

QIEHUAN MOHU XITONG DE WENDINGXING
YU LUBANG KONGZHI LILUN

切换模糊系统的稳定性 与鲁棒控制理论

.....

杨 红 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

切换模糊系统的稳定性与 鲁棒控制理论

杨 红 著

东 北 大 学 出 版 社

· 沈 阳 ·

© 杨 红 2012

图书在版编目 (CIP) 数据

切换模糊系统的稳定性与鲁棒控制理论 / 杨红著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-5517-0236-2

I. ①切… II. ①杨… III. ①模糊系统—稳定性—鲁棒控制 IV. ①N94②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 250990 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024-83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 8

字 数: 135 千字

出版时间: 2012 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2012 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 张德喜 王延霞

封面设计: 刘江旻

责任校对: 北 辰

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0236-2

定 价: 20.00 元

前 言

切换模糊系统 (switched fuzzy systems) 是一类新型的重要的混杂系统, 是以切换系统理论和模糊系统理论为基础的新型控制系统. 因此它是一种更为复杂的混杂系统. 切换系统是在连续变量系统中恰当地引入离散事件, 通过连续控制和离散控制的相互作用, 使之对系统的控制更加灵活. 另外, T-S 模糊系统通过模糊规则给出非线性系统的局部线性表示, 它可以逼近很大一类非线性系统. T-S 模糊系统是基于模型的模糊控制研究平台的最流行、最有前途的方法之一, 许多模糊控制专家对此也进行了深入研究. 切换模糊系统结合了切换系统和模糊系统的特性, 能更准确地刻画实际系统中模糊特性、连续动态和离散动态的相互作用及运动行为.

本书围绕切换模糊系统的控制理论与控制技术的基本问题 and 研究热点问题, 结合笔者几年来的研究与教学成果和体会, 系统地阐述了切换模糊控制中的主要概念、典型问题、热点问题、分析方法、控制理论与控制技术以及发展趋势.

全书共分 7 章. 第 1 章论述混杂动态系统、切换系统、模糊控制系统、切换模糊系统的研究背景、研究方法以及发展状况. 第 2 章讨论一类切换模糊系统模型及其渐近稳定性. 第 3 章给出模糊系统和具有不确定性的模糊系统的混杂控制. 第 4 章在第 2 章的基础上, 分别就连续切换模糊系统和离散模糊系统两种类型的系统, 提出了松弛稳定性. 第 5 章进一步研究切换模糊系统状态反馈 H_∞ 鲁棒控制问题. 第 6 章探讨不确定切换模糊系统和带有扰动的不确定切换模糊系统的鲁棒控制器的设计问题. 第 7 章给出具有不确定性的

切换模糊系统的鲁棒镇定问题和一类具有不确定性的切换模糊系统的鲁棒自适应跟踪控制问题.

在编著过程中, 本书得到了国家自然科学基金(61004039)、辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划基金(L2011127)的资助, 还得到了东北大学出版社的大力帮助. 研究生吕欢欢、陶冠男做了大量的资料收集、整理工作. 在此一并表示衷心的感谢.

由于作者水平有限, 书中的疏漏之处在所难免, 敬请专家和读者不吝赐教.

杨 红

2012 年 7 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 混杂系统概述	1
1.2 切换系统的特性及发展状况	4
1.3 模糊控制系统概述	8
1.4 切换模糊控制系统概述	16
1.5 本书的主要工作	19
第 2 章 一类离散切换模糊系统的稳定性分析	22
2.1 引 言	22
2.2 系统模型	23
2.3 任意切换律下的稳定性条件	24
2.4 保证稳定性的切换律设计	27
2.5 仿真例子	32
2.6 结 论	36
第 3 章 模糊系统的混杂控制	37
3.1 引 言	37
3.2 混杂控制问题的提出	38
3.3 混杂控制律的设计	40
3.4 不确定模糊系统混杂控制律的设计	42
3.5 仿真例子	46
3.6 结 论	52

第 4 章 一类切换模糊系统的松弛稳定性	53
4.1 引 言	53
4.2 连续切换模糊系统的松弛稳定性	54
4.3 离散切换模糊系统的松弛稳定性	60
4.4 结 论	71
第 5 章 一类切换模糊系统的 H_∞ 控制	72
5.1 引 言	72
5.2 预备知识	73
5.3 切换模糊系统的 H_∞ 控制	74
5.4 仿真例子	78
5.5 结 论	80
第 6 章 一类不确定切换模糊系统的鲁棒控制	81
6.1 引 言	81
6.2 切换模糊系统的鲁棒控制	82
6.3 一类带扰动的不确定切换模糊系统的鲁棒控制器设计	88
6.4 结 论	95
第 7 章 不确定切换模糊系统的鲁棒自适应控制	96
7.1 引 言	96
7.2 鲁棒自适应镇定	97
7.3 鲁棒自适应跟踪控制	101
7.4 仿真例子	106
7.5 结 论	110
参考文献	111

第1章 绪 论

1.1 混杂系统概述

混杂动态系统(hybrid dynamical systems)是同时包含连续变量动态和离散事件动态及其相互作用的复杂系统^[1]. 现代计算机等数字控制技术应用连续系统、分布式控制系统、嵌入式系统等人工复杂系统的发展, 一些系统本身的不连续性, 如根据系统连续变量的变化和离散事件的发生对系统控制的情况, 都是混杂动态系统受到重视的原因. 对于混杂动态系统, 迄今还没有统一的定义. 然而一个混杂动态系统的不同部分可以表现出几种动态行为, 连续变量动态系统常用微分方程或差分方程的模型建模并服从连续系统的运动规律, 离散事件过程一般用逻辑模型建模并服从离散事件系统的演变规律. 整个混杂动态系统的演化过程是两者相互作用的结果.

第一篇研究混杂系统的文献出现于1966年^[2]. 1979年, 瑞典人 Cellier 第一个引入混杂系统结构的概念, 把系统分为离散、连续和接口三个部分^[3]. 1989年, Gollu 针对计算机磁盘驱动器模型引入混杂系统的概念, 把连续部分和接口部分结合起来进行研究^[4]. 由于混杂系统的种类繁多、范围广泛, 因此, 对于混杂系统的研究, 需要集控制、数学、辨识、计算机科学、人工智能等多领域多学科的理论和技术方法才可能获得突破. 一批来自数学、计算机科学、控制工程等领域的科学家对混杂系统的研究和发展作出了杰出的贡献, 如 A. Nerode, P. J. Antsaklis, J. A. Stiver, M. S. Branicky, P. Peleties, R. Alur, W. Kohn, C. G. Cassandras, R. L. Grossman, M. D. Lemmon, B. Lennartson, T. A. Henzinger 和 P. Varaiya 等. 国际控制杂志《IEEE AC》在1998年、《Automatica》在1999年、《System & Control Letters》在1999年、《International Journal of Control》在

2002 年分别出版了混杂动态系统的专刊. 国际主要控制会议, 如 ACC 和 CDC, 每年也都举办专题会议和邀请会议.

混杂动态系统的提出, 是现代控制理论和计算机技术等高新技术发展的结果, 特别是计算机信息处理速度的不断提高、存储量的增加以及多任务实时处理功能和通信功能的提高, 使计算机数字技术广泛应用于通信网络、现代工业生产制造系统、交通系统、军事系统等大规模复杂系统^[5-11]. 这些应用突破了计算机单纯代替模拟控制装置的局限, 也突破了计算机只作为控制单元的单一功能, 而是集控制、调度、管理、总体优化等于一体的多任务和多功能的控制和决策. 计算机被拓展到连续加工过程和连续处理过程, 如石油化工、冶金等连续工业的生产和调度, 供电网的监控和调度, 城市交通系统的指挥和监控, 飞机和巡航导弹中基于计算机和其他复杂信息处理装置的决策和高精度控制^[6-10]. 这些重要的工程和军事问题, 促进了对同时包含相互作用的连续变量过程和离散事件过程的混杂动态系统的研究. 混杂系统理论已发展成为现代控制理论的一个崭新的研究领域.

一般来说, 混杂动态系统应当有如下特点:

① 系统同时包含按照连续变量系统规律变化的连续变量和按照离散事件系统规律演化的离散事件, 整个系统的演化过程是一个混杂的运动过程;

② 系统中的连续变量和离散事件之间存在依据某种规律或规则的相互作用, 连续状态的变化过程和离散事件的演化过程相互制约;

③ 一般来说, 系统的状态是随时间演化的, 系统具有一个动态系统的基本特征.

与连续动态系统和离散事件系统不尽相同, 混杂动态系统有自身的特点. 首先, 混杂动态系统不能不考虑系统的连续状态特性而简单地归结为对离散事件系统的研究, 因为系统的连续状态变量对离散事件的演化有作用. 同时, 混杂动态系统也不能离开对离散事件演化过程的研究而只研究连续动态系统, 因为系统连续状态的变化既受离散事件的控制和制约, 也对系统的离散事件的演变起控制和制约作用. 混杂动态系统的提出和发展是对复杂大系统研究的结果, 其模型的复杂性大为增加. 在连续过程的计算机控制中, 对大规模复杂系统的整体性能要求越来越高, 传统的控制方法将受到限制, 而用连续变量动态系统和离散事件动态系统的混杂动态模型来分析、研究实际系统有相当的灵活

性. 如光滑非线性动态系统的镇定, 可通过非光滑的离散事件动态系统模型控制器来实现. 有约束的连续变量动态系统的最优控制中, 控制器是呈离散时刻跳跃变化的开关型控制器^[8-9].

一个混杂动态系统 $H = (\mathbf{R}^n \times M, \mathbf{R}^p \times \Sigma, f, \phi)$ 由以下三个部分组成^[12]:

- ① 非空集合 $\mathbf{R}^n \times M$ 为 H 的混杂状态空间;
- ② 集合 $\mathbf{R}^p \times \Sigma$ 为 H 的输入空间;
- ③ 函数 $f: D_f \subseteq \mathbf{R}^n \times M \times \mathbf{R}^p \rightarrow \mathbf{R}^n$ 和 $\phi: D_\phi \subseteq \mathbf{R}^n \times M \times \mathbf{R}^p \times \Sigma \rightarrow M$, 其中

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{m}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$\mathbf{m}^+(t) = \phi(\mathbf{x}(t), \mathbf{m}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\sigma}(t))$$

式中, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 为连续状态变量, $\mathbf{m}(t) \in M$ 为离散状态变量, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^p$ 为连续输入, $\boldsymbol{\sigma}(t) \in \Sigma$ 为离散输入.

一个带有输出的混杂系统除上面的三个组成部分外, 还包括以下两个部分:

- ① 称集合 $\mathbf{R}^q \times O$ 为 H 的输出空间;
- ② 输出关系 $g: D_g \subseteq \mathbf{R}^n \times M \times \mathbf{R}^p \rightarrow \mathbf{R}^q$ 和 $\varphi: D_\varphi \subseteq \mathbf{R}^n \times M \times \mathbf{R}^p \times \Sigma \rightarrow O$, 其中

$$\mathbf{y}(t) = g(\mathbf{x}(t), \mathbf{m}(t), \mathbf{u}(t))$$

$$\mathbf{o}^+(t) = \varphi(\mathbf{x}(t), \mathbf{m}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\sigma}(t))$$

式中, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^q$ 为连续输出, $\mathbf{o}$ 为离散输出.

混杂系统的框图如图 1.1 所示. 其中, $\mathbf{m} \uparrow$ 和 $\mathbf{x} \downarrow$ 表示连续状态和离散状态及连续控制和离散控制之间的相互作用.

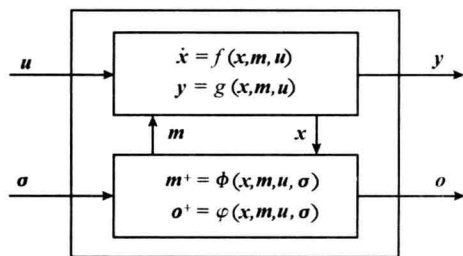


图 1.1 混杂系统的框图

大量的研究成果和实例^[5-11]表明,在连续变量系统中恰当引入离散事件构成混杂系统,虽然对系统的分析带来一些不便,但常常可更加准确地描述实际系统,并且对系统的控制更加灵活.

1.2 切换系统的特性及发展状况

切换系统是混杂动态系统中一类有影响的重要系统.切换系统的特点是包含有限个子系统或动态模型,同时附加一个切换规律(又称为切换律或切换策略),使之在子系统之间进行切换.切换律较常用的表达形式是切换序列.

图 1.2 为切换系统的一个简单示意图.其中, k 为切换开关,在子系统 1 至子系统 m 之间,按照切换律进行切换.这里的切换律是离散动态模型,而子系统 1 至子系统 m 为连续动态模型.

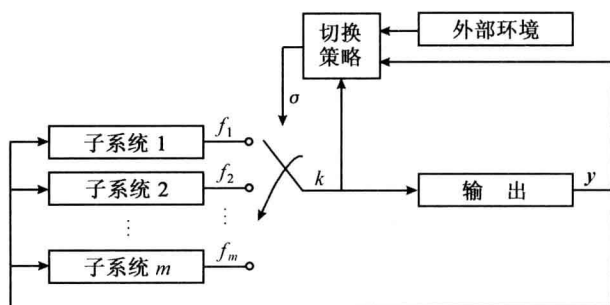


图 1.2 切换系统示意图

切换系统由各子系统及切换规律构成,其中的各子系统是切换系统的连续动态部分,切换规律是系统的逻辑、决策部分,表现为离散动态.由于既包含连续动态又包含离散动态,所以切换系统具有特殊性和复杂性,如两个全局指数稳定的子系统经过切换可以是不稳定的,而两个不稳定的子系统经过切换可以是渐近稳定的.

切换系统是一类重要的混杂系统,许多实际系统可以概括为切换系统,如 dc-to-dc 电转炉系统、电容电路系统^[13-14]等.对切换系统展开研究将有助于推动混杂系统理论的发展.

20 世纪 80 年代末,现代计算技术和计算机科学的迅速发展为切换系统的

研究提供了强大的技术支持, 切换系统的研究进入了一个蓬勃发展的新阶段. 计算机软件的深入开发, 使得切换系统的计算机仿真成为可能, 并推动了对切换系统的深入研究.

通常来说, 一个切换系统由有限个子系统组成, 即

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f_{\sigma}(\mathbf{x}(t)) \quad (1.1)$$

其中, $\sigma: [0, +\infty) \rightarrow \underline{p} = \{1, 2, \dots, p\}$ 是切换函数, 它是一个依赖于时间 t 或状态 $\mathbf{x}(t)$ 或其他信号的分段常值函数. 对于任意的 $i \in \underline{p}$, $f_i(\mathbf{x}(t))$ 是 $\mathbf{R}^n$ 到 $\mathbf{R}^n$ 上的光滑函数.

若每一个子系统均是线性的, 则可以得到下面的线性切换系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_{\sigma} \mathbf{x}(t)$$

切换系统具有复杂性和特殊性. 切换系统的性质不是各子系统性质的简单叠加. 切换系统的性质与设计或给出的切换律密切相关. 多种多样的切换方式使得切换系统的属性千变万化、纷繁复杂. 其表现为在不同切换规则的作用下, 切换系统可能具有截然不同的属性(如稳定或不稳定)^[15]. 即使构成切换系统的每个子系统都是不稳定的, 却可能通过一个适当切换规则的选取使切换系统稳定^[16].

手动换挡的轿车, 就是切换系统的例子. 轿车从静止到起车, 挂上低速挡, 并保持较低的车速, 这就对应一个子系统. 当进一步提高车速时, 就需要及时增挡, 也就是使轿车这个系统进入新的子系统. 当轿车运行在各个挡位时, 对应的是连续系统, 而换挡的过程就是离散事件系统.

例 1.1 自动传动轿车的简化模型如下:

$$\dot{v} = \frac{k}{m} v^2 \operatorname{sign}(v) - g \sin \alpha + \frac{G_{p(t)}}{m} T \quad (1.2)$$

$$\omega = G_{p(t)} v$$

其中, v 为速度; α 为路面的倾斜角; $G_{p(t)}$ 为传动齿轮比率, 为离散量, $G_{p(t)} \in \{G_1, G_2, G_3, G_4\}$, 且 $G_1 > G_2 > G_3 > G_4$; k 为适当的常量; ω 为角速度; T 为发动机产生的转矩, 是系统的输入.

离散状态的变换函数如下.

$$\text{当 } p(t) = i \neq 4 \text{ 且 } v = \frac{1}{G_i} \omega_{\text{high}} \text{ 时}$$

$$p(t^+) = i + 1$$

当 $p(t) = i + 1 > 2$ 且 $v = \frac{1}{G_{i+1}}\omega_{\text{low}}$ 时

$$p(t^+) = i$$

其中, ω_{low} 和 ω_{high} 是事先设定的发动机的角速度.

轿车的速度受离散变量 $p(t)$ 取值的影响, 当 $p(t) = i$ 时, $G_{p(t)} = G_i$, 因此轿车的连续动态为

$$\dot{v} = \frac{k}{m}v^2 \text{sign}(v) - g\sin\alpha + \frac{G_i}{m}T$$

$$\omega = G_i v$$

当速度 $v = \frac{1}{G_i}\omega_{\text{high}}$ 时, 离散状态发生变化, 此时若 $p(t) = i \neq 4$, 则 $p(t) = i + 1$, 相应地, 有

$$\dot{v} = \frac{k}{m}v^2 \text{sign}(v) - g\sin\alpha + \frac{G_{i+1}}{m}T$$

$$\omega = G_{i+1} v$$

可见系统(1.2)有两种动态: 其一是表示速度的连续动态; 其二是离散动态 $p(t)$. 两者相互作用, 其综合作用的结果来决定轿车系统的速度.

由于稳定性是控制系统中最基本的性质, 因此早期的切换系统的研究大部分是关于系统的稳定性问题^[17-22]. Liberzon 和 Morse 在 1999 年 10 月的《控制系统》杂志上发表了第一篇有关切换系统稳定性及其设计的综述文章^[23], 比较全面地阐述了切换系统稳定性研究的几个基本问题.

问题 I: 寻找切换系统在任意切换律下均渐近稳定的条件.

问题 II: 切换系统在某个(些)特定切换律下渐近稳定的验证.

问题 III: 构造切换律, 使切换系统在此切换律下渐近稳定.

对于问题 I, W. P. Dayawansa 等人在文献[24]、J. L. Mancilla-Aguilar 等人在文献[25]给出了切换系统的逆 Lyapunov 定理, 因此切换系统在任意切换律下均渐近稳定的充分必要条件是它的子系统具有公共的 Lyapunov 函数. 对于线性切换系统, 文献[26]指出, 如果它对于任意切换律均是渐近稳定的, 则公共 Lyapunov 函数可以取成准二次型或分段二次型. 针对仅含两个子系统的线性切换系统, 文献[27]利用矩阵约束条件研究了这种系统存在公共的二次型

李亚普诺夫函数的充分必要条件. 文献[28]利用线性矩阵不等式方法研究了系统的公共二次型 Lyapunov 函数的计算. 对于一般的非线性切换系统, 其公共的 Lyapunov 函数结构和计算还有待于进一步研究.

对于问题 II, 相比较而言要比问题 I 复杂些, Morse A. S.^[29] 和 Hespanha J. P.^[30] 引入平均驻留时间的概念, 得到了在稳定的线性子系统之间进行平均意义上的慢切换, 就能保证线性切换系统的稳定性. 另外, 一般地说, 切换系统具备公共 Lyapunov 函数的条件是相当苛刻的, 许多系统不具备这个条件. 于是, Peleties 在文献[31]中引入了多 Lyapunov 函数方法, 这为问题 II 的解决提供了有效的工具. 此后, Branicky^[32-33] 以及 Ye 和 Michel 等人^[34-36] 在多 Lyapunov 函数方面做了许多有意义的工作.

多 Lyapunov 函数的原理可解释如下. 假设系统

$$\dot{X} = f_i(X) \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

的每个子系统 $\dot{X} = f_i(X)$ 均存在一个函数 $V_i(X)$, 这个函数 $V_i(X)$ 满足: 当 $X \neq 0$ 时, 有 $V_i(X) > 0$, 但 $\dot{V}_i(X) < 0$ 不一定成立, 其中 $i = 1, 2, \dots, k$, 同一个子系统在下次被激活时, 其函数 $V_i(X)$ 的终点值小于上一次被激活时函数 $V_i(X)$ 的终点值. 这样, 整个系统的能量将呈现递减的趋势, 从而切换系统 (1.1) 渐近稳定. 图 1.3 为多 Lyapunov 函数原理图, 图 1.4 是单 Lyapunov 函数原理图, 不难看出多 Lyapunov 函数是单 Lyapunov 函数的推广.

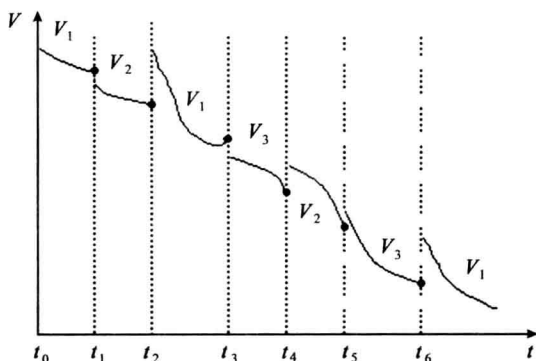


图 1.3 多 Lyapunov 函数原理图

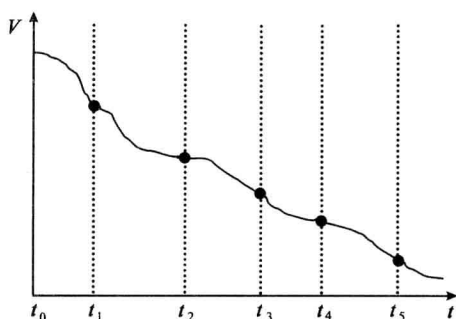


图 1.4 单 Lyapunov 函数原理图

对于问题Ⅲ，从应用角度看，它的意义最大。因为切换系统的精华在于“切换”，即设计切换律，使切换系统在此切换律下渐近稳定，这是切换系统研究的重要内容。虽然切换系统由若干个子系统和一个切换律组成，但它决不是各个子系统简单地叠加，切换律的作用同样是相当重要的。Peleties, Decarlo 等人在研究稳定性方面做了大量的工作^[31, 37-42]。其中，线性矩阵不等式方法^[43-44]、凸组合技术^[37, 39, 45]、线性化手段^[21]以及完备集概念^[46]等都被应用到这一研究领域。

1.3 模糊控制系统概述

随着现代工业过程日趋复杂，系统存在的非线性和不确定性常常使得经典及现代的控制理论和方法很难处理或无法处理。实际上，任何一个有效的工业过程控制方案的设计都不能由一种控制理论单独完成，都隐含着人的直觉推理。经典控制理论和现代控制理论都不能处理有关控制对象的一些模糊信息，也不能利用人的经验知识和直觉推理能力，有时难以满足对复杂控制系统的设计要求。因此在原有控制理论的基础上纳入“人工智能”控制就势在必行。模糊集理论的创立不仅拓展了经典数学的数学基础，而且为控制理论和方法面向人们的自然机理、研究“人工智能”控制提供了新的途径。二十年来，模糊控制在许多实际应用问题中不断取得惊人的成果，使许多学者改变了当初对模糊集合理论的看法，使人们更加坚信模糊控制在处理不确定系统方面的巨大

潜力.

1.3.1 模糊控制的背景及研究进展

模糊集理论已成为人工智能及控制应用中最为活跃的研究领域之一. 1965年, 美国加州大学 L. A. Zadeh 教授在《Information and Control》上发表了开创性的论文《模糊集合论》^[47-48], 打破了二位逻辑 0-1 的界限, 为表示人类概念的模糊性、描述模糊信息、处理模糊现象提供了新的数学方法. 在控制方面最先将模糊集理论应用于实际的是英国伦敦大学的 Mamdani 教授. 1974 年, 他研制了第一个工业应用的模糊控制系统——蒸汽发动机自动运行实验装置^[49-50], 把模糊语言应用到工业控制中并获得成功, 标志着模糊控制的诞生. 相对于 20 世纪的大多数领域来讲, 模糊逻辑的研究还只是一个开头, 但是, 一个商业化的模糊产品浪潮增加了人们对模糊逻辑的兴趣. 1980 年, 实用化的模糊控制系统在丹麦的 Simdith 水泥厂的水泥生产过程控制中投入运行^[51]. 1988 年, 日立公司使仙台市的地铁实现了模糊控制^[52]. 此后, 日本人用模糊逻辑生产了几百种“智能”产品. 日本通产省估计, 1992 年日本模糊产品的价值大约是 20 亿美元. 相对于人工控制, 模糊系统给出了较为平滑的运作, 并且能更精确地将列车停在指定的位置. 现在许多美国人驾驶的通用汽车公司生产的 Saturns 车就是用模糊系统平滑地调低变速器的速挡来进行操控. 现在, 模糊控制作为一种有效的控制策略受到人们的普通关注, 并有大量的研究工作相继问世. 到目前为止, 模糊控制已应用于热交换、水泥窑、水净化、核反应堆、自动车、地铁、集装箱自动装卸^[53-54]等复杂的系统中.

所谓模糊控制, 既不是指被控对象是模糊的, 也不是指控制器是不确定的, 而是指在表示知识、概念上的模糊性. 虽然模糊控制算法是通过模糊语言描述的, 但它所完成的却是一项完全确定的工作. 目前获取模糊控制规则的方法主要有以下四种^[55]:

- ① 基于专家的经验 and 知识;
- ② 建立操作者的控制行为模型;
- ③ 自组织, 自学习;
- ④ 建立被控对象的模型.

由于模糊控制利用了模糊集合的思想, 因此具有本质上的非线性和智能

性,显示了许多特殊的优良品质.在近几十年中,国内外许多学者以极大的热情投入到这一领域的研究,取得了一系列重要的理论和应用研究成果,模糊控制理论成为模糊系统理论最广泛、最成熟的应用分支,并逐渐成为智能控制理论的重要分支.

模糊控制系统由被控制过程和模糊控制器构成.模糊控制器由模糊化、模糊推理和去模糊化三部分组成,三者均建立在知识库(控制率和隶属函数)的基础上.模糊控制的基本原理如图 1.5 所示.当被控过程与知识库在动态过程中进行联系时(图 1.5 中虚线所示),模糊控制系统可实现自组织、自适应调整知识库,从而改善控制系统的品质,优化控制率.

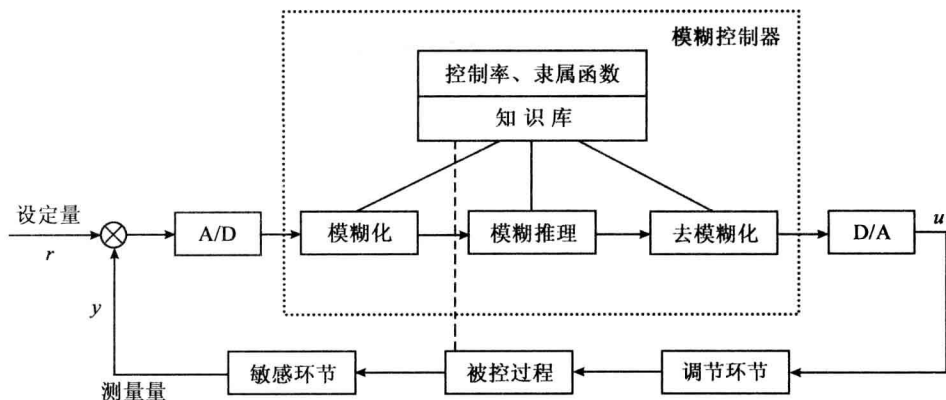


图 1.5 模糊控制系统原理框图

基本模糊控制器设计过程如下:

① 将操作者的操作经验归纳成定性的一组 If-then 形式的模糊规则,或称模糊模型;

② 对系统的输出偏差、偏差的变化和控制量进行模糊化;

③ 应用模糊推理方法,通过模糊算法,由模糊偏差和偏差的变化量,经控制规则计算出模糊控制量;

④ 通过模糊判决将模糊控制量去模糊化,得到精确的控制量,从而构造基本模糊控制器的查询表,存储于计算机内,以备实时控制使用.

早期的模糊控制系统不依赖于系统精确的数学模型,只需要提供现场操作