

研究生教学用书

# 模糊控制理论 与系统原理

诸静 编著

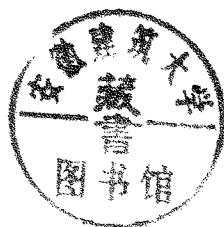
 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



研究生教学用书

# 模糊控制理论与系统原理

诸 静 编著



机械工业出版社

“模糊控制”是一种基于模糊数学理论,采用语言规则与模糊推理的先进控制策略,它是近代智能控制理论中的一个重要分支。其发展迅速、应用广泛、实效显著、引人注目。

本教材根据近几年来模糊控制理论的发展和研究成果,着重论述基础理论、基本原理和基本技术。主要内容有:模糊数学与模糊控制基础理论,模糊控制器的设计和性能分析,模糊系统辨识和模糊建模,以及模糊集成控制与应用研究等。全书力求概念清晰,内容翔实,实例丰富,图文并茂,由浅入深。

本书主要作为各高等院校研究生和高年级学生相应课程的教材,也可以作为信息学科相关领域、特别是自动化领域的高科技研究和开发部门的工程技术人员、科研工作者的主要参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

模糊控制理论与系统原理/诸静编著. —北京:机械工业出版社, 2005.8

研究生教学用书

ISBN 7-111-16611-6

I. 模... II. 诸... III. 模糊控制—研究生—教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第052719号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于苏华 版式设计:霍永明 责任校对:王欣

封面设计:陈沛 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2005年8月第1版第1次印刷

1000mm×1400mm B5·16.5印张·643千字

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

自动控制理论至今已有将近一个世纪的发展历史，经历了经典和现代控制理论两个阶段发展以后，正促使人们致力于 20 世纪 70 年代开始的智能控制理论研究。它是在人工智能学科基础上，对控制理论研究在深度和广度上的开拓。

“模糊”是人类感知万物、获取知识、思维推理、决策实施的重要特征。“模糊”比“清晰”所拥有的信息量更大，内涵更丰富，更符合客观世界。“模糊控制理论”是由美国学者加利福尼亚大学著名教授 L.A.Zadeh 于 1965 年首先提出，至今仅有 40 年的时间。它是以模糊数学为基础，用语言规则描述知识和经验的方法，结合先进的计算机技术，通过模糊推理进行判决的一种高级控制策略。它含有人工智能所包括的推理、学习和联想三大要素；它不是采用纯数学建模的方法，而是将相关专家的知识 and 思维、学习与推理、联想和决策过程由计算机来实现辨识和建模并进行控制。因此，它无疑是属于智能控制范畴，而且发展至今已成为人工智能领域中的一个重要分支。其理论发展之迅速，应用领域之广泛，控制效果之显著，实为世人关注。特别是近几年来，模糊控制与其它控制策略构成的集成控制，如与神经网络相结合的模糊神经网络等迅速发展，更使诸多学者确信，它是智能控制理论中一个全新的研究方向。

本教材主要作为研究生课程应用，在内容编辑上以前沿性、先进性、创新性和当前研究发展的新动向为主。在择用时，可以根据不同学科需求、教学课时和研究生的学习特点，选用相关章节，择优组合。可以主要以模糊控制基础理论和模糊控制器及模糊控制系统的设计与分析的基本原理和实现技术为基本教学内容，以模糊建模与模糊

辨识和模糊集成控制理论部分作为深化教学的内容或自学选材；此外，为增强研究生教学的理论联系实际应用的意识和能力，应用成果和实例部分可以作为参考和借鉴。

全书共有六章。第1章为绪论；第2章模糊控制的数学基础，包括模糊集合及其基本定义、定理，模糊关系的基本性质和模糊图与模糊网络；第3章模糊控制基本理论，主要阐述了模糊逻辑系统，以及模糊控制中的知识表示、隶属度函数与模糊推理等相关知识；第4章模糊控制器，着重论述了模糊控制器的结构原理及其组成、分类、设计方法与动态、静态特性分析；第5章模糊建模与模糊辨识，主要研究了近几年在基于模糊模型的建模与辨识，T-S模糊模型的模糊建模和辨识。基于模糊数据相关分析法和神经网络模糊模型的辨识与建模，以及复杂系统的模糊模型参考建模等方面的成果；第6章模糊控制系统、集成与应用，探讨了模糊控制系统的组成原理、特点与分类，研究了目前众多学者所关注的模糊控制集成系统的相关理论，包括与自适应、预测、滑模等先进控制理论相集成的基于模型的模糊集成控制系统，与神经网络、遗传算法、专家系统等相集成的具有学习功能的模糊集成控制系统，以及增强型模糊集成控制系统等。此外较完整地介绍了模糊控制应用实例与研究成果，如模糊控制在水泥生产过程中的应用，模糊神经网络在系统辨识中的应用和异步电动机模糊直接转矩控制系统等。

本书的撰写与出版参阅了大量文献资料，在此对文献资料的作者表示由衷的感谢。

由于模糊控制是一个新兴的领域，正在深入研究和迅速发展，许多理论尚不够完善与成熟，加之作者水平所限，难免有错漏和不妥之处，衷心希望师友和读者批评指正，不胜感激。

作者

2005年4月于浙江大学

# 目 录

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 1  |
| 1.1 自动控制理论发展简史 .....      | 1  |
| 1.1.1 经典控制理论 .....        | 1  |
| 1.1.2 现代控制理论与先进控制策略 ..... | 2  |
| 1.1.3 智能控制理论 .....        | 5  |
| 1.2 模糊控制理论 .....          | 12 |
| 1.2.1 模糊控制理论研究与进展 .....   | 12 |
| 1.2.2 模糊集成控制理论 .....      | 14 |
| 1.3 模糊控制应用领域与现状 .....     | 16 |
| 1.3.1 历史上应用的回顾 .....      | 16 |
| 1.3.2 现代应用技术的进展 .....     | 17 |
| 1.4 模糊理论研究的新动向 .....      | 18 |
| 1.4.1 “人类友好系统” .....      | 18 |
| 1.4.2 软计算技术 .....         | 20 |
| 1.5 模糊控制研究目前存在的主要问题 ..... | 20 |
| 第 2 章 模糊控制数学基础 .....      | 22 |
| 2.1 模糊集合 .....            | 22 |
| 2.1.1 集合的基本知识 .....       | 22 |
| 2.1.2 模糊概念和模糊集合 .....     | 25 |
| 2.1.3 模糊集合基本术语和运算 .....   | 29 |
| 2.1.4 截集和基本定理 .....       | 36 |
| 2.1.5 凸模糊集与模糊集的数字特征 ..... | 41 |
| 2.1.6 区间值模糊集合 .....       | 46 |
| 2.1.7 模糊序列 .....          | 47 |
| 2.2 模糊关系 .....            | 52 |
| 2.2.1 模糊关系定义与表示方法 .....   | 52 |
| 2.2.2 模糊关系运算及其合成 .....    | 65 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 2.3 模糊图与模糊网络 .....                       | 78         |
| 2.3.1 模糊图 .....                          | 78         |
| 2.3.2 Petri 网与模糊 Petri 网 .....           | 88         |
| 2.3.3 H 网与模糊 H 网 .....                   | 91         |
| 附录 2-A 几个运算性质的证明 .....                   | 96         |
| 附录 2-B F 集合基本原理的证明与推广 .....              | 98         |
| 附录 2-C II 型模糊集 .....                     | 99         |
| 附录 2-D $t$ 算则与 $s$ 算则 .....              | 100        |
| <b>第 3 章 模糊控制基础理论 .....</b>              | <b>106</b> |
| 3.1 模糊逻辑系统 .....                         | 106        |
| 3.1.1 模糊命题 .....                         | 106        |
| 3.1.2 模糊集合的格 .....                       | 107        |
| 3.1.3 模糊逻辑函数 .....                       | 109        |
| 3.1.4 模糊逻辑函数的分析与综合 .....                 | 113        |
| 3.1.5 模糊逻辑函数的硬件实现 .....                  | 115        |
| 3.2 模糊控制中的知识表示 .....                     | 121        |
| 3.2.1 模糊语言 .....                         | 121        |
| 3.2.2 模糊语句 .....                         | 131        |
| 3.2.3 Petri 网的知识表示 .....                 | 137        |
| 3.3 隶属度函数 .....                          | 142        |
| 3.3.1 隶属度函数的特征与形式 .....                  | 143        |
| 3.3.2 模糊化 .....                          | 144        |
| 3.3.3 隶属度函数的确定 .....                     | 145        |
| 3.4 模糊推理 .....                           | 160        |
| 3.4.1 似然推理 .....                         | 161        |
| 3.4.2 模糊关系方程及其求解 .....                   | 169        |
| 3.4.3 模糊条件语句 .....                       | 171        |
| 3.4.4 几种模糊推理方式 .....                     | 176        |
| 3.4.5 模糊推理的图示法 .....                     | 182        |
| 3.4.6 基于嵌入式模糊 Petri 网 (EFPN) 的知识推理 ..... | 185        |
| 3.5 解模糊化方法 .....                         | 192        |
| 3.5.1 最大隶属度法 .....                       | 192        |
| 3.5.2 重心法 .....                          | 193        |
| 3.5.3 加权平均法 .....                        | 193        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 附录 3-A 几种函数分布例 .....                  | 195        |
| 附录 3-B 模糊条件语句的几种真域模型 .....            | 200        |
| 附录 3-C 多重模糊条件语句的几种表示 .....            | 204        |
| 附录 3-D 一些常用的模糊蕴涵算子 .....              | 205        |
| <b>第 4 章 模糊控制器 .....</b>              | <b>207</b> |
| 4.1 模糊控制器的组成 .....                    | 207        |
| 4.1.1 模糊化接口 (Fuzzy Interface) .....   | 207        |
| 4.1.2 数据库 (DB——Data Base) .....       | 209        |
| 4.1.3 规则库 (RB——Rule Base) .....       | 209        |
| 4.1.4 推理机 (Inference Machine) .....   | 211        |
| 4.1.5 解模糊接口 (Defuzzy Interface) ..... | 212        |
| 4.2 模糊控制器结构及其分类 .....                 | 212        |
| 4.2.1 按输入-输出变量个数分类 .....              | 212        |
| 4.2.2 按模糊控制器模型分类 .....                | 216        |
| 4.2.3 按模糊控制器功能分类 .....                | 219        |
| 4.3 模糊控制器设计 .....                     | 228        |
| 4.3.1 模糊控制器设计要求 .....                 | 228        |
| 4.3.2 常规模糊控制器设计 .....                 | 230        |
| 4.4 模糊控制器性能分析 .....                   | 258        |
| 4.4.1 模糊控制器静态性能分析 .....               | 258        |
| 4.4.2 模糊控制器动态性能分析 .....               | 265        |
| 4.4.3 模糊控制器稳定性分析方法 .....              | 279        |
| 4.4.4 模糊控制器鲁棒性分析 .....                | 284        |
| 4.5 模糊控制器的特点 .....                    | 286        |
| 附录 4-A 模糊控制器多值继电特性 .....              | 286        |
| 附录 4-B 有关控制规则干涉性的几个定理证明 .....         | 288        |
| <b>第 5 章 模糊建模与模糊辨识 .....</b>          | <b>290</b> |
| 5.1 系统建模 .....                        | 290        |
| 5.1.1 系统建模概述 .....                    | 290        |
| 5.1.2 系统建模分类 .....                    | 290        |
| 5.1.3 模糊系统的模糊模型 .....                 | 292        |
| 5.2 基于模糊模型的建模与辨识 .....                | 294        |
| 5.2.1 模糊模型的辨识 .....                   | 294        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 5.2.2 模糊预测模型的辨识 .....           | 305        |
| 5.2.3 复合模糊模型的辨识算法 .....         | 311        |
| 5.3 基于 T-S 模型的模糊建模与辨识 .....     | 313        |
| 5.3.1 T-S 模糊模型的辨识 .....         | 313        |
| 5.3.2 T-S 模糊预测模型的辨识 .....       | 318        |
| 5.4 基于模糊数据相关分析法的建模与辨识 .....     | 327        |
| 5.4.1 数据相关分析原理 .....            | 327        |
| 5.4.2 模糊数据相关分析法 .....           | 332        |
| 5.4.3 模糊数据相关分析法建模 .....         | 333        |
| 5.5 基于神经网络模糊模型的辨识与建模 .....      | 337        |
| 5.5.1 模糊神经网络 .....              | 337        |
| 5.5.2 基于 DIFNN 的辨识与建模 .....     | 344        |
| 5.5.3 模糊穴映射模型的辨识与建模 .....       | 352        |
| 5.6 复杂系统的模糊模型参考建模 .....         | 359        |
| 5.6.1 连续系统的模糊模型参考建模 .....       | 359        |
| 5.6.2 离散系统的模糊模型参考建模 .....       | 361        |
| 附录 5-A DIFNN 网络参数的优化 .....      | 368        |
| 附录 5-B FCMNN 的学习算法 .....        | 371        |
| 附录 5-C 定理 5-3 和定理 5-5 的证明 ..... | 375        |
| <b>第 6 章 模糊控制系统、集成与应用 .....</b> | <b>380</b> |
| 6.1 模糊控制系统 .....                | 380        |
| 6.1.1 模糊控制系统的组成 .....           | 381        |
| 6.1.2 模糊控制系统的原理与特点 .....        | 382        |
| 6.1.3 模糊控制系统的分类 .....           | 389        |
| 6.1.4 一个简单的模糊控制系统实例 .....       | 393        |
| 6.2 模糊集成控制系统 .....              | 399        |
| 6.2.1 系统集成原则与类型 .....           | 399        |
| 6.2.2 基于模型的模糊集成控制系统 .....       | 405        |
| 6.2.3 具有学习功能的模糊集成控制系统 .....     | 427        |
| 6.2.4 增强型模糊集成控制系统 .....         | 454        |
| 6.3 模糊控制系统的应用 .....             | 471        |
| 6.3.1 模糊控制在水泥生产过程中的应用 .....     | 471        |
| 6.3.2 模糊神经网络在系统辨识中的应用 .....     | 480        |
| 6.3.3 异步电动机模糊直接转矩控制系统 .....     | 485        |

---

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 6.3.4 机器人模糊控制系统 .....    | 491        |
| 附录 6-A 多变量广义预测控制算法 ..... | 498        |
| <b>附录</b> .....          | <b>501</b> |
| 附录 A 符号集表 .....          | 501        |
| 附录 B 基本运算表 .....         | 505        |
| 附录 C 基本规律表 .....         | 506        |
| 附录 D 基本性质表 .....         | 509        |
| <b>参考文献</b> .....        | <b>510</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 自动控制理论发展简史

早在 19 世纪中期,自马克斯威尔(J.C.Maxwell)就蒸汽机飞轮调速器的离心调节问题发表了“关于调节器”的论文以后,直至 20 世纪 40 年代,自动控制理论才作为一门新学科受到众多学者关注,并于 1948 年由维纳(Wiener)创立了控制论,至今已有 100 多年的发展史了。随着工业生产和现代科学技术的迅速发展,各个领域中对自动控制系统的控制精度、响应速度、系统稳定性与适应能力的要求越来越高,应用的范围也越来越广。自动控制理论的发展充分展示了一条源于生产科技实践又回归于生产科技实践的历史真迹。特别是 20 世纪 80 年代以来,由于电子计算机的快速更新换代和计算技术的高速度进展,推动了对控制理论的深入研究,并开始了智能控制和生物进化优化计算的研究新阶段。综观自动控制理论发展简史,通常可以分为三个时期。

### 1.1.1 经典控制理论<sup>[1]</sup>

人们从 20 世纪 50 年代前后开始对“经典控制理论”的研究,是自动控制理论发展中的第一个历史时期。该时期以单输入—单输出(SISO)的线性定常系统为主要研究对象,并且完全依赖于系统的精确数学模型。经典控制理论是以传递函数、频率特性、特征根分布等为理论基础,主要采用的是波德(H.W.Bode)图法和依凡思(W.R.Evans)的根轨迹法,包括劳斯—赫尔维茨(E.J.Routh—A.Hurwitz)代数判据、奈奎斯特(H.Nyquist)稳定判据与基于期望对数频率特性的分析与设计方法等。其主导思想是构成加有反馈通道的闭环控制系统。所研究的目标装置是能够使该闭环控制系统达到预期动态、静态性能要求的自动调节器。因此该时期的自动控制理论也被称为“自动调节原理”。在经典控制理论中对于一般非线性系统,除了采用线性化方法来研究以外,通常还采用描述函数分析和不超过两个变量的庞加莱(Poincare)相平面分析法。在经典控制理论研究基础上,该时期后半阶段发展起来的 PID 调节原理和 PID 调节器设计方法,以及后来出现的串级、前馈补偿等系统一直是颇受关注的工程实用方法。

### 1.1.2 现代控制理论与先进控制策略

该时期始于 20 世纪 60 年代末, 由于航天飞机器等空间技术开发的需求而发展起来的现代控制理论, 主要研究的是多输入—多输出的受控对象, 系统可以是线性的或非线性的, 定常的或时变的, 可以是集中参数或分布参数的, 也可以是连续的或离散的。现代控制理论仍然要依赖于系统的精确数学模型, 但是它把原来直接根据受控系统机理特性的建模方法, 向基于参数估计和系统辨识理论的建模方向拓展了。现代控制理论用一组一阶微分方程 (亦称为状态方程) 代替经典控制理论中的一个高阶微分方程式来描述系统, 并且把系统中各个变量均取为时间  $t$  的函数, 因而属于时域分析方法, 它有别于经典控制理论中的频域法, 这样更有利于用计算机进行运算; 此外, 状态变量的选取可以不一定是系统中可观测的物理量, 因而具有很大的自由度, 这些都是状态空间表示法的优点所在。现代控制理论所研究的系统结构, 已从单闭环系统扩展到双闭环、多环以及含有适应环、学习环等多种结构的系统; 在综合和分析系统时, 已经从受控系统的外部特征描述, 深入到揭示系统内部的规律性; 从局部控制进入到一定意义上的全局优化。

现代控制理论研究的范畴很广, 主要包括:

(1) 系统运动状态的描述和能控性、能观性 状态空间描述法为系统性能设计与分析提供了强有力的工具; 1960 年, 由卡尔曼 (R.E.Kalman) 首先提出能控性和能观性这两个重要概念, 也是最优控制与最优估计的理论基础。

(2) 系统极大值原理 由贝尔曼 (R.E.Bellman)<sup>[2]</sup> 根据哈密尔顿-雅可比 (Hamilton-Jacobi) 方程提出的动态规划最佳原理, 和由前苏联学者庞特里亚金 (Pontryagin)<sup>[3]</sup> 提出的极大值原理, 是以性能指标泛函最小 (或最大) 为目标, 对系统进行“最佳控制”的重要理论基础。

(3) 系统识别与滤波理论 建立在统计函数理论上, 应用相关函数的系统动态特性测量方法 (系统识别) 和卡尔曼<sup>[4]</sup> 滤波理论。卡尔曼滤波是利用系统在时间上的转移关系所获得的一套适合于计算机运算的递推公式, 属于时域方法, 它有别于频域法中的维纳-霍夫 (Wiener-Hoff) 滤波理论。

(4) 稳定性理论 李亚普诺夫 (Lyapunov)<sup>[5]</sup> 稳定性理论 (直接法) 和李亚普诺夫函数 (亦称  $V$  函数)。前者是根据系统微分方程组解的性质来判定系统稳定性; 后者的特点是可以不求出状态方程的解, 利用李亚普诺夫函数来直接确定任意阶非线性系统和时变系统的稳定性, 此外还可以对系统瞬态响应的品质进行评价, 对系统参数优化问题进行求解。

(5) 自适应原理 20 世纪 70 年代初, 随着对自动控制系统性能要求的不断提高, 人们不仅希望在环境条件有大范围变化时, 仍能保证系统最佳运行状态

(即确定性自适应问题),而且还希望在环境条件的改变并不确知情况下,也能实现系统最佳控制(不确定性自适应问题)。瑞典的奥斯特隆姆(K.J.Astrom)<sup>[6]</sup>教授和法国的朗道(I.O.Landau)教授在这方面的研究做出了很大贡献。

近半个多世纪以来,随着科学技术的发展与被控对象的复杂化,对于现有的大范围内多参数时变、大时滞以及具有严重非线性和强耦合的多输入—多输出系统,要建立精确的数学模型是非常困难的。为此,在现代控制理论研究成果基础上,近十几年来提出了多种先进控制策略,并对其相关理论和应用技术进行了研究<sup>[7~9]</sup>。常见的先进控制策略如下:

### 1. 最优控制 (optimal control, optimum control)<sup>[10]</sup>

最优控制是由庞特里亚金和贝尔曼在20世纪50年代末做了奠基性研究工作后发展起来的<sup>[2,3]</sup>。至今,自动控制理论从经典到现代、从大系统到智能控制的半个多世纪发展以来,最优控制始终是一种有效的控制手段,并起着重要的作用。

对于使评价控制系统的某一目标函数最小(或最大)来确定控制量的这类控制问题,都被称为最优控制问题,如最小时间控制、最佳调节器设计和 $H_2$ 最优控制等均属于此范畴。这类问题的解是以状态变量为函数的控制量。特别在考虑时间域为无限大时,可由Riccati代数方程式来求得最优解,最优控制量则由时不变状态反馈增益来实现。

### 2. 自适应控制 (Adaptive Control)<sup>[6]</sup>

自适应控制是把已知控制对象特性的模型辨识和根据已知特性决定控制量的控制规律设计这两方面的问题结合起来考虑的一种新型控制方法。探索容易辨识的控制和容易控制的辨识是自适应控制的原意。自适应控制虽然以在线辨识为核心,但其所提供的原理框架在离线辨别中也同样有效。

早在20世纪50年代,美国麻省理工学院(MIT)的Whither教授首先提出了模型参考自适应控制方法,并试图在飞行器的自动驾驶控制系统中应用;1980年U.Hartmanu等人提出了一种数字自适应控制系统,通过混合数字仿真研究,最早验证了采用数字自适应控制的优越性<sup>[10]</sup>;1984年J.V.Amerogen等人提出的自适应自动驾驶仪,替代原来大型油轮和海洋考察船舶用的PID调节器,实践证明船舶在复杂变化的随机环境下都能准确、稳定、可靠、经济地运行<sup>[11]</sup>。

目前自适应控制理论主要研究方向有:

(1) 自适应控制的收敛性 在给定条件下,一个自适应控制算法能够收敛达到期望目标,并在这过程中保持系统的所有变量有界。自适应控制收敛性是区别各种自适应控制算法的优劣和在实际应用中可信度的重要标志。

(2) 自适应控制的稳定性 自适应控制系统在外界干扰的影响下, 系统的状态、输入、输出和参数等的界限问题。

(3) 自适应控制的鲁棒性 当系统存在未建模动态特性和随机扰动时, 仍能保持系统的稳定性和必要的动态性能的能力。随机扰动能使系统参数产生时变和飘移, 从而导致自适应控制系统的不稳定, 特别当系统存在未建模动态特性时, 有可能使自适应控制系统丧失稳定性。

### 3. 变结构控制 (VSC——Variable Structure Control)<sup>[12]</sup>

变结构控制是由前苏联学者欧曼尔扬诺夫 (S.V.Emelyanov)、犹特金 (V.I.Utkin)<sup>[13]</sup>和依特克斯 (Uitkis)<sup>[14]</sup>等人于 20 世纪 60 年代初首先进行的研究, 40 多年来变结构控制已经成为新型控制技术的一个重要分支。变结构控制是在状态空间设定的切换面上, 约束控制系统的动态, 频繁地切换两个控制规则, 使受控状态搜索至原点。变结构控制在多数情况下是指滑模控制, 但从广义上讲, 如开关控制、多模态控制也属于变结构控制。这种控制方法具有鲁棒性和稍微吸收模型化误差的能力。若要增加这种能力, 有必要采用具有大增益的控制规则来切换, 这势必增加控制能量和执行元器件的功耗。消除变结构控制中的“抖振”现象, 是其重要的研究课题之一。

### 4. 模型预测控制 (MPC——Model Predictive Control)<sup>[15]</sup>

模型预测控制是 20 世纪 70 年代中后期, 在欧美工业领域内出现的一类新型的计算机控制算法。1978 年, Richalet<sup>[16]</sup>等著名学者在发表的几篇论文中首先阐述了这种算法产生的背景、机理与应用效果。预测控制的主要特征是: 以预测模型为基础, 采用二次型在线滚动优化性能指标和反馈校正的策略, 来克服受控对象建模误差、参数和环境不确定性因素的影响, 有效地弥补了现代控制理论对复杂受控对象所无法避免的不足之处。模型预测控制中最基本的是:

1) 由 Cutler<sup>[17]</sup>等人提出的基于有限阶跃响应模型的动态矩阵控制 (DMC——Dynamic Matrix Control)。

2) 由 Rouhani<sup>[18]</sup>等人提出的基于有限脉冲响应模型的模型算法控制 (MAC——Model Algorithmic Control)。

3) 由 Clarke<sup>[19]</sup>提出的基于受控自回归积分滑动平均模型 (CARIMA——Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) 的广义预测控制 (GPC——Generalized Predictive Control) 等。

前两种是以非参数模型为预测模型, 而后一种则是与常规自适应控制相结合的一类长程预测控制算法。预测控制目前算法繁多, 但它不外乎包括: 预测模型、参考轨迹、在线校正、目标函数性能指标、在线滚动优化等五个方面。预测控制特点如下:

(1) 预测模型的多样性 从原理上讲, 只要是具有预测功能的受控对象模

型,无论采用什么描述形式和建模方法都可以作为预测模型。

(2) 滚动优化的时变性 预测控制采用的是在有限时域内的滚动优化策略,即在每一时刻,采用对未来充分长时间内的理想优化和包含系统存在的时变、不确定性、局域优化相兼顾的目标函数。

(3) 在线校正的鲁棒性 在预测控制中,把系统输出的动态预估问题分为预测模型的输出预测和基于偏差的预测校正两部分。由于预测模型只是对对象动态特性的粗略描述,不可能完全包括实际系统存在的非线性、时变性、模型失配与随机干扰等因素,因此预测模型与系统输出必然存在偏差,对这种偏差进行在线校正,构成具有负反馈的系统结构,从而提高了预测控制系统的鲁棒性。

#### 5. 解耦控制 (Decoupling Control)<sup>[20]</sup>

在多变量控制系统中,往往存在多个输入和输出量之间的耦合作用。如何消除这种耦合,使输入给定值与输出控制量之间做到一一对应,这是一种非常理想的解耦控制理念。为了消除这种耦合,往往在实现方法上不是那么容易,控制装置也变得更加复杂,它的调节也很困难。

#### 6. 鲁棒控制 (Robust Control)

鲁棒控制这一概念,最早是分别于1972年和1974年由 E.J.Davison 以及 J.B.Pearson<sup>[21,22]</sup>等人提出。鲁棒控制是研究当系统有一定范围的参数不确定性及一定限度的未建模误差时的控制器设计问题,使系统闭环仍能保持稳定并保证期望的动态品质。此外,考虑到控制系统的变动、传感器和执行元件故障时仍能保证系统的整体性质和稳定性。鲁棒控制主要理论有:

1) Kharitonov (1978 年) 定理:将区间多项式中无穷多个多项式的稳定性与多面体四个顶点的稳定性等价和 Bartlett (1988 年) 给出的多项式凸多面体的棱边定理。

2) Zames (1981 年) 的  $H_\infty$  控制理论<sup>[23]</sup>和 Doyle (1982 年) 提出的结构奇异理论 ( $\mu$  理论)<sup>[24]</sup>,可根据范数界限扰动有效地描述模型不确定性,成为判别鲁棒稳定性和鲁棒性能的强有力工具<sup>[25,26]</sup>。

鲁棒控制主要研究方法有:研究对象是闭环系统的状态矩阵或特征多项式的代数方法;从系统传递函数或传递函数矩阵出发的频域法。

先进控制理论是现代控制理论研究的进一步发展和延伸,是一类基于受控对象模型,有利于采用计算机系统及其算法软件实现的控制技术。因此与现代控制理论研究一起被认为是自动控制理论研究的第二个时期。

### 1.1.3 智能控制理论

20 世纪 70 年代后期,自动控制受控对象扩展到大规模复杂系统,要建立这类系统的数学模型是相当困难的,有时几乎是不可能,即使能获得它们的近似

模型,也难以求解或者不能适应实时控制的需求。基于这种情况,自动控制理论研究形成大系统递阶控制和智能控制两个分支,标志着自动控制理论开始进入到第三个发展时期。1965年,傅京孙(K.S.Fu)教授首先提出将人工智能的启发式规则应用于学习控制系统<sup>[27]</sup>;1966年,门代尔(J.M.Mendel)首次将人工智能用于飞船控制系统的设计;1967年,里昂兹(Leondes)等人首次应用“智能控制”这一名词。

智能控制主要是指一类无需人为干预,基于知识规则和学习推理的、能独立驱动智能机器实现其目标的自动控制技术。智能控制<sup>[28]</sup>的主要特点是:

1. 智能控制是一门多学科交叉、综合性很强的边缘学科,并需要这些相关学科间的配合与支撑,它的理论研究与技术进展将会取决于这些学科发展,并渗透到各个新兴领域。

2. 智能控制主要是针对那些具有复杂性(多输入-多输出、强耦合、严重非线性、大时滞)、非完全性、模糊性或不确定性的受控对象,由数学模型与知识表示的非数学广义模型相结合,通过知识推理、学习、启发引导,进行问题求解,来实现拟人智能的控制方式。

3. 智能控制可以具有高层组织级控制,该层的主要任务是对现实环境、过程或对象进行规划、决策和综合优化,实现广义问题求解,且具有拟人的思维特征。

智能控制系统的核心是智能控制器,它是对人脑神经结构、思维、专家决策过程的一种模仿,甚至对仿生物进化和群体特性的优化算法。它应该是:

1) 具有分层信息处理和决策功能。

2) 具有变结构特性。在按当前规律调整参数得不到满足性能要求时,能通过逻辑判断以跃变方式改变控制模式与结构。

3) 具有人类思维、理解、识别和规划等非线性特性。

4) 具有总体自学习、自组织、自寻优能力,能群体优化和全局搜索最佳参数与结构,达到总体最优控制性能。

智能控制目前主要包括模糊控制、神经网络、专家控制系统、学习控制、人工生物进化(包括遗传、免疫和种群寻优)算法等。

### 1. 神经网络控制(Neural Network Control)

神经网络控制是使用人工神经网络作为控制器(或者是其中的一部分),对被控系统进行学习、训练和控制。它具有对非线性函数逼近、大规模并行处理、学习、寻优和自适应、自组织等能力。显然,人工神经网络具有最优化和学习两种功能,在控制系统中主要是利用多层神经网络的学习功能,适宜于构成一类智能控制系统和智能控制器的硬件实现。

神经元网络是由人工神经元按多层(输入层、中间层和输出层)平行结构

互连而成的信息处理网络,亦称人工神经网络。目前大致可以分成三大类,即前馈网络、互连网络 and 自组织网络。在神经网络中,由于基本上没有像微分、积分这类的动态算子,因此一般只能学习静态非线性函数;当对控制系统的动态性能也有要求时,最简单的方法是外加积分器和微分器,将它们的输出作为神经网络的输入信号,这样神经网络也就可以学习非线性动态函数了。

## 2. 基于规则库控制 (Rule Based on Control)

以往多数控制系统是要求有人参与的,对于人机接口,不仅可以用数学式子来预示规则、动作等,更简单的可以用规则来描述控制,特别是像顺序动作那样的规则,而作为控制装置核心的计算机也是面向规则描述的。因此,规则库控制方式成为当前的人工智能控制之一,得到迅速发展和推广。

1) 专家系统 (Expert System) 的先导者费根鲍姆 (Feigenbaum)<sup>[29]</sup>教授,把专家系统定义为一个智能计算机程序,是通过知识库和推理过程来解决那些需要大量专家知识和经验才能解决的难题。近年来发展的新型专家系统有:分布式专家系统和协同式专家系统等。其特点是:①并行技术和分布处理;②高级语言和知识语言的描述功能;③先进的智能人机接口;④具有自学习功能;⑤引进新的推理机制;⑥多专家系统协同工作;⑦具有自纠错和自完善能力。

2) 专家控制系统 (Expert Control System) 也是一种典型的基于知识库的控制系统,是应用专家系统的概念和相关技术,模拟人类专家的控制知识与熟练工程技术人员的操作经验所构造的智能型控制系统。

专家控制系统与专家系统区别在于:

1) 从广义上讲,专家系统可在各个领域得到普遍应用。针对某一领域的专家系统,要求可靠性高,并具有解释、预测、分析、诊断、调试、设计、规划、控制、监视、教学、检测、咨询、管理、评估和快速决策等功能;而专家控制系统是“专家系统”族内的成员之一,它是以智能控制为目标领域,也应该具有分析、诊断、控制、调试和预测等多种功能。

2) 专家系统的推理是以知识规则为基础,推理结果是原知识项、新知识项以及对原知识项的更新项;而专家控制系统需要独立、自主地作出控制决策,其推理结果是更新的知识项或是启动(执行)某些解析算法。

3) 专家系统通常以离线方式工作,而专家控制系统需要采集在线动态信息,对系统进行实时控制。

## 3. 学习控制 (Learning Control)<sup>[30]</sup>

学习是人类基本的智能活动,也是人类智能的基本特征之一。人类的知识、才能、智慧和能力是在人类活动中不断学习所形成、发展和完善的。这种学习主要有:

(1) 监督学习 (又称有导师学习) 学习者直接接受导师的知识讲解,按导