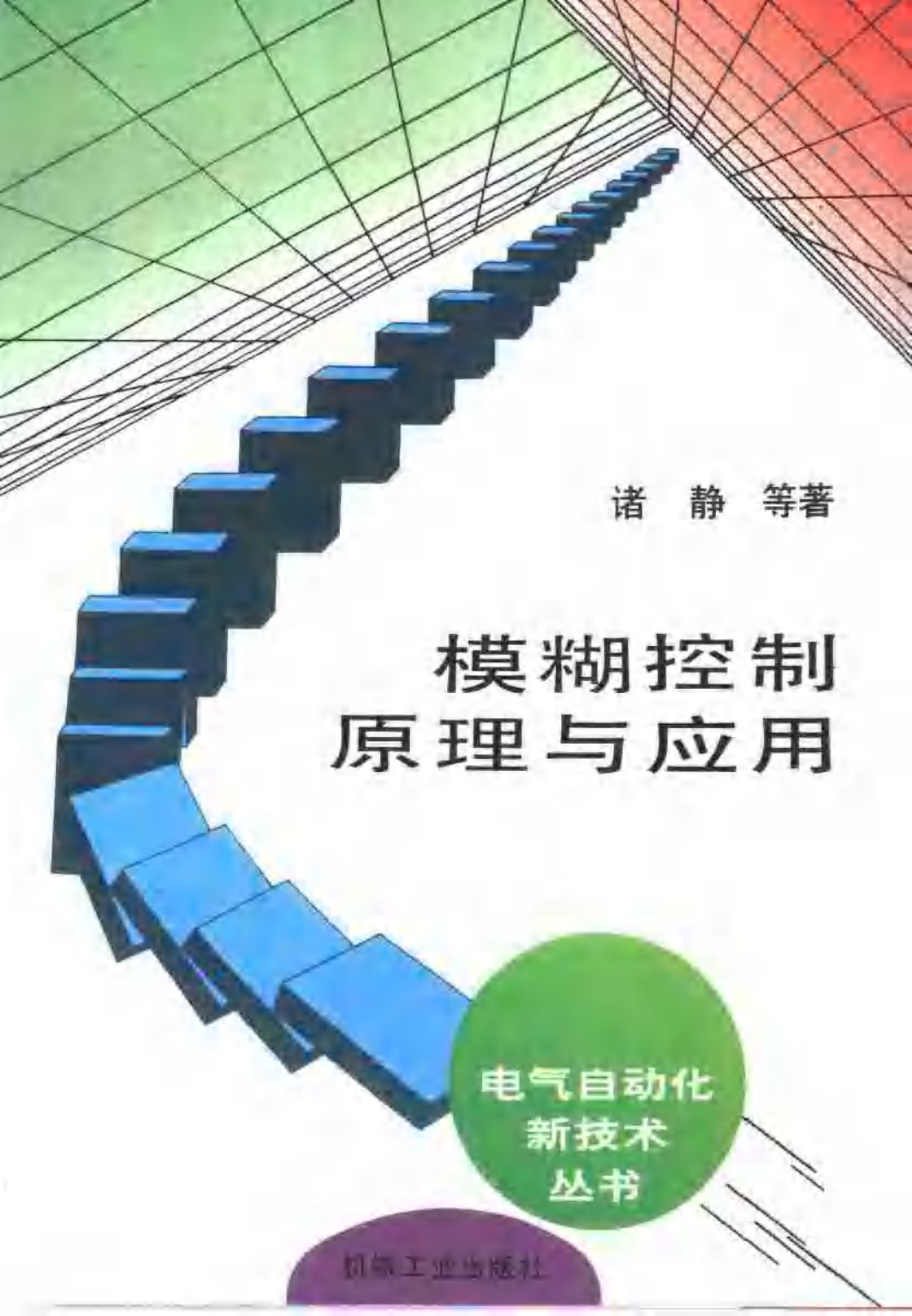




诸 静 等著

模糊控制 原理与应用

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

模糊控制原理与应用

(国家自然科学基金资助项目)

诸 静 等著



机械工业出版社

“模糊控制”是近代控制理论中一种基于语言规则与模糊推理的高级控制策略和新技术。它是智能控制的一个重要分支，发展迅速，应用广泛，成效显著，引人关注。

本书主要内容有：模糊数学基础；模糊控制基本原理；模糊控制系统与模糊控制器设计和分析；模糊控制理论研究及模糊集成控制；以及模糊控制的应用等。原理部分的阐述条理清楚，通俗易懂；应用实例面广量多，说明详实；图文并茂，由浅入深。

本书的读者以自动化领域的工程技术人员和科研工作者为主，既宜于自学入门，开卷有益；也可作为各高等院校教师、研究生、高年级学生教学与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制原理与应用/诸静等著. -北京：机械工业出版社，1995

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-04671-4

I. 模… II. 诸… III. 模糊控制 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第04077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：孙流芳 版式设计：李松山 责任校对：孙志筠

封面设计：姚毅

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2001年6月第1版第4次印刷

850mm×1168mm $\frac{1}{32}$ · 20.125印张 · 541千字

8 201—10 200册

定价：30.00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)68993821、68326677-2527

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域

新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿，来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书编辑委员会》。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》
编辑委员会成员

主任委员： 陈伯时
副主任委员： 喻士林 夏德铃 李永东
委 员： (以姓氏笔划为序)
王 炎 王文瑞 王正元
刘宗富 孙 明 孙武贞
孙流芳 过孝瑚 许宏纲
朱稚清 夏德铃 陈伯时
陈敏逊 李永东 李序葆
张 浩 张敬明 周国兴
涂 健 蒋静坪 舒迪前
喻士林 霍勇进 戴先中

前 言

自动控制理论有将近一个世纪的发展史，经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段后，正促使人们致力于 70 年代末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；也是当前被控对象的高度复杂化、控制性能要求的高指标化和计算机技术发展高速化所必然的趋向。

人工智能包括推理、学习和联想三大要素，它是采用非数学式子方法，把人们的思维过程模型化，并用计算机来模仿人的智能的学科。很多科学家认为下一世纪生产力的飞跃寄托于人工智能技术，并认为人工智能的发展必将带来一次新的史无前例的技术革命，第五代计算机的研究充分体现了人类左脑的逻辑推理功能，而人工智能研究的下一步是模仿人类右脑的模糊处理功能。人工智能将在逻辑推理计算机、模糊计算机和神经网络计算机这三者的基础上，由两个方面来实现，即：一是利用现有的计算机技术模拟人类的智能；二是利用一种全新的技术来实现信息处理的模糊化和网络化。前者是实现人工智能必需的先决条件；后者是实现人工智能的根本途径。

“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”所拥有的信息容量更大，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 20 余年时间。它以模糊数学为基础，用语言规则表示方法和先进的计算机技术，由模糊推理进行判决的一种高级控制策略。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，控制效益之显著，实为世人醒目关注。特别是近一二年内，模糊控制与其他控制策

略构成的集成控制，以及与神经网络相结合的模糊神经网络等得到迅速发展，更使诸多学者确信，它是一种全新的技术和高科技的发展方向。

模糊理论的研究最早始于模糊逻辑数学，因此，众多学者在总结研究成果的基础上，撰写了不少有关模糊数学及其应用方面的著作，这对促进模糊理论及其在各学科领域中应用研究是有贡献的。从系统角度全面地介绍模糊控制基础理论，模糊控制系统的基本原理、设计与分析方法及其应用的著作还比较少。

本书是作者多年来从事研究生教学与指导研究生学位论文工作的体会与总结，也是结合国家自然科学基金——“多变量复杂系统模糊推理和自学习模糊控制策略研究”课题，以及浙江省自然科学基金——“模糊控制理论的工业应用机理和系统集成研究”课题所取得的初步成果的综合，并经去粗存精、充实提高面写成。

全书共9章。第1章为绪论；第2、3章阐述了模糊控制的数学基础与基本理论，包括集合论与模糊关系的基本性质、定义、定理；模糊逻辑系统中命题、范式、函数的分析与综合，以及硬件实现和模糊控制中知识表示和推理方法；第4、5章主要论述模糊控制系统及模糊控制器的原理、组成、分类、设计方法与静、动态特性分析；第6章论述了模糊控制理论近几年在模糊系统辨识建模、模糊控制器结构与合成推理规则方面的研究成果；第7章以较大篇幅，较全面地介绍了模糊控制的应用实例与成果，包括它的工业应用和在可编程控制器、系统故障与医疗诊断、天气预报以及图象识别等领域中应用，特别是对模糊控制近几年在家用电器如电饭煲、全自动洗衣机及空调器中的应用作了详细论述。第8、9章着重综述了日前众多学者致力于研究的模糊集成控制系统，及其由模糊控制用的通用芯片和通用软件组成的支撑工具——模糊控制通用系统。全书兼顾基础知识介绍、基本原理阐述和基本应用技术探讨的同时，又适量论及当前模糊控制理论研究成果和发展动向，以满足不同层次读者的需求。

本书第5章由金耀初博士编写，其余章节由诸静编写。在撰写过程中，除作者参考了“参考文献”目录所列的大量文献资料和国内外学术会议论文以外，在应用实例一章中引用了作者所涉及的不少博士与硕士研究生学位论文中的大量理论与应用研究成果；有关造纸过程中模糊控制模型和应用方面的内容，还借重于孙优贤教授的《造纸过程建模与控制》一书。在此特对他们表示由衷的感谢。

本书完稿后由蒋静坪教授主审并提出许多宝贵意见，由王景美副教授协助校对与誊写，并得到中国自动化学会电气自动化专业委员会喻士林等老师和机械工业出版社有关同志关照。作者特此对各位也深表感谢。

由于模糊控制理论是一个新颖的领域，正在深入研究和迅速发展，许多理论尚不够完善与成熟，再加之作者水平所限，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
于浙江大学



● 封面设计：姚毅

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

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”阶段	(1)
1.1.2 “现代控制理论”阶段	(1)
1.1.3 “大系统理论”和“智能控制理论”阶段	(2)
1.2 模糊控制理论进展概况	(4)
1.3 模糊控制应用领域	(8)
1.3.1 历年应用的回顾	(8)
1.3.2 现代应用的进展	(9)
1.3.3 目前存在的主要问题	(12)
1.4 模糊控制工程	(12)
第 2 章 模糊控制的数学基础	(16)
2.1 清晰集合	(16)
2.1.1 集合的基本知识	(16)
2.1.2 集合的运算性质	(21)
2.1.3 集合的笛卡儿积、映射与关系	(22)
2.1.4 特征函数	(27)
2.2 模糊集合	(29)
2.2.1 模糊概念与模糊集定义	(29)
2.2.2 模糊集合的表示方式	(31)
2.2.3 模糊集合中的基本定义和运算性质	(33)
2.2.4 α 截集和基本定理	(40)
2.2.5 隶属函数确定方法	(46)
2.2.6 模糊集与模糊数	(58)
2.3 模糊关系	(62)

2.3.1	模糊关系定义与表示方法	(62)
2.3.2	模糊关系性质与其合成关系	(76)
附录 2.A	几个运算性质的证明	(89)
附录 2.B	F 集合基本原理的证明与推广	(91)
附录 2.C	t 算则与 s 算则	(93)
第 3 章	模糊控制的基础理论	(100)
3.1	模糊逻辑系统	(100)
3.1.1	二值逻辑与多值逻辑	(100)
3.1.2	模糊命题与模糊逻辑	(106)
3.1.3	模糊逻辑公式及其范式	(108)
3.1.4	模糊逻辑函数的分析与综合	(117)
3.1.5	模糊逻辑函数的硬件实现	(123)
3.1.6	区间值模糊集与区间值模糊逻辑	(132)
3.2	模糊控制中知识表示	(130)
3.2.1	模糊语言与语言变量	(137)
3.2.2	模糊语句	(150)
3.3	模糊推理	(162)
3.3.1	似然推理	(163)
3.3.2	模糊关系方程及其解	(171)
3.3.3	模糊条件语句与多重模糊条件语句	(174)
3.3.4	几种模糊推理方法	(178)
附录 3.A	II 型模糊集	(184)
附录 3.B	模糊条件语句的几种真域模型	(185)
附录 3.C	多重模糊条件语句的几种表示	(182)
附录 3.D	一些常用的模糊蕴涵算子	(193)
第 4 章	模糊控制系统与模糊控制器	(194)
4.1	模糊控制系统	(194)
4.1.1	模糊控制系统组成	(196)
4.1.2	模糊控制系统的原理与特点	(197)
4.1.3	模糊控制系统分类	(206)
4.2	模糊控制器	(210)
4.2.1	模糊控制器的组成	(210)
4.2.2	模糊控制器结构	(220)

4.2.3	模糊控制器模型分类	(225)
4.3	一个简单的模糊控制系统实例	(229)
4.3.1	系统对象	(229)
4.3.2	锅炉锅筒水位模糊控制系统	(230)
4.3.3	燃烧系统的模糊控制	(236)
附录 4.A	模糊控制器多值继电特性	(237)
第 5 章	模糊控制系统的设计与分析	(240)
5.1	模糊控制器设计	(240)
5.1.1	模糊控制器设计要求	(240)
5.1.2	模糊控制器结构设计	(242)
5.1.3	模糊规则的选择和模糊推理	(246)
5.1.4	解模糊	(258)
5.1.5	模糊控制器论域及比例因子的确定	(261)
5.2	模糊控制器的静态特性分析	(269)
5.2.1	模糊控制规则的完整性	(269)
5.2.2	模糊控制规则的干涉性	(270)
5.2.3	模糊控制规则的相容性	(273)
5.2.4	模糊控制器的鲁棒性	(278)
5.3	模糊控制器动态分析	(280)
5.3.1	影响模糊控制器动态特性的若干因素	(280)
5.3.2	模糊控制器动态特性的改善	(284)
5.3.3	模糊控制仿真实例	(298)
5.3.4	模糊控制器的动态稳定性	(306)
附录 5.A	有关控制规则干涉性的几个定理证明	(312)
第 6 章	模糊控制理论研究	(315)
6.1	模糊系统建模	(315)
6.1.1	系统建模概述	(315)
6.1.2	模糊系统辨识建模原理	(317)
6.1.3	模糊系统辨识建模的改进	(329)
6.1.4	多变量系统的辨识建模	(334)
6.2	模糊控制器结构研究	(338)
6.2.1	PID 模糊控制器	(338)
6.2.2	自调整模糊控制器	(356)

6.2.3	最优模糊控制器	(362)
6.2.4	自学习模糊控制器	(371)
6.3	模糊推理规则研究	(386)
6.3.1	模糊推理函数	(386)
6.3.2	语句连接词与合成算子	(395)
6.3.3	合成推理	(396)
6.3.4	模糊推理类型	(399)
附录 6.A	式 (6-93) 的证明	(401)
附录 6.B	几个引理的证明	(402)
第 7 章	模糊控制的应用	(405)
7.1	模糊控制的工业应用	(405)
7.1.1	模糊控制在交流伺服系统中应用	(405)
7.1.2	自学习模糊控制器及其在液位控制中应用	(420)
7.1.3	自校正模糊控制器在粮食烘干系统中应用	(426)
7.1.4	模糊控制器在造纸生产过程控制中应用	(433)
7.1.5	模糊控制在工业机器人中应用	(439)
7.2	模糊控制在其他领域中应用	(449)
7.2.1	模糊控制在可编程控制器中应用	(449)
7.2.2	模糊模型化在抗生素发酵过程的染菌故障 诊断中应用	(455)
7.2.3	模糊预测及其在天气预报中应用	(461)
7.2.4	模糊控制在图象识别中应用 - 智能机器 人行走控制	(470)
7.2.5	模糊控制在医疗诊断中应用	(478)
7.3	模糊控制在家用电器中应用	(485)
7.3.1	概况	(485)
7.3.2	模糊控制在电饭煲中应用	(488)
7.3.3	模糊控制在全自动洗衣机中应用	(491)
7.3.4	模糊控制在空调器中应用	(501)
第 8 章	模糊集成控制器与系统	(506)
8.1	模糊集成控制	(506)
8.1.1	模糊集成控制器	(506)
8.1.2	模糊集成控制系统	(545)

8.2	模糊-神经网络系统	(561)
8.2.1	神经网络在模糊控制器中应用	(562)
8.2.2	采用神经网络的自组织模糊控制器	(569)
8.2.3	模糊-神经网络控制应用实例	(575)
8.2.4	几点结论	(577)
8.3	专家模糊控制系统	(578)
8.3.1	专家模糊控制系统设计	(579)
8.3.2	专家模糊控制系统应用实例	(582)
附录 8.A	反向传播学习算法	(585)
第 9 章	模糊控制用的通用芯片与支持系统	(586)
9.1	模糊控制通用芯片	(586)
9.1.1	模糊样本比较器与应用系统	(587)
9.1.2	模糊相关器	(588)
9.1.3	模糊微控制器与其开发系统	(589)
9.1.4	神经处理器及其开发系统	(589)
9.2	NLX230 单片模糊微控制器	(590)
9.2.1	模糊微控制器逻辑设计基本思想	(591)
9.2.2	距离测量原理	(593)
9.2.3	单片简介	(596)
9.2.4	工作模式	(600)
9.2.5	应用和特点	(603)
9.3	ADS230 模糊微控制器开发系统	(604)
9.4	模糊控制用的通用系统	(604)
9.4.1	模糊控制用的通用控制器	(604)
9.4.2	模糊控制用的通用软件	(609)
9.4.3	结论	(611)
附录 A	符号集表	(612)
附录 B	基本运算表	(617)
附录 C	基本规律表	(618)
附录 D	基本性质表	(622)
参考文献		(623)

第1章 绪 论

1.1 自动控制理论发展简史

自动控制理论发展至今已有100多年历史。随着各个阶段的工业和现代科学技术飞速发展,各个领域自动控制系统对控制精度、响应速度、系统稳定性与适应能力的要求越来越高,应用范围也更加广泛。特别是本世纪80年代以来,电子计算机的快速更新换代和计算技术的高速度进展,推动了控制理论研究的深入开展,并进入了新的一段历程。综观控制理论发展史,通常可以分为三个阶段。

1.1.1 “经典控制理论”阶段

本世纪50年代前后的控制理论也被称为“自动调节原理”。它主要研究的自动控制系统为线性定常系统;被控对象也几乎全部是单输入-单输出的。经典控制理论所采用的方法通常是以传递函数、频率特性、根轨迹分布为基础的波德(H. W. Bode)图法和依凡思(W. R. Evans)的根轨迹法,包括劳斯(E. J. Routh)-赫尔维茨(Hurwitz)代数判据、奈奎斯特(H. Nyquist)稳定性判据与希望对数频率特性综合等。在经典控制理论中,对于非线性系统,采用描述函数分析和一般不超过2个变量的庞加莱(Poincare)的相平面分析法。

1.1.2 “现代控制理论”阶段

60年代末,由于航天飞行器等空间技术开发的需要而发展起来的现代控制理论,主要用来研究多输入-多输出的被控对象,系统可以是线性或非线性的,定常或时变的。它用一组一阶微分方程(亦称为状态方程)代替经典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，它区别于经典理论中频域法，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的物理量，因而具有很大自由度。这些都是状态空间表示法的优点所在。现代控制理论研究的范畴很广，主要包括：

(1) 系统运动状态的描述（即系统数学模型的建立）和能控性、能观测性的分析。

(2) 李亚普诺夫 (А. М. Ляпунов) 稳定性理论（直接法）和李亚普诺夫函数（亦称 V 函数）。它的特点是不求出状态方程解的情况下，来确定任意阶非线性系统和（或）时变系统的稳定性理论。

(3) 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（即系统识别）和卡尔曼 (R. E. Kalman) 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，属于时域法。它有别于早期频域法中的维纳-霍夫 (Wiener-Hoff) 滤波理论。

(4) 改变系统的控制量，使系统按某一最佳运行方式工作，实现系统性能指标泛函最小的“系统最佳控制”。1961年苏联学者庞特里亚金 (Л. С. Понтрягин) 发表的极大值原理和1957年贝尔曼 (Bellman) 根据哈密尔顿-雅可比 (Hamilton-Jacobi) 方程提出动态规划最佳原理。他们分别对连续系统和离散系统的最佳控制理论的发展作出了重要贡献。

(5) 随着对自动控制系统的控制性能要求的不断提高，人们不仅希望系统能在环境条件有大范围变化时，仍能保证系统最佳运行状态（即确定性自适应控制）；而且还希望系统在环境条件的改变并不确知情况下，也能实现最佳控制（不确定性自适应控制）的系统自适应控制研究。70年代初，瑞典奥斯特隆姆 (K. J. Åström) 教授和法国朗道 (I. O. Landau) 教授在这方面作出了贡献。

1.1.3 “大系统理论”和“智能控制理论”阶段

上述两个阶段的控制理论的发展与应用，对于存在数学模型