

**Fuzzy Cognitive Maps
and
Their Construction
Methods**

**模糊认知图 及其
构建方法**

彭 珍 著

模糊认知图 及其构建方法

彭 珍 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书旨在丰富和充实知识工程与系统工程的理论与方法,充分利用了模糊认知图的模糊信息处理能力、因果关系的传播方法以及动态自适应特性,拓展已有的认知图、模糊认知图及其构建方法,深入分析了模糊认知图的稳定状态、因果关系和平衡性等认知机理,结合具体的应用需求提出了基于多关系的模糊认知图 MRFCM 和基于规则的模糊认知图 RBFCM,实现了数据驱动的 MRFCM 和 RBFCM 构建,这必将模糊认知图及其构建方法引向新的阶段,实现对复杂客观世界的映像。

本书适用于信息与自动化领域的研究人员。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

模糊认知图及其构建方法/彭珍著. —北京:北京理工大学出版社, 2017. 4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 3991 - 2

I. ①模… II. ①彭… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.411

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 082441 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 8.25

字 数 / 129 千字

版 次 / 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 党选丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

个人简介

彭珍，拥有计算机应用技术博士学位，计算机学会、系统工程学会会员，现为北京石油化工学院副教授。长期从事模糊认知图、数据挖掘方面的研究。近五年来，主持国家自然科学基金和省级自然科学基金与社会科学基金项目五项，参与国家级自然科学基金、国家社会科学基金、国家重大科技支撑计划等多项相关的重大课题，以第一作者发表科研论文 10 余篇，出版学术专著 1 部。电子邮箱：zhenpeng@bipt.edu.cn。



前 言

现实中一些大规模复杂的结构化系统，如生物信息、金融数据、气象系统等，都涉及大量的概念和复杂的概念间关系，概念间的相互作用形成了一个有机的动态系统。以雾霾形成系统为例，雾霾的形成受到气象因素（气温、气压、相对湿度等）、污染因素（ SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等），甚至地理因素等的影响。如何实现这类复杂系统的映像或模拟，即如何提取系统中涉及的概念，如何认知概念间的关系，以及如何模拟系统中概念状态、概念间关系的动态演变是系统认知与系统构建、知识表示与知识发现的一项重要重要的课题。

模糊认知图（Fuzzy Cognitive Map, FCM）作为一种先进的软计算工具，能够为系统建模、模拟系统的演变规律、实现对复杂客观世界的映像。相比神经网络和基于一阶谓词逻辑的知识表示和推理方法，模糊认知图的知识表示和推理能力较强，且具有更强的语义性、更方便的专家介入性、更适用的分布式构造性、更敏感的预测与分析特征等。

国外对模糊认知图的研究起步较早，但对模糊认知图的理论分析及构建方法的研究仍有很大深入探索的空间。相对国外，国内学者虽然针对不同问题，从不同的角度逐步展开研究并取得了一定的研究进展，但都不尽充分。而且迄今，国内没有一本系统介绍模糊认知图理论与方法的专业书籍。因此，深入研究模糊认知图及其构建方法具有重要的理论意义和应用价值。本书正是在系统研究模糊认知图的基础上，通过对已有模糊认知图及其构建方法的介绍，特别是对认知图的产生与发展、模糊认知图、复杂结构的模糊认知图、模糊认知图构建方法等进行了详细介绍，并拓展已有的研究，对模糊认知图的稳定状态、因果关系和平衡性进行了理论分析，结合现有的应用需求还提出了基于多关系的模糊认知图构建方法和基于规

则的模糊认知图构建方法，这必将模糊认知图及其构建方法引向新的阶段，实现对复杂客观世界的映像。

本书旨在丰富知识工程与系统工程的理论与方法，模糊认知图作为一种有效的知识表示方式和系统建模方式，它能够实现复杂客观世界的映像，直观地表达出其中的概念、概念之间的关系，并利用它的模糊信息处理能力、因果关系的传播方法以及动态自适应特性，完成对复杂系统的认知、模拟、构建，实现知识发现。

本书得到了国家自然科学基金项目（项目编号：71601022）、北京市自然科学基金项目（项目编号：4173074）、北京市社科基金项目（项目编号：15JDJGB028）的支持。本书能够得以顺利出版，首先要感谢我的博士指导老师——杨炳儒，正是在杨老师的指导下从博士期间就开始着手研究模糊认知图及其方法，在近十年积累的基础上完成了本书的撰写；其次要感谢北京石油化工学院，为我提供了良好的学术氛围与科研环境，在学院各位领导和专家的大力支持下，在模糊认知图与数据挖掘研究的基础上，申请到国家自然科学基金项目、北京市自然科学基金项目与北京市社会科学基金项目，并对本书的出版给予支持；再次感谢我的家人的辛勤付出，没有他们的支持与付出，也不可能有本书的出版；最后感谢北京理工大学出版社对全书内容的编辑。

对模糊认知图的研究无论是在理论还是应用方面待不断深入，还有很多值得探索和发展的空间，限于作者水平，尽管始终坚持严谨认真的态度，但仅在对现有的模糊认知图及其构建方法进行归纳总结的基础上，重点对模糊认知图稳定性、因果关系、平衡性进行了理论分析，针对多关系特征与非单调性推理分别提出了基于多关系的模糊认知图构建方法和基于规则的模糊认知图构建方法。因此，难免存在错误和不足之处，敬请广大读者批评和指正。

目 录

绪论	1
第 1 章 认知图	4
1.1 认知图的产生与发展	4
1.2 认知图的相关定义	6
1.3 本章小结	8
第 2 章 模糊认知图	9
2.1 模糊认知图模型	9
2.1.1 模糊认知图数学模型	9
2.1.2 模糊认知图的特征	11
2.1.3 模糊认知图的推理机制	13
2.2 复杂结构的模糊认知图	15
2.2.1 聚合模糊认知图	15
2.2.2 层次模糊认知图	19
2.2.3 粒模糊认知图	22
2.3 模糊认知图的应用研究	24
2.3.1 模糊认知图在信息安全中的应用	24
2.3.2 模糊认知图在系统评估中的应用	30
2.3.3 模糊认知图在系统控制中的应用	33
2.4 本章小结	40
第 3 章 模糊认知图的理论分析	41
3.1 稳定状态	41
3.1.1 两种稳定状态	41
3.1.2 FCM 固定点分析	42
3.1.3 FCM 有限环分析	43

3.1.4	稳定状态的应用分析	44
3.2	因果关系	47
3.2.1	因果关系概述	47
3.2.2	因果关联程度	48
3.3	平衡性研究	49
3.3.1	关于 FCM 的平衡性与平衡度	49
3.3.2	影响 FCM 平衡的关键因素	51
3.3.3	新的平衡度计算方法	52
3.3.4	消除非平衡性的方法	53
3.4	本章小结	54
第 4 章	模糊认知图的构建方法	55
4.1	模糊认知图的构建概述	55
4.1.1	人工构建方式	55
4.1.2	计算构建方式	57
4.2	基于 Hebbian 学习的 FCM 构建方法	58
4.2.1	Hebbian 规则	58
4.2.2	基于非线性 Hebbian 规则学习方法	59
4.2.3	激活 Hebbian 学习算法	60
4.2.4	AHL 和 NHL 两种学习算法讨论	63
4.3	基于遗传算法的 FCM 构建方法	64
4.3.1	基于 RCGA 的 FCM 构建方法	64
4.3.2	基于并行 RCGA 的 FCM 构建方法	66
4.4	基于粒子群算法的 FCM 构建方法	68
4.5	基于梯度下降法的 FCM 构建方法	70
4.6	本章小结	73
第 5 章	基于多关系的模糊认知图构建方法	74
5.1	基于多关系的 MRFCM 构建	74
5.1.1	基于多关系的 MRFCM 构建思想	74
5.1.2	基于多关系的 MRFCM 构建理论	76
5.2	基于多关系的 MRFCM 结构的建立	77
5.2.1	基于多关系数据的 MRFCM 结点	77
5.2.2	基于多关系数据的 MRFCM 结构	79
5.2.3	MRFCM 结构的分解	84

5.3	MRFCM 中子结点状态的获取	85
5.4	MRFCM 超结点状态的挖掘	87
5.4.1	MRFCM 超结点状态挖掘的方法	87
5.4.2	MRFCM 超结点状态挖掘的算法	90
5.4.3	MRFCM 超结点状态挖掘的稳定性	91
5.5	本章小结	92
第 6 章	基于规则的模糊认知图构建方法	93
6.1	研究现状	93
6.2	RBFCM 的知识表示方法	94
6.3	RBFCM 的推理机制	96
6.4	RBFCM 在启发型协调器中的应用	98
6.4.1	可达矩阵的推理	98
6.4.2	启发型协调器的实现	101
6.4.3	性能测评	102
6.5	本章小结	104
结论		106
参考文献		108

绪 论

模糊认知图既是知识工程中的一种知识表达方式，又是复杂系统中的建模方式之一，应用极为广泛。它充分利用了模糊逻辑的模糊信息处理能力、认知图因果关系的传播方法和神经网络的动态自适应特性，能够很好地将三者结合在一起，有利于知识的合成和系统的仿真与处理。

本书主要从以下两大方面展开论述：

一方面是模糊认知图的研究，从认知图的产生与发展出发，分析了目前国内外关于模糊认知图的研究现状，特别是对复杂结构的模糊认知图以及国内模糊认知图的应用现状进行了归纳，并从模糊认知图的稳定状态、因果关系、平衡性三大方面展开了理论分析。

另一方面是模糊认知图构建方法的研究，在归纳、总结模糊认知图构建方法的基础上，特别是模糊认知图的计算构建方法，针对现实世界的多关系特征，提出基于多关系的模糊认知图构建的思想，实现多关系模糊认知图结构的建立与状态的挖掘；并针对多关系间的关联规则以及非单调性推理问题，实现了基于规则的模糊认知图构建方法，建立了基于规则模糊认知图的推理机制。

本书主要包含 8 部分。具体组织和安排如下：

首先是绪论，主要对本书的研究内容与线路进行介绍。

第 1 章为认知图部分，概括性地总结认知图的产生与发展，以及认知图的相关定义。

第2章为模糊认知图部分,介绍模糊认知图的数学模型、特征与推理机制,以及几类典型的复杂结构的模糊认知图和模糊认知图的应用。

第3章为模糊认知图的理论分析部分,主要对模糊认知图的稳定状态、因果关系、平衡性进行深入研究。具体地,就模糊认知图的固定点和有限环两种稳定状态进行理论与应用分析,根据因果关系对模糊认知图的平衡性与平衡度进行研究,提出新的平衡度和消除非平衡性的计算方法。

第4章为模糊认知图的构建方法部分,主要介绍现有的模糊认知图的构建方法,主要就计算构建方式进行归类,详细介绍基于 Hebbian 学习的 FCM 构建方法、基于遗传算法的 FCM 构建方法、基于粒子群算法的 FCM 构建方法和基于梯度下降法的 FCM 构建方法。

第5章为基于多关系的模糊认知图构建方法部分,针对多关系数据的特征建立基于多关系的模糊认知图 MRFCM 构建思想与理论,实现面向 E-R 关系数据库的 MRFCM 自动构建方法,其中为实现 MRFCM 结点状态的获取与挖掘,建立面向多实例的超结点状态挖掘方法,并证明其稳定性。

第6章为基于规则的模糊认知图构建方法部分,从多关系间的非单调推理出发,采用研究理论模型—提出可行算法—实现具体应用为主线。首先,提出一种基于规则模糊认知图模型,定义它的七种推理机制;其次,据此建立可达矩阵的推理,实现启发型协调器;最后,通过胸痹症状预测实验证明该方法具备更有效的推理规则,其智能程度更高,更符合知识发现的认知规律。

最后是结论部分,该部分对全部研究工作进行总结,并对今后的工作进行了展望。

本书的研究结构与线路如图 0-1 所示。

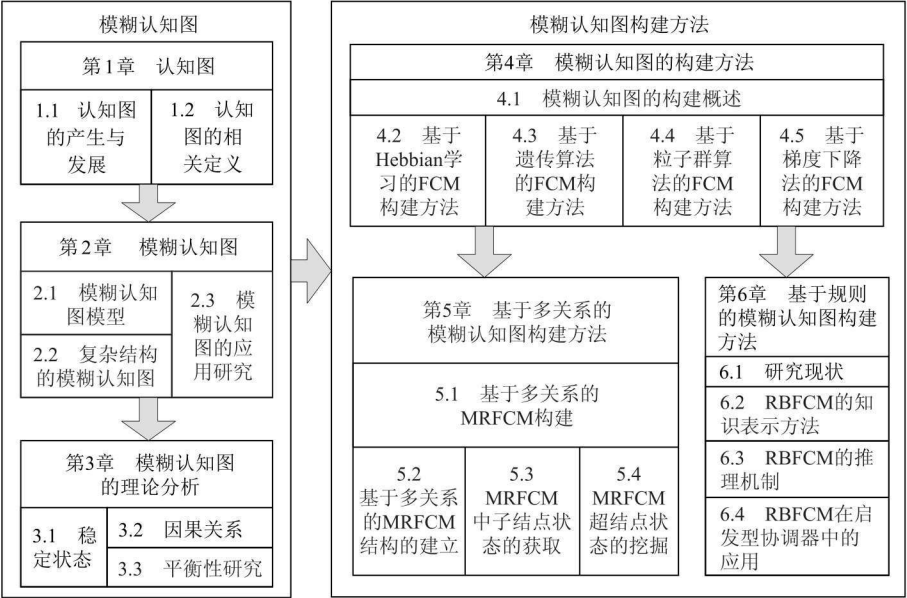


图 0-1 研究结构与线路

第 1 章

认知图

1.1 认知图的产生与发展

1948 年, Tolman 首次提到认知图^[1], 它把认知图描述为有向图, 认为认知图是由一些弧连接起来的结点的集合, 其目的是为心理学构建一个模型。后来, 认知图被其他学者所借用, 不同的学者对弧与结点赋予了不同的含义。

古典认知图包括 Kelly 认知图与 Axelord 认知图。Kelly 与 Axelord 的认知图都是因果关系图, 而 Axelord 认知图比 Kelly 的更接近于动态系统, 对以后认知图的发展产生了一定的影响。

1955 年, Kelly 提出的认知图中的概念是二值的, 即 0 和 1; 概念间的关系是三值的, 即 +、- 和 0^[2]。若概念间的因果关系取 +, 表示原因概念与结果概念呈同方向变化; 若概念间的因果关系取 -, 表示呈相反方向变化; 若概念间的因果关系取 0, 表示这两个概念之间不存在因果关系。此外, 这些关系还可以进行逻辑联合, 有 e (表示可以取 +、0)、± (表示可以取 +、-)、⊖ (表示可以取 -、0)、a (表示矛盾的情绪)、? (可取 +、-、0 中的任何一种)。

1976 年, Axelord 提出的认知图由结点集合 C 与结点箭头集合 A 组成^[3], 即 $CM = \{C, A\}$ 。概念由结点表示, 它反映了系统的目的、行为等。概念间的关系用带箭头的弧表示, 箭头的方向表示概念间的关联、影

响关系的方向,其关联强度用数值表示,即弧的权值。它有两个不同的弧,即正的类型与负的类型。正的类型表示原因结点的变化能导致结果结点呈同方向变化,负的类型表示原因结点的变化能导致结果结点呈相反方向变化。

Axelord 认知图是表达和推理系统中概念间关系的图模型,作为一种新的知识表示和推理的技术方法,它的显著特点就是利用系统的先验知识及其子系统具备的可加性,表示具有反馈的动态因果系统,可用于鸟瞰系统的概念结构。

1986年,Kosko 融合 Zadeh 的模糊集理论和 Alexrod 的认知图理论,提出了模糊认知图(Fuzzy Cognitive Map, FCM)的概念^[4,5],它将概念间具有的三值逻辑关系扩展为区间 $[-1, 1]$ 的模糊关系。FCM是有符号、带反馈的有向网络,其中每个网络结点都具有其结点状态值(权重),用于刻画 FCM 环境中物元的属性;结点之间的有向连接弧则代表物元之间的因果关系。对于每条有向连接弧,箭头出发的结点称为前向结点,箭头指向的结点称为后向结点,后向结点的状态值受到前向结点状态值和前后向结点之间关系权值的共同影响。整个 FCM 描述了环境中所有概念之间的因果关系以及相互作用的程度,并在此基础上分析它们的推理状态。概念之间的关系权值取为 $[-1, 1]$ 的等间隔模糊数值,能够对不同类型和精度的模糊信息进行描述和处理。

Kosko 提出的模糊认知图在认知图的发展中具有里程碑的作用。在 Kosko 之后,一些学者在 FCM 的基础上展开了拓展研究。

1990年,Wellman 提出了定性概率网络(Qualitative Probability Network, QPN)^[6]。它认为认知图是一个具有未知概率的网络,概念为随机变量。概念 a 到概念 b 的边权值 $A+$ 表示为:如果 a 值变大, b 值也变大的概率增加。概念 a 到概念 b 的边权值 $A-$ 表示为:如果 a 值变大, b 值也变大的概率减少。

1992年,Hagiwara 提出了扩展模糊认知图(extended Fuzzy Cognitive Map, eFCM)^[7]。eFCM 能表示概念结点间的非线性关系、时间关系、因果关系的延迟及条件权重等,它能更自然地表示现实世界中的复杂因果关系。

1997年,Stylios 等提出了具有监控能力的 FCM^[8]。同年,Obata 与 Hagiwara 针对如何处理和表示概念间复杂因果关系提出了神经元认知图(Neural Cognitive Maps, NCM)^[9],它考虑了概念结点自身的变化,利用误

差反向传播 (Error Back Propagation, BP) 算法求出每个概念间的复杂因果关系的强度, 模拟和预测能力比 FCM、eFCM 有很大的提高, 最大限度地模拟现实世界。

1999 年以来, Carvalho 和 Tome 连续发表多篇文章提出了基于规则的模糊认知图模型 (Rule Based Fuzzy Cognitive Maps, RBFCM)^[10~14], 其中的概念分为 Levels 与 Changs 两种类型, 概念状态的构造是基于模糊成员函数构建的, 概念间的关系则是基于规则。它将认知图中概念结点间的因果关系扩展为模糊影响关系, 包括模糊因果关系 (Fuzzy Casual Relation, FCR)、概率关系 (Probabilistic Relation, PR)、时间依赖概率关系 (Time Dependent Probabilistic Relation, TDPR)、可能性关系 (Possibilistic Relation, PR) 和相似性关系 (Similarity Relation, SR), 以达到能够处理和分析概念间复杂因果关系及非因果关系的目的。

1999 年, Stylios 等又在 FCM 基础上提出了具有记忆功能的 FCM^[15~17]。同年, Satur 与 Liu 在 IEEE Transaction on Fuzzy System 连续发表了两篇 FCM 的文章, 提出了上下文关系的模糊认知图 (contextual Fuzzy Cognitive Maps, cFCM), 这类认知图概念间的关系表示为上下文关系, 对 eFCM 的性质进行了讨论, 并在信息地理系统中加以应用^[18,19]。他们还曾提出了多层 FCM 的模型^[20]。

2000 年、2001 年 Miao 和 Liu 提出了动态认知网络 (Dynamic Cognitive Networks, DCN)^[21,22], 它是对 FCM 的拓展, 在该网络中概念状态值可根据环境自主选取, 概念间的因果关系可以是非线性的, 并从数学上对概念间因果关系的 0 阶与 1 阶微分关系进行了分析。

2002 年, Chaib-draa 等提出了具有语义的关系模型认知图, 并利用这个模型发展了一个多 Agent 环境下的可计算模型^[23]。

除了以上认知图模型外, 还有面向对象的模糊认知图 (Object Oriented Fuzzy Cognitive Maps, OOFCM)^[24]、随机模糊认知图^[25]、概率模糊认知图^[26~28]和区间数模糊认知图^[29]等。



1.2 认知图的相关定义

因果关系在模拟、推理和预测中具有重要的作用。作为一种软计算方法, 认知图是一个描述因果知识的网状模型, 由概念 (Concept) 与概念间

的关系 (Relation) 组成: 概念 (用结点表示) 表示系统的属性、性能与品质; 概念间的关系表示概念间的因果关系 (用带箭头的弧表示, 箭头的方向表示因果联系的方向)^[30]。它可以鸟瞰系统中各概念间如何相互作用、每个概念与哪些概念具有因果关系, 能够表示很难用树结构、Bayes 网络, 以及 Markov 网络等表示的具有反馈的动态因果系统^[31]。

参考相关文献, 本书给出了认知图的相关基本定义。

定义 1-1 认知图中的概念表示系统中的抽象实体 (如原因、结果、目的等), 在认知图中用结点表示。第 i 个概念结点记为 C_i 。

定义 1-2 认知图中的概念状态值 (状态权重) 表示系统中对应概念的状态值, 这个状态值也是对应概念结点的状态值。第 i 个概念结点的状态值记为 A_i 。

定义 1-3 认知图中的关联边表示系统中概念之间存在因果关系。若两个概念结点 C_i 、 C_j 存在直接因果关系, 则边记为 e_{ij} 。

定义 1-4 认知图中的概念间因果关系影响程度表示两概念结点之间因果关系影响的强弱, 即为关联边的权重。若两个概念结点 C_i 、 C_j 存在直接因果关系, 则因果关系影响程度记为 w_{ij} 。

定义 1-5 认知图中的邻接矩阵是指在认知图中所有因果关系影响程度形成的矩阵, 即权重矩阵, 该矩阵记为 $\mathbf{W} = [w_{ij}]$ 。

定义 1-6 原因结点与结果结点: 对认知图中两个不同的概念结点 C_i 、 C_j , 若概念结点 C_i 状态发生变化, 导致概念结点 C_j 的状态也随之发生变化, 则称 C_i 为 C_j 的原因结点、 C_j 为 C_i 的结果结点。

定义 1-7 直接因果关系: 对认知图中两个不同的概念结点 C_i 、 C_j , 若 C_j 发生变化是由 C_i 的变化直接引起的, 即有 C_i 到 C_j 的边 e_{ij} , 则称 C_i 、 C_j 之间具有直接因果关系, 记为 $C_i \rightarrow C_j$ 。

定义 1-8 间接因果关系及其路径长度: 在认知图中的两个不同概念结点 C_i 、 C_j , 若 C_i 、 C_j 之间不具有直接因果关系, 但至少存在一个 C_k , 使 $C_i \rightarrow C_k$, $C_k \rightarrow C_j$, 即至少具有边集 $e = \{e_{ik}, e_{kj}\}$, 使得结点 C_i 、 C_j 通过 C_k 相连接, 则称结点 C_i 、 C_j 之间存在间接因果关系, 记为 $C_i \rightarrow C_k \rightarrow C_j$; 边的个数称为 C_i 作用于 C_j 的路径长度。

定义 1-9 正的因果关系与负的因果关系: 在认知图中, 若存在 $w_{ij} > 0$, 则表示 C_i 状态值的增加将导致 C_j 状态值的增加, 称 C_i 到 C_j 是正的因果关系; 若存在 $w_{ij} < 0$, 则表示 C_i 状态值的增加将导致 C_j 状态值的减少, 称 C_i 到 C_j 是负的因果关系。

定义 1-10 反馈环：在认知图中对于概念结点 C_i ，若至少存在一个结点 C_k 使 $C_i \rightarrow C_k \rightarrow C_i$ ，且权重 $W = \{w_{ik}, w_{ki}\}$ 中任一元素都不等于 0，则称认知图中存在 C_i 的反馈环。

1.3 本章小结

认知图作为智能信息处理的重要工具，支持基于先验知识的自适应行为，能表示具有反馈的动态因果系统。模糊认知图的研究涉及模糊数学、模糊推理、不确定性理论及神经网络等诸多学科，已逐渐成为一种新的知识表示和系统建模方法，在模糊推理中起着很大的作用。虽然认知图模型提出较多，但任何一种模型都待更深入地研究，正如 Kosko 所讲，对认知图的机理目前仍不清楚^[5]。