

地震预报专家系统(二)

——知识表示和证据组合^{*}

范洪顺 王碧泉

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要

研究了地震预报专家系统 ESEP 的知识表示。ESEP 的知识表示模型为 ESEP/K, 它从地震预报领域知识的特殊性着眼, 结合了产生式表示和过程表示两种知识表示方法, 在产生式规则中, 除常用的证据组合方式“AND”和“OR”外, 我们还设计了三种新的证据组合方式。

关键词 专家系统; ESEP; 知识表示; 证据组合; 地震预报

一、引言

专家系统是基于知识库的知识利用系统, 是知识表示、知识推理和知识获取等知识工程技术和方法的应用、实验场所。其中, 阐述和表达人类专家处理专门问题的知识是建造专家系统的中心任务。尽管专家系统发展很快, 但它仍然是一个通用性理论较少的、高度实践性的领域, 几乎每一个新的应用都有一系列创造性的工作要做。

知识是客观世界的事物和它们之间的联系。一般认为, 知识可以分为四种: 对象、事件、行为和元知识。学者们已经提出了许多知识表示方法, 例如: “AND/OR”图、语义网络、产生式规则、谓词逻辑、过程表示、特征表以及框架等(管纪文等, 1987; 傅京孙等, 1987; 涂序彦, 1988; Barr *et al.*, 1981)。大多数的专家系统都以产生式规则为其基本的知识表示方式, 其中最著名的是用于医疗诊断的 MYCIN 系统(Shortliffe, 1976)。

ESEP 是一个根据多种地震前兆(或证据)进行地震预报的专家系统, 由王碧泉等人于 1989 年建成(王碧泉等, 1992)。本文专门介绍 ESEP 知识表示方面的内容。ESEP 的知识表示模型称为 ESEP/K, 它结合应用了产生式规则和过程表示两种方法, 把地震预报的专门知识表示成事实(或称为证据, 它包括了对象的类别和它们之间的关系)、规则或过程、有关何时和怎样应用这些规则或过程的信息。

为适应某些地震预报知识的特殊性, ESEP/K 对产生式规则的证据组合方式进行了

* 国家地震局地球物理研究所论著 92A0030。

1990 年 6 月 30 日收到本文初稿, 1991 年 5 月 31 日决定采用。

改进. 所谓证据组合方式, 即规则中各证据的安排和联系. 除已有的“AND”和“OR”外, 我们设计了三种新的方式: “CON”(限制), “W”(加权)和“SYN”(综合).

二、ESEP 的知识表示

知识表示的工作不但涉及设计几种在计算机的程序中储存信息的数据结构, 而且包括允许“有智能”地管理这些数据结构以进行推理的过程. 一个专家系统的知识表示模型应该考虑以下 3 个方面:

适用性 要适于表达有关领域的各种知识; 方便于知识获取; 表达要明确、简洁.

可扩充性 要便于知识库的添加、删除、扩充、修改和维护.

有效性 要确保语法和语义的正确, 提高知识的推理效率.

ESEP/K 充分发挥了产生式表示和过程表示的优点, 对地震预报的有关知识按其性质分别用产生式和过程程序来表示. 通过人机对话, 由知识库管理程序统一进行管理, 由推理机调度程序实现统一调用.

1. 产生式表示

产生式表示也称规则表示, 最基本的规则形式可表示为

IF(E) THEN(H)

IF 部分称为条件部分, 它陈述使产生式(即规则)发生作用所需要的条件; THEN 部分称为结论部分, 它表示产生式发生作用(激活)后的结果.

产生式系统有许多优点:

(1) 自然性. 产生式规则以“IF…, THEN…”的形式表示, 这与人们所说他们怎样解决问题的方式非常相似.

(2) 模块性. 规则库中的单个产生式可以独立地加入、删除或更改.

(3) 一致性. 所有的信息都用产生式规则的严格结构来编码, 这易于使计算机实现自动推理.

(4) 结构化. 利用产生式规则的组合, 可以表达深层知识, 如元知识.

(5) 灵活性. 产生式系统的知识库很好管理, 便于加入启发性知识, 便于学习和解释.

产生式系统也有一些缺点, 主要是:

(1) 效率低. 由于简单产生式系统中, 各条规则独立, 按顺序检索, 效率较低. 在求解复杂问题时, 会出现“组合爆炸”. 关于这一点, ESEP 的规则库采用了分层结构, 相对地在很大程度上提高了系统的效率.

(2) 表达能力低. 简单的产生式的“IF…, THEN…”格式, 表达复杂问题不方便. 关于这一点, 在 ESEP 中, 一方面改进产生式的结构, 扩充产生式的表达能力; 另一方面, 把复杂的过程型知识用过程性程序块表示.

ESEP/K 的产生式规则用下面的形式表示:

((规则类型)(规则名)(规则参数))

(证据)

(结论))

每条产生式规则包括三个部分: 第一部分是规则的说明部分; 第二部分是证据(条件)部分; 第三部分是结论(假设)部分。规则中的“规则类型”标明证据部分各证据的组合(或联系)方式, 有“NIL”, “AND”, “OR”, “CON”, “W”, “SYN”六种方式。“规则名”是每个产生式所特有的名称或编号。“规则参数”是规则发生作用时需要的一些参数。

例如, 在 ESEP“中短期预报子规则库”中有下面一条规则:

((NIL RULE049 (0.8))

((earthquake with $M \geq 6.0$ is impending by earthquake gap))

((earthquake with $M \geq 6.0$ is impending by spatial distribution)))

这条规则的含义是:

若由地震空区有 $6.0 \leq M < 7.0$ 的地震, 则由空间分布有 $6.0 \leq M < 7.0$ 的地震。

规则类型为“NIL”, 规则名是“RULE049”, 规则信度为 0.8。

ESEP 由 3 个子系统组成: 中长期预报子系统、中短期预报子系统和年度预报子系统。这 3 个子系统相对独立又相互联系, 各个子系统都有 1 个子规则库。ESEP 的规则库中已容纳了三百多条规则。

用产生式规则可以将前兆异常与强震发生的关系简明直观地表示出来, 使 ESEP 具有产生式系统的众多优点。关于 ESEP 的产生式规则, 后面还有介绍。

2. 过程表示

过程表示是把一组知识表示成怎样去使用这些知识的过程。它的优点主要是:

- (1) 易于表示怎样去做某事的知识;
- (2) 易于表示那些不适于用简单的说明型方法表示的知识;
- (3) 易于表示关于如何有效地去做某件事的启发性知识。

地震预报最基础的工作, 就是从原始资料中发现地震前兆。这方面的知识, 一般来说都是较为复杂的过程性知识, 用产生式规则来表示就显得无能为力, 而适于用过程表示。在 ESEP 中, 这些知识被表示成一个个的程序块。对这种知识的运用就是对描述它的过程的调用执行。不同条件或不同环境下的运用, 可用程序要求的各种调用参数来实现。这样的表示方法, 一方面表示了十分复杂的过程性知识, 另一方面又具有模块化、层次化的优点。

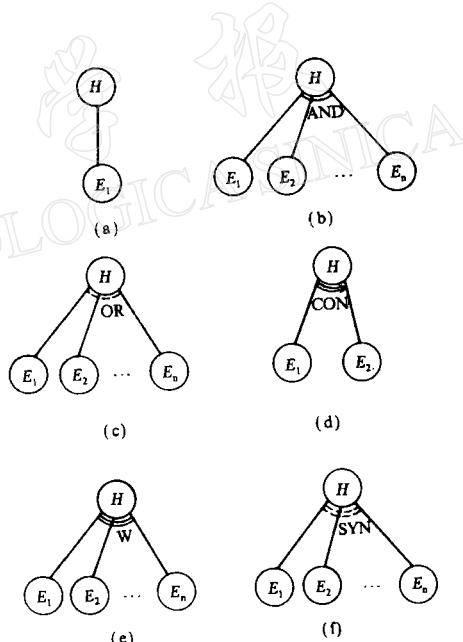


图 1 ESEP 的证据组合关系图

(a) 单个证据; (b) 证据以 AND 连接; (c) 证据以 OR 连接; (d) 证据以 CON 连接; (e) 证据以 W 连接; (f) 证据以 SYN 连接

例：子模块 BELT. 其功能是判定一个研究地区是否有地震条带分布，并给出条带分布的事实信度。它按下列步骤运行：

- (1) 获得有关地区和时间的参数；
- (2) 对地震目录进行预处理；
- (3) 由地震目录获得研究地区的震中分布图；
- (4) 从数据库中获得有关启发式搜索的参数；
- (5) 搜索和判断地震条带分布。

在 ESEP 中，由产生式规则表示的知识可以用图 1 所示的关系联成一个树状图。叶子节点的事实可以是人机对话输入，部分也可由方法库中的过程获得。

三、ESEP 系统中的证据组合

1. 证据的不确定性

地震预报的意见，主要来自分析地震前兆异常情况。在 ESEP 中，这就表现为获得前兆证据，通过知识推理，到最终得出预报意见的过程。实际上，这些证据是具有某些不确定性的。例如，当一个专家在分析某地区是否存在地震空区时，他往往不是给出一个绝对肯定（或否定）的结论。他也许会说，有 80% 的可能是一个地震空区或 80% 像一个地震空区。也就是说，专家的观察和判断本身就带有不确定性。另外，干扰或测量的不精确性也会带来证据的不确定性。

ESEP 规则库中每条规则的证据部分 (E) 可以是单个的证据，也可以由多个证据 E_i ($i = 1, 2, \dots, n; n \geq 1$) 组成。由于 E_i 具有不确定性，所以有一个值 $CF(E_i)$ 与之对应，称为信度值。 $CF(E_i)$ 的性质为：

- (1) $0 \leq CF(E_i) \leq 1$ ；
- (2) $CF(E_i) = 0$ ，表示该证据完全不可信；
- (3) $CF(E_i) = 1$ ，表示该证据完全可信；
- (4) $0 < CF(E_i) < 1$ 时， $CF(E_i)$ 的值越大，表示该证据的可信度越高。

2. 产生式规则里的证据组合关系

建立规则库时，需要同时考虑两方面的问题：第一是要把事实分组安排到一个个产生式规则中；第二是要在产生式规则中确定这些事实之间的关系。关于后者，又包括两个方面的内容：其一是证据和假设的关系；其二是当证据部分包含不只一条证据时，这些证据之间的关系。下面通过介绍证据部分各条证据之间的关系，明确 ESEP 产生式规则的性质。

在简单的产生式规则中，证据之间的关系（我们称之为证据组合方式）只有“AND”和“OR”两种。在 ESEP 系统中，我们遇到这样的问题：当有不止一个证据需要安排在一条规则里时，仅用以上的“AND”和“OR”还不能完满地表达它们之间的关系。为此，我们研究提出了另外三种证据组合方式：“CON”，“W”，“SYN”，使更多的专家知识得以能用产生式规则表示。根据不同的证据组合方式，产生式被分为六种类型。ESEP 的规则中，证据部分的信度 $CF(E)$ 、结论的信度 $CF(H)$ 和规则信度 $CF(H, E)$ 满足

$$CF(H) = CF(E) \cdot CF(H, E) \quad (1)$$

下面分别介绍 ESEP 的各种证据组合方式(图 1 给出了这些关系的示意).

(1) 只有一条证据 当证据部分(E)只有一条证据时, 规则类型为“NIL”, 规则参数是规则信度 $CF(H, E)$, 证据部分的信度为

$$CF(E) = CF(E_1) \quad (2)$$

(2) AND(与)关系 当规则的类型为“AND”时, 规则参数是规则信度, 若证据部分有 n 条证据 E_1, E_2, \dots, E_n 时, 则

$$CF(E) = \min_{i=1, n} \{CF(E_i)\} \quad (3)$$

(3) OR(或)关系 当规则类型为“OR”时, 规则参数是规则信度, 若证据部分有 n 条证据 E_1, E_2, \dots, E_n , 这时

$$CF(E) = \max_{i=1, n} \{CF(E_i)\} \quad (4)$$

(4) CON(限制)关系 规则类型为“CON”, 规则参数为“NIL”, 规则信度 $CF(H, E)$ 隐含为 1. 证据部分包含两条证据 E_1, E_2 , 这两条证据的位置不可交换. 这时

$$CF(E) = \begin{cases} CF(E_2) & \text{当 } CF(E_2) < CF(E_1) \\ \frac{CF(E_1) + CF(E_2)}{2} & \text{当 } CF(E_2) \geq CF(E_1) \end{cases} \quad (5)$$

(5) W(加权)关系 规则类型为“W”. 当证据部分有 n 条证据 E_1, E_2, \dots, E_n 时, 规则参数是对应的各证据的权重 W_1, W_2, \dots, W_n .

当 n 个证据中, 有 $m (1 \leq m \leq n)$ 个证据 $(E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm})$ 发生, 则该产生式可以被激活, 证据部分的信度 $CF(E)$ 为

$$CF(E) = \frac{\sum_{i=1}^m W_{ni} \cdot CF(E_{ni})}{\sum_{i=1}^m W_{ni}} \quad (6)$$

式中, W_{ni} 为 E_{ni} 对应的权重.

(6) SYN(综合)关系 规则类型为“SYN”, 当证据部分有 n 条证据 E_1, E_2, \dots, E_n 时, 规则参数部分有 n 个数 S_1, S_2, \dots, S_n 与之相对应.

当这 n 个证据中有 $m (1 \leq m \leq n)$ 个证据 $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm}$ 发生时, 产生式可以被激活, 证据部分信度为

$$CF(E) = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ni} \cdot CF(E_{ni})}{\sum_{i=1}^m S_{ni}} \quad (7)$$

式中, S_{ni} 为 E_{ni} 对应的参数. 规则信度是可变的

$$CF(H, E) = \max_{i=1, m} S_{ni} \quad (8)$$

3. 新的证据组合关系的意义和性质

由上可见, 对于简单的“AND”, “OR”关系, 我们没有作改变. 下面仅就我们提出的 CON, W, SYN 关系的意义和性质进行讨论.

(1) CON(限制)关系 在 CON 关系中, 第二个证据 E_2 在规则里的作用, 总是受到第一个证据 E_1 的限制.

我国地震工作者在实践中开辟了长期预报、中期预报、短期预报直至临震预报的地震预报途径。这表现为一个在时间上的逐步逼近和空间范围上逐步缩小的过程。用不同手段、不同方法或使用不同的资料，可以得到不同时空尺度上的地震危险性估计。较长时间、较大范围内的趋势性意见，对较小尺度上的预报意见有着一定的规定和指导作用。例如，某地区存在 7 级以上地震的中期趋势，则当短期（或临震）前兆出现时，就要多注意 7 级以上地震；相反，如果中期趋势是排除 7 级以上地震，则虽然有短期（或短临）前兆出现，但对未来地震的震级估计就应低一些（当前兆出现得较大、较多时，也应多注意 7 级以上地震）。“CON”关系的提出，正是为了适应这类情况。

(2) W(加权)关系 W 关系中，证据部分的信度取为各个证据信度的加权平均。各证据 E_i 的权 W_i 的相对大小，代表了该证据在规则中的重要程度。

在许多领域内，当用多种方法对同一对象进行判断或评估时，经常用到这种加权平均所代表的“权衡”方式。在地震预报中，由于地震前兆表现形式的多样性和复杂性，由于对这些现象之间的物理联系了解不够而带来的认识的经验性，当对不同来源的多个分析意见进行综合时，有时也采用“权衡”的方式。

(3) SYN(综合)关系 在实际的地震预报工作中，还常常出现这样的现象：虽然预报手段相同，但是对于不同的专家，由于他们的方法、资料和前兆判别指标等方面存在差别，因而对同一前兆的判断存在一定的差别，预报效果也有一定差异。例如，同样用 b 值作预报，不同的人可能选用不同的计算方法，时间段和地区范围可能不一样， b 值异常的标准也可不一样。

对于这类情况，如果各个专家的知识都用不同的规则表示，用多条规则支持同一事实的方式来综合，结果会不太符合实际。用 SYN 关系，把各个专家的意见安排在一条规则里，效果比较理想。第 i 个参数 S_i 代表了专家 i 用前兆 E_i 作预报的水平。

四、结语

专家系统的知识表示是与知识推理和知识获取紧密联系在一起的。知识表示模型的建立，首先需要对有关领域内的知识有一定的认识，同时也要考虑到系统的有效性和复杂性的矛盾。ESEP 的知识表示与地震预报知识的结构相适应，并且成功地汇集了多个专家的知识；“CON”，“W”，“SYN”这三种新的证据组合方式，扩大了产生式规则的表达能力。ESEP 几年来的使用情况表明，该系统的知识表示是方便于推理、解释和知识获取的。

参 考 文 献

- 傅京孙、蔡自兴、徐光佑，1987. 人工智能及其应用，248—304. 清华大学出版社，北京。
- 管纪文、邱涤虹，1987. 关于知识表示. 计算机科学，9，1，13—21。
- 涂序彦，1988. 人工智能及其应用，11—37. 电子工业出版社，北京。
- 王碧泉、陈祖荫、马淑田、范洪顺，1992. 地震预报专家系统 ESEP(一)——总体设计及主要结构. 地震学报，14，1—8。
- Barr, A. and Feigenbaum, E. A., 1981. *Handbook of Artificial Intelligence*, Vol. 1, 142—222. William Kaufmann, Los Altos, Calif.
- Shortliff, E. H., 1976. *Computer-Based Medical Consultations*; MYCIN, 1—264. American Elsevier, New York.