

利用 Petri 网模型的求解因果图最小割集的算法^{*}

邹敏, 王洪春

(重庆师范大学 数学科学学院, 重庆 401331)

摘要:【目的】为快速有效地求得因果图的最小割集。【方法】将因果图转换为 Petri 网模型,利用 Petri 网的特点提出一种新的求解因果图最小割集的算法,该算法省略了求因果图节点事件的一阶割集和最终割集这两步,大大减少了因果图用于故障诊断的时间。【结果】以实例说明了这一求解过程,并验证了算法的有效性。【结论】利用上述算法能够快速有效地求得最小割集,从而可对系统进行定性分析。

关键词:因果图;故障分析;最小割集;Petri 网

中图分类号:TP38

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)03-0130-07

因果图理论是 1994 年张勤教授提出的一种基于概率论的知识表达和逻辑推理方法^[1],它可以用于对复杂系统的故障诊断,兼顾了定量分析与定性分析的特点^[2-3]。其中,定量分析是指通过求解基本事件的后验概率确定最有可能导致该系统发生故障的原因,从而采取相应措施;而定性分析是指通过对求解因果图最小割集确定导致该系统发生故障的原因或者原因集,从而进行故障诊断^[4]。要对系统进行定性分析,要求系统的最小割集。虽然近些年来因果图理论得到了进一步发展,但是对于因果图最小割集的求解方法却十分缺乏。到目前为止,求解因果图最小割集的方法主要分为两种。一种是基于最终割集求最小割集的常规方法,但要用这种方法求复杂系统的最小割集,需要先求得最终割集,而最终割集的求解是十分复杂的。因此对于复杂系统的最小割集求解,一般不采取此方法。另一种方法是基于因果图基本事件矩^[5]的方法,该方法是构造一个关于因果图基本事件的矩阵,通过对矩阵的列做交运算得到最小割集。但是这种方法只能用于没有逻辑门交互的因果图,对于其他情况不能满足。在此情况下,笔者提出一种利用 Petri 网模型的求解因果图最小割集的新算法,该算法是根据 Petri 网能通过令牌的流动反应系统的状态变化和导致这种变化的因果关系这一特点以及 Petri 网的相关性质得出来的。笔者还利用该算法解决了某电站内的高压安全注射系统这一实际问题,求解出的最小割集与文献^[6]的结果相同,说明了该算法的有效性。

1 因果图与 Petri 网

1.1 因果图的相关知识表达

因果图是一种基于概率论的知识表达方式。它的计算过程可分为 4 步^[7]:1) 求各节点事件的一阶割集表达式;2) 求各节点事件的最终割集表达式;3) 求各节点事件的不变化割集表达式;4) 求感兴趣事件的后验概率。

现将因果图理论的相关知识定义如下。

定义 1 在因果图中,把一组以逻辑与为关系组合在一起的事件称为割集(CS)。各割集间是逻辑或的关系^[8]。

定义 2 在因果图中,如果节点事件的割集仅由相邻的事件(包括基本事件和节点事件)和连接事件构成,那么把这样的割集称为一阶割集(CSs-1)^[9]。

定义 3 在因果图中,若节点事件的割集仅由基本事件和连接事件构成,那么把这样的割集称为最终割集

* 收稿日期:2017-02-27 修回日期:2018-04-20 网络出版时间:2018-05-22 10:02

资助项目:国家社会科学基金(No. 13BTJ008)

第一作者简介:邹敏,女,研究方向为人工智能,E-mail:645376700@qq.com;通信作者:王洪春,男,教授,博士,E-mail:wanghc@cqnu.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180522.1002.046.html>

(CSs-f)。

定义 4 在最终割集中,如果任意去掉一个基本事件后,就不再是割集,那么把这样的最终割集称为最小割集(MCS)^[10]。

因果图的一种经典因果图模型表达如图 1。其中, $X_i(i=1,2,3,4)$ 表示中间事件, $B_i(i=5,6,7,8)$ 表示基本事件, $P_{ij}(i,j=1,2,3,4,i \neq j)$ 表示连接事件。

1.2 Petri 网的相关知识表达

Petri 网是一种由库所(Position)、变迁(Transition)、有向弧(Arc)和令牌(Token)组成的有向网^[11]。它的图形表达方法形象、直观,可以表达故障的动态传递过程^[12]。

定义 5 三元组 $N=(S,T;F)$ 称为有向网(Directed net,简称网(Net))的充分必要条件是^[13]:1) $S \cap T = \emptyset$;2) $S \cup T \neq \emptyset$;3) $F \subseteq S \times T \cup T \times S$ (“ $\times$ ”为笛卡儿积);4) $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T$,其中 $\text{dom}(F) = \{x \mid \exists y: (x,y) \in F\}$, $\text{cod}(F) = \{y \mid \exists x: (x,y) \in F\}$;它们分别为 F 的定义域和值域。

定义 5 中 S 和 T 分别称为 N 的库所(Position)集和变迁(Transition)集, F 为流关系(Flow relation)。 $S \cup T$ 称为 N 的元素集。

定义 6 若有 $(p,t) \in F$,则称 p 为变迁 t 的输入库所;若有 $(t,p) \in F$,则 p 称为变迁 t 的输出库所。若有 $p' = \{t \in T \mid (t,p) \in F\}$ 和 $p'' = \{t \in T \mid (p,t) \in F\}$,则称 p' 和 p'' 分别为 p 的前集和后集。

一个简单的 Petri 网模型如图 2 所示,其中: $P_i(i=1,2,3,4)$ 表示库所,用“○”表示。 $t_i(i=1,2,3,4)$ 表示变迁,用“|”表示。“●”表示令牌;有令牌时,表示逻辑“1”;没令牌时,表逻辑“0”。在此特别说明的是,由于本研究主要关注最小割集的求解,故只考虑故障信息为 0,1 的情况,对其他概率信息不予考虑。如果库所中没有黑点,说明它没有发生故障。“ $\rightarrow$ ”表示库所之间的关系。

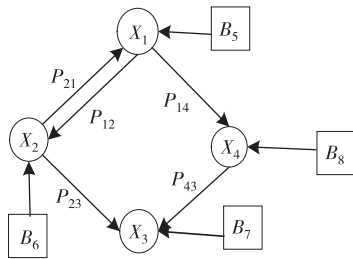


图 1 经典因果图模型

Fig. 1 Classic cause and effect diagram model

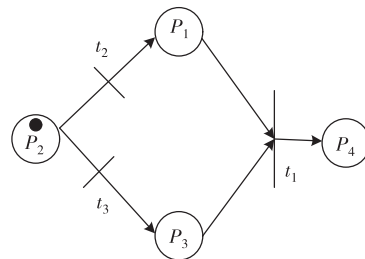


图 2 一种简单的 Petri 网模型

Fig. 2 A simple petri net model

如果用 Petri 网来对系统进行故障诊断,则将故障作为目标库所,故障源作为基本库所,构建一个 Petri 网。Petri 网既有静态性又有动态性。它的静态性体现在库所,它的动态性体现在变迁。当变迁使能时,即当变迁的每一个输入库所都含有令牌时,令牌将传递到下一个库所。从 Petri 网的这种动态性可知,如果目标库所出现令牌,那么该系统将发生故障;否则,该系统不发生故障。因此,可以通过令牌的传播情况表示故障信息的传播关系。从而要求因果图的最小割集,可以将因果图的基本关系转换成 Petri 网模型,再基于 Petri 网求取最小割集。

1.3 因果图向 Petri 网的转换步骤

因果图的逻辑门向 Petri 网模型的逻辑门转换如图 3 所示。这是因为从文献[14]可知,任一个因果图都可以转化成一个只包含逻辑或门和逻辑与门的标准化因果图。因此任何一个因果图的逻辑关系都可以只用或门和与门表示。根据因果图与 Petri 网的符号对应,可将因果图转换成 Petri 网模型,具体步骤如下。

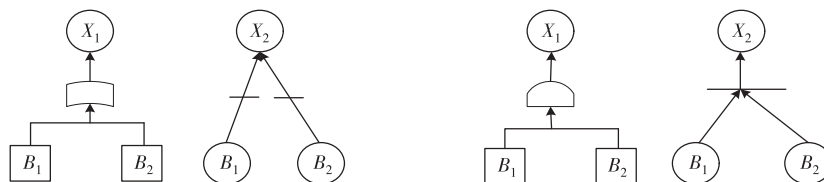


图 3 因果图中或门和与门在 Petri 网中的表示

Fig. 3 The causality diagram of the OR gate and the AND gate in the Petri net

步骤 1:对因果图中的每一个基本事件和中间事件,在 Petri 网中建立相应的基本库所和中间库所,并保持跟因果图中节点事件的位置不变,对它赋予相同的序号。

步骤 2:对因果图当中节点事件之间的有向弧,在 Petri 网中同样用有向弧表示。

步骤 3:对因果图中的每一个逻辑符号,根据图 3,在 Petri 网中建立相应的逻辑符号;若因果图中有两个节点之间没有逻辑符号,则在 Petri 网中各库所之间加“|”表示变迁。

如果因果图里面含有有向环,则利用解环规则解环,解环后再根据上面的步骤转换为 Petri 网。解环规则^[15]:当出现因果环路时,在重复的结点处将环截断,而把它以下的割集表达式视为空集。

1.4 基本库所的运算法则

为了方便求解因果图的最小割集,现定义如下的基本库所运算法则。

定义 7 设 $P_i (i=1,2,3,4)$ 是 Petri 网模型中的 4 个基本库所,则:

$$P_1 \rightarrow P_2 = P_2 \rightarrow P_1 = \{P_1, P_2\}; \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} \rightarrow P_3 = P_3 \rightarrow \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_1, P_3\} \\ \{P_2, P_3\} \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} P_3 \\ P_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_3 \\ P_4 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_1, P_3\} \\ \{P_1, P_4\} \\ \{P_2, P_3\} \\ \{P_2, P_4\} \end{Bmatrix}。 \quad (3)$$

根据上面的定义,可以得到如下的定理。

定理 1 设 $P_i (i=1,2,\dots,m_1), Q_i (i=1,2,\dots,m_2), Z_i (i=1,2,\dots,m_n)$ 是 Petri 网中的基本库所,则:

$$P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow \dots \rightarrow P_{m_1} = \{P_1, P_2, \dots, P_{m_1}\}; \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow \dots \rightarrow P_{m_1} = \begin{Bmatrix} \{P_1, P_3, P_4, \dots, P_{m_1}\} \\ \{P_2, P_3, P_4, \dots, P_{m_1}\} \end{Bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{m_1} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{m_2} \end{Bmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_{m_n} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_1, Q_1, \dots, Z_1\} \\ \{P_1, Q_1, \dots, Z_{m_n}\} \\ \vdots \\ \{P_{m_1}, Q_{m_2}, \dots, Z_{m_n}\} \end{Bmatrix}。 \quad (6)$$

证明 关于(4)式,根据定义 7,有

$$P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow \dots \rightarrow P_{m_1} = \{P_1, P_2\} \rightarrow P_3 \dots \rightarrow P_{m_1} = \{P_1, P_2, P_3\} \rightarrow \dots \rightarrow P_{m_1} = \dots = \{P_1, P_2, \dots, P_{m_1}\}。$$

关于(5)式,根据定义 7 和定理 1 的已知条件,有

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow \dots \rightarrow P_{m_1} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \{P_3, P_4, \dots, P_{m_1}\} = \begin{Bmatrix} \{P_1, P_3, P_4, \dots, P_{m_1}\} \\ \{P_2, P_3, P_4, \dots, P_{m_1}\} \end{Bmatrix}。$$

关于(6)式,根据定义 7,有

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{m_1} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{m_2} \end{Bmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_{m_n} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_1, Q_1\} \\ \vdots \\ \{P_{m_1}, Q_{m_2}\} \end{Bmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_{m_n} \end{Bmatrix} = \dots = \begin{Bmatrix} \{P_1, Q_1, \dots, Z_1\} \\ \vdots \\ \{P_1, Q_1, \dots, Z_{m_n}\} \\ \vdots \\ \{P_{m_1}, Q_{m_2}, \dots, Z_{m_n}\} \end{Bmatrix}。 \quad \text{证毕}$$

由定义 7 知,基本库所作运算的结果个数为 $m \times n$,其中 m, n 分别为“ $\rightarrow$ ”前、后的“ $\{$ ”的行数。需要特别说明的是,当“ $\{$ ”只有 1 行时,常常把“ $\{$ ”省去。比如:(1)式的结果个数为 $1 \times 1 = 1$, (2)式的结果个数为 $2 \times 1 = 2$, (3)式的结果个数为 $2 \times 2 = 4$ 。同理,定理 1 中的每一个公式的结果个数分别为 $\underbrace{1 \times 1 \times \dots \times 1}_{m_1 \text{ 个}} = 1, \underbrace{2 \times 1 \times \dots \times 1}_{m_1 - 2 \text{ 个}} = 2,$

$$m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n = m_1 m_2 \dots m_n。$$

在用因果图进行故障诊断的过程中,有时会遇到求有重复事件因果图的最小割集。为了方便求有重复事件的因果图最小割集,给出如下定理。

定理 2 设 P_1, P_2, P_3 是 3 个基本库所,设 P_2 为重复事件,则 $\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_1, p_3\} \\ \{p_2\} \end{Bmatrix}$ 。

证明 由定义 7 得 $\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_1, p_2\} \\ \{p_1, p_3\} \\ \{p_2, p_2\} \\ \{p_2, p_3\} \end{Bmatrix}$ 。

因为 P_1 与 P_2, P_2 与 P_3 是逻辑或的关系,而 P_2 与 P_2 既是逻辑或的关系又是逻辑与的关系,所以 $\{p_1, p_2\} = \emptyset, \{p_2, p_3\} = \emptyset$ 且 $\{p_2, p_2\} = \{p_2\}$ 。因此 $\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{p_1, p_3\} \\ \{p_2\} \end{Bmatrix}$ 。证毕

2 基于 Petri 网求解因果图最小割集的算法

根据以上对 Petri 网的分析,求解因果图最小割集的具体步骤如下。

步骤 1:根据相关统计资料,分析导致事故发生的关键要素,画出因果图。

步骤 2:将因果图转换成 Petri 网模型。

步骤 3:从目标库所起,逐层向下,从左到右对每一个库所进行遍历。1) 若库所前集非空,即在这个库所中有输入,则在“{”里从上到下依次记下前集里每个变迁的输入库所序号,即每一个变迁的输入库所各占 1 行;若前集里只有 1 个变迁,可省略“{”不写。对于前集里变迁的输入库所:若输入库所为多个,那么从左到右依次记下这几个库所的序号,并用“→”隔开;若输入库所为单个,那么直接记下这个库所的序号。这样就可以构造出一个关于库所的体系。2) 若库所的前集为空,即这个库所没有输入,则保持它的序号在体系中的位置不变。

步骤 4:如果体系中有中间库所,则转步骤 3;否则,转步骤 5。

步骤 5:当体系中的中间库所都被替换成基本库所之后,根据定义 7、定理 1 和定理 2 整理体系。此时,将体系的每一行加上“{”就成为一个最小割集。需要说明的是,为了保持结构上的一致,本研究规定 $\{\{\}\} = \{\}$ 。

3 实例分析

以某电站内的高压安全注射系统为例^[16],应用该算法求解因果图的最小割集。该系统的因果图模型如图 4 所示, Petri 网模型如图 5 所示。具体算法步骤如下。

步骤 1,步骤 2 均已完成。

步骤 3:从目标库所 T 开始进行遍历。此时目标库所 T 的前集非空,即 T 有输入,则在“{”里从上到下记下前集里变迁的输入库所序号,即每一个变迁得输入库所各占“{”里的 1 行,记为 $\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix}$ 。

步骤 4:根据前面的步骤构造出了一个关于库所的体系,但因为体系中含有中间库所,所以转至步骤 3。对中间库所 X_1 来说,它的前集非空,且前集里只有一个多输入库所的变迁,则将其的输入库所序号记 $X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow$

X_5 。对中间库所 X_2 来说,它的前集非空,则将其的输入库所序号记为 $\begin{Bmatrix} X_6 \\ X_7 \end{Bmatrix}$ 。此时体系变成 $\begin{Bmatrix} X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{Bmatrix}$ 。

但体系中仍然有中间库所,故一直用步骤 3,直至将所有中间库所都换成基本库所。具体的转换过程如图 6 所示。

步骤 5:此时构成了一个关于基本库所的体系,由基本库所的运算法则知,因果图的最小割集有 $85(2 \times 2 \times 2 + 6 \times 2 + 1 + 4 \times 4 \times 2 \times 2 = 85)$ 个。其中 2 阶和 3 阶的结果分别为 $\{B_7, B_8\}, \{B_8, B_{23}\}, \{B_8, B_{24}\}, \{B_8, B_{25}\}, \{B_8, B_{16}\}$ 和 $\{B_1, B_3, B_5\}, \{B_1, B_3, B_6\}, \{B_1, B_4, B_5\}, \{B_2, B_3, B_5\}, \{B_2, B_3, B_6\}, \{B_2, B_4, B_5\}, \{B_2, B_4, B_6\}, \{B_7, B_{12}, B_{13}\}, \{B_8, B_{14}, B_{15}\}, \{B_{12}, B_{13}, B_{23}\}, \{B_{12}, B_{13}, B_{24}\}, \{B_{12}, B_{13}, B_{25}\}, \{B_{12}, B_{13}, B_{16}\}, \{B_9, B_{10}, B_{11}\}$ 。

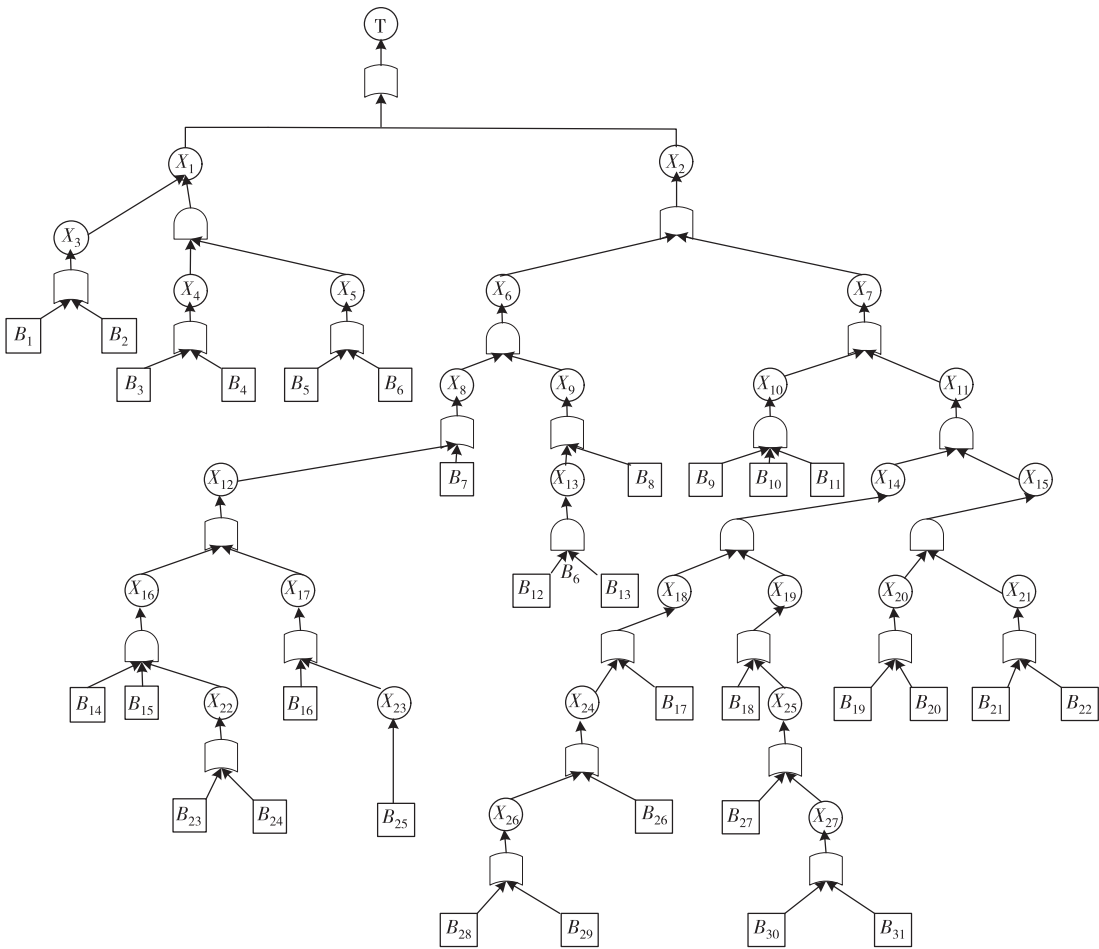


图 4 系统的因果图模型

Fig. 4 System causality model

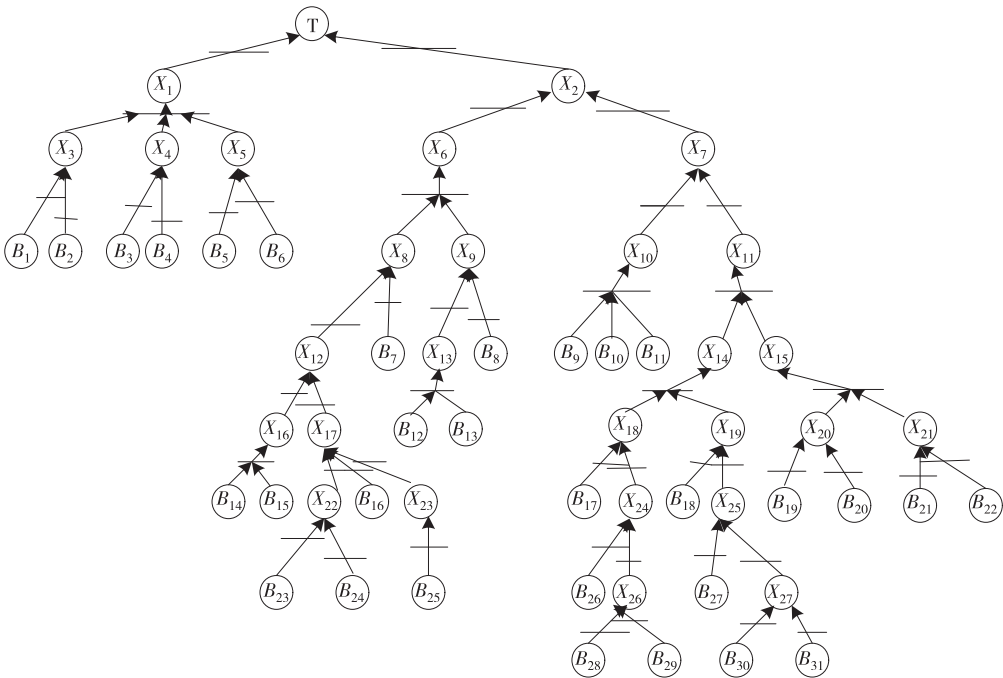


图 5 因果图对应的 Petri 网

Fig. 5 Correspondence Petri net

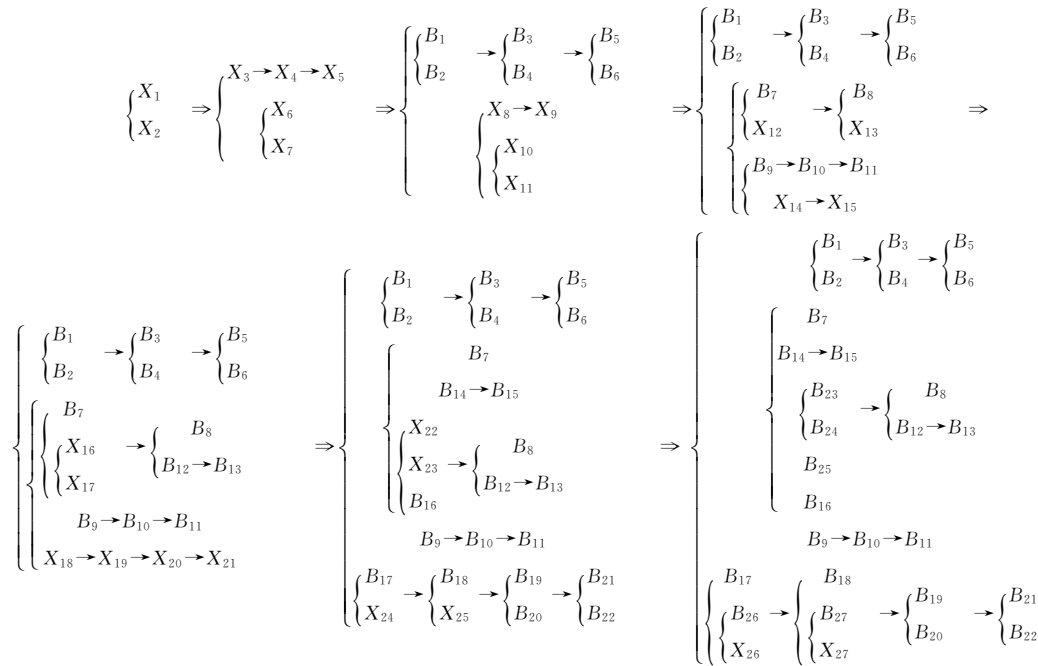


图 6 体系的具体转换过程

Fig. 6 The specific conversion process of the system

根据此算法求出来的最小割集与文献[16]相同,因此此算法是有效的。

4 结束语

本研究以 Petri 网作为工具,将因果图的节点事件转换成 Petri 网的库所,将因果图的逻辑关系转换成 Petri 网的逻辑关系,实现了因果图向 Petri 网形式上的转化。再利用 Petri 网既有静态性又有动态性这一特点,构造了一个求解因果图最小割集的新算法。该算法省略了求因果图节点事件的一阶割集和最终割集这两步,大大减少了用因果图进行故障诊断的时间,提供了一种简单有效的方法。然而,本研究只讨论了对于单原因故障的因果图最小割集求解,对于多故障原因的情形,这种算法不一定满足。

参考文献:

- [1] 梁新元,张勤. 基于因果图故障模式重要度的分析方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(8):75-78.
LIANG X Y, ZHANG Q. Analysis method based on the importance of causality diagram[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2004, 27(8): 75-78.
- [2] 梁帆,王洪春. 利用改进的二元决策图的因果图推理[J]. 计算机工程与应用,2015,51(18):229-232.
LIANG F, WANG H C. Using an improved binary decision diagram of causal reasoning[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(18): 229-232.
- [3] 刘绍红,王洪春. 一种基于改进的多值因果图的近似推理[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(4):127-131.
LIU S H, WANG H C. Approximate reasoning based on improved multi valued causal graph [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(4): 127-131.
- [4] 梁新元,张勤. 因果图在故障分析中的应用[J]. 计算机工程与应用,2004,40(19):185-188.
LIANG X Y, ZHANG Q. Application of causality diagram to fault analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(19): 185-188.
- [5] 梁帆,王洪春. 基于因果图基本事件矩的研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(3):119-123.
LAING F, WANG H C. Research on basic event moments based on causality diagram[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(3): 119-123.
- [6] 张永发,蔡琦,赵新文. 应用 Petri 网模型改进最小割集的算法[J]. 核动力工程,2007,28(5):63-68.
ZHANG Y F, CAI Q, ZHAO X W. Improved algorithm of minimum cut sets by using petri net model[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(5): 63-68.
- [7] 王洪春,张勤. 基于因果图的一种近似推理算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(8):96-99.
WANG H C, ZHANG Q. An approximate reasoning algo-

- rithm based on causality diagram[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2004, 27(8): 96-99.
- [8] ZHANG Q. Probabilistic reasoning based on dynamic causality tree/diagrams[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 46(3): 209-220.
- [9] 梁新元. 复杂因果图并行推理算法研究[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(4): 483-493.
- LIANG X Y. Parallel reasoning algorithm in complex cause and effect diagram[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2014, 8(4): 483-493.
- [10] 彭霜霜, 王洪春. 基于因果图最小割集和最小径集在故障系统中的诊断[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2015, 15(3): 60-63.
- PENG S S, WANG H C. Diagnosis of minimal cut sets and minimal path sets based on causal graph in fault system[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2015, 15(3): 60-63.
- [11] 臧希年, 申世飞. 核电站系统与设备[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- ZANG X N, SHEN S F. Nuclear power plant systems and equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [12] 武滢, 谢里阳, 李进东. 应用 Petri 网的关联矩阵求最小割集的新方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(9): 1044-1047.
- WU Y, XIE L Y, LI J D. Application of Petri net incidence matrix method for minimum cut sets new[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(9): 1044-1047.
- [13] 袁崇义. Petri 网原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 18.
- YUAN C Y. Petri net theory and its application[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2005: 18.
- [14] 樊兴华, 仲昕, 张勤, 等. 因果图推理的一种新方法[J]. 计算学, 2001, 28(11): 48-52.
- FAN X H, ZHONG X, ZHANG Q. A new method of causality diagram reasoning [J]. Computer Mathematics, 2001, 28(11): 48-52.
- [15] 梁新元, 王洪春, 石庆喜, 等. 因果图向故障树转换的研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 67-69.
- LIANG X Y, WANG H C, SHI Q X, et al. Study on conversion of causality diagram to fault[J]. Computer Simulation, 2005, 22 (12): 67-69.
- [16] 秦兴秋, 邢昌凤. 一种基于 Petri 网模型求解故障树最小割集的算法[J]. 计算机应用, 2004, 24(S1): 299-306.
- QIN X Q, XING C F. An algorithm for solving the minimum cut set of fault tree based on Petri net model[J]. Computer Application, 2004, 24(S1): 299-306.

An Algorithm for Solving Minimal Cut Set of Causality Diagram by Petri Net Model

ZOU Min, WANG Hongchun

(School of Mathematics Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] In order to quickly and efficiently find the minimum cut set of the causality diagram. [Methods] A new algorithm for finding the minimum cut sets of causality diagram is presented by using the characteristics of Petri nets. This algorithm omits the first-order and the final cut-sets of the nodes. Greatly reducing the causality diagram for fault diagnosis time. [Findings] An example is given to demonstrate the effectiveness of the solution. [Conclusions] Using this algorithm can quickly and efficiently obtain the minimal cut sets and a qualitative analysis of systems.

Keywords: causality diagram; fault analysis; minimum cut set; Petri net

(责任编辑 方 兴)