

深度不确定环境下的决策分析方法——研究现状与展望

胡笑旋, 陈意

(合肥工业大学 a. 管理学院, b. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 合肥 230009)

摘要: 复杂、重大的决策活动经常会面临深度不确定的决策环境, 其决策难度和风险远超一般不确定环境下的决策. 自21世纪以来, 对深度不确定环境下决策分析方法的研究已成为决策分析领域新的重要方向之一. 对此, 首先梳理了该领域的研究现状, 总结了深度不确定环境下决策问题的特征和难点, 分类阐述了4种主要方法的起源与发展、核心思想、实现步骤和典型应用; 然后进行了案例分析; 最后展望了该领域未来的研究方向.

关键词: 决策分析; 深度不确定; 探索性分析; 鲁棒决策; 信息差距理论; 决策图

中图分类号: C934

文献标志码: A

Decision analysis under deep uncertainty — Present situation and prospect

HU Xiao-xuan, CHEN Yi

(a. School of Management, b. Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China. Correspondent: HU Xiao-xuan, E-mail: xiaoxuanhu@hfut.edu.cn)

Abstract: Complex and important decisions are often faced with the condition of deep uncertainty. Deep uncertainty has brought difficulties and risks far more than general uncertainty to decision. Since the 21st century, the research on the decision analysis under deep uncertainty is becoming one of the new important direction in the field of decision analysis. Firstly, the current research on decision making under deep uncertainty is combed, the decision characteristics and difficulties under deep uncertainty are summarized. Four main methods are described and analyzed in several aspects including the origin and development, the core idea, the implementation steps, and the typical applications. Then, a case is studied. Finally, the future research directions are suggested.

Keywords: decision analysis; deep uncertainty; exploratory analysis; robust decision; info-gap theory; decision map

0 引言

现实世界中的很多决策都面临不确定性, 其根源主要来自问题本身的随机性、模糊性, 信息的不完备性、不精确性、不一致性、不稳定性, 以及人类主观认识与客观实际之间存在的差异性等. 描述不确定性的经典数学工具是概率理论, 通过概率分布反映人们对各种自然状态呈现的预期程度, 这种情况下的决策一般称为风险型决策. 决策理论, 尤其是早期的统计决策理论, 都是围绕风险型决策问题的求解而发展起来的^[1].

概率理论只能描述和计量随机不确定性, 在应用中逐渐暴露出不足. 随着数学理论、人工智能等技术的发展, 人们在概率理论的基础上, 扩展或创新出各

种不确定信息的处理方法, 如模糊集、粗糙集、证据理论和灰色系统理论等, 可以用来量化更多类型的不确定性, 减少或消除决策者的疑惑, 帮助其作出科学的决策. 然而, 在现实中还存在着的一类不确定性, 其不确定程度难以量化. Knight^[2]最早将其称为奈特不确定性 (Knightian uncertainty), 也可称之为严格不确定性 (strict uncertainty). 这里所说的难以量化指的是决策者只能知道有哪些自然状态可能出现, 但对各种状态出现的可能性大小一无所知.

随着研究的深入, 人们发现在决策中难以量化的不仅是自然状态, 还有更多的因素, 于是产生了内涵更广的深度不确定性 (deep uncertainty)^[3-15], 有些学者也将其称为严重不确定性 (severe uncertainty)^[15-24].

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-10-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71131002); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(13YJC630051).

作者简介: 胡笑旋(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 从事优化与决策技术等研究; 陈意(1988—), 女, 博士生, 从事决策理论与方法的研究.

“深度不确定”作为专业名词是由诺贝尔经济学奖获得者 Arrow 在一次演讲中首次提到,后由美国兰德公司研究员 Bankes^[3]在 2002 年正式提出,引起了学术界和高层决策者的极大关注.深度不确定性给决策带来的困难和风险远超一般不确定性,其特征主要体现在以下几个方面:1) 情景不确定 (scenario uncertainty). 未来会呈现多种可能的情景(自然状态),各情景出现的可能性大小未知,其演变趋势难以预测. 2) 决策后果不确定 (consequence uncertainty). 决策的后果有很强的情景依赖性,同一决策方案在不同情景下的实施效果有很大差别,且即使在给定的情景下,决策的后果也难以准确判定. 3) 决策方案不确定 (alternative uncertainty). 事先给出的备选决策方案集包含若干备选方案,除此之外,更好的决策方案可以在决策分析的过程中不断探索发现.

深度不确定环境下的决策存在于许多现实决策中,突发事件的应急决策就经常面临深度不确定环境,它的决策过程充分体现了深度不确定性的多种特征.例如,美国“911”恐怖袭击、印度洋海啸、卡特里娜飓风、汶川大地震以及国内多次发生的暴恐事件.首先,这类事件的发生具有情景不确定性.突发事件发生的时间、地点、表现形式都具有很大的不确定性.据《中国国家安全研究报告(2014)》,中国境内的恐怖活动呈现高发状态,恐怖袭击案件发生的时间、地点难以预测,有的针对普通民众,有的针对国家机关和政府人员.其次,突发事件的应急决策方案实施效果事前难以准确评估.突发事件发生后,一般都是按照预先设定的某一行行动方案进行实施和部署,然而实际情况通常与预设的特定情景有所差异,这将导致预设的行动方案实施存在偏差,而且随着事件的演变,行动方案应不断调整.最后,应对突发事件的决策方案具有很大的不确定性.由于突发事件存在的时间、地点、事件范围和事态发展趋势等不确定性因素导致应急处置决策方案的任务对象、人员组成、组织结构等方面存在一系列不确定性,决策者很难给出具体的决策方案,只能提供若干备选方案,并且根据实时事态发展不断改进决策方案.可以说,深度不确定性是突发事件的本质特征,突发事件带来的深度不确定性足以导致传统的“命令-控制”应急管理无法实现,随着深度不确定性而来的社会恐慌行为造成的社会失序是对当前应急决策的巨大挑战^[25].

深度不确定环境下的决策问题都具有上述一个或几个特征,风险型决策的分析方法已难以适用,因为其所隐含的前提条件在深度不确定环境下不能满足^[26-27].因此,近年来人们对深度不确定环境下决策分析方法的研究提出了现实的需求,也逐渐认识到该

问题的重要性,研究工作逐渐增多,使其成为一个新的重要研究领域.本文就该领域目前国内外研究现状进行系统性的梳理,对典型方法及其应用进行综述和比较分析,随后进行了案例分析并提出未来的研究方向.

1 深度不确定性

一个决策问题通常含有如下要素:决策方案集 $D = \{d_i | i = 1, 2, \dots, n\}$; 决策情景集 $S = \{s_j | j = 1, 2, \dots, m\}$, 每一个情景代表一种可能的自然状态; 效用集 $U = \{U_{ij} | i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m\}$, 其中 U_{ij} 代表决策方案 d_i 在情景 s_j 下的效用值.

如果以上要素都能明确给定,则该问题即为确定型的决策问题.但是,在现实条件下,往往存在不确定性,使得一些要素无法明确给定,存在着各种各样的可能性. Knight^[2]于 1921 年从对自然状态认知的角度区分了两种程度的不确定性:一种是可度量的,即有概率分布的不确定性,也是通常所说的“风险”;另一种是不可度量的,没有概率分布的不确定性,即在结果状态出现之前的问题形成阶段,决策者无法通过概率分布来定量描述不确定性. Knight 认为第 2 种不确定性才是真正的不确定性,称为奈特不确定性.一些学者将这种不可度量的不确定性称为严格不确定性.

从不同的视角,可以将不确定性划分为不同的类型或等级,例如根据掌握信息的多寡,可以将不确定性划分为如下 4 个等级^[4-5,28].

第 1 级不确定性:自然状态和每种状态发生的概率均已知.例如掷一枚骰子,必然知道将有 6 种结果,并且每一种结果发生的概率为六分之一.

第 2 级不确定性:能够通过信息推理得知自然状态和状态发生的可能性.例如在医疗诊断的过程中,医生通常是根据患者症状预判,同时结合各项检查指标,再经过推理判断出病人所患疾病及其可能性大小.

第 3 级不确定性:对自然状态的认知模糊、不全面,导致决策与其结果之间的因果关系不明确,不能准确预知.例如人们关注的房地产价格控制问题,由于对政策如何影响房地产价格的机理的认知还不全面,从而无法准确预测一系列政策的实施结果,往往是解决了一个问题,却又引出了另一个意想不到的新问题.

第 4 级不确定性:完全无知,事情发生在人们常规认识之外的情况下,而在此前没有任何信息表征这种事情会发生.例如著名的“黑天鹅”事件^[29].在发现黑天鹅之前,欧洲人认为天鹅都是白色的,但随着第 1 只黑天鹅的出现,这个不可动摇的信念崩溃了.黑天鹅的存在寓意着不可预测的重大稀有事件.

现有的决策分析方法在处理第1级、第2级不确定性时相对成熟,例如在处理第1级不确定性时,可以运用风险型决策的各种分析方法;在处理第2级不确定性时,可以用数学或人工智能方法消除不确定性,再采用风险型决策方法进行决策.但是,当面临第3级和第4级的不确定性时,由于不确定程度加大,决策难度显著增加,除了自然状态的不确定,又带来了后果不确定以及决策方案不确定等一系列问题,传统的决策分析方法难以处理.因此,第3级和第4级的不确定性都属于深度不确定性的范畴.

深度不确定决策问题与不确定型决策和风险型决策问题差异较大.例如“911”恐怖袭击发生前,尽管事先已有相关情报显示可能会发生恐怖袭击,但对于应急决策部门而言,袭击发生的时间、地点和形式无法准确知晓,应急决策面临情景不确定性.当恐怖袭击发生后,针对世贸大楼发生火灾应急处理的预案已经不符合实际情景,尽管消防救援人员第一时间赶到现场展开救援,决策者也没有考虑世贸大厦双子楼会接连整体坍塌的情况,否则决策者不会让消防人员进入大楼内长时间搜寻救援,而是应该尽快疏散大楼附近所有人员,这导致343名消防员遇难,超过“911”遇难总人数的十分之一.客机撞击发生的火灾导致世贸大楼整体坍塌对于救援决策者而言是深度不确定环境下的决策事件.由此可见,深度不确定

决策面临的挑战是巨大的,特别是对于危机管理应急决策,需要汇集不同专家的知识 and 经验,对未来事件发生的可能情景尽可能地探索分析,针对可能发生各种情景,采取相对鲁棒的决策方案是决策者的最佳选择.

2 深度不确定环境下的决策分析方法

决策分析是指对决策问题进行建模和求解的过程,为了实现在深度不确定环境下的决策,必须具有行之有效的决策分析方法.深度不确定环境下决策分析方法的研究建立在传统决策分析方法的基础之上.目前主要发展出4类方法:1)探索性分析;2)鲁棒决策;3)信息差距理论;4)决策图.如图1所示,这4类方法的基本思路和典型应用如表1所示,下面将分别展开评述.

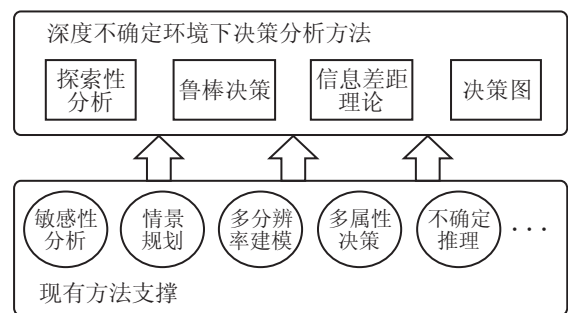


图1 深度不确定环境下的决策分析方法

表1 4类方法的基本情况

方法名称	侧重点	基本思路	典型应用
探索性分析	框架设计	充分分析决策问题中大量复杂的不确定性,通过对模型成千上万次运行,探索各方案在全部不确定条件下所产生的结果.	军事领域:军事政策、战术决策等
鲁棒决策	框架设计	构建大量未来情景,对比评估各方案在所有情景中的表现,找出缺陷并改进,反复迭代,构造出适当的鲁棒方案.	政府长期政策制定:环境、气候等
信息差距理论	不确定信息处理	使用不确定参数 α 描述决策已知信息与需要知道信息之间的差距,定义奖惩函数并计算各不确定水平下的值,通过平衡机会性和鲁棒性两个评价指标来获取满意方案.	自然保护区选择、环境生命周期设计、移动机器人自主决策等
决策图	分布式推理机制	通过构建不同情景引入决策模型,采取分布式推理模式,分析推理决策问题面临的各种可能性,结合多属性决策方法得出不同方案的综合效果值.	应急管理

2.1 决策分析框架

2.1.1 探索性分析

探索性分析是在系统分析基础上,充分考虑决策问题中大量复杂的不确定要素,并分析全部不确定要素对决策方案所产生的影响的整体性研究方法.美国兰德公司的Banks^[30]和Dewar等^[31]最早提出了探索性分析这一名词.

探索性分析的做法是:系统分析问题,构建层次化问题求解树,利用求解树对不确定因素进行全面组

合实验设计,构成情景空间,再利用多分辨率建模技术对问题进行抽象综合,通过计算机运行大量的探索实验,最后对结果进行可视化分析.按照处理问题的方式,可分为输入参数探索性分析、概率探索性分析以及结合前两种的混合探索性分析^[32].

探索性分析需要对问题获得全面的认识和快速的分析,所以需要采用自顶向下的方式建立高层抽象、低层具体、充分考虑各种不确定性的模型.故多分辨率建模(multi-resolution modeling)成为进行探索性分析的关键环节.关于多分辨率建模技术的研究,

以兰德公司 Davis^[32]的研究最具代表性,他描述了多分辨率建模的概念,分析多分辨率建模的出发点和可行性,并提出了相应的见解和方法。

探索性分析方法具有以下优点: 1) 考虑分析问题全面,由决策者根据自身经验提供不同环境下的初始决策方案,初始方案的提供很大程度上依赖于决策者的经验和偏好,同时为不同环境分别提供备选方案,保证了决策方案的适应性; 2) 对决策模型的探索灵活多样,提高了决策的灵活性,便于不同水平输入的多次运行; 3) 重视对深度不确定性的处理,详细充分分析决策过程中各种不确定因素,有利于降低决策的风险。当然,探索性分析也还存在一定的不足: 1) 探索性分析是一种决策分析思路,并没有固定的方法形式,给应用带来一定困难; 2) 多分辨率模型建立困难; 3) 随着问题维度增加,容易带来不确定性的组合爆炸问题。

探索性分析方法的研究背景以决策咨询为主,尤其在军事咨询项目中得到了良好的应用,如“兰德战略评估系统(RSAS)”、“联合一体化应急模型(JICM)”、“大规模装甲部队入侵的空中打击问题”以及“地形、机动能力、战术和 C4ISR 对远距离精确打击的影响评估”等^[33-35]。

随着深度不确定概念的提出,探索性分析方法逐渐发展为深度不确定环境下的进行决策分析的重要方法之一。有学者也在不断对其进行改进和完善。如 Agusdinata^[6]将“探索性分析”与“探索性建模”两个名词相统一,提出使用“探索性建模与分析(EMA)”这个名词,并从技术的角度出发,建立了更为系统性、更具操作性的 EMA 实现流程。Van der Pas 等^[4]将 EMA 与多属性决策相结合,研究了深度不确定环境下汽车智能速度适应系统的使用政策制定问题。Pruyt 等^[7]将 EMA 与系统动力学方法相结合,应用于可持续能源转换中的政策制定问题。Kwakkel 等^[8]研究了 EMA 的 3 种应用,将 EMA 分别与 3 种不同建模方法相结合并用于处理深度不确定环境下的决策问题。

2.1.2 鲁棒决策

鲁棒决策由 Lempert 于 2003 年提出^[9]。在随后的研究中,Lempert 指出鲁棒性是评估深度不确定环境下候选方案的重要准则,并给出了在深度不确定环境下寻找鲁棒方案的一般性方法^[10]。

鲁棒决策方法的具体步骤如下^[10-11]: 1) 确定决策目标,分析决策过程中面临的不确定环境,同时由决策者和相关利益者根据决策的目标和不确定环境给出一系列初始决策方案; 2) 从一系列的决策方案中选出有效可行的方案作为备选方案,并根据以上分析的不确定因素规划未来情景; 3) 分析每一种备选方案

在不同未来情景下的表现; 4) 根据方案的表现,识别出各方案的缺陷并进行改进; 5) 对方案进行分析评估,如果已找到满意的鲁棒方案,则结束,否则继续步骤 6); 6) 将改进后的方案加入备选方案中,替换原有方案,然后转步骤 3)。

Lempert^[10]认为,鲁棒决策方法与传统决策方法具有显著的差异。主要体现在以下几个方面。

1) 分析角度不同。传统决策方法基于预测分析实施每种方案后所带来的收益,从而选取收益最大的方案作为最终决策方案; 而鲁棒决策方法从不确定性的角度出发,分析未来出现的各种情景,再分析各备选方案在不同情景下的执行结果,寻找方案的缺陷,进行弥补以产生更优秀的方案,最终选择一个在大部分情景下都能够获得满意结果的方案。

2) 对不确定性的分析方式不同。传统决策方法在决策之前对不确定性进行特征化,获取或者假定不确定性的特征概率,若实在无法描述,则舍弃部分不确定因素,这样容易带来较大的决策误差; 而鲁棒决策方法中充分考虑各种不确定因素,形成尽可能完备的情景空间,但并不试图对不确定因素概率化。

3) 决策方案的评价标准不同。传统决策方法是对某一特定情景获得最优方案; 而鲁棒决策方法是在尽可能完备的情景空间中分析各备选方案的表现,从而选取能适应不同情景的、对不确定性不敏感的满意方案。

鲁棒决策方法的提出为深度不确定环境下的决策提供了有效可靠的解决方案,同时为决策者在面临此类问题时开启了一种新的思考角度。该方法也可以用于一般不确定环境,然而在深度不确定环境下更能凸显其优点。Lempert 等^[12-13]将鲁棒决策应用于中国国家气候风险管理及帮助水管理机构适应气候变化等政策分析过程中。胡笑旋等^[14]研究了面向企业战略制定的鲁棒决策方法。同时该方法也可用于智能 Agent 的自主决策,如无人飞行器的自主决策^[36-37]。最近的研究中,Kasprzyk 等^[38]将多目标进化优化方法与鲁棒决策方法相结合用于解决环境管理问题。Weaver 等^[39]运用鲁棒决策分析框架改进气候信息,为有效决策作出了贡献。情景作为鲁棒决策中至关重要的部分,Lempert^[40]在他近期的研究中提出了一个特定的概念化的场景。

在上述不同的应用中,实现鲁棒决策的方法也有所区别,而 Lempert 的方法最具系统性和代表性。然而,Lempert 的方法仍然存在着一一定的不足与困难,包括: 1) 很难生成完备的情景空间; 2) 由于情景的差异性和方案的多样性,难以确定统一的评价准则。

2.2 决策分析理论——信息差距理论

信息差距理论起源于 Ben-Haim 教授关于机械系统可靠性的研究^[15], 随着该理论的发展, 它已逐渐应用于决策领域, 发展成为深度不确定 (Ben-Haim 称之为严重不确定) 环境下的一种决策方法. Ben-Haim^[16]将这种深度不确定环境阐述为一种决策信息稀缺和对未来预测有限的情况. 在这种条件下, Ben-Haim 给出了信息差距的定义^[16]: 决策时已知道的信息与为了作出一个有效决策而需要知道的信息之间的不一致. 他使用不确定参数 α 来描述“知道”与“需要知道”之间的信息差距, 并定义了决策的奖惩函数和两个评价指标: 机会性 (opportuneness) 和鲁棒性 (robustness), 通过两个指标之间的平衡找到一个满意解. 该理论保证了在 α 最大化的情况下决策效果达到最低满意值.

与此同时, Ben-Haim^[16]还给出了信息差距分析过程中的三要素: 1) 一个描述不确定性的信息差距模型; 2) 一个展现决策方案效果的系统模型; 3) 一组决策者要求或者渴望达到的效果值.

信息差距理论在深度不确定环境下的决策中所作出的主要贡献在于: 1) 描述了决策中的深度不确定, 通过构造不确定信息差距模型, 分析决策者已知信息与需要知道信息之间的差距来描述深度不确定的环境; 2) 定义了深度不确定环境下的决策奖惩函数和评价准则, 综合分析选取最坏输出最小化且最好输出最大化的策略. 从而有效解决了深度不确定环境下对不确定的描述以及评价准则选取这两个问题.

随着信息差距理论的发展, 它逐渐被应用于解决不同领域中的深度不确定性决策问题. Moilanen 等^[17]将其应用于自然保护区的选择决策上; Regan 等^[18]将其应用于生态养护管理; Duncan^[19]将其应用于环境生命周期设计; Berleant 等^[20]将其应用于移动机器人自主决策; Hall 等^[21]将其应用于洪水风险管理; Matrosov 等^[22]将 Lempert 的鲁棒决策方法和 Ben-Haim 的信息差距理论同时进行了应用, 发现两种方法有互补作用, 一起使用时促进了更好结果的产生.

Hall 等^[15]还比较了 Lempert 的鲁棒决策方法和 Ben-Haim 的信息差距理论, 分别利用这两种方法实现了政府减少温室气体排放政策的评估与决策, 他认为两种方法有很多相似之处, 都是致力于寻找一个对不确定性因素不敏感、对未知条件适应性较强的决策结果, 虽然在处理过程中有所不同, 但能得出基本一致的结论.

2.3 决策问题分布式推理工具——决策图

决策图提供了一种深度不确定环境下处理决策

问题的分布式结构化新框架. 其核心是构建决策问题面临的各种可能情景, 并运用多属性决策分析技术进行方案评估^[23].

决策图包含两部分: 因果图 (causal map) 和属性树 (attribute tree). 因果图包含了情景构建的复杂过程, 它系统地处理与决策相关的数据信息, 从而减少专家和相关决策者的信息处理负担. 属性树结合运用多属性决策方法对各种情景下决策变量的不同状态值进行综合判断, 得出不同方案的效用值.

决策图在处理决策变量的深度不确定性时, 将不确定性分为不同等级: 确定型、概率型、模糊型和有限型. 初始的决策变量在情景构建初始化时至少设定一种不确定等级, 而由因果图推导出的决策变量包含了父节点的所有不确定等级的组合. 因果图中每一个节点的状态经推理后构建情景, 形成可能的情景集合.

决策图通过构建不同情景引入决策模型, 并采取分布式推理的模式, 即将一个整体决策问题分解为一组子问题, 再分别对每一个子问题进行分析处理. 不同子问题领域的专家可以根据自身所掌握的信息来应用不同的推理规则, 分析推理出决策问题面临的各种可能性, 再结合多属性决策方法得出不同方案的综合效果值.

决策图为深度不确定环境下的决策提供了有效的支持, 其主要贡献在于: 1) 提出了分布式推理的模式, 能够同时处理多种推理规则; 2) 提出了分布式场景构建的方法, 并给出了具体内容. 由于决策图用于深度不确定决策问题上的研究提出不久, 其延伸研究还比较少.

Comes^[23]以应急管理为背景运用决策图方法进行了案例研究. 首先, 分析了应急管理具有深度不确定环境下的决策特征, 主要包括: 1) 一组备选方案; 2) 多个目标; 3) 分散的决策者、专家和利益相关者, 他们具有不同的知识、技术、能力和偏好; 4) 信息类型各异、质量不同和不确定程度不一.

其次, 描述了现实中的一个应急决策问题: 一列货运列车出轨导致氯气泄漏, 有关应急单位暂时堵住泄露点, 但需要对发生泄露的车厢进行转移以彻底解决问题. 在转移过程中, 可能会发生氯气大量泄露, 给附近居民造成影响, 需要作出应急决策. 专家有两种备选方案: 疏散所有居民或让居民就近躲避.

再次, 对问题进行决策分析. 第1步是构建决策图模型, 基本结构为: 1) 属性树, 专家给出3个父属性节点和3个父属性节点下的39个子节点, 案例主要以父属性节点“健康影响”下的子节点“医院病患数”为例进行说明; 2) 因果图, 由相应领域专家构建. 第2步是情景构建: 考虑转移过程中的泄露是否发生泄露、

车厢中氯气总量、可能的气象条件以及氯气泄露的影响范围等因素,组合生成各种可能情景.

最后,评估决策备选方案,获得每一种候选方案在每一个情景下的表现,并结合情景权重进行评估.研究者给出了两种评估方式:1)假设所有情景同等重要;2)由专家评选出最坏、最好以及一般情景,给出每种候选方案在每种等级情景下的表现,以此作出鲁棒决策.

此外, Ram 等^[41]和 Comes 等^[42]将决策图方法与多准则决策分析进一步结合,用于策略的评估选择. Sedki 等^[43]在研究决策推理原则和决策变量间关系时,将贝叶斯因果图融入这种分布式推理方法中,有效地解决了问题. Comes 等^[44-46]在之后的研究中进一步完善了此方法在应急管理决策中的应用.

3 案例分析

德国军事理论家克劳塞维茨曾说过:“战争是不确定性的王国”.现代战争作战指挥决策具有信息不确定或不完备、对抗性强以及节奏快等突出特点,使得许多信息在决策之前不充分、甚至是不可知的,战争的不确定性更加突出.战场环境下的决策问题同样具有情景不确定、决策后果不确定等特征,因而也是深度不确定环境下的决策分析问题.

无人机在现代战争中正发挥着越来越大的作用,它在应用过程中常常需要在深度不确定战场环境下作出决策.本文以此军事决策问题为背景,在上述学者研究的基础上,对无人机对地攻击决策分析进行相关案例研究.

3.1 问题描述

红方一架无人机攻击蓝方高价值目标.红方无人机携带电子支援措施(ESM)、合成孔径雷达(SAR)和机载空对地导弹.蓝方高价值目标本身没有打击能力,但周围有防御阵地对其进行保护.防御阵地包含:地对空导弹、防空高炮、雷达以及电子干扰对抗系统(ECM).对于红方而言,蓝方的具体防空设备以及蓝方所采取的行动都是未知的,从而使得无人机决策处于深度不确定的战场环境下.

3.2 无人机对地攻击决策分析

当无人机进入作战区域时,它将对蓝方目标进行搜索.一旦找到目标,无人机就开始从4种候选策略中决策出所要执行的决策方案.4种候选策略由军事专家给出,分别为:攻击目标、攻击导弹、规避和突防.同时,无人机将面临被蓝方发现、攻击、甚至被蓝方防空设备击落的可能.无人机对地攻击决策分析由以下4个阶段组成.

1) 情景分析.一组相关领域的专家对战场情况进行分析,在分析的基础上,识别出影响攻击效果的关键因素,并对这些因素的不确定水平进行进一步辨析.然后将这些关键因素作为情景变量,通过这些变量各种可能取值的组合产生一组情景,再由专家鉴定,保留有效情景,舍弃无效情景.经过专家分析识别出13个对无人机决策有显著影响的因素作为情景的关键变量,如表2所示.

表 2 关键变量

关键变量	缩写	状态	描述
BlueRadarState	BR	开,关	蓝方雷达状态
BlueMissile	BM	中程导弹,近程导弹,无导弹	蓝方地对空导弹类型
BlueHasAA	BH	有,无	蓝方有无防空高炮
BlueGetLocation	BG	远,中,近,未知	蓝方获取红方位置距离
BlueECMState	BE	开,关	蓝方电子干扰设备状态
RedESMState	RE	开,关	红方电子支援措施状态
RedSARState	RS	开,关	红方 SAR 雷达状态
RedGetLocation	RG	远,中,近	红方获取蓝方位置距离
RedMissile	RM	A, B	红方无人机携带导弹类型
RealBlueLocation	RB	远,中,近,不存在	蓝方高价值目标实际位置
RedHeight	RH	高,中,低	红方无人机飞行高度
RedDestroyed	RD	是,否	红方无人机是否被蓝方摧毁
RedResult	RR	摧毁目标,毁坏目标,摧毁导弹,损坏导弹,获得好位置,无作用	红方无人机攻击结果

2) 影响图建模.影响图用于帮助无人机评估全部情景下各候选行动方案的决策效用值.影响图将

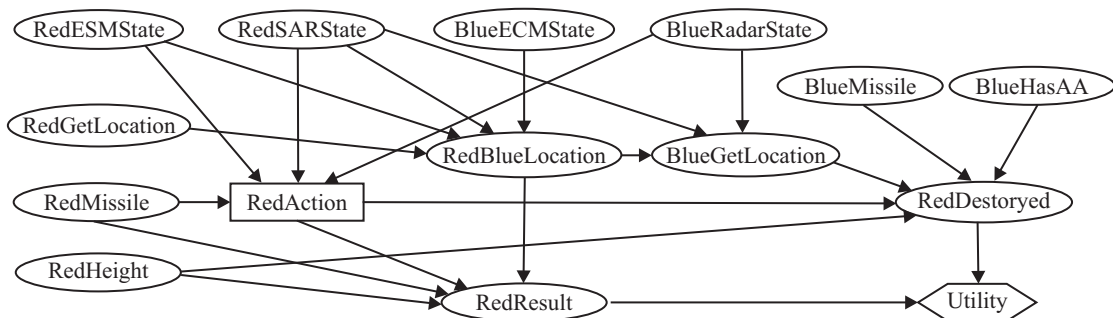


图 2 无人机对地攻击决策影响图

情景带入模型中,建立了无人机对地攻击的决策模型.它用紧凑和直观的方式表达了无人机对地攻击决策情况,是一种强有力的决策支持工具.无人机对地攻击影响图模型如图2所示.

3) 探索实验. 此阶段将各种情景输入影响图,探索每一种候选决策方案在每一种情景中的决策效用值.输出的全部效用值作为接下来鲁棒决策的基础.经过探索实验,获得每一种候选行动方案在全部情景下的效用值如表3所示.

表3 全部情景下每种候选行动方案效用值

情景	效用值			
	攻击目标	攻击导弹	规避	突防
s_1	39.6	37	42.3	33.2
s_2	42.8	39.9	43.9	36.2
s_3	64.7	60.1	45.3	51.7
s_4	39	39.6	42.4	34.9
s_5	45.5	43.2	43.9	37.9
s_6	83.4	75.9	50	64.1
s_7	38.1	36.3	41.8	32.2
s_8	42.6	39.5	43.5	35.5
s_9	66	61	45.1	52
s_{10}	38.5	39.1	42	34
s_{11}	45.5	43	43.6	37.3
s_{12}	85.7	77.7	50	65.1

4) 鲁棒决策. 在该阶段,无人机将从若干候选决策方案中选择出最优鲁棒决策方案进行实施,从而完成整个决策过程.基于探索实验阶段所获取的各行动方案在全部情景中的效用值,对候选决策方案的鲁棒性进行评估,根据鲁棒性准则选择出鲁棒候选决策方案;最终结合TOPSIS法在鲁棒候选方案中识别出最优鲁棒决策方案.

无论是哪种类型的决策,都需要根据某种准则来选择决策方案,使结果最优(或满意),这种准则称为决策准则,或称决策原则^[1].传统的决策理论与方法中的决策准则的制定主要集中在风险型决策准则和严格不确定决策上.风险型决策的准则是由期望效用(EU)理论和主观期望效用(SEU)理论构成^[47].同样,面临严格不确定决策时,也有相应的决策准则,主要包括以下几类^[1]: 1) 悲观准则,又称极小极大化准则; 2) 乐观系数法; 3) 后悔值极小化极大; 4) 等概率准则,即当对真实的自然状态一无所知时,就“等价于”所有自然状态具有相同的概率.

然而,在深度不确定环境下,由于决策情景不确定、后果不确定以及决策方案不确定等一系列问题重叠累加,各种不确定因素是否对决策产生影响及其影响程度都无法预知,使得无法运用现有决策准则选择出满意的决策.许多学者认为,深度不确定环境下的

决策,应采取相对保守的策略,不片面追求收益的最大化,而应更加注重风险防范,追求稳定性,或者说是对情景的适应性,这就是鲁棒性准则.

鲁棒性源于统计学中一个专门的术语,20世纪70年代初开始的控制理论的研究中流行,它是指系统在受到扰动的前提下仍能保持其特征行为. Gupta等^[48]最先将鲁棒性概念引入决策领域,他们将决策的灵活性作为鲁棒性的衡量标准. Ullman^[49]认为,鲁棒决策意味着遵从一个策略,使用已有的资源尽可能消除噪音(不确定性),然后选择一个对剩余的噪音不敏感的决策方案. Do^[24]认为,决策的鲁棒性可以用一个比值来衡量,分子是决策方案执行后能产生较好效果的情景数量,分母是全体可能的情景数量. Rosenhead等^[50]认为,鲁棒性是一种柔性程度的度量,这里的柔性指的是一个决策方案在不确定情况下仍能维持近最优(near-optimal)结果的能力. Hites等^[51]认为,鲁棒性是抵抗“近似”或者是“未知”的一种能力,这种能力可以保护决策自身免受遗憾性的影响.

综合许多学者的研究,本文将案例研究过程中的鲁棒性准则表达如下.

定义1(最小效用值) 定义 $M(d_i)$ 为决策方案 d_i 在决策情景集中的最小效用,即 $M(d_i) = \min(\mu_{ij})$, $j = 1, 2, \dots, m$.

定义2(鲁棒可行性) 定义决策方案 d_i 在情景 s_j 中是鲁棒可行的,如果满足 $\mu_{ij} \geq \beta$,其中 β 为事先设定的效用阈值.

定义3(鲁棒满意度) 定义 $R(d_i)$ 为决策方案 d_i 在决策情景集中的鲁棒满意度,则 $R(d_i) = \frac{|S(d_i)|}{|S|}$.其中: $|S|$ 为全部情景的数目, $|S(d_i)|$ 为满足鲁棒可行性定义的情景的数目.

本文分别从保证最小效用值、鲁棒可行性、鲁棒满意度这3个条件的满足来体现决策方案的鲁棒性.因此满足鲁棒性准则的决策方案必需满足以下条件:

条件1 $M(d_i) \geq \alpha$,表示决策方案在任何情景下都应保证一个最小的收益,避免出现不可控制风险的情况;

条件2 $u_{ij} \geq \beta$,表示决策方案能够在满足定义2的情景中产生较好的效果;

条件3 $R(d_i) \geq \theta$, $\theta \in [0, 1]$,表示决策方案在一定比例的情景下都能够产生较好的效果.

只有同时满足上述3个条件才能够满足鲁棒性准则.其中 α 、 β 和 θ 都是预设的阈值. α 、 β 和 θ 的值越大,表明决策者对鲁棒性的要求越高.基于深度不确定环境下的决策特征,本文将这种鲁棒性的准则作

为衡量深度不确定环境下决策好坏的重要标准。

以上是本文在案例研究过程中形成的鲁棒决策准则。在不同的应用中,根据问题的不同以及决策者偏好的不同,可以有不同的鲁棒决策策略。许多学者已将鲁棒性准则应用于解决现实生活中的决策问题,如 Kasprzyk 等^[52]在深度不确定环境下研究开发在各种模型条件下均表现较好的鲁棒水资源规划方案; Karvetski 等^[53]基于深度不确定含义,结合鲁棒特性,进行了深度不确定环境下能源设施投资应用研究; Klibi 等^[54]将鲁棒性作为关键衡量标准应用于供应链网络的设计决策。

根据鲁棒性准则,获得鲁棒决策方案“攻击目标”、“攻击导弹”和“规避”。最后结合 TOPSIS 法计算出“攻击目标”方案贴近度最大,识别出“攻击目标”方案为最优鲁棒决策方案。

4 研究展望

深度不确定环境下决策分析方法的研究对促进科学决策和管理实践进步方面具有重要的意义,对经济、社会、军事活动中复杂的决策活动,如应急管理、战略决策、政策制定、传染病防控、战术规划等,也将起着关键性的作用。通过对现有研究工作的梳理与分析,本文发现尽管该领域的研究已有一些成果,但从管理实践对其提出的要求角度,该领域的研究仍然存在许多亟待发展的地方。今后的研究工作可以重点关注以下几个方面。

1) 深度不确定环境下的决策情景生成。

完备情景空间生成方法。在深度不确定环境下应尽可能模拟所有的未来情景,然后在每个情景里面推演决策方案的效果,因此完备情景空间的生成是决策的前提条件之一,情景的数量、质量将直接影响到决策的效果。随着云计算、物联网以及大数据等新兴信息技术的进一步发展,决策情景信息的获取更加便捷、全面和精确。如物联网通过各种感知设备感知物体信息,然后传输至数据中心,为决策情景提供基础物体信息;大数据是能够通过微观海量数据反映客观世界的“显微镜”,它使得决策情景生成更加精确,效率大幅提高。但有关新兴信息技术下决策情景的研究才刚刚起步,需要进一步深入研究新兴信息技术下决策情景元素的识别、提取方法,情景元素的关联方法以及基于仿真技术的完备情景空间生成方法等。

2) 深度不确定环境下的决策建模方法。

集成决策建模方法。深度不确定环境下的决策很难找到一个合适的模型来描述,而使用多个模型(模型簇)集成描述问题是一种较好的思路。多个模型的集成,能形成对决策问题多视角、多分辨率的描述,其

中每个模型不一定完全精确,不一定能在决策者中达成共识,但多个模型集成在一起,能有效消除单个模型的偏倚,反映出系统的总体发展规律。

3) 基于群体智慧的初始候选方案构建与集结。

初始候选方案对决策分析也起着至关重要的作用,它的优劣程度将直接影响整个决策分析的效率 and 准确性。目前,深度不确定环境下的初始候选方案基本都是由相应决策领域专家给出,但随着社交网络、微博等新兴互联网商业模式的发展,互联网上涌现出的群体智慧(collective intelligence)已成为深度不确定环境下决策初始候选方案的有效来源。群体智慧的参与者是一群具有不同文化和专业背景的人,他们结合自身知识独自或协作给出多种初始决策方案。群体智慧可以使决策者拥有更广泛的信息和更好的初始候选决策方案。然而,目前有关群体智慧的决策分析研究工作还很少,基于群体智慧的初始候选方案构建和集结是处理深度不确定环境下决策问题中未来值得研究的重要内容。

5 结论

客观世界中的绝大部分现象都是不确定的,或者说,不确定性是绝对的,确定性是相对的。随着对不确定性研究的深入,世界的不确定性特征越来越得到学术界的普遍认可^[55],在不确定的环境下进行科学的决策是决策理论与方法的重要研究领域,研究过程已经历了很长时间。其中,深度不确定环境下的决策分析方法研究是随着经济、社会的发展而兴起的新的研究课题,在近年来获得了越来越多的关注。本文对该领域的研究现状和已有成果进行了总结,并对未来的研究方向进行了展望。

通过更多学者的参与和更多的研究成果的出现,建立起系统的深度不确定环境下的决策分析框架,有其重要的理论和实践意义。理论上能够丰富决策理论与方法的内容体系,创新决策方法,推动领域发展;实践上,能够用于深度不确定环境下的实际决策过程,为降低决策风险,避免发生重大的决策失误作出贡献。

参考文献(References)

- [1] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 58-62.
(Yue C Y. Decision theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2003: 58-62.)
- [2] Knight F H. Risk, uncertainty and profit[M]. New York: Hart, Schaffner and Marx, 1921: 55-58.
- [3] Bankes S C. Tools and techniques for developing policies for complex and uncertain systems[J]. Proc of the National Academy of Sciences of the United States of America,

- 2002, 99(S 3): 7263-7266.
- [4] Van der Pas J, Walker W E, Marchau V, et al. Exploratory MCDA for handling deep uncertainties: The case of intelligent speed adaptation implementation[J]. *J of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2010, 17(1/2): 1-23.
- [5] Kwakkel J H, Walker W E, Marchau V A W J. From predictive modeling to exploratory modeling: How to use non-predictive models for decision making under deep uncertainty[C]. *Proc of the 25th Mini-EURO Conf on Uncertainty and Robustness in Planning and Decision Making*. Portugal, 2010: 1-10.
- [6] Agusdinata D B. Exploratory modeling and analysis: A promising method to deal with deep uncertainty[D]. Delft: Department of Policy and Management, Delft University of Technology, 2008.
- [7] Pruyt E, Kwakkel J, Yucel G, et al. Energy transitions towards sustainability: A staged exploration of complexity and deep uncertainty[C]. *Proc of the 29th Int Conf on the System Dynamics Society*. Washington, 2011: 1-26.
- [8] Kwakkel J H, Pruyt E. Exploratory modeling and analysis: An approach for model-based foresight under deep uncertainty[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2013, 80(3): 419-431.
- [9] Lempert R J, Popper S W, Bankes S C. Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative, long-term policy analysis[M]. Santa Monica: Rand Publishing, 2003: 39-66.
- [10] Lempert R J, Groves D G, Popper S W, et al. A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios[J]. *Management Science*, 2006, 52(4): 514-528.
- [11] Groves D G. New methods for identifying robust long-term water resources management strategies for California[R]. Santa Monica: Rand Corp, 2006.
- [12] Lempert R J, Kalra N. Managing climate risks in developing countries with robust decision making[R]. *World Resources Report*. Washington DC, 2011.
- [13] Lempert R J, Groves D G. Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2010, 77(6): 960-974.
- [14] 胡笑旋, 任明晖. 面向企业战略制定的鲁棒决策方法[C]. 第14届中国管理科学学术年会论文集(下册). 济南, 2012: 659-663.
(Hu X X, Ren M H. The robust decision-making method for corporate strategic decision-making[C]. *Proc of the 14th China Management Science*. Jinan, 2012: 659-663.)
- [15] Hall J W, Lempert R J, Keller K, et al. Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info-gap methods[J]. *Risk Analysis*, 2012, 32(10): 1657-1672.
- [16] Ben-Haim Y. Info-gap decision theory: Decisions under severe uncertainty[M]. Israel: Academic Press, 2006: 9-48.
- [17] Moilanen A, Wintle B A. Uncertainty analysis favours selection of spatially aggregated reserve networks[J]. *Biological Conservation*, 2006, 129(3): 427-434.
- [18] Regan H M, Ben-Haim Y, Langford B, et al. Robust decision-making under severe uncertainty for conservation management[J]. *Ecological Applications*, 2005, 15(4): 1471-1477.
- [19] Duncan S J. Including severe uncertainty into environmentally benign life cycle design using information gap-decision theory[D]. Atlanta: School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2008.
- [20] Berleant D, Anderson G T. Decision-making under severe uncertainty for autonomous mobile robots[C]. *IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics*. Montréal, 2007: 2360-2365.
- [21] Hall J, Solomatine D. A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions[J]. *Int J of River Basin Management*, 2008, 6(2): 85-98.
- [22] Matrosov E, Woods A, Harou J. Robust decision making and info-gap decision theory for water resource system planning[J]. *J of Hydrology*, 2013, 494(7): 43-58.
- [23] Comes T, Hiete M, Wijngaards N, et al. Decision maps: A framework for multi-criteria decision support under severe uncertainty[J]. *Decision Support Systems*, 2011, 52(1): 108-118.
- [24] Do D. Formulating and modelling robust decision-making problems under severe uncertainty[D]. Department of Mathematics and Statistics, The University of Melbourne, 2008.
- [25] 陶鹏, 童星. 深度不确定性与应急管理[J]. *学术界*, 2011, 8(8): 30-38.
(Tao P, Tong X. Deep uncertainty and emergency management[J]. *Academics*, 2011, 8(8): 30-38.)
- [26] Shaffer M J. Decision theory, intelligent planning and counterfactuals[J]. *Minds and Machines*, 2009, 19(1): 61-92.
- [27] Stewart T J, French S, Rios J. Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning: Review and extension[J]. *Omega — Int J of Management Science*, 2013, 41(4): 679-688.

- [28] Walker W E, Harremoes P, Rotmans J, et al. Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support[J]. *Integrated Assessment*, 2003, 4(1): 5-17.
- [29] Taleb N N. *The black swan: The impact of the highly improbable*[M]. New York: Random House, 2007: 72-80.
- [30] Bankes S. Exploratory modeling for policy analysis[J]. *Operations Research*, 1993, 41(3): 435-449.
- [31] Dewar J A, Builder C H, Hix W M, et al. Assumption-based planning: A planning tool for very uncertain times[R]. Santa Monica: Rand Corp, 1993.
- [32] Davis P K. Dealing with complexity: Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling[C]. *Proc of the 32nd Conf on Winter Simulation*. Santa Monica: Society for Computer Simulation Int, 2000: 293-302.
- [33] Brooks A, Bennett B, Bankes S. An application of exploratory analysis: The weapon mix problem[J]. *Military Operations Research*, 1999, 4(1): 67-80.
- [34] Johnson S E, Libicki M C, Treverton G F. New challenges, new tools for defense decisionmaking[M]. Santa Monica: Rand Corporation, 2003: 48-55.
- [35] McGinnigle Jr J. An exploratory analysis of the military value of information and force[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [36] Bertuccelli L F. Robust decision-making with model uncertainty in aerospace systems[D]. Massachusetts: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [37] Bertuccelli L F, Alighanbari M, How J P. Robust planning for coupled cooperative UAV missions[C]. *The 43rd IEEE Conf on Decision and Control*. 2004, 3: 2917-2922.
- [38] Kasprzyk J R, Nataraj S, Reed P M, et al. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 42(5): 55-71.
- [39] Weaver C P, Lempert R J, Brown C, et al. Improving the contribution of climate model information to decision making: The value and demands of robust decision frameworks[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2013, 4(1): 39-60.
- [40] Lempert R. Scenarios that illuminate vulnerabilities and robust responses[J]. *Climatic Change*, 2013, 117(4): 627-646.
- [41] Ram C, Montibeller G. Exploring the impact of evaluating strategic options in a scenario-based multi-criteria framework[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2013, 80(4): 657-672.
- [42] Comes T, Hiete M, Schultmann F. An approach to multi-criteria decision problems under severe uncertainty[J]. *J of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2013, 20(1/2): 29-48.
- [43] Sedki K, De Beaufort L B. Cognitive maps and Bayesian networks for knowledge representation and reasoning[C]. *IEEE 24th ICTAI*. Athens, 2012: 1035-1040.
- [44] Comes T, Wijngaards N, Schultmann F. Efficient scenario updating in emergency management[C]. *Proc of Int Conf on Information Systems for Crisis Management and Response*. Vancouver, 2012: 1-10.
- [45] Comes T, Wijngaards N, Schultmann F. Designing distributed multi-criteria decision support systems for complex and uncertain situations[J]. *Multicriteria Decision Aid and Artificial Intelligence: Links, Theory and Applications*, 2013, 18(2): 45-76.
- [46] Comes T. Robust emergency management strategies: Supporting interdependent decisions[C]. *IEEE 46th Hawaii Int Conf on System Sciences*. Hawaii, 2013: 184-193.
- [47] Von Neumann J, Morgenstern O. *The theory of games and economic behavior*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1947: 10-26.
- [48] Gupta S K, Rosenhead J. Robustness in sequential investment decisions[J]. *Management Science*, 1968, 15(2): B-18-B-29.
- [49] Ullman D G. Robust decision-making for engineering design[J]. *J of Engineering Design*, 2001, 12(1): 3-13.
- [50] Rosenhead J, Elton M, Gupta S K. Robustness and optimality as criteria for strategic decisions[J]. *Operational Research Quarterly*, 1972, 23(4): 413-431.
- [51] Hites R, De Smet Y, Risse N, et al. About the applicability of MCDA to some robustness problems[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 174(1): 322-332.
- [52] Kasprzyk J R, Reed P M, Characklis G W, et al. Many-objective de Novo water supply portfolio planning under deep uncertainty[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 34(6): 87-104.
- [53] Karvetski C W, Lambert J H. Evaluating deep uncertainties in strategic priority-setting with an application to facility energy investments[J]. *Systems Engineering*, 2012, 15(4): 483-493.
- [54] Klibi W, Martel A, Guitouni A. The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 203(2): 283-293.
- [55] 李德毅, 刘常昱, 杜鹃, 等. 不确定性人工智能[J]. *软件学报*, 2004, 15(11): 1583-1594.
(Li D Y, Liu C Y, Du Y, et al. Artificial intelligence with uncertainty[J]. *J of Software*, 2004, 15(11): 1583-1594.)