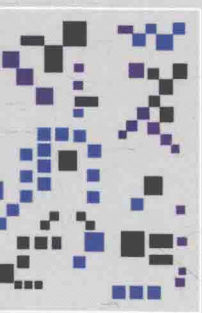
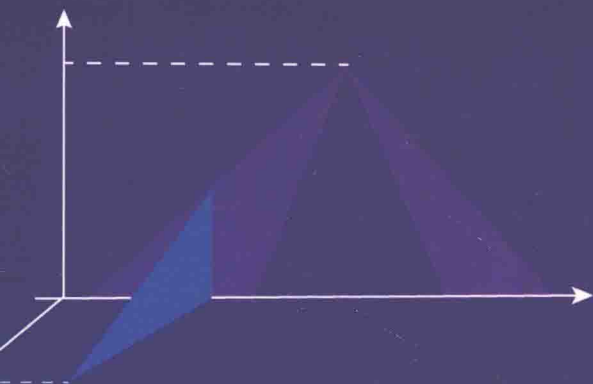


KNOWLEDGE AND DATA DRIVEN
TYPE-2 FUZZY METHODS WITH APPLICATIONS



知识与数据驱动的二型模糊方法及应用

李成栋 易建强 张桂青 任伟娜 著



科学出版社

知识与数据驱动的二型模糊 方法及应用

李成栋 易建强 著
张桂青 任伟娜

科学出版社

北 京

内 容 简 介

数据驱动方法是解决复杂生产过程、设备等研究对象建模与控制问题的有效途径,正在形成其特有的研究体系与内容。本书大部分内容是作者近期的研究成果,探讨了知识与数据混合驱动的二型模糊方法及应用。本书主要涉及数据驱动二型模糊集合模型的构建、数据驱动二型模糊系统设计、知识在二型模糊系统中的嵌入、知识与数据驱动二型模糊系统设计、知识驱动二型模糊控制器设计、数据驱动二型模糊神经网络设计、知识与数据混合驱动二型模糊神经网络设计等方面的内容。本书在理论方面为数据驱动、二型模糊等研究提供了新思路,在应用方面为处理建模与控制问题中的各类不确定性、改善建模精度与控制效果提供了一种新的有效工具。

本书可供自动化、计算机、数据科学等相关领域与专业的研究人员、教师、研究生、高年级本科生阅读,也可供相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

知识与数据驱动的二型模糊方法及应用/李成栋等著. —北京:科学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-03-052477-5

I. ①知… II. ①李… III. ①模糊控制—自动控制系统 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 069806 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年5月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:237 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

对于很多复杂生产过程和设备而言,建立精确机理模型是很困难的,但这些复杂研究对象每天都在产生大量的数据。目前,通过数据驱动方法,有效利用大量的离线、在线数据,实现对复杂生产过程和设备的建模、优化与控制已成为一大研究热点,其理论、方法及应用日益受到重视。特别是近年来随着数据规模与类型的急剧增大,大数据已经上升为国家战略,国务院与工业和信息化部先后出台了《促进大数据发展行动纲要》和《大数据产业发展规划(2016—2020年)》。因此,数据驱动方法研究既符合科学研究发展要求,同时对相关行业经济发展具有推动作用。

另外,虽然我们拥有海量数据,但数据质量有时却不尽人意,从而使得所构建的数据模型性能受限。为了解决这一问题,可以考虑两种途径:其一是充分利用知识来增加有用信息;其二是采用性能好的建模与控制方法,而二型模糊方法便提供了这样一种工具。当采用二型模糊方法进行系统建模及控制时,在基于数据的同时充分利用各类知识,将有助于提高所构建模型的性能,取得更好的效果。

本书大部分内容是作者近期在国家自然科学基金(61473176、61105077、60975060、61573225)、山东省属高校优秀青年人才联合基金(ZR2015JL021)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012DX026)等项目资助下对取得的研究成果进一步加工、深化而成的,是对已有成果的全面总结。

作者的这些成果拓宽了数据驱动、二型模糊等理论与方法研究的思路,提高了采用数据驱动及二型模糊方法解决实际问题的能力,有利于处理实际建模与控制问题中的各类不确定性,改善建模精度与控制效果。

本书主要涉及知识与数据驱动的二型模糊方法及应用。在理论及方法方面,将主要探讨数据驱动的二型模糊方法、知识在二型模糊系统中的嵌入、知识与数据驱动的二型模糊方法;在应用方面,将所给出的相关方法应用于建模、辨识、预测、控制等实际问题中。本书共10章。第1章综述二型模糊方法及应用研究进展。第2章对二型模糊集合的基本概念与运算、二型模糊系统及其推理过程给出详细的介绍和总结,为后面几章提供统一的理论框架。第3章和第4章探讨数据驱动二型模糊集合的构建方法,分别给出基于不确定度的数据驱动二型模糊集合构建策略和基于集成方法的数据驱动二型模糊集合构建策略。第5章给出一种数据驱动的二型模糊系统快速设计方法。第6章探讨如何在二型模糊系统中嵌入有界性、对称性、单调性等知识,给出嵌入相关知识时二型模糊系统前件参数与后

件参数应满足的条件,为后续设计嵌入知识的二型模糊系统提供保证。第7章给出知识与数据驱动下二型模糊系统的构建方法。第8章研究基于知识的单输入规则模块连接二型模糊控制器的系统化设计问题。第9章探讨数据驱动二型模糊神经网络设计及其在建模和控制问题中的应用。第10章研究知识与数据驱动的二型模糊神经网络设计,给出基于惩罚函数法的约束参数优化算法,并在舒适性指标预测问题上进行应用。

在本书的撰写过程中,参考了大量国内外相关研究成果,这些成果是本书学术思想的重要源泉,在此衷心感谢所涉及的专家与研究人员。辽宁工业大学王铁超教授对本书进行了认真审阅,并提出了许多中肯的建议与意见。硕士研究生王丽、丁子祥、颜秉洋在本书编辑、修改、图形绘制等方面付出了辛勤的汗水。同时科学出版社的编辑为本书出版做了大量辛苦而细致的工作,在此一并表示感谢。

另外,知识与数据驱动二型模糊方法研究是比较新颖的多学科交叉方向,由于作者的学识水平限制,书中不妥之处,敬请同行专家和读者批评指正。

作 者

2017年3月

目 录

前言

第 1 章 二型模糊方法及应用研究进展	1
1.1 引言	1
1.2 二型模糊基本理论与性质研究	2
1.2.1 二型模糊集合及其运算研究	2
1.2.2 二型模糊系统结构及推理研究	2
1.2.3 二型模糊系统基本性质研究	3
1.3 基于二型模糊集合的词计算研究	4
1.3.1 基于二型模糊集合的感知计算研究	4
1.3.2 基于二型模糊集合的语言动力系统研究	5
1.4 二型模糊系统设计研究	6
1.4.1 二型模糊聚类方法研究	6
1.4.2 二型模糊神经网络方法研究	7
1.4.3 二型模糊系统的进化优化方法研究	8
1.5 二型模糊控制研究	8
1.5.1 二型模糊控制方法研究	8
1.5.2 二型模糊控制应用研究	10
1.6 本书简介	10
参考文献	12
第 2 章 二型模糊集合与二型模糊系统	22
2.1 引言	22
2.2 二型模糊集合的定义与运算	22
2.2.1 二型模糊集合的定义	22
2.2.2 二型模糊集合的运算	23
2.3 二型模糊系统	24
2.3.1 一般二型模糊系统	24
2.3.2 区间二型模糊系统	27
2.4 本章小结	30
参考文献	31
第 3 章 基于不确定度的数据驱动二型模糊集合构建	33

3.1	引言	33
3.2	二型模糊集合的不确定度	34
3.2.1	对称二型模糊集合	34
3.2.2	二型模糊集合的截集	34
3.2.3	二型模糊集合的不确定度及其性质	36
3.3	典型二型模糊集合不确定度的计算	38
3.3.1	高斯二型模糊集合	38
3.3.2	梯形二型模糊集合	38
3.4	基于不确定度的二型模糊集合构建	40
3.4.1	区间数据预处理	40
3.4.2	区间数据统计量及不确定度的计算	42
3.4.3	二型模糊集合待定参数满足的方程	43
3.4.4	二型模糊集合参数的确定	45
3.5	在热感觉建模中的应用	46
3.5.1	数据获取及预处理	46
3.5.2	热感觉语言词二型模糊集合模型	47
3.6	在舒适性偏好建模中的应用	49
3.6.1	舒适性偏好建模步骤	50
3.6.2	传感数据采集	51
3.6.3	区间数据获取及预处理	51
3.6.4	舒适性偏好二型模糊集合模型	53
3.7	本章小结	54
	参考文献	54
第4章	基于集成方法的数据驱动二型模糊集合构建	56
4.1	引言	56
4.2	相关知识	56
4.2.1	采用的模糊集合	56
4.2.2	一型模糊集合的含糊度	57
4.3	基于集成方法的二型模糊集合数据驱动建模	58
4.3.1	二型模糊集合建模总体方案	58
4.3.2	代表性一型模糊集合的构建	58
4.3.3	一型模糊集合的集成	61
4.3.4	数据驱动的二型模糊集合构建流程	63
4.4	在热感觉建模中的应用	63
4.5	本章小结	65
	参考文献	65

第5章 数据驱动的二型模糊系统快速设计方法	67
5.1 引言	67
5.2 相关知识	68
5.3 二型模糊系统的数据驱动设计	69
5.3.1 总体方案	69
5.3.2 输入论域的一型模糊划分	69
5.3.3 一型模糊系统的优化	70
5.3.4 基于集成策略的二型模糊划分	71
5.3.5 规则后件参数的最小二乘优化	73
5.4 仿真与比较	74
5.4.1 混沌 Mackey-Glass 时间序列预测	75
5.4.2 二阶时变系统辨识	76
5.4.3 非线性模型辨识	78
5.4.4 风速预测	78
5.5 本章小结	80
参考文献	80
第6章 知识在二型模糊系统中的嵌入	84
6.1 引言	84
6.2 相关知识	84
6.2.1 用到的模糊集合	84
6.2.2 讨论的模糊系统	86
6.3 输入输出有界性知识的嵌入	90
6.4 奇偶对称性知识的嵌入	91
6.5 单调性知识的嵌入	94
6.5.1 问题描述与定义	94
6.5.2 单调性条件	95
6.5.3 规则前件中的模糊集合需满足的单调性条件	98
6.5.4 举例	107
6.5.5 进一步的讨论	113
6.6 本章小结	114
参考文献	114
第7章 知识与数据驱动二型模糊系统构建	116
7.1 引言	116
7.2 总体方案	116
7.3 优化问题中的线性约束条件	118
7.3.1 单输入情况	118

7.3.2	两输入情况	120
7.4	在单输入问题中的应用	121
7.4.1	问题描述	121
7.4.2	仿真结果	122
7.4.3	辨识结果举例	125
7.4.4	比较与讨论	125
7.5	在两输入问题中的应用	126
7.5.1	问题描述	126
7.5.2	仿真设定	127
7.5.3	仿真结果	127
7.6	本章小结	129
	参考文献	130
第 8 章	基于知识的单输入规则模块连接二型模糊控制器设计	131
8.1	引言	131
8.2	单输入规则模块连接模糊控制器	131
8.3	知识驱动单输入规则模块连接模糊控制器设计	133
8.3.1	奇对称性	133
8.3.2	单调性	134
8.3.3	闭环系统的局部稳定性	134
8.4	仿真试验	136
8.4.1	倒立摆系统	136
8.4.2	倒立摆控制器设计	137
8.5	本章小结	139
	参考文献	139
第 9 章	数据驱动二型模糊神经网络设计及其应用	141
9.1	引言	141
9.2	基于 KM 方法的二型模糊神经网络	141
9.3	二型模糊神经网络的学习算法	143
9.3.1	反向传播算法	144
9.3.2	混合学习算法	147
9.4	在系统辨识中的应用	149
9.4.1	问题描述	149
9.4.2	仿真设定	149
9.4.3	仿真结果	150
9.5	基于二型模糊神经网络的水箱液位直接自适应控制	152
9.5.1	二型模糊神经网络直接自适应控制器	152

9.5.2	多容水箱液位控制模型	153
9.5.3	多容水箱液位控制结果	155
9.6	在水平调节吊具系统中的应用	157
9.6.1	问题描述	157
9.6.2	水平调节吊具系统二型模糊神经逆控制器	158
9.6.3	实验结果	160
9.7	本章小结	161
	参考文献	162
第 10 章	知识与数据驱动的二型模糊神经网络设计	164
10.1	引言	164
10.2	基于 BMM 方法的二型模糊神经网络	164
10.3	单调二型模糊神经网络参数学习	166
10.3.1	单调二型模糊神经网络条件	166
10.3.2	单调二型模糊神经网络参数学习方案	167
10.3.3	单调二型模糊神经网络参数初始化	167
10.3.4	单调二型模糊神经网络参数学习的最速下降法	168
10.4	在舒适性指标预测中的应用	171
10.4.1	问题描述	171
10.4.2	仿真设定	172
10.4.3	仿真结果	173
10.5	本章小结	175
	参考文献	176

第1章 二型模糊方法及应用研究进展

1.1 引言

自1965年Zadeh^[1]提出模糊集合以来,模糊系统理论及其应用得到了迅速发展。模糊系统方法应用的领域相当广泛,从控制、信号处理、通信到商业专家系统、医药等。尽管得到了广泛应用,但在处理各种实际系统的不确定性上,传统模糊系统方法有一定的局限与不足,因为传统模糊系统方法是基于经典模糊集合的,而这些模糊集合通过精确的隶属函数来刻画,一旦隶属函数确定,在推理过程中各种不确定性就会消失^[2,3]。而在现实世界中,不确定性广泛存在,包括如下几项^[2,3]。

(1)模糊系统输入的不确定性。主要体现在含有较强噪声干扰的输入数据或者由传感器输入的存在误差的测量数据。传感器的老化或者运行环境的变化等使得这一现象不可避免。

(2)模糊规则的不确定性。在模糊规则设计过程中,不同的专家可能给出不同的模糊规则,从而设计出的模糊系统是不一样的。

(3)训练数据的不确定性。在实际应用中,用来设计、调节、优化模糊系统的数据几乎不可避免地含有噪声,而关于这些噪声分布状态的知识通常是未知的。

(4)对语言词理解的不确定性。模糊集合代表的是语言词,但对自然语言的理解存在着很大的不确定性。对于同一个语言词,不同的人有不同的理解,同一个人的理解也可能随时间的变化而有所改变。

为了更好地处理这些不确定性,可行的方法之一是进一步增强系统方法的模糊性。1975年,在文献[4]~文献[6]中,Zadeh将模糊集合的隶属度由精确值扩展为模糊集合,来进一步增强模糊性,从而提出了二型模糊集合的概念,以期能更好地刻画及处理各种不确定性。为了区分,称隶属度是精确值的经典模糊集合为一型模糊集合(Type-1 Fuzzy Set),称隶属度是一型模糊集合的模糊集合为二型模糊集合(Type-2 Fuzzy Set),完全采用一型模糊集合的模糊系统称为一型模糊系统(Type-1 Fuzzy Logic System),而部分或全部使用二型模糊集合的模糊系统称为二型模糊系统(Type-2 Fuzzy Logic System)。

近年来,与二型模糊系统理论相关的研究发展迅速,并已在多个领域获得了应用。同样,目前二型模糊系统理论应用最有效、最广泛的领域仍为建模与控制领域。作为一型模糊系统的一种改进,二型模糊系统不但能够有效地刻画复杂、

非线性、不精确系统，而且在处理系统不确定性、减少模糊规则数目、抗干扰等方面都具有明显的优越性。2000 年以来，多个国际著名期刊组织了二型模糊专题 (Special Issue)，如 *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*、*IEEE Computational Intelligence Magazine*、*Information Sciences*、*International Journal of Fuzzy Systems* 等，同时在 WCCI 2008、FUZZ-IEEE 2009、WCCI 2010、FUZZ-IEEE2011、WCCI2012、NAFIPS2012、FUZZ-IEEE2013、ICICIC2013、NAFIPS2013 等多个国际学术会议上都召开了二型模糊系统理论与应用方面的专题学术讨论。在国际上，二型模糊系统理论及其应用研究正逐渐成为一大热点，其重要性日益受到重视。

尽管研究结果证实二型模糊系统具有比一型模糊系统更优越的性能，但到目前为止，对二型模糊系统理论及其应用的研究都远没有对一型模糊系统理论及其应用的研究深入。本章将从四个方面回顾二型模糊方法的发展状况，包括二型模糊基本理论与性质研究、基于二型模糊集合的词计算研究、二型模糊系统设计研究、二型模糊控制研究。

1.2 二型模糊基本理论与性质研究

1.2.1 二型模糊集合及其运算研究

Zadeh^[4-6]最早于 1975 年将普通模糊集合(一型模糊集合)的概念进行了扩展，提出了具有更多参数能更好地刻画不确定性的二型模糊集合的概念。

随后，Mizumoto 和 Tanaka^[7,8]深入研究了二型模糊集合的性质并探讨了二型模糊集合在代数积 (Algebraic Product) 与代数和 (Algebraic Sum) 算子下的运算。Nieminen^[9]更详细地研究了二型模糊集合的代数结构。Dubois 和 Prade^[10,11]讨论了模糊值逻辑，并将一型模糊关系的 sup-star 合成运算推广到二型模糊关系的合成运算。此后，二型模糊理论及其应用一直发展缓慢，直到 20 世纪 90 年代左右，相关的研究又开始受到重视。

20 世纪 90 年代左右，Turksen^[12,13]、Schwartz^[14]、Klir 和 Folger^[15]等研究了区间二型模糊集合(此时期称为区间值模糊集合 (Interval-valued Fuzzy Set))，提出采用区间二型模糊集合代替一型模糊集合来处理各种不确定性以及进行语言值和知识的表示。区间二型模糊集合的隶属度值为区间值。由于相比于一般二型模糊集合，区间二型模糊集合的复杂度极大降低，因此，获得了更好的发展，并成为了近年来理论与应用研究的主流。

1.2.2 二型模糊系统结构及推理研究

与一型模糊系统一样，二型模糊系统仍是一种基于知识或规则的系统，其核

心是由 IF-THEN 规则构成的知识库,而这些 IF-THEN 规则可以由人类专家对特定的对象或过程的认识或操作得到的经验总结而成。在二型模糊系统研究方面,Mendel 领导的团队做了大量的工作,提出了二型模糊系统结构,阐述了二型模糊系统各个环节的功能^[2,16-25]。

与一型模糊系统相比,二型模糊系统的不同之处在于其输出处理环节多了一个降型器^[2,25]。为实现降型操作,Karnik 和 Mendel 等给出了用于降型的 Karnik-Mendel 算法(KM 算法)^[2,17]。此后,很多学者对 KM 算法的性质以及降低降型算法的运算复杂性展开了研究。Mendel 和 Liu 研究了 KM 算法的收敛性^[26],Wu 和 Mendel、Yeh 等分别给出了强化的 KM 算法^[27,28],Chiclana 和 Zhou 讨论了基于 OWA 方法的降型方法^[29],Linda 和 Manic 给出了基于 Monotone Centroid Flow 算法的降型方法^[30],Liu 给出了一般二型模糊系统的降型方法^[31],Chen 等讨论了 LR 二型模糊集合的降型问题^[32]。为规避降型环节的复杂性,Wu 和 Mendel 提出了一种近似算法来取代基于 KM 算法的降型运算^[33]。上述二型模糊系统方面的研究为其应用提供了一定的理论支撑。

1.2.3 二型模糊系统基本性质研究

同时,关于上述结构二型模糊系统基本性质的研究也引起了研究人员的重视。

Ying^[34]研究了二型模糊系统的逼近性能,指出二型模糊系统仍为万能逼近器,为二型模糊系统在建模、基于辨识或逼近的非线性控制中的应用提供了理论支持。Fard 和 Zaniuddin^[35]提出了区间二型三角模糊神经网络版本的 Stone-Weierstrass 定理,该定理给出了确保一类特殊的区间二型三角函数神经网络逼近单调连续区间二型三角模糊函数的条件。

在实际应用中,很多模型或控制器是连续的。当二型模糊系统用于建模或控制时,需要研究如何确保所设计的二型模糊系统的输入输出映射之间满足连续性要求。针对这一问题,Wu 和 Mendel^[36]给出了二型及一型模糊系统连续的条件,为设计满足实际要求的模型或控制器提供了依据。

二型模糊系统与一型模糊系统相比可以获得更好的性能,原因何在?二型模糊系统与一型模糊系统的本质区别是什么?为解决上述问题,Wu^[37]进行了相关研究,指出自适应性(Adaptiveness)与新颖性(Novelty)是二型模糊系统与一型模糊系统的根本区别所在,同时只有在采用 KM 降型算法时,二型模糊系统才具有这两种特性。

在很多建模及控制问题中,所建立的模型或所设计的控制器需要具有单调的输入与输出关系。针对这一问题,Li 等^[38-42]研究了二型模糊系统的单调性问题,给出了保证二型模糊系统输入输出满足单调性关系的条件。所得到的条件适用于不同类型的二型模糊集合以及不同的降型方法,有助于建立更符合实际情况的模型或设计出更合理的二型模糊控制器。

稳定性与鲁棒性是二型模糊系统研究中另外两个重要的理论问题,特别是在控制理论研究中。关于二型模糊系统稳定性的研究目前较多,如文献[43]~文献[46];而关于二型模糊系统鲁棒性的研究相对较少,其中文献[47]和文献[48]研究了二型模糊系统鲁棒性问题。

二型模糊系统作为控制器时,二型模糊控制器性能如何,其与PID控制规律之间的区别何在,这些问题的阐明在模糊控制的研究中至关重要。Zhou等在文献[49]~文献[52]中,研究了二型模糊系统作为控制器时其输入输出之间的关系,阐明了其分析结构(Analytical Structure),揭示了其与PID控制的关系。相关结果表明,二型模糊控制器在本质上是非线性PID控制器,从而为二型模糊控制器的设计提供了有力支撑。

上述性质的研究有助于更深刻地认识二型模糊系统,也有助于在设计二型模糊系统时确定合理的结构。当然,尚有二型模糊系统其他性质的研究,在此,不一一论述。

本节中所回顾的内容在很大程度上解决了二型模糊集合、二型模糊系统的理论与性质问题,为其应用奠定了基础。

1.3 基于二型模糊集合的词计算研究

在复杂系统中,人类已习惯于用自然语言描述和分析事物,并用自然语言表示的前提进行推理和计算,得到用自然语言表达的结果^[53]。近年来,随着智能信息处理的不断深入与普及,人们越来越发现排除自然语言的代价太大了。基于此,模糊数学的创始人Zadeh于1996年提出了词计算(Computing with Words, CWW)的概念^[53]。词计算主要处理基于感知的信息,其运算对象是语言变量,即变量的值是用自然语言描述的词语或句子^[54]。

自从词计算的概念提出以来,大量的论文与专著^[55-57]开始讨论词计算的问题。Mendel^[58]和Turksen^[59]指出词计算应采用二型模糊集合来处理语言值的不确定性。Mendel在文献[58]中指出“由于不同人对同一语言词有着不同的理解,因此,语言词模型的构建至少应采用区间二型模糊集合”。

1.3.1 基于二型模糊集合的感知计算研究

近年来,基于二型模糊集合的词计算研究基本可以划归到Mendel等提出的感知计算机(Perceptual Computer)^[60-63]框架下来论述。感知计算机主要由四部分组成:代码本(CodeBook)、编码器(Encoder)、解码器(Decoder)以及词计算引擎(CWW Engine)^[60-63]。

代码本^[60-63]:代码本是由所需要的语言词及其相对应的二型模糊集合构成的。

为使得人机交互具有灵活性,感知计算机代码本中代码的数量应该尽可能大。而代码本的构建涉及如何对语言词进行二型模糊建模。目前主要有两类方法。第一类方法称为模糊统计(Fuzzistics)方法^[64-66],该方法类似于数理统计中的矩法估计,令数据的不确定性度量与二型模糊集合的不确定性度量相等,进而通过解方程确定二型模糊集合的参数。在文献[64]~文献[66]中,Mendel和Wu讨论了基于二型模糊集合中心(Centroid)这一度量的模糊统计方法。在文献[67]中,Li等给出了基于二型模糊集合不确定度(Uncertainty Degree)的模糊统计方法,并建立了描述热舒适性的语言词的二型模糊模型。第二类方法称为区间值方法(Interval Approach),该建模方法由Liu和Mendel在文献[68]中提出,Wu等及Coupland等在文献[69]和文献[70]中给出了更合理的讨论。该方法首先通过问卷方式获取语言词的区间描述,然后采用数理统计的方法预处理数据,将预处理后的每个区间数据看成均匀分布,计算其均值与方差,令其等价于三角形一型模糊集合的均值与方差,进而确定该三角模糊集的参数,最后将得到的多个一型模糊集合合成得到相应语言词的二型模糊集合。在文献[71]中,Li等认为区间数据应该是一个区间模糊集而不应看成一个均匀分布,在此基础上改进了该方法,并采用相关方法实现了热舒适性的二型模糊建模。

编码器^[60-63]:编码器的主要作用是将输入的语言词映射为代码本中的二型模糊集合。

解码器^[60-63]:解码器的主要作用是将由词计算引擎推理得到的二型模糊集合与代码本中的二型模糊集合相比较,找出最相似的一个,并输出其对应的语言词。文献[72]~文献[74]讨论了二型模糊集合的不确定性度量问题,相关结论可以用来进行二型模糊集合的相似性比较,其中,文献[73]给出了一种基于排序方法(Ranking Method)的解码方案,文献[74]给出了基于Subsethood方法的解码方案。2014年,Wu在文献[75]中给出了一种重构解码器(Reconstruction Decoder)。

词计算引擎^[60-63]:词计算引擎是感知计算机的核心结构。其主要功能是:根据输入及其规则库,通过近似推理得出推理结论。词计算引擎的输入输出都为二型模糊集合。为解决词计算引擎的近似推理,Wu和Mendel提出了语言加权平均算法^[76]以及模糊加权平均算法^[77],并在此基础上发展了感知推理(Perceptual Reasoning)方法^[78-81]。通过研究感知推理方法的性质,发现感知推理方法输出能保证二型模糊集合的直观性,同时具有其他一些方面的合理性。

1.3.2 基于二型模糊集合的语言动力系统研究

二型模糊词计算的一大理论应用是基于二型模糊集合的语言动力系统研究^[82-85]。语言动力系统这一理论是王飞跃教授为了解决复杂系统的建模、分析、控制和评估等问题提出的,并得到了广泛应用。语言动力系统着重于在语言的层次上动态地有效利用信息来处理复杂系统中的相关问题^[82-85]。在基于二型模糊集

合的语言动力系统研究方面, Zhao 在其博士论文中讨论了基于区间二型模糊方法的词计算和语言动力系统^[86]; Mo 等在文献[87]中介绍了基于区间二型模糊扩展原理的词计算方法, 分析了区间二型模糊集合的语言动力学轨迹, 在文献[88]中分析了严格单调情况下基于区间二型模糊集合的单输入单输出系统的语言动力系统稳定性。

尽管基于二型模糊集合的词计算获得了广泛的关注, 但不论是语言词的二型模糊模型的构建还是解码器的设计以及词计算中的近似推理方案都需要进一步深入研究与讨论。而在基于二型模糊集合的语言动力系统研究方面, 如何降低语言动力系统的运算量, 在何种实际问题中可以获得应用等都是需要进一步解决的问题。

1.4 二型模糊系统设计研究

为构建性能优越的二型模糊系统, 需要实现输入输出空间的二型模糊划分(即确定二型模糊集合), 生成合理的模糊规则库, 并优化规则中的参数, 包括规则前件与规则后件中的参数。总体来说, 上述问题涉及二型模糊系统结构及参数的确定与优化。目前, 在二型模糊系统的研究中, 通常采用模糊聚类、神经网络及各种进化优化方法对其参数和结构进行学习与优化。

1.4.1 二型模糊聚类方法研究

在二型模糊系统的构建中, 模糊聚类方法常用来实现输入输出空间的二型模糊划分(即确定二型模糊集合), 并得到合理的模糊规则库。在二型模糊聚类研究方面, Hwang 和 Rhee^[89]把区间二型模糊逻辑和模糊 C 均值聚类算法结合起来用于观测不确定参数对两个模糊器的影响, 并且提出了在二型模糊 C 均值聚类算法中降型和解模糊化的方法。Phong 和 Thien^[90]运用模糊 C 均值聚类和 BP 算法构建区间二型模糊系统, 并将其应用于心电图心律不齐的分类中。Ozkan 和 Turksen^[91]研究了各种信息不完备情形下运用模糊 C 均值方法确定二型模糊系统参数的方法, 着重阐述了模糊隶属函数形状的确定方法。Uncu 和 Turksen^[92]提出了基于模糊 C 均值聚类的离散区间二型模糊系统的结构辨识方法。张伟斌等^[93]利用改进型模糊 C 均值聚类给出了区间二型模糊系统的规则提取方法, 并将其应用于路口群落交通流的预测与控制问题中。Yu 等^[94]提出了一种鲁棒区间二型模糊 C 均值聚类算法, 其中的二型模糊集合由用户选择。Liu 等^[95]提出了新的一般二型模糊 C 均值聚类结构辨识算法, 并应用于两足机器人步伐的简化切换控制设计问题中。Linda 和 Manic^[96]采用一般二型模糊 C 均值聚类算法, 并扩展 α 平面描述定理, 提出了一种新的不确定模糊聚类算法。

1.4.2 二型模糊神经网络方法研究

二型模糊系统缺少自学习与自适应能力。神经网络具有模拟人脑结构的思维功能,具有较强的自学习功能,人工干预少,精度较高,但它不能处理和描述模糊信息,不能很好利用已有的经验知识。因此,将两者合理地结合起来,可以优势互补,从而构造出具有更好性能的系统。

Rutkowska^[97]首次提出了二型模糊神经网络的概念,并给出了 NEFCON、NEFCLASS、NEFPROX 三种神经网络模型,这三种模型都可以看作类 RBF 神经网络模糊模型,并且可以视为二型模糊神经网络。Shim 和 Rhee^[98]提出了一般二型模糊隶属函数设计方法,并与 BP 神经网络相结合,形成一般二型模糊 BP 神经网络。Wang 等^[99]提出了一种二型模糊神经网络,后件参数由动态优化训练算法得到,训练过程中每次迭代的区间二型神经网络的学习率能够根据最大误差进行优化。Castro 等^[100]提出了三种基于混合学习算法的区间二型模糊神经网络模型,神经网络参数由 BP 算法和具有自适应学习率的最速下降算法构成的混合学习算法优化得到。Chen 和 Lin^[101]研究了自适应二型模糊神经网络,并用于控制永磁直线同步电动机(PMLSM)。Lin 等^[102-105]采用二型模糊神经网络实现了直线型超声电机(LUSM)控制。Li 等^[39]研究了嵌入单调性先验知识的二型模糊神经网络,并将其应用于热舒适度预测中。Li 等^[106]采用最小二乘方法优化了二型模糊神经网络参数,并设计了用于水平吊具控制的逆控制器。

二型模糊神经网络的设计涉及结构及参数两方面的优化。而在文献[97]~文献[106]中,二型模糊神经网络的结构是确定的,只对其参数进行优化。为获得性能更优越的模糊系统,其结构包括模糊集合及规则也需要优化获得。在文献[107]中,Juang 和 Tsao 提出了一种自组织区间二型模糊神经网络模型,同时调整优化二型模糊神经网络的结构与参数,并将该类型神经网络应用到非线性系统建模、自适应消噪和混沌信号预测问题中。在文献[108]中,Juang 和 Tsao 提出了递归自主进化区间二型模糊神经网络模型,在该神经网络中有局部的内部反馈环,实现了在动态系统辨识和混沌信号预测问题中的应用。在文献[109]中,Juang 等提出了基于支撑向量机的区间二型模糊神经网络模型,该神经网络的辨识包括结构学习和参数学习两部分,结构学习负责在线生成规则,参数学习基于结构风险最小化原则、利用线性 SVR 算法对参数进行优化。在文献[110]中,Yeh 等采用聚类方法获取二型模糊 IF-THEN 规则,而神经网络的相关参数则由粒子群算法和最小二乘算法构成的混合算法计算得到。在文献[111]中,Lin 等提出了相互递归区间二型模糊神经网络模型,结构学习采用在线的二型模糊聚类方法,参数学习采用规则排序型 Kalman 滤波算法。