

模糊双曲正切模型

——建模·控制·应用

张化光 著



科学出版社

www.sciencep.com

模糊双曲正切模型

——建模·控制·应用

曹文光 著



清华大学出版社
Tsinghua University Press

模糊双曲正切模型

——建模·控制·应用

张化光 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地研究了模糊双曲正切模型的建模、控制和应用问题。全书共分为14章。第1~3章详尽地阐述了模糊双曲正切模型的发展和完善的理论建模过程,第4~12章介绍了该模型在非线性系统的多种控制问题中的研究成果,第13章和第14章研究了该模型在滤波、混沌系统等学术前沿领域中的应用。书中介绍了模糊双曲正切模型、广义模糊双曲正切模型、时滞模糊双曲正切模型和模糊随机双曲正切模型等多种新型模糊模型,所采用的主要教学工具是线性矩阵不等式(LMI)。本书的主要特点是性能分析透彻和理论证明严谨,特别是在模糊模型建模、时滞非线性系统控制以及模型在混沌系统中的应用等方面提出了开创性的设计和分析方法。书中的全部内容来源于作者近几十年来的创新性研究成果,新颖实用,研究方法先进,具有重要的理论研究和实际应用价值。

本书适合高等院校中应用数学、物理学、控制科学、计算机科学、信息技术等专业的高年级本科生、研究生和教师使用,同时也可供相关的科技人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

模糊双曲正切模型:建模·控制·应用/张化光著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024314-0

I. 模… II. 张… III. 模糊控制-数学模型 IV. TP13022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 045262 号

责任编辑:张海娜/责任校对:李奕莹

责任印制:赵 博/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年4月第一次印刷 印张:22 3/4

印数:1—2 000 字数:517 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

随着科学技术的飞速发展，现代工业系统的许多领域（如飞机控制、宇宙飞船控制、机器人学、过程控制、生物医学工程和电力系统等）具有以下特征：

（1）复杂性。系统的结构和参数具有高维性、时变性、高度非线性、时滞性。

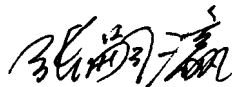
（2）不确定性。系统及其外部环境具有许多未知的、不确定的模糊性因素。

（3）高标准的性能要求。由于系统复杂，导致了控制目标的多样性和各目标之间的矛盾，因而对控制理论提出了更高的要求。

20 世纪 80 年代以来，迅速发展的智能控制理论受到人们极大的关注。在多种智能控制方法中，模糊控制、神经网络控制和专家控制被视为三种典型的智能控制方法。目前，模糊控制已经成为智能控制研究的热点，其便于利用人的先验知识，具有无须建立被控对象精确数学模型的特点，非常适合非线性系统的控制，并在实践中取得了很好的效果。模糊控制与自适应技术、鲁棒控制理论的结合，为非线性系统的自适应控制、鲁棒控制等问题找到了多种解决方案。

“工欲善其事，必先利其器”，一个好的模糊模型的建立对于基于该模型的控制、滤波等问题的解决是至关重要的。模糊双曲正切模型及广义模糊双曲正切模型正是该书作者张化光教授及其研究团队在模糊建模领域内取得的一个创新性研究成果。基于该模型的建模、控制、滤波问题及其工业应用的研究成果分别发表在国内外很有影响力的期刊上，如 *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*、*IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*、*Fuzzy Sets and Systems*、《中国科学》、《自动化学报》、《电子学报》、《中国电机工程学报》等。该书涵盖了作者近年来在这些方面的学术研究成果，系统地介绍了模糊双曲正切模型和广义模糊双曲正切模型的建立及其在控制、滤波、混沌等领域的应用，为该领域进一步深入研究提供了很好的参考，是模糊控制领域不可多得的一本好书。

中国科学院院士



2008 年 9 月 1 日于青岛

前言

自从 1965 年美国的 Zadeh 教授创建模糊集理论和 1974 年英国的 Mamdani 教授成功地将模糊控制应用到蒸汽机控制以来,模糊控制得到了广泛的发展并在现实中得以成功的应用,其根源在于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的一种系统的推理方法,因而能够解决许多复杂而无法建立精确数学模型的系统控制问题。从广义上讲,模糊控制是基于模糊推理、模仿人的思维方式,对难以建立精确模型的复杂非线性系统实施的一种智能控制。同其他控制方法相比,模糊控制有不需要被控对象精确的数学模型、鲁棒性强、能够处理复杂甚至“病态”系统等优点。因此,模糊建模与控制成为控制领域近年来的研究热点。

模糊模型是一种本质非线性模型,易于表达非线性系统的动态特性,而且从理论上已经证明了几种典型的模糊系统具有万能逼近性,可以逼近任意非线性系统到任意精度,因此模糊模型建模和辨识方法被认为是解决非线性问题的一种可行的方法。迄今为止,已经有两种主要的模糊模型被提出:第一种是模糊关系模型。其主要手段是构造一个模糊系统来近似理想的控制行为。这类模糊系统可以看做从输入空间到输出空间的一个模糊映射。其主要缺点是在建模过程中系统许多重要的动态信息受到忽略,因此很难得到控制性能良好的控制器。第二种是当前应用最广泛的、由 Takagi 与 Sugeno 提出的 T-S 模糊模型。其主要思想是构造一系列的线性方程来表示每个子系统,然后通过隶属函数将这些子系统连接为一个全局模型。

本书提出了一类新型的模糊模型——模糊双曲正切模型(FHM)、广义模糊双曲正切模型(GFHM)以及时滞模糊双曲正切模型(DFHM),此类模型的状态矩阵是状态变量的双曲正切函数,其输入矩阵是线性常数矩阵,并且证明了广义模糊双曲正切模型可以以任意精度逼近非线性函数。同 T-S 模糊模型和模糊动态模型相比,模糊双曲正切模型是一种全局模型,因此根据此模型设计的最优控制器可以使整个系统性能指标达到最优。与其他模糊模型相比,该模型更加适合用于对控制对象所知有限的多变量非线性系统进行建模和控制。同时它也是一种神经网络模型,因此可以通过神经网络强大的学习功能来优化模型参数。基于这种新型模糊模型,作者以其所在的科学研究小组近年来的相关研究成果为主线,展开了以下问题的研究:首先对 FHM 和 GFHM 的建模与辨识方法及其非线性逼近能力进行了探讨,并应用 FHM 设计了非线性系统的四种稳定的控制器。然后针对时滞和随机的情形,提出了时滞模糊双曲正切模型和模糊随机双曲正切模型(FSHM),并基于上述模型进行了五种非线性系统控制方法的研究,得到了许多可喜的成果。本书也针对基于 GFHM 模型的鲁棒自适应和 FHM 模型的非线性系统 H_∞ 滤波问题及其在混沌系统中应用的问题进行了深入研究。

本书讲述的内容为作者近年来的研究成果,内容新颖,属于当前所属研究领域的前沿问题,具有重要的理论与应用价值。

在本书写作过程中,作者的几位博士生为本书提供了大量的素材,他们分别是全永

兵、黎明、汪刚、杨珺、宫清先、张明君、伦淑娴、王以忠、王智良、赵琰。另外，博士生解相鹏、曹宁、冯德志、李冉冉、会国涛在手稿整理、仿真实验和校对书稿等方面做了大量的工作，作者在此向他们表示由衷的感谢。

本书的出版获得了中国科学院科学出版基金的资助，也得到了国家自然科学基金（项目编号：60534010，60572070，60521003，60774048，60728307）、长江学者和创新团队发展计划以及教育部博士点专项基金（20070145015）的资助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，热诚欢迎读者与同行不吝赐教。

张化光

2008年12月于东北大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 模糊控制理论的发展及其存在的问题	2
1.3 模糊建模的发展	6
1.4 本书内容安排	9
参考文献	11
第 2 章 模糊双曲正切模型与广义模糊双曲正切模型	15
2.1 引言	15
2.2 模糊双曲正切模型及其建模过程	16
2.3 广义模糊双曲正切模型	21
2.4 模糊双曲正切模型和广义模糊双曲正切模型的特点	26
2.5 时滞模糊双曲正切神经网络模型	27
2.6 小结	38
参考文献	39
第 3 章 模糊双曲正切模型与广义模糊双曲正切模型的辨识	41
3.1 模糊双曲正切模型的神经网络实现及模型参数辨识方法	41
3.2 广义模糊双曲正切模型的辨识方法	45
3.3 小结	48
参考文献	48
第 4 章 基于模糊双曲正切模型的典型稳定控制器的设计	50
4.1 引言	50
4.2 基于模糊双曲正切模型的稳定控制器设计	50
4.3 模糊 Lyapunov 分析方法	59
4.4 小结	61
参考文献	62
第 5 章 广义模糊双曲正切 PID 控制器解析分析及其应用	64
5.1 引言	64
5.2 模糊 PID 控制器结构分析	64
5.3 广义模糊双曲正切模型构造 GPP 系统	65
5.4 GFHM 的非线性逼近能力——基于“非线性变化能力”的分析	68
5.5 基于粗糙集理论的 GFHM-PID 控制器两级调整策略	79
5.6 GFHM-PID 控制器在变频空调系统中的应用	86

5.7 小结	91
参考文献	91
第6章 基于模糊双曲正切模型的一类连续非线性系统的分析与设计	93
6.1 引言	93
6.2 预备知识	93
6.3 H_∞ 控制器设计	94
6.4 积分滑模控制器设计	99
6.5 小结	102
参考文献	102
第7章 基于时滞模糊双曲正切模型的一类连续非线性时滞系统的分析与设计	104
7.1 引言	104
7.2 预备知识	105
7.3 时滞依赖的稳定性分析	108
7.4 控制器综合	114
7.5 小结	118
参考文献	119
第8章 基于模糊双曲正切模型的一类离散非线性系统的分析与设计	121
8.1 引言	121
8.2 离散系统建模	121
8.3 基于 FHM 的可靠控制器设计	123
8.4 基于 FHM 的 H_2/H_∞ 控制	127
8.5 基于 FHM 的非脆弱控制器设计	131
8.6 小结	136
参考文献	136
第9章 基于模糊双曲正切模型的不确定时滞非线性系统的鲁棒 H_∞ 干扰抑制	138
9.1 引言	138
9.2 不确定时滞非线性系统的鲁棒 H_∞ 干扰抑制控制	139
9.3 不确定时变时滞非线性系统的鲁棒 H_∞ 干扰抑制控制	154
9.4 小结	167
参考文献	167
第10章 基于广义模糊双曲正切模型的鲁棒自适应控制方法的研究	170
10.1 引言	170
10.2 一类离散非线性系统的模糊自适应控制	172
10.3 一类离散非线性系统的模型参考自适应控制	176
10.4 连续非线性系统的鲁棒直接自适应控制	183
10.5 连续非线性系统的鲁棒间接自适应控制	203
10.6 小结	215
参考文献	215

第 11 章 基于模糊双曲正切模型的一类非线性系统的网络控制	218
11.1 引言	218
11.2 系统描述	218
11.3 主要结果	220
11.4 仿真研究	224
11.5 小结	227
参考文献	227
第 12 章 基于模糊随机双曲正切模型的非线性随机系统的鲁棒 H_∞ 控制	229
12.1 引言	229
12.2 模糊随机双曲正切模型	230
12.3 一类时滞非线性随机系统的鲁棒 H_∞ 控制	233
12.4 一类多时滞非线性随机系统的鲁棒 H_∞ 控制	242
12.5 一类时变时滞非线性随机系统的鲁棒 H_∞ 控制	249
12.6 小结	258
参考文献	258
第 13 章 模糊双曲正切模型在非线性系统模糊 H_∞ 滤波中的应用	260
13.1 引言	260
13.2 连续非线性系统模糊双曲正切 H_∞ 滤波器设计	261
13.3 时滞连续非线性模糊双曲正切 H_∞ 滤波器设计	283
13.4 时滞连续非线性系统新型模糊双曲正切 H_∞ 滤波器设计	287
13.5 时滞离散非线性系统模糊双曲正切 H_∞ 滤波器设计	294
13.6 小结	302
参考文献	302
第 14 章 模糊双曲正切模型在混沌系统研究中的应用	304
14.1 引言	304
14.2 基于脉冲方法的非混沌系统混沌化研究	307
14.3 基于逆最优控制理论的连续非混沌系统的混沌化研究	314
14.4 基于非线性反馈的离散非混沌系统混沌化研究	329
14.5 小结	340
参考文献	341
索引	345
本书中使用的符号	349

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

自从 Wiener 在 20 世纪 40 年代创立控制论以来,自动控制理论经历了两个主要的发展阶段:经典控制理论与现代控制理论。经典控制理论主要解决单变量系统的反馈控制问题,而现代控制理论则着重解决多变量系统的优化控制问题。经过半个多世纪的发展,这些常规的控制方法已形成了比较完善的学科体系,并获得了许多成功的应用^[1,2]。

随着科学技术的飞速发展,现代工业系统具有如下一些特征:

(1)复杂性。系统的结构和参数具有高维性、时变性、高度非线性。

(2)不确定性。系统及其外部环境具有许多未知的和不确定的模糊性因素。

(3)高性能的要求。由于系统复杂,导致了控制目标的多样性和各种目标之间的矛盾,在设计控制器的时候需要综合考虑这些因素。

常规的控制方法主要是针对参数集中的线性动态系统^[1],要求对象必须可以量化,且各种量化参数之间的关系能够用微分方程或差分方程来描述^[2]。因此,常规的控制方法在面对现代工业系统时就显得力不从心,智能控制正是在这样的背景下提出来的。

智能控制的概念最早出现于 20 世纪 60 年代,傅京孙教授较早地对此进行了研究^[3],此后得到了迅速发展,人们提出了多种智能控制方法:专家控制、学习控制、基于信息论的分层递阶控制、拟人智能控制、知识控制、模糊控制以及神经网络控制等。虽然目前还难以断言智能控制理论就是人们期待已久的第三代控制理论,但可以肯定,第三代控制理论至少会把智能控制理论作为其一个重要分支。另外值得注意的是,智能控制不仅是人工智能应用研究的重要领域,而且其发展也推动了人工智能的发展^[4]。在各种智能控制方法中,模糊控制、神经网络控制与专家控制被视为三种典型的智能控制方法。目前,基于规则的传统的专家系统也有逐渐让位于基于模糊逻辑的模糊控制系统和神经网络控制系统的趋势^[5]。因此,模糊控制、神经网络控制两者之间的交叉综合,以及这两者与其他方法(如遗传算法)之间的交叉综合已经成为近年来智能控制研究的重点^[6]。

自从 1965 年美国加州大学的 Zadeh 教授创建模糊集理论^[7]和 1974 年英国的 Mamdani 教授成功地将模糊控制应用到蒸汽机控制^[8]以来,模糊控制得到广泛的发展并在工业实践中得以成功地应用,其根源在于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的一种系统的推理方法,因而能够解决许多因为复杂而无法建立精确数学模型的系统控制问题。从广义上讲,模糊控制是基于模糊推理、模仿人的思维方式,对难以建立精确模型的复杂非线性系统对象所实施的一种智能控制。同其他控制方法相比,模糊控制有不需被控对象精确数学模型、鲁棒性强、能够处理复杂甚至“病态”系统等优点。尽管模糊控制因其自身的优势在实践中取得了巨大的发展,然而不同于其他领域,模糊控制理论的发展似乎落后于模糊控制应用的发展,缺乏常规控制理论指导是制约模糊控制理论发展的一个重要因素。本书对模糊建模作了进一步的探索,提出了几

种新的模糊模型并得到了基于这些模型的一系列控制方法,期望以此能为模糊控制理论的发展添砖加瓦。

1.2 模糊控制理论的发展及其存在的问题

1.2.1 模糊控制理论的发展

为了解决复杂工业生产过程难以控制的问题,在 20 世纪 60 年代 Zadeh 教授提出模糊集合论^[7]的基础上,一种新型的控制理论——模糊控制理论诞生了。虽然关于模糊控制至今还没有统一的定义,但是从广义上讲可定义为:“应用模糊集合理论,统筹地考虑控制的一种控制方式”。模糊控制理论的核心是利用模糊集合理论,把人的控制策略的自然语言转化为计算机能够接受的算法语言来实现过程控制。虽然它是建立在模糊集合论的基础之上,但它的控制输出仍为精确量,因此它不仅能成功地实现控制,而且由于其能够模仿人的思维方式,故对那些无法用数学模型描述的对象可进行良好的控制,迄今为止,模糊控制技术已成功地应用于多种控制对象^[4,9,10]。

模糊控制和传统控制最根本的差异就是在于规则的形式。模糊控制所使用的基本规则形式是“如果……,则……”的形式,而且模糊控制法则中各个规则的制定也是由专家的经验得来的,因此模糊控制可以说是地地道道的专家系统,这是模糊控制的第一特征。在专家知识的基础上,融入个人的主观认定,可以将包含在知识里面的模糊性,应用模糊集合将其进行数值化,并置入控制中,此为第二特征。以规则形式所表示模糊控制的特征在于所有的规则并列,并同时考虑,即其并行性,此为第三特征。除此之外,由于在设计控制器时,模糊控制器都是由一些语法上的规则所组成的,它和系统真正的确定模式之间关联度并不大,所以在设计时甚至可以不必很清楚地知道系统的数学模型(因此要比传统控制器的设计简单得多),不管是线性系统还是非线性系统都没有关系,而且即使控制的过程中系统有些扰动,或是有些元件故障而导致系统的模型变化,所设计的模糊控制器仍能运作得很好(也就是所谓的鲁棒性),这是模糊控制的另一大特征。因为模糊控制具有以上的这些特征,所以它可以以一个较粗糙形态的控制器来实现系统的需求。如此一来,控制器的设计与实现将可以用比较少的花费来完成。

自从 1974 年英国的 Mamdani 工程师首先将模糊控制器用于蒸汽发动机的控制以来^[8],此后的二十多年中,模糊控制技术得到了较快的发展,越来越多地受到人们的关注和重视。模糊控制发展大致可分为以下几个阶段。

第一阶段:基本模糊控制器

由于在实际的诸多生产过程中,很难获得被控对象的数学模型,所以无法采用相同的控制方式来实现过程控制;另外,在管理科学、经济学、心理学、医学等领域里,也因精确的数学模型难以建立,使得传统的定量分析方法无法实现。然而利用操作人员在实践中积累的经验,形成一定的控制规则,在实际的控制过程中利用这些规则,并采用适当的策略,进而实现对被控过程进行定量的控制,这也就是基本模糊控制器的指导思想。这种模糊控制器的特点包括:控制器的核心是利用实践经验形成一定的模糊控制规则表,由于设计控制器时是针对控制过程中的某些特定的过程,因此控制器的使用具有针对性;另外,这种基本模糊控制器的控制规则表一旦形成,就不再改动,因而不具有自学习、自组织的

能力。

第二阶段:自组织、自学习模糊控制器

一方面,对于一些复杂的被控过程,人们很难精确、完整地总结出操作人员的实践经验,致使控制规则比较粗糙,很不完善,如果利用基本模糊控制器,势必会影响控制效果。另一方面,即使控制规则总结得比较完善,由于被控过程在运行中会经常发生变化,如果始终按照一组控制规则对其进行控制,也不可能取得理想的控制效果。

为了克服基本模糊控制器的缺陷,近一段时间,众多的研究人员着手研究自组织、自适应模糊系统,目的就是能够自动修改、完善和调整模糊控制规则,使被控过程的控制效果不断提高,直至达到预定的控制效果。这种具有自学习、自组织能力的模糊控制器称为自组织模糊控制器。它利用性能测试部分得到的期望值与实际输出值之间的偏差对控制量进行校正,然后根据控制量应取的校正量,对原有的模糊控制规则进行修正,得到控制效果更好的控制量,以获得新的控制规则。由此可见,自组织模糊控制器的控制过程,就是反复进行性能检测和调整控制规则,直到取得满足要求的控制效果的过程。Procyk 和 Mamdani 首先提出了自组织模糊逻辑控制器的概念^[11],之后一些学者在文献[12]~[16]中给予了进一步的完善和扩展,另外,在文献[17]~[21]中对其他类型的基于模糊逻辑的自适应控制器也给予了阐述。自学习模糊控制器运用模糊推理的手段,在其运行过程中逐步获得受控对象和环境的非预知信息,积累控制经验,并在一定的评价标准下进行估值、分类和决策,从而不断改善系统的品质。从本质上讲,自适应模糊控制与自学习模糊控制并无太大的区别,但从控制的过程来看,自学习控制更加主动,更加智能化。体现了模糊控制器由低级向高级、由常规向智能化发展的必然趋势,其优势体现在以下两个方面:

(1)对系统先验知识要求更少,对系统的非线性、不确定性及时滞,具有更强的适应能力;

(2)具有实时搜索、特征辨识、特征记忆、直觉推理和多模态控制等仿人智能的特征。

文献[22]给出了一种多变量模糊自学习控制方法。该方法引入参考模型和重复学习控制机构。系统通过搜索、识别、记忆以及推理学习,寻求合理的控制行为,对各控制环节建立起独立解耦的控制库。该学习方法类似于人的学习过程,有效地克服了多变量间强耦合过程的时间滞后。它包括四个功能块:参考模型、学习算法、规则库的建立机构以及被控过程,同时文中对该系统的收敛性进行了分析,文献[23]给出该方法的仿真结果。

自适应/自学习模糊控制与传统的自适应方法一样也分为直接和间接两种控制方法^[18,24,25]。一种广泛的模糊自适应/自学习控制结构如图 1.1 所示。直接控制方法是在原有的模糊控制基础上,通过对控制规则基的调整获得的;间接控制方法则不直接调整控制器的有关参数,而是首先辨识对象的模糊模型,然后再基于得到的模型来设计模型控制器。对应于图 1.1,自适应/自学习模糊控制可分为如下四大部分:模糊逻辑控制器、自适应/自学习算法、性能评价和模糊模型。

需要指出的是,自适应/自学习模糊控制都是基于模糊逻辑系统的逼近特性而设计的,即模糊逻辑系统可以以任意精度逼近连续非线性函数^[19,26~30]。文献[30]于 1992 年应用 Stone-Weierstrass 定理证明了模糊逻辑系统具有全局逼近性质,进一步说明了模糊逻辑系统的本质非线性特性,也为自适应/自学习模糊控制的全局收敛及系统稳定性分析奠定了理论基础。

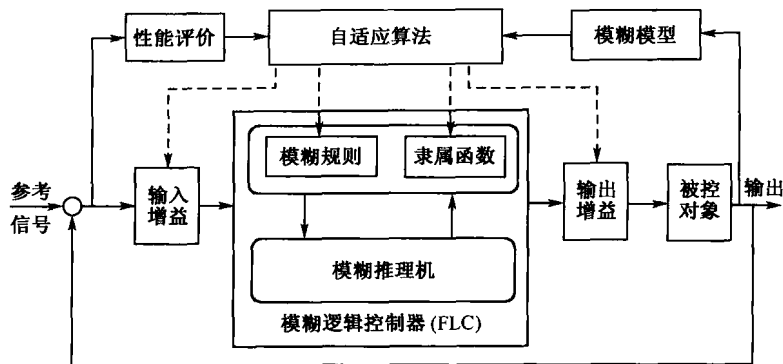


图 1.1 模糊自适应/自学习控制的一般结构

第三阶段:智能模糊控制

与基本模糊控制器相比,虽然自组织、自学习模糊控制器能比较好地解决一些问题,但由于在自组织模糊控制器中,依旧是按照人的意志,凭借时间经验,实现充分的划分,使之在允许的范围内进行调整,因此它的控制能力有限。在这种情况下,为了能对复杂的生产过程进行控制,就必须在不断了解、掌握过程控制机理的同时,结合操作经验,利用模糊控制规则构成原始的人工智能专家系统,然后通过产生式学习系统,对照实际的生产过程进行不断修改、完善和补充,从而构成机理操作经验型专家系统,利用产生式学习系统软件决定处理问题的过程,并对原有知识进行反馈修正,这就是智能模糊控制器^[10]。

1.2.2 模糊控制的特点

模糊控制语言是一种表述人类思维活动以及复杂事物非常有效的手段,因此,对于那些传统控制方法难以实现或奏效的控制问题,模糊控制技术往往可使问题迎刃而解。与传统的控制技术相比,模糊控制具有如下的特点:

(1)在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型。模糊控制是直接利用对被控过程参数现状及其发展趋势观测和判断所产生的定性感觉来构成控制算法。但是现在的模糊控制理论研究中,为了对闭环系统进行稳定性分析,通常需要构造一个模糊模型,之后再根据此模型进行性能分析。

(2)适应性较强。大量研究表明,对于确定的过程对象,采用模糊控制与采用PID控制的效果相当;但是对于非线性和时变的不确定系统,模糊控制具有较好的控制效果,同时对于非线性、噪声和纯滞后有较强的抑制能力。

(3)系统的鲁棒性较强,对参数变化不灵敏。由于模糊控制采用的不是二值逻辑,而是一种连续多值逻辑,所以当参数变化时,能比较容易地实现稳定的控制,尤其适合于非线性、时变、滞后的系统。

(4)系统的规则和参数整定方便。通过对现场的工业过程进行定性分析,就能比较好地确定控制规则和系统的控制参数。

(5)对于一个给定的系统而言,可以设计几个不同的指标函数,其语言控制规则是分别独立的,且通过整个控制系统的协调可以取得总体的协调控制。

(6)结构简单,系统的软、硬件实现都比较方便。在基本模糊控制器实际运行时只需

进行简单地查表运算,其他过程可离线进行。因此,这种控制方法很容易被现场工程技术人员和操作者所掌握。

1.2.3 模糊控制理论的发展前景

模糊控制理论开辟了自动控制领域新的篇章,在短短的二三十年里就取得了迅速的发展,不论是在理论方面,还是在实际工业过程控制中,模糊控制理论都逐渐显示出其自身的活力。正是鉴于模糊控制所具有的独特优点,国外专家预言:模糊控制技术可使计算机模拟人的直觉,并依据不确定信息作出决定,这将是下一代工业自动化的基础。尽管如此,模糊控制理论在体系上还不完备,系统的研究尚不够充分,在理论、系统设计等方面还需要进一步的完善。其中有待解决的问题主要有:

(1)有关模糊知识的获得。目前模糊规则接近人的语言规则,但是如何从众多纷繁复杂的规则中选取若干能有效反映控制对象特性的模糊规则却是亟待解决的问题。

(2)由于专家或实际操作者的语言描述同最终形成的模糊控制规则还存在一定的差距,还没有系统的理论和方法将该语言描述完整、精确地转化成模糊控制规则;另外,在模糊化过程中,语言变量的基本论域应划分成多少档、精确量的模糊化方法、模糊合成和推理算法的选取以及反模糊化问题的计算方法等至今在理论界还存在争议。

(3)由于模糊控制属于离散控制,在将精确的模拟输入量转化成离散的模糊量时,往往导致输入量一部分信息的丢失,同时由于模糊化时模糊论域的量化等级数目是一定的,所以当模拟输入量在一定范围内变化时,量化后的模糊数可能并不发生变化,这样往往使得最终求得的控制量毫无作用,由此导致模糊控制出现零点极限环振荡等现象,这样势必引起系统的稳态波动现象,最终影响整个模糊控制系统的控制性能。

(4)模糊控制的动态分析还没有系统的理论,一般作近似处理来分析其动态特性。由于模糊控制的输入输出关系具有多值逻辑的特点,所以常把模糊控制器近似为一个多值继电器模型,但由于是在近似基础上进行的,不能完全反映出模糊控制器的自身特性,因此势必产生分析的不精确性,同时也阻碍了对模糊控制器真实特性的认识。

(5)传统的控制理论对于控制的稳定性分析已经比较完善,但是与其相比,模糊控制对于稳定性的分析还处于起步阶段。

(6)带有自适应/自学习能力的模糊控制器虽然提高了模糊控制器的控制性能,但是它们仍旧处于起步阶段,还有待于理论上的进一步完善,并且对于这种自学习模糊控制策略和智能化系统结构及其实现人们还知之甚少。

(7)虽然模糊控制技术在工业控制过程中得到了大规模的应用,但从这些应用中不难发现,众多模糊控制都是针对不同的控制对象进行单独设计的,即模糊控制器的设计缺乏通用性和适应能力。

模糊控制理论存在的问题对其发展提出了要求,解决这些问题就成为模糊控制技术目前所面临的主要任务和发展方向。首先,应加强模糊控制理论的研究,使其具有坚实的、系统的理论基础;其次,解决模糊控制的机理和实现、动态性和稳定性分析以及可遵循的设计准则等一系列亟待解决的问题,从而促进模糊控制理论的发展;再次,将模糊控制同神经网络、专家系统等人工智能控制相互结合,构造出具有更智能化的控制系统,使其能在具有非线性、随机性的系统中得到应用,以获得良好的控制效果;最后,要充分发挥模

糊控制独特的优点,把已经取得的研究成果尽可能地应用到实际的控制过程中,同时研制和开发简单、实用且具有模糊推理功能的模糊集成芯片、模糊控制装置以及通用的模糊控制系统,加快模糊控制理论转化为生产力的步伐。

综上所述,模糊控制理论是一门发展迅速、有着广阔应用前景的新技术。随着模糊控制理论的不断深入以及系统的不断规范化,模糊控制技术必将在广度和深度上进一步得到发展,并且对未来控制策略将产生重大的影响。同时,模糊控制理论应用的灵活性与简便性以及其特有的处理模糊信息的功能,将在人工智能和新一代计算机的研制中发挥巨大的作用。不少专家认为,模糊控制技术将是 21 世纪的最重要控制技术之一。

1.3 模糊建模的发展

要想对控制系统进行稳定性分析,被控对象及控制器的数学模型是必需的。如何根据系统输入输出数据和对被控对象的定性分析得到其数学模型——建模问题,如何得到数学模型的各个参数——模型辨识问题,以及一个完善的数学模型对于稳定性分析和最优控制器的设计都是非常重要和必要的。然而总的来说,系统建模和辨识无论在理论上还是在实际应用上还远没有达到完善的程度,尚有大量的工作需要去做。对于非线性时变系统的辨识,目前常见的有两种方法:一是利用线性模型来近似描述非线性系统,显然这对于有高度非线性的系统来说误差较大;二是根据被控对象已知的信息,选择与之相近的非线性数学模型,这显然也具有局限性。

模糊模型是一种本质非线性模型,又易于表达非线性系统的动态特性,而且从理论上已经证明了几种模糊模型具有万能逼近性,可以逼近任意非线性系统到任意精度,因此模糊模型建模和辨识方法被认为是解决此类问题的一种可行的方法。迄今为止,已经有两种主要的模糊模型被提出。第一种是文献[27]、[30]中提出的模糊关系模型。其主要目的是构造一个模糊模型来近似理想的控制行为。这种模糊模型可以看做是从输入空间到输出空间的一个模糊映射。其主要缺点是,在建模过程中系统的许多重要动态信息被忽略了,因此很难得到控制性能良好的控制器。第二种是 Takagi 与 Sugeno 在文献[31]、[32]中提出的 Takagi-Sugeno 模糊模型,一般简称为 T-S 模糊模型。其主要思想是构造一系列的线性方程来表示每个子系统,然后通过隶属函数将这些子系统连接为一个全局模型。下面来简要介绍这两种模糊模型。

1) 模糊关系模型

具有 m 个输入的 MISO 系统可表达为

$$y(t) = x_1(t) \circ x_2(t) \circ \cdots \circ x_m(t) \circ R \quad (1.1)$$

式中, $R \in F(x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_m \times Y)$ 是基于参考模糊集的模糊关系; $F(\cdot)$ 代表定义在论域上的一组参考模糊集,记为

$$A_{i1}, A_{i2}, \cdots, A_{ir} \in F(x_i), \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad B_1, B_2, \cdots, B_r \in F(Y)$$

为保证模糊模型的性能,要求各参考模糊集为正规凸集。辨识的目的是在性能指标 J 给定的情况下,从系统的 I/O 数据中按极小化 J 的原则确定各参考模糊集合、模糊关系 R 和模型的结构参数。

Pedrycz 等研究了模糊关系的迭代算法^[33],并在隶属函数的构造上引入了模糊聚类

方法,结果显示,算法具有很好的收敛性。Czogola 和 Pedrycz 还首先提出了在辨识系统模型的同时,对系统实施控制的思想,并进一步发展成为优于常规模糊控制的基于关系模型的自适应控制方法。陈建勤等在 Pedrycz 的工作基础上,提出了在线模糊辨识方法^[34,35],能够克服不准确的测量数据对模糊关系产生的不良影响,并且结合在线模糊模型辨识与基于模型的模糊控制算法,得到了自适应模糊控制系统。

2) T-S 模糊模型

T-S 模糊模型^[31]是基于输入模糊划分的思想,可以看做是分段线性化的扩展,可描述和表示一类非常广泛的静态或动态非线性系统,非常适合基于模型的控制系统的稳定性分析。 m 输入单输出的 MISO 系统可由形如式(1.2)的 n 条模糊规则组成的集合表示

$$\begin{aligned} R^i: & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ & \text{THEN } y^i = P_1^i x_1 + P_2^i x_2 + \dots + P_m^i x_m \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中, R^i 为第 i 条模糊规则; A_j^i 为模糊子集,隶属函数可以取三角形、梯形或高斯形; y^i 为第 i 条模糊规则的输出; P_j^i 为结论参数。基本的 T-S 模糊模型的辨识流程图如图 1.2 所示,包括前提结构的辨识、前提参数的辨识、结论结构的辨识和结论参数的辨识等。由于 T-S 模糊模型的结论是采用线性方程式描述的,因此方便使用传统的控制策略设计相关的控制器。现在已有学者提出多种方法来设计基于 T-S 模糊模型的控制器并对其进行稳定性分析^[36,37]。

最初提出的 T-S 模型辨识方法需要涉及非线性规划问题,实现过于复杂,而且烦琐费时,并不适合于复杂系统的在线应用,随着对 T-S 模糊模型研究的不断深入,多种新的辨识算法与改进的 T-S 模糊模型相继被提出,如 Sugeno 提出的快速辨识算法,加入了结论结构的辨识,大大提高了模型的辨识速度。Sugeno 和 Kang 在文献[38]中提出了用复合型方法进行前提参数的辨识,其特点是不需要已知对象的数学模型,适用面广,目标函数容易建立;缺点是计算量大,收敛速度慢。事实上,这本身就是一个自相矛盾的问题,如果一个模型有更高的匹配精度、更广泛的适用范围,那么必然导致辨识的时间长、辨识的速度慢。而后, Sugeno 和 Takagi 又提出 T-S 模型的连续辨识算法,该方法将辨识分为两级,一个是监控级,另一个是调整级。监控级采用模糊调整规则集来确定参数调整策略,调整规则由模糊隐含推理以及 Zadeh 的对比强度概念推广而得到。参数调整级执行调整规则所决定的调整策略,其中包括前提参数和结论参数的调整,均由加权循环最小二乘法实现。该连续辨识算法可以快速调整 MIMO 系统的 T-S 模糊模型,便于控制快速的复杂实际过程,并且通过连续调整,能够得到较为精确的系统模型,便于时变系统的控制。为适合工程使用, Sugeno 和 Yasukawa 在 1993 年提出一种简化的 T-S 模糊模型(一般称为纯 T-S 模糊模型或标准模糊模型)^[32],其结论部分为一单值,这样就大大简化了模型辨识过程和控制器的设计步骤,但由于其结论部分并非采用前提变量的线性组合,因此其对系

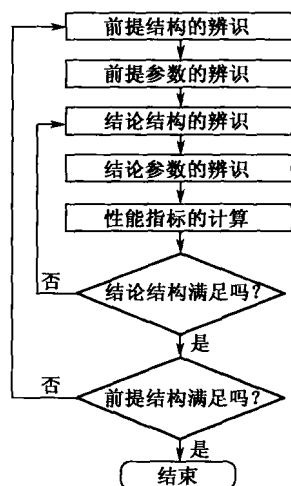


图 1.2 T-S 模糊模型的辨识流程图