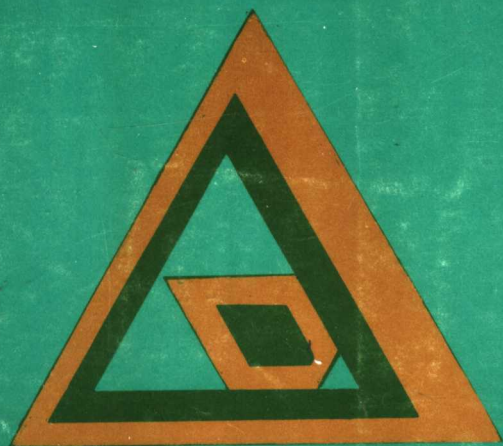


张尧庭 \ 张能胜 \ 杜劲松 \ \ 编译

专家系统中 不确定性 方法学



广西师范大学出版社

专家系统中 不确定性 方法学



张尧庭 \ 张能胜 \ 杜劲松 \ \ 编译

广西师范大学出版社

(桂)新登字 04 号

内 容 简 介

本书根据 1990 年德国的 Springer 出版社出版的“*A Methodology for Uncertainty in Knowledge-Based Systems*”和美国的 John Wiley & Sons 出版社出版的“*Approximate Reasoning Models*”编译而成,并给出一个较好的形式的处理,使本书比原著更清晰、更系统,介绍不确定性推理这一研究方向近期的工作。

专家系统中不确定性方法学

张广庭等编译

责任编辑:余鑫晖 封面设计:桑林佳 版式设计:肖向阳

广西师范大学出版社出版发行 邮政编码:541001

(广西桂林市中华路 36 号)

湖南省地质测绘印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:5.375 插页:1 字数:135 千字

1994 年 6 月第一版 1994 年 6 月第一次印刷

印数:0001—2000 册

ISBN 7-5633-1837-2/O · 007

定价:(平装)3.00 元

(精装)6.00 元

前 言

1990 年, 德国的 Springer 出版社和美国的 John Wiley & Sons 出版社相继出版了两本关于不确定性推理的书。前者出版的是

A Methodology for Uncertainty in Knowledge-Based Systems

作者是 Kart Weichselberger 和 Sigrid Pöhlman, 是一本专题性的书, 主要是介绍他们自己的工作——概率区间估计。后者出版的是

Approximate Reasoning Models

作者是 Ramon López de Mántaras, 是一本教材性质的书, 主要是介绍这一方向的几个典型的方法。这两本书的内容有重复的部分, 但侧重点很不相同, 前一本书着重于将以前的方法和他们的工作进行比较, 后一本书则重点在于介绍方法。这两本书篇幅都不长, 利用这些材料, 写成一本书, 并给出一个较好的形式的处理, 介绍这一方向近期的工作, 这就是我们编译的目的。

本书的顺序大致上与上述的第一本书相似, 把第二本书中的概率方法、信念方法等内容, 与第一本书的有关介绍综合在一起, 成为 § 2 的内容。把与概率方法无密切关系的模糊逻辑与可能性理论(即第二本书的重要内容)作为 § 8, 并标以 * 号, 如对非概率方法没有兴趣的读者, 可以不看。这样既系统、完整地介绍了概率方法, 又不遗漏这两本书的内容。

为了让读者更好地了解这两本书的内容, 我们把这两本书的前言均译出附在这里, (一)、(二)分别表示第一本书和第二本书的前言。

毋庸讳言，在编译过程中，我们的确花了一些功夫，力求使本书比原著更清晰、更系统，有兴趣的读者，可以与原文对比。当然限于水平，是否还有遗漏或错误理解之处，诚恳地希望读者批评指正。

应该感谢广西师范大学出版社的余鑫晖同志，没有他和出版社同志的努力，本书很难这么快付印。本书写作中是得到博士点基金资助的。

编译者 张尧庭 张能胜 杜劲松

1992年3月

(一)

近年来专家系统中不确定性管理方面的出版物数量明显地增加了不少,然而这场讨论还远没有结束.新的建议接二连三地提出来想刻划和综合专家系统中的信息,这些建议没有一个能被普遍地接纳.

被推荐的这些新方法,大都引入新概念,这些新概念是不以古典概率理论作为基础的.然而,这本由统计学家写的书,研讨了用经典理论给出系统化处理的可能性.它已注意到了在许多专家系统中可用于给出可靠的点估计的信息是相当少的,因此处理概率的区间值是本书的主要目标之一.

在我们的研究中,还不能处理好这些内容的各个重要的专题.我们想在这一方面继续研究,目的是处理好目前尚未解决的这些问题.我们还认识到,同行们的经验可能对我们关心的内容会给出新的看法.因此我们竭诚欢迎对我们的研究提出各种批评并注意所有的建议.

我们有幸能与 Ulm 的 Thomas Kämpke 讨论研究其中的某些方面,他提了一些有意义的建议.

我们的母语是德语,而且生活在一个讲德语的环境中,因而用英文表达是有些困难的. Plymouth 的 Louise Wallace 在这方面曾给我们很多帮助,她不应対书中遗留的不妥之处承担任何责任.

Munich(慕尼黑)的 Anneliese Hüser 和 Angelika Lechner 仔细地编排了书稿,一次次改进直到最后. Munich 的 Dieter Schremmer 帮我们画了图.

非常感谢他们的帮助.

Kurt Weichelberger, Sigrid Pöhlmann

1990 年 1 月于慕尼黑

(二)

不确定性的处理是专家系统发展中遇到的主要问题之一，这是因为专家系统知识库中的许多信息由于以下的种种原因而具有不确定性：信息不是完全可靠的，信息是不完全的；不同来源的信息是抵触的，信息是不精确的。不可靠信息是来自一些无法很好限定的概念，这些概念不得不用一些不确定的事实来描述。它还来自专家系统中一些缺乏可信度的规则，由于这些规则总有例外的情形。不完全信息也是不确定性的一个来源，这是由于不得不处理在评估一些前提的不确定性的程度时，这些值是未知的。在汇集不同来源的信息时会面临四种有问题的结论：知识库可能含有不相容的规则，冗余的规则，重复地综合，还可能遗漏了重要的规则。知识库在编辑时可以消除一些这类问题，特别是冗余性和重复性。不确定性的一个重要来源是用来表示规则和事实的语言本身的不精确性。这些不精确性阻碍了对这些规则和事实给出确切的解释。

本书给出三个主要的数值方法的近代分析和描述，这些方法用于在推理部分进行建模、作出近似推理：它们是概率的、可能的和信念的。本书说明了它们的相似性、差别和适用范围。其主要目的是，将以前文献中的重要成果汇集成一个小册子。

本书由三章组成。第一章是论述基于概率模型的方法，突出了 PROSPECTOR 的主观贝叶斯方法和 MYCIN 的确信因子，因为这些是到现在最广泛的熟知的概率方法。第二章陈述 Dempster—Shafer 的信念理论。第三章集中于对可能性理论中最重要的和近期的结果给出详细的论述。这是最长的一章，也包括了我们的研究组所得的主要结果。结束时提了一些注记，概括了处理不确定性的这些数值方法的适用范围，并提出了建议：应该考虑能综合这

些方法的一种纯形式的处理。

这本书主要是为人工智能方面较好的大学生和研究生写的，是基于我在巴塞罗那理工和自动化大学讲授 40 学时的研究生课程的教材。

尽管我试图展开我自己个人的观点，但我感到我是很受益于别的作者，特别是 D. Dubios 和 H. Prade。

这本书的部分材料是我与同事合作的成果，我应衷心地感谢他们，特别是 L. Godo, C. Sierra, E. Trillas 和 L. Valverde。还要感谢 Maria Angeles Valls 给我打印手稿，同时要感谢西班牙的 Rank Xerox 提供最好的 6085 工作站设备和软件，有了这些，手稿才能打印好。

Ramon López de Mántaras

Artificial Intelligence Group

Centre of Advanced Studies

National Scientific Research Council (CSIC)

17300 Blanes, Girona

Spain

目 录

§ 1 引 言	(1)
§ 2 常用的几种方法	(6)
§ 3 概率的区间估计	(26)
§ 4 电厂报警的例	(53)
§ 5 一般情形的综合规则	(71)
§ 6 诊断系统中概率区间的估计	(82)
§ 7 使用区间估计的例	(103)
*§ 8 模糊逻辑与可能性理论	(108)
参考文献	(157)

引言

不确定性推理的研究与人工智能中的专家系统是分不开的，也与统计学的统计推断的研究有联系。下面我们简要地说明一下有关的发展情况，从而可以了解本书编译的目的。

60年代，由于计算机硬件技术的迅速发展，人工智能的专家们过于乐观，他们企图弄清各类问题解决的一般方法，对思考问题的复杂过程给以模拟，再把这种方法用于通用程序。然而，开发通用程序往往是非常困难的，因而虽然有了一些进展，却没有重大的突破，而且发现：如果一个程序所能处理的问题种类越多，那么它对任何问题的处理能力也往往就越差。于是自70年代后，人工智能专家转向研究知识的表示和控制搜索的技术，把这一方法和技术用来开发专用性较强的程序，这样既减少了存贮所需的空
间，也缩短了占用的CPU时间。这一方面的研究有不少进展，但仍未能有重大的突破。

到了70年代末，一些人工智能的专家，如E. A. Feigenbaum等人，认识到一个重要的事实：一个程序解决问题的能力来自它所拥有的知识，而不只是它所采用的形式和推理方法。这就明确了程序的智能功能，需要向它提供某些领域的大量高质量的知识才有可能开发。这就引向了开发专用的智能程序，这些程序系统成为某些有限问题领域的专家，因而也就称为专家系统。

诊断专家系统是一类特殊的专家系统，它能对“症状”进行

分析,推断产生这些“症状”的原因,作出合理的解释,并提供排除“故障”的方案.很明显,这是一类“故障诊断”的专家系统,它是根据应用的对象、范围来划分的.在已开发的专家系统中,诊断专家系统最多,应用的面也最广.例如,农业方面有伊利诺思大学开发的农业诊断专家系统 PLANT/ds,它利用对病害的症状和植物环境的知识,提供诊断大豆病害的咨询;在计算机方面,有美国国际计算机有限公司研究与开发中心与 BRUNEC 大学共同开发的诊断专家系统 CRIB,它能帮助计算机工程师和系统维护员寻找计算机硬件的问题和软件的错误;在电子学方面,有斯坦福大学开发的 DART,有贝尔实验室开发的 ACE,可用来测定电话网中故障的位置,提出维修的建议,此外还有其他大学和军方开发的一些专家系统;在工程方面,有美国通用电气公司开发的诊断系统 DELTA,它能帮助维护人员确定并排除柴油电力机车中的故障;在核反应堆方面,EG & G 开发了诊断专家系统 REACTOR,它通过监视设备的读数来协助操作人员诊断和处理反应堆的事故;在地质方面,有卡耐基—梅隆大学开发的 MED 诊断专家系统,它能查找钻探中出现问题的起因,提供处理建议;在管理方面,佐治亚理工学院开发了专家系统 PROJCON,它能帮助管理人员诊断项目中的问题和找寻起因;在医学领域内,诊断系统是最活跃的,除了 MYCIN 以外,还可列举 ABEL, AI/COAG, AI/MM, ……等等几十个这一方面的诊断系统.

在诊断系统中,不确定性的推理是不可避免的,它要从观察到的现象中作出诊断的结论,就有相当程度的不确定性.它导出这些结论的规则不应与通常的逻辑规则相矛盾,而且一般说来,还不能对各种规则予以相同的地位.在本书中,将以一个电厂的报警系统为例给以说明.今后,我们说诊断系统,总是指一类专家系统,不再重复声明了.

从上面的介绍,就可以看到,设计诊断系统的研究人员必需

回答这样的问题：用什么来度量不确定性？三百多年来，哲学家、科学家、数学家和统计学家们，一直是用概率这一概念来描述不确定的程度，已经发展了丰硕的理论，积累了大量的应用于各方面问题的经验，应该说用它来处理诊断系统中的问题是会有办法和有成效的。然而，近几十年中，在诊断系统中应用概率的理论却引起了种种疑问；一方面，在统计学中，对概率论的应用范围和对它的解释也有不同的观点，由于这种分歧而形成了不同的学派。下面我们从人工智能专家系统和统计学这两方面来介绍引起的问题。

从人工智能的专家系统提出的要求来看，自然要问：在构造这一类系统时，究竟遇到了什么新的问题，以致于必需越过概率论来发展一些新的度量不确定性的方法？

实际上可以从下面的三点看出这些新的问题：

(1) 如果观察到某一事实，于是就有对问题中有关假设的一个不确定性度量 M_1 。如果又观察到了另一个事实，对同一个假设又有一个不确定性的度量 M_2 。这样必需给出一个规则，它能由这两个事实导出对这个假设的不确定性的度量。这种规则作为 M_1 和 M_2 的函数，它就不能不考虑两个被观察到的事实之间存在哪一种相依的关系。如果这两个事实几乎总是同时发生的，此时，第二个观察是多余的，不应用它来作为依据；如果这两个事实很少同时发生，真是这样的话，这对问题中的假设是一个很重要的征兆，一旦它们同时发生，对不确定性度量的处理就会有强烈的影响。于是就产生了问题：概率论是否因无法提供这种规则的构造而应受到责难呢？

(2) 以医学方面的诊断为例，如果观察到某种症状，于是对患某种病的假设就有一个不确定性的测度。然而，这种病如果是越来越频繁地发生，再使用这个测度是否合适呢？这表明这种不确定性的测度不能用于已显示出有不同频率出现某种疾病的各个总

体。所以第二个问题是：对观察到的事实，能否不考虑环境而赋予某一个不确定性的度量？

(3)当概率论用于陈述命题时，是用实数作为不确定性的度量的大小。然而诊断系统中提供的信息，通常是难以强到可以给出这种表述。对诊断系统中的一些概念不合于概率论的传统方式时，的确是这样。但是确有可能不取消概率论的基本假定，扩充它的框架来满足这种需要。本书中的一些内容就是与此有关的。另一个与此相关的反对意见是认为概率论是适用于统计推断而不适用于诊断系统，对另一些专家系统，统计推断是合适的。问题是：什么样的不确定性度量既可以反映专家经验提供的信息，又可以反映从样本中获得的信息？

实际上，从统计推断的发展历史来看，统计本身就是一种不确定性的推理，对于这一方面的研究和争论，已持续了相当长的时间。早在本世纪 30 年代，R. A. Fisher 提出了信念(Fiducial)概率或信念程度来描述统计推断的不确定性。他认为这是与概率完全不同的概念，这是一种客观的归纳推理的方法，因而他的这一学派称为信念学派，与贝叶斯学派、经典学派一起成为统计学中的三大学派。信念学派的特点是，它不需要对参数假定有一个先验的概率分布，通常由这种方法给出的“概率”不是一个实数，而是一个区间。例如，对参数 θ 属于某一集合 B ，它能给出下限 $P_-(B)$ 和上限 $P_+(B)$ ，因此 $[P_-(B), P_+(B)]$ 就形成了一个区间。这一方面的进展，首先是由 A. P. Dempster 在 60 年代的一系列工作完成的。然而，Dempster 的工作在统计界并未引起关注，到了 1986 年，J. V. Zadeh 作了改进，使这个模型更容易被了解和便于使用。在 1975 年，Dempster 的学生 G. Shafer 把 Dempster 的理论用于两个特殊的方面：区间值概率和综合规则。Shafer 在他的理论中引进了一个基本概念——信任函数(belief function)，他认为信任的程度(信任函数)是一个命题的属性，把它引入诊断系统。本

书将介绍 Dempster-Shafer 的方法，并将它们与概率的区间估计作比较。

本书提供的概率的区间估计方法还来源于 50 年代 Gustave Choquet 的工作。他引入了“容量”(Capacity)这一概念，用来描述一些集合函数。这类集合函数不遵循可加性，但具有准可加性或次可加性(这一类的概念，其实在测度论中早就有了，相当于外测度、内测度所具有的那种比可加性弱的性质)。在后来 70 年代，Huber 和 Strassen(见 Strassen 1964; Huber 和 Strassen 1973; Huber 1973, 1976)系统地研究和传播了这种想法，发展了稳健统计(Robust Statistics)。稳健统计要处理的不是单个的概率分布，而是考虑具有某些相似性质的概率分布族。后来 80 年代，Walley 和 Fine 对区间值的概率提出频率理论的基本观点。本书的内容将与概率的区间值理论和方法有密切的联系。

在进入数学的陈述和推导之前，我们先作一些声明。

本书假定读者已熟悉概率论和数理统计的一般知识，相当于理工科大学中本科生的教材内容，我们使用的符号也是和普通教科书的符号是一样的，因而不需要再逐一声明。我们不追求形式上的过于严密，而使符号变得复杂而麻烦，反而不易理解。例如，专家系统中涉及的对象总是有限的，因此谈到概率空间时，不再提及相应的 σ 代数(或事件域、波来儿域)，总是以一切子集作为我们的 σ 代数。有时对命题、事实、现象、证据……等等，也论及它的概率或条件概率，这也就是把它们也考虑成事件。这些对实际工作者而言，是容易理解的。

常用的 几种方法

这一节重点介绍目前在专家系统中常用的几种方法, 对这些方法的依据和有关的推导, 尽可能给以概率的解释.

我们这里的介绍, 并不是按历史上出现的早、晚来安排顺序, 而是从内容上看, 比较相近的, 尽可能放在一起, 既节省篇幅, 又便于进行比较. 有些概念的定义和引入, 也不是按最初出现时的说法, 是为了前后便于比较和联系, 适当加以改写的.

§ 2.1 PROSPECTOR 中的 LN 与 LS

先引入记号“ $\rightarrow$ ”, 若有证据 E , 则假设 H 成立, 用 $E \rightarrow H$ 表示. 换成概率的说法, 就是 E 发生时, H 这个命题对, 这是有概率的, 这个概率就是条件概率 $P(H|E)$.

如 H 成立的先验概率是 $P(H)$, 在 E 发生后, H 成立的概率就不是 $P(H)$, 而是 $P(H|E)$, 它们的联系就是贝叶斯公式

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)}{P(E)} P(H)$$

Duda 等(1976)用它引入了 LN 与 LS . 对 $\bar{H}$ 用上述公式,

$$P(\bar{H}|E) = \frac{P(E|\bar{H})}{P(E)} P(\bar{H})$$

因而有

$$\frac{P(H|E)}{P(\bar{H}|E)} = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E|\bar{H})P(\bar{H})}$$

值 $P(H)/P(\bar{H})$ 称为先验的优比, 用 $O(H)$ 表示, 把 $P(H|E)/P(\bar{H}|E)$ 称为后验的优比, 用 $O(H|E)$ 表示, 记

$$LS = \frac{P(E|H)}{P(E|\bar{H})}$$

它就是似然比, 于是有公式

$$(2.1) \quad O(H|E) = (LS) \times O(H)$$

再记

$$LN = \frac{P(\bar{E}|H)}{P(\bar{E}|\bar{H})}$$

用 $\bar{E}$ 代 (2.1) 中的 E , 就有

$$(2.2) \quad O(H|\bar{E}) = (LN) \times O(H)$$

很明显, LS 的值越大, E 发生时, H 成立的概率就会增加, 它反映了规则 $E \rightarrow H$ 的充分性的程度; LN 的值越小, $\bar{E}$ 发生时, H 成立的概率就会减少, 它反映了规则 $E \rightarrow H$ 的必要性的程度. 因此, LS 和 LN 的值就反映了我们对于假设 H 的知识的不确定性. 在已知 E 发生或 E 不发生的前提下 (在已知 E 为真或 E 为不真的条件下), LS 与 LN 有如下的关系式:

$$(2.3) \quad LN = \frac{1 - (LS) \times P(E|\bar{H})}{1 - P(E|\bar{H})}$$

这很容易直接验证. 从 (2.3) 就知道: 若 $LS < 1$, 则 $LN > 1$; 若 $LS > 1$, 则 $LN < 1$; 而且其中一个为 1 时, 另一个也必然为 1. 正如 Duda 等人 (1976) 指出的, 这有些与直觉相背. 因为我们可以想到 E 为真时增加 H 的概率 ($LS > 1$), 而 E 不真时对 H 没有影响, 但由 (2.3) 却导出 E 不真时对 H 有负的影响 ($LN < 1$).

现在来考虑若干个证据的综合推断的问题. 假定有 m 个规则 $E_1 \rightarrow H, \dots, E_m \rightarrow H$, 问题是怎样给出由 $E_1, \dots, E_m$ 去推断 H 的规则. 如果考虑到 $E_1, \dots, E_m$ 之间各种联系, 问题就会变得非常

复杂. 这时通常都假定 $E_1, \dots, E_m$ 对 H 和 $\bar{H}$ 都是条件独立的, 也即有

$$P(E_1 \cap \dots \cap E_m | H) = \prod_{i=1}^m P(E_i | H)$$

$$P(E_1 \cap \dots \cap E_m | \bar{H}) = \prod_{i=1}^m P(E_i | \bar{H})$$

于是就有

$$O(H | E_1 \cap \dots \cap E_m) = \left(\prod_{i=1}^m LS_i \right) O(H)$$

$$O(H | \bar{E}_1 \cap \dots \cap \bar{E}_m) = \left(\prod_{i=1}^m LN_i \right) O(H)$$

其中 $LS_i = P(E_i | H) / P(E_i | \bar{H})$, $LN_i = P(\bar{E}_i | H) / P(\bar{E}_i | \bar{H})$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

然而, 这样的条件独立性是一个很强的假定条件. 这可以由下面的定理看出, 这个定理是由 Johnson (1986) 和 Steve (1987) 独立得到的.

定理 2.1 假定有 n 个假设 $H_1, \dots, H_n$, 它们互斥, 并且 $\bigcup_{i=1}^n H_i$ 是必然事件, 此外 $E_1, \dots, E_m$ 对 H_i 和 $\bar{H}_i$ 都条件独立, $i = 1, 2, \dots, n$, 则当 $n \geq 3$ 时, 对每一个 H_i , 至多有一个 E_a 使得

$$P(H_i | E_a) \neq P(H_i)$$

证 今

$$\begin{aligned} P(E_j E_k \bar{H}_i) P(\bar{H}_i) &= P(E_j E_k | \bar{H}_i) [P(\bar{H}_i)]^2 \\ &= P(E_j | \bar{H}_i) P(E_k | \bar{H}_i) P(\bar{H}_i) P(\bar{H}_i) \\ &= P(E_j \cap \bar{H}_i) P(E_k \cap \bar{H}_i) \end{aligned}$$

也即

$$\begin{aligned} &(P(E_j E_k) - P(E_j E_k H_i))(1 - P(H_i)) \\ &= (P(E_j) - P(E_j H_i))(P(E_k) - P(E_k H_i)) \end{aligned}$$

两边展开, 注意等式 $P(E_j E_k H_i) P(H_i) = P(E_j H_i) P(E_k H_i)$, 因此就有

$$(*) \quad P(E_j E_k) - P(E_j E_k H_i) - P(E_j E_k) P(H_i)$$