

# 一种基于证据理论的概念树结构 多 Agent 合作求解模型\*

毛雪岷 白石磊

(中国科学技术大学 自动化系 合肥 230027)

(中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

熊范纶 王儒敬

(中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

**摘 要** 本文针对多 Agent 系统中 Agent 之间的盲目交互可能产生的效率低下问题,提出了一种基于概念树结构的多 Agent 合作求解模型.在这个模型中,各 Agent 基于自己的领域知识构造出概念树,通过 Agent 之间的合作,对概念树从根节点开始使用证据理论实现逐层聚焦,逐步缩小求解范围.为此,本文基于模态、逻辑和关系概念提出了一种面向可能解集的证据理论表示,并探讨了在多 Agent 环境下应用证据理论可能导致的若干问题.

**关键词** 多 Agent 系统,概念树,证据理论

**中图分类号** TP18

## 1 引 言

文献[1]把多 Agent 系统中按合作关系分为垂直的、水平的、递归的和混合的四种类型.本文探讨的是水平合作的多 Agent 系统.在这种系统中,各个 Agent 的知识和能力是类似的,之间没有控制关系,各自对同一个问题求解,通过交换和综合求解结果来提高求解能力,不需要进行任务的分解和分配.

与单个 Agent 的问题求解模式相比,多 Agent 合作求解的主要优势在于可以综合利用不同 Agent 的知识提高问题求解的效率、扩展解题范围、提高结果的准确性.但由于 Agent 之间的知识组合呈指数性增长,交互形式复杂多样,可能使得合作求解的过程变得极为低效. M. J. Shaw 指出, MAS 系统中 Agent 之间的知识共享和信息交互是 MAS 系统具有更强解题能力的主要原因.但在解题过程中会产生大量信息,对此必须有好的协调机制使 MAS 系统能够聚焦于有用信息上(文献[2]).文献[3]甚至因此对多 Agent 系统持怀疑态度.

我们认为,为了在水平合作的多 Agent 系统中

解决上述问题,应采取如下两个途径:

1)根据所要求解的问题特性,为各个 Agent 构造一个相似的数据结构,各 Agent 在此数据结构上执行解题过程,以降低 Agent 之间知识组合和交互形式的复杂性;

2)采用适当的合成规则综合各 Agent 的求解结果,以缩小搜索空间和提高结果的准确性.

针对专家系统推理的特点,本文提出了一种基于概念树结构的合作求解模型,并采用证据理论(Evidence Theory)来综合各 Agent 的求解结果.这种模型尤为适用于我们研制的知识表示形式具有层次结构的 XF 系列专家系统.本文的以后部分把专家系统和 Agent 不加区分地使用.

证据理论已在多传感器信息融合、决策分析、专家系统等领域得到广泛应用,现在已被引入多 Agent 系统中<sup>[4-11]</sup>.

但证据理论在应用于多专家系统合作推理中还将产生下面三个问题:

1)由于每个专家系统的知识范围不同导致对同一问题有不同辨识框架;

2)由于专家系统间的交互合作可能导致的证据

\* 国家 863 计划资助项目(No. 2001AA110464)

收稿日期:2002-05-27;修回日期:2002-11-22

相关性问题;

3)各个专家系统的权威性不同,而 D-S 合成规则是将它们平等对待的,这会降低结果的准确性.

本文将在后面的部分讨论如何解决这些问题.

## 2 基于概念树结构的多 Agent 合作求解模型

在多 Agent 系统中,Agent 之间的合作与协调机制是极为重要的.若缺乏适当的协调机制,多 Agent 系统未必有更好的问题求解效果,且可能导致求解过程的时间和空间复杂度呈指数性增长.文献[12]以约束-满足问题为例,分析了多 Agent 合作求解过程,指出必须对 Agent 间的交互加以一定限制,否则会影响求解效果.但怎样才能利用 Agent 间的合作能力和降低交互机制的复杂性之间取得较好的平衡,目前还未有成熟的研究结果.

我们认为,应当为 Agent 的求解过程建立统一的数据结构,作为 Agent 之间交互与合作的平台,将 Agent 间的合作限制在这个平台上.我们不赞成完全异构的多 Agent 系统,异构的多 Agent 系统也必须有一个统一的交互平台,否则将因复杂的协调机制带来巨大的开销.

文献[13]中提出了一个分层递阶问题求解模型.在这一模型中,问题可用三元组  $(X, f, T)$  表示,其中  $X$  是问题的论域,  $f$  是问题的属性,  $T$  表示问题的结构.通过定义适当的等价关系  $R$ ,将论域  $X$  划分为一组等价类  $[X]$ ,从而导出  $[X]$  上的属性  $[f]$  和结构  $[T]$ ,这样就可以从原问题导出一个较粗粒度上的问题  $([X], [f], [T])$ .粗粒度上的问题往往较原问题更为简单,且较高层次上的解有助于简化下一层次的求解过程.文献[13]证明了进行适当的分层后,可能把指数复杂性的问题简化为一系列线性复杂度的问题,但如何对问题进行适当分层仍是一个难题,目前还没有通用的有效方法.不适当的分层并不能降低问题复杂度<sup>[13]</sup>.

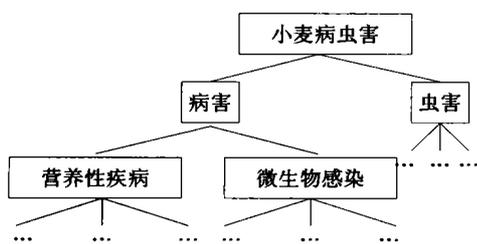


图1 病虫害诊断知识的概念树结构

我们注意到,在知识型的多 Agent 系统中(如专家系统),Agent 的领域知识有较强的结构性,其层次结构可用概念树来描述.例如一个小麦病虫害诊断专家系统,其知识结构可用图 1 表示.

这种概念上的层次结构表达了问题论域上的层次结构,在通常情况下可以作为问题分层求解的依据.沿着概念树自顶而下逐层求解,可以逐步缩小求解范围,简化求解过程,最终得出适当的结果.这里我们说“适当的结果”,是因为这种结构和求解过程可以使专家系统在问题的初始信息不充分或领域知识不完备的情况下,得出一个尽可能细的层次上的结果,不至于完全无解.这一特点在实际应用中是极为有益的.此外,这种结构在很大程度上避免了证据理论可能导致的指数复杂性.

我们将概念树作为多 Agent 合作求解过程中的交互平台,要求系统中每个 Agent 根据问题的论域和自身的知识结构建立一棵概念树,参与求解的 Agent 的概念树之间应当有相似性.Agent 在相同的概念树层次上尽可能独立求解,如需要合作,合作范围也限制在同一层次上.得出这一层的结果后,对各 Agent 的结果进行综合,从而更准确地缩小下一层次的问题求解范围.这样就避免了 Agent 之间交互的盲目性,减少了协调机制的额外开销.

下面我们给出概念树的相似性定义和求解模型的工作过程:

定义 1  $T_1, T_2$  为两棵概念树,层数分别为  $N_1, N_2$ ;  $S_{1j}, S_{2j}$  分别为其第  $j$  层的节点集.若  $N_1 = N_2$ ,且  $\forall j \leq N_1, N_2$  有:  $S_{1j} \cap S_{2j} \neq \emptyset$ ,则称  $T_1, T_2$  为相似的概念树.

如果两个专家系统的概念树不相似,则表明这两个 ES 的知识范围和知识结构差异较大,要求它们进行水平合作求解是不合理的.

设系统内有  $N$  个专家系统,各专家系统(以下简称 ES)的概念树层数为  $L$ ,整个系统的工作过程如下:

1)  $i = 1$ ,每个 ES 以其概念树第  $i$  层节点为初始的辨识空间;

2) 各 ES 得出第  $i$  层上的结果和基本概率分配 (bpa)  $m_{ji}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ;无法得出结果的 ES 退出求解过程,如果所有的 ES 均不能得出结果,则系统以上一层次的结果作为最终结果,转 7);

3) 各 ES 根据其他 ES 的结果调整辨识空间和  $m_{ji}$ ;

4) 对  $m_{ji}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$  进行合成,得出第  $i$

层的合成结果  $m_i = \{m(Q_1), m(Q_2), \dots, m(Q_k)\}$ ,  $Q_{1 \dots k}$  为焦点元素, 是第  $i$  层概念树上的节点集合. 若有  $m(Q_n) > \zeta$ ,  $n = 1, 2, \dots, k$ ,  $\zeta$  为设定的阈值, 则取  $Q_n$  放入候选解集  $S$ ;

5) 若  $i < L$ , 转 6); 否则对  $S$  中候选解集作进一步判断, 得出最终结果, 转 7);

6) 各  $ES$  扩展出现在候选解集  $S$  中的概念结点, 以其子节点集作为第  $i + 1$  层的辨识空间,  $i = i + 1$ , 转 2);

7) 结束求解过程.

上面简述了模型的求解过程, 要说明的是, 其中各  $ES$  给出的基本概率分配表示的是对可能的解集的支持, 而不是对解命题或概念的支持, 这与通常的证据理论求解是不同的, 因此在得出最底层的结果之前还需要做进一步判断, 确定最终解. 对于这一点以及其中的辨识空间和中间结果的调整, 各个  $ES$  结果的合成方法将在下面的部分详细论述.

### 3 多 Agent 环境下辨识空间的调整

通常在用证据理论进行专家系统推理时, mass 函数表示对命题或命题集合的信任程度. 但本文的目的是利用概念树结构逐步缩小问题求解范围以逐层简化推理过程, mass 函数应表示对解的范围的支持, 而非对解命题本身的信任程度. 这就需要不同的证据理论解释. 本文从模态逻辑和可能世界语义学的观点提出一种证据理论的解释, 并基于关系概念给出了这样证据理论表示, 涉及的模态逻辑公理为  $KTD5$ .

在多 Agent 环境下, 系统内不同  $ES$  的知识范围有差异, 例如  $ES_i$  有概念  $A$ ,  $ES_j$  没有概念  $A$ , 导致辨识框架不统一. 合成结果时应要求  $ES_i$  和  $ES_j$  有相同的辨识空间, 否则将导致  $A$  被否定, 但证据理论要求辨识空间中命题是互斥的, 否则将导致无法进行基本概率分配. 互斥性要求是难以满足的, 这也是证据理论实际应用中的一个困难. 在多专家系统环境下, 一个 Agent 是无法判断不在其辨识空间内的概念是否与其辨识空间内的概念互斥, 因而无法统一各个 Agent 的辨识空间, 这是多专家系统环境下特有的问题. 我们根据本文的证据理论表示给出了一种简单的解决方法.

#### 3.1 基于关系概念的证据理论表示

设  $X = \{x\}$ ,  $L = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$  为有限命题

空间,  $Q \in 2^L, f(x, \theta) \in \{0, 1\}$  为映射:

定义 2  $R = X \times 2^L$  为关系集, 且  $\forall (x, Q) \in R$ , 满足  $\text{iff } \theta \in Q, f(x, \theta) = 1$ , 称  $x$  与  $Q$  是  $R$  相关的, 记作  $xRQ$ .

我们可以把  $x$  理解为描述问题初始状态的命题, 称之为证据.  $2^L$  为 Agent 的信念空间,  $Q \in 2^L$  表达了 Agent 对问题的一种信念状态, 即:  $\text{iff } \theta \in Q, \Diamond \theta$ , 可用如下模态命题表示:

$$\Diamond \theta_i \wedge \Diamond \theta_{i+1} \wedge \dots \wedge \Diamond \theta_{i+k-1} \wedge \neg \Diamond \theta_j \wedge \dots \wedge \neg \Diamond \theta_{j+l-k-1}, Q = \{\theta_i, \theta_{i+1}, \dots, \theta_{i+k-1}\}.$$

为简便起见, 我们用  $\Diamond Q \wedge \neg \Diamond \bar{Q}$  表示上述命题.

$f(x, \theta)$  将证据  $x$  映射到信念空间,  $f(x, \theta) = 1$  表示根据证据  $x$  和专家知识, Agent 认为  $\Diamond \theta$  成立. 这样  $xRQ$  则意味着  $Q$  为问题的可能解集. 如果  $X$  和系统知识存在不确定性, 则 Agent 的信念状态也是不确定的, 我们用  $2^L$  上的概率分布  $P\{Q | (x, Q) \in R\}$  来表示这种不确定性. 为此, 需要证明信念空间  $2^L$  是互斥且完备的.

定理 1 信念空间  $2^L$  的元素是互斥的.

证明 只需证明  $\forall Q_1, Q_2 \in 2^L, Q_1 \neq Q_2$ , 则两者互斥. 如上所述,  $Q_1$  和  $Q_2$  分别等价于模态命题  $\Diamond Q_1 \wedge \neg \Diamond \bar{Q}_1$  和  $\Diamond Q_2 \wedge \neg \Diamond \bar{Q}_2$ , 我们用  $Q_1 \wedge Q_2$  表示这两个命题的合取. 若  $Q_1 \neq Q_2$ , 必  $\exists \theta_i, \theta_j \in Q_1$  且  $\theta_j \in \bar{Q}_2$ , 则在  $Q_1 \wedge Q_2$  中, 必有符号串  $\Diamond \theta_i \wedge \neg \Diamond \theta_j$ , 故:

$$Q_1 \wedge Q_2 \vDash \perp$$

证毕.

定义 3  $x, L, f(x, \theta)$  满足定义 1, 若有  $\theta_1 \vee \theta_2 \vee \dots \vee \theta_L$ , 则称  $L$  为完备的

定理 2 若  $P\{\phi\} = 0$  则称  $L$  为完备的.

证明  $\phi$  等价于模态命题  $\neg \Diamond \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \Diamond \theta_L$ , 则  $P\{(x, \phi)\} = 0$  可理解为模态命题  $\neg \Diamond (\neg \Diamond \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \Diamond \theta_L)$ , 有

$$\neg \Diamond (\neg \Diamond \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \Diamond \theta_L)$$

$$\rightarrow \Box \rightarrow (\neg \Diamond \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \Diamond \theta_L)$$

$$\rightarrow \Box \rightarrow (\Box \rightarrow \theta_1 \wedge \dots \wedge \Box \rightarrow \theta_L)$$

$$\rightarrow \Box \rightarrow (\neg \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \theta_L)$$

$$\rightarrow \neg (\neg \theta_1 \wedge \dots \wedge \neg \theta_L)$$

$$\rightarrow \theta_1 \vee \dots \vee \theta_L.$$

证毕.

若  $L$  为完备的, 则有如下定理:

定理 3  $m(Q) = P\{Q | (x, Q) \in R\}$  为 mass 函数.

证明 1)  $m(\phi) = P\{\phi\} = 0$ ;

$$\begin{aligned}
 &2) m(Q) = P\{Q\} \geq 0; \\
 &3) \sum_{Q \in 2^L} m(Q) = \sum_{(x,Q) \in R} P\{Q\} \\
 &= P\left\{ \bigcup_{(x,Q) \in R} Q \right\} = P\{2^L\} = 1,
 \end{aligned}$$

故  $m(Q)$  为 mass 函数.

对于一个问题而言,如果  $L$  是完备的,则该问题的解应能通过给  $L$  中的各个命题赋予确定的真值来表示. 对于用上面的集合  $Q$  表示的模态命题而言,如果一个解与之不冲突,则称这样的解为  $Q$  的一个可能世界. 记  $Q$  的所有可能世界组成的集合为  $W_Q$ , 显然  $\forall Q_i \subset Q, W_{Q_i} \subset W_Q; \forall Q_i$ , 若  $Q_i \cap Q \neq \phi$ , 则  $W_{Q_i} \cap W_Q \neq \phi$ . 由此可引申出下面两个关系定义:

**定义 4**  $R_b(Q) \subseteq X \times 2^L$ , 且  $\forall (x, Q_i) \in R_b(Q)$ , 满足:  $\forall \theta \in Q, f(x, \theta) = 0$ , 则称  $x$  与  $Q$  是  $R_b$ - 相关的, 记作  $xR_b Q$ .  $R_p(Q) \subseteq X \times 2^L$ , 且  $\forall (x, Q) \in R_p$ , 满足  $\exists \theta \in Q, f(x, \theta) = 1$ , 则称  $x$  与  $Q$  是  $R_p$ - 相关的, 记作  $xR_p Q$ .

事实上,  $xR_b Q$  表示由证据  $x$  可以得出的所有具有与  $Q$  完全相容的可能世界模态命题.  $xR_p Q$  表示由证据  $x$  可以得出的所有具有与  $Q$  不完全冲突的可能世界模态命题. 显然, 对于一个模态命题  $Q_i$ , 若  $W_{Q_i} \subseteq W_Q$ , 这样对  $Q_i$  的支持也意味着对  $Q$  的支持; 若  $W_{Q_i} \cap W_Q \neq \phi$ , 对  $Q_i$  的支持也意味着对  $Q$  的不反对. 我们用  $bel(Q)$  和  $pl(Q)$  分别表示对  $Q$  的支持程度的下确界和上确界, 则有如下结论:

**定理 4** 若  $L$  是完备的,  $R, R_b, R_p, m(Q)$  满足上述定义,  $P$  为  $R$  上的概率分布, 则

$$\begin{aligned}
 bel(Q) &= P\{\bigcup Q_i \mid (x, Q_i) \in R, (x, Q_i) \in R_b(Q)\} \\
 pl(Q) &= P\{\bigcup Q_i \mid (x, Q_i) \in R, (x, Q_i) \in R_p(Q)\}
 \end{aligned}$$

**证明** 由可能世界的语义解释可知, 若  $Q_i \not\subset Q$ , 则必存在一个  $Q_i$  的可能世界  $w_i$ , 且  $w_i \notin W_Q$ . 若  $Q_i \cap Q = \phi$ , 则  $W_{Q_i} \cap W_Q = \phi$ . 故  $bel(Q)$  和  $pl(Q)$  分别为对模态命题  $Q$  支持度的下上确界.

对于给定的问题, 设解命题空间  $L$  是完备的, 若有两个证据  $x$  和  $y$ , 从  $x$  和  $y$  分别得到模态命题  $Q_x$  和  $Q_y$ , 合理的结果  $Q$  应与  $Q_x$  和  $Q_y$  均保持一致, 即  $W_Q \subseteq W_{Q_x}, W_Q \subseteq W_{Q_y}$ , 也即:  $W_Q = W_{Q_x} \cap W_{Q_y}$ . 我们有如下结论:

**定理 5** 对于如下用集合表示的模态命题  $Q, Q_x, Q_y$ ,  $iff Q = Q_x \cap Q_y$ , 有  $W_Q = W_{Q_x} \cap W_{Q_y}$ . 证明略.

由定理 5, 我们有如下定义:

**定义 5**  $X = \{x\}, Y = \{y\}, R_x, R_y$  满足定义 2, 令  $R_{x \oplus y} = X \times Y \times 2^L$ , 且  $\forall ((x, y), Q) \in R_{x \oplus y}$  满足:  $iff \theta \in Q, f_x(x, \theta) = 1, f_y(y, \theta) = 1$ , 则称  $(x, y)$  与  $Q$  是  $R_{x \oplus y}$ - 相关的, 记作  $(x, y)R_{x \oplus y} Q$ .

显然, 若  $xR_x Q_1, yR_y Q_2, Q_1 \cap Q_2 = Q$ , 则有  $(x, y)R_{x \oplus y} Q$

**定义 6**  $X = \{x\}, Y = \{y\}, R_x, R_y$  满足定义 2,  $P_x, P_y$  为  $R_x, R_y$  上的概率分布, 若满足:

$$P\{(x, Q_1), (y, Q_2)\} = P_x\{(x, Q_1)\} \cdot P_y\{(y, Q_2)\}, \tag{1}$$

则称  $R_x, R_y$  独立.

由概率性质可得到如下定理:

**定理 6** 若  $L$  完备,  $R_x, R_y$  独立,  $m_x, m_y$  分别为由  $x, y$  和定理 1 得到的 mass 函数, 则

$$\begin{aligned}
 m_{x \oplus y}(Q) &= P\{((x, y), Q) \mid (x, y)R_{x \oplus y} Q\} \\
 &= \frac{\sum_{Q_1 \cap Q_2 = Q} \{m_x(Q_1) \cdot m_y(Q_2)\}}{\sum_{Q_1 \cap Q_2 \neq \phi} m_x(Q_1) \cdot m_y(Q_2)} \tag{2}
 \end{aligned}$$

为 mass 函数. 证明略.

从上面的证据理论表示可以看出, 我们定义的 mass 函数不是表示对某个命题的信任程度, 而是某个解集成立的可能性. 这样对  $bel$  和  $pl$  函数的理解也有所不同. 在我们的表示方法中,  $(bel(Q), pl(Q))$  表示问题的解集包含在  $Q$  中的概率的下限和上限. 对于命题  $\theta, bel(\theta), pl(\theta) = (0, 0)$  仍表示命题  $\theta$  被否定,  $(0, 1)$  表示  $\theta$  不否定其他命题, 其他命题也不否定  $\theta$ , 相互没有影响.  $(1, 1)$  表示  $\theta$  成立, 且排斥其他命题. 根据本节的面向问题解集的证据理论表示, 我们给出了一种多专家系统环境下统一各专家系统辨识框架的简便方法.

### 3.2 多专家系统环境下辨识框架的调整

设系统内有  $n$  个专家系统  $ES_1, \dots, ES_n$ , 辨识框架分别为  $L_1, \dots, L_n$ , 给出的结果为  $m_1, \dots, m_n$ . 我们取  $L = L_1 \cup \dots \cup L_n$  为统一的辨识框架, 并修正  $m_i, i = 1, \dots, n$ .

设  $m_i$  的焦点元素集  $S_i = \{Q_1, \dots, Q_m\}$ , 令  $m_i(Q_j \cup (L - L_i)) = m_i(Q_j), Q_j \in S_i, S_i = \{Q_1 \cup (L - L_i), \dots, Q_m \cup (L - L_i)\}$ . 也即将  $(L - L_i)$  中的元素插入  $m_i$  的焦点元素中去, 并保持 mass 函数值不变. 这种修正方法有如下结论:

**定理 7** 设  $m_i$  为  $ES_i$  的辨识框架  $L_i$  上的  $bpa$  函数,  $\theta_k \in L - L_i$ , 则按上述方法修正后, 有

$bel(\theta_k) = 0, pl(\theta_k) = 1.$

**证明** 用  $bel$  函数和  $pl$  函数的计算公式可证.

如前面所述, 这表明  $\theta_k$  与  $L$  中其他命题相互没有影响,  $ES_i$  接纳了不在自己知识范围内的概念, 但对其他命题的成立与否不产生影响, 可以理解为  $ES_i$  对不在自己知识范围内的概念作一无所知处理, 这说明上面的处理方法是合理的.

要说明的是本文提出的合作求解模型只要求在每个概念树层次上给出结果的可能性分布, 所以辨识框架的调整可以在完成一个概念层次上的推理过程后进行, 这样就避免了因辨识框架的扩大带来额外开销.

### 4 多专家系统环境下的相关证据问题

证据相关性的研究已有一些<sup>[14,15]</sup>, 但都是限于单个系统内的, 计算也较为复杂. 有些文献<sup>[9-11]</sup> 虽然认为证据理论是多 Agent 环境下综合 Agent 结果的较好方法, 但并未注意到 Agent 交互合作过程中产生的证据相关性问题. 举例说明:

$ES_1$  和  $ES_2$  为两个专家系统,  $ES_1$  的结果  $m_1$  由证据  $m_{11}$  和  $m_{12}$  合成得来, 即  $m_1 = m_{11} \oplus m_{12}$ ,  $ES_2$  因缺乏某些知识要求  $ES_1$  提供部分结果, 若  $ES_1$  的该部分结果为  $m_{11}$ ,  $ES_2$  据此得出自己的结果  $m_2 = m_{11} \oplus m_{21}$ , 那么合成  $m_{11}$  和  $m_{12}$  时有:  $m = m_1 \oplus m_2 = m_{11} \oplus m_{12} \oplus m_{11} \oplus m_{21}$ , 显然  $m_{11}$  和  $m_{12}$  存在相关性, 正确的结论应该是  $m = m_{11} \oplus m_{12} \oplus m_{21}$ .

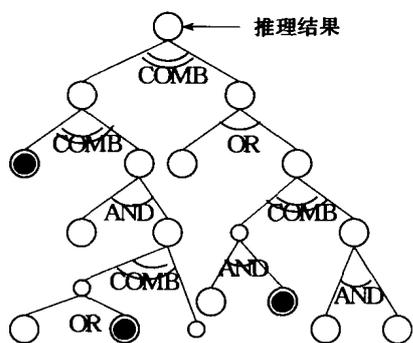


图 2 多 Agent 环境下  $ES_i$  的 AND/OR/COMB 树 (图中黑色节点表示其他  $ES$  提供的部分解)

这种情况在多 Agent 环境下是难以避免的, 为了保证结果的正确性, 应限制相关证据的使用. 如果

禁止 Agent 之间的合作, 则限制了多 Agent 系统的能力. 但若允许 Agent 合作, 为了避免相关证据的使用, 可能造成死锁. 如在上例中,  $ES_2$  要等到  $ES_1$  推理结束才能确定  $m_{11}$  是否为相关证据, 如果  $ES_2$  和  $ES_1$  互相提供部分结果就会因相互等待造成死锁.

为了解决上述问题, 我们为每个  $ES_j$  的结果获得过程建立一棵 AND/OR/COMB 树  $B_j$ , 如图 2 所示.

显然, 满足证据独立的前提下, 图 2 应为数形结构. 我们用邻接表表示上述树结构,  $Q.1$  指向  $Q$  的最左子节点,  $Q.r$  指向  $Q$  的右侧兄弟节点. 对于树中每个节点, 记录属性  $(f, v), Q.f = i, i \in \{1, \dots, m\}$  表示这个节点代表的结论由  $ES_i$  提供.  $Q.v \in \{0, 1\}$ ,  $Q.v = 0$  表示该节点有独立性,  $Q.v = 1$  表示该节点为相关节点. 各节点的不确定性由以下公式获得:

设节点  $Q$ , 其子节点集为  $S(Q) = \{Q_1, \dots, Q_k\}$ , 令  $S'(Q) = \{Q_i \mid Q_i \in S, \text{且 } Q_i.v = 0\}$ , 如果  $S'(Q) = \Phi$ , 则: 令  $Q.v = 1$ , 不计算不确定值; 如果  $S'(Q) \neq \Phi$ , 则:

- 1) 若  $Q$  为 COMB 节点, 则:  $m_Q = m_i \oplus \dots \oplus m_j$ , 其中  $m_i, \dots, m_j$ , 其中  $m_i, \dots, m_j$  分别为由  $Q_i, \dots, Q_j$  确定的 bpa, 且  $Q_i, \dots, Q_j \in S'$ ;
- 2) 若  $Q$  为 AND 节点, 则:  $C(Q) = f_{and}(C(Q_i), \dots, C(Q_j))$ , 其中  $C(Q_i), \dots, C(Q_j)$  分别为由  $Q_i, \dots, Q_j$  的确定性值, 且  $Q_i, \dots, Q_j \in S'$ ;
- 3) 若  $Q$  为 OR 节点, 则:  $C(Q) = f_{or}(C(Q_i), \dots, C(Q_j))$ , 其中  $C(Q_i), \dots, C(Q_j)$  分别为由  $Q_i, \dots, Q_j$  的确定性值, 且  $Q_i, \dots, Q_j \in S'$ .

上式中  $f_{and}$  和  $f_{or}$  可根据具体情况选定 (如取大、取小或取平均值等).

$ES_j$  在给出最终结果  $R_j$  前对 AND/OR/COMB 树  $B_j$  从根节点作深度优先遍历  $dfs(R_j)$ .

procedure  $dfs(k)$ .

if  $k = null$  then return;

$R = k.f$

if  $R \neq j$  then /\*  $k.f$  表示节点  $k$  由专家系统  $ES_R$  提供 \*/

begin

向  $ES_R$  查询是否  $k \in B_R$ ;

if  $k \in B_R$  then begin

$k.v = 1$ ; return ; /\*  $k.v = 1$  表示节点  $k$  为相关证据 \*/

end

```

    end;
  end;
  dfs(k.1);
  将 k 的所有属性  $v = 0$  的子节点放入  $S'(k)$ ;
  if  $S'(k) = \phi$  then begin/*  $S'(k)$  表示  $k$  的子节点
  中属性  $v = 0$  的子节点集 */
     $k.v = 1$ ; return;
  end;
  else 根据  $k$  的节点类型计算  $k$  的不确定
  性
    dfs(k.r);
  end Procedure

```

在上面的遍历过程中,如果遇到来自其他 ES 提供的结果节点,则向提供这个结果的 ES 查询此结果是否为其所用.若是,则该节点引起证据相关性,保留该节点的结果,但向上修正其祖先节点的不确定性,去除因该节点引起的相关性.如果最后的结果为  $R_j.v = 1$ ,则令  $m_j(L) = 1$ ,这样保证  $R_j$  在合成各个 ES 的结果时不起作用.

这种方法在允许利用其他 ES 提供的部分结果的同时,保证了结果的准确性.

## 5 专家系统推理结果的合成

D—S 合成公式是证据理论的基础,但由于物理意义有不明确之处,历来存在一些争议<sup>[16]</sup>.文献[11]从属性合成的角度分析了 D—S 合成公式,指出该公式是满足最大熵原理的属性合成方法的特例,不具备普适性,对不同类型的问题应有不同的合成公式.从本文给出的证据理论表示来看,D—S 合成公式还是有很大的合理性的,但在具体应用时应解决下面三个问题:1) 结果的稳定性;2) 证据冲突;3) 证据的权威性.

在多专家系统环境下,结果的稳定性更为重要.如一个专家系统  $ES_i$  否定命题  $\theta$ ,即  $bel(\theta) = pl(\theta) = 0$ ,则无论其他 ES 对  $\theta$  的支持程度多高,合成后  $\theta$  仍被否定,这显然是不合理的.我们建议给被否定的命题集分配一个较小的 mass 函数值,以避免这种情况.具体做法如下:

设  $ES_j$  为系统内的专家系统,  $m_j$  为  $ES_j$  得出的结果,  $L_j$  为  $ES_j$  计算未调整前的辨识框架,  $S_j = \{Q_1, \dots, Q_m\}$  为  $m_j$  的焦点元素集;

1)  $S'_j = \phi$ ;

2) 计算  $L_j$  中各元素的  $bel$  和  $pl$  值,  $\forall \theta \in L_j$ , 且  $bel(\theta) = pl(\theta) = 0$ , 将  $\theta$  放入  $S'_j$ ;

3) 令  $m_j(S'_j) = \delta$ ,  $\forall Q \in S_j$ ,  $m_j(Q) = m_j(Q) - \frac{\delta}{|S_j|}$ ;

4)  $S_j = S_j \cup \{S'_j\}$ .

证据冲突是不可避免的,强求消解冲突也是不合理的.我们的看法是,当两个专家系统的权威性差距较大时应以权威性高的专家系统结论为主,权威性接近时直接用 D—S 合成公式.由于 D—S 合成公式将所有的证据平等对待,因此在考虑权威性差距时应予以修正.文献[17]提出在合成之前将权威性低的证据的 mass 函数进行调整,使其向最高权威性靠近的方法,但仅适用于焦点元素为单元元素集的情况.我们建议采用以 Dubois—Prade 的基于一致性因子加权“与”运算为基础的方法<sup>[18]</sup>.

设  $m_1, m_2$  为两个证据,且  $m_2$  较  $m_1$  的权威性高,则:

$$\begin{aligned}
 m(A) &= m_1 * m_2(A) \\
 &= \sum_{Q_1 * Q_2 = A} m_1(Q_1) \cdot m_2(Q_2), Q_1, Q_2 \in 2^L.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

上式中的“\*”为一致性与算子,有如下性质:

1)  $Q_1 \cap Q_2 \neq \phi$  时,  $Q_1 * Q_2 = Q_1 \cap Q_2$ ,

2)  $Q_1 \cap Q_2 = \phi$  时,  $Q_1 * Q_2 = Q_2$ .

(3)式不满足交换律,在合成时应将证据从低到高排列.这种方法保证了证据存在冲突时保留权威性高的证据,可以作为 D—S 合成公式的补充.

我们建议将系统内的各个 ES 按照权威性分为较低、一般和较高三组,每组内部用 D—S 合成公式进行合成,再将各组的合成结果按权威性从低到高排列,用(3)式合成.这样保证了可信度接近的专家系统的结论得到平等待待,同时避免低信度专家系统的结论否定高可信度专家系统结论的情况.

## 6 总 结

本文讨论了多 Agent 环境下 Agent 之间的交互与合作对问题求解效率的影响,提出应为待解问题建立一个统一的数据结构,作为 Agent 问题求解过程中的交互平台,以此来引导 Agent 的交互过程,避免盲目的交互与合作可能带来的巨大开销.并针对多专家系统合作推理的特点提出了一种基于概念树结构的多 Agent 合作求解模型,定义了一种面向问题可能解集的证据理论表示,用证据理论在概念树结构上逐层缩小问题求解范围,以提高系统的求解效率和准确度.本文还针对证据理论在多 Agent 环

境下的应用特点,从辨识空间、证据相关性和合成公式三个方面探讨了可能产生的问题,并提出了相应的解决方法.但本文给出的证据理论表示是面向问题的可能解集,而不是命题本身的可信度,如何将本文的方法与命题本身的可信度表示结合起来,以得到更准确的结果,还需要进一步的研究.

### 参 考 文 献

- [1] Zhang C. Cooperation under Uncertainty in Distributed Expert Systems. *Artificial Intelligence*, 1992, 56(1): 21 - 69
- [2] Shaw M J, Harrow B, Herman S. Distributed Artificial Intelligence for Multi-Agent Problem Solving and Group Learning. In: Proc of the International Conference on System Science, Hawaii, 1991, IV: 13 - 26
- [3] Petrie C J. What's an Agent and What's so Intelligent about It. *IEEE Internet Computing*, July - Au, 1997, 4 - 5
- [4] 涂嘉文,等.贝叶斯方法与 Dempster - Shafer 证据理论的讨论. *红外与激光工程*, 2001, 30(2): 139 - 142
- [5] 邹永革,杨静宇.基于证据理论处理移动机器人视觉信息的一种方法. *计算机研究与发展*, 1994, 31(12): 32 - 36
- [6] 王伟强,顾国昌.利用 Shafer 证据理论进行决策的改进算法. *哈尔滨工程大学学报*, 1997, 18(1): 70 - 74
- [7] 李 凡.人工智能中不确定性.北京:气象出版社,1992
- [8] 倪 明,单渊达.证据理论及其应用. *电力系统自动化*, 1996, 20(3): 66 - 80
- [9] Zhang Mingjie, Zhang Chengqi. Investigations on Solution Synthesis in Distributed Expert Systems. In: Proc of the IEEE International Conference on Intelligent Processing System, Beijing, 1997, 1108 - 1112
- [10] Zhang Chengqi, Li Yuefeng. Horizontal Cooperation under Uncertainties in Distributed Expert Systems. In: Proc of the 3rd International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIUA'99), New Delhi, 1999, 23 - 26
- [11] 陈 锋.多 Agent 合作问题求解.博士学位论文,中国科技大学,2000
- [12] Mamen D L, Lesser V R. Problem Structure and Subproblem Sharing in Multi-Agent Systems. In: Proc of the 3rd International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS - 98), Paris, France, 1998, 174 - 181
- [13] 张 钺,张 铃.问题求解理论.北京:清华大学出版社,1992
- [14] 肖人彬,等.相关证据合成方法的研究. *模式识别与人工智能*, 1993, 6(3): 227 - 234
- [15] 孙怀江,杨静宇.一种相关证据合成方法. *计算机学报*, 1999, 22(9): 1004 - 1007
- [16] 向 阳,史习智.证据理论合成规则的一点修正. *上海交通大学学报*, 1999, 33(3): 357 - 360
- [17] 刘大有,等.一种简化的证据理论模型的研究. *计算机研究与发展*, 1999, 36(2): 134 - 138
- [18] 杜文吉,谢维信. D-S 证据理论中的证据组合. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(12): 92 - 94

## A MODEL OF CONCEPT TREE STRUCTURE FOR MULTI-AGENT PROBLEM SOLVING BASED ON EVIDENCE THEORY

Mao Xuemin, Bai Shilei

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Institute of Intelligent Machine, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

Xiong Fanlun, Wang Rujing

(Institute of Intelligent Machine, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

### ABSTRACT

Disordered interaction and cooperation among agents could make multi-agent problem solving system inefficient, so a model of multi-agent problem solving based on conceptual tree is proposed. In this model, to solve a problem, every agent would construct a concept tree according to characteristics of problem and corresponding knowledge. According to the hierarchical structure of the concept tree, agents solve the problem, cooperate with each other and synthesize results. Using this method, agents could focus solutions of the problem along the tree. Evidence theory is utilized to synthesize results of deferent agents, and difficulties caused by using evidence theory in MAS are discussed. To overcome these difficulties, an expression of evidence theory based on model logic and conception of relation is proposed.

**Key Words** Multi-Agent System, Conceptual Tree, Evidence Theory