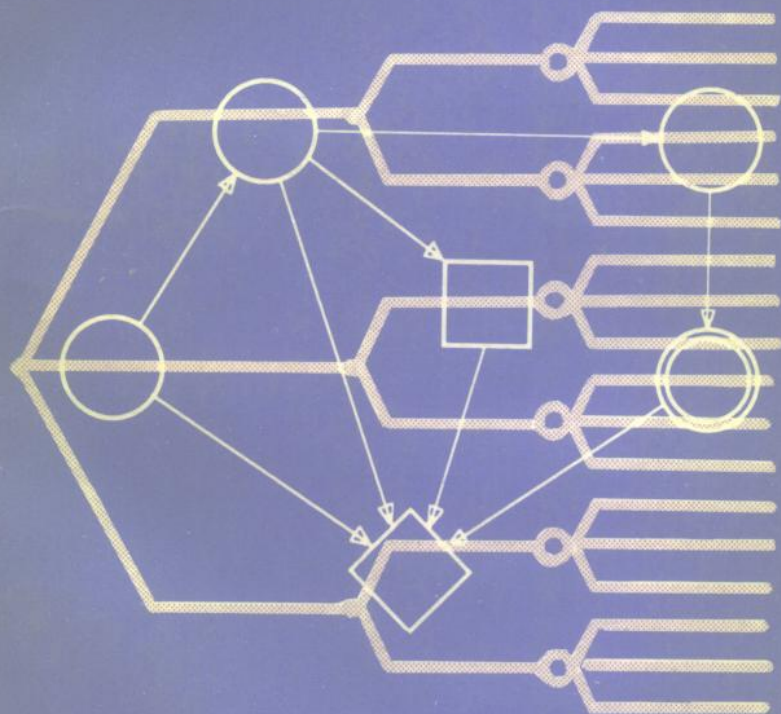


影响图理论方法与应用

詹原瑞 编著
陈 珽 主审



天津大学出版社

国家自然科学基金资助项目专著

影响图的理论方法与应用

詹原瑞 编著
陈 珽 主审

天津大学出版社

内 容 提 要

本书详细地介绍了影响图的组成、生成和概率估计的方法;阐述了树和影响图的关系;论述了影响图的变换定理、图形逻辑、表示的统计模型和信度函数的理论;讨论了影响图在信息及控制价值的确定、概率推理和决策问题最优策略选择中的应用.书中收集了大量的国内外研究成果,内容丰富,是关于影响图理论较完整的著作.

全书共 12 章,具有概率基本知识的人都可阅读.凡从事决策分析、不确定性建模或人工智能等方面研究、教学、学习的人们都会从这本书获得启迪.

影响图的理论方法与应用

詹原瑞 编著

陈 珉 主审

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

邮编:300072

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:10% 字数:275 千

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月第一次印刷

印数:1—1000

ISBN 7-5618-0821-6

F·92 定价:16.00 元

序

从 von Neumann 和 Morganstern 奠基性工作开始, 决策分析的发展已有 50 多年的历史. 但过去采用的图形表示是决策树, 用影响图作为决策分析的工具则不过是近 10 年的事, 这首先应归功于美国斯坦福大学的 R A Howard 和他的合作者们. 这种方法刚提出时并没有引起学术界重视, 但随着理论日益完善, 应用范围不断扩大, 人们才逐渐认识到它是一种强有力的决策分析工具, 有很大的发展潜力, 而且把决策分析和人工智能两个不同的学科领域沟通起来. 在此, 我引用两段对影响图的评价意见, 以说明其重要性. 一段是 Howard 本人写的. 他 1986 年由于对决策分析的发展有突出贡献, 荣获美国 TIMS/ORSA 的 F A Ramsey 奖. 在授奖大会上 Howard 曾发表演说, 这篇演说以“决策分析: 实践与展望”为题发表在美国《管理科学》1988 年第 6 期, 该文中有一段论述影响图. 他说: 在信息交流 (Communication)、启发 (elicitation) 和对人们知识的细致表达等方面, 我所见到的最大进展是影响图. 另一段则摘自 I Matzkevich 和 B Abramson 在美国《管理科学》1995 年第 1 期上发表的题为“在人工智能中决策分析网络”的论文. 他们认为决策分析和人工智能本来是两个互相独立的研究领域, 但自从影响图和信度网络 (belief network) 发展以后, 它们就有了结合点. 他们又认为大型的随机模型, 由于变量间的复杂关系, 很难用概率论求解. 从而人们倾向于用拟概率计算和特定的符号推理方法, 但自从影响图和信度网络发展以后, 这类问题在一定程度上找到了概率表示和概率推理算法. 他们还认为影响图和信度网络的研究刚开始不久, 还有许多有意义的结果仍待继续探讨, 这是一个有潜力的研究领域.

影响图对于从事决策分析和人工智能等学科的高等学校的师生和科技工作者们虽然非常重要,但由于其文献散见于国内外学术期刊,还没有学术专著,因此在我国了解它的人并不多.詹原瑞教授这本著作的问世,无疑对传播影响图的理论、方法和应用有重要意义.本书内容翔实,全书共有 12 章,几乎包括了国内外研究影响图的所有主要成果.从影响图的基本原理、基本变换定理、概率估计、信息和控制价值的确定方法,直到与影响图有关的一些专门问题,如概率推理、信度函数、图形逻辑、统计模型等都作了较详细的介绍,由浅入深,由简到繁,便于读者循序渐进地学习.本书不仅理论完备,而且还重视实用方法,书中除有专门章节介绍各种方法外,还附有大量例题帮助读者加深对理论和方法的理解和使用.总之,詹原瑞教授这本书对国际上正在发展的一门新学科分支——影响图作了全面而系统的介绍,它的出版是我国学术界和出版界一件可喜的事,我相信必将引起更多的人对影响图和信度网络的兴趣,将使我国在这方面的研究工作迅速赶上国际水平.

陈强

于华中理工大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 决策分析综述	(2)
1.2 建立和求解决策分析模型的方法	(9)
1.3 影响图方法的发展历史	(11)
1.4 本书内容介绍	(15)
第二章 影响图的基本理论	(18)
2.1 影响图的组成	(19)
2.2 相互关系	(22)
2.3 函数关系	(30)
2.4 数值层次	(36)
2.5 影响图的分类	(41)
第三章 影响图的基本变换定理	(45)
3.1 引言	(45)
3.2 弧向翻转	(48)
3.3 冗余结点的删除	(51)
3.4 机会结点的合并与分解	(52)
3.5 机会结点的删除	(54)
3.6 决策结点的删除	(62)
3.7 影响图变换的限制条件汇总	(64)
3.8 评估具有单个价值结点的影响图的算法	(65)
第四章 影响图的生成和概率估计	(74)
4.1 目标定向构造影响图	(74)
4.2 确定型关系	(80)
4.3 求解影响图的迭代过程	(82)

4.4	概率估计.....	(85)
4.5	明确性检验.....	(87)
4.6	油价估计.....	(88)
4.7	知识图展开.....	(89)
4.8	数值估计举例.....	(90)
4.9	累赘知识图的一体化概念	(102)
4.10	不连通的知识图.....	(105)
第五章	树与影响图.....	(109)
5.1	决策树求解过程综述	(109)
5.2	树的表示特性	(111)
5.3	树的计算特性	(115)
5.4	影响图求解过程综述	(118)
5.5	影响图的表示特性	(119)
5.6	影响图的计算特性	(124)
第六章	确定信息和控制价值的正确方法.....	(128)
6.1	原始决策问题	(129)
6.2	完全信息价值	(130)
6.3	洞察者的概念	(132)
6.4	应用影响图确定洞察者的价值	(135)
6.5	洞察者价值问题的规则	(141)
6.6	基本影响图的应用	(143)
6.7	完全控制价值	(146)
6.8	结论	(148)
第七章	影响图与概率推理.....	(150)
7.1	引言	(150)
7.2	举例——化工厂的警报系统	(151)
7.3	概率影响图的数学特征	(152)
7.4	概率推理	(155)

7.5	概率影响图的基本变换	(156)
7.6	概率影响图的复杂变换	(158)
7.7	求解概率影响图推理问题所需要的信息量	(167)
7.8	合并与扩展	(176)
7.9	数值举例	(178)
第八章	动态规划和影响图	(190)
8.1	概述	(190)
8.2	可分解性和超级值结点	(191)
8.3	具有超级值结点的影响图变换定理	(197)
8.4	评价具有超级值结点的影响图算法	(202)
8.5	举例	(204)
第九章	信度函数理论基础及应用	(210)
9.1	概率、证据和判断	(210)
9.2	概率判断的语言与设计	(212)
9.3	信度函数语言	(214)
9.4	离散情况下概率判断设计举例	(218)
9.5	用信度函数表示连续变量模型中不确定性之 必要性	(223)
9.6	利用信度函数建立连续变量的不确定性模型	(225)
9.7	相关变量和其关系的信度函数	(230)
9.8	不确定变量的算术运算和通过不确定关系传递 的信度函数	(233)
9.9	计算随机变量信度函数的蒙特卡罗方法	(235)
第十章	影响图的图形逻辑	(242)
10.1	概述和总结结果	(242)
10.2	可靠性和完整性	(245)
10.3	推论	(252)
10.4	应用	(254)

第十一章	用影响图表示统计模型	(260)
11.1	在建立统计模型中存在的问题	(261)
11.2	条件独立关系的基本性质	(262)
11.3	准影响图及其性质	(266)
11.4	影响图与条件独立的图形表示	(267)
11.5	影响图的贝叶斯规则	(270)
11.6	影响图的分解定理	(274)
第十二章	影响图的应用	(280)
12.1	机械系统监测与实时控制的影响图	(281)
12.2	含信息的采样方法:试验设计对决策的影响	(298)
参考文献		(312)
汉英名词术语对照表		(324)

第一章 绪 论

当今,无论是政府官员还是企业的经理,所面临的最大的难题之一是怎样在不确定的条件下做好决策.不管是决定核电站设计中的健康与环境标准,还是分析推销新产品的获利性,不确定性都将使决策变得复杂.如果决策的结局是不确定的,那么人们应该怎样评估决策?人们为了减少决策的不确定性需要搜集信息,获取信息应支付的费用是多少?等等.由此提出关于研究不确定性的方法论和基本观点问题.

决策分析是解决上述问题的基本观点.它给人们提供了分析和解决决策问题的逻辑框架,即以决策者所掌握的信息、可采取的行动和对待风险的态度为基础作决策的逻辑框架.它的理论基础是概率论的基本原理和由效用理论推导的一组理性公理.决策分析的理论和方法成功地应用在解决从商业到公共福利事业广阔领域的决策问题.

尽管决策分析大有可为,但在其应用中仍存在许多实际的局限性,最大的局限性是决策分析现有的建模工具的缺陷所致.很多实际决策分析问题规模大、内容复杂,是教科书中简单例子所无法比拟的.用现有的方法求解实际的大型问题,其计算量是随模型中变量个数呈指数增长的,因此存在无法解决的计算障碍.基于这一点,经常要求对模型的现实性和可操作性(或可计算性)进行非常麻烦的权衡.其结果往往是所建立的模型适应了建模工具的局限性,却无法实际的需要.

1.1 决策分析综述

这里简要综述典型决策分析问题的主要特征和决策分析过程,并以一个假设的问题说明决策分析的过程.

典型的决策分析问题具有两个特征:其一,问题中含有大量的相互联系的不确定变量;其二,它是将每个决策与在作决策时对不确定变量的了解联系起来的过程.

下面考虑的序贯决策问题是以实际决策为背景,但为便于说明概念而作了许多假设.

电力公司准备将进行常规检修停机的核电站重新启动运行,此时公司的经理们担心电站几个主要系统的可靠性.因为这个电站采用的设计和管网系统使用的建筑材料与其他发生主要系统故障的电站是一样的.许多类似故障都与一种称作“内部颗粒受压腐蚀爆炸”(英文缩写 IGSCC)现象有关.尽管产生 IGSCC 现象的真正原因尚不清楚,但人们相信故障是由加压冷却水与铺设管网所用材料之间的物理作用和化学反应引起的.

公司有许多方案可采用.一种是按计划进行直接启动电站.假如在重新启动时,主要系统发生故障,其他系统有可能遭到重大破坏,修复故障所造成的损失和系统停机的损失都是巨额的.另一种方案是公司推迟重新启动的时间,着手进行一项可靠性工程.该项工程的费用数目巨大,而且具体数额不能确切掌握.因为可靠性工程主要是更换可能引起 IGSCC 现象的管网材料,所以其效果是肯定的.实施可靠性工程后再重新启动时,因 IGSCC 现象引发的故障概率将明显降低.但 IGSCC 现象不是造成系统故障的唯一原因,公司对采用可靠性工程方案是否杜绝系统故障没有把握.

鉴于可靠性工程的费用高,直接启动风险大,工程师又提出一个方案:在实施上述两个方案之前,进行一项或两项旨在估计现有

IGSCC 水平的试验. 其中, 一个试验方案花钱少准确性差, 它仅能搜集系统易于获取的有关 IGSCC 证据的有限样本; 另一个试验可靠性高费用也高, 它主要对系统内部进行 IGSCC 检查. 不管哪个试验, 即使估计出系统 IGSCC 现象存在程度, 也不能完全预见系统是否发生故障, 但以此却可估计系统发生故障的条件概率.

公司应该采取什么行动(直接启动实施可靠性工程, 还是进行一二项估计试验系统 IGSCC 现象存在程度)? 假如公司决定怎么做, 那么公司希望支付的费用是多少? 哪个方案具有最小费用期望值? 下面就以此例说明决策分析的过程.

决策分析的过程是由一系列的迭代步骤所组成. 这里将决策分析的过程分为五个基本步骤: 构造问题; 建立确定型模型; 建立概率模型并搜集数据; 分析问题; 交流分析结果. 整个过程的流程如图 1-1 所示. 下面简述每一步骤, 并结合上述问题说明各步骤的结果.

1. 构造问题

构造问题阶段的目标是要清晰地提出决策者可采用的行动方案、决策结局和不确定性. 在这一步通常要澄清有关问题的一些模糊思想. 由于开始构造问题时, 一般都在高层次上进行, 因而难以采用一般化的自动辅助构造方法. 这是内容非常丰富的一个研究领域, 许多专家曾致力研究基于决策分析公理的专家系统概念, 并建立有具体专业内容的自动化决策系统.

(1) 公司的可行方案 在假设问题中, 决策者可行方案是一个动态过程, 具体过程如下: 公司要在重新启动和实施可靠性工程二者间抉择. 在此之前, 公司可在两项试验中进行选择. 假如公司作一项试验, 由试验获取系统发生故障可能性的信息. 在此之后, 假设公司作第二项试验, 公司还需在两个基本决策间作出选择. 不过此时, 公司由第二个试验获取系统存在 IGSCC 现象程度的新信

息,对系统发生故障可能性的估计进行修改.

(2) 价值 公司主要关心选择方案的经济成本,包括发生故障的直接费用和延时启动的间接费用. 公司还关心核电站在重新启动时如发生主要系统故障,使公司在核能监管会及公众中信誉下降的问题.

(3) 不确定性 公司认为存在如下不确定性:

- 1) 系统内存在 IGSCC 现象的程度;
- 2) 在重新启动时发生故障的系统个数;
- 3) 可靠性工程的费用;
- 4) 每个试验的结局;
- 5) 每项试验的费用.

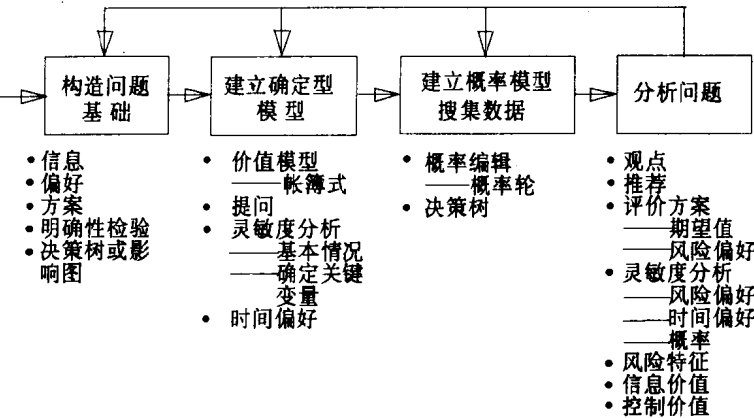


图 1-1 决策分析过程

2. 建立确定型模型

在决策分析过程中的确定阶段有三个主要目标:第一,建立一

个决策与状态变量之间结构关系的数值化模型,此模型称作结局模型;第二,提出一个反映决策者对结局偏好模型,称此为价值模型;第三,识别结局对不确定变量的灵敏度.确定型模型的灵敏度分析有助于减少模型中作为不确定性变量的个数.假设问题确定型模型的输出是:

(1) 结局模型 本质上,结局模型是一个计算器,它计算各种方案(试验、直接重新启动、可靠性工程)和每个不确定性变量在每种状态下的各种结果.在假设问题中,公司关心在核能监管会和公众中的信誉及每种选择方案的直接结果.在本例中,采用简单的结局模型.例如,总成本等于试验成本加上可靠性工程费用和故障费用.为简化起见,假设所有结局都用费用成本衡量.譬如,发生重大系统故障造成的信誉损失用系统故障成本反映.

(2) 价值模型 在多种结局的模型中,根据决策者的偏好价值模型将各种结局量度结合在一起变成单一的数值量度.建立价值和偏好模型的方法已发展成一种称作多属性效用函数分析方法(MUA).这种分析方法已广泛地应用于解决众多领域的决策问题.在假设问题中,因为将所有的结局都变成成本量度,自然满足可加性模型假设.

(3) 灵敏度分析 在决策分析中,“灵敏度”的基本准则是:当一个不确定变量在极点(通常是10%和90%的分位点)上,而其他变量保持正常值时,检验决策是否随之改变.如果决策变量保持不变,那么将该变量当确定型变量处理,在模型中以其正常值或平均值表示.这种对决策不灵敏的变量不需作概率估计,因而通过灵敏度分析可减少模型中不确定变量的个数和计算的难度.虽然灵敏度分析准则表面上看很简单,但做起来却需要不断地尝试.在这一阶段,还不知道变量间的概率关系或变量的可能取值.虽然从灵敏度分析中可以得到很多启示,但具体尝试时需格外谨慎小心地进行试算.

3. 建立概率模型并搜集数据

这一阶段的目的有两个:提出不确定变量之间的概率关系模型(相关与独立);指出每一个变量的概率输入. 用一般术语解释任意两个变量 X 和 Y 的概率独立的概念比较简单,即已知 A 的取值并不改变变量 B 的概率分布;反之亦然. 在数学上,概率独立意味着 X 和 Y 的联合概率等于两个变量边缘概率的乘积,即若 $Pr(X, Y | \epsilon) = Pr(X | \epsilon) Pr(Y | \epsilon)$ 或者概率 $Pr(X | Y, \epsilon) = Pr(X | \epsilon)$, 则变量 X 和 Y 概率独立. 否则当上述等式不成立时,变量 X 和 Y 概率相关.

通常,概率输入需要由多个步骤完成. 首先对每一个变量的概率分布和描述可能结局的值点作出估计,再用连续变量画出拟合这些点的曲线,最后,将估计的连续分布转化为离散型,用高斯平方法保证两个分布(这里有 n 个离散点)的前 $2n-1$ 阶距相等,检验拟合匹配情况. 将连续分布转化为离散分布的目的是便于计算,易于估计概率相关性.

概率关系和不确定数值的处理是决策分析的主要特征. 专家判断估计是将所有可利用的信息(包括统计的和经验的数据)结合到模型中的典型作法. 正规的程序化的交流过程有利于专家在判断估计中减少常见易出的偏差. 虽然有了这些保证措施,表示与估计概率信息仍是提出决策分析模型中最困难的一步. 经常要通过下一步的概率灵敏度分析,发现估计结果对概率输入的灵敏程度.

考虑假设问题中的概率关系时,主要研究采样、几个变量与 IGSCC 现象存在程度的关系. 两种事前试验的结果都受系统内 IGSCC 现象存在的实际程度约束,系统发生故障的似然率也受系统内 IGSCC 现象的实际程度和是否实施可靠性工程决策的限制. 假如公司不实施可靠性工程,系统是否发生故障不能确定,这种可能性很大. 反之,假如公司实施了可靠性工程,虽说系统是否发生

故障仍是不确定的,但将极大地减少发生故障的可能性.试验的成本与系统内存在 IGSCC 现象的程度无关,同时把试验的成本可看作是确定的,并且与工程成本相比是可以忽略不计的.相反,数额巨大的可靠性工程的成本是不确定变量.

4. 分析问题

在问题的分析阶段,将模型的所有组成部分联系起来,对问题进行正规评估.决策分析的标准输出包括:

(1) 最优策略 最优策略是决策分析的主要结果,它指示每个决策的最佳选择.在序贯决策中最优策略必须指示出已知每个前序不确定变量的每一状态条件下,决策的最优选择.在假设问题中,最优策略指出公司应该先干什么,后干什么.譬如公司决定先做试验,最优策略便指示公司在得到不同试验结果的条件下,再干什么.

(2) 最优策略的期望值 最优策略期望值是指采用最优策略在各种可能结局下所获价值的概率加权平均值.

(3) 确定当量和确定当量策略 假如决策者对待风险的态度不是中性(即非期望值决策者),那么分析中还需包括对决策者风险态度的处理.典型的做法是把结局以效用值表示,再转化为确定当量.确定当量系指决策者认为肯定一定数量的货币与得到一个结局不确定的彩票是无差别的,即二者的效用期望值相等,那么这一定数量的货币为这一彩票的确定当量.确定当量是通过决策者回答一系列问题直接估计得到的,或者是先确定决策者对待风险的态度,再利用相应的效用函数计算得到的.确定当量策略是考虑决策者风险态度的最优策略,即具有最大效用期望值的策略.

(4) 风险特征 最优策略是分析的结果,风险特征是一种解释性的输出.通常把风险特征表述成最优策略各种结局的累计概率分布或概率密度函数.通过比较最优策略和一般策略的风险特

征间的差别,有助于增加决策者对不同策略结局的感性认识.

(5) 完全信息价值和控制价值 完全信息价值是指在观察到与观察不到不确定变量的状态的两种不同情况下,最优策略期望值之差.控制价值系指假设能够控制一个不确定变量,保证某个具体的结局发生与对不确定变量不做控制的期望值之差.如果在上述两种情况下,两个策略之间不存在差异,那么完全信息价值或控制价值是零.只有两个策略存在差别,才可能有完全信息价值或控制价值.

信息价值的概念是对决策分析的重要贡献.决策者利用这一概念可决定为减少不确定性而收集新信息的工作何时应该停止.尽管多占有信息有助于减少不确定性,但存在一定的界限.信息价值的概念提供了量度附加信息价值的尺度,完全信息价值是收集新信息费用的上限.

同理,控制价值概念提供一个在现时分析中不存在的新添决策选择的价值.已知在假设问题中,经理们可能想了解保证实施可靠性工程费用不超过某一指标的控制措施的价值.计算控制价值可帮助决策者探讨保险、奖励或签订固定价格合同的各种方案.在假设问题中,公司要求计算关于可靠性工程费用的不确定性的完全信息价值,即在做出是否实施可靠性工程之前,估计观察到可靠性工程费用真实的价值.而计算完全信息价值时要对问题的结构进行修正.因为可靠性工程费用的不确定性受到是否实施可靠性工程的决策的约束.如何抑制这种不合理性在第六章将专门讨论.

(6) 灵敏度分析 在问题分析阶段所进行的灵敏度分析,一般既包括对作为确定变量的确定型灵敏度分析,也包括检验分析结果对概率分布或不确定变量的敏感性的概率灵敏度分析.这些分析要求进行大量的计算,并且在相当大的程度上依赖模型的结构.