

# 基于分层因果关系的定性推理方法\*

顾宇红 石统一

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘要** 定性推理能为信息不完全的复杂系统产生行为预测,但推理分支可能出现组合爆炸,限制它的应用.传统的算法不仅产生无法控制的推理分支,并且占用了大量的内存,不仅使用户不易理解推理的结果,而且甚至导致推理的失败.在LSIM方法的基础上提出了一种基于分层因果关系的定性推理方法LCQR(layered causal qualitative reasoning),旨在解决这一问题,使提取出的变量间的因果关系层次化,并应用于定性推理,取得了较满意的结果.

**关键词** 定性推理,因果关系.

**中图法分类号** TP18

定性推理的目的之一是提取和运用常识,充分利用定性及不完全、不精确的信息来推理系统定性行为,给出易于理解的行为描述和因果解释.而目前的定性推理方法在生成有意义的定性行为的同时,也生成了大量无意义的行为分支,从而导致组合爆炸.即使模型很小,也可能导致不易处理的推理分支.我们注意到,在许多系统中,存在这样一些变量组(因果关系的前件),组内变量的状态转移相互独立,可以组合成多种后继状态,但并不是每一组后继状态都会导致系统内其他一些变量(因果关系的后件)的状态变化.因此可以将那些不影响因果关系后件的前件的状态归为一类,从而减少推理分支的扩展.例如与门,  $A = B \wedge C$ ,  $B, C$  因果决定了  $A$ , 已知  $B, C$  各自将由 0 变为 1, 人们并不关心  $B, C$  从 0 到 1 的变化顺序,而只知道  $A$  只有当  $B, C$  均为 1 时才为 1.

Lance Tokuda<sup>[1]</sup>注意到这一问题,提出了LSIM方法,将变量按约束关系分层,利用层间的约束传播,控制无序变量的组合生成,从而达到减少推理复杂性的要求.但在构造层次关系时,把约束关系看成无向关系,这与多数因果关系的不可逆性相冲突,还忽略了变量间的跨层作用和反馈作用.本文提出的一种基于分层因果关系的推理方法,考虑了变量间的跨层及反馈等作用,减少了计算复杂度,并可生成易于理解的行为描述.

## 1 分层因果关系的构造

### 1.1 因果关系的建立

一种简单的方法是依系统方程来构造系统的因果关系图.我们可以采用Iwasaki, Simmon的因果顺序理论<sup>[2]</sup>,用高斯消元法从自容的方程组中构造出变量间的因果关系.

此外,当已知系统的因果决定关系图时,若系统结构不变,只是人们关心的重点发生了改变,此时不必从系统方程出发,而只要按照下述算法即可在更短的时间内获得新的因果决定关系.

令CG为原因果关系图, $V$ 为CG的顶点集(系统变量集), $E$ 为边集(变量间的因果关系集,  $e(v_i, v_j) \in E$ ,表示 $v_i$ 因果决定 $v_j$ );

- (1) 初始化  $V_s = \{V_i | V_i \text{ 为外部变量}\}$ ,  $\forall e \in E, \text{Flag}(e) = 0$ ;
- (2) 若  $V_s = \emptyset$ , 结束;
- (3) 取  $v \in V_s, V_s = V_s - \{v\}$ ;
- (4) 若  $\exists e(v, x) \in E$ , 则令  $\text{Flag}(e(v, x)) = 1$ , 否则, 转(2);
- (5) 对于点  $x$ , 若  $\forall e(v_i, x) \in E$ , 有  $\text{Flag}(e(v_i, x)) = 1$ , 则令  $V_s = V_s \cup \{x\}$ , 转(3);
- (6) 否则, 若只有一条以  $x$  为终点的边的标志为 0, 不妨设

\* 本文研究得到国家自然科学基金资助. 作者顾宇红, 女, 1971年生, 博士, 主要研究领域为人工智能应用基础研究. 石统一, 1935年生, 教授, 博导, 主要研究领域为人工智能应用基础研究, 知识工程.

本文通讯联系人: 石统一, 北京 100084, 清华大学计算机科学与技术系

本文 1997-10-15 收到原稿, 1998-01-08 收到修改稿

$$e(v_i, x) \in E, i=1, \dots, m, \text{Flag}(e(v_1, x))=0, \text{Flag}(e(v_i, x))=1, i=2, \dots, m,$$

则删去  $e(v_i, x), i=1, \dots, m$ , 插入  $e(v_i, v_i), i=2, \dots, m$ , 及  $e(x, v_1)$ , 令新插入边的标志为 1,  $V_r = V_r \cup \{v_1\}$ ;

(7) 转(2).

经过上述的变换,可以得到新的因果决定关系.

算法复杂度为  $O(m+n)$ ,  $m, n$  分别为 CG 的边数及顶点数(实质上是对图进行了一次遍历). 若把第 2 步的约束条件改为  $(V_r = \emptyset) \vee$  (用户感兴趣的变量  $V \in V_r$ ), 则此方法将只导出与用户感兴趣的变量有关的因果关系.

例如,若冷凝系统的因果关系如图 1(a)所示,其中  $P, Tw, Q, Ti$  为外部变量,用户想知道  $G$  的状态变化.

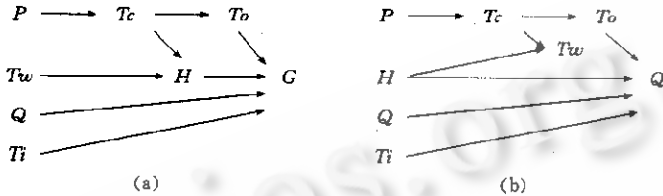


图 1

现在系统方程不变,但外部变量变为  $P, H, G, Ti$ , 而用户对  $Q$  感兴趣. 经上述算法,可以得到新的因果关系图,如图 1(b)所示.

### 1.2 层次结构的生成

在得到因果关系图 CG(causal graph)后,我们按下述步骤将它构成分层因果关系图 LCG(layered causal graph).

令  $L_i$  表示 LCG 中第  $i$  层变量组的集合,  $E$  为 CG 的边集,  $V$  为 CG 中的顶点集,  $\forall v \in V, \text{Flag}(v)=0$ .

(1) 令  $V_I = \{v | v \in V \text{ 且 用户 对 } v \text{ 感兴趣}\}, \forall v \in V_I, \text{Flag}(v)=1, i=1, L_i = \{V_I\}$ ;

(2)  $j=1, L_{i+1} = \emptyset$ ;

(3) 若  $1 \leq j \leq |L_i|$ , 继续, 否则, 转(8);

(4) 令  $V_j$  为第  $i$  层中第  $j$  个变量组,  $k=1, V_{jk} = \emptyset$ ;

(5) 若  $1 \leq k \leq |V_j|$ , 继续, 否则, 转(7);

(6) 令  $v_k$  为变量组  $V_j$  中第  $k$  个变量,

若  $v_k \in V_r$ , 则  $V_{jk} = \emptyset$

否则, {

{对  $\forall u, (u \in V) \wedge (e(u, v_k) \in E)$ , 令  $V_{jk} = V_{jk} \cup \{u\}$

若  $\text{Flag}(u)=0$ , 则令  $\text{Flag}(u)=1$ ,

否则, {说明  $u$  已处于某层次  $m(1 \leq m \leq i)$  中, 记  $m$  层中的  $u$  为  $u'$  (只是为了区别方便, 实际为同一变量),

建立  $u'$  到  $u$  的对等连接

}

} 纵向连接  $V_{jk}$  到  $v_k$

$k=k+1$ , 转(5);

(7)  $L_{i+1} = L_{i+1} \cup \{V_{jk} | k=1, \dots, |V_j|\}$

$j=j+1$ , 转(3);

(8) 若  $L_{i+1} = \emptyset$ , 结束,

否则,  $i=i+1$ , 转(2).

如图 2 所示的逻辑电路, 其因果关系及分层后的因果关系分别如图 3, 4 所示.

图 4 为典型的分层因果关系, 不包括变量的交叉作用与反馈, 代表了更广泛的一类应用.

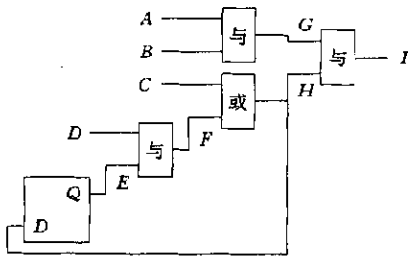


图2

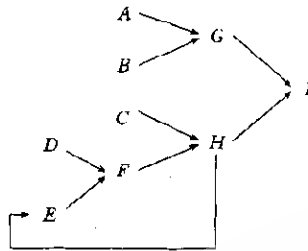


图3

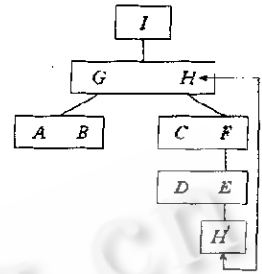


图4

## 2 分层因果关系基础上的定性推理(LCQR)

### 2.1 LCQR 方法描述

为了避免推理分支的组合爆炸,我们放弃了 QSIM(qualitative simulator)算法的先组合各变量,生成所有可能解,然后再定性过滤删去虚假解的做法.我们采纳了 Tokuda 的 LSIM 中的推理思想,并更充分地利用系统变量之间的分层因果依赖关系,提取行为序列中上层变量的共性,从而有效地控制了推理分支的组合爆炸,同时又给出了直观的因果解释.

推理方法如下:

令  $L_i, i=1, \dots, n$  为分层因果关系图 LCG 中的  $n$  个层次,其中  $L_1, L_n$  分别为最上层和最下层.

- (1) 初始化外部变量,并将其值沿层次关系向上传播,得到所有变量的初始状态;
- (2) freeze( $L_i$ ),  $i=1, \dots, n$ ;
- (3) 令  $L_i$  为被 freeze 作用的最下层次, thaw( $L_i$ );
- (4) advance( $L_i$ ), applyconstrains( $L_i$ );
- (5) 若未生成新的状态,且  $i=1$ , 结束, 否则;
- (6) 若未生成新的状态, 转(3), 否则;
- (7) 若  $i < n$ , 则 freeze( $L_i$ ), 并令  $i=i+1$ ;
- (8) 转(4).

各函数说明如下:

freeze( $L_i$ ): 禁止  $L_i$  层变量状态转移.

thaw( $L_i$ ): 解除禁止, (freeze(), thaw() 的含义同文献[1]).

advance( $L_i$ ):  $L_i$  层中的变量组向前推进一步, 即组合该层变量组所有可能的状态转移. 同时, 若变量存在对等连接线, 则也要将该变量状态转移值赋予与其对等的变量.

applyconstrains( $L_i$ ): 检查由 advance 引起的  $L_i$  层中变量的状态转移是否与导致了上层由它们因果决定的变量的变化, 即是否将导致与上层变量当前状态的不一致; 若是, 则删去此状态转移. 此外, 若  $L_i$  中的变量存在对等连接线, 则还应检查该对等变量的状态转移是否引起上层的变化; 若是, 则应删去此状态转移.

### 2.2 举例说明

以图 2 所示的逻辑电路为例, 令  $A, B, C, D$  各自独立变化, 其初值均为 0, 随时间的延迟将分别由 0 变为 1, 可以得到它的一般的行为转移序列(如图 5 所示)及分层因果行为转移图(如图 6 所示).

图 6 中, “ $\rightarrow$ ”表示系统状态的转移, 从图中我们可以看出,  $AB$  为 00, 01, 10 都不会影响  $G$  的状态,  $CF$  为 01, 10, 11 也不会影响  $H$  的状态; 同样,  $GH$  为 00, 01, 10 也不会影响的  $I$  状态. 基于分层因果关系的推理就是利用了实际系统中的这种现象, 将这些对上层变量没有影响的分支组合在一起, 在 QSIM 方法中, 上例的系统行为序列图(如图 5 所示)包含 176 个九元组(IGHABCDFDE), 共 1 584 个变量状态值. 而因果层次转移图(如图 6 所示)则只有 68 个状态值及若干个指针, 且指针数目不超过状态值数目.

对图 6 的解释如下:

- (1) 从某一状态出发找到可能的状态转移

假定当前状态为(001001000), 从第 1 层开始, 找到  $I$  为 0 的结点, 然后沿纵向连线向下至第 2 层, 再沿状态转移

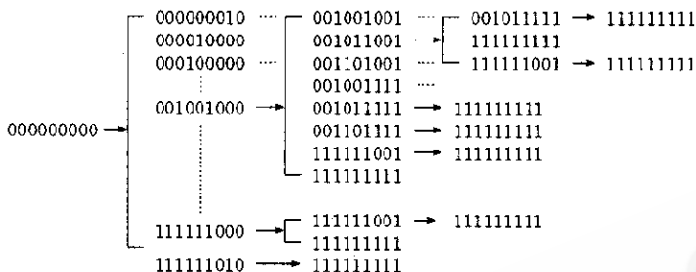


图5

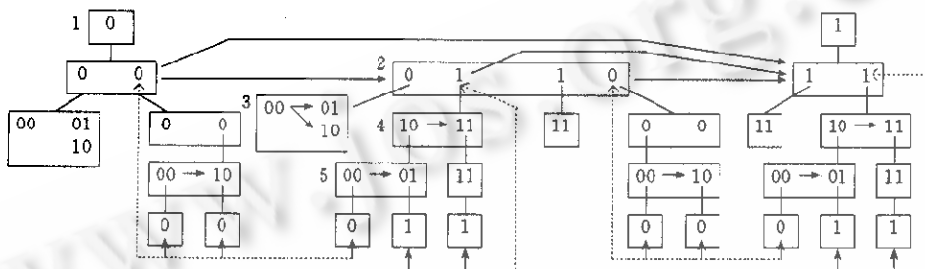


图6

箭头找到  $GH$  为 01 的点,如此下去,直到找到最下层结点 5 中的  $DE$  状态 00。由结点 3 可知,  $AB$  由 00 变为 01,  $10$  都不会影响  $C$  的值;由结点 4 可知,  $CF$  由 10 可以变为 11 且不影响  $H$  的值;由结点 5 可知,  $DE$  由 00 变为 01 且不影响  $F$  的值;而由结点 2 可以看出,  $GH$  可由 01 变化到 11, 此时沿纵向连线可找到  $AB$  必为 11,  $CF$  可以由 10 变换到 11 而不影响  $H$  的值。又由于状态变量可独立变化, 所以从当前状态(001001000)可能生成 8 个状态转移(如图 5 所示)。

(2) 找到状态转移的最终解

若人们不关心这些中间结果, 而只关心最终状态, 可以从图中方便地找到与  $AB, CD$  值均为 11 的相对应的结点。从此点沿纵向连线向上, 即可得到最终解。

(3) 变量间的反馈作用

由于系统中存在反馈环, 所以采用迭代的方法来处理反馈变量。例如, 若当前状态变量  $HCFDE$  为(00000), 当下一时钟脉冲到来时, 应将  $H$  的值代入  $E$ , 使  $E$  为 0, 所以  $DE$  只能取 00 或 10, 而不能取 01, 即  $DE$  受到限制不能取任何可使  $F$  为 0 的值。这种反馈作用是通过跨层次的对等连接来实现的。

(4) 因果依赖关系

图中的层次关系表示了变量间的因果依赖关系: 上层依赖于下层, 图中不相关变量组(不在同一框内的变量组)的状态转移可以组合形成多个新的状态。在层次结构定义中, 同一层次由许多变量组组成, 变量组内的变量为相关变量, 它们的状态变化直接影响其上层变量, 而不同变量组内的变量可以在不影响各自的上层变量的前提下相互组合。

3 与相关工作的比较

QSIM<sup>[3,4]</sup>是定性推理的重要方法, 许多研究工作都围绕 QSIM 展开。<sup>[1,5]</sup>与之相比, 本文的 LCQR 方法有以下特点:

- 采用基于分层因果关系的层次结构表示, 将不影响上层变量(结果)状态的下层变量(原因)的可能的状态变化组合在一起, 推理过程为自下向上, 逐层转换过滤, 而不是像 QSIM 那样同时列出所有变量各组合, 再进行过滤。从上述实例可以看到, LCQR 方法压缩了存储空间, 并解决了行为分支的组合爆炸问题, 这对于复杂系统, 尤其是知识不完整的系统更为有利。

- 用户对于系统行为及因果解释一目了然。

Tokuda 提出的 LSIM 方法也是立足于解决行为分支的组合爆炸问题的, 它的不足之处在于:

- 层次结构无法体现因果关系, 并且在某些情况下甚至会导致错误。如  $A=B, B=C \wedge D$ , 按照 LSIM 方法, 若人们对  $A$  感兴趣, 则可以得到正确的层次(如图 7(a)所示); 而若人们对  $B$  感兴趣, 则它将得到错误的因果关系(如图 7

(b)所示),因为这里对  $B$  进行了过分的约束;而按我们的方法,则可得到图 7(c),略去了以  $B$  为因、 $A$  为果的关系.如果  $A$  的值又反馈到  $B$  以下的层次,则得到图 7(d).这些都符合人们对实际问题的因果解释.

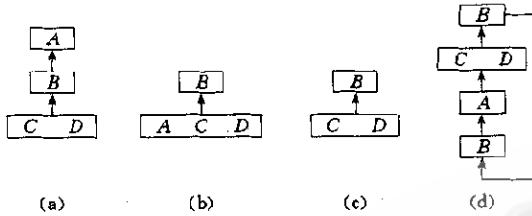


图7

LSIM 方法较为简单,不能处理反馈等问题,LCQR 方法则解决了这个问题.

• LCQR 方法对于重复的状态变量值用指针进行引用,而不是重复罗列其状态值,从而进一步减少了空间开销.

LCQR 方法与 QSIM 方法有相同的解题能力,并且能够有效地处理行为分支的组合爆炸问题.今后的工作是如何在其中增加一些控制信息及过滤算法,使之得到更精确的结果.

参考文献

- 1 Lance Tokuda. Managing occurrence branching in qualitative simulation. In: Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, CA: AAAI Press, Cambridge, London; the MIT Press, 1996. 998~1003
- 2 Iwasaki Y, Simon H A. Causality in device behavior. Artificial Intelligence, 1986,29(1):3~32
- 3 Kuipers E. Qualitative simulation. Artificial Intelligence, 1986,29(3):289~338
- 4 Kuipers E. Qualitative simulation; then and now. Artificial Intelligence, 1993,59(1~2):133~140
- 5 Yoshinobu K, Mitsuru I, Riichiro M. A causal time ontology for qualitative reasoning. In: Martha E Pollack ed. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, 1997. 501~506

A Method of Qualitative Reasoning Based on Layered Causal Relation

GU Yu-hong SHI Chun-yi

(Department of Computer Science and Technology Tsinghua University Beijing 100084)

**Abstract** Qualitative reasoning can predict the system behavior of complicated system with incomplected knowledge, but the combinatorial explosion of reasoning branches limits its application. Traditional algorithms not only produce intractable reasoning branches, but also occupy a lot of memory space. It makes the result of reasoning difficult to be understood, and sometimes it even leads to failure. In this paper, on the base of LSIM, a method of qualitative reasoning based on LCQR (layered causal qualitative reasoning) is proposed to solve this problem. LCQR extracts the causal relation between variables, layers it and utilizes it in qualitative reasoning. The result of LCQR is satisfying.

**Key words** Qualitative reasoning, causal relation.