

一阶谓词逻辑的图形推理法

耿 霞 张继军 李蔚妍

(山东农业大学信息科学与工程学院 泰安 271018)

摘 要 针对已有一阶谓词逻辑推理方法中存在的推理效率低等问题,研究一种基于谓词/变迁系统的图形推理法。定义了描述谓词间与/或关系的谓词-与/或图,借助谓词-与/或图表示谓词/变迁系统,提出一种实现反向推理的目标制导的图形推理法。该方法推理效率高,较已有的推理方法具有一定的优越性。

关键词 一阶谓词逻辑,谓词/变迁系统,图形推理,谓词-与/或图,反向推理,目标制导

中图法分类号 TP301 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.030

Graphical Reasoning Method to First-order Predicate Logic

GENG Xia ZHANG Ji-jun LI Wei-yan

(College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract Traditional reasoning methods to first-order predicate logic have some problems such as inference inefficient, so a graphical reasoning method based on predicate/transition system was presented. The concept of predicate-and/or graph describing the and/or relation among predicates was presented, and several pre-and/or graph representations of predicate/transition system were defined. Finally, a goal guiding graphical reasoning method adopting backward reasoning way was put forward. This method has high efficiency and some advantages compared with other present reasoning methods.

Keywords First-order predicate logic, Predicate/transition system, Graphical reasoning, Predicate-and/or graph, Backward reasoning, Goal guiding

1 引言

Petri 网为一阶谓词逻辑推理的研究提供了新的手段。Petri 网不仅为传统逻辑中的符号串提供了直观的语义框架,而且逻辑推理中的随机性可借助 Petri 网性质,为实现机器推理找一途径。

一阶谓词逻辑可以利用高级 Petri 网系统中的谓词/变迁系统(简称为 Pr/T 系统)进行建模^[1-7]。在建模的基础上,研究一阶谓词逻辑的推理主要分为两个方向:①针对 Horn 子句集:提出了 T-不变量求解算法^[2,8,9];通过归结反演的改进策略,提出了 4 种可以推广到一阶谓词逻辑的证明结论成立的推理算法^[10]。②针对非 Horn 子句集:根据 T-不变量分析的非 Horn 子句集包含矛盾的充要条件,提出了求 T-不变量的有效算法和向前向后两种推理方法^[11,12];针对命题逻辑,将推理过程转变为求关联矩阵线性方程组的非负整数解,此思想可以推广到谓词逻辑^[1]。

但已有的基于 Pr/T 系统的一阶谓词逻辑推理方法都同传统的反演归结法一样,是将前提和结论放在一起进行推理的,这样不便于在推理中使用启发式信息,使得推理过程可能会存在大量无用步骤,推理效率低。因此本文借鉴与/或形反

向演绎推理的思想,基于 Pr/T 系统,提出了一种实现反向推理的目标制导的图形推理方法。

2 基本概念

假设读者熟悉 Petri 网、一阶谓词逻辑及推理的知识,为了便于描述,在这里仅给出相关的概念和术语。

定义 1^[13] 满足下列条件的表达式,称为一阶谓词的合式公式。

(1)原子公式是合式公式;

(2)若 G, H 是合式公式,则 $(\neg G), (\neg H), (G \vee H), (G \wedge H), (G \rightarrow H), (G \leftrightarrow H)$ 也是合式公式;

(3)若 G 是合式公式, x 是个体变量,则 $(\forall x)G, (\exists x)G$ 也是合式公式;

(4)仅由(1)、(2)、(3)产生的表达式才是合式公式。

一阶谓词的合式公式简称为一阶谓词公式。

定义 2^[1] 设 D 为非空有限集, V 为非空有限符号集。

(1)若 V 中符号均代表 D 中元素,则 V 称为 D 上的变量集, V 中符号称为 D 上的变量。

(2) D 中的元素和 D 上的变量均称为 D 的项(term)。若 $f^{(n)}$ 是 D 上的 n 元运算符, v_1, v_2, \dots, v_n 是 D 的项,则

到稿日期:2013-04-17 返修日期:2013-05-22 本文受国家自然科学基金(61170079, 61201252),教育部科技论文快速共享项目(2012107),山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2009DX012)资助。

耿 霞(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为 Petri 网理论及应用, E-mail: geng_xia117@163.com;张继军(1965—),男,硕士,教授,主要研究方向为 Petri 网理论及应用、软件工程;李蔚妍(1975—),女,硕士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论及应用、信息技术。

$f^{(n)}(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 也是 D 的项。此外,没有其它类的项。

(3)以 D 的项为分量的 n 元向量 $\langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$ 称为 D 上的 n 元组,其中 $n \geq 1$ 。

(4)将 D 的有限多个 n 元组用加号“+”连接起来组成的形式和叫做 D 的 n 元符号和(symbolic sum),简称符号和。当 $n=0$ 时,称为空符号和,用“NULL”或“ $\langle \rangle$ ”表示。

(5)运算符加号“+”满足交换律。

定义 3^[1] 设 $\Sigma = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 为谓词/变迁系统,满足:

(1) $(S, T; F)$ 是有向网,称为 Σ 的基网。

(2) D 为非空有限集,称为 Σ 的个体集; D 上有给定的运算符集 Ω 。

(3) V 是 D 上的变量集。

(4) $A_S: S \rightarrow \pi$, 其中 π 是 D 上的动态谓词集,对于 $s \in S$,若 $A_S(s)$ 为 n 元谓词,称 s 是 n 元谓词。

(5) $A_T: T \rightarrow f_D$, 其中 f_D 是 D 的公式集,对于 $t \in T$, $A_T(t)$ 只能含静态谓词和 Ω 中的运算符。

(6) $A_F: F \rightarrow f_S$, 其中 f_S 是 D 的符号和集。对 n 元谓词 $s \in S$,若 $(s, t) \in F$ 或 $(t, s) \in F$,则 $A_F(t, s)$ 或 $A_F(s, t)$ 为 n 元符号和。对于 $t \in T$,公式 $A_T(t)$ 中的自由变量必须是以 t 为一端的有向弧上的自由变量。

(7) $M_0: S \rightarrow f_S$, 对 n 元谓词 $s \in S$, $M_0(s)$ 是 n 元符号和。

一阶谓词公式在描述逻辑问题时,可分为描述前提的谓词公式和描述结论的谓词公式。

不失一般性,本文均采用文献[7]提出的方法对一阶谓词公式进行 Pr/T 系统建模。

定义 4 设 P 和 Q 分别为描述前提和结论的谓词公式,设 $\Sigma_1 = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 和 $\Sigma_2 = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 分别为 P 和 Q 对应的 Pr/T 网系统^[7],则称 Σ_1 为前提 Pr/T 网系统,简称为前提网,称 Σ_2 为结论 Pr/T 网系统,简称为结论网。

定义 5 设 $\Sigma = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 为结论网,则称 $\forall t \in T$ 为目标变迁。

定义 6 满足下列条件的二元组 $N = (S, F)$ 称为谓词-与/或图(Predicate-and/or graph),简称为 Pre-与/或图。

- (1) $|S| \geq 2$;
- (2) $F \subseteq (S \times S)$;
- (3) $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S$;

其中

$$\text{dom}(F) = \{x \in S \mid \exists y \in S: (x, y) \in F\}$$

$$\text{cod}(F) = \{x \in S \mid \exists y \in S: (y, x) \in F\}$$

(4) $\forall s \in S$ 代表一个原子谓词公式;

(5) $s_1, s_2, \dots, s_n (n \geq 2)$ 表示的谓词间为“或”的关系当且仅当 $\exists s \in S$ 且 $(s, s_i) \in F (i=1, 2, \dots, n)$;

(6) $s_1, s_2, \dots, s_n (n \geq 2)$ 表示的谓词间为“与”的关系当且仅当 $\exists s \in S$ 且 $(s_i, s) \in F (i=1, 2, \dots, n)$;

(7) 若 $\exists x \in S, \cdot x = \emptyset$, 则称结点 x 为端结点。

定义 7 设 $\Sigma = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 为一个 Pr/T 网系统, $\Sigma' = (S_1 \cup S_2, T'; F', D, V, A_{S_1 \cup S_2}, A_{T'}, A_{F'}$,

$M_0')$ 为 Σ 的一个二层库所 Pr/T 子网,当且仅当同时满足以下条件:

- (1) $S_2 = \{s_1, s_2, \dots, s_m\} \subseteq S (m \geq 0)$;
- (2) $T' = \{t \mid t \in T, t' = S_2\}$, 且 T' 不为空集;
- (3) $S_1 = \{s \mid s \in S, \exists t \in T', \text{使得 } s' = \{t\}\}$;
- (4) $F' = \{(x_1, x_2) \mid x_1, x_2 \in S_1 \cup S_2 \cup T', (x_1, x_2) \in F\}$, 对 $\forall (x_1, x_2) \in F', A_{F'}(x_1, x_2) = A_F(x_1, x_2), A_{S_1 \cup S_2}: S_1 \cup S_2 \rightarrow \pi$, 其中 π 是 D 上的动态谓词集, $A_{T'}: T' \rightarrow \text{true}$, 对 $t \in T'$, $A_{T'}(t)$ 是静态谓词, $M_0': S' \rightarrow \langle \rangle$ 。 S_2 称为 Σ' 的输出库所集合, S_1 称为 Σ' 的输入库所集合。

若 Σ 是本身的一个二层库所 Pr/T 子网,则称 Σ 为一个二层库所 Pr/T 网。

例如,图 1 表示的就是一个二层库所 Pr/T 网的基网。特殊地,定义 7 中的 S_2 和 S_1 都可为空集,但由于网中不能出现孤立结点,因此不能同时为空集。另外,定义 7 中的(2)和(3)并未要求 T' 和 S_1 为所确定的极大集,所以,即使当 S_2 确定了,得到的由 S_2 所确定的二层库所 Pr/T 子网也可能是不是唯一的。

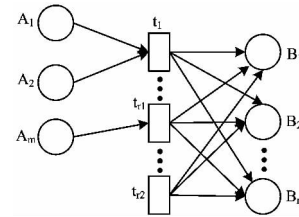


图 1 一个二层库所 Pr/T 网的基网

定义 8 设 $\Sigma = (S, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 为一个 Pr/T 网系统,对 $\forall t \in T$,若 $t' \neq \emptyset$,则设 $t' = \{s_1, s_2, \dots, s_m\} (m \geq 1)$,定义 $\{s_1(X_1), s_2(X_2), \dots, s_m(X_m)\}$ 为变迁 t 的输出谓词集合(其中 $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ 是 $A_F(t, s_i)$ 上的项)。类似地,若 $\cdot t \neq \emptyset$,则设 $\cdot t = \{s_1', s_2', \dots, s_n'\} (n \geq 1)$,定义 $\{s_1'(Y_1), s_2'(Y_2), \dots, s_n'(Y_n)\}$ 为变迁 t 的输入谓词集合,(其中 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是 $A_F(s_i', t)$ 上的项)。输入/输出谓词集合中的元素分别称为变迁 t 的输入/输出谓词。

定义 9 设 $\Sigma = (S_1 \cup S_2, T; F, D, V, A_S, A_T, A_F, M_0)$ 为一个二层库所 Pr/T 子网,其中, S_1 为 Σ 的输入库所集合, S_2 为 Σ 的输出库所集合。对于任意一个原子谓词公式集合 $P = \{P_1(X_1), P_2(X_2), \dots, P_n(X_n)\}$,称原子谓词公式集合 P 与二层库所 Pr/T 子网 Σ 成功匹配当且仅当同时满足条件:

- (1) 集合 P 对应的库所集合 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\} = S_2$;
- (2) 存在一替换 θ ,使得对 $\forall t \in T, X_i \theta = A_F(t, P_i) \theta (i=1, 2, \dots, n)$ 。

为了便于讨论,作出如下规定:

(1) 定义 9 中,假设原子谓词公式集合 P 中的谓词符号均不相同。

(2) 假设 Pr/T 网系统中每个有向边上只有一个 $n (n \geq 1)$ 元组,不会出现由 $m (m \geq 2)$ 个 n 元组组成的符号和形式。

3 Pr/T 网系统的 Pre-与/或图表示

设 Σ 为一个含 $r (r \geq 1)$ 个变迁的二层库所 Pr/T 网,根据

二层库所 Pr/T 网的定义, Σ 可由 r 个只含一个变迁的二层库所 Pr/T 网共享合成^[14]。

3.1 只含一个变迁的二层库所 Pr/T 网的 Pre-与/或图表示

变迁的输入库所与输出库所的个数之比用 $m : n (m, n \geq 0)$ 表示, 根据 $m : n$ 的不同, 可分以下几种情况进行讨论。

(1) $1 : n (n \geq 1)$ 的情况如图 2(a) 所示, 它的 Pre-与/或图如图 2(b) 所示。

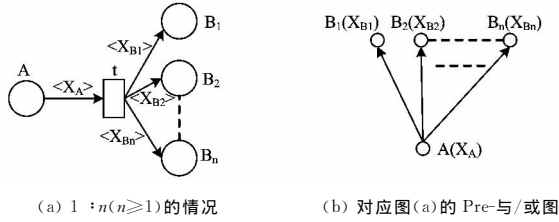


图 2 $1 : n (n \geq 1)$ 的情况以及它的 Pre-与/或图

(2) 对于 $0 : n (n \geq 1)$ 的情况, 它的 Pre-与/或图和图 2(b) 类似, 只是在图 2(b) 中将原子谓词公式 $A(X_A)$ 改成“NULL”即可。

(3) $m : 1 (m \geq 2)$ 的情况如图 3(a) 所示, 它的 Pre-与/或图如图 3(b) 所示。

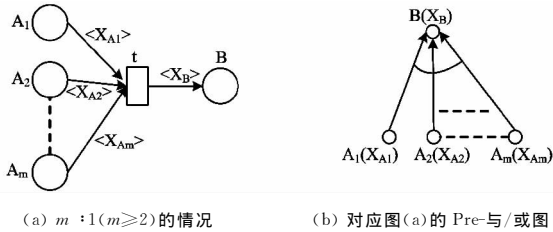


图 3 $m : 1 (m \geq 2)$ 的情况以及它的 Pre-与/或图

(4) 对于 $m : 0 (m \geq 1)$ 的情况, 它的 Pre-与/或图和图 3(b) 类似, 只是在图 3(b) 中将原子谓词公式 $B(X_B)$ 改成“NULL”即可。

(5) $m : n (m, n \geq 2)$ 的情况如图 4(a) 所示, 它的 Pre-与/或图如图 4(b) 所示。

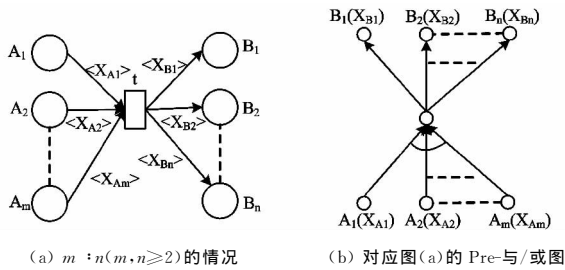


图 4 $m : n (m, n \geq 2)$ 的情况以及它的 Pre-与/或图

3.2 二层库所 Pr/T 网的 Pre-与/或图表示

定理 1 设 Σ 为一个含 $r (r \geq 1)$ 个变迁的二层库所 Pr/T 网, 它的 Pre-与/或图可由 3.1 节中 5 种情况的 Pre-与/或图共享合成。

证明: (1) 当 $r=1$ 时, 结论自然成立。

(2) 当 $r>1$ 时, 根据 Σ 输出库所的总个数 n 的不同以及定义 7, 可分为以下 3 种情况进行证明。

1) $n=1$ 的情况如图 5 所示, 其中 $P_i (i=1, 2, \dots, r)$ 分别为 t_i 的输入库所集合, 且 $|P_i| \geq 0$ (对 P_i 的解释下同)。图 5

的情况可由 r 个图 6 所示的子图组成。

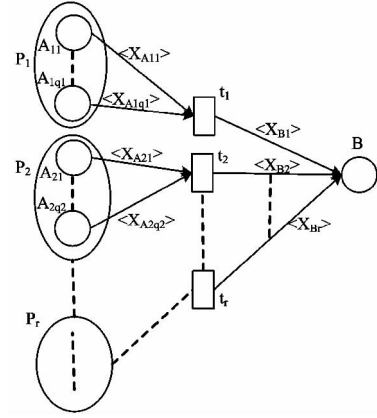


图 5 $n=1$ 的情况

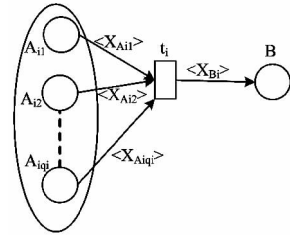


图 6 组成图 5 的子图

根据 $|P_i|$ 的不同, 图 5 的 Pre-与/或图可由 3.1 节的第 (1)、第 (2) 或第 (3) 种情况的 Pre-与/或图组成。

2) $n>1$ 的情况如图 7 所示。图 7 的情况可由 r 个图 8 所示的子图组成。

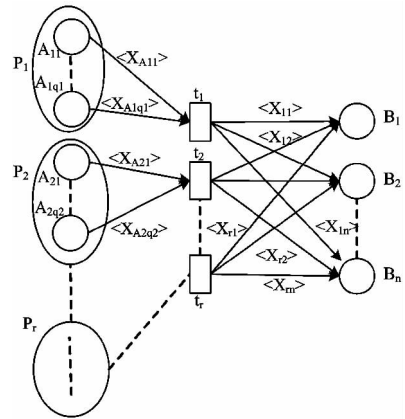


图 7 $n>1$ 的情况

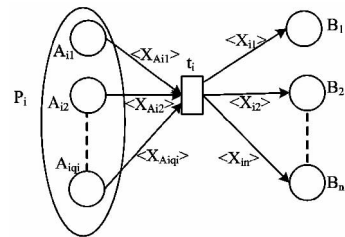


图 8 组成图 7 的子图

根据 $|P_i|$ 的不同, 图 7 的 Pre-与/或图可由 3.1 节的第 (1)、第 (2) 或第 (5) 种情况的 Pre-与/或图组成。

3) $n=0$ 的情况如图 9 所示, 其中 $|P_i| > 0$ 。图 9 的情况可由 r 个图 10 所示的子图组成。

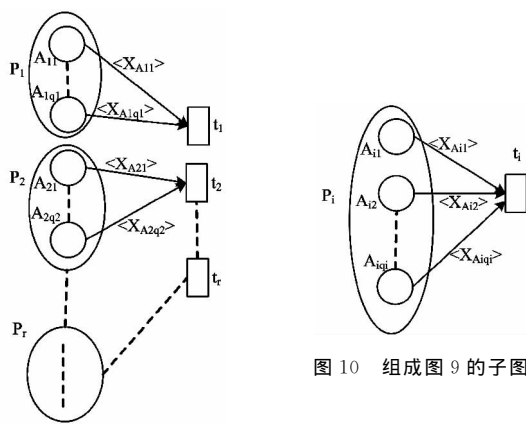


图9 $n=0$ 的情况

图9的Pre-与/或图可由 r 个3.1节中第(4)种情况的Pre-与/或图组成。

综上所述,定理1成立。(证毕)

当 $r>1$ 时,在第1)、第2)情况中,变迁的输出库所 B 或 $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 在Pre-与/或图中会出现 r 次。本文规定,在借助Pre-与/或图进行推理的过程中,只能有一个(组)输出库所继承其原有Pre-与/或图中的各种与或关系,并在图中明确画出,而其余 $r-1$ 个(组)输出库所虽然也继承原有的与或关系,但为了图的简洁,不需明确画出。

4 一阶谓词逻辑的图形推理

4.1 一阶谓词逻辑的目标制导图形推理方法

假设需要证明的一阶谓词逻辑命题的一般形式为: $P: A_1, A_2, \dots, A_m \rightarrow B$, 其中,前提 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 和结论 B 均为一阶谓词公式,要求 B 具有前束范式的形式且不含全称量词。一阶谓词逻辑的目标制导图形推理方法的具体步骤如下:

Step 1 对 A_1, A_2, \dots, A_m 分别建立相应的Pr/T网系统,将相同的库所合并,得到的前提网设为 $\Sigma_1 = (S_1, T_1; F_1, D, V, A_{S1}, A_{T1}, A_{F1}, M_{01})$;对 B 中量词之后的谓词公式建立相应的Pr/T网系统,得到的结论网设为 $\Sigma_2 = (S_2, T_2; F_2, D, V, A_{S2}, A_{T2}, A_{F2}, M_{02})^{[7]}$;适当改名,使相同的变元不出现在 Σ_1 和 Σ_2 不同变迁的输入/输出弧上;

Step 2 每个目标变迁 $t_i (i=1 \text{ to } |T_2|)$ 对应的Pre-与/或图 $G_i (i=1, 2, \dots, |T_2|)$ 初始化为空;

Step 3 for($i=1$ to $|T_2|$) {

Step 3.1

(1)若 t_i 的输出谓词集非空,设输出谓词集为 $Q_i = \{P_1(X_1), P_2(X_2), \dots, P_n(X_n)\} (n \geq 1)$,用 G_i 的 n 个端结点分别表示这 n 个原子谓词公式,作为推理的起点。若存在 $t \in T_1$,并且 $t^* = \emptyset$,则再在 G_i 中增加一个标注为“NULL”的端结点,也作为推理的起点;

(2)若目标变迁 t_i 的输出谓词集为空,则只在 G_i 中建立一个标注为“NULL”的端结点作为推理的起点;

Step 3.2

if(Q_i 任一子集在前提网 Σ_1 中没有能够成功匹配的二层库所Pr/T子网) then 证明 B 不是 A_1, A_2, \dots, A_m 的有效结论,转 Step5
else {

while(存在 Q_i 的某一子集和前提网 Σ_1 中某个二层库所Pr/T子网 Σ_1' 成功匹配) do {

Step 3.2.1 将 Σ_1' 的Pre-与/或图加入到 G_i 中(若一个结点参与了 $n(n \geq 2)$ 次成功匹配的过程,则在 G_i 中将其复制 n 个,使各次加入到 G_i 中的Pre-与/或子图互相独立);

Step 3.2.2 得到新的端结点集合;

Step 3.2.3 若某个端结点表示的原子谓词公式经过替换是目标变迁 t_i 的输入谓词,则将此端结点标注为“终止结点”;

Step 3.2.4 令 Q_i 为非终止端结点表示的原子谓词公式集合。

}

};

Step 3.3

若 G_i 中存在某一个子图 G_i' ,满足如下条件:

(1)目标变迁 t_i 的输出谓词集合与 G_i' 的推理起点表示的原子谓词公式集合相等;

(2)子图中所有“终止结点”表示的原子谓词公式集合经过某个替换与目标变迁 t_i 的输入谓词集合相等。

则证明对目标变迁 t_i 推导成功。否则,证明目标变迁 t_i 推导不成功,从而证明 B 不是 A_1, A_2, \dots, A_m 的有效结论且转 Step5。

};

Step 4 若对每个目标变迁 $t_i (i=1, 2, \dots, |T_2|)$ 推导都成功,且推理过程中用到的替换是一致的,则证明 B 是 A_1, A_2, \dots, A_m 的有效结论,否则证明 B 不是 A_1, A_2, \dots, A_m 的有效结论;

Step 5 推理结束。

在上述方法中,若新加入到Pre-与/或图 $G_i (i=1, 2, \dots, |T_2|)$ 中的原子谓词公式通过替换与 G_i 中已有的某个原子谓词公式相等,则只能在 G_i 中不能再加入新的端结点时进行合并。合并时遵循:

(1)若两个结点均标注为“终止结点”,则将两个结点合并,否则不合并;

(2)为了保持两个结点原来各自的推理关系,不将两个结点真正合并成一个结点,而是通过虚线联接表示合并。

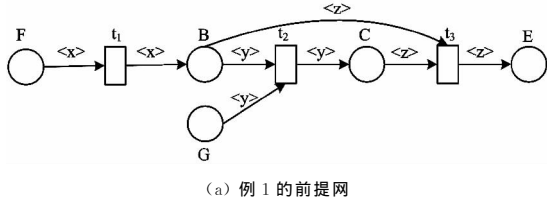
Step 1 规定相同变元不出现在 Σ_1 和 Σ_2 不同变迁的输入/输出弧上,所以,若Step 3.3中的替换存在,则一定和Step 3.2.3中的替换是一致的。由3.1节知,一个Pre-与/或图 $G_i (i=1, 2, \dots, |T_2|)$ 中存在 $n(n \geq 2)$ 个“终止结点”时, n 个“终止结点”表示的谓词间为“与”的关系,且这些“终止结点”到推理起点均有有向路径,所以,对于目标变迁 t_i ,设其输入谓词集为 $I_i = \{P_1(X_1), P_2(X_2), \dots, P_n(X_n)\} (n \geq 0)$,输出谓词集为 $O_i = \{Q_1(X_1), Q_2(X_2), \dots, Q_m(X_m)\} (m \geq 1)$,当Step 3.3所述的两个条件成立时,下面命题成立: $P_1(X_1) \wedge P_2(X_2) \wedge \dots \wedge P_n(X_n) \rightarrow Q_1(X_1) \vee Q_2(X_2) \vee \dots \vee Q_m(X_m)$,即对目标变迁 t_i 的推导是成功的,Step3.3是正确的。其它步骤的有效和合理性是显然的,因此针对一阶谓词逻辑,提出的目标制导图形推理方法是有效和合理的。

4.2 应用实例

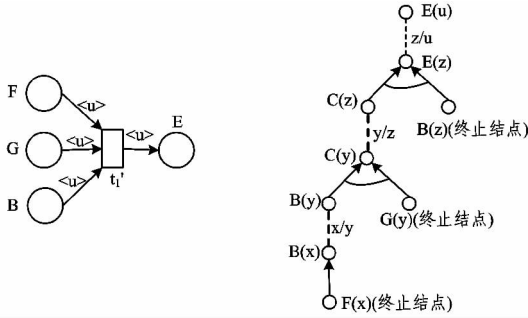
例1 已知 $\forall x(F(x) \rightarrow B(x)), \forall x(B(x) \wedge G(x) \rightarrow C(x)), \forall x \forall y(C(x) \wedge B(y) \rightarrow E(y))$,求证:

$$\exists y(F(y) \wedge G(y) \wedge B(y) \rightarrow E(y))$$

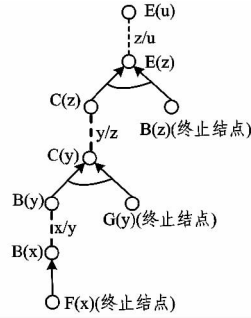
证明:根据文献[7]和目标制导图形推理方法中的 Step1, 前提网和结论网分别如图 11(a)和图 11(b)所示, 目标变迁 t_1' 的推理过程如图 11(c)从上至下所示。因为满足目标制导图形推理方法中 Step 3.3 的两个条件, 所以对目标变迁 t_1' 推导成功, 且推理过程中用到的替换是一致的, 从而证明结论成立。



(a) 例 1 的前提网



(b) 例 1 的结论网



(c) 目标变迁 t_1' 的推理过程

图 11 例 1 的前提网和结论网以及它的推理过程

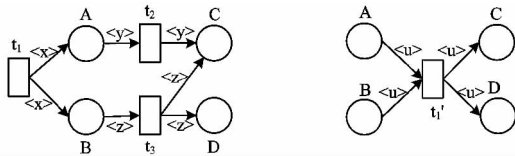
图 11(c)中, 虚线表示某结点对应的谓词公式通过替换得到前提网中的某个谓词公式, 虚线联接的两个结点在图中实质是一个结点。下例同。

例 2 已知 $\forall x(A(x) \vee B(x)), \forall x(\neg A(x) \vee C(x)), \forall x(\neg B(x) \vee C(x) \vee D(x))$, 求证:

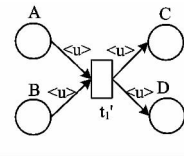
$$(1) \exists x(A(x) \wedge B(x) \rightarrow C(x) \vee D(x))$$

$$(2) \exists x(A(x) \vee C(x) \vee D(x))$$

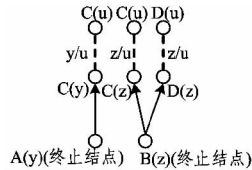
证明:(1)根据文献[7]和目标制导图形推理方法中的 Step1, 前提网和结论网分别如图 12(a)和 12(b)所示, 目标变迁 t_1' 的推理过程如图 12(c)所示。



(a) 例 2(1)和(2)的前提网



(b) 例 2(1)的结论网

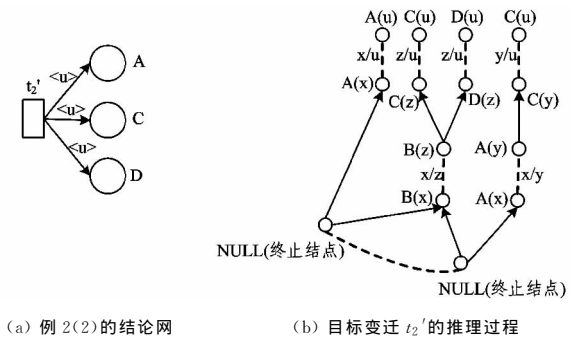


(c) 目标变迁 t_1' 的推理过程

图 12 例 2 的前提网和(1)的结论网以及(1)的推理过程

注意:图 12(c)中两个 $C(u)$ 结点不能合并, 因为它们不同为“终止结点”, 不满足目标制导图形推理方法中 Step3.3 的两个条件, 从而证明结论不成立。

(2)结论网如图 13(a)所示, 根据目标制导图形推理方法, 目标变迁 t_2' 的推理过程如图 13(b)所示。



(a) 例 2(2)的结论网

(b) 目标变迁 t_2' 的推理过程

图 13 例 2 中(2)的结论网以及它的推理过程

在图 13(b)中, 两个“NULL”结点由于均为“终止结点”, 因此可以合并, 满足目标制导图形推理方法中 Step 3.3 的两个条件, 所以对目标变迁 t_1' 推导成功, 且推理过程中用到的替换是一致的, 从而证明结论成立。

结束语 本文针对一阶谓词逻辑推理, 提出一种基于谓词/变迁系统的目标制导图形推理法, 此方法较已有的推理方法具有以下优点:

(1)由于推理过程从要论证的结论出发, 通过原子谓词公式集合与二层库所 Pr/T 子网的不断匹配进行反向推理, 目的性强, 能减少推理过程的冗余步骤, 提高推理效率。

(2)推理过程中前提、结论相分离, 避免了传统推理方法掩盖蕴含词所表示的因果关系的缺点, 知识的可读性较强, 便于在推理中使用启发式信息。

(3)传统的与/或形演绎推理虽然能实现反向推理, 但是它对描述已知事实和目标的谓词表达式有较严格的限制, 而本方法相应的限制较少。

一阶谓词逻辑命题的结论部分只能是前束范式形式, 且不能含有全称量词。绝大多数一阶谓词逻辑命题直接或通过一定变换后可以满足这种要求。例如, 对于谓词逻辑命题 $\forall x(P(x) \vee Q(x)) \Rightarrow \neg \forall x P(x) \vee \exists x Q(x)$, 可将结论部分化成 $\exists x(\neg P(x) \vee Q(x))$, 从而满足本方法所要求的结论形式。因此, 本文提出的方法适用范围广。

参考文献

- [1] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [2] Peterka G, Murata T. Proof procedure and answer extraction in Petri net model of logic programs[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1989, 15(2): 209-217
- [3] Murata T, Zhang D. A predicate-transition net model for parallel interpretation of logic programs[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1988, 14(4): 481-497
- [4] 林闯, 吴建平. 利用不动点求解子句逻辑推演的 Petri 网模型[J]. 软件学报, 1999, 10(4): 359-365
- [5] 方欢, 吴哲辉, 崔焕庆. 基于 Horn 子句集的 Pr/T 网可达树的方案求解[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(增刊 1): 163-165
- [6] 方欢, 印玉兰, 徐誉尹. 利用谓词/变迁网证明的一阶谓词逻辑命题[J]. 计算机工程, 2006, 32(23): 191-198
- [7] 耿霞, 吴哲辉, 张继军. 谓词/变迁系统对一阶谓词公式的建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(增刊 1): 9-15
- [8] Lin C, Chandhury A, Whinston A B, et al. Logical inference of Horn clauses in Petri net models[J]. IEEE Transactionson Knowledge and Data Engineering, 1993, 5(3): 416-425

(下转第 156 页)

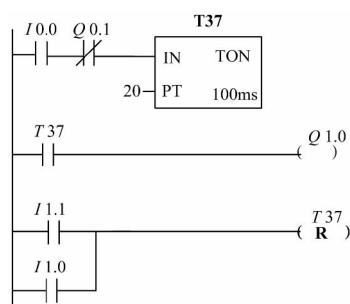


图 5 电梯自动开门延时梯形图

根据算法 1,可以得到图 5 中梯形图的 Petri 网模型的模块图,如图 6 所示。

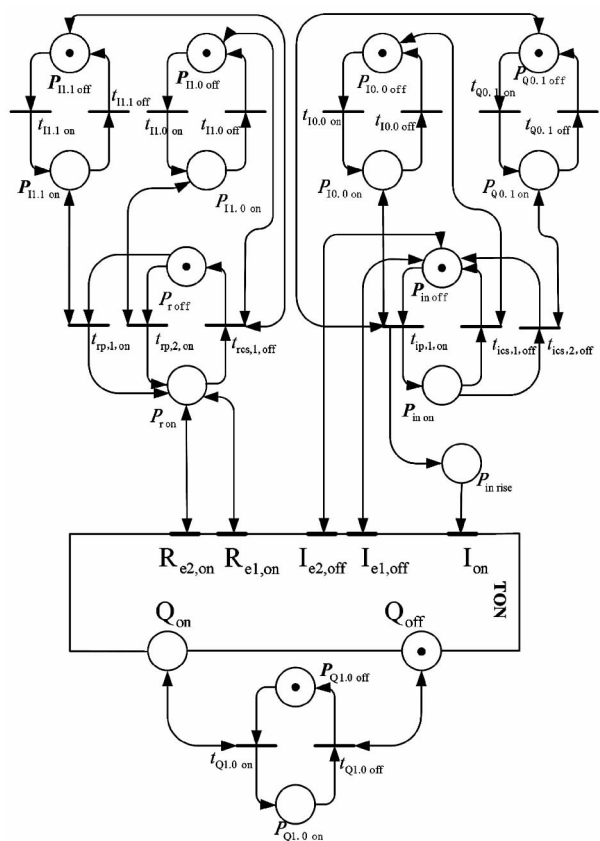


图 6 图 5 所示梯形图对应的 Petri 网模型

结束语 文中提出了一个完整的将 PLC 中 TON 模块转换为普通 Petri 网的算法。因为普通 Petri 网比扩展 Petri 网的激发条件更为简洁,结构也更为清晰,所以,利用此算法可

以通过 Petri 网理论去分析和模拟含有 TON 的梯形图程序,得到的 Petri 网模型可以更方便地在细节上显示出 TON 的运行原理,也为 PLC 程序仿真和验证建立了理论基础。接下来,我们将研究利用 Petri 网去做含有 TON 的梯形图程序的程序验证工作。也会继续研究将梯形图中其它复杂功能块转换为普通 Petri 网的工作。

参考文献

- [1] IEC. International Standard 1131-3. Programmable controllers, part 3: programming languages[S]. IEC Publication, 1993
- [2] Venkatesh K, Zhou Meng-chu, Caudill R J. Comparing Ladder Logic Diagrams and Petri Nets for Sequence Controller Design Through a Discrete Manufacturing Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(6): 611-619
- [3] 韩赞东, 刘继国, 罗晟. 基于控制 Petri 网的高温气冷堆燃料装卸过程控制系统设计方法[J]. 核动力工程, 2008, 29(1): 14-18
- [4] Suesut T, Inban P, Nilas P, et al. Interpretation Petri Net model to IEC 1131-3: LD for Programmable Logic Controller[C]// Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, 2004: 1107-1111
- [5] Wightkin N, Buy U, Darabi H. Formal Modeling of Sequential Function Charts with Time Petri Nets [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 19(2): 455-464
- [6] Tsai Jui-i, Teng Ching-cheng. Constructing an Model for Ladder Diagram Diagnosis Using Petri Nets[J]. Asian Journal of Control, 2010, 2(3): 309-322
- [7] Chen Xue-kun, Luo Ji-liang, Qi Peng-fei. Method for Translating Ladder Diagrams to Ordinary Petri Nets [C]// 51st IEEE Conference on Decision and Control. Maui, Hawaii, USA, 2012: 6716-6721
- [8] 秦绪平, 张万忠. 西门子 S7 系列可编程控制器应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 42-44
- [9] Luo Ji-liang, Nonami K. Approach for Transforming Linear Constraints on Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(11): 2751-2765
- [10] 罗继亮. Petri 网的一类禁止状态问题的混合型监控器算法设计[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 291-298
- [11] David R, Alia H. Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets [M]. Germany: Springer, 2005: 24-40
- [12] 罗继亮, 陈雪琨, 齐鹏飞, 等. 间歇式化工形式化建模与顺序控制器设计[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 1896-1900

(上接第 152 页)

- [9] 林闯. Petri 网用于 Horn 子句的逻辑推论[J]. 软件学报, 1993, 4(4): 32-37
- [10] 周奕, 吴时霖. 基于归结反演的 Petri 网推理新方法[J]. 计算机学报, 1997, 20(3): 213-222
- [11] Lin C, Chanson S T, Murata T. Petri Net Models and Efficient T-Invariant Analysis for Logical Inference of Clauses[C]// 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Beijing, China, October 1996: 3174-3179
- [12] 林闯, 王鼎兴. 使用 Petri 网 T-不变量求解子句的逻辑推论[J].

计算机学报, 1996, 19(10): 762-767

- [13] 左孝凌,李为鑑,刘永才. 离散数学[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1982
- [14] 蒋昌俊. Petri 网的动态不变性[J]. 中国科学(E 辑),1997,27(5):567-573
- [15] 梁伟晟,李磊. 基于与或逻辑的界面关系模型表示方法[J]. 计算机科学,2008,35(4):203-204,210
- [16] Murata T, Subrabmanian V S, Wakayama T. A Petri net model for reasoning in the presence of inconsistency[J]. IEEE Trans on Knowledge and data Engineering, 1991, 3(3):281-292