

因果图推理的一种新方法^{*}

A New Reason Method in Causality Diagram

樊兴华¹ 仲 昕² 张 勤³ 黄席樾¹

(重庆大学自动化学院 重庆400044)¹(上海交通大学机器人研究所 上海200030)²

(重庆市科委 重庆 400015)³

Abstract Among the probabilistic approaches under uncertainty, belief network is the most representative. The causality methodology which is based on belief network overcomes some difficulties in knowledge express and reason of belief network. So it is very useful for industry application. To improve the deficiency of logic operation complexity and computation complexity, a new reason method in causality diagram has been presented. This method translates causality diagram into some causality trees by normalization and standardization. A new computation method has been brought forth by using the cut sets matrix in former non-intersect causality according to the former non-intersect mind. It can lower the "NP" difficulty and raise the computation velocity in causality diagram reason. So it is very useful to experiment application such as fault diagnose.

Keywords Causality diagram, Reason under uncertainty, Former non-intersect, Cut sets matrix, NP Problem

1 引言

基于概率论推理的不确定性知识表达推理方法包括信度网^[1]、马尔可夫网^[2]以及 PROSPECTOR^[3]中使用的方法等。其中,信度网推理模型因其理论上的严格性和一致性,以及有效的局部计算机制和直观的图形化知识表达,正日益受到高度的重视,然而,信度网也存在一些不足:如处理多连通问题和因果循环问题的方法复杂,计算量大;采用条件概率表达因果关系强度不直观,数据之间存在相依性;较难根据实时收到的信息对知识库中的数据和因果结构进行在线修改;没有考虑条件概率随时间动态变化等问题。

1994年张勤教授提出了另一种基于概率论的知识表达推理方法——“基于动态因果树/图的概率推理”^[4]。该方法通过引入布尔逻辑运算,克服了上述信度网之不足,具有如下一些显著的特点:完全基于概率论,有良好的理论基础;对网络的拓扑结构没有限制(不要求通常使用的 DAG 图),可根据实际情况任意构造自己的网络;在网络中引入了逻辑门,使得对因果关系的表达更加清晰、自然、容易理解、便于解释;采用直接因果强度而不是条件概率,避免了在给定知识时知识间的

相关性问题,符合客观实际,更便于知识表达;具有灵活的推理方法,既能由因到果: $P(X|Causes)$,也可由果到因: $P(X|Consequence)$,还可因果混合: $P(X|Causes \& Consequence)$;在结构中引入了动态特性,能根据在线情况的变化动态变换网络结构,使之更符合当前时刻的客观实际。总的来讲,该方法可以更有效地模拟客观世界,得到更加准确的推理结论,同时,因果图模型也是可能性传播图模型^[5]和故障影响传播图模型^[6]的基础,具有重要的工业应用价值,如在线故障诊断等。

因果图一阶割集表达式经过逻辑扩展,得到的最终割集表达式规模大,即最终割集表达式中割集的数目多。一般来说,因果图的推理是一个 NP 难问题。常规的因果图推理算法存在逻辑运算量大,计算复杂的不足。主要表现在如下两个方面:1)在最终割集表达式的不交化中,需应用迪·摩根定律进行等幂($X \cdot X = X$)、相补($X' \cdot X = 0$)和吸收($A \cup AB = A$)等逻辑运算,计算量很大;2)在不交化最终割集表达式的逻辑与运算中必须经过吸收运算($A + AB = A$),这需要对不交化的最终割集进行两两比较,计算量很大。

笔者基于实际开发因果图系统的经验,根据早期

^{*} 本文受博士点基金和重庆市科委攻关项目《面向工业应用的智能开发平台及系统研究》资助。樊兴华 博士研究生;仲 昕 博士研究生;张 勤 教授,博士生导师;黄席樾 教授,博士生导师。

不变化的思想,通过对因果图进行正规化、标准化变换,将因果图变换为以节点事件为根的一棵棵标准因果树,引入割集矩阵对其进行早期不变化,从而有效地降低了因果图推理的 NP 难问题,提高了因果图推理的计算速度,这对因果图模型在故障诊断等实践领域中的应用具有重要意义。

2 因果图模型及其推理过程

2.1 因果图模型

因果图是一个允许具有环路的有向图,如图1所示,因果图中使用的符号定义如下。圆圈:节点事件;方框:基础事件,基础事件是与其相关联的连接事件和节点事件的独立原因;逻辑门:一个逻辑操作(与门,或门等等),将输入事件的组合映射到一个单独输出的逻辑门事件上;有向边:连结事件,表示一个原因事件引起一个结果事件发生。

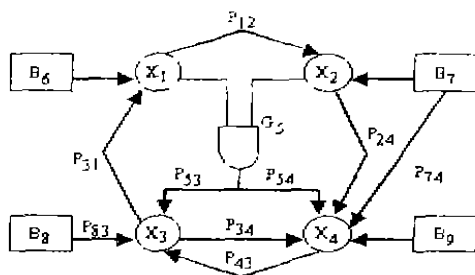


图1 因果图示例

因果图中,我们假设所有基础事件发生的概率和连结事件发生的概率是已知的,这些概率值由领域专家或者统计数据给出。没有标注连结事件的边,表示原因事件发生一定引起结果事件发生,即原因事件和结果事件之间的连接事件发生的概率为1。指向同一节点事件的所有有向边均为逻辑或(OR)的关系。

我们采用如下记号,大写字母表示事件,小写字母表示该事件发生的概率。 B_i 表示第*i*个基础事件; X_i 表示第*i*个节点事件; G_i 表示第*i*个逻辑门事件; V_i 表示上述三种事件的任意一种, $v_i = \Pr\{V_i\}$; P_{ij} 表示原因事件 V_i 引起结果事件 V_j 的连接事件, $p_{ij} = \Pr\{P_{ij}\}$, $\Pr\{\cdot\}$ 表示计算 $\{\cdot\}$ 内事件发生的概率。

2.2 因果图推理过程

因果图的推理分为4个步骤:

1)求节点事件的一阶割集表达式 假设一个节点事件有*m*条指向它的有向边,则该节点事件至少可以展开为*m*个割集。这里割集(cut set,简称CS)就是一组事件(包括基本事件、节点事件、逻辑门事件和连接事件)以逻辑与的关系组合在一起,每个割集(CS)之间的关系为逻辑或。仅由和某节点事件相邻的事件构

成的割集称为一阶割集,简称为CSs-1。例如图2中,各个节点事件的CSs-1表达式为:

$$X_1 = B_6 \cup P_{21}X_2$$

$$X_2 = B_7 \cup P_{12}X_1$$

$$X_3 = B_8 \cup P_{13}X_1$$

$$X_4 = B_9 \cup P_{34}G_5 = B_9 \cup P_{34}(X_2 \cup X_3)$$

其中, G_5 为逻辑或门 $G_5 = X_2 \cup X_3$ 。

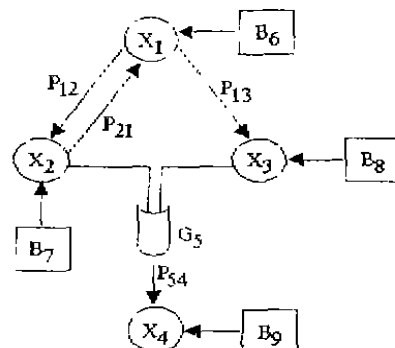


图2 因果图例子

2)求节点事件的最终割集表达式 仅用基本事件和连接事件表示的割集表达式称为节点事件的最终割集,简称为CSs-f。将CSs-1表达式展开,消去所有的节点事件,就得到了最终割集。在展开过程中,如果存在有向环,需要运用文[1]中提出的解环规则进行解环。解环规则:在同一时间点上一个节点事件不能成为自己的原因,当出现因果环路时,在重复的节点处将环截断,而把其以下的CS表达式视为空集,例如图2中,各节点事件的CSs-f表达式为:

$$X_1 = B_6 \cup P_{21}B_7$$

$$X_2 = B_7 \cup P_{12}B_6$$

$$X_3 = B_8 \cup P_{13}(B_6 \cup P_{21}X_2) = B_8 \cup P_{13}B_6 \cup P_{13}P_{21}B_7$$

$$X_4 = B_9 \cup P_{34}G_5 = B_9 \cup P_{34}(X_2 \cup X_3) = B_9 \cup P_{34}B_7 \cup P_{34}P_{12}B_6 \cup P_{34}P_{13}B_8$$

3)求节点事件的不交割集(Disjoint Cut Sets,简称DCSs-f)表达式 一个节点事件X的CSs-f表达式可表示为:

$$X = \bigcup_{i=1}^n C_i, \text{ 其中 } C_i = \bigcap_{j=1}^m V_{ij}, C_i \text{ 是一个CS, 则}$$

$$X = C_1 + C_2\bar{C}_1 + C_3\bar{C}_1\bar{C}_2 + \dots + C_n\bar{C}_1\bar{C}_2\dots\bar{C}_{n-1} \quad (1)$$

是X的DCSs-f表达式, '+'为互斥或操作符。例如图2中,各个节点事件的DCSs-f表达式为:

$$X_1 = B_6 + \bar{B}_6P_{21}B_7$$

$$X_2 = B_7 + \bar{B}_7P_{12}B_6$$

$$X_3 = B_8 + \bar{B}_8P_{13}B_6 + \bar{B}_8\bar{B}_6P_{13}P_{21}B_7$$

$$X_4 = B_9 + \bar{B}_9P_{34}B_7 + \bar{B}_9\bar{B}_7P_{34}P_{12}B_6 + \bar{B}_9\bar{B}_7\bar{B}_6P_{34}P_{13}B_8 + \bar{B}_9\bar{B}_7P_{34}P_{12}\bar{B}_6 + \bar{B}_9\bar{B}_7\bar{B}_6P_{34}P_{12}P_{13}B_6$$

4)在给定证据E条件下,计算感兴趣事件的后验概率 $Pr\{V_i|E\}$ 给定证据E就是观察到一些节点事件或者基本事件发生,即这些事件的取值为真。根据概率理论,有:

$$Pr\{V_i|E\} = Pr\{V_i, E\} / Pr\{E\} \quad (2)$$

这需要计算证据E的先验概率和 V_i, E 的先验概率。文[1]指出,对节点事件的DCSs-f进行逻辑与运算,其结果仍然是DCSs-f形式。对证据E所包含事件的DCSs-f表达式进行逻辑与运算,得到证据E的DCSs-f表达式,将要推理事件 V_i 的DCSs-f表达式和证据E的DCSs-f表达式进行逻辑与运算,得到 V_i, E 的DCSs-f表达式,然后将各个基础事件和连结事件的先验概率值带入(2)式,即可计算得到证据E下事件 V_i 的后验概率 $Pr\{V_i|E\}$ 。

3 因果图推理的新方法

3.1 因果图的正规化、标准化变换

定义1 最多只含有逻辑与门(AND)和逻辑或门(OR)的因果图称为正规化的因果图。通过逻辑门的等效变换,去除因果图中的非逻辑与门和非逻辑或门如表决门等,称为因果图的正规化。

例如如图3为未正规化的因果图,它包含有2/3表决门 G_6 。通过对 G_6 的等效变换,用 G_{13} 、 G_{14} 和 G_{15} 三个逻辑与门的逻辑或来代替 G_6 , 对它进行正规化,其结果如图4所示。

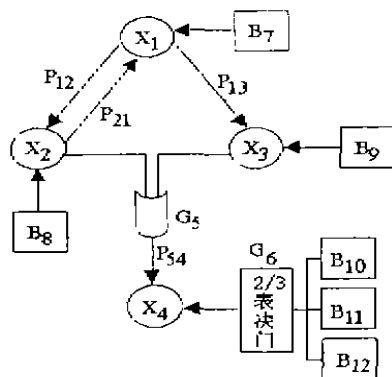


图3 正规化前的因果图

定义2 以因果图中节点事件为树根,以因果图中基本事件、连接事件和节点事件为树叶,通过逻辑与门和逻辑或门组织起来的因果树称为正规化的因果树。

由正规化因果图向正规化因果树转换的步骤为:以节点事件为树根节点(Root),添加逻辑或门作为树根节点的子节点。如果指向节点事件的有向边代表连接事件,则添加逻辑与门作为逻辑或门的子节点,以连接事件和连接事件相邻的事件作为逻辑与门的子节

点。如果指向节点事件的有向边不代表连接事件,就以和有向边相邻的事件作为逻辑或门的子节点。这样逻辑或门的子节点数为指向它的有向边的个数。注意如果有向边或者连接事件的相邻事件为逻辑门事件,则应将包括逻辑门输入事件在内的整个逻辑门事件添加进去。

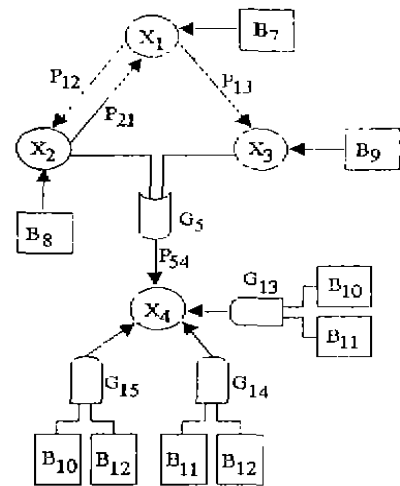


图4 正规化后的因果图

例如对图4所示正规化因果图,转化为正规化因果树后如图5所示。

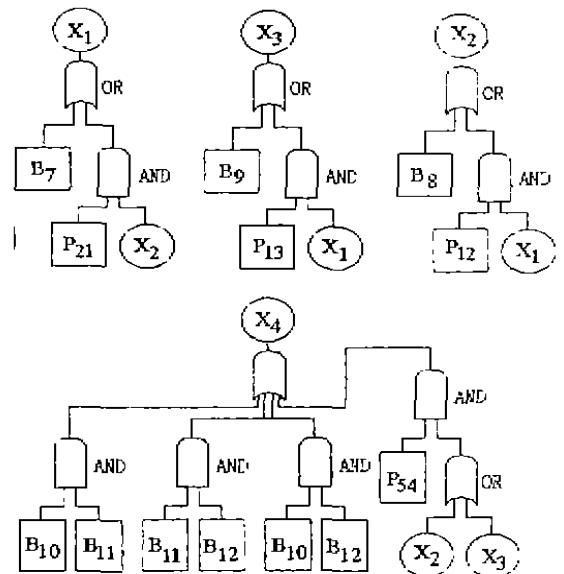


图5 正规化的因果树

定义3 以因果图中节点事件为树根,以因果图中基本事件和连接事件为树叶,通过逻辑与门和逻辑或门组织起来的因果树称为标准化的因果树。

由正规化的因果树转换成标准因果树的方法为:

写出正规化因果树的逻辑表达式,利用解环规则消去表达式中的节点事件,就得到了标准化因果树的逻辑

表达式。例如图5中,节点事件 X_4 所对应的因果树转换为标准化因果树后如图6所示。

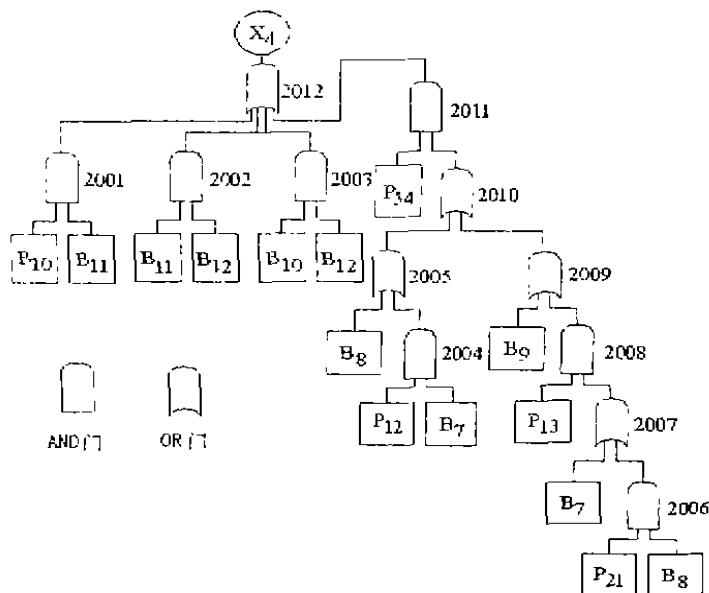


图6 标准化因果树示例

为便于程序设计,采用如下记号,可将正规化因果树表示为一张用数字符号表示的表。对因果图中的基本事件和连接事件统一编号,用整数1~999表示基本事件,用整数1001~1999表示连接事件,在一棵标准因果树内,对所有的逻辑与门和逻辑或门按如下规则进行编号:对整个树进行深度搜索,以搜索到逻辑门的先后顺序按从小到大的顺序编号,其编号用整数2001~2999表示。

G :逻辑门编号; $KG(I)$:逻辑门的种类, $KG(I)=1$ 表示逻辑与门, $KG(I)=2$ 表示逻辑或门。 $IN(I)$: I 号逻辑门的输入事件数目; $GA(I,J)$: I 号逻辑门的第 J 个输入事件编号, $J=1\sim IN(I)$ 。事件编号前面加负号表示该事件的补事件。

例如图3中,对基本事件和连接事件的编号如表1所示。图6中,对逻辑与门和逻辑或门的编号如图6所示。将图6所示因果树转换成表的形式如表2所示。

通过上述方法可将因果图转化为一张张标准化因果树表。

表1 事件编号对照表

事件名称	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	P_{12}	P_{21}	P_{13}	P_{34}
事件编号 ID	1	2	3	4	5	6	1001	1002	1003	1004

3.2 标准化因果树的不变化

在标准化因果树的不变化过程中,逻辑与门保持

不变,逻辑或门按如下规则进行替换,设逻辑或门 G 表示为 $G_n = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_n$,按不交型布尔代数规则可得:

$$G_n = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_n = X_1 + X_1'X_2 + \dots + X_1'X_2'\dots X_{n-1}'X_n = X_1 + G_{n-1}$$

式中: $G_{n-1}, G_{n-2}, \dots, G_{n-n+1}$ 为逻辑或门不变化时新增加的 $n-1$ 个与门。按上述方法将图6所示标准因果树不变化后结果如表3所示。

表2 标准因果树

G	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
$KG(I)$	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2
$IN(I)$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
$GA(I,J)$	4, 5	5, 6	4, 6	1001, 1002	1004, 1005	1002, 1005	1003, 1007	1003, 1009	1005, 1009	1013, 1004	1001, 1003, 1004	1011

表3中1013,1014...,表示将标准因果树不变化时新增的逻辑门,负号表示逻辑门的补门。

3.3 求不变化标准因果树的最小割集矩阵

不变化割集矩阵:将标准因果树的不变化割集用一个只含有0、1和-1的矩阵表示,矩阵的列号表示基本事件和连接事件的代号,矩阵的每一行表示一个不变化割集。若第 I 号割集含有第 J 号基本事件或连接事件,则 $A(I,J)=1$;若含有第 J 号基本事件或连接事件

的补事件,则 $A(I,J)=-1$; 否则 $A(I,J)=0$ 。

对不变化割集矩阵定义加、合并、求补和吸收4种操作,设不变化割集矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

加操作的运算规则为:矩阵的每一行和另一矩阵的每一行相加,当对应元素至少有一个不为0时,若相加结果为3或-3,则取1或-1;若相加结果为0,则去掉该行;若相加结果为1或-1,则保持不变。

例如 $A+B$ 中

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 因第二个元素不为0,且相加结果为0,故去掉该行。

同理可得

$$A+B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表3 不变化标准因果树

G	KG(I)	IN(I)	GA(I,J)
2001	1	2	4,5
2002	1	2	5,6
2003	1	2	4,6
2004	1	2	1001,1
2005	2	2	2,2013
2006	1	2	1002,2
2007	2	2	1,2014
2008	1	3	1003,2007
2009	2	2	3,2015
2010	2	2	2005,2016
2011	1	2	2010,1004
2012	2	4	2001,2017,2018,2019
2013	1	2	-2,2004
2014	1	2	-1,2006
2015	1	2	-3,2008
2016	1	2	-2005,2009
2017	1	2	-2001,2002
2018	1	3	-2001,-2002,2003
2019	1	4	-2001,-2002,-2003,2011

对加操作的理解:加操作相当于逻辑与运算,将A、B用逻辑表达式表示为

$$A = ab + b\bar{c} \quad B = ab + \bar{b}c \quad \text{则} \quad AB = (ab + b\bar{c})(ab + \bar{b}c) = ab + ab\bar{c}$$

合并操作的运算规则为:将一个矩阵的每一行加入另一矩阵的后面,形成一个新矩阵。例如将A、B合并得新矩阵C为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

可将合并操作理解为逻辑或运算。

吸收操作的运算规则为:按照矩阵每一行所含非零元素的个数从少到多地顺序排列矩阵的行,用矩阵第一行与其它各行比较,若第J行含有第一行所含有的全部非零元素,则吸收掉J行,否则保留该行。接着用第二行和其它各行比较,以此类推。例如对矩阵C进行合并运算得矩阵D为:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

可将割集矩阵吸收运算理解为逻辑吸收运算($AB \cup B = B$)

求补操作的运算规则为:先对矩阵的每一行进行求补操作,将结果表示为割集矩阵,然后对求得各个割集矩阵进行加操作。

对矩阵的行进行求补操作规则为:将第一个非零元素反号(一变-,一变+),其余非零元素变为0作为第一行;第一个元素保持不变,将第二个非零元素反号(一变-,一变+),其余非零元素变为0作为第二行,以此类推直到将所有非零元素都处理完毕为止。

例如对矩阵A的求补操作过程为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

可将求补操作理解为逻辑求补操作,将A用逻辑表达式表示为

$$A = ab + b\bar{c} \quad \text{则} \quad \bar{A} = \overline{(ab + b\bar{c})} = \bar{a}\bar{b}\bar{c} = (\bar{a} + a\bar{b})(\bar{b} + bc) = \bar{a}\bar{b} + \bar{a}bc + a\bar{b}$$

不交标准因果树中与门的展开步骤为:1)把与门的各个输入转化为不变化割集矩阵,如果输入为基本事件或连接事件,根据不变化割集矩阵的定义进行转化;2)对输入的不变化割集矩阵进行加操作。

不交标准因果树中或门的展开步骤为:1)把或门的各个输入转化为不变化割集矩阵;2)对输入的不变化割集矩阵进行合并操作;3)对合并后的矩阵进行吸收操作。

将不变化标准因果树按照逻辑门序号从低到高顺序展开,可得不变化标准因果树的不变化割集矩阵,例如表3所示因果树从2001门始,到2012门结束。

3.4 求E和V.E的不变化最小割集矩阵

设 $E = X_1 X_2 \cdots X_n$, X_i 为前面求出的不变化割集矩阵,求E的不变化最小割集矩阵的步骤为:先对 X_1 和 X_2 进行加操作,然后对加操作结果进行吸收操作;将所

(下转第43页)

的剩余空间(1M左右),同时推理速度也较慢,经观测,PDA处理需超过1秒才显示最终结果,故PDA上的推理树的层次一般应为2至3层。

(2) 结果分析 通过上述实验,说明在容量和速度都有限的PDA上,通过本文提出的综合知识表示方法和综合推理策略来实现农业专家系统,是切实可行的。

但是囿于PDA的局限性,我们也发现:由于PDA的存储和显示的局限性,在PDA上不能处理多媒体知识;另外PDA上的农业专家系统只能提供基本的信息和推理决策,而不能处理复杂的推理决策。

因此我们在农业应用中应该利用PDA和PC的优势互补和资源共享,综合运用基于PDA和PC的农业专家系统,更好地为农业生产实践服务。

小结 本文结合PDA和农业应用实际,首次提出了基于PDA的农业专家系统的综合知识表示方法,该综合知识表示方法有以下优点:

1. 该综合知识表示方法表示能力强,能将逻辑判断型、建议说明型、计算型知识集成于一体,较好地表示了农业专家知识和经验。
2. 该综合知识表示方法是嵌套层次结构,可扩充性较强。
3. 较好地将知识的模糊与精确相结合,能较好地表达知识的模糊性。
4. 表示简明,易于在PDA上处理。

(上接第52页)

得结果与 X_1 进行加操作,再进行吸收操作,以此类推可求出E的不变化最小割集矩阵。

同理可求出V/E的不变化最小割集矩阵。

根据(2)式可计算出 $P(V_i|E)$ 。

结论 在信度网基础上发展起来的因果图模型,能有效地模拟客观世界,具有重要的工业应用价值。本文介绍了因果图模型的概念及其推理过程,针对因果图推理中存在逻辑运算量大、计算复杂的困难,根据早期不变化的思想,对因果图进行了正规化、标准化变换,定义了割集矩阵及其操作,利用割集矩阵导出了因果图早期不变化推理新算法。该方法能有效地消除标准因果树中重复事件的影响,而利用割集矩阵的数值运算能提高逻辑吸收运算的速度,从总体上降低了因果图推理的NP难问题,提高了推理计算速度。这对因果图模型在故障诊断等实际领域中的应用具有重要意义。因为在实际领域中,如核电站故障诊断^[6],因果图的规模不是很大,但存在逻辑门和环路,导致标准因果

由上可以看出,该综合知识表示方法同样也适用于处理功能更强的便携式HPC。

本文同时针对该综合知识表示方法,提出了相应基于PDA的综合推理策略,阐述了该综合推理策略不仅在理论上是必要的,而且在实践中也是可行和需要的。本文的综合推理策略具有一定的灵活性和通用性,易于在PDA上实现,同样该综合推理策略也适用于便携式HPC。

由于我们对基于PDA的农业专家系统的理论研究仍处于开拓阶段,还需要更广泛的农业实际应用的验证,因此我们还需要进行更深入的研究。

本文的综合知识表示方法和综合推理策略的研究均得到北京农林科学院农业信息技术中心赵春江等人的帮助,在此表示致谢!

参考文献

- 1 Song Jian, Wang Maohua, eds. Intelligent Agriculture Information Technology Application and Demonstration Project in Beijing. In: Proc. of Intl. Conf. on Engineering and Technological Sciences 2000 Session 6 Beijing: New World Press, Oct. 2000
- 2 Zhao Chunjiang ed. Proceeding of Agriculture Information Technology. Beijing: International Academia Publisher Dec, 2000
- 3 熊范轮. 农业专家系统及开发工具. 清华大学出版社, 1999
- 4 何新贵. 知识处理与专家系统. 北京: 国防工业出版社, 1998

树中存在大量的重复事件,严重影响了因果图的推理计算速度。

参考文献

- 1 Zhang Qin. Probabilistic Reasoning based on Dynamic Causality Tree/Diagrams. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 46: 209~220
- 2 Judea P. Probabilistic Reasoning in intelligent systems, network of plausible inference. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA 1988
- 3 Zhang Qin. A Continuous Possibility Propagation Diagram Approach for Reasoning under Uncertainty. 内部资料, 1995
- 4 Zhang Qin. A Frequency Based Fault Influence Propagation Diagram for Fault Diagnosis of Process Systems under Uncertainty and Continuous Variables. 内部资料, 1995
- 5 Duda R O. Development of the PROSPECTOR consultation system for mineral exploration, final report. SRI international, 1978
- 6 Zhang Qin, et al. Application of FBOLES-a prototype expert system for fault diagnosis in nuclear power plants. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 34: 225~235