制器分类

If (“Perform Index” is ...) then  $(\Delta K_P \text{ is } \dots)$  and  $(\Delta K_I \text{ is } \dots)$  and  $(\Delta K_D \text{ is } \dots)$ , (1)

有关性能指标 (Performance Index) 可以是超调量、稳态误差、或其它静动态特性. 由于这些性能指标需要一个完整控制过程得到, 因此该类控制器可以作为自整定<sup>[18]</sup> 或自适应的方式对增益进行动态调整. 该类控制器通常被认为是时变系统. 但是, 不能保证非线性特征. 因

为在自整定或自适应调整间隔期间,控制器的增益参数可能是常数。

增益调整型的另一种形式是基于误差驱动 (error-driven) 的模糊 PID 控制器。典型的研究工作见文献 [19] 与 [20]。Zhao 等人应用了如下的规则形式

$$\text{If } (e \text{ is } \dots) \text{ and } (\Delta e \text{ is } \dots) \text{ then } (K_P \text{ is } \dots)(K_I \text{ is } \dots)(K_D \text{ is } \dots). \quad (2)$$

该控制器的 PID 增益参数将是误差  $e$  或误差变化  $\Delta e$  的非线性函数。如非线性比例增益可以记为:  $K_P = f(e, \Delta e)$ 。虽然  $e$  与  $\Delta e$  均是时间的函数,但是  $K_P$  取值只由  $e$  与  $\Delta e$  具体值决定,而与处在什么时刻无关。因此,该类模糊控制器本质上是一个静态 (或定常) 非线性系统,并可以实现各个非线性增益的独立整定。以 He 等 [20] 发展的模糊 PID 控制器应用二维 ( $e$  与  $\Delta e$ ) 模糊推理机计算 Ziegler-Nichols 规则中的单因子参数  $\alpha$ , 各增益参数均表现为  $\alpha(e, \Delta e)$  的函数。因此,该模糊系统无法独立调整各个非线性增益。

传统的 PID 控制技术已经对各个增益参数的物理意义,或控制效果有了明确的了解。如调整比例增益可以加快系统动态响应速度,但同时可能会产生较大的超调量以至引起系统失稳。这些均可以作为专家知识纳入模糊规则 (1) 式中的建立。然而,对于应用 (2) 式的非线性增益设计,到目前也未有成熟的模糊规则可以借鉴。例如,当误差变小时,  $K_P$  的变化应如何取还未有定论。

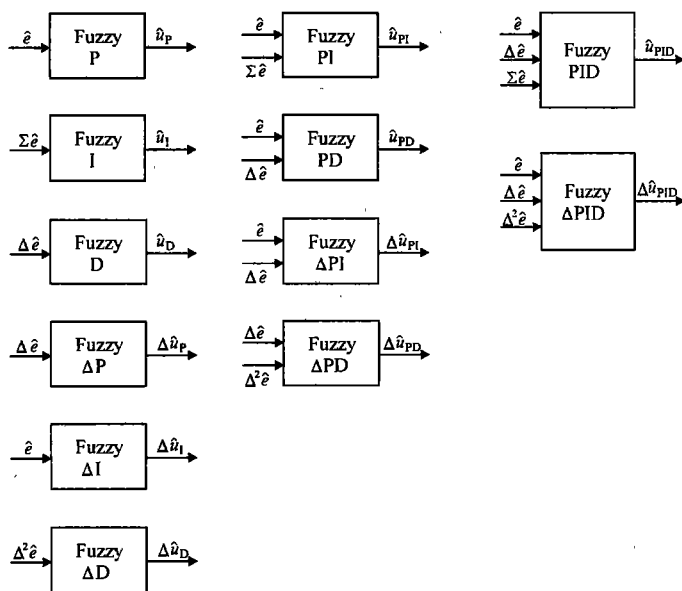
### 直接控制量型 (Direct-action) 模糊 PID 控制器

如果模糊推理机的输出是 PID 原理范围内的控制作用量,则该控制器属于直接控制量型。Mann 等 [21] 归纳了该类控制器的 12 种结构单元 (structural elements)。由于各单元在控制作用效果上不完全等效,可以进一步认为每个单元是独立的 (independent)。因此图 2 中给出了不同的单元名称。各单元名称不仅与输入变量,如误差  $\hat{e}$ , 误差变化  $\Delta \hat{e}$ , 误差的二次变化  $\Delta^2 \hat{e}$ , 以及误差累计  $\Sigma \hat{e}$  的信号内容相关,同时也由输出变量形式决定。由这些结构单元可以组合成各种形式的模糊 PI/PD/PID 控制器。应用先验知识,可以排除一些组合,以便实现合理的控制器设计。为此 Mann 等提出了两条: A. 由于稳态的误差累计量通常是未知的,致使设计者无法以此变量建立规则,因此,可以取消包括误差累计变量输入的结构组合。B. 比例控制分量是控制作用中不可或缺的控制量。因此,任何模糊 PID 控制器至少应该包括比例控制分量成分。文 [22] 提出了“增益角色变换 (gain-role change)”的概念。即在有时延的设定值过程控制中,以增量形式输出的 PID 控制器,其积分增益在初始时延范围内将承担比例增益的角色,而设定的比例增益在此阶段不产生任何作用 (因为  $\Delta e = 0$ )。如果这成为设计考虑因素,则可以取消包括以增量形式输出的模糊 PID 控制器结构单元。

通常我们将模糊推理机的输入变量个数定为模糊控制器的维数。虽然 Mamdani 发展的二维模糊控制器已经成为模糊控制技术中最常见形式的控制器 [23~25] 并为设计者所熟悉,有关它的结构特性及其应用特点的研究是不足的。de Silva 在 1994 年研究了模糊知识表达与耦合规则的关系 [26]。由此可以推证出 Mamdani 型模糊控制器是有耦合影响 (coupling influence)。胡包钢等对模糊 PID 控制器的推理机维数进行了进一步的研究 [22]。并将一维模糊 PID 控制器称为“独立控制量型 (Individual-action)”,传统的二维或三维模糊 PID 控制器称为“合成控制量型 (composed-action)”。文中认为合成控制量型模糊 PID 控制器还存在以下功能缺陷:如控制分量合成 (control-action composition), 输入耦合影响 (input coupling), 增益相关 (gain dependency) 和规则指数增长 (rule growth)。这些缺陷对于各控制量物理意义进行分析并整定调整参数是不利的。

### 混合型 (Hybrid) 模糊 PID 控制器

混合型模糊 PID 控制器可以有各种形式出现。如增益调整型与直接控制量型的结合 [27],

图 2 模糊 PID 控制器结构单元<sup>[21]</sup>

或传统线性 PID 控制器与模糊 PID 控制器的结合. 一些学者提出了应用模糊 PID 进行初始的快速响应调整<sup>[24,28]</sup>, 之后采用传统线性 PID 控制器进行细节调整. 然而, 何时并如何实现无扰 (bumpless) 切换将是应用中的附加问题. 另一方面, 为了解决模糊 PD 控制器无法消除稳态误差的问题, 可以增加积分 I 的环节, 并称为模糊 PD + 线性 I<sup>[29]</sup>. 为了降低定值控制中的超调问题, Astrom 与 Hagglund 曾采用过降低设定值的权系数 (set-point weighting) 方法计算误差量<sup>[30]</sup>:  $e_p(t) = by_{sp}(t) - y(t)$ . 其中设定值权系数  $b$  取在 (0,1) 之间, 且为常数. 由  $e_p$  计算的比例控制分量  $u_p(t) = K_p e_p(t)$  比常规计算值要小. 从而可实现较小的超调控制响应. 基于此方式的 PID 控制器方法, Visioli 应用二维 ( $e$  与  $\Delta e$ ) 模糊推理方式计算“动态”的  $b(t)$ <sup>[31]</sup>. 取得了比静态的固定  $b$  值算法优良的控制效果. 这是混合型模糊 PID 控制器的另一种形式. 虽然 Visioli 给出的  $b(t)$  形式上是动态的, 但是控制器具有非时变本质, 而应理解为是定常非线性系统, 即  $b = f(e, \Delta e)$ . 由此产生非线性比例增益. Kim 等应用模糊前向补偿器与 PID 控制器结合的方式也可以被认为是一种混合型模糊 PID 控制器<sup>[32]</sup>.

### 3 关于“系统化设计方法”

需要指出的是“系统化设计 (systematic design)”与“系统化设计方法 (systematic design approach)”是不同的. 前者是针对某一特定控制对象进行的全面、系统的控制器设计. 后者则是完成系统化设计的基本理论方法. 不同于发展一种新方法, 系统化设计方法主要侧重于各种方法定量或定性的比较, 目的是为设计者提供一套完整的、可遵循的设计准则, 以及完成优化设计的理论方法.

缺乏系统化设计方法被认为是模糊控制理论中仍然未解决的主要问题之一<sup>[23,33~35]</sup>. 目前的模糊控制器设计方法基本上如同一种“模糊艺术 (fuzzy art)”. Hu 等将模糊 PID 系统的设计参数分为两大类 (表 1): 结构参数与整定参数<sup>[36]</sup>. 如何建立可遵循的设计方法准则选定表 1 中的参数应是系统化设计方法的主要任务. 目前的状态是设计过程中的系统结构选

取、算法确定、参数调整等主要是基于设计者的经验和偏好, 同时还要依赖大量的计算机模拟实验. “试差法 (trial and error)” 仍然是模糊控制器设计过程中的主要方法或手段. 那么, 模糊控制技术系统化设计方法的基本内容是什么呢? 至今缺少明确的结论. 更多的研究是基于传统的设计方法. 在控制性能优化设计方面: Nyberg 和 Pao 建议了比较通用的整定方法, 整定内容包括量化因子、模糊规则与隶属度函数等<sup>[37]</sup>; Palm 应用相关技术调整模糊控制器的输入、输出量化因子, 并考虑优先整定后者以保证系统稳定, 最后

是模糊规则等<sup>[38]</sup>; Li 和 Gatland 给出了更为具体的量化因子整定策略<sup>[39]</sup>. 在稳定性分析方面: Wang 应用 Lyapunov 方法<sup>[35]</sup>; Malki 等借鉴小增益理论方法<sup>[40]</sup>; 卢朝晖与黄道君依据圆判据准则<sup>[41]</sup>; Xu 等根据增益裕量与相位裕量<sup>[42]</sup>; 张金明与李人厚应用局部反馈和极点配置技术等<sup>[43]</sup>. Ying 应用局部稳定性准则建立的模糊控制器可以不需要被控对象的数学模型<sup>[44]</sup>. 可以认为, 这些传统的设计方法是“基于性能评价”的理论方法. 同时, 各方法之间缺少横向的系统化比较.

“如何合理地选择模糊控制器设计参数”已经成为许多学者致力研究内容. 以模糊推理方法 (fuzzy reasoning scheme) 研究为例. Mizumoto 于 1988 年对十二种不同的模糊推理方法进行了系统的比较研究<sup>[45]</sup>, 推断出合理的推理方法. 比较结果是以一阶带延时被控对象的响应性能为根据. 然而, Mizumoto 的数值式 (numerically-based) 方法给出的结论是有局限性的, 它将随被控对象而发生改变. 为克服这一缺点, Ying 采用了分析解方法<sup>[10]</sup>. 基于简单地讨论首先可以去除其中不合理的八种方法, 然后对剩余的四种方法进行控制量形式的比较研究. 这种分析解方法得到的设计准则结论将更具有广义意义.

虽然模糊控制器最初是根据特定被控对象, 应用特定专家知识发展起来的技术. 其中特定被控对象如水泥窑、锅炉、地铁列车等. 但是, 模糊控制器正在发展成为类似于传统 PID 技术的通用控制器单元, 如应用 20 个规则的通用模糊 PI 或 PD 控制器<sup>[46]</sup>. 为实现这一目标, 设计者需要更完善的系统化设计方法来指导在众多的模糊 PID 类型中完成综合能力比较最优的设计选择. 由于传统的“基于性能评价”的设计方法只能根据某个特定控制对象的控制性能结果获得设计准则, 由此该设计准则则会存在先天的 (inherent) 局限性. 那么, 有没有适用于通用控制对象的系统化设计方法呢?

最近, Hu 等提出了两类系统化设计方法: 基于性能评价方法 (Performance-based evaluation approach) 与基于功能评价方法 (Function-based evaluation approach)<sup>[16]</sup>. 当前者关注于研究控制器对外部环境的响应特性时, 后者着重于考察控制器本身的固有特征. 两者涉及了模糊控制器中的不同设计内容 (表 2), 因此各自方法将提供独有的设计准则. 一般说来, 应用两种评价方法建立的设计准则在实际应用中是互为补充的. 控制器的综合能力评价需要基于两种方法获得的有用信息. Hu 等认为只有两种方法结合才能提供完整、有效的系统化设计方法. 以控制器设计中“简单性”功能考察为例, 表明功能评价方法对于指导控制器设计同样是重要的. 下面是两个具体设计内容的考察.

表 1 模糊 PID 控制器设计参数分类<sup>[36]</sup>

设计参数	
结构参数 (或方法)	整定参数
输入变量	比例增益 ( $K_P$ )
输出变量	积分增益 ( $K_I$ )
模糊语言变量	微分增益 ( $K_D$ )
隶属度函数	隶属度函数参数
模糊规则	量化因子
推理机制	知识库转换参数
解模糊机制	解模糊机制参数或查表参数
PID 环路结构	控制策略转换参数
其它	其它

关于模糊控制器生成非线性内容的选择

第 2 节中讨论了不同种类的模糊 PID 控制器. 其中基本差异是反映在模糊推理机所生成的非线性内容上. 如果考虑可利用的专家知识对生成各类非线性内容均是充分的. 那么, 设计者需要对各种控制器作出选择. 除了兼顾性能因素之外, 控制器应用功能的好坏也是十分重要的. 如果以控制器设计与应用的“简单性”考察, 这就涉及了非线性内容的“简单性”特征的比较. Hu 等在文 [47] 中提出了建议选取模糊 (或非线性) 比例控制分量作为优先考虑的设计内容. 与生成非线性增益, 或其它合成控制量的设计相比, 非线性比例控制分量具有本质上的最简非线性函数形状特征, 如非线性函数 (或控制曲线) 必须经过原点、满足单调递增等要求. 而非线性增益方式设计不能确保其函数经过原点特性. 如文 [36] 中的图 13,15,20 表现的非线性增益不具有简单的规律性, 而它们均对应了原文图 8 中的简单“C”或“反 C”类曲线以表现非线性比例控制分量. 同样可以理解, 应用合成控制量的设计方法并不能保证其函数是单调递增的要求. 非线性形式的复杂程度直接对应了控制器参数数量需求的多寡. 目前, 缺乏对各种非线性内容的模糊控制器设计进行全面的比较研究.

关于模糊控制器维数的选择

虽然有关维数选取是模糊 PID 控制器结构设计中最为基本的内容, 关于这一问题的全面比较研究是不够的. 一些研究者应用基于性能评价方法 [24,48], 针对某个特定的被控对象得出结论: 三维模糊 PID 控制器可以优于二维模糊 PID 控制器. 虽然这对应用有一定指导意义, 但是由维数变化对模糊系统的应用还会产生什么样的影响 (如参数整定、系统实现等), 同样是控制器设计者应该了解的. 表 2 反映出可能考虑的设计内容是多方面的. 在基于“简单性”功能考察中, 胡包钢等对直接控制量型模糊 PID 控制器维数选取进行了比较研究 [22]. 文中认为“一个好的模糊 PID 控制器应该与传统的 PID 控制器的优良特性兼容”, 特别是在“简单性”方面. 他们应用了四项系统功能特征评价指标比较了一至三维模糊 PID 控制器在工程整定方面的简单性 (表 3). 以这样的指标考察, 可以发现应用“一维输入——三维输出”形式的模糊 PID 最为优越. 但是, 如果根据鲁棒性这样的性能指标考察, 二维模糊 PD (或滑模) 控制器将是最佳选择 [49]. 这个讨论说明, 应用两种评价方法可能得到有冲突的设计准则, 在这种情况下, 设计者可以根据实际应用中的优先考虑因素完成合理的设计.

在模糊控制理论与技术发展到今天, 有关基于功能评价方面的控制器研究基本上空白的. 建立严格、有效的功能评价方法将是值得关注的课题. 有些功能评价并不存在现成、或完整的方法, 如第 5 节中将讨论的模糊控制器非线性逼近能力评价. 另一方面, 如何应用基于功能评价方法挖掘模糊控制器通用的、与被控对象无关的设计准则应该引起研究者的重视. 这些方面研究将是逐步建立起系统化设计方法体系过程中不可缺少的重要内容.

表 2 模糊控制器系统化设计中的两大类评价方法及其评价内容 [16]

评价方法	基于性能方法	基于功能方法
评价内容	响应误差	控制原理
	稳定性	连续 / 离散
	鲁棒性	敏感度
	能观性	透明度
	能控性	非线性
	优化	软 / 硬推理
	自适应性	自整定 / 自组织
	抗干扰性	容错性
	频率响应 (闭环)	频率响应 (开环)
	静态响应	并行机制
	动态响应	静 / 动态系统
	模型 / 控制精度	复杂性
	实时性	交互性
	其它	其它

表 3 “直接控制量”型模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器的功能特征比较  
( $N$  = 每维输入变量中的模糊规则数量)

控制器形式		系统功能特征			
		独立控制分量计算	非耦合输入	非相关增益	规则数量
线性 PID 控制器		是	是	是	0
模糊 PID 控制器	三维 —— 一维	否	否	否	$N^3$
	二维 —— 一维	否	否	否	$N^2$
	一维 —— 一维	是	是	否	$N$
	一维 —— 三维	是	是	是	$3N$

4 关于“控制性能优于传统线性控制器的模糊控制器设计”

大量研究结果表明，模糊控制器可提供优于传统线性控制器的控制性能。然而两种控制器性能孰优孰劣一直是学术界的争论焦点。如何设计模糊控制器，使之控制性能优于传统控制器，不仅是模糊控制研究中的一个重大理论问题，也是实际应用中亟待解决的难点问题。

1991 年，模糊控制学者在 IEEE Control Systems 第 4 期上发表了一篇用模糊控制技术实现飞行器柔性机翼控制的文章。可是不到一年，传统控制学者在同一刊物上发表了反驳上文结论的文章，要点是应用传统线性控制技术实现了优于模糊控制技术的控制性能。模糊控制学者也注意到了这个问题的严重性。1995 年，Chen 和 Kuo 记述了模糊控制器并不能确保总是优于传统 PID 控制器的实例<sup>[50]</sup>。

传统控制理论学派与模糊控制理论学派有关“性能优劣”问题的争论至今未有结果。1999 年 IEEE Control Systems 第 3 期上 Abramovitch 与 Bushnell 以“Report on the Fuzzy versus Conventional Control Debate”为题目记录了传统控制理论学者 Athans 与模糊理论创始人 Zadeh 的辩论论点<sup>[51]</sup>。Athans 强调“对于任何标准控制问题，总可以找到实现控制性能优于模糊控制方法的传统控制方法”(“for any standard control problem, one could always outperform fuzzy control using conventional-albeit quite sophisticated-control”。

传统控制理论学派争论的另一个要点是：目前多数的模糊控制技术与传统控制器的性能比较只是数值式的。Ortega 评论道<sup>[52]</sup>：以计算机模拟方式证明这些方法（指模糊神经网络控制器，本文作者注）的有效性根本不能让人信服（“We do not believe that it is in the interest of the control community to provide ‘demonstrations’ of practical viability of these algorithms [means neuro-fuzzy] via simulations”）。应该认为传统控制理论学派的这个争论要点是对的。如果在模糊控制技术早期发展期间还可以认为基于数值仿真得到的“性能更优”发现具有启迪意义，那么在其技术进化了 25 年之后，应该有理论证明回答如下问题

- A) “模糊控制器的控制性能是否总能优于传统线性 PID 控制器”？
- B) “如果不能，模糊控制器是在什么条件下出现如此情况”？

由于这些问题未能得到圆满解决，使模糊控制技术在替换传统控制技术时面临了一个强有力的挑战。为了解决这一问题，Hu 等最近建议了模糊控制器的“保守设计准则 (Conservative Design Strategy)”<sup>[36]</sup>。该准则要求“任一模糊 PID 控制器应该能够实现通过参数调整产生线性输入输出关系”。符合这一准则的系统可以称为“确保 PID 性能的模糊系统 (Guaranteed-PID-Performance fuzzy controller)”，或 GPP 系统。这一设计准则的建立在理论与应用方面具有重要意义。它导致模糊控制理论可以引用并借鉴传统控制理论中大量的定理和准则作为其控制器的性能指标下限 (lower-bound performance) 分析，使模糊控制技术可

以坚实的立于传统控制技术基础之上。

可看到以上设计准则完全依赖于功能评价方法。将传统控制技术作为模糊控制技术中的一个特例,可以避免基于性能评价方法中需用穷举方式对“性能优劣”完成理论证明的困境。在性能比较方面,必须以比较公平的方式进行,即两种控制器至少应该同样应用优化方法整定系统参数。所谓 GPP 系统从严格意义上讲控制性能应不劣于传统线性控制器。

如何构造 GPP 模糊系统仍是需要关注的研究方向。并不是所有的模糊控制器算法都能够实现 GPP 系统。如应用 Mamdani 型控制器设计方法(如第 2 节中所述的特点),采用有限数量规则是无法构造 GPP 系统。其原因是由于诸如模糊推理中“最大-最小”的非线性操作。另一方面,在构造 GPP 系统的同时,保证合理地、按照“简单性优先”原则<sup>[47]</sup>,即“线性→C 类曲线(或曲面)→S 类曲线(或曲面)→…”的方式逐步增加非线性函数种类也是亟待研究的课题。

## 5 关于“模糊控制器非线性逼近能力”

模糊控制器实现非线性控制的方法十分独特。它实际上是基于专家的经验并通过语言规则的形式实现了系统输入与输出的非线性映射关系。模糊控制器为什么能够在许多情况下提供优于传统线性控制技术的控制性能。其本质是在于模糊控制器可以实现非线性增益的调整过程,而应用专家知识只是表面上的原因。因此,模糊控制器的非线性逼近能力直接反映了模糊系统的品质。受人工神经网络控制器研究工作<sup>[53]</sup>的启发,一些学者证明了模糊控制器同样也是“万能非线性逼近器”(Universal Approximator)<sup>[35,54~56]</sup>。该证明为模糊技术的普适性应用奠定了重要的理论依据:即模糊控制器可以对定义在致密集下的任何一种连续非线性方程实现在任意近似精度条件下的函数逼近。然而,从实际应用的角度讲,我们认为有必要对模糊控制系统或其它类型非线性系统的逼近能力(approximation capability)划分出以下三种不同的内容。

### 基于误差的非线性函数逼近能力

这是最为常规的概念。通常情况下,对于定义在集合  $U \subset R^n$  的非线性函数  $F(\mathbf{X})$  是给定的,其中  $\mathbf{X} \in U$  是非线性函数的自变量向量。应用非线性系统可以拟合估计出非线性方程,记为  $G(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})$ ,其中  $\boldsymbol{\theta} \in V \subset R^m$  是用于调整非线性函数的自由参数向量。那么,特定非线性函数逼近能力的考察是通过两个非线性方程的误差量

$$e = \int |F(\mathbf{X}) - G(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})|^2 d\mathbf{X}, \quad \text{all } \mathbf{X} \in U. \quad (3)$$

误差量越小说明系统的非线性逼近能力越好。(3)式的定义与常规数理统计中的回归分析方法相同。对基于统计学习的非线性逼近器, Vapnik 给出了更为通用的误差表达式<sup>[57]</sup>

$$R(\boldsymbol{\theta}) = e = \int L(\mathbf{Y}, G(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})) dP(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad (4)$$

Vapnik 将  $R(\boldsymbol{\theta})$  与  $L(\mathbf{Y}, G(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}))$  分别称为风险函数(risk function)与损失函数(loss function)。其中  $P(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  是输入变量与输出变量的联合概率函数。对于分类器、特定函数逼近器以及概率分布估计器, Vapnik 分别给出了更具体的定义。

所谓“万能非线性逼近器”定理可以按照定性与定量两个角度研究<sup>[58]</sup>。前者主要是推导存在性定理。后者根据给定误差构造控制器,对工程实际应用有着直接的意义。包括充分或必要条件的定量方面研究可见文献[54, 55, 59, 60]。



基于“泛化能力 (Generalization Capability)”的非线性逼近

在人工神经网络研究中,“泛化能力 (generalization capability)”已经成为考察非线性系统另一类非线性逼近能力的研究内容<sup>[61~63]</sup>.所谓“泛化能力”被定义为经过样本训练后的非线性系统能够正确识别符合相同分布而未经训练样本的能力.或者以多输入多输出的人工神经网络系统解释,该网络经过样本数据训练后,在  $p$  维 ( $p$  为网络输入节点数) 中生成的  $q$  个 ( $q$  为网络输出节点数) 特定的非线性超曲面,所谓“泛化能力”即表明这些非线性超曲面能够正确划分非训练样本的能力.此种情况多数是用于考察模式识别应用中的分类器性能.如果按照非线性逼近器为应用内容,我们以  $q = 1$  时作解释,其泛化能力可以表现为系统对特定函数的内插或外推的非线性函数逼近能力.近似于 (3) 式,我们可以定义泛化误差 (Generalization Error) 为

$$ge = \int |F(\mathbf{X}) - G(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})|^2 d\mathbf{X}, \quad \text{all } \mathbf{X} \in U_{\text{testing}}.$$

(5)

这里实验子集  $U_{\text{testing}}$  与训练子集  $U_{\text{training}}$  构成了完整集  $U$ . (4) 式与 (5) 式的不同在于泛化误差只是对实验子集中的样本数据进行计算的,它本质上反映了系统的推广能力<sup>[62]</sup>:即泛化误差小表明非线性系统经过学习后,能够很好地预测未知数据.经过训练之后得到函数逼近能力好的非线性系统,其泛化能力并不一定好,并可能出现“过拟合 (overfitting) 问题”<sup>[64]</sup>.这可能是由于以下两个原因: A) 训练数据中通常包含有噪声 (图 3A); B) 应用有限数据获取整个任意分布函数本身就是一类病态问题 (图 3B).泛化能力的概念可以推广到基于监督学习方式的模糊控制器应用中.

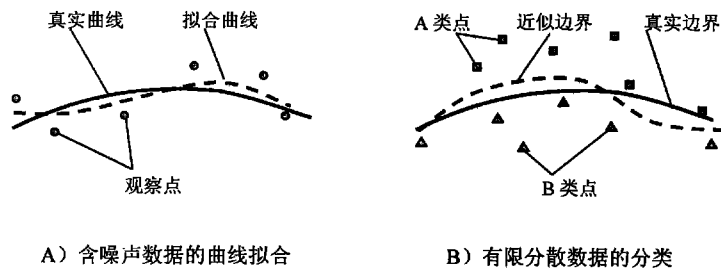


图 3 非线性逼近中的“过拟合”问题

基于“非线性变化能力 (Nonlinearity Variation)”的非线性逼近

模糊控制系统通常包括线性与非线性调整参数.以 Mamdani 型控制器为例,其线性调整参数包括误差信号量化因子 ( $S_e$ ),误差变化信号量化因子 ( $S_{\Delta e}$ ),与输出量化因子 ( $S_u$ );非线性调整参数则更为广泛:如语言变量值 (linguistic values),隶属函数 (membership fuctions),模糊规则 (fuzzy rules),推理机制 (inference mechanism),解模糊方法 (defuzzification) 等.其中线性调整参数类似于传统控制器中的增益参数,如  $S_e$  和  $S_{\Delta e}$  同时控制了比例与积分分量的比重关系,而  $S_u$  是用于改变控制输出量的总体作用水平.这三个参数的调整将无法改变系统的非线性特征,除非考虑控制量饱和因素影响.相反,非线性调整参数可以整体或局部地改变系统的非线性映射关系.应该说,这些参数是如何改变模糊控制器的非线性特征,是至今仍然缺少的研究.

由于实际控制器的非线性调整参数总是有限的.因此,控制器的非线性变化能力也是有限的.当对模糊控制器的非线性映射能力进行分析时,主要有两个信息是需要确定的.首先,控制器可以生成哪几类非线性形式?其次,每一类非线性形式的限制范围有多大?弄清这些问题对于模糊控制器各种算法以及设计参数的评价和选取有着重要的指导意义.

最近, Hu 等提出了“非线性变化能力”的概念<sup>[36,47,65]</sup>. 然而, 定量的评价非线性变化能力将是一项比较复杂的数学问题, 目前没有现成方法可以借鉴. 作为一种近似方法, 他们为非线性曲线考察提出了一个定量的非线性变化范围指标 (Nonlinearity Variation Index)

$$NVI(N_v, N_t, N_e) = \frac{R_A}{R_W},$$

(6)

其中  $N_v, N_t, N_e$  分别为模糊控制器输入变量个数, 非线性整定参数个数, 以及非线性类别考察参数个数. 这里  $R_A$  定义为模糊控制器输出曲线在  $N_e$  维空间下可能张开的范围,  $R_W$  则是  $N_e$  维空间的全部范围. 当  $NVI = 1$ , 表明该控制器的非线性变化可以张满  $N_e$  维空间的全域. 如若  $NVI = 0$ , 该控制器将不具有非线性变化能力 (如果  $R_A$  退化到小于  $N_e$  维空间情况下例外). 对应  $NVI$ , 他们还建议了“非线性域图 (Nonlinearity Diagram)”. 通过该图 (如文献 [36] 中图 9, 19 及 23), 可以直观地了解模糊控制器可生成的非线性种类 (如文中提出的“C”或“S”类曲线), 以及可能包含的范围. 应用“非线性变化能力”指标可以不需要控制对象的信息来考察不同设计方法的优劣或者非线性特征差异<sup>[65]</sup>.

常规控制器的自整定或自适应功能一般是通过改变线性调整参数实现的. 其线性变化能力 (Linearity Variation) 可由这类参数范围直接确定. 当模糊控制方法引入非线性时, 其非线性变化能力本质上也就反映了控制器的非线性自整定或自适应范围, 或者是非线性优化空间. 因此, 在有限非线性调整参数情况下, 应该使该空间尽可能的大. 并需要一种度量去检验. 然而, 模糊控制器中的非线性调整参数与非线性变化范围大小并非直接可比. Hu 等提出的  $NVI$  度量仍存在许多理论与应用方面的问题.

“非线性变化能力”概念的提出为模糊控制器的非线性理论研究提出了一条新思路, 并应成为以“基于功能评价”的系统化设计方法的重要内容. 王立新在 1995 年关于自适应模糊控制器的研究专著 (英文版是 1994 年) 中曾设想了一种方法<sup>[35]</sup>, “设立某些指标来衡量从知识库到非线性的‘品质’, 然后再合理地选择模糊推理机, 模糊产生器和模糊消除器来使这些指标达到最优. 这样的指标也许可以作为某种‘信息的测度’” (第 235 页). “非线性变化能力”也许是这样一种非线性映射品质的测量指标. 不同于传统的“基于误差的非线性函数逼近能力”指标, “非线性变化能力”是指逼近一簇或多簇非线性函数的能力. 这可能更符合实际控制情况. 因为非线性控制作用函数通常是未知的, 而可预知的也许只是一些启发式特征<sup>[47]</sup>. 为深刻理解“泛化能力”与“非线性变化能力”的差异, 表 4 给出了两者的比较.

表 4 “泛化能力”与“非线性变化能力”的差异比较

比较项目	非线性系统特征评价	
	泛化能力	非线性变化能力
考察内容	正确识别非训练样本的能力	可生成各类非线性的能力
表现特征	对外响应	内在功能
系统参数	经过训练后固定在设计值	需要在全域范围内变化
评价方法	非训练样本的识别精度	非线性变化范围指标
影响因素	根据训练样本数量、分布、信噪比等因素而改变, 与系统设计相关	与外部数据无关, 只与系统结构、算法方式、参数选取等有关
增加系统参数数量	其能力趋近定值、也可能显著降低	其能力可无限扩展
主要考察对象	分类器或特定函数逼近器	控制器或广义函数生成器

6 关于“模糊系统中的规则爆炸”

1997 年, Kosko 曾评论道<sup>[66]</sup>: “任何模糊控制系统将遭受由规则爆炸引起的维数灾

难”(“Any fuzzy systems suffer from the curse of the dimensionality: rule explosion”). 传统模糊控制器规则数量一般随输入变量个数成指数增长关系. 如  $n$  个输入变量, 每个输入变量包含有  $m$  个模糊语言变量. 则总规则数是  $n^m$ . 考虑到模糊控制器中的参量一般与规则数成正比. 因此规则爆炸使系统设计与工程整定变得十分复杂, 或不现实. 因此降低模糊规则数量一直是模糊理论学者所关心的问题. 特有术语 “parsimony”(原意为 “最简” 或 “吝啬”), 在此处指 “经济使用参数”) 已经被一些学者用来评价人工神经网络控制器的设计了<sup>[67]</sup>. 如何应用最少的控制规则, 并能满足控制性能要求也已经成为模糊控制研究中的热点. 到目前为止, 这一研究基本上包括了以下一些主要方式进行.

### 规则去除 (rule reduction) 方式

以这一方式进行的典型研究内容是从已有的规则库中去除冗余规则, 或称为 “规则去除法 (rule reduction)”. 其中应用的方法包括正交最小二乘法 (Orthogonal Least-Squares)<sup>[68]</sup>, 神经网络<sup>[69]</sup>, 相似性分析 (Similarity Analysis)<sup>[70]</sup>, 奇异值分解 (Singular value decomposition)<sup>[71]</sup> 等. 然而, “规则去除法” 面临了一个双重目标优化的问题. 一个目标函数是系统参数简化指标时, 另一个目标函数是控制性能精度指标. 两个指标在本质上对系统参数数量产生相反的要求. 实际应用中, 如何确定这两个目标函数以及给定优化迭代过程终止精度, 或者建立近似于系统辨识中的单项目标准则 (如 AIC, MID 准则等) 都是一个难题. 在基于学习方法建立的模糊控制系统设计中, VC 维数的概念可以借用<sup>[57]</sup>.

### 分层递阶模糊系统结构 (hierarchical fuzzy system) 方式

另一种降低规则的方法是应用分层递阶模糊系统结构方式<sup>[72~74]</sup>. 图 4 表现的这样结构使总规则数量下降为  $(n-1)m^2$ . 这种降低是相当显著的. 因为规则数量与输入变量个数成为线性关系. Wang 证明了该结构同样可以实现 “万能非线性逼近器”.

### 并规则结构 (Union-Rule Configuration) 方式

虽然上面两种研究在降低规则方面取得了成效, 但正如 Combs 和 Andrews 于 1998 年中提到的<sup>[75]</sup>: 许多研究没有触及到产生规则爆炸的根本原因 —— 交规则结构 (Intersection-Rule Configuration):

$$\text{If } (x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^j \text{ and } \dots \text{ and } x_M \text{ is } A_M^k) \text{ then } (y \text{ is } B). \quad (7)$$

为此, Combs 和 Andrews 系统性地研究了规则结构与降低模糊规则数目的更有效办法. 采用并规则结构方式构造模糊规则集

$$(\text{If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ then } y_1 \text{ is } B_1) \text{ or } (\text{If } x_2 \text{ is } A_2^j \text{ then } y_2 \text{ is } B_2) \text{ or } \dots \text{ or } (\text{If } x_M \text{ is } A_M^k \text{ then } y_M \text{ is } B_M), \quad (8)$$

并通过命题逻辑证明了具有并规则结构的模糊控制器 (简称 URC 控制器) 和具有交规则结构的模糊控制器 (简称 IRC 控制器) 二者在逻辑上是完全等效的. URC 控制器的一个显著优点是它可以把模糊规则数降到完全的线性关系 (共  $nm$  个规则), 这是十分令人鼓舞的. 事实上, 孙增圻等在其论著中就叙述过将 IRC 控制器转变为 URC 控制器的方法<sup>[25]</sup>, 以减少规则数量. 但是, 考虑到模糊控制系统是一种 “通用非线性逼近器”, 从 IRC 控制器转变为 URC 控制器时仅保证逻辑上等效性 (logical equivalency) 是不够的. 只有同时保证非线性方面的等效性 (nonlinear equivalency) 才能实现两种结构控制器的完全互换.

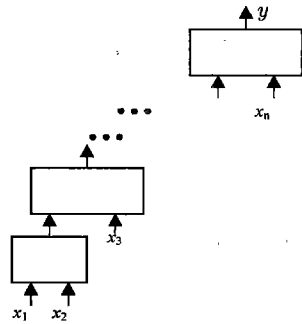


图 4 递阶分层模糊系统结构<sup>[72]</sup>

我们认为模糊系统“规则爆炸”问题需要重新定义. 首先, 并不是所有模糊控制系统存在先天性的“规则爆炸”特征. 只是以应用传统“交规则”方法构造的模糊系统具有如此缺陷. 比较以上几种模糊系统构成方式, 应用“并规则”结构方法最具有前景. 再有, 结构方法与规则数量关系只是初始的研究. 有关方法的合理选择应该进一步结合非线性逼近能力或控制性能要求才具有完整意义. 因此, 该类问题定义为模糊系统的“参数效率 (efficiency of parameters)”应该更为确切 (规则可以视为参数的一部分). 所谓效率可能包括两个方面: 空间效率与时间效率<sup>[76]</sup>. 前者要求在保持逼近能力的同时降低模糊规则数量, 应用最少的自由参数. 后者是针对监督学习过程而言, 即系统达到逼近精度规定值所需的时间. 从原理上讲, 各种结构的模糊控制系统均可构造成为“万能非线性逼近器”(但是, 应用并规则结构方法有待证明). 在这种情况下, 研究“逼近能力与效率”之间的关系, 建立有效率的模糊系统构成方法, 对于实际系统设计与应用是十分重要的.

## 7 关于模糊 (及智能) 控制理论与技术发展的思考

模糊控制理论与技术发展远未成熟. 在过去的发展过程中, 模糊系统理论本身就受到了各方面的争议. 这些争议对学术发展起到了推动作用. 本文以提问题的方式回顾模糊控制技术的发展. 明确或质疑这些问题有助于启发或促进未来的研究工作. 应该看到, 这些问题只是众多理论难题中的一部分. 另一方面, 回顾过去发展历程中的经验与教训也将激发我们对模糊 (及智能) 控制理论与技术发展在方法学方面的认识与思考. 以下要点是希望引起同行对该学科走向进行更全面地讨论.

### 没有严格理论指导的智能控制技术是盲目、不成熟的技术

智能控制的定义长期未有统一认识<sup>[77]</sup>. 一般认为用机器实现模拟专家智能推理过程或行为是智能控制技术的主要内容. 目前的控制技术已经发展成为多方法的融合, 如模糊系统、神经网络、遗传算法、多智能体 (Multi-agent) 等. 模糊控制的特点或优势正是在于“能够系统而有效地利用语言信息功能”<sup>[35]</sup>. 模糊控制技术所受到的质疑之一是缺乏理论指导.

“ad hoc (特定解)”, “trial and error (可称试凑法)”, “toy (玩具方式)”是一些传统控制研究者的评语. 应该看到, 智能技术本身容易使研究者陷于只停留在直觉、启发式的结果. 包括模糊控制技术的先驱者 Mamdani 也认为模糊控制属于“非解析方法模式 (nonanalytic-approach paradigm)”范畴<sup>[78]</sup>. 另一方面, 有些算法具有较大的不透明度, 一般只适用于数值解. 人工神经网络系统基本上被认为是非透明的、非物理意义的. 当缺乏显式表达的非线性映射关系时, 模糊系统基本上是半透明的, 因为输入与输出的定性映射关系还有模糊规则语句保持.

所谓“模糊控制属于非解析方法模式范畴”的评论只是在一定意义上是正确的. 不同于传统控制技术, 模糊控制技术不需要对被控对象建模. 多数模糊控制器的建立是非解析方式的, 并取得了较好的效果. 但非解析方式包含了一定的随意性, 因为专家的知识是不同的. 解析方法是理论研究中的重要手段之一. 智能方法处理结果中的柔顺性 (soft property) 固然提供了应用中的有利一面, 但这并不意味着智能方法处理过程中不需要严格的 (rigorous) 理论推导与证明. 因此, 传统控制理论学派的批评不是没有道理, 建立严格的智能控制理论方法 (包括解析方法) 是发展智能技术的方向, 也是将智能控制理论与现有的传统或现代控制理论相结合的前提.

### 非线性理论是智能控制理论发展的重要内容

应该说, 非线性理论研究在智能控制理论早期发展中未有得到足够的重视. 这在智能控

制理论奠基阶段是可以理解的。如果认为专家知识库、模糊数学等为智能系统搭好了高层构架之后,人们发现智能系统本身的底层单元并未与之完全配套。以各种类型的模糊 PID 控制器设计为例。虽然专家知识规则已经构造完毕,但是在挑选隶属函数、解模糊算法、量化因子调整等方面却遇到了麻烦。在这些方面,至今缺乏严格的理论证明给出全面、合理的选择判据。

如果理解了模糊控制器是应用语言方式构造的非线性控制单元的本质,那就可以很自然地认识到非线性理论在模糊控制理论研究中的重要地位。然而,有关非线性研究中的具体理论内容需要进一步的定义。至少有两个非线性方面的基本问题需要探索<sup>[36]</sup>。一是系统设计参数与非线性变化范围的关系。当给定的自由参数数量一样时,能够提供非线性变化范围大的模糊控制器可以认为是应用了好的设计方法选择。二是非线性函数与控制过程质量的关系。这是用于考察模糊控制器生成的非线性范围是否合适。有关这些问题的研究可以包括应用各种非模糊控制技术。如本文中讨论的基于“非线性变化能力”的非线性逼近,同样可推广到人工神经网络等其它非线性逼近器的研究中去。也许可以发现,应用语言规则与样条函数结合,可以比传统的模糊控制系统提供更为灵活、有效的设计(因为免除了诸如隶属函数、推理机制、解模糊算法等方面考虑)<sup>[47]</sup>。应用非线性理论分析方法,可能会对传统智能方法带来新的改观和发现。

### “简单性(simplicity)”是智能控制器设计中的基本策略

真实世界对象或被控系统通常是复杂的。与此相比,任何人工设计的控制器都是简单的。这可能有三个原因。一是人们的认知能力有限。二是可用的技术水平不够,三是控制器只是一种工具。简单性应该成为控制器设计中的基本策略。“简单性”设计思想与专家智能决策策略更为相符。当被控对象未知时,“由简单到复杂”是最为常用的智能策略。当面临“简单”与“复杂”两种方法同样可以解决问题时,“简单”方法总是最为被人接受。因为“复杂”方法不仅使控制器成本提高,在使用与维护方面也带来不便。

智能控制技术发展为系统的简单性设计方面提出了更高的要求。理想目标下,希望智能控制器的应用能够进化成为类似人人可操作的“玩具”。这就要求在操作上应该符合简单、低智能的要求。在应用功能方面,智能控制器应该具有更为宽广的适用性。如果该控制器能够完成复杂的控制过程,那么对于简单的控制过程它也应该同样胜任。因此,简单控制过程应该作为智能控制器的基本控制内容予以保留。由此反映出系统的非线性自整定过程中,应该是“由简到繁”的渐变过程。人工神经网络系统,混沌系统, L 系统,分形理论等为智能控制系统设计带来许多启迪。这些用于描述复杂系统的基本单元是简单的。有关简单性的研究应该引起我们的重视。自动控制作为一门应用科学,经历了从简单系统到复杂系统理论的发展过程。这是科学上的进步。但是,无论是从应用还是从理论视角来看,化繁为简、揭示复杂世界内在规律的最简本质应是发展智能控制工具(包括理论方法)的致力目标。

最后,让我们引用三位科学家有关“简单性”的精辟论述作为文章结束语:

*“God always acts in the simplest way.”*<sup>[79]</sup>

Galileo Galilei (伽利奥·伽利略, 1564–1642).

*“Nature is pleased with simplicity and affects not the pomp of superfluous cause.”*<sup>[80]</sup>

Isaac Newton (艾萨克·牛顿, 1642–1727).

*“Nature is the realisation of the simplest conceivable mathematical ideas.”*<sup>[81]</sup>

Albert Einstein (阿尔伯特·爱因斯坦, 1879–1955).

## 参 考 文 献

- 1 Chen G. Conventional and fuzzy PID controllers: An overview. *Int. J. of Intelligent Control & Systems*, 1996, 1: 235~246
- 2 Jang J S R, Sun C T. Neuro-fuzzy modeling and control. In: Proc. of IEEE, 1995. **83**: 378~406
- 3 刘增良. 模糊控制技术与应用选编 (I - IV). 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997~1999
- 4 Ying H. Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations & Applications. New York: IEEE Press, 2000
- 5 Zadeh L A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, **8**: 338~353
- 6 Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetic*, 1973, **3**: 28~44
- 7 Mamdani E H. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. *Proc. IEE*, 1994, **D-121**: 1585~1588
- 8 Ying H. Analytical relationship between the fuzzy PID controllers and the linear PID controller, Technical Report. Department of Biomedical Engineering, The University of Alabama at Birmingham, 1987
- 9 Ying H, Siler W, Buckley J J. Fuzzy control theory: A nonlinear case. *Automatica*, 1990, **26**: 513~520
- 10 Ying H. A fuzzy controller with linear control rules is the sum of a global two-dimensional multilevel relay and a local nonlinear proportional-integral controller. *Automatica*, 1993, **29**: 499~505
- 11 丁永生, 应浩, 任立红, 邵世煌. 解析模糊控制理论: 模糊控制系统的结构和稳定性分析. 控制与决策, 2000, **15**: 129~135
- 12 Ying H. General analytical structure of typical fuzzy controllers and their limiting structure theorems. *Automatica*, 1993, **29**: 1139~1143
- 13 Tong R M. The evaluation of fuzzy models derived from experimental data. *Fuzzy Sets and Systems*, 1980, **4**: 1~12
- 14 Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems & its applications to modelling and control. *IEEE Trans. on Systems, Man, & Cybernetics*, 1985, **15**: 116~132
- 15 Ma X J, Sun Z Q, He Y Y. Analysis and design of fuzzy controller and fuzzy observer. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998, **6**: 41~51
- 16 Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. A Systematic Study of Fuzzy PID Controllers-Function-based Evaluation Approach. Submitted to *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999
- 17 de Silva C W. Intelligent Control: Fuzzy Logic Applications. New York: CRC, 1995
- 18 Maeda M, Murakami S. Self-Tuning fuzzy controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, **51**: 29~40
- 19 Zhao Z Y, Tomizuka M, Isaka S. Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *IEEE Trans. on Systems Man & Cybernetics*, 1993, **23**: 1392~1398
- 20 He S Z, Tan S, Wang P Z. Fuzzy self-tuning of PID controllers. *Fuzzy Sets & Syst.*, 1993, **56**: 37~46
- 21 Mann G K I, Hu B -G, Gosine R G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 1999, **29B**: 371~388
- 22 胡包钢, G K I Mann, R G Gosine. 关于模糊 PID 控制器推理机维数的研究. 自动化学报, 1998, **24**(5): 608~615
- 23 Driankov D, Hellendoorn H, Reinfrank M. An Introduction to Fuzzy Control (2nd ed). New York: Springer-Verlag, 1996
- 24 李士勇. 模糊控制, 神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996

- 25 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 26 de Silva C W. A criterion for knowledge base decoupling in fuzzy-logic control systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 1994, **24**: 1548~1552
- 27 Mudi R K, Pal N R. A robust self-tuning for PI- and PD-type fuzzy controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, **7**: 2~16
- 28 Katata R, de Geest D, Titli A. Fuzzy controller: design, evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller. *Fuzzy Sets & Systems*, 1995, **71**: 113~129
- 29 淳于怀太. 模糊控制器与积分控制器混合应用的研究. 化工自动化及仪表, 1986, 5
- 30 Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. New York: ISA, 1995
- 31 Visioli A. Fuzzy logic based set-point weight tuning of PID controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 1999, **29A**: 587~592
- 32 Kim J H, Kim K C, Chong K P. Fuzzy precompensated PID controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, **2**: 406~411
- 33 Sugeno M. (ed.) Industrial Applications of Fuzzy Control. Noth-Holland, 1985
- 34 Lee C C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller—Part I & II. *IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics* 1990, **20**: 404~435
- 35 Wang L X. Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1994  
(中文版: 王立新, 自适应模糊系统与控制—设计与稳定性分析. 北京: 国防工业出版社, 1995)
- 36 Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, **7**: 521~539
- 37 Nyberg M, Pao Y H. Automatic optimal design of fuzzy systems based on universal approximation and evolutionary programming. In: Fuzzy Logic and Intelligent Systems. Li H, Gupta M M (eds.). Boston: Kluwer Academic, 1995. 311~366
- 38 Palm R. Scaling of fuzzy controller using the cross-correlation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1995, **3**: 116~123
- 39 Li H X, Gatland H B. A new methodology for designing a fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics*, 1995, **25**: 505~512
- 40 Malki H A, Li H, Chen G. New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, **2**: 245~254
- 41 卢朝晖, 黄道君. 模糊控制器的绝对稳定性判别. 控制理论与应用, 1994, **12**: 697~702
- 42 Xu J X, Liu C, Hang C C. Tuning of fuzzy PI controllers based on gain/phase margin specifications and ITAE index. *ISA Transactions*, 1996, **35**: 79~91
- 43 张金明, 李人厚. 模糊控制的系统化设计和稳定性分析. 自动化学报, 1999, **25**: 493~497
- 44 Ying H. Practical design of nonlinear fuzzy controllers with stability analysis for regulating processes with unknown mathematical models. *Automatica*, 1994, **30**: 1185~1195
- 45 Mizumoto M. Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods. *Information Sciences*. 1988, **45**: 129~151
- 46 von Altrock C. Fuzzy logic applications in Europe. In: Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Yen, J, Langari R, Zadeh L A, (eds). New York: IEEE Press, 1995
- 47 Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. Control curve design for nonlinear (or fuzzy) proportional actions using spline-based functions. *Automatica*, 1998, **34**: 1125~1133
- 48 刘向杰, 柴天佑, 张焕水. 三维模糊控制器的结构研究. 自动化学报, 1999, **25**: 230~235
- 49 Palm R. Robust control by fuzzy sliding mode. *Automatica*, 1994, **30**: 1429~1437

- 50 Chen C L, Kuo F C. Design and analysis of a fuzzy logic controller. *Int. J. Systems Sciences*. 1995, **26**: 1223~1248
- 51 Abramovitch D Y, Bushnell L G. Report on the fuzzy versus conventional control debate. *IEEE Control Systems*, 1999, **19**(3): 88~91
- 52 Ortega R. Some remarks on adaptive neuro-fuzzy systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1996, **10**: 79~83
- 53 Funahashi K. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks. *Neural Networks*, 1989, **2**: 183~192
- 54 Ying H. Sufficient conditions on general fuzzy systems as function approximations. *Automatica*, 1994, **30**: 521~525
- 55 Ying H. Sufficient conditions on uniform approximation of multivariate functions by General Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 1998, **28A**: 515~520
- 56 Zeng X J, Singh M G. Approximation theory of fuzzy systems - SISO case. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, **2**: 162~176
- 57 Vapnik V N. An overview of statistical learning theory. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, **10**: 988~999
- 58 Zeng X J, Singh M G. Approximation accuracy analysis of fuzzy systems as function approximations. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, **4**: 44~63
- 59 Ying H, Chen G R. Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators. *Automatica*, 1997, **33**: 1333~1338
- 60 Ying H, Ding Y S, Li S K, Shao S H. Comparison of necessary conditions for typical Takagi-Sugeno and Mamdani fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Transactions on Man, Systems & Cybernetics*, 1999, **29A**: 508~514
- 61 Honik K. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 1991, **4**: 551~557
- 62 阎平凡, 黄端旭. 人工神经网络——模型, 分析与应用. 合肥: 安徽教育出版社, 1993
- 63 董聪, 刘西拉. 广义 BP 算法及网络容错性和泛化能力的研究. 控制与决策, 1998, **13**: 120~124
- 64 Geman S, Bienenstock E, Doursat R. Neural networks and the bias/variance dilemma. *Neural Computation*, 1992, **4**: 1~158
- 65 Hu B G, Mann G K I., Gosine R G. How to evaluate fuzzy PID controllers without using process information. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Congress-IFAC, K. Beijing: 1999. 177~182
- 66 Kosko B. Fuzzy Engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- 67 Manson J C, Parks P C. Selection of neural network structures: Some approximation theory guidelines. In: Warwick K, Irwin G W, Hunt K J, (eds.). *Neural Networks for Control and Systems*, London: Peter Peregrinus, 1992. 151~180
- 68 Wang L X, Mendel J M. Fuzzy basic functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1992, **3**: 807~814
- 69 Halgamuge S, Glesner M. Neural networks in designing fuzzy systems for real world applications. *Fuzzy Sets & Systems*, 1994, **65**: 1~12
- 70 Chao C T, Chen Y J, Teng C C. Simplification of fuzzy-neural systems using similarity analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 1996, **26**: 344~354
- 71 Yen J, Wang L. Simplifying Fuzzy Rule-Based Models Using Orthogonal Transformation Methods. *IEEE Trans. on Systems, Man, & Cybernetics*, 1999, **29B**: 13~24



- 72 Raju G V, Zhuo J. Adaptive hierarchical fuzzy controller. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, 1993, **23**: 973~980
- 73 Yager R R. On the construction of hierarchical fuzzy systems models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, **28C**: 55~66
- 74 Wang L X. Analysis and design of hierarchical fuzzy systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, **7**: 617~624
- 75 Combs W E, Andrews J E. Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998, **6**: 1~11
- 76 Ma S, Ji C. Performance and efficiency: Recent advances in supervised learning. *Proceedings of IEEE*, 1999, **87**: 1519~1535
- 77 Antsaklis P. Defining intelligent control, report of the task force on intelligent control. *IEEE Control Systems*, 1994, **14**(3): 4~5, 58~66
- 78 Mamdani E H. Twenty years of fuzzy control: Experiences gained and lessons learnt. In: *Proceedings on 1993 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1993. 339~344
- 79 Galilei G. Dialogue Concerning the Two Chief World Systems. Ptolemaic & Copernican. University of California, 1961
- 80 Thayer H S. Newton's Philosophy of Nature: Selection from His Writings. Hafner, 1953
- 81 Norton J D. Nature is the realisation of the simplest conceivable mathematical ideas: Einstein and canon of mathematical simplicity. *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, 2000, **31**(2): 135~170

## Review of Fuzzy PID Control Techniques and Some Important Issues

HU Bao-Gang<sup>1</sup>, YING Hao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

<sup>2</sup>(Dept. of Electrical & Computer Engineering Wayne State University, Detroit, Michigan, 48202, U.S.A.)

(E-mail: hao.ying@wayne.edu)

**Abstract** Some latest progresses in fuzzy PID control studies are briefly presented. Based on their control principles, various fuzzy PID controllers are classified to illustrate their inherent differences. The paper concentrates on four issues that are important in order to achieve widespread applications of fuzzy (PID) control. They are systematic design approaches, design with guaranteed performance, universal approximation capability and its quantitative measures, and fuzzy rule explosion. Each issue is discussed and, when needed, redefinition is introduced to better clarify the points on the issue. For instance, "rule explosion" can be reconsidered as "parameter efficiency." Finally, we summarize and provide the perspectives of the development of fuzzy control theory and techniques. We especially point out that simplicity should be fundamental to the design of intelligent controllers, including fuzzy controllers.

**Key words** Intelligent control, fuzzy control, PID control, design methodology, universal approximation.

**胡包钢** 1983 年于北京科技大学机械系获工学硕士。1993 年于加拿大 McMaster 大学机械系获哲学博士。现为中国科学院自动化研究所, 模式识别国家重点实验室研究员。中法信息、自动化、应用数学联合实验室 (LIAMA) 中方主任。中国科技大学北京研究生院兼职教授。IEEE 高级会员。目前研究方向为模式识别、智能系统、植物生长建模。

**应 浩** 1990 年在美国 University of Alabama at Birmingham 获生物医学工程哲学博士。曾在 University of Texas Medical Branch 任教十年。现任 Wayne State University 电气与计算机工程系副教授及东华大学顾问教授。1981 年起开始从事模糊控制的研究。出版过专题研究高等教材: Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications (IEEE Press, 2000)。1994 年曾担任 The First International Joint Conference of North American Fuzzy Information Processing Society Conference, Industrial Fuzzy Control and Intelligent System Conference 和 NASA Joint Technology Workshop on Neural Networks and Fuzzy Logic 程序委员会主席。2000 年担任了 The Third International Workshop on Intelligent Control and Systems 程序委员会主席, 以及 2000 IEEE International Conference on Fuzzy Systems 出版委员会主席。还担任过一些国际会议的程序委员会委员, 包括 1999 International Fuzzy Systems Association World Congress 与 2001 International Joint Conference of IFSA and NAFIPS。