



电气工程系列丛书

THE APPLICATION
RESEARCH OF
INTELLIGENT NONLINEAR
CONTROL TECHNOLOGY

韩 霞 著

智能非线性
控制技术的应用研究

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP, 项目负责人: 朱锡芳, PPZY2015B129)、常州工学院 - “十三五” 江苏省重点学科项目 - 电气工程重点建设学科、2016 年度江苏省高校重点实验室建设项目 - 特种电机研究与应用重点建设实验室资助出版

韩 霞 著

智能非线性 控制技术的研究

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

智能非线性控制技术的研究 / 韩霞著. — 镇江:
江苏大学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5684-0698-7

I. ①智… II. ①韩… III. ①智能控制—非线性控制
系统—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 301741 号

智能非线性控制技术的研究

Zhineng Feixianxing Kongzhi Jishu De Yingyong Yanjiu

著 者/韩 霞

责任编辑/吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/4.25

字 数/158 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0698-7

定 价/28.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

随着科学技术的发展,现代工业系统变得越来越复杂,传统的控制方法已经远远不能满足高性能的要求。在此背景下,智能控制理论被提出并逐渐发展起来。模糊逻辑控制和神经网络是智能控制理论中十分活跃的分支,由两者有机结合的模糊神经网络(FNN)是一种能处理抽象信息的网络结构,具有强大的自学习和自整定功能。模糊控制和神经网络对于非线性、模型未知对象的控制往往具有较好的效果。本书对模糊逻辑控制和神经网络在非线对象中的应用展开研究,主要内容如下。

(1) 自适应模糊控制器在药剂温控系统中的应用研究。药剂温度控制系统具有纯时滞、大惯性、时变不确定性等特点,是工业生产中一类典型的控制对象,传统模糊控制对具有非线性、大时滞、强耦合等特性的被控对象控制效果并不理想。模糊逻辑控制器的设计核心是模糊控制规则和隶属度函数的确定,而传统的模糊逻辑控制器不具备对规则的自修正功能,因此模糊控制规则的自调整 and 自寻优是提高和改善模糊控制器性能的重要手段。通过构建带加权因子的自适应模糊控制器,根据误差 E 和误差的变化 CE 自动产生控制规则,利用实时修改加权因子 α 来达到修改控制规则的目的。仿真结果表明,带加权因子的自适应模糊控制器的性能优于传统模糊逻辑控制器。

(2) 神经网络 PID 控制器在药剂温控系统中的应用研究。常规的 PID 控制方法对药剂温控系统的控制效果不佳,本书尝试使用神经网络 PID 控制方法,通过 BP 算法对神经网络正模型权值进行调整,设计了神经网络辨识器对控制对象的数学模型进行辨识,降低系统输出温度的超调量,提高控制精度,加快调节过程,以此

获得良好的控制效果。

(3) 模糊神经网络(FNN)控制器的优化策略。针对 FNN 控制器一般存在在线调整权值计算量大、训练时间长、过度修正权值可能会导致系统剧烈振荡等缺点,本书提出了两种对 FNN 控制器进行优化的方法:① 在线自学习过程中,仅对控制性能影响大的控制规则所对应的权值进行修正,以减小计算量,加快训练速度。② 根据偏差及偏差变化率大小,基于 T-S 模糊模型动态自适应调节权值修正步长,抑制控制器输出的剧烈变化,避免系统发生剧烈振荡。

(4) 模糊神经网络滑模控制器在倒立摆中的应用。本书充分考虑了 FNN 的特点,将 FNN 和传统控制策略结合起来,设计了一种一类非线性对象的 FNN 自适应控制器:基于模糊基函数网络的间接型自适应控制器和基于 T-S 模糊模型神经网络的直接自适应控制器。本书首先用 FNN 完成对控制系统未知结构或参数的逼近,然后用传统的控制器设计方法进行系统设计,使系统满足一定的性能指标(例如稳定性),并且在系统设计过程中给出 FNN 参数的学习律,在线完成网络参数的调整。

(5) 本书指出了 FNN 理论及其在复杂系统应用中所存在的问题,并对下一步研究工作进行了展望。

由于作者水平有限,书中难免会有不足之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2017 年 9 月 10 日

目 录

第1章 绪 论 001

- 1.1 模糊逻辑控制和人工神经网络 001
 - 1.1.1 模糊逻辑控制的国内外研究概况 001
 - 1.1.2 人工神经网络的国内外研究概况 004
- 1.2 模糊神经网络 005
 - 1.2.1 模糊神经网络的发展和现状 005
 - 1.2.2 模糊神经网络的应用及存在的问题 006
- 1.3 本书的研究内容 008

第2章 模糊控制系统的工作原理 010

- 2.1 概 述 010
- 2.2 模糊控制系统的组成 011
- 2.3 模糊控制器的基本结构和组成 013
- 2.4 论域为离散时模糊控制的离线计算 022

第3章 神经网络控制器简介 029

- 3.1 神经网络的概述和结构 029
 - 3.1.1 神经网络简介 029
 - 3.1.2 神经网络研究的发展历史 031
- 3.2 神经网络的建模 032
 - 3.2.1 神经网络特征 033
 - 3.2.2 神经网络模型 033
- 3.3 神经网络的 BP 学习算法 035
- 3.4 神经网络控制系统的结构 037

第4章 智能非线性控制在药剂温控系统中的应用 039

- 4.1 温度控制系统概述 039
 - 4.1.1 系统描述 039
 - 4.1.2 控制要求 039
 - 4.1.3 数学模型分析 040
- 4.2 自适应模糊控制器在药剂温控系统中的应用 041
 - 4.2.1 常规模糊控制器性能分析 041
 - 4.2.2 自适应模糊控制器的设计 043
 - 4.2.3 利用梯度下降法对 α 自寻优 045
 - 4.2.4 自适应模糊控制器系统仿真分析 048
- 4.3 神经网络BP-PID控制器在药剂温控系统中的应用 051
 - 4.3.1 经典PID控制器的设计 051
 - 4.3.2 神经网络PID控制器的系统结构 052
 - 4.3.3 基于BP算法的神经网络PID控制器 053
 - 4.3.4 被控对象神经网络辨识器 056
 - 4.3.5 BP-PID控制器算法的步骤 058
 - 4.3.6 归一化的方法 059
- 4.4 仿真结果 059
 - 4.4.1 经典PID控制仿真结果 059
 - 4.4.2 BP-PID控制仿真结果 061
 - 4.4.3 仿真结果比较 062

第5章 模糊神经网络控制器的优化设计 063

- 5.1 模糊神经网络控制系统 063
 - 5.1.1 复杂过程的模糊神经网络控制结构 063
 - 5.1.2 模糊神经网络控制器的结构 064
 - 5.1.3 模糊神经网络控制器参数的学习算法 066
- 5.2 模糊神经网络控制器的优化 068
 - 5.2.1 FNN权值修正计算的优化 068
 - 5.2.2 基于T-S模型的FNC修正步长的动态优化 068

5.3 仿真研究 069

5.3.1 控制对象及控制目标 069

5.3.2 基于数值优化计算的 FNC 仿真 070

5.3.3 基于 T-S 模型修正步长动态优化的 FNC 仿真 071

第 6 章 智能非线性控制技术在倒立摆系统中的应用 073

6.1 基于模糊基函数网络的间接型稳定自适应控制器 074

6.1.1 自适应模糊控制 074

6.1.2 李亚普诺夫方法 076

6.1.3 模糊基函数 080

6.1.4 基于模糊基函数网络的间接型稳定自适应控制器的设计 081

6.1.5 系统结构 087

6.1.6 设计步骤和稳定性分析 089

6.1.7 仿真研究——倒立摆跟踪控制问题 092

6.2 基于模糊 T-S 神经网络的直接型稳定自适应控制器 098

6.2.1 T-S 模糊神经网络 098

6.2.2 基于 T-S 模糊神经网络的直接型稳定自适应控制器的设计 101

6.2.3 系统结构 105

6.2.4 设计步骤和稳定性分析 106

6.2.5 仿真研究 107

6.3 小 结 112

第 7 章 结论与展望 113

参考文献 116

附 录 123

第1章 绪论

1.1 模糊逻辑控制和人工神经网络

1.1.1 模糊逻辑控制的国内外研究概况

自1965年美国加州大学的Zadeh教授提出模糊集理论和1974年英国Mamdani教授首先将模糊逻辑和模糊推理应用于蒸汽机控制以来,模糊逻辑在系统建模和控制上都得到了广泛应用。目前,该理论在以下两方面应用最多也是最成功的:一是工业过程控制,如水厂水质净化控制、地铁车辆运行自动控制、汽车自动变速控制、染色配色系统、超净室恒温恒湿系统、化学反应罐温度控制等。二是模糊家电产品。20世纪80年代,日本开始把模糊技术用于家用电器,在全世界迅速掀起了模糊家用电器热潮。市场上陆续推出了模糊洗衣机、电冰箱、空调器、电烤箱、电饭锅、摄录一体机、电风扇、吸尘器、自动电话、衣物干燥机、自动热水器、电子炉灶等,不胜枚举。模糊控制技术使家用产品智能化程度大大提高,操作更加简便,性能得到改善,同时又有明显的节能效益。

1987年,日立公司将模糊控制技术成功地应用于仙台市地铁,使地铁启动和制动均极为平衡,再无冲撞之感,而且停车误差能精确到10 cm以内,模糊控制技术的知名度和声誉大增。日本就模糊技术的研究开发制订了长远规划,确定了6个重要发展课题。

① 基础研究:研究基本概念,模糊数学理论和方法,以确保应用开发的连续性。

② 模糊电脑:实现模糊信息的电脑处理,包括电脑的构造、逻

辑记忆和存贮等。

③ 机器智能:实现模糊信息处理,使机器能高速地识别和判断模糊信息,包括智能控制、机器人、通信处理和模式识别等。

④ 人机系统:实现人机系统,包括模糊数据库、模糊专家系统和自然语言处理技术。

⑤ 人与社会系统:主要进行复杂的人类行为分析,包括决策支持系统、医疗诊断系统、行为心理透视系统及社会经济模型。

⑥ 自然系统:研究模拟和理解自然现象,包括辨别物理变化和化学变化、判断大气污染状况、进行地震预测和经济系统分析。

由于美国的半导体技术、软件设计和单片机技术等方面具有优势,这为模糊控制技术在军事工程方面的应用打下了基础,并使相关高新科技成为美国 90 年代军事工程中的热点之一。美国已将它用于信息工程、图像识别、人工智能、空间飞行、卫星与导弹的控制等系统,并取得了显著的效果。模糊技术在地震预报、心理学和金融等领域也得到成功的应用。如证券公司应用“模糊”逻辑买卖证券和股票,可以在错综复杂、瞬息万变的市場条件下,像最有经验的行家一样,指导人们何时买入、何时抛出等。从 1995 年到 1997 年,美国的电力部门拨款 120 万美元资助美国电网的模糊神经元网络控制系统的开发。另外,智能汽车高速公路运行系统、金融管理系统研究计划也在实施之中。

我国在模糊控制技术的理论和实践两方面也都有了长足的发展。国家经贸委于 1994 年所立的国家重大技术项目“模糊控制技术的开发与应用”中特别包含了一个子项目——模糊控制技术标准化。这个项目由国家技术监督局标准化司直接承担并负责组织实施,迄今已取得了重大进展。

综上所述,模糊控制是通过归纳操作人员的控制策略,运用语言变量和模糊集合理论构造控制算法的一种控制。模糊控制不依赖被控对象精确的数学模型,只要求把现场操作人员的经验和数据结构总结成较完善的语言控制规则,因此它适用于非线性、时变、滞后系统的控制。

模糊控制的基本思想是把操作人员或专家对特定的被控对象或过程的控制策略总结成一系列以 IF(条件) - THEN(作用)形式表示的控制规则,通过模糊推理得到控制作用。模糊控制算法主要包括:

- ① 定义模糊变量和模糊子集。
- ② 基本论域变换为模糊论域。
- ③ 建立模糊控制规则。
- ④ 模糊推理合成,求出控制输出模糊子集。
- ⑤ 进行逆模糊运算,得到精确控制量。

模糊控制与常规控制方法相比主要有以下优点:

① 模糊控制完全是在操作人员控制经验的基础上实现对系统的控制,不依赖被控对象精确数学模型,是解决不确定系统控制的一种有效途径。

② 模糊控制具有较强的鲁棒性,被控对象的参数变化对模糊控制的影响不明显,可用于非线性、时变系统的控制。

③ 控制的机理符合人们对过程控制作用的直观描述和思维逻辑,便于人机智能的结合。

尽管模糊控制和模糊建模方法在实际应用中取得了很大发展,但仍然存在许多问题,模糊控制的主要缺点是:

① 模糊控制的核心是模糊规则库,建立复杂系统完善的模糊控制规则和隶属函数是非常困难的。

② 模糊控制的规则库往往非常庞大,难以找出规则与规则之间的关系。

信息简单的模糊处理将导致系统控制精度降低和动态品质变差,通常采用增加量化级数来提高控制精度,从而导致规则搜索范围扩大,降低决策速度,甚至不能进行实时控制。另外,模糊规则库一旦建立,很难进行修改,即很难实现规则的自学习和自适应。

③ 模糊逻辑控制器的设计缺乏系统性,且论域的选择、模糊集的定义、量化因子的选取等多采用试凑法,从而复杂系统的模糊控制器设计通常非常困难。

目前,模糊控制理论的研究方向主要有以下 3 个方面:

① 如何将常规控制理论和概念推广到模糊控制系统。

② 如何将模糊逻辑与神经网络相结合,以使模糊控制器具有自学习功能。

③ 模糊建模与辨识、模糊最优控制、模糊自组织控制、模糊自适应控制及传统 PID 与模糊控制相结合的多模态模糊控制器等。

1. 1. 2 人工神经网络的国内外研究概况

神经网络的研究始于 20 世纪 40 年代,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 合作提出了兴奋与抑制神经元模型,Hebb 提出了神经元连接强度修改规则,他们的研究成果至今仍是许多神经网络模型研究的基础。五六十年代,神经网络研究的代表作是 Rosenblatt 的感知机。1969 年, Minsky 和 Papert 合作出版了颇有影响的 *Perceptron* 一书,得出了消极悲观的论点。70 年代,人工神经网络的研究处于低潮。1982 年,英国物理学家 J. J. Hopfield 提出了一种全连接神经网络——Hopfield 网络模型,并成功解决了复杂系统的非线性寻优问题。1986 年, D. E. Rumelhart 和 J. L. McClelland 等人提出了多层前馈网络的反向传播算法 (Back - Propagation), 也称 BP 算法,该算法成为最成功的神经网络学习算法,极大地促进了神经网络的应用和发展。1988 年, Broomhead 等人首次将径向基函数 (RBF) 应用于网络设计,从而构成了 RBF 神经网络。Hopfield 等人在神经网络领域取得的这些突破性进展,再次掀起了研究神经网络的研究热潮。从人脑的生理结构出发来研究人的智能行为,模拟人脑信息处理的功能,是人工神经网络的研究目的。它虽然反映了人脑功能的基本特性,但远不是自然神经网络的逼真描写,而只是它的某种简化抽象和模拟。

目前神经网络已在许多领域得到了广泛的应用,人工神经网络的以下突出优点引起了人们的极大关注:

① 可以充分逼近任意复杂的非线性关系。

② 所有定量或定性的信息都等势分布并贮存于各神经元,故有很强的鲁棒性和容错性。

- ③ 采用并行分布处理方法,使得快速进行大量运算成为可能。
- ④ 可学习和自适应模型未知或不确定的系统。
- ⑤ 能够同时处理定量、定性知识。

神经网络在控制中的应用是一个非常活跃的研究领域,但是神经网络研究的理论体系尚不完善,还存在许多问题需要解决:

① 由于神经网络的高度非线性,使得整个控制系统从数学上进行稳定性与收敛性的证明仍比较困难,需要寻求有效的分析手段。

② 由于神经网络的学习速度一般都比较慢,学习时间长,容易陷于局部极小。为满足实时控制的要求,必须研究快速的学习算法。

③ 神经网络尚缺乏系统化的设计方法。

④ 缺乏比较适合控制系统的网络结构和灵活的智能神经元。

1.2 模糊神经网络

1.2.1 模糊神经网络的发展和现状

模糊控制不依赖被控对象精确的数学模型,而是根据人工控制规则组织控制决策表,然后由控制决策表决定控制量的大小。但是建立复杂系统的控制规则是比较困难的,即使建立起了控制规则,由于工业被控对象的参数通常具有时变性,所以控制效果常常不能令人满意。

神经网络可以逼近任意复杂的非线性关系,并具有强大的学习能力、记忆能力、计算能力,在不同程度和层次上模仿人脑神经网络的信息处理、存储和检索功能,但是神经网络结构一般比较复杂,网络训练计算量大,现有学习算法的收敛速度低,而且网络设计缺乏理论指导。

1993年Jang在文献中提出了基于网络结构的模糊推理的概念,并设计了网络结构模型,这种网络结构便是模糊神经网络(FNN)的雏形。之后,研究人员设计了多种FNN结构和学习算

法。例如,将 Mamdani 模糊模型和多层前向网络(BP 网)相结合,构成标准型 FNN,这种网络结构简单,物理意义明确。王立新证明了该网络的万能逼近能力,使该网络在系统控制和辨识上都得到了广泛应用。将 T-S 模糊模型与多层前向网络结合构成的 T-S 型 FNN 在系统建模上有特殊的优势。结合 RBF 网络结构和特点,王立新提出了模糊基函数的概念,建立了模糊基函数网络模型。这种网络模型类似于 RBF 网络,网络输出与可调参数之间是线性关系,简化了参数的学习过程,实时性强。本书将在第 6 章对此进行详细介绍。

尽管各种 FNN 的结构和学习算法各具千秋,但是它们都有一个共同特点,即能有效利用语言信息又具有强大的自学习和自适应能力,并且网络参数具有较为明确的物理意义,有助于对实际系统的理解和分析。

目前 FNN 的研究热点有:

- ① 当对象未知或对象过于复杂而无法建立精确的模型时,如何利用 FNN 来辨识模型。这种方法需要较多的数据,运算效率比较低,还有待优化。
- ② 如何利用神经网络来自动生成模糊规则、隶属函数等。
- ③ 如何利用合适的算法对网络进行训练,提高运算效率。
- ④ 如何根据特定问题来确定网络的拓扑结构及函数逼近形式。

1.2.2 模糊神经网络的应用及存在的问题

1993 年,FNN 概念的提出引起了许多研究者的关注,并很快便成为智能控制研究领域的一个十分活跃的分支。目前,FNN 主要用于复杂系统的辨识、建模及控制。

1. FNN 在复杂系统辨识中的应用

与神经网络一样,FNN 是一种本质非线性模型,易于表达非线性系统动态特性,而且理论上已经证明了 FNN 可以作为万能逼近器,可以以任意精度逼近连续非线性系统,因此 FNN 建模和辨识方法被认为是复杂系统辨识的一种可行的方法。

2. FNN 在复杂系统控制中的应用

下面给出几种典型的 FNN 控制方案。

(1) FNN 监督控制

对某些复杂系统,采用传统的控制器很难实现对其良好的控制,而操作人员却能很好地控制系统。在这种情况下,可以考虑采用 FNN 控制器代替人工控制。这种通过对人工或传统控制器进行学习,然后用 FNN 控制取代或逐渐取代原控制的方法,称为 FNN 监督控制,系统结构如图 1-1 所示。

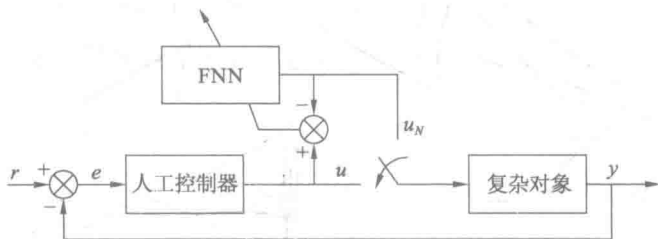


图 1-1 FNN 监督控制结构图

(2) FNN 复合控制器

将 FNN 控制策略与其他控制策略(例如, PID 控制、最优控制、滑模变结构控制等)相结合,构成 FNN 复合控制器(见图 1-2)。这种控制器可以充分利用常规控制策略成熟的设计方法,还可以利用 FNN 来智能补偿。

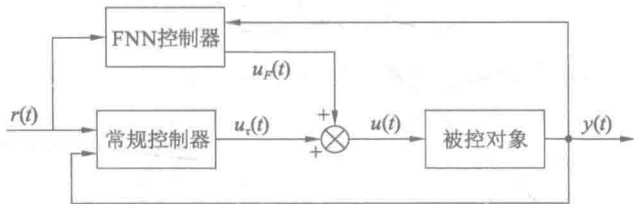


图 1-2 FNN 复合控制器结构图

3. FNN 存在的问题

虽然 FNN 在复杂系统控制和建模等应用中已取得了很大的成功,但是作为一门新技术,它在理论和应用中仍然存在一些问题:

① 有关网络中包含的模糊知识的获取方法。从众多纷繁复杂的规则中选取若干能有效反映对象特性的模糊规则仍然没有一个通用、有效的方法。

② 存在模型复杂性与模型泛化能力之间的矛盾,即 FNN 的结构优化问题还远没有解决。

③ FNN 控制系统的稳定性分析还处于起步阶段。

④ FNN 模型结构的确定,网络中模糊化层和模糊推理层节点个数的选取及模糊合成和推理算法的选取及反模糊化问题的计算方法等,至今在理论界还存在争议。

⑤ 如何将 FNN 与传统控制策略有效地结合是目前亟待解决的问题。

1.3 本书的研究内容

随着科学技术的发展,现代工业系统变得越来越复杂,传统的控制方法已经远远不能满足高性能的要求。在此背景下,智能控制理论被提出并逐渐发展起来。模糊逻辑控制和神经网络是智能控制理论中十分活跃的分支,由两者有机结合的模糊神经网络(FNN)是一种能处理抽象信息的网络结构,具有强大的自学习和自整定功能。模糊控制和神经网络对于非线性、模型未知对象的控制往往具有较好的效果。本书对模糊逻辑控制和神经网络在非线对象中的应用展开研究,主要内容如下:

(1) 自适应模糊控制器在药剂温控系统中的应用研究。药剂温度控制系统具有纯时滞、大惯性、时变不确定性等特点,是工业生产中一类典型的控制对象,传统模糊控制对具有非线性、大时滞、强耦合等特性的被控对象控制效果并不理想。模糊逻辑控制器的设计核心是模糊控制规则和隶属度函数的确定,而传统的模糊逻辑控制器不具备对规则的自修正功能,因此模糊控制规则的自调整 and 自寻优是提高和改善模糊控制器性能的重要手段。通过构建带加权因子的自适应模糊控制器,根据误差 E 和误差的变化

CE 自动产生控制规则,利用实时修改加权因子 α 来达到修改控制规则的目的。仿真结果表明,带加权因子的自适应模糊控制器的性能优于传统模糊逻辑控制器。

(2) 神经网络 PID 控制器在药剂温控系统中的应用研究。常规的 PID 控制方法对药剂温控系统的控制效果不佳,本书尝试使用神经网络 PID 控制方法,通过 BP 算法对神经网络正模型权值进行调整,设计了神经网络辨识器对控制对象的数学模型进行辨识,降低系统输出温度的超调量,提高控制精度,加快调节过程,以此获得良好的控制效果。

(3) 模糊神经网络(FNN)控制器的优化策略。针对 FNN 控制器一般存在在线调整权值计算量大、训练时间长、过度修正权值可能会导致系统剧烈振荡等缺点,本书提出了两种对 FNN 控制器进行优化的方法:① 在线自学习过程中,仅对控制性能影响大的控制规则所对应的权值进行修正,以减小计算量,加快训练速度。② 根据偏差及偏差变化率大小,基于 T-S 模糊模型动态自适应调节权值修正步长,抑制控制器输出的剧烈变化,避免系统发生剧烈振荡。

(4) 模糊神经网络滑模控制器在倒立摆中的应用。本书充分考虑了 FNN 的特点,将 FNN 和传统控制策略结合起来,设计了两种一类非线性对象的 FNN 自适应控制器:基于模糊基函数网络的间接型自适应控制器和基于 T-S 模糊模型神经网络的直接自适应控制器。本书首先用 FNN 完成对控制系统未知结构或参数的逼近,然后用传统的控制器设计方法进行系统设计,使系统满足一定的性能指标(例如稳定性),并且在系统设计过程中给出 FNN 参数的学习律,在线完成网络参数的调整。

(5) 最后,指出了 FNN 理论及其在复杂系统应用中所存在的问题,并对下一步研究工作进行展望。