

云推理方法及其在预测中的应用

陈昊^{1,2} 李兵¹

(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)¹ (湖北大学数学与计算机科学学院 武汉 430062)²

摘要 不确定性推理是当前人工智能研究领域中的一重要研究内容。云模型实现了定性概念与其定量表示之间的不确定转换,在云模型基础上构建的规则发生器能有效描述用自然语言表示的定性规则,实现不确定性推理。将基于云模型的不确定性推理方法用于预测实际工作环境中电子产品的使用寿命,说明了云推理方法的有效性和实用性。

关键词 不确定性推理,云模型,规则发生器

中图分类号 TP18 文献标识码 A

Cloud Reasoning Method and its Application in Prediction

CHEN Hao^{1,2} LI Bing¹

(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)¹

(School of Mathematics and Computer Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)²

Abstract Uncertain reasoning is an important work in current artificial intelligence research field. The cloud model can establish transformation of uncertainty between the qualitative concept and the quantitative description. The rule generator constructed by cloud model can describe qualitative rules expressing by natural language effectively, and carry out uncertain reasoning. Finally, an uncertain reasoning approach based on cloud model was used for forecasting electronic products lifetime under practical working conditions, which demonstrated the validity and practicability of the cloud reasoning method.

Keywords Uncertain reasoning, Cloud model, Rule generator

1 引言

当今信息时代,不确定信息远比确定信息要多,可以说现实世界中几乎没有事物是完全确定的^[1,2]。在人类的知识和思维行为中,精确性只是相对的,不确定性才是绝对的,因此不确定性推理才是人类思维活动的本质特征。不确定性推理也称为近似推理,是建立在不确定知识基础上的一种推理,主要用于模拟和处理人类思维活动中的不精确性、不确定性和不完整性。

如何在不确定性知识的基础上,依据某些合理标准,推出一个有一定可信度的结论,成为不确定性推理研究的主要内容^[3]。其中要解决的两个关键问题是确定性知识的表示和不确定性推理机制。现实生活中的不确定性主要表现为随机性和模糊性^[4],目前常用的不确定性推理方法概括起来主要有以下4类:基于概率理论的概率推理法(如贝叶斯概率推理模型^[5,6])、基于证据理论的证据推理^[7]、基于粗糙集理论的粗糙集方法^[8]以及基于模糊集合和模糊逻辑理论基础上的模糊推理^[9,10]。近年来,南加州大学电子工程系孟德尔教授领导的研究团队在扎德提出的二型模糊集合和一型模糊逻辑系统基础上提出了二型模糊逻辑系统^[11,12],用模糊集合运算和降型形成了二型模糊逻辑系统的不确定推理机制。

李德毅院士从随机性与模糊性的关联性出发,提出了描述自然语言中概念不确定性的云模型,实现了用自然语言表示的定性概念与其定量表示之间的不确定转换,它用于不确定性知识的表示非常有效。本文在云模型基础上,引入不确定推理方法,通过构建规则发生器能有效表示用自然语言描述的定性规则,以便实现带有不确定性的推理。

本文第2节介绍了基于云模型的不确定性知识的表示;第3节介绍了基于云模型规则发生器,重点给出了双条件单规则发生器的具体算法;第4节将基于云模型的不确定性推理方法用于预测可变环境中电子产品的寿命,说明了基于云的不确定性推理方法的有效性和实用性。

2 云模型

2.1 云模型定义

语言和文字是人类智能的重要体现,是人类知识的载体。概念是最小的语言单位,它与数学符号的最大区别是其中包含太多的不确定性,主要体现于概念的随机性和模糊性。要将自然语言表示成计算机能够理解和处理的形式,就必须建立一个定性概念与定量描述之间的不确定转换模型^[13]。云模型是在概率论和模糊集合论两种理论基础上,通过特定构造算法,统一刻画概念的随机性、模糊性及其关联性。

到稿日期:2010-07-21 返修日期:2010-12-03 本文受国家自然科学基金(60873083),国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB310801),湖北省青年杰出人才基金(2008CDB351)资助。

陈昊(1977—),男,博士生,主要研究方向为不确定性人工智能,E-mail:6724768@qq.com;李兵(1969—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、复杂网络,E-mail:bingli@whu.edu.cn(通信作者)。

设 C 是论域 U 上的概念,若 $x \in U$ 是概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数: $\mu(x): U \rightarrow [0, 1] \forall x \in U$, 则 x 在论域 U 上的分布称为云模型^[14]。其中随机实现的定量数值 x 体现了表示概念的定量值的随机性,而 x 对概念 C 的确定度 $\mu(x)$ 体现了数值 x 能够代表定性概念的确定程度。云模型用 3 个数字特征: 期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 来反映定性概念整体特征。期望 Ex 是论域空间中最能代表这个定性概念的数值,熵 En 反映了在论域中可被概念接受的数域范围,超熵 He 是熵不确定性的度量,即熵的熵。

2.2 正向云发生器

云是用自然语言表示的某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型,具有直观性和普遍性。正态云是一种最基本的云模型,具有普遍适用性^[15]。正向云发生器是从概念表达的定性信息中获取定量数据的范围和分布情况,一维正向正态云具体实现算法如下。

算法 1 一维正态云发生器算法

输入: 一维定性概念的数字特征 (Ex, En, He) 及云滴数 N 。

输出: N 个云滴的定量值 x 以及代表概念的确定度 y 。

(1) 生成以 En 为期望值、 He 为均方差的正态随机数 En' ;

(2) 生成以 Ex 为期望值、 En' 为均方差的正态随机数 x ;

(3) 计算确定度 $y = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}}$;

(4) (x, y) 成为论域中 1 个云滴;

(5) 重复步骤(1)–(4)直至产生 N 个云滴。

例如用云模型表示定性概念“青年人”,根据生活经验,将 25 岁定为完全属于青年人概念即期望 Ex ,熵 En 和超熵 He 定为 3 和 0.3,图 1 是用正向云发生器生成表示概念“青年人”的定量数据的范围和分布情况。云图是由一个个云滴构成的,每个云滴都是定性概念的一次定量实现,每个云滴的 x 值选取都是一次随机事件,云模型同时还给出了每个云滴能够代表定性概念的确定度,云滴的确定度不是一个固定值,而是一个具有稳定倾向的随机值。

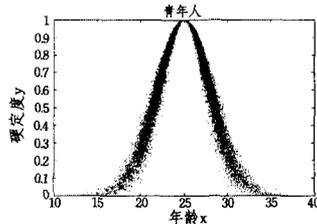


图 1 一维正态云

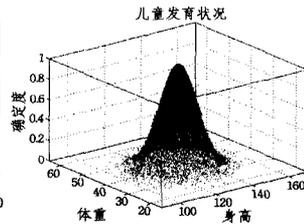


图 2 二维正态云

定性概念对应的论域空间是数域空间,可以是一维、二维甚至是多维的。在一维正态云模型基础上,很容易推广到二维乃至多维正态云,可表示两个或者多个定性概念组合而成的复杂定性概念。二维正向正态云具体实现算法如下。

算法 2 二维正态云发生器算法

输入: 二维定性概念的数字特征 $(Ex_1, Ex_2), (En_1, En_2), (He_1, He_2)$ 及云滴数 N 。

输出: N 个云滴的定量值 (x_1, x_2) 以及代表概念的确定度 y 。

(1) 生成以 En_1 为期望值、 He_1 为均方差的正态随机数 En_1' ;

(2) 生成以 Ex_1 为期望值、 En_1' 为均方差的正态随机数 x_1 ;

(3) 生成以 En_2 为期望值、 He_2 为均方差的正态随机数 En_2' ;

(4) 生成以 Ex_2 为期望值、 En_2' 为均方差的正态随机数 x_2 ;

(5) 计算确定度 $y = e^{-\frac{(x_1-Ex_1)^2}{2(En_1')^2} - \frac{(x_2-Ex_2)^2}{2(En_2')^2}}$;

(6) (x_1, x_2, y) 成为论域中 1 个云滴;

(7) 重复步骤(1)–(6)直至产生 N 个云滴。

例如通常用“身高、体重”两个指标评价儿童身体发育状况,以儿童的身高和体重的期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 为数字特征,利用二维正态云发生器算法就能够得到儿童身体发育状态云,如图 2 所示。

3 云规则发生器

不确定性推理的基础是不确定性知识,通常使用诸如 if A then B 形式的定性规则来表达不确定性知识,其中 A 和 B 都是自然语言描述的定性概念,比如“如果纬度低,则气温高”。A 称为规则的前件,可以是一个或者多个条件;B 是规则的后件,通常是一个结果。

3.1 前件云与后件云

给定论域中一个定量值 x ,通过正向云发生器生成定量值 x 属于定性概念的确定度 y ,称为前件云发生器。确定度 y 每次实现都带有不确定性;一维前件云发生器具体算法如下。

算法 3 一维前件云发生器

输入: 一维定性概念的数字特征 (Ex, En, He) 及定量值 x 。

输出: 定量值 x 属于定性概念的确定度 y 。

(1) 生成以 En 为期望值、 He 为均方差的正态随机数 En' ;

(2) 计算确定度 $y = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}}$ 。

给定确定度 $y, y \in [0, 1]$,通过正向云发生器生成定性概念上满足确定度 y 的定量值 x ,称为后件云发生器。定量值 x 每次实现都带有不确定性,后件云发生器具体算法如下。

算法 4 后件云发生器

输入: 一维定性概念的数字特征 (Ex, En, He) 及确定度 $y, y \in [0, 1]$ 。

输出: 满足确定度 y 的定量值 x 。

(1) 生成以 En 为期望值、 He 为均方差的正态随机数 En' ;

(2) 计算定量值 $x = Ex \pm En' \times \sqrt{-2 \ln y}$ 。

3.2 规则发生器

通常定性规则是由一个或几个前件与一个后件组成,因此,定性规则可分为单条件单规则(if A then B)、双条件单规则(if A1, A2 then B)和多条件单规则(if A1, A2, ..., An then B)等。前件云发生器和后件云发生器组合在一起就可以构成基于云模型的规则发生器。在规则发生器中前件云可以是一维或多维的,后件云都是一维的。

将一维前件云发生器与一维后件云发生器相连接,则构造出单条件单规则发生器,如图 3 所示。单条件单规则发生器具体算法如下。

算法 5 单条件单规则发生器

输入: 前件定性概念的数字特征 (Ex_A, En_A, He_A) 及定量值 x_A , 后件定性概念的数字特征 (Ex_B, En_B, He_B) 。

输出: 满足确定度 y 的后件定性概念的定量值 x_B 。

(1) 生成以 En_A 为期望值、 He_A 为均方差的正态随机数 En_A' ;

(2) 计算确定度 $y = e^{-\frac{(x_A-Ex_A)^2}{2(En_A')^2}}$;

(3) 生成以 En_B 为期望值、 He_B 为均方差的正态随机数 En_B' ;

(4) 如果前件激活上升沿 $x_A \leq Ex_A$, 则后件同样激活上升沿 $x_B =$

$Ex_B - En_B' \times \sqrt{-2 \ln y}$;

(5) 如果前件激活下降沿 $x_A > Ex_A$, 则后件同样激活下降沿 $x_B = Ex_B + En_B' \times \sqrt{-2 \ln y}$ 。

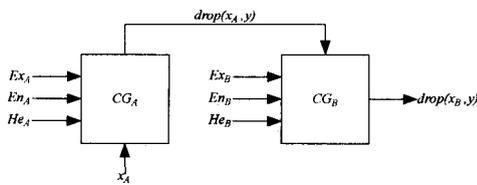


图3 单条件单规则发生器

规则发生器算法同样包含着不确定性,首先对于给定的前件定性概念的定量值 x_A ,得到的确定度 y 带有不确定性;后件云发生器在确定度 y 的控制下,得到一个同样不确定的表示后件定性概念的定量值 x_B 。因此,规则发生器实现了不确定性推理过程中的不确定性的传递。

双条件单规则的前件可以理解为一个二维的定性概念,若将二维前件云发生器与一维后件云发生器相连接,就可构造出双条件单规则发生器,如图4所示。双条件单规则发生器具体算法如下。

算法6 双条件单规则发生器

输入:前件二维定性概念的数字特征 $(Ex_{A1}, Ex_{A2}), (En_{A1}, En_{A2}), (He_{A1}, He_{A2})$ 及定量值 (x_{A1}, x_{A2}) ,后件定性概念的数字特征 (Ex_B, En_B, He_B) 。

输出:满足确定度 y 的后件定性概念的定量值 x_B 。

(1)生成以 En_{A1} 为期望值、 He_{A1} 为均方差的正态随机数 En'_{A1} ;

(2)生成以 En_{A2} 为期望值、 He_{A2} 为均方差的正态随机数 En'_{A2} ;

(3)计算确定度 $y = e^{-\frac{(x_{A1}-Ex_{A1})^2}{2(En'_{A1})^2} - \frac{(x_{A2}-Ex_{A2})^2}{2(En'_{A2})^2}}$;

(4)生成以 En_B 为期望值、 He_B 为均方差的正态随机数 En'_B ;

(5)如果 $x_{A1} \leq Ex_{A1}, x_{A2} \leq Ex_{A2}$, 则 $x_B = Ex_B - En'_B \times \sqrt{-2\ln y}$;

(6)如果 $x_{A1} > Ex_{A1}, x_{A2} > Ex_{A2}$, 则 $x_B = Ex_B + En'_B \times \sqrt{-2\ln y}$;

(7)如果 $x_{A1} \leq Ex_{A1}, x_{A2} > Ex_{A2}$, 则 $y_1 = e^{-\frac{(x_{A1}-Ex_{A1})^2}{2(En'_{A1})^2}}$, $x_{B1} =$

$Ex_B - En'_B \times \sqrt{-2\ln y_1}$, $y_2 = e^{-\frac{(x_{A2}-Ex_{A2})^2}{2(En'_{A2})^2}}$, $x_{B2} = Ex_B + En'_B \times \sqrt{-2\ln y_2}$, $x_B = (x_{B1} + x_{B2})/2$;

(8)如果 $x_{A1} > Ex_{A1}, x_{A2} \leq Ex_{A2}$, 则 $y_1 = e^{-\frac{(x_{A1}-Ex_{A1})^2}{2(En'_{A1})^2}}$, $x_{B1} =$

$Ex_B + En'_B \times \sqrt{-2\ln y_1}$, $y_2 = e^{-\frac{(x_{A2}-Ex_{A2})^2}{2(En'_{A2})^2}}$, $x_{B2} = Ex_B - En'_B \times \sqrt{-2\ln y_2}$, $x_B = (x_{B1} + x_{B2})/2$ 。

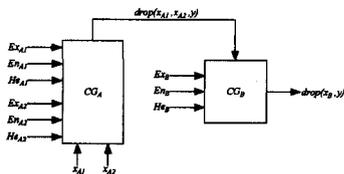


图4 双条件单规则发生器

4 应用实例

电子产品的说明书一般都会注明产品的平均无故障工作时间和产品工作环境的适应范围。产品的平均无故障工作时间是在实验室理想环境下的测试结果,但产品实际工作环境与实验室的理想环境存在较大差异,当产品实际工作环境发生变化后,产品的可靠性会降低,产品的实际无故障工作时间也会减少^[16,17]。我们可通过基于云模型的规则发生器来预测电子产品在实际工作环境中的使用寿命。

某品牌节能灯说明书中有关产品使用寿命和工作环境的描述如下:1. 平均无故障工作时间:6000小时(测试环境为气温20℃,电压220V);2. 工作温度:-25℃~65℃;3. 工作电压:160V~280V。从中看出该产品的使用寿命与气温和电压相关,一般而言,产品在理想工作环境中寿命最长,在工作环境适用范围边界寿命很短,超出工作适用范围则无法工作。

基于上述经验,可将气温和电压作为规则的前件,使用寿命作为规则的后件,得到一个双条件单规则(if 气温,电压 then 使用寿命)。气温、电压和使用寿命都是定性概念,可分别用正态云模型的3个数字特征来描述。产品理想工作环境下的气温20℃、电压220V和使用寿命6000小时分别作为3个定性概念的期望 Ex 值。根据正态云的3En规则^[18]:对定性概念有贡献的定量值,主要落在区间 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$,甚至可忽略此区间外的定量值对定性概念的贡献,因此,对于具有取值范围双边约束的 $[C \min, C \max]$ 定性概念,熵 $En = (C \max - C \min)/6$ 。超熵 He 为比熵 En 低一个数量级的常数,可根据概念的具体物理意义调整。我们得到如下3个定性概念的数字特征:概念“气温”的数字特征为(20, 15, 1);概念“电压”的数字特征为(220, 20, 2);概念“使用寿命”的数字特征为(6000, 2000, 50)。用正向云发生器算法1得到的正态云如图5所示,其中由于产品实际使用寿命低于6000小时,概念“使用寿命”为半正态云。

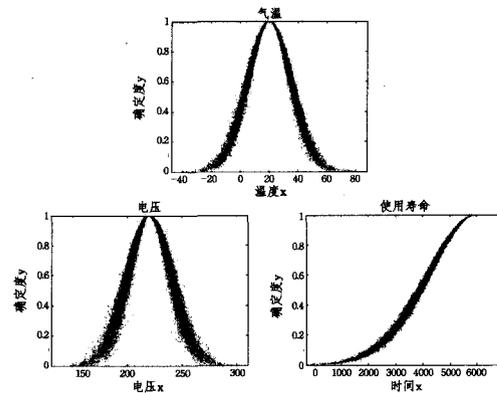


图5 定性概念云图

假设某品牌节能灯实际工作环境为气温0℃、电压250V时,采用云规则发生器预测该环境中的节能灯使用寿命。将(0, 250)作为规则前件定量值输入图4所示的双条件单规则发生器,则算法7具体计算步骤如下:

算法7

(1)输入: $Ex_{A1} = 20, En_{A1} = 15, He_{A1} = 1, Ex_{A2} = 220, En_{A2} = 20, He_{A2} = 2, x_{A1} = 0, x_{A2} = 250, Ex_B = 6000, En_B = 2000, He_B = 50$;

(2)某次计算正态随机数 $En'_{A1} = 13.83$, 正态随机数 $En'_{A2} = 23.35$;

(3)则确定度 $y = e^{-\frac{(x_{A1}-Ex_{A1})^2}{2(En'_{A1})^2} - \frac{(x_{A2}-Ex_{A2})^2}{2(En'_{A2})^2}} = 0.154$;

(4)某次计算正态随机数 $En'_B = 1975$;

(5)后件“使用寿命”只有上升沿的半正态云,则 $x_B = Ex_B - En'_B \times \sqrt{-2\ln y} = 2178$ 小时。说明气温降低、电压不稳缩短了节能灯的使用寿命,与实际情况相符合。

当气温0℃、电压250V时,某次计算采用云推理方法预测出的节能灯的使用寿命为2178小时。同理,只要给定任意其他确定的气温和电压值,就可以通过云推理方法预测出具体的使用寿命值。由于算法6中前件云和后件云的输出结果都是通过随机过程获得的,因此对于同一输入,云推理方法每

(下转第224页)

由表中数据可知,在测试改进的 Himmelblau 函数实验中,SASGSO 算法与 CMPGA 算法一样,在每次运行中都能 100%地发现函数的 4 个极值点。从函数值计算结果相同的有效值来看,CMPGA 算法除了 N1 极值点外,都明显优于 MPES 算法。而 SASGSO 算法计算出的 4 个极值点的函数值都明显大于 CMPGA 算法的计算结果,CMPGA 算法计算出 4 个峰值的最大值为 659.999999970170,比 SASGSO 算法计算出 4 个峰值的最小值 659.999999985761 小 0.000000015591。而且 SASGSO 算法使用的迭代次数为 650,比 CMPGA 算法少了 250 次。在测试 Shekel's Foxholes 函数实验中,SASGSO 算法也和 CMPGA 算法一样每次运行都能 100%地发现函数的 25 个极值点,但是 SASGSO 算法只使用了 1200 次迭代,是 CMPGA 算法迭代次数的 1/15。

在相同的有效值下相比,SASGSO 算法计算出的函数值并不比 MPES 算法差。Shekel's Foxholes 函数有 25 个极值点,是改进的 Himmelblau 函数极值个数的 6 倍;而 SASGSO 算法优化 Shekel's Foxholes 函数所用的迭代次数是 1200,不到优化改进的 Himmelblau 函数的两倍,随着函数峰数目成倍增加而不需要明显增加迭代次数。总体上,SASGSO 算法优化两个测试函数的性能都优于文献中的两种算法。

结束语 针对 GSO 算法优化多模态函数存在的问题,提出了一种自适应步长萤火虫群优化算法。算法中的萤火虫个体根据其邻域分布密集程度自适应调整其移动步长,以达到使用合理的移动步长进行移动。通过实验对比分析表明,SASGSO 算法不仅提高了 GSO 算法的收敛速度和求解精度,还提高了其捕获峰值个数的能力。与其它同类文献算法相比,ASAGSO 算法使用的迭代次数更少,却能找到更精确的解,随着函数峰数目成倍增加而不需要明显增加迭代次数,所以,SASGSO 算法非常适用于解决多模态函数优化及相关工

程、控制、决策中普遍存在的优化问题。

参考文献

- [1] Krishnand K N, Ghose D. Glowworm swarm optimisation; a new method for optimising multi-modal functions[J]. Int. J. Computational Intelligence Studies, 2009, 1(1): 93-119
- [2] Krishnand K N, Ghose D. Glowworm swarm optimisation for simultaneous Capture of mutiple local optima of multimodal functions[J]. Swarm Intell, 2009(3): 87-124
- [3] Krishnand K N, Ghose D. Glowworm swarm based optimization algorithm for multimodal functions with collective robotics applications[J]. Multiagent and Grid Systems, 2006, 2(3): 209-222
- [4] 李敏强, 寇纪淞. 多模态函数优化的协同多群体遗传算法[J]. 自动化学报, 2002, 28(4): 497-504
- [5] 覃俊, 康立山, 陈毓屏. 一种新的求解多峰函数优化问题的动态演化算法[J]. 计算机学, 2004, 31(3): 134-136
- [6] 王湘中, 喻寿益. 多模态函数优化的多种群进化策略[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 285-288
- [7] 郑士芹, 王秀峰. 基于多模态函数优化的改进克隆选择算法[J]. 计算机工程与应用, 2006(3): 15-18
- [8] 腾泓虬, 李春华. 小生境人工免疫算法用于多峰函数优化[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12): 148-150
- [9] 陆青, 梁昌勇, 杨善林, 等. 面向多模态函数优化的自适应小生境遗传算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1): 91-100
- [10] 郑高飞, 王秀峰. 带子群自组织萤火虫算法及其在多模态问题中的应用[J]. 计算机工程, 2006, 32(7): 182-184
- [11] 杨诗琴, 须文波, 孙俊. 用于多峰函数优化的改进小生境微粒群算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1191-1193
- [12] 李莉, 李洪奇, 谢绍龙. 一种有效的多峰函数优化算法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2973-2976

(上接第 211 页)

次得到的输出值都具有不确定性,但所有输出值都在合理范围内上下波动。

结束语 建立在定性规则基础上的不确定推理的核心问题是规则中的定性概念的定量描述。基于概率理论的不确定性推理需要给出规则中定性概念的概率密度函数,这些函数的获取需要很大工作量,影响了概率方法的实际应用。同样模糊推理方法要给出精确的隶属函数,且对于相同输入,都会得到完全相同的输出^[10]。云模型用期望、熵和超熵描述自然语言中的定性概念,简单有效地解决了不确定的定性概念的定量转换问题。在云模型基础上构建的规则发生器描述定性规则同样简单易于理解,且对于相同输入,每次得到的输出值都具有不确定性,但整体上又保持了与模糊推理相同的变化趋势。近年来,不确定性推理方法在智能控制、知识发现与预测等研究领域具有广泛应用。李德毅院士提出的定性、定量转换方法云模型已被国内外同行公认,基于云模型的不确定推理方法为不确定推理研究提供了一条新途径,必将有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 李德毅, 刘常昱, 杜鹤, 等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594
- [2] Bouchon-Neunier B, Valverde L, Yager R R. Uncertain in Intelligent Systems[M]. Amsterdam, New York: North Holland, 1993
- [3] 张博锋, 谭建荣, 蔡青. 通用不确定性推理模型[J]. 模式识别与人工智能, 1999, 12(3): 292-299
- [4] 张文修, 梁怡. 不确定性推理原理[M]. 西安: 西安交通大学出版

社, 1996

- [5] Pearl J. Fusion, propagation, and structuring in belief networks [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29: 241-288
- [6] Kleite G D. Bayesian diagnosis in expert systems[J]. Artificial Intelligence, 1992, 54: 1-32
- [7] Kim H, Swain P H. Evidential reasoning approach to multi-source data classification in remote sensing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1995, 25(8): 1257-1265
- [8] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Information and Computer Science, 1982, 11: 344-356
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353
- [10] 王立新. 模糊系统与模糊控制[M]. 王迎军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [11] Karnik N N, Mendel J M, Liang Q. Type-2 fuzzy logic systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(6): 643-658
- [12] Mendel J M, John R I, Liu F L. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(6): 808-821
- [13] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [14] 李德毅, 孟海军, 史学梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20
- [15] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-33
- [16] 宋远骏, 杨孝宗, 李德毅, 等. 考虑环境因素的计算机可靠性云模型评价[J]. 计算机研究与发展, 2001, 38(5): 631-636
- [17] 宋远骏, 李德毅, 杨孝宗, 等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 74-77
- [18] 刘禹, 李德毅, 张光卫, 等. 云模型雾化特性及在进化算法中的应用 [J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1651-1658