



BOSHI WENKU

〔自动化〕

智能模糊控制的 若干问题研究

ZHINENG MOHU KONGZHI DE
RUOGAN WENTI YANJIU

王志新 著

知识产权出版社

本书得到中国青年政治学院学术著作出版基金资助



BOSHI WENKU
〔自动化〕

智能模糊控制的 若干问题研究

ZHINENG MOHU KONGZHI DE
RUOGAN WENTI YANJIU

王志新 著

知识产权出版社

内容提要

本书主要介绍了智能模糊控制问题的几点研究,研究工作目的在于将智能控制理论应用于大滞后、强耦合、非线性的控制系统之中,建立较为理想的数学模型,设计适当的自适应控制器,以期达到良好的控制效果。本书共七章,分别介绍了模糊控制的基本实现方法、模糊推理建模方法、变论域模糊控制的方法、基于因素空间理论的控制方法以及应用。

本书内容丰富、专业性强,对于大专院校智能控制方向的教师和研究生以及初涉这一领域的研究人员具有一定的参考价值。

责任编辑:范红延 责任校对:董志英

装帧设计:SUN 工作室 责任出版:卢运霞

图书在版编目(CIP)数据

智能模糊控制的若干问题研究 / 王志新著. —北京:知识产权出版社, 2009.9

ISBN 978-7-80247-827-5

I. 智… II. 王… III. 人工智能—模糊控制—研究

IV. TP18 TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 164826 号

智能模糊控制的若干问题研究

王志新 著

出版发行: 知识产权出版社

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

网 址: <http://www.ipph.cn>

发行电话: 010-82000097 82000860 转 8104

责编电话: 010-82000860 转 8024

印 刷: 知识产权出版社电子制印中心

开 本: 880mm×1230mm 1/32

版 次: 2009 年 9 月第一版

字 数: 200 千字

ISBN 978-7-80247-827-5/TP·282 (2682)

邮 编: 100088

邮 箱: bjb@cnipr.com

传 真: 010-82000893

责编邮箱: fanhongyan@cnipr.com

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 7

印 次: 2009 年 9 月第一次印刷

定 价: 20.00 元

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。



前 言

在描述时间时，人们经常使用“现在、最近、正在、适当时候”等词汇；在描述事物的变化程度时，“一般、比较、加大力度、适当、几乎”等词汇也是十分常用的。这些常见的词语具有类似的特点，它们表示的意思很难用精确的数字来取代，但却能完美地描述现实存在的复杂系统。这就是普遍存在的语言的模糊性。

早在 20 世纪 20 年代，著名的哲学家和数学家 B. Russell 就写出了有关“模糊”的论文。他认为所有的自然语言均是模糊的，比如“年轻的”和“老的”等概念没有明确的内涵和外延，因而不明确的和模糊的。可是，在特定的环境中，人们用这些概念来描述某个具体对象时却又能心领神会，很少引起误解和歧义。美国伯克利加利福尼亚大学的 L. A. Zadeh 教授在 1965 年正式提出了“模糊”的概念和理论。模糊理论认为：在现实的物质世界中所遇到的许多客体，经常没有精确规定的界限。如：绵绵细雨、倾盆大雨等。模糊性是客观世界普遍存在的自然现象。模糊理论的提出，为认识充满模糊性的现实世界提供了一种有效的科学研究新方法，是科学方法论的一大飞跃。

在智能控制领域内，“模糊”理论用于描述不确定性系统的问题，尤其适用于传统方法难以解决的科学研究死角，然而又是现实存在的复杂系统。1974 年，英国的 E. H. Mamdani 首次用模糊逻辑和模糊推理实现了世界上第一个实验性的蒸汽机控制，并取得了比传统的直接数字控制算法更好的效果，从而宣告模糊控制的诞生。1980 年丹麦的 L. P. Holmblad 和 Ostergard 在水泥窑炉采用模糊控制并取得了成功，这是第一个商业化的有实际意义的模糊控制器。模糊理论在控制领域的成功应用使得越来越多的学者走入到模糊理论



的研究队伍中来，使得模糊理论逐渐走向成熟。

事实上，模糊理论应用最有效、最广泛的领域就是模糊控制，模糊控制在各领域出人意料地解决了传统控制理论无法解决的或难以解决的问题，并取得了一些令人信服的成效。

智能模糊控制是模糊控制与其他智能方法结合的产物，本书的核心内容是发展和应用智能模糊控制方法以解决复杂系统的控制问题。本书第一至二章重点对于模糊控制的基本概念和理论进行了描述。本书第三至五章介绍了变论域模糊控制的理论，讨论了基于三容水箱液位控制系统的变论域模糊控制方法的应用，接着分析总结了基于因素空间的智能控制方法。最后第六至七章给出了一些其他智能模糊控制的应用实例并对今后的发展进行了展望。

本书是在作者的博士学位论文的基础上撰写的。在此要感谢我的导师——北京师范大学李洪兴教授。李洪兴教授是模糊控制理论和应用领域的重要领军人物，他所研制的四级倒立摆是世界首次研究成功的典型范例，验证了智能模糊控制的控制精度。

本书详述了智能模糊控制理论和实际的应用实例，希望能对模糊控制方向的硕士、博士研究生以及准备步入该研究领域的人员给予一定的参考。

由于作者水平有限，本书可能有许多不妥或谬误之处，希望读者不吝赐教。



目 录

第一章 引言	(1)
1.1 控制的发展概况	(1)
1.2 模糊控制的理论和应用的发展与现状	(2)
1.3 模糊控制理论概述	(3)
1.4 基于因素空间的智能控制理论	(8)
1.5 液位控制实验系统发展的现状	(10)
1.6 本书的主要内容	(13)
第二章 模糊控制器的基本原理	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 经典集合论	(16)
2.3 模糊集合基础	(25)
2.4 模糊控制器的工作原理	(51)
2.5 小结	(72)
第三章 模糊控制在三容水箱液位控制系统中的应用	(73)
3.1 三容水箱液位控制系统结构以及功能模块	(73)
3.2 三容水箱液位控制系统的实验设计	(80)
3.3 三容水箱液位控制系统机理分析模型及其能控能观性分析	(90)
3.4 三容水箱液位控制系统几种建模仿真方法的比较与分析	(106)
第四章 变论域控制算法研究	(130)
4.1 变论域模糊控制的理论基础	(131)
4.2 变论域自适应模糊控制器概述	(138)
4.3 变论域伸缩因子的自适应机理以及优化	(140)



4.4	仿真研究	(145)
4.5	小结	(146)
第五章	基于因素空间的自适应 PID 控制算法	(147)
5.1	因素空间的理论概述	(147)
5.2	PID 控制器的机理以及影响控制器参数 选择的因素	(153)
5.3	基于因素空间理论的最优 P 控制器	(155)
5.4	基于因素空间理论的 PD 控制器	(158)
5.5	基于因素空间理论的 PI 控制器	(161)
5.6	小结	(164)
第六章	其他智能模糊控制应用实例	(166)
6.1	单级倒立摆	(166)
6.2	倒车实验	(175)
第七章	结论与展望	(180)
7.1	研究成果总结	(180)
7.2	几点收获	(181)
7.3	研究方向的展望	(182)
参考文献		(184)
附录一: Matlab 中的重要程序代码		(193)
附录二: 常见的模糊控制实现软件		(206)
后记		(216)



第一章 引言

1.1 控制的发展概况

纵观自动控制理论的发展,经历了由经典控制到现代控制理论的发展进程。从最初的频域分析到时域分析,对各种系统中被控对象的研究越来越深入,控制的方法也日趋丰富,控制的质量得到了很大程度的提高。

现代工业中的被控系统,常常具有高度复杂性、测量的不精确性、系统动力学特性的不确定性,并且人们对控制性能指标要求越来越高,基于精确模型的传统控制理论受到了严峻的挑战。近十年来,人工智能技术、计算机技术、神经网络理论、信息科学以及非线性科学等学科的迅速发展,促使广大科学工作者又在维纳控制论的思想指引下,在新的高度上进一步研究控制理论。20世纪70年代末开始的智能控制理论的研究与应用,是现代控制理论在深度上和广度上的开拓。智能控制理论以控制器作为研究重点,能够根据被控对象的动态过程特征自学习,自组织自身的控制模式,自适应地改变控制器的结构和自动调整参数,以获取最佳控制效果^[1]。

智能控制已经被广泛研究应用于工业、农业、服务业、军事航空等各个领域^[2-4]。近年来,随着人工智能技术和其他信息处理技术,尤其是信息论、系统论和控制论的发展,智能控制在控制机理和应用实践方面均取得了突破性的进展。模糊逻辑、神经网络与遗传算法相互融合,通过模拟人类思维方式和结构来设计用于解决复杂的各种非线性问题的控制策略,并已在各种实际工程项目中得到应用,取得了良好的效果。在理论研究取得进步的同时,国内外的研究者均意识到智能控制的研究不能只停留在计算仿真的层次上,



智能控制应该直接面向传统控制难以或无法解决的复杂的非线性系统，面向实际工程应用^[5]。

智能控制包括模糊控制、神经网络控制、专家控制、仿人智能等。模糊控制是目前应用最成功的智能控制方法，它也必将成为一种常规自动控制方法而被人们普遍接受。可以毫不夸张地说，最近10年是模糊控制很风光的10年^[6,7]。把模糊理论运用于非线性控制系统的研究已成为控制领域的前沿课题。

1.2 模糊控制的理论和应用的发展与现状

1965年，L. A. Zadeh 教授创立了模糊集合论，为描述和处理事物的模糊性和系统中的不确定性，为模拟人的模糊逻辑思维功能提供了强有力的工具。

1974年，英国 E. H. Mamdani 把模糊语言逻辑用于蒸汽机过程控制获得成功。

1977年，Ostergaard, Willaeyls 提出最优模糊控制理论，并成功应用于热交换器和水泥窑控制。

1979年，T. J. Procyk 发表了“语言自组织控制器”的研究成果论文，为自适应模糊控制研究奠定了基础。

1980年，Fokami, Mizumoto, Tong 等人提出模糊条件推理，并成功应用于废水处理。

1982年，汪培庄教授提出的解析描述的模糊控制规则的自调整方法，为自适应模糊控制提供了新途径^[8,9]。

1983年，Hirofa, Pedrycz 提出概率模糊集合；Yasunobu 提出预测模糊控制。

1985年，Takagi, Sugeno 提出 Takagi-Sugeno 型模糊系统，发展了用模糊集理论辨识系统模糊模型的语言化方法^[10]。

1985年，Tagai, Watanable 制作了第一款模糊芯片。

1988年，Dubois, Prade 提出模糊近似推理。



1992年,王立新教授提出模糊系统的通用逼近性,使得模糊控制器的应用范围得到了极大的扩展^[11]。

1993年,王立新教授提出稳定的模糊自适应控制器。

1995年,李洪兴教授首次提出:目前常用的模糊控制算法都可归结为某种插值方法^[12],它是对响应函数的逼近,相当于离散响应函数的拟合;模糊控制方法类似于数学物理问题中的有限元方法,是经典控制论和现代控制论的直接方法或数值方法。这样的理论为一类高精度自适应模糊控制器提供了理论基础。

1999年,李洪兴教授正式提出了可变论域(Variable Universe)思想,为自适应模糊控制提供了解决方案^[13,14],并基于模糊控制的插值形式给出了以变论域为手段的自适应模糊控制器^[15];2002年,采用变论域自适应模糊控制理论在实验室中成功实现了世界首例直线四级倒立摆的控制^[16];2003年,成功实现了平面三级倒立摆的控制。

模糊控制理论上的进步最终会给实际应用带来巨大的效益。模糊控制在工业过程、家用电器以及高技术领域的一系列成功应用,充分显示了模糊控制的巨大应用潜力。常见的应用有日本研制的模糊控制洗衣机、微波炉以及空调;美国也在大力推广模糊技术,用它控制喷气机引擎,节约家用电器用水和启动钢厂200吨重的轧钢机。另外,美国的航空与航天管理局也尝试把模糊技术用于太空和航空系统^[17]。除日本、美国以外,俄罗斯、法国、加拿大、英国等国家也在积极进行模糊技术的研究、推广和应用。国内也有许多学者积极尝试模糊控制算法,并将这种算法投入实际应用之中^[18-21]。

1.3 模糊控制理论概述

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的非线性智能控制,它已与神经网络、遗传算法以及混沌理论



等新学科相融合，正在显示出其巨大的应用潜力^[22,23]。它的核心部分为模糊控制器，在模糊控制系统中具有举足轻重的作用。

1.3.1 模糊控制器

模糊控制器的基本结构如图 1-1 所示。

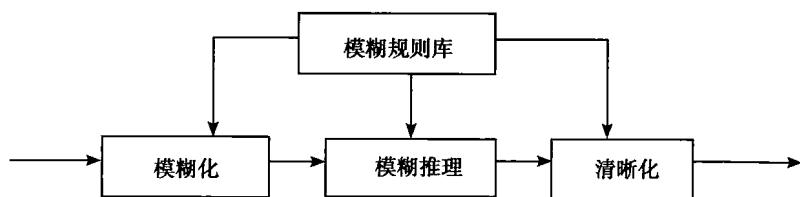


图 1-1 模糊控制器的基本结构

由图可见，模糊控制器主要由四个基本部分组成：模糊规则库、模糊化、模糊推理和清晰化。

1. 模糊化 (Fuzzification)

模糊化的作用是将输入的精确量转化为模糊量。首先选择合适的论域，即通过检测输入变量值的变化范围，确定相应的论域大小；然后将输入数据模糊化，将精确输入量转换成合适的语言值，如 {正大，正中，正小，零，负小，负中，负大}。也就是实现清晰的输入空间 $U \subset R^n$ 到定义在论域 U 上模糊集 A 的映射，定义在论域 U 上的模糊集 A 由隶属函数 $\mu_A: U \mapsto [0, 1]$ 来刻画。

2. 模糊规则库 (Knowledge Base)

模糊规则库是由条件语句和模糊语言变量组成，是运用模糊逻辑表达的一系列控制规则，该规则集反映了控制专家的经验 and 知识。规则的形式为“IF 规则前件，THEN 规则后件”。

3. 模糊推理 (Fuzzy Inference)

模糊推理具有模拟人运用模糊概念进行推理的能力。由于模糊控制的规则实际上是一组多重条件语句，可以表示为从输入变量论域到被控制量论域的模糊关系矩阵。模糊推理的作用就是从模糊规



则库中选出被输入激活的模糊规则，确定从输入空间模糊集到输出空间模糊集的映射。

4. 清晰化 (Defuzzification)

清晰化即反模糊化。是将模糊推理得到的被控量（模糊量）转化为能够应用于实际控制的精确量，包括以下两部分内容：

◇ 模糊的被控量经过反模糊化变换成表示在论域范围内的精确量。

◇ 将表示在论域内的精确量经过变换，成为实际的控制量。

模糊控制器遵从以上的原理和方法，借助于微机、单片机或者其他的数字系统实现模糊控制的目的。

模糊控制器的优势在于：

(1) 模糊控制便于利用操作人员的经验直接设计控制器，无须了解被控对象的精确数学模型，只要求有关对象的经验和知识；

(2) 对于不确定性系统，如随时间变化的以及非线性系统能有效地实施控制，对被控对象和过程有较强的鲁棒性；

(3) 由被控对象的定性认识出发，容易建立语言变量控制规则，控制的机理符合人们对控制作用的直观描述和思维逻辑；

(4) 从不同的观点出发，可以设计几个不同的模糊控制器，其语言控制规则分别独立，通过整个控制系统的协调，即可取得总体的最佳控制效果。

1.3.2 自适应的模糊控制

为了使模糊控制系统在出现不确定因素时仍能保持既定的特性，可以在模糊控制系统中引入自适应方法，组成自适应模糊控制系统^[24,25]。它包括直接型和间接型两种，前者是用模糊逻辑系统作为控制器语言性的模糊控制规则，可以直接应用于控制器；后者是用模糊推理方法来为被控对象建模，且假设模糊逻辑系统近似地等效于真实的被控对象，然后再针对这种模糊逻辑系统来实施控制。



1.3.2.1 直接型自适应模糊控制器

直接型模糊推理控制器的合理性、精确性,主要依赖于专家或操作人员的经验和知识,即规则总结的好坏。当然对那些时变的、非线性的复杂系统采用模糊控制时,为了获得良好的控制效果,必须要求模糊控制具有较完善的控制规则,这些控制规则是人们对被控过程认识的模糊信息的归纳和操作经验的总结。然而由于初始论域的设定一般不能十分精确,造成有些学者认为模糊控制器只能应用于控制精度要求不高的场合。为了弥补这个不足,自然就考虑到模糊控制器应向着自适应、自组织、自学习方向发展,使得模糊控制参数或/和规则在控制过程中自动地调整和完善,从而使系统的控制性能不断改善,达到最佳的控制效果。

变论域模糊控制是一种自适应在线改变模糊规则的方法,在控制器实施作用的初始阶段选用一个较为粗糙的初期模型,随着误差的减小,经过模糊控制器的自组织功能,在线修正模糊控制规则,完善系统性能,使其达到预期的要求。这种控制器的论域遵循一定的调节规律发生变化,随着误差的增加而放大,随着误差的减小而收缩。相当于在常规的模糊控制器中增加了系统识别和自调整控制器参数的功能,从而使得模糊控制器的控制精度大大提高。

那么如何在线修正模糊控制规则呢?实际应用中研究人员总结出两种方法:一种方法是利用伸缩因子修改论域的大小,即变论域模糊控制器;还有一种方法是修改非均匀分布的隶属函数的形状,即变分布模糊控制器。图1-2中列出了两种变论域自适应模糊控制器在跟随误差变化过程中隶属函数的变化。文献[26]已经证明这两种方法实际上是等价的。那么在实际应用中采用任意一种方法都可以取得类似的控制效果。

仿真实验表明,变论域自适应模糊控制器的控制效果非常好,尤其处理多变量非线性系统十分有效。变论域自适应模糊控制囊括了通常所说的模型自适应,规则自组织与自调整,隶属函数自生成等优点,极大地提高了控制品质,例如,它的精度很高,无震荡,



几乎无超调，其调整时间相当于常规模糊控制或经典控制的 $1/500 \sim 1/200$ ^[27]。

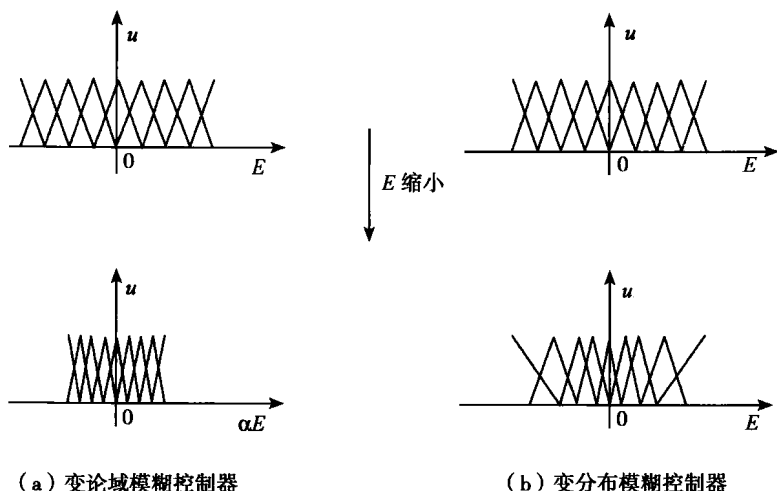


图 1-2 两类模糊控制器隶属函数的变化

目前有一些研究人员开始积极地将变论域控制理论投入到实际的复杂系统应用之中，例如：大连理工大学已经在内燃机车柴油机电控制系统中尝试使用了变论域的模糊控制器^[28]；上海大学机械自动化系统设计了非对称缸伺服系统的变论域模糊控制系统^[29]，但目前将变论域控制理论应用于大滞后，多变量，非线性而且变量之间强耦合的液位控制系统之中的工作还属于空白。

1.3.2.2 间接型自适应模糊控制器

模糊控制器在数学本质上是插值器。目前常用的模糊控制算法都可归结为某种插值方法，是对响应函数的逼近，相当于离散响应函数的拟合，对于一类比较复杂难以精确描述的系统，也可以尝试以模糊逻辑系统逼近真实系统的数学模型，然后对于该模糊逻辑系统进行控制。

将模糊推理机制施加于被控对象，即可得到描述该被控对象的



模糊逻辑系统。然后根据模糊逻辑系统的插值机理即可把模糊逻辑系统转变为一组微分方程（HX 方程）。

文献 [30] 根据模糊控制器的插值机理，讨论了二阶系统的自由运动（即输入 $u=0$ ）模型，得到了一元分片插值函数

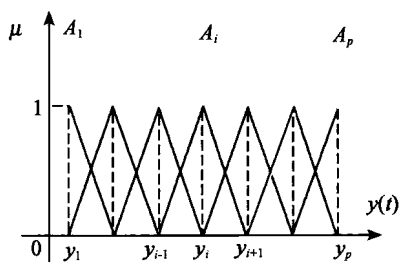
$$\dot{y}(t) = F(y(t), \dot{y}(t)) \triangleq \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(y(t)) B_j(\dot{y}(t)) \dot{y}_{ij} \quad (1-1)$$

其中， $A_i(y(t)) B_j(\dot{y}(t))$ 是一族方程的系数。然后选用三角波函数作为隶属函数，即可得到与实际二阶系统等价的一组非线性方程组。为了进一步分析系统的方便，文 [31] 选择矩形波作为隶属函数，并使用边缘线性化方法，也可以将模糊逻辑系统转变为一组线性微分方程。从集合的意义上看，即把模糊集的隶属函数换为清晰集的特征函数，可以使用三角波函数和矩形波函数；从插值的角度说，可以使用一次（即线性）插值基函数以及零次插值基函数。对于一阶不确定系统来说，利用三角波隶属函数也可以将模糊逻辑系统转变为一组线性微分方程，因而两种方法都可以选用；而对于高阶非线性不确定系统来说，矩形波作为隶属函数本质上是对于模型的形式进行了一定的简化。这两种方法在投入使用时，如果论域划分的足够精细，效果应该是类似的。图 1-3 中显示了三角波隶属函数和矩形波隶属函数的曲线表示。

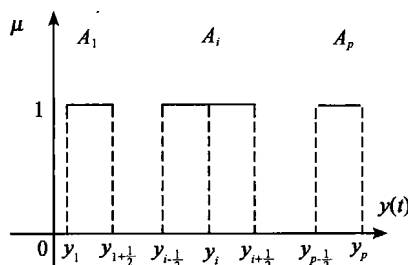
建立了模糊逻辑模型之后，即可以对于系统进行进一步的分析。

1.4 基于因素空间的智能控制理论

因素空间理论是建立在模糊数学基础上的描述概念的一种方法。最早是汪培庄先生在 20 世纪 80 年代提出了因素空间的思想^[32,33]，后来经李洪兴教授等人的发展，形成了一种比较完善的理论体系^[34-49]。



(a) 三角波隶属函数



(b) 矩形波隶属函数

图 1-3 两种模糊推理建模的常用隶属函数

因素是因素空间中最基本的概念，文献 [37] 中刻画了“因素”的含义，给出了因素空间的公理化定义，并进一步引入了表达概念的基本工具——描述架；文献 [38] 讨论了因素对概念的充分性问题；文 [39] 引入反馈外延这种表达概念的新工具；利用反馈外延，文 [41] 给出了反馈外延的 DFE 决策方法；接着，文 [42] 讨论了复杂因素状态合成的方法，提出综合函数的概念，并讨论了可加型综合函数的性质，给出了综合决策的数学模型。1995 年，文 [44] 提出了“变权”综合的问题，用以解决常权综合进行决策时的不合理现象，给出了变权的公理化定义，并讨论了均衡函数的概念；文 [45] 给出了激励型变权和混合型变权的公理化定义。专著 [50—52] 是因素空间基础理论的总结，标志着因素空间理论



的形成。

利用因素空间理论可以将测定的数值信息作为概念的表现外延,对于概念进行量化的描述,从而可以使用一系列数学方法处理多种复杂系统。例如故障诊断、预测与决策以及自适应控制等问题。目前有一些学者将这种理论应用于多因素决策,已经取得了较好的效果^[53-56];文[57—61]对于因素空间理论应用于数据挖掘进行了讨论;文[46, 62]对于因素空间理论应用于人工智能进行了研究。但由于这种理论抽象难懂,目前在解决复杂系统的控制中还少有应用。将因素空间理论引入智能控制领域,必将大大改善自适应控制器的控制效果。

1.5 液位控制实验系统发展的现状

智能控制理论的涉及面十分广泛,其实验项目是由领域内的专家教授经过精心挑选确定的,应包含智能控制理论的典型实验内容,又包含工业过程控制、计算机控制和机器人控制的部分内容,目前在实验室中比较常见的实验系统有以下三种。

1. 倒立摆控制系统

倒立摆系统被公认为是现代控制理论中的典型实验设备,是控制理论教学和科研中不可多得的典型物理模型,只有采取较高水平的控制方法才能使之稳定。图1-4是直线二级倒立摆系统。作为一个装置,它结构简单成本低廉,作为一个对象,相当复杂,是一个多变量,强耦合,高阶次,不稳定,非线性的快速系统。通过对倒立摆系统的研究可以解决控制理论和实践中的诸多问题。目前北京师范大学李洪兴教授在倒立摆控制方面已经设计了典型的实验并基于这种实验系统在控制理论方面取得了重大的进展,研制成功了世界第一个直线四级倒立摆以及平面三级倒立摆控制系统^[63,64]。

2. 双容水箱控制系统

双容水箱数控系统是典型的多输入,多输出过程计算机控制系