

# 命题对象的空间逻辑运算模型<sup>\*</sup>

毛明毅 何华灿 陈志成

(西北工业大学计算机学院 西安710072)

**摘要** 在现有逻辑系统中,各连接词的运算模型都可以归结为某些“代数算子”,其共同特征是仅考虑了命题所描述集合的代数测度大小,而没有考虑它们在几何空间中的位置关系。文章以“空间位置相关性”为中心,提出了“摸天花板问题”,分析了逻辑运算中存在的几何位置相关性。在“命题对象”、“真值向量”、“空间图像”等概念的基础上,提出了命题对象的空间逻辑运算模型,并结合格分维理论给出了在几何图像中的具体应用形式。本文工作拓展了泛逻辑学中广义相关性的含义,为连接词的运算形式提供了一种新的模型。

**关键词** 泛逻辑,空间逻辑,命题对象,空间位置相关性,运算模型,几何图像

## The Operation Model of Space Logics on Proposition Objects

MAO Ming-Yi HE Hua-Can CHEN Zhi-Cheng

(Computer College of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** In today's logic systems, the operation models of connectives belong to some "algebraic operators". The common characteristic is that they consider only the algebraic measures of sets without the space correlations in the geometrical space. The center idea of the paper is "space correlation". It raises "the problem to touch ceiling", and analyzes the geometrical correlation in logic operations. Based on the conceptions of "proposition object", "truth-value vector" and "space image", authors put forward the operation model of space logics on proposition objects, and give the embodiment of the model in the application of geometrical images under the grid dimension theory. The work enlarges the meanings of general correlation in universal logic, and offers a new kind of model on connective operations.

**Keywords** Universal logic, Space logic, Proposition object, Space correlation, Operation model, Geometrical image

### 1 引言:泛逻辑学中的广义相关性

在现有各类逻辑中,一个基本的出发点在于“试图使用一个或一组代数算子来完成某连接词的逻辑运算”,因此,由于算子的选择不同形成了各种不同的逻辑,泛逻辑的重要思想在于提出了基于三角范数的算子族运算模型<sup>[1]</sup>,把现有各种逻辑算子统一在同一个框架之中,认为它们是广义相关系数  $h$  和广义自相关系数  $k$  取某个具体值情况下的特例。例如:

模糊逻辑的连接词运算模型为<sup>[2,3]</sup>:

$$P_1: \sim P = 1 - P$$

$$P_2: P \wedge Q = \min(P, Q) \text{ and } P \vee Q = \max(P, Q)$$

$$P_3: P \rightarrow Q = \min(1, 1 - P + Q) \text{ and } P \leftrightarrow Q = 1 - |P - Q|$$

在泛逻辑中,当  $k=0$ ,也即不考虑命题真值的误差时  $P_1$  成立(非运算只与  $k$  相关,与  $h$  无关);当  $k=0, h=1$  时  $P_2$  成立;当  $k=0, h=0.5$  时  $P_3$  成立。故模糊逻辑也是泛逻辑所包含的特例。

又如,零级泛等价运算族为:  $Q(x, y, h) = ite\{(1 + |x^m - y^m|)^{1/m} | m \leq 0; (1 - |x^m - y^m|)^{1/m}\}$ , 连接词为“ $\leftrightarrow_k$ ”,在四个点的具体算子为:

扎德等价算子  $Q(x, y, 1) = Q_3 = ite\{1 | x = y; \min(x, y)\}$

概率等价算子  $Q(x, y, 0.75) = Q_2 = \min(x/y, y/x)$

中心等价算子  $Q(x, y, 0.5) = Q_1 = 1 - |x - y|$

突变等价算子  $Q(x, y, 0) = Q_0 = ite\{x | y = 1; y | x = 1;$

1}

泛逻辑是建立在  $h, k$  可变之上的一种柔性逻辑,其对逻辑学的重要贡献在于发现并提出了“命题之间存在广义相关性和广义自相关性”。在已经发表的文献中<sup>[1,4]</sup>,  $h$  是指“命题之间的相生相克关系”,用以描述命题之间的吸引排斥性质,其中各连接词的运算模型是“基于范数算子”的运算模型。

在实际生活中,命题之间的广义相关性通常包含两种类型:一是在性质上的相生相克与吸引排斥关系,二是在几何空间上存在的位置相关性。目前泛逻辑学对第一种类型进行了系统地研究,并已取得重要成果。与第二种类型相关的研究主要涉及空间逻辑,但此方面的研究似乎停滞不前,笔者尚未检索到与逻辑运算相关的文献,分析其原因主要有两个方面:一是目前还没有空间逻辑的具体运算模型,二是对空间逻辑的具体应用还很不明确。本文之前的相关工作涉及到一些应用<sup>[5,6]</sup>,这些应用说明了空间逻辑在某些领域还是很有用的。本文试图从理论上建立一种基于面向对象思想的空间逻辑运算模型,探讨命题对象之间的空间位置相关性。

### 2 命题对象的空间位置相关性

#### 2.1 摸天花板问题

在现实生活中,许多实际问题具有明显的逻辑运算意义,但其逻辑运算很难用某个甚至某族算子来确切表达。例如有下面的问题,暂且称其为“摸天花板问题”:

问题:房间里有两个人,一个大人,一个小孩。大人身高

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金项目(60273087)、北京市自然科学基金项目(4032009)、十五863项目(2002AA412020)资助。毛明毅 博士生,主要研究方向为面向对象的泛逻辑学原理。何华灿 教授,博导,主要研究方向为人工智能基础及其应用,泛逻辑学与不确定性推理。陈志成 博士生,主要研究领域为分形与混沌中的泛逻辑,因特网操作系统。

1.8米,小孩身高1.3米,房间高度3.0米,试问:这两个人能否摸到天花板?

分析:如利用基于代数算子的运算模型,取与运算(二人中身高较低者)为1.3,取或运算(二人中身高较高者)为1.8,都小于3.0,因此可以得出结论:不能摸到天花板。

把上面的问题用集合的语言可描述为:集合 $A$ 的测度为1.8,集合 $B$ 的测度1.3,集合 $C$ 的测度3.0,利用模糊算子 $A \cap B = 1.3, A \cup B = 1.8$ ,集合 $A \cap B$ 与 $A \cup B$ 都不能覆盖集合 $C$ ,因此,其结论也是“摸不到天花板”。

但是这里“不能摸到天花板”的结论隐含着前提:“二人都站在地板上”。而有一种情况是大人抱着小孩,或小孩站在大人头上,或爬到某个箱子上,此时就有可能摸到天花板。假设天花板上的灯泡坏了需要更换,则它们总会想办法取下坏灯泡,更换新灯泡的,于是其结论总应该是肯定的。

这里,我们需要注意这样两个事实:

①数值1.8、1.3、3.0都不在区间 $[0,1]$ 之上,房间高度为3.0米,身高也肯定在 $[0,3]$ 之间,因此合适的真值空间可以取为 $[0,3]$ ,显然,在 $[0,3]$ 直接进行推理比在 $[0,1]$ 上进行推理更为方便,而且命题的物理意义更为确切。当然也可以用把它们变换到 $[0,1]$ 之上再进行推理,但此时命题真值的物理意义已经发生了改变。

②使用集合与代数算子的逻辑运算仅仅考虑了“集合的测度大小”,而没有考虑集合之间的“空间位置关系”。事实上,如果 $A=[0,1.8], B=[1.8,3.1]$ ,尽管二者的测度大小仍为1.8和1.3,但 $A \cup B$ 的测度则为3.1。

第一个事实要求我们建立一种基于“实际数据”的推理逻辑,其真值域空间不一定等于 $[0,1]$ ,而是包含数据定义域的某个 $[a,b]$ 区间上的连续值基逻辑。第二个事实要求考虑命题所描述对象之间以及所在参考空间之间的几何位置关系,而不能简单地运用某个逻辑算子来进行逻辑运算。

## 2.2 空间位置相关性

**定义1** 在客观实际的推理问题中,命题所描述对象之间,以及命题与参考空间之间往往存在几何位置上的关系,称这种关系为“空间位置相关性”。

在泛逻辑中,广义相关系数 $h$ 描述了命题之间的吸引排斥关系,这种关系同样也在集合的空间位置关系中得到反映。当用分形理论来研究几何图像的分维时,通常涉及图像之间的各种逻辑比较,这时需要考虑图像之间的几何空间关系。

**定义2** 对于连接词的运算模型而言称仅仅考虑集合的代数测度大小的算子为“代数算子”,如果某算子还考虑了命题所描述的空间对象与参考空间的几何位置关系,则称其为“空间算子”。

**定义3** 称基于代数算子运算模型的逻辑为代数逻辑,称基于空间算子运算模型的逻辑为空间逻辑。

**定义4** 在空间逻辑中,引入面向对象的思想,把命题及其所描述的对象统称为“命题对象”。命题对象主要包含两个方面:一是命题的“真值向量”,二是对象的“空间图像”,如图1所示。

在空间逻辑中,在考虑了空间位置关系的前提下,如果某些命题对象的某些属性的逻辑运算可以退化为某类特定逻辑的算子运算,则其可视为空间逻辑的特例,这并不影响空间逻辑的正常运算。

对于上述定义,主要理解以下几点:

(1)“参考空间”与“命题对象”是两个重要的概念,逻辑运

算必须在某个参考空间中进行,而命题不仅仅是一个真值,而是把其看成一个对象来考虑。

(2)现有的模糊逻辑、数理逻辑、概率逻辑,以及几种主要的测度(概率测度、必然测度、似然测度、可信测度),其推理所用的连接词都是“代数算子”,泛逻辑中“基于范数算子”的连接词运算模型,其实质也是一种“代数算子”,因为它们没有考虑命题对象之间的空间位置关系。

(3)模糊逻辑的“代数算子”是一种确定性运算模型,对于泛逻辑而言,当 $h, k$ 确定时,其连接词的运算模型也是确定的。“代数算子”是“空间算子”在某种特殊空间位置时的特例。

## 3 命题对象的空间逻辑运算模型

### 3.1 空间逻辑运算模型

**定义5** 如图1所示,称如下的逻辑运算模型为命题对象的空间逻辑运算模型:

(1)逻辑运算在某个参考空间中来考虑,这个参考空间根据实际问题的研究论域进行选择,它可以是某个几何空间,也可以是某个数值集合,它通常是包含所有考察对象的全集,但也可以是其它的集合。

(2)命题真值是由一组数据组成的多维向量,向量中的各个数值用以描述命题对象的相应属性,这里的“属性”是指“具有逻辑运算意义的、在研究论域之内的那些属性”。真值域的基空间是任意的 $[a,b]$ 基空间(包括无穷空间),向量中的各数值在其所描述属性的定义域中取值。基空间为 $[0,1]$ 和命题真值仅是单个数据的情况是其特例。

(3)连接词的运算模型定义在对命题对象的操作之上,如图1所示:命题对象 $P$ 与命题对象 $Q$ 的运算结果是产生新的命题对象 $R$ ,具体操作是:首先把真值向量“上升”到几何空间中,根据真值向量中的各个属性值“还原或构造”出相应的空间图像 $P, Q$ ;然后在几何空间中对空间图像 $P, Q$ 进行“非、与、或、等价、平均、组合”等逻辑运算,此时需要考虑空间图像之间、空间图像与参考空间之间的几何位置关系,对于泛逻辑运算,同时还要考虑命题对象之间的相生相克关系,从而得到一个新的空间图像 $R$ ;最后求出新对象 $R$ 关于真值向量的各个属性值,然后再从几何空间中“回落”下来。这就完成了一次逻辑运算。

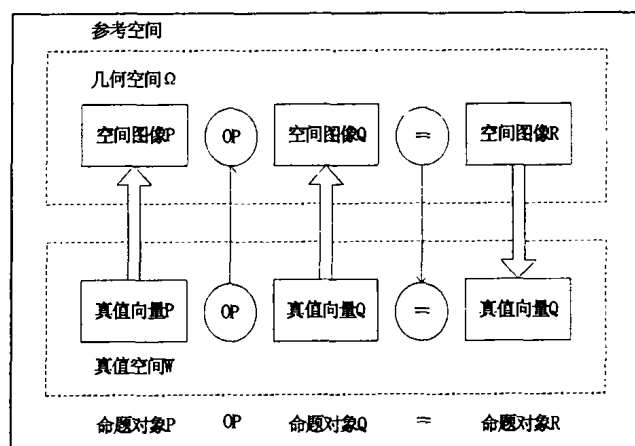


图1 命题对象的空间逻辑运算模型示意图

### 3.2 连接词的统一表达式

对于命题对象的空间逻辑运算模型,其连接词的统一表达式为:

$$Q = F(OP_{(A,B)}(F^{-1}(P_1), F^{-1}(P_2), \dots, F^{-1}(P_n)))$$

其中:  $P$  为命题对象的真值向量, 包括参考空间、命题对象的位置矢量、属性的逻辑真值等; 每个命题对象唯一对应一个空间图像, 函数  $F^{-1}(P)$  表示根据真值向量  $P$  构造出对应的空间图像,  $OP$  表示对相关空间图像的逻辑操作, 它相当于“命题连接词”, 其范围包括但远远超过“与或非、蕴涵”等经典逻辑连接词,  $OP$  操作不仅考虑空间图像在代数上的测度大小, 还要考虑各相互间的几何位置关系, 经过  $OP$  操作之后得到一个新命题对象的空间图像  $Q$ , 函数  $F(x)$  则表示根据真值向量中的各项, 把新图像表示出来, 从而得到新命题对象的真值向量  $Q$ 。其中:  $h, k$  分别为泛逻辑中的广义相关系数和广义自相关系数,  $F^{-1}(x)$  与  $F(x)$  表示两个相反的操作过程, 而不是纯数学意义上的互逆运算。

#### 4 空间逻辑运算模型在几何图像应用中的具体形式

对于命题对象的空间逻辑运算模型, 其重要的应用领域就是关于任意几何图像的空间逻辑运算, 本节探讨这个问题。

##### 4.1 几何图像的空间逻辑运算模型

在上述统一模型中, 略写  $k, h$ , 则各连接词的运算为:

非运算:  $NOT(P) = \sim P = F(\sim_{OP}(F^{-1}(P)))$

与运算:  $AND(P, Q) = F((F^{-1}(P) \wedge_{OP}(F^{-1}(Q)))$

或运算:  $OR(P, Q) = F((F^{-1}(P) \vee_{OP}(F^{-1}(Q)))$

蕴涵运算:  $I(P, Q) = F((F^{-1}(P) \rightarrow_{OP}(F^{-1}(Q)))$

等价运算:  $E(P, Q) = F((F^{-1}(P) \leftrightarrow_{OP}(F^{-1}(Q)))$

平均运算:  $M(P, Q) = F((F^{-1}(P) \oplus_{OP}(F^{-1}(Q)))$

组合运算:  $C(P, Q) = F((F^{-1}(P) \odot_{OP}(F^{-1}(Q)))$

对于任意的几何图像, 我们可以根据上述模型和格分维理论来定义其空间逻辑运算模型, 格分维是分形维数的一种, 它与格图像和单位格测度  $\delta$  有关, 格分维理论给出了求解任意几何图像(不仅指具有分形特性的分形图像)分形维数的方法, 有关概念详见文[7]。在本文中, 具体而言有:

命题对象即指在一定参考空间中的几何图像。

命题对象  $P$  的真值向量表示为  $P(S, V, \delta, D)$ ; 其中,  $S$  表示  $P$  所在的参考空间,  $V$  表示  $P$  在  $S$  中的位置矢量,  $\delta$  表示求  $D$  时选用的单位格测度,  $D$  表示  $P$  在  $S$  中的格分维。如果把“任意几何图像”限定在“计算机图像”之内, 则由于计算机图像的最小分辨率是一个像素, 因此真值向量中的  $\delta$  就取一个像素。

命题对象  $P$  的空间图像就是由其真值向量所描述信息构造出来的格图像。因此, 这里的空间逻辑运算就变成对格图像的“非、与、或、蕴涵、等价、平均、组合”等运算。

至此, 我们可以给出如下定义:

**定义6** 在参考空间中, 对于任意的命题对象, 称由其真值向量直接构造所得的格图像为“原空间图像”, 简称“原图像”, 如直接对未经任何  $OP$  操作的“原图像”求格分维, 称为“空间原运算”。

**定义7** 在参考空间中, 对原图像的像素进行取反操作得到“补空间图像”, 简称“补图像”, 求补图像的格分维称为“空间非运算”。对于二维图像而言, 把像素中的黑点变为白点, 把白点变为黑点, 即可得到“补图像”。对于 RGB 三维图像, 取各像素点的异或值可得补图像。

**定义8** 在参考空间中, 对两个原图像的像素进行与操作得到“与空间图像”, 简称“与图像”, 求与图像的格分维称为“空间与运算”。

同理, 对两个原图像的像素分别进行或(蕴涵、等价、平均、组合)运算, 可以得到相应的“或(蕴涵、等价、平均、组合)空间图像”, 简称为“或(蕴涵、等价、平均、组合)图像”, 分别求其格分维则称为“空间或(蕴涵、等价、平均、组合)运算”。

在意义明确时, 以上所有运算的名称均可以省略“空间”二字。以上所有运算的操作对象都是空间图像的像素, 也即格图像的像素。显然, 由于格图像的分形维数不一定在  $[0, 1]$  之间(比如, 二维图像的分形维数通常大于1), 因此像素之间的运算公式应该采用基于任意  $[a, b]$  区间的分形逻辑连接词运算模型<sup>[7]</sup>。

例如: 对两幅图像进行平均运算, 设像素点为 RGB 格式, 则其真值基空间应选为  $[0, 255 \times 255 \times 255]$ , 运算模型为<sup>[7]</sup>:

$$M(x, y, h, k) = b - [((b-x)^h + (b-y)^h) / 2]^{1/h}$$

如取  $k=0, h=0$  则简化为代数平均算子:  $M = (x+y)/2$ , 即  $OP$  操作表示求两个像素点颜色值的代数平均值; 如  $h, k$  为其它值, 则  $OP$  操作便代表其它的算子。此外, 由于像素点都是整数, 我们可以约定在  $OP$  操作之后再取整。

##### 4.2 几何图像的空间逻辑运算步骤

几何图像的空间逻辑运算主要有以下几个步骤:

①选取参考空间和单位格测度, 确定命题对象及其真值向量;

②根据真值向量所描述的各属性构造出命题对象的空间图像, 也即格图像;

③依照  $[a, b]$  区间上的分形逻辑运算模型, 对空间图像进行  $OP$  操作得到新图像;

④依照格分维理论求取新图像的格分维及其它属性值, 得到新的真值向量。

#### 5 摸天花板问题求解

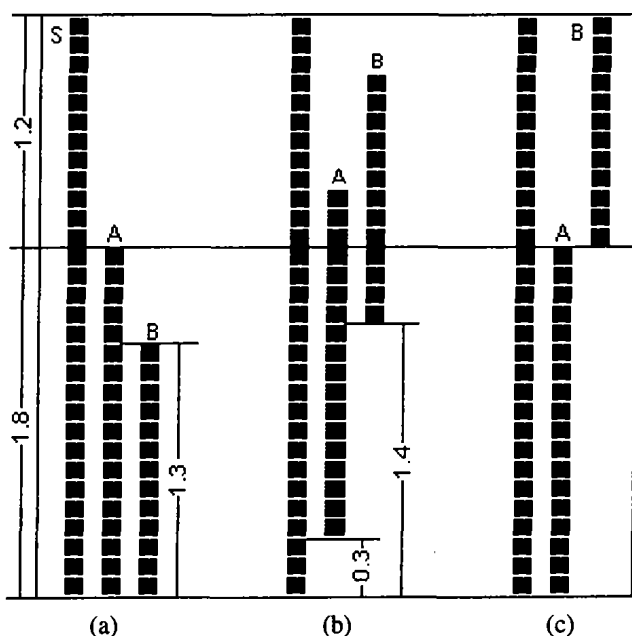


图2 摸天花板问题的空间图像

**例** 分析前面提到的“摸天花板问题”, 依照上述四个步骤有:

①选取参考空间为  $[0, 3]$ , 设单位格测度  $\delta$  大小为1米, 命题对象包括房间和两个人, 设两个人均站在地板上, 其真值向量  $P(S, V, \delta, D)$  则可具体化为:

$$A = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.8 \rangle$$

$$B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.3 \rangle$$

②由真值向量构造的空间图像如图2(a)所示,其中每个小方格代表0.1米高度, $\delta$ 为其10倍。

③任意 $[a, b]$ 区间上的与或运算模型为<sup>[7]</sup>:

$$\text{与运算: } (b-a)[(\max(a, ((x-a)^m + (y-a)^m)/(b-a)^{m-1} + 2a-b) - a)/(b-a)]^{1/m} + a$$

$$\text{或运算: } b + a - \{ (b-a)[(\max(a, ((b-x)^m + (b-y)^m)/(b-a)^{m-1} + 2a-b) - a)/(b-a)]^{1/m} + a \}$$

在取  $h=1.0$  和  $k=0.0$  时,上述与或运算模型可以简化为 Zadeh 算子。

④然后再利用格分维理论,考虑空间图像的几何位置关系,我们可以得到:

$$C = A \wedge B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.8 \rangle \wedge_{OP} \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.3 \rangle = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.3 \rangle$$

$$D = A \vee B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.8 \rangle \vee_{OP} \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.3 \rangle = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 1.8 \rangle$$

新的命题对象  $C$  和  $D$  的真值向量的含义是:在高度为3米的房间内,两个人的高度进行逻辑意义上的与或运算之后,从地板算起,得到的新的高度是1.3米和1.8米。由于二者都小于3.0米,因此得到“不能摸到天花板”的结论。

但是,如果二者并不是都站在地板上,例如:假设小孩爬到大人头上并站起来(杂技演员很容易实现),或者小孩站在高度与大人身高相当的某箱子上,于是真值向量  $B$  表示为:

$$B = \langle [0, 3.0], 1.8, 1.0, 1.3 \rangle$$

此时的空间图像如图2(c)所示,如再利用格分维理论和 $[a, b]$ 区间上的与或运算模型,则可以求得: $A \wedge B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 0.0 \rangle$ ,  $A \vee B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 3.0 \rangle$ ,与运算得到的新的高度值为0.0说明  $A$  与  $B$  没有相交之点,但或运算得到3.0,已经达到天花板高度,这说明小孩可以摸到天花板。

说明:(1)单就高度而言,集合  $A \cup B = 3.1 > 3.0$ ,由于逻辑运算的封闭性,故这里限制在 $[0, 3.0]$ 之间,因此  $A \vee B = \langle [0, 3.0], 0.0, 1.0, 3.0 \rangle$ 。当然,我们还可以把 $[0, 3.0]$ 放大到 $[0, 4.0]$ 等,此时房间天花板可以当成除大人、小孩之外的第三个命题对象来考虑。

(2)在图2中,介于(a)、(c)之间还可能有(b)等其它情况,在(b)中二人离地板均有一定高度: $A = \langle [0, 3.0], 0.3, 1.0, 1.8 \rangle$ ,  $B = \langle [0, 3.0], 1.4, 1.0, 1.3 \rangle$ ;另外还可以选择除与或运算之外的其它逻辑运算模型,如平均、组合运算,但只要确知  $A, B$  在几何空间中的位置关系,我们就可以根据选择的运算模型进行求解。

**讨论与小结** 近年来,逻辑学在理论上和应用上都得到快速发展,在理论上主要是提出了柔性逻辑的思想,从而产生了泛逻辑学<sup>[1]</sup>,在应用上主要表现在很多领域都出现了相应的逻辑推理模型,如用于电子商务安全性分析的 Kailar 逻辑等<sup>[8,9]</sup>。诚然,在不同领域中,即使是同一逻辑,由于考虑因素与参数不同,其连接词的运算模型不尽相同。基于本文的内容,小结为以下几点:

(1)由于在现有的逻辑推理系统中,其连接词主要是基于代数算子的运算模型。本文提出的考虑命题对象的空间位置

关系的逻辑运算模型,在理论上和应用上,它既是一种新的思想方法,也是对现有逻辑中连接词运算模型的补充与完善。

(2)基于代数算子的运算模型是“把实际问题进行逻辑简化的推理”模型,而基于空间算子的运算模型则是“把简化问题还原为客观事实的推理”模型。前者主要强调集合(对象)之间的测度大小关系,在泛逻辑中也考虑相互间的吸引排斥相关性,体现更多的代数性质;后者除此之外,还重点强调集合(对象)在空间位置上的相互关系,体现更多的几何性质。

(3)本文在逻辑推理中引入了面向对象的思想,但这里仅是给出了与命题对象相关的部分说明,有关“面向对象的泛逻辑推理系统”还正在研究之中,其中涉及的分形逻辑的相关概念在文[7]中定义。

目前,空间逻辑运算模型已经应用在分形图像的逻辑运算之中,笔者相关的研究是在复杂系统与分形领域建立一种相关性推理系统,目前已经取得一定进展<sup>[5~7,10]</sup>。本文从一个简单的“摸天花板问题”谈起,提出空间逻辑运算模型,旨在说明考虑命题对象之间的空间几何关系也是相关性推理的一个重要方面。由于这是一种新的思想方法,文中部分名词还有待完善,其最终目的在于为今后的基于客观现实的分形混沌等复杂系统推理奠定基础。

**致谢:**本文工作受国家自然科学基金项目(60273087)、北京市自然科学基金项目(4032009)、十五863项目(2002AA412020)资助,相关工作得到教研室许多老师的有益建议与热忱帮助,在此表示感谢。

## 参考文献

- 何华灿,王华,刘永怀,等. 泛逻辑学原理[M]. 北京:科学出版社, 2001
- Zadeh L A. A Theory of Approximate Reasoning. In: Hayes J, Michie D, Mikulich L I, eds. Machine Intelligence [M]. Halstead Press, New York, 1979, 19: 149~194
- Zadeh L A, Zimmermann H J. On Computation of The Compositional Rule of Inference Under Triangular Norms [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 51: 267~275
- He Huacan, Ai Lirong, Wang Hua. Uncertainties and the Flexible Logics [C]. IEEE Proc. of 2003 Intl. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, vol4/5, Xi'an, 2003, 11: 2573~2578
- 陈志成,何华灿,毛明毅,刘峰. 基于格图像的康托集分维与泛逻辑运算[J]. 计算机科学, 2004, 30(4)
- 毛明毅,何华灿,陈志成,葛敬亚. 分形图像的泛逻辑运算模型. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 23~56
- 陈志成. 复杂系统中分形混沌与逻辑的相关性推理研究[D]. 西安: [西北工业大学博士学位论文]. 2004
- Kailar R. Accountability in electronic commerce protocols [C]. IEEE Transaction on Computer Systems, 1990, 8(1): 18~36
- 陈建中,刘大有,等. 支持多 Agent 通信的扩展 BDI 逻辑[J]. 软件学报, 1999, 10(7): 776~784
- Chen Zhicheng, He Huacan, Mao Mingyi. Correlation Reasoning of Complex System Based on Universal Logic [C]. IEEE Proc. of 2003 Intl. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, vol3/5, Xi'an, 2003, 11: 1831~1835