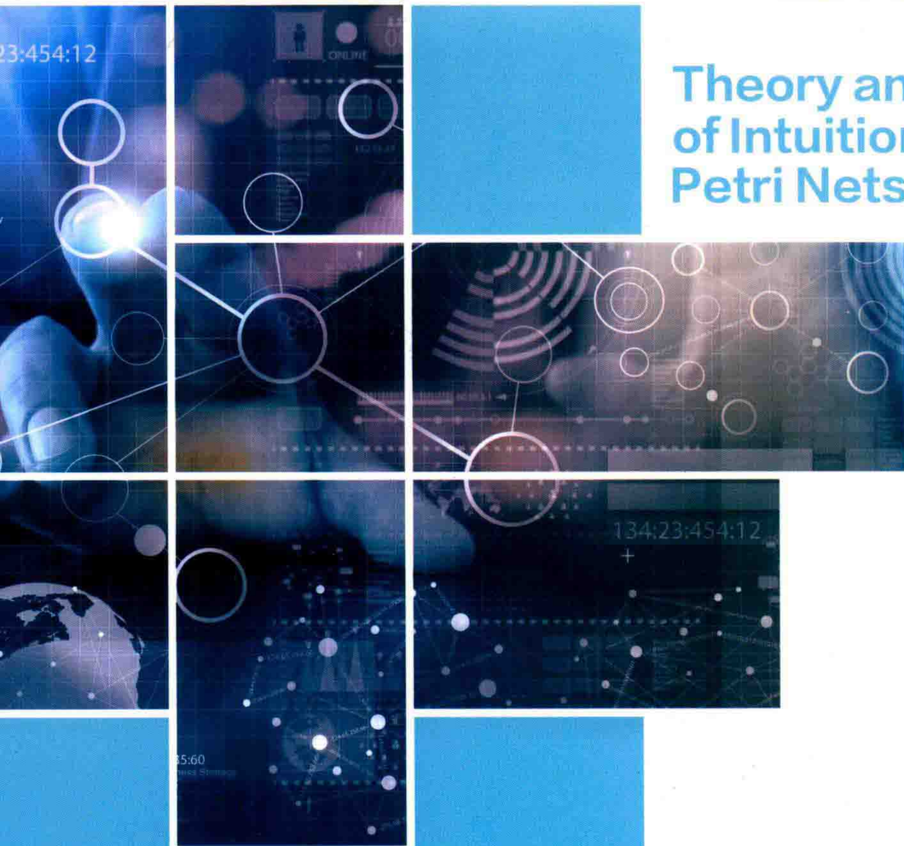
直觉模糊Petri网理论及应用

Theory and Application of Intuitionistic Fuzzy Petri Nets



申晓勇　雷　阳
孟飞翔　王亚男　著

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

直觉模糊 Petri 网理论及应用

Theory and Application of Intuitionistic Fuzzy Petri Nets

申晓勇　雷　阳
孟飞翔　王亚男　著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍直觉模糊 Petri 网理论及其在智能信息系统等领域中的应用。全书共 9 章，第一章介绍模糊集、直觉模糊集、Petri 网、模糊 Petri 网等基础知识；第二章介绍基于直觉模糊集的不确定时空关系；第三章介绍直觉模糊 Petri 网模型及其参数优化方法；第四章介绍基于直觉模糊 Petri 网的知识表示和推理；第五章介绍基于加权直觉模糊 Petri 网的不确定性推理；第六章介绍基于反向推理的 IFPN 推理模型简化方法；第七章介绍基于直觉模糊 Petri 网的敌战术意图识别方法；第八章介绍基于 IFTPN 的防空 C^4ISR 指挥决策系统建模与分析；第九章介绍基于 IFPN 的弹道目标识别方法。

本书可作为高等院校计算机、自动化、电子、信息、管理、控制、系统工程等专业的高年级本科生或研究生智能信息处理类课程的教材或教学参考书，也可供从事智能信息处理、智能信息融合、智能决策等研究的教师、研究生及科技人员自学或参考。

图书在版编目(CIP)数据

直觉模糊 Petri 网理论及应用/申晓勇等著. —西安：西安电子科技大学出版社，2018.12
ISBN 978-7-5606-5113-2

Ⅰ. ① 直…　Ⅱ. ① 申…　Ⅲ. ① Petri 网—研究　Ⅳ. ① TP393.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 236299 号

策划编辑　戚文艳
责任编辑　张倩
出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)
电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　　编　710071
网　　址　www.xduph.com　　电子邮箱　xdupfxb001@163.com
经　　销　新华书店
印刷单位　陕西利达印务有限责任公司
版　　次　2018 年 12 月第 1 版　2018 年 12 月第 1 次印刷
开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印张 12
字　　数　278 千字
印　　数　1～3000 册
定　　价　32.00 元
ISBN 978-7-5606-5113-2/TP
XDUP　5415001-1

前言

模糊集(Fuzzy Sets)理论由扎德(L. A. Zadeh)教授所创立。模糊集(合)是对经典的康托尔(Cantor)集合的扩充和发展。在语义描述上，经典集(合)只能描述"非此即彼"的"分明概念"，而模糊集则可以扩展描述外延不分明的"亦此亦彼"的"模糊概念"。作为模糊集扩充形式的直觉模糊集，可以扩展描述中立(犹豫)的"非此非彼"的"模糊概念"。随着模糊信息处理技术的发展，模糊集理论在逻辑推理、模式识别、控制、优化、决策等领域得到广泛应用，取得了举世公认的成就。同时，由于模糊集理论及其应用研究已渐趋成熟，其局限性也已逐渐显现，所以国内外学者的研究不约而同地转向对模糊集理论的扩充和发展，相继出现了各种拓展形式，如：直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Sets，IFS)、L-模糊集、区间值模糊集、Vague集等理论。这种情形，既反映出模糊集理论研究与应用的活跃态势，又反映出客观对象的复杂性对于应用研究的反作用。在这诸多的拓展形式中，直觉模糊集理论的研究最为活跃，也最富有成果。

直觉模糊集理论作为Zadeh模糊集理论的重要扩充和发展，由于增加了一个新的属性参数——非隶属度函数，因而在描述客观世界的模糊性时，不仅可以描述支持和反对的状态，而且可以描述中立的状态。相对于ZFS(Zadeh模糊集)理论，IFS理论在描述客观世界时更全面、更细腻，再加上IFS理论具有较好的结合性，因此被广泛运用于解决不确定性问题。Petri网作为优秀的建模和分析工具，不仅能以清晰的图形形式表示系统的结构，而且可以准确地描述系统的异步并发等动态行为，被广泛用于人工智能等领域。模糊Petri网是在基本Petri网的基础上扩充模糊处理能力而得到的。

为此，针对现有模糊Petri网隶属度单一的缺陷，本书将IFS理论与Petri网相结合，通过加入权重、时间、空间等因素，构建直觉模糊Petri网、加权直觉模糊Petri网、直觉模糊时间Petri网等模型，给出形式化推理算法和反向推理算法，并将其引入防空C^4ISR指挥决策系统领域，以解决敌意图识别、C^4ISR指挥决策时延计算、弹道中段目标识别等问题。

全书共9章，第一章介绍模糊集、直觉模糊集、Petri网、模糊Petri网等基础知识；第二章介绍基于直觉模糊集的不确定时空关系；第三章介绍直觉模糊Petri网模型及其参数优化方法；第四章介绍基于直觉模糊Petri网的知识表示和推理；第五章介绍基于加权直觉模糊Petri网的不确定性推理；第六章介绍基于反向推理的IFPN推理模型简化方法；第七章介绍基于直觉模糊Petri网的敌战术意图识别方法；第八章介绍基于IFTPN的防空C^4ISR指挥决策系统建模与分析；第九章介绍基于IFPN的弹道目标识别方法。

本书作为一本系统介绍直觉模糊 Petri 网理论及其在智能信息处理系统中应用的著作，其中部分内容取自作者研究团队近年来发表的学术论文和硕博论文，是作者系列研究成果的汇集，还有部分内容取自研究过程中所参阅学习的有关资料。在本书的撰写过程中，还参考了国内外大量的文献资料，众多学者们的研究成果是本书不可或缺的素材，在此一并对他们致以诚挚的感谢。特别要诚挚感谢西安电子科技大学出版社戚文艳老师，正是她的勤谨工作，才使本书得以呈现给读者。本书的出版得到“军队2110 工程”建设项目资助。

本书内容新颖，逻辑严谨，语言通俗，理例结合，注重基础，面向应用，可作为高等院校计算机、自动化、信息、管理、控制、系统工程等专业的本科生或研究生智能信息处理类课程的教材或教学参考书，也可供从事智能信息处理、智能信息融合、智能决策等研究的教师、研究生以及科研和工程技术人员自学或参考。

本书由申晓勇博士主编、策划并编撰，雷阳博士、王亚男博士校核了其中各个章节内容。全书由申晓勇博士(第 2、3、7、8 章)、雷阳博士(第 1 章)、孟飞翔博士(第 4、5、6、9 章)共同编写。在此，特别感谢雷英杰教授，他为本书的出版提供了很多宝贵的意见。

需要说明的是，直觉模糊集是近年来新兴起的研究领域，其理论及应用研究受到国内外众多学者关注，成为当前研究的热点领域，发展很快。本书汇集的研究成果只是冰山一角，只能起抛砖之效，加之作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

作　者

2018 年 10 月

目录

MULU

第一章　基础知识

本章介绍后续章节要用到的一些基础知识，主要包括：模糊集、直觉模糊集、Petri 网、模糊 Petri 网等。

1.1　模　糊　集

德国数学家康托尔(Cantor)于 19 世纪末创立了集合论，现称其为经典集合论。在康托尔集合论中，对于论域中的任何一个对象(元素)，它与集合之间的关系只能是属于或者不属于的关系，即一个对象(元素)是否属于某个集合的特征函数的取值范围被限制为 0 和 1 两个数。这种二值逻辑已成为现代数学的基础。

人们在从事社会生产实践、科学实验的活动中，大脑形成的许多概念往往都是模糊的。这些概念的外延是不清晰的，具有亦此亦彼性。例如，"肯定不可能""极小可能""极大可能"等，只用经典集合已经很难刻画如此多的模糊概念了。随着社会和科学技术的发展，人们在对某个事情或事件进行判断、推理、预测、决策时，所遇到的大部分信息常常是不精确、不完全或模糊的，这就要求人们在计算机中模拟人的智能行为时，计算机能够处理这类信息。为此，在康托尔集合论的基础上，美国加利福尼亚大学控制论专家 Zadeh 教授于 1965 年发表了关于模糊集合的第一篇开创性论文，由此建立了模糊集理论。在模糊集中，一个对象(元素)是否属于某个模糊集的隶属函数(特征函数)的取值范围是[0，1]，这就突破了传统的二值逻辑的束缚。模糊集理论使得数学的理论与应用研究范围从精确问题拓展到了模糊现象的领域。模糊集理论在近代科学发展中有着积极的作用，它为软科学(如经济管理、人工智能、心理教育、医学等)提供了数学语言与工具；它的发展使计算机模仿人脑对复杂系统进行识别判决得以实现，提高了自动化水平。1975 年，Mamdani 和 Assilian 创立了模糊控制器的基本框架，并将模糊控制器用于控制蒸汽机。这是关于模糊集理论的另一篇开创性文章，它标志着模糊集理论有其实际的应用价值。

近年来兴起的模糊推理方法是针对带有模糊性的推理而提出的，模糊控制理论的基础核心就是模糊推理理论。通过模糊集表示模糊概念，Zadeh 于 1973 年提出了著名的推理合成规则算法，即 CRI(Compositional Rule of Inference)算法。随后，Mamdani 和 Zimmermann 分别对 CRI 方法做了进一步的讨论。模糊推理一经提出，立即引起了工程技术界的关注。20 世纪 70 年代以后，各种模糊推理方法纷纷被提出，并被应用于工业控制与家电的制造中，取得了很大的成功。

模糊集理论的核心思想是把取值仅为 1 或 0 的特征函数扩展到可在闭区间[0，1]中任意取值的隶属函数，而把取定的值称为元素 x 对集合的隶属度。下面简要介绍模糊集的基本概念。

定义 1.1(模糊集) 设 U 为非空有限论域，所谓 U 上的一个模糊集 A，即一个从 U 到 $[0,1]$ 的函数 $\mu_A(x):U\to[0,1]$，对于每个 $x\in U$，$\mu_A(x)$ 是 $[0,1]$ 中的某个数，称为 x 对 A 的隶属度，即 x 属于 A 的程度，称 $\mu_A(x)$ 为 A 的隶属函数，称 U 为 A 的论域。

如给 5 个同学的性格稳重程度打分，按百分制给分，再除以 100，这样给定了一个从域 $X=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ 到 $[0,1]$ 闭区间的映射，即

$$x_1: 85\text{ 分}, \quad A(x_1)=0.85$$
$$x_2: 75\text{ 分}, \quad A(x_2)=0.75$$
$$x_3: 98\text{ 分}, \quad A(x_3)=0.98$$
$$x_4: 30\text{ 分}, \quad A(x_4)=0.30$$
$$x_5: 60\text{ 分}, \quad A(x_5)=0.60$$

这样就确定出一个模糊子集 $A=(0.85, 0.75, 0.98, 0.30, 0.60)$。

模糊集完全由隶属函数所刻画，$\mu_A(x)$ 的值越接近于 1，表示 x 隶属于模糊集合 (A) 的程度越高；$\mu_A(x)$ 的值越接近于 0，表示 x 隶属于模糊集(合) A 的程度越低；当 $\mu_A(x)$ 的值域为 $\{0,1\}$ 时，A 便退化为经典集(合)，因此可以认为模糊集(合)是普通集合的一般化。

模糊集可以表示为以下两种形式：

(1) 当 U 为连续论域时，U 上的模糊集 A 可以表示为

$$A=\int_U \mu_A(x)/x, x\in U$$

(2) 当 $U=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 为离散论域时，U 上的模糊集 A 可以表示为

$$A=\sum_{i=1}^{n}\mu_A(x_i)/x_i,\ x_i\in U$$

定义 1.2(模糊集的运算) 若 A、B 为 X 上的两个模糊集，则它们的和集、交集和余集都是模糊集，其隶属函数分别定义为

$$(A\vee B)(x)=\max(A(x), B(x))$$
$$(A\wedge B)(x)=\min(A(x), B(x))$$
$$A^C(x)=1-A(x)$$

关于模糊集的和、交等运算，可以推广到任意多个模糊集中去。

定义 1.3(λ截集) 若 A 为 X 上的任一模糊集，对任意 $0\leqslant\lambda\leqslant 1$，记 $A_\lambda=\{x|x\in U, A(x)\geqslant\lambda\}$，称 A_λ 为 A 的λ截集。

A_λ 是普通集合，而不是模糊集。由于模糊集的边界是模糊的，所以如果要把模糊概念转化为数学语言，需要选取不同的置信水平λ$(0\leqslant\lambda\leqslant 1)$来确定其隶属关系。λ截集就是将模糊集转化为普通集的方法。模糊集 A 是一个具有游移边界的集合，它随λ值的变小而增大，即当 $\lambda_1<\lambda_2$ 时，有 $A_{\lambda_1}\subset A_{\lambda_2}$。

对任意 $A\in F(U)$，称 A_1($\lambda=1$ 时 A 的 λ 截集)为 A 的核，称 $\sup p(A)=\{x|A(x)>0\}$ 为 A 的支集。

模糊关系是模糊数学的重要概念。普通关系强调元素之间是否存在关系，模糊关系则可以给出元素之间的相关程度。模糊关系也是一个模糊集合。

定义 1.4(模糊关系) 设 U 和 V 为论域，则 $U\times V$ 的一个模糊子集 $\boldsymbol{R}$ 称为从 U 到 V 的一个二元模糊关系。

对于有限论域 $U=\{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$，$V=\{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$，$U$ 对 V 的模糊关系 $\boldsymbol{R}$ 可以用一个矩阵来表示：

$$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{m\times n}, \ r_{ij}=\mu_R(u_i, v_j)$$

隶属度 $r_{ij}=\mu_R(u_i, v_j)$ 表示 u_i 与 v_j 具有关系 $\boldsymbol{R}$ 的程度。特别地，当 $U=V$ 时，$\boldsymbol{R}$ 称为 U 上的模糊关系。如果论域为 n 个集合(论域)的直积，则模糊关系 $\boldsymbol{R}$ 不再是二元的，而是 n 元的，其隶属函数也不再是两个变量的函数，而是 n 个变量的函数。

定义 1.5(模糊关系的合成) 设 $\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{Q}$ 分别是 $U\times V$、$V\times W$ 上的两个模糊关系，$\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{Q}$ 的合成是指从 U 到 W 上的模糊关系，记为 $\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{Q}$，其隶属函数为

$$\mu_{R\circ Q}(u, w)=\bigvee_{u\in V}(\mu_R(u, v)\wedge\mu_Q(v, w))$$

特别地，当 $\boldsymbol{R}$ 是 $U\times U$ 的关系，有

$$\boldsymbol{R}^2=\boldsymbol{R}\circ\boldsymbol{R}, \quad \boldsymbol{R}^n=\boldsymbol{R}^{n-1}\circ\boldsymbol{R}$$

利用模糊关系的合成，可以推论事物之间的模糊相关性。

模糊集理论最基本的特征是：承认差异的中介过渡。也就是说，承认渐变的隶属关系，即一个模糊集 F 是满足某个(或几个)性质的一类对象，每个对象都有一个互不相同的隶属于 F 的程度，隶属函数给每个对象分派了一个[0，1]之间的数，作为它的隶属度。但是，要注意的是隶属函数给每个对象分派的是[0，1]之间的一个单值。这个单值既包括了支持 $x\in X$ 的证据，也包括了反对 $x\in X$ 的证据，它不可能表示其中的一个，更不可能同时表示支持和反对。

1.2 直觉模糊集

模糊信息处理技术已渐趋成熟，其局限性也已逐渐显现，进而引起模糊集理论出现了各种拓展，如区间值模糊集、Vague 集、直觉模糊集、L-模糊集等。这种情形既反映出模糊集理论研究与应用的活跃态势，又反映出客观对象的复杂性对于应用研究的反作用。在模糊集诸多的拓展形式中，直觉模糊集理论的研究最为活跃，也最富有成果。L-模糊集、区间值模糊集等都可以与之相结合，从而形成 L-直觉模糊集、区间值直觉模糊集等。

直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Sets，IFS)最初由 Atanassov 于 1986 年提出，是对 Zadeh 模糊集理论最有影响的一种扩充和发展。

在语义描述上，经典的康托尔(Cantor)集合只能描述“非此即彼”的“分明概念”。Zadeh 模糊集(ZFS)理论可以扩展描述外延不分明的“亦此亦彼”的“模糊概念”。直觉模糊集增加了一个新的属性参数——非隶属度函数，进而还可以描述“非此非彼”的“模糊概念”，亦即“中立状态”的概念或中立的程度，且能更加细腻地刻画客观世界的模糊性本质，因而引起众多学者的关注。

对于直觉模糊集的研究，最初十多年基本处于纯数学的角度；进入 21 世纪后，除继续从数学角度进行深入研究外，逐渐出现了相关应用研究，并形成了多个研究热点。如直觉模糊集间的距离、直觉模糊熵、相似度等直觉模糊集之间的度量及应用，直觉模糊聚类分析，直觉模糊拓扑，直觉模糊推理及应用，直觉模糊集在人工智能、决策分析、信息融合、模式识别及智能信息处理等各个领域的应用等。

1.2.1 直觉模糊集的基本概念

Atanassov 对直觉模糊集给出如下定义。

定义 1.6(直觉模糊集) 设 X 是一给定论域，则 X 上的一个直觉模糊集 A 为

$$A=\{\langle x, \mu_A(x), \gamma_A(x)\rangle \mid x\in X\}$$

其中，$\mu_A(x):X\to[0, 1]$、$\gamma_A(x):X\to[0, 1]$分别代表 A 的隶属函数 $\mu_A(x)$和非隶属函数 $\gamma_A(x)$，且对于 A 上的所有 $x\in X$，$0\leqslant\mu_A(x)+\gamma_A(x)\leqslant 1$ 成立，由隶属度 $\mu_A(x)$和非隶属度 $\gamma_A(x)$所组成的有序区间对$\langle\mu_A(x), \gamma_A(x)\rangle$为直觉模糊数。

直觉模糊集 A 有时可以简记作 $A=\langle x, \mu_A, \gamma_A\rangle$或 $A=\langle\mu_A, \gamma_A\rangle/x$。显然，每个一般模糊子集对应于下列直觉模糊子集 $A=\{\langle x, \mu_A(x), 1-\mu_A(x)\rangle \mid x\in X\}$。

对于 X 中的每个直觉模糊子集，称 $\pi_A(x)=1-\mu_A(x)-\gamma_A(x)$为 A 中 x 的直觉指数(Intuitionistic Index)，它是 x 对 A 的犹豫程度(Hesitancy Degree)的一种测度。显然，对于每一个 $x\in X$，$0\leqslant\pi_A(x)\leqslant 1$，$X$ 中的每一个一般模糊子集 A 的 $\pi_A(x)=1-\mu_A(x)-(1-\mu_A(x))=0$。

若定义在 U 上的 Zadeh 模糊集的全体用 $F(U)$表示，则对于一个模糊集 $A\in F(U)$，其单一隶属度 $\mu_A(x)\in[0, 1]$既包含了支持 x 的证据 $\mu_A(x)$，也包含了反对 x 的证据 $1-\mu_A(x)$，但它不可能表示既不支持也不反对的“非此非彼”的中立状态的证据。若定义在 X 上的直觉模糊集的全体用 IFS(X)表示，那么一个直觉模糊集 $A\in$ IFS(X)，其隶属度 $\mu_A(x)$、非隶属度 $\gamma_A(x)$以及直觉指数 $\pi_A(x)$分别表示对象 x 属于直觉模糊集 A 的支持、反对、中立这三种证据的程度。可见，直觉模糊集有效地扩展了 Zadeh 模糊集的表示能力。

1.2.2 直觉模糊集的基本运算

定义 1.7(直觉模糊集的基本运算) 设 A 和 B 是给定论域 X 上的直觉模糊集，则有

(1) $A\cap B=\{\langle x, \mu_A(x)\wedge\mu_B(x), \gamma_A(x)\vee\gamma_B(x)\rangle \mid \forall x\in X\}$；

(2) $A\cup B=\{\langle x, \mu_A(x)\vee\mu_B(x), \gamma_A(x)\wedge\gamma_B(x)\rangle \mid \forall x\in X\}$；

(3) $\bar{A}=A^C=\{\langle x, \gamma_A(x), \mu_A(x)\rangle \mid x\in X\}$；

(4) $A\subseteq B\Leftrightarrow\forall x\in X, \mu_A(x)\leqslant\mu_B(x)\wedge\gamma_A(x)\geqslant\gamma_B(x)$；

(5) $A\subset B\Leftrightarrow\forall x\in X, \mu_A(x)<\mu_B(x)\wedge\gamma_A(x)>\gamma_B(x)$；

(6) $A=B\Leftrightarrow\forall x\in X, \mu_A(x)=\mu_B(x)\wedge\gamma_A(x)=\gamma_B(x)$。

1.2.3 直觉模糊集的基本特点

在分析处理不精确、不完备等粗糙信息时，直觉模糊集理论是一种很有效的数学工具。直觉模糊集是对 Zadeh 模糊集理论最有影响的一种扩充和发展，较模糊集有更强的表达不确定性。从一定意义上讲，直觉模糊集为事物属性的描述提供了更多的选择，因而在学术界及工程技术领域引起了广泛的关注。

直觉模糊集是模糊集的扩充，而模糊集是经典集的扩充，因此直觉模糊集与经典集也有着密切的关系。表现直觉模糊集与经典集关系的是直觉模糊集的分解定理与表现定理。直觉模糊集与一般模糊集相比，即使直觉指数为 0，所得结果的精度仍然显著提高，因而直

觉模糊集理论也可以应用在控制系统中。直觉模糊集具有先天的负反馈性，比一般模糊集的推理性能更好、更平稳，因而可有效改善、控制或辨识结果。这里的直觉指数为0仅是表述其中立程度为0，仍然有表示其支持程度和反对程度的隶属度函数和非隶属度函数同时起作用。推理合成计算时，隶属度函数和非隶属度函数同时起作用，这是与一般模糊集不同的，因为后者在推理合成计算时仅考虑支持证据的作用，而反对证据对推理结果不产生反制影响。这一特点，正是直觉模糊集有效克服一般模糊集单一隶属度函数缺陷而呈现出来的优势所在。

理论分析与实践表明，与 Zadeh 模糊集相比，直觉模糊集至少具有两大优势：

(1) 在语义表述上，直觉模糊集的隶属度、非隶属度及直觉指数可以分别表示支持、反对、中立这三种状态，而 Zadeh 模糊集的单一隶属度函数只能表示支持和反对两种状态，所以直觉模糊集可以更加细腻地描述客观对象的自然属性；

(2) 直觉模糊集合成计算的精度显著改善，推理规则的符合度显著提高，明显优于 Zadeh模糊集。

1.3 Petri 网的基础理论

Petri 网是由库所(位置)、变迁(转换)、托肯(Token)值和连接库所与变迁并表示它们之间关系的有向弧线所组成的一种有向图。其中，库所用于描述可能的系统局部状态(条件或状况)；变迁用于描述修改系统状态的事件；托肯表示系统的资源，托肯个数就是资源个数；有向弧规定局部状态和事件之间的关系，它表述事件能够发生的局部状态。由事件所引发的局部状态的转换标记包含在库所中，它们在库所中的动态变化表示系统的不同状态。

1.3.1 Petri 网的基本概念

为了后面讨论方便，我们将 Petri 网的一些基本概念和术语[1]作简单介绍。

定义 1.8 (Petri 网，PN) PN 是一个三元组，即 PN=(P, T, F)，满足以下几个条件：

(1) $P=\{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$是一个有限库所集；

(2) $T=\{t_1, t_2, \cdots, t_m\}$是一个有限变迁集；

(3) $P\cap T=\varnothing$，即集合 P 和集合 T 不相交；

(4) $P\cup T\neq\varnothing$，即集合 P 和集合 T 不同时为空；

(5) $F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$，$F$ 是 PN 上的流关系，其元素叫弧，即流关系仅存在于元素 $p\in P$ 和 $t\in T$ 之间；

(6) $\mathrm{dom}(F)\cup\mathrm{cod}(F)=P\cap T$，其中，$\mathrm{dom}(F)=\{x\mid\exists y:(x, y)\in F\}$，$\mathrm{cod}(F)=\{x\mid\exists y:(y, x)\in F\}$，即不存在孤立元素。

定义 1.9(Petri 网系统，Σ) Petri 网系统是个六元组 Σ，$\Sigma=(P, T, F, W, K, M_0)$，满足以下几个条件：

(1) (P, T, F)是一个网；

(2) $K: P\to\mathrm{N}^+\cup\{\infty\}$是库所容量函数；

(3) $W: F\to\mathrm{N}^+$是弧权函数；

(4) $M_0: P\to\mathrm{N}$ 是初始 Token 值，满足 $\forall p\in P: M_0(p)\leqslant k(p)$；

(5) 函数 $M:P\rightarrow \mathrm{N}$ 是 Σ 的 Token 值，如果 $\forall p\in P$：$M(p)\leqslant k(p)$。

定义 1.10(前置集和后置集) $X=P\cup T$，对于 $\forall x\in X$，称 $^{\cdot}x=\{y|(y,x)\in F\}$ 为 x 的前置集；$x^{\cdot}=\{y|(x,y)\in F\}$ 为 x 的后置集。

定义 1.11(变迁发生条件) t 在 M 下有发生权的条件是

$$\forall p_i\in {}^{\cdot}t:M(s)\geqslant W(s,t)，且\ \forall p_i\in t^{\cdot}:M(s)+W(s,t)\leqslant K(s)$$

t 在 M 下发生记作 $M[t\rangle$，也说 M 授权 t 发生或 t 在 M 授权下发生。

定义 1.12(输入库所和输出库所) 若 $p_i\in I(t_i)$，$t_i\in T$，则从库所 p_i 到变迁 t_i 的有向弧，即为变迁 t 的输入弧，称 p_i 是变迁 t_i 的输入库所；若 $p_j\in O(t_i)$，$t_i\in T$，则从变迁 t_i 到库所 p_j 的有向弧，即为变迁 t_i 的输出弧，称 p_j 是变迁 t_i 的输出库所。

定义 1.13(初始库所和终止库所) 若存在变迁 t_1，使得库所 $p\in I(t_1)$，但不存在变迁 t_2，使得 $p\in O(t_2)$，则称库所 p 为初始库所；若存在变迁 t_1，使得库所 $p\in O(t_1)$，但不存在变迁 t_2，使得 $p\in I(t_2)$，则称库所 p 为终止库所。

对不同应用，Petri 网的构成及构成元素的意义均不相同，但其基本结构相同，如图 1.1 所示。

图 1.1 Petri 网基本结构

其中，p_j 与 p_k 分别表示第 j 个和第 k 个库所，y_j 与 y_k 分别表示这两个位置对应的 Token 值，t_i 是一个变迁，p_j 和 p_k 分别为 t_i 的输入库所和输出库所。

1.3.2 Petri 网的基本性质

Petri 网研究的系统模型性质，包括网系统运行过程中的性质(动态性质)和网结构所决定的性质(结构性质)。本书只讨论 Petri 网的动态性质，包括：可达性、可逆性、可覆盖性、有界性、安全性、活性、公平性和持续性等。比较重要的性质有可达性、有界性、安全性和活性[2]。

(1) 有界性和安全性。

设 $\Sigma=(P,T,F,M_0)$ 为一个 Petri 网。若存在正整数 B，使得 $\forall M\in R(M_0):M(s)\leqslant B$，则称库所 s 是有界的，并称满足条件的最小正整数 B 为库所 s 的界，记为 $B(s)$，即

$$B(s)=\min\{B|\ \forall M\in R(M_0):M(s)\leqslant B\}$$

当 $B(s)=1$ 时，称库所 s 为安全的。若每个 $s\in P$ 都是有界的，则称 Σ 是有界 Petri 网，称 $B(\Sigma)=\max\{B(s)|s\in P\}$ 为 Σ 的界，当 $B(\Sigma)=1$ 时，称 Σ 为安全的。

(2) 活性。

M_0 为初始标识，$t\in T$，如果对任意 $M\in R(M_0)$，都存在 $M'\in R(M)$，使得 $M'[t\rangle$，则称变迁 t 是活的。如果每个 $t\in T$ 都是活的，则称 Σ 为活 Petri 网。

(3) 可达性。

如果存在 $t\in T$，使得 $M[t\rangle M'$，则称 M' 为从 M 直接可达的。如果存在变迁序列 t_1，t_2，…，t_k 和标识序列 M_1，M_2，…，M_k，使得 $M[t_1\rangle M_1[t_2\rangle\cdots\rangle M_{k-1}[t_k\rangle M_k$，则称 M_k 是从

M 可达的。从 M 可达的一切标识的集合为可达集 $R(M)$。

1.4 模糊 Petri 网

Petri 网建模的灵活性允许对基于 Petri 网的基本定义进行一些扩展，如对托肯赋予不同信息，可以将其扩展为各种形式的 Petri 网。

模糊 Petri 网是在基本 Petri 网的基础上扩充模糊处理能力而得到的，它与普通 Petri 网的最大不同在于：库所结点中的 Token 值是任意模糊数 t_k；变迁结点具有启动阈值 τ $(0<\tau\leqslant 1)$；变迁结点是否启动取决于各输入弧上的输入量、连接强度及其某个相应的计算函数 ST（我们称之为输入强度计算函数）的值是否大于该变迁结点的启动阈值。

模糊 Petri 网的动态行为是通过变迁启动引起标识改变来体现的，下面给出变迁启动的条件和结果。

（1）变迁启动的条件。

若在标识 M 下有 $\sum\limits_{\forall p_i,\, p_i \in {}^{\cdot}t} M(p_i)\times\alpha_i > \tau(t)$，则称 t 在 M 下是有效的，其中 $M(p_i)$ 为库所结点 p_i 在标识 M 下的 Token 值，α_i 是库所 p_i 到变迁 t 输出弧上的连接强度。

（2）变迁启动的结果。

若 t 在 M 下是有效的，则变迁 t 就可以启动，启动后将 M 变成新标识 M'，称 M' 为 M 的后继标识。对 $p\in P$，库所结点的 Token 值有如下变化：

$$M'(p)=\begin{cases} M(p), & p\in {}^{\cdot}t \\ F[M(p),\ \mathrm{ST}(t),\ \beta_{t\to p}], & p\in t^{\cdot} \end{cases}$$

其中，ST 为输入强度计算函数，F 为新标识 M' 下库所 p 中的 Token 增量计算函数，它们具体的算式要根据不同的应用而定；当 $p\in {}^{\cdot}t$ 时，其标识根据实际应用而定，在知识推理中，规则的前件即事实，推理后仍然存在，故其 Token 值不变。

在上述定义中，输入强度计算函数 ST、Token 增量计算函数 F 以及变迁结点的启动阈值 τ 对 FPN 的行为特征起着决定作用，决定变迁结点能否被启动以及库所结点 Token 值如何被改变。

参考文献

[1] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2005.

[2] 李丹. 基于面向对象有色 Petri 网的合同网协议建模研究[D]. 武汉：华中师范大学，2008.

[3] Gao M M, Zhou M C, Huang X G, et al. Fuzzy reasoning Petri Nets[J]. IEEE Transactions on system, man and Cybernetics part A, 2003, 33(3):314 - 32.

[4] 史志富，张安，刘海燕，等. 基于模糊 Petri 网的空战战术决策研究[J]. 系统仿真学报，2007，19(1)：63 - 66.

第二章 基于直觉模糊集的不确定时空关系

本章对不确定时空关系的描述和推理方法进行了研究，并应用于态势评估领域。首先，本章提出了基于直觉模糊集的不确定时序逻辑，再分别定义了不确定时刻、时段以及时序逻辑判定公式；其次，基于直觉模糊时序逻辑，提出一种在态势评估中的直觉模糊时间推理方法，对未知时刻进行模糊预测；最后，利用直觉模糊集对不确定空间实体以及实体间的拓扑关系进行模糊描述，给出一种抽象化方法解决态势评估中的拓扑空间判定问题。

2.1 基于直觉模糊集的不确定时序逻辑

战场上，我们经常不能准确判断事件发生的时间及其时态关系，有时只知道事件发生的大概时间。由于这类时间信息的广泛性，研究不确定时间及其时态关系很有必要。国内外很多学者对不确定时间信息的表示方法进行研究。贾超[1]研究了两个端点不明确的时间间隔表示方法及时态运算；郑琪[2]对不确定时间概念进行描述，并建立了概率模型；林闯等[3]在点时段时序逻辑的基础上，提出了扩展时段时序逻辑(Extended Interval Temporal Logic，EITL)，通过扩展时段结束的最早时刻和最晚时刻，描绘持续时间段结束时间不确定的情形。在实际情况下，由于系统的随机性、缺乏相关属性(参数)或信息不精确等原因，时段的开始时间也可能没有被预先确定，因此文献[4]定义了模糊时间区间[a，b，c，d]，其中子区间[a，b]和[c，d]分别表示不确定时段的起始时间和结束时间，从而全面描述时段的不确定情形。但是，时间的不确定性往往不能单纯地通过四元组形式的梯形函数进行描述，用模糊集来研究不确定时间更能反映客观世界。文献[5]提出利用模糊集对不确定时间区间进行描述，但是其只讨论了离散论域下的隶属度函数及其关系运算且存在隶属度单一的问题。

针对现有时序逻辑在描述复杂不确定时间信息方面的局限性，本书提出了一种基于直觉模糊集的不确定时序逻辑模型。通过定义在离散或连续论域上的直觉模糊集对不确定时间信息进行描述，构建不确定点时序逻辑、点-时段时序逻辑以及时段时序逻辑。

下面分别给出基于直觉模糊集的不确定时刻、不确定时段的定义及其时序逻辑判定方法。

2.1.1 不确定时刻

所谓不确定时刻，是指我们不知道某个时刻落在哪个确切的时间点，只知道它可能落在一个时间区间上，这个区间可能是单一时间区间，也可能是时间区间的交、并等，即这个时刻是不确定的。

定义 2.1(不确定时刻) 假设不确定时刻落在确定时间区间 $\alpha=[t_1, t_2]$上，则不确定