

自由选择工作流网的可靠完备化简规则集*

张曼¹, 段振华^{1,2}, 王小兵¹

¹(西安电子科技大学 计算理论与技术研究所, 陕西 西安 710071)

²(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

通讯作者: 段振华, E-mail: zhhduan@mail.xidian.edu.cn

摘要: 流程化简技术是一种重要的商业流程模型分析方法. 已有的非形式化化简方法因缺乏理论基础而无法保证完备性. 基于 Petri 网的化简方法应用范围不针对流程模型因而不能保证可靠性. 提出了针对自由选择工作流网的一个可靠完备化简规则集, 可靠性保证化简过程中这类模型的行为正确性被保持, 完备性保证任意一个正确的此类工作流网最终都能被化简为最简形式. 基于化简规则集给出可靠完备的合成规则集, 用于流程模型的设计与精化.

关键词: 自由选择工作流网; 流程化简/合成; 化简规则的可靠性; 化简规则集的完备性

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

中文引用格式: 张曼, 段振华, 王小兵. 自由选择工作流网的可靠完备化简规则集. 软件学报, 2013, 24(5): 993-1005. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4261.htm>

英文引用格式: Zhang M, Duan ZH, Wang XB. Sound and complete set of reduction rules of free choice WF-nets. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(5): 993-1005 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4261.htm>

Sound and Complete Set of Reduction Rules of Free Choice WF-Nets

ZHANG Man¹, DUAN Zhen-Hua^{1,2}, WANG Xiao-Bing¹

¹(Institute of Computing Theory and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

²(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Corresponding author: DUAN Zhen-Hua, E-mail: zhhduan@mail.xidian.edu.cn

Abstract: The reduction technique is an important analysis method for business process models. Existing informal reduction methods suffer from the infirm completeness because of their lack of formal fundamental. Also, Petri-net-based reduction methods available cannot guarantee the soundness due to their unspecific applications for process models. A sound and complete set of reduction rules is presented for free choice WF-nets. The soundness determines that the behavioral correctness of such a model is preserved during the reduction, and the completeness ensures that every such a correct WF-net can be finally reduced to its simplest form. Based on this, a sound and complete set of synthesis rules are given, which facilitates the design and refinement of process models.

Key words: free choice WF-net; process reduction/synthesis; soundness of a reduction rule; completeness of a set of reduction rules

商业流程模型的控制流结构分析对保证流程模型及其相关应用的正确性至关重要. 流程化简作为一种重要的控制流模型分析方法, 能够缓解状态空间分析所面临的状态爆炸问题, 在商业流程管理及工作流领域已取得广泛关注. 流程模型的化简通常由定义一组化简规则开始, 一个模型按照化简规则转换成另一个相对简单的模型. 对于一类模型, 若一条规则能够保持此类模型的特定属性, 则称它是可靠的; 若一个规则集能够将其中任意一个最终化简为最简形式, 就说它们针对这类模型是完备的. 一个可靠而完备的化简规则集为一类模型提供专属的化简方法, 所有且仅有这类模型能够应用这个规则集通过化简进行分析. 合成作为化简的逆操作, 根据预

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2010CB328102); 国家自然科学基金(61133001, 61272117, 61272118)

收稿时间: 2011-10-17; 修改时间: 2012-01-16, 2012-04-18; 定稿时间: 2012-05-25

先定义的合成规则由简单系统生成较复杂的系统,在流程建模过程中能够指导模型的设计与精化.类似地,合成规则保持一类网系统特征的属性称为可靠性,合成规则集保证这类网系统中任意一个能够由最简形式逐步生成的属性称为完备性.

工作流网(workflow net,简称 WF-net)^[1]是主流的商业流程形式化模型之一.合理性是对工作流网行为正确性的规定,自由选择性^[2]在工作流网建模中被认为是一种应尽量满足的特性.然而合理的自由选择工作流网这种重要的形式化流程模型缺乏可靠而完备的化简规则集.针对这一现状,本文提出一个自由选择工作流网的化简规则集,可靠性使每个规则都能保持此类模型的合理性,完备性保证任意一个合理的自由选择工作流网都能被化简,并对规则集的可靠性与完备性给出基于 Petri 网理论的严格形式化证明.最后,基于化简规则集给出可靠而完备的合成规则集,作为流程设计与精化的可参考原则,为自由选择工作流网化简与合成提供理论支持.

1 相关工作

已有的流程化简方法按照模型主要分为两类.一类以基于图形的流程模型为对象,采用最广泛的是工作流图.这类方法通常应用图形化简技术降低模型的复杂度.Sadiq 和 Orłowska 最早应用化简技术检测无循环工作流图中的死锁与无同步两类结构冲突^[3],并定义了一组化简规则.文献[3]中规则集的完备性后来被 Lin 等人推翻^[4],他们提出 3 条新规则以代替文献[3]中的交叠(overlapped)规则,并证明了新规则集的完备性.Li 等人也发现了文献[3]中的不完备性,它们提出在工作流图中寻找可折叠对并将其融合的 4 条化简规则,证明了规则集对于无冲突的工作流图是完备的^[5].以上研究中的完备性证明因为缺乏理论基础都不够严格.Touré 等人在文献[3]的基础上提出 3 条新的图形化简规则^[6],其中的规则集要与图遍历结合才能验证工作流图,因此也是不完备的.

另一类化简方法以基于 Petri 网定义的流程模型为对象,采用最广泛的模型是工作流网.Aalst 通过证明工作流网的合理性等价于其短路网系统的活性和有界性^[1],使普通 Petri 网的化简技术能够应用于工作流网.然而,普通 Petri 网化简规则应用于工作流网时面临可靠性或完备性缺失问题.首先,原本就不具备完备性的规则集对工作流网的完备性无从得证.Murata 提出了普通 Petri 网的 6 条化简规则^[7],因其能够保持 Petri 网的活性与有界性,被 Verbeek 应用于工作流网^[8].此规则集对于工作流网显然不完备.其次,普通 Petri 网的化简规则在针对工作流网时可能失去可靠性.Esparza 在文献[9]中针对活的和有界的自由选择(live and bounded free choice,简称 LBFC)网系统提出了可靠而完备的化简规则集,被 Aalst 等人用于化简工作流网的短路网系统以验证工作流图是否包含冲突^[10].规则集的完备性得到保持,然而某条规则可能因破坏短路网系统的结构而失去对工作流网的可靠性.李建强等人将文献[9]中的规则集简化后直接移植到自由选择工作流网上^[11],其中第 2 条规则由于缺乏必要的应用条件,会将不合理的工作流网化简为合理的,因此是不可靠的.专门以工作流网为对象定制的化简规则仍然缺乏可靠性或完备性.Aalst 在文献[1]中基于工作流的基本控制结构提出了 8 条可靠转换规则.胡乃静等人在文献[12]中提出了两条封闭子网的化简规则并证明了其可靠性.而文献[1]和文献[12]中的规则集都不是完备的.

除了以工作流网为化简对象的研究之外,周建涛等人为添加语义的流程模型 3DWFN 定义了 14 条化简规则以验证语义冲突^[13],其中,规则 R5 与 R6 对交叠模式的处理不够完善而影响其完备性.Huang 等人提出工作流逻辑模型的 12 条可靠化简规则^[14],用于缩减模型的规模以配合可达图分析,因此规则集也是不完备的.其他以各种高级 Petri 网及工作流网变种为模型的化简方法中,更多考虑的是对时间及资源等相关信息的处理,如文献[15];或是对具有更强表达能力的流程模型的化简,如文献[16].在这些工作中,完备性不再是首要考虑的问题.

在合成方面,讨论流程模型合成的方法大多着眼于通过节点替换精化工作流网^[17-19],而基于 Petri 网的合成规则同样存在缺少可靠性或完备性的不足.文献[1]中提出的 8 条可靠转换规则可作为工作流网合成的指导原则.文献[20]在 LBFC 网系统的合成规则上增加限制条件,以保持短路网系统的结构特征.两者的合成规则集都未考虑完备性.

2 基础知识

2.1 自由选择 workflow 网

workflow 网是主流的形式化流程模型之一,用于定义一个商业流程的控制流结构.合理性是对 workflow 网行为属性的规定,要求网在特定初始标识下的每一次执行都以一种正确的方式完成,并且不存在死变迁.判断一个 workflow 网是否是合理的,可以通过判断它的短路网系统的活性与有界性进行.短路网系统通过在工作流网中增加一个额外的变迁 t^* 连接漏库所与源库所,并在源库所中添加一个托肯得到.关于 workflow 网更详细的内容,可参阅文献[1].

定义 2.1(workflow 网). Petri 网 $N=(P,T,F)$ 是 workflow 网当且仅当各有一个源库所 $i \in P$ 和一个漏库所 $o \in P$ 使得 $\bullet i = \emptyset, o \bullet = \emptyset$, 且任意节点 $x \in P \cup T$ 都在从 i 到 o 的路径上.

定义 2.2(短路网). workflow 网 $N=(P,T,F)$ 的短路网定义为 $\bar{N}=(P,\bar{T},\bar{F})$, 其中,

$$\bar{T} = T \cup \{t^*\}, \bar{F} = F \cup \{(o,t^*), (t^*,i)\},$$

称 (\bar{N},i) 为 N 的短路网系统, t^* 为短路变迁.

结论 2.1^[1]. 一个 workflow 网 N 是合理的当且仅当它的短路网系统 (\bar{N},i) 是活的和有界的.

自由选择(free choice)网是一类重要的 Petri 网,它规定处于冲突中的变迁要有相同的输入库所.通过限制选择与并发间的相互作用,自由选择网在建模能力与可分析能力之间取得良好的折中.关于自由选择网更详细的内容可参见文献[2].

定义 2.3(自由选择网). Petri 网 $N=(P,T,F)$ 是自由选择网当且仅当对于任意两个变迁 $t_1, t_2 \in T$, 如果 $\bullet t_1 \cap \bullet t_2 \neq \emptyset$, 则有 $\bullet t_1 = \bullet t_2$.

如前所述,自由选择性在 workflow 网建模中是一种应尽量满足的特性:首先,冲突与并发混合造成的混惑通常使一个 Petri 网不满足自由选择性,而这种结构是造成流程模型异常行为的潜在源;其次,以自由选择网为基础的工作流模型被大多数商业流程管理系统支持.容易证明,一个 workflow 网 N 是自由选择的,当且仅当其短路网 \bar{N} 是自由选择的.由于合理性是对 workflow 网行为正确性的基本要求,因此下文中以合理的自由选择 workflow 网为讨论对象.

定义 2.4(SFCW 网). 满足自由选择性以及合理性的 workflow 网称为合理的自由选择 workflow 网,简称为 SFCW 网(sound free choice WF-net).

2.2 LBFC 网系统及 WFFC 网的化简规则集

首先介绍规则集的可靠及完备性概念.对于一类网系统 \mathcal{C} , 一个规则保持 \mathcal{C} 特性的能力由规则的可靠性描述,而一个规则集合处理 \mathcal{C} 中任意一个网系统的能力由规则集的完备性描述.详细定义请参考文献[9]第 3 节中对化简规则的定义.

定义 2.5(化简规则的可靠性和完备性). (1) 化简规则的可靠性:网系统 Σ 经规则 R 化简为 Σ' 记为 $(\Sigma, \Sigma') \in R$, R 对于一类网系统 \mathcal{C} 是可靠的当且仅当 $((\Sigma, \Sigma') \in R \wedge \Sigma \in \mathcal{C}) \Rightarrow \Sigma' \in \mathcal{C}$; R 对于 \mathcal{C} 是强可靠的当且仅当 $(\Sigma, \Sigma') \in R \Rightarrow (\Sigma' \in \mathcal{C} \Leftrightarrow \Sigma \in \mathcal{C})$; (2) 原子网系统: \mathcal{C} 的原子网系统表示属于 \mathcal{C} 的结构最简单的网系统; (3) 化简规则集的完备性:若 \mathcal{C} 中任意一个网系统 Σ 都能按照一个化简规则集化简为 \mathcal{C} 的一个原子网系统,则这个规则集对于 \mathcal{C} 是完备的.

一个网系统 (N, M_0) 由有向网 N 及初始标识 M_0 组成, N 称为网系统的底层网.以上对化简规则的相关定义对有向网同样适用.下面介绍本文研究工作的基础——LBFC 网系统及其底层网 WFFC 网的化简规则集.首先给出它们的定义:

定义 2.6(LBFC 网系统). 若一个网系统满足活性与有界性,且它的底层网满足自由选择性,则称其为活的和有界的自由选择(live and bounded free choice, 简称 LBFC)网系统.

定义 2.7(WFFC 网). 对于 Petri 网 N , 若存在一个初始标识 M_0 使得 (N, M_0) 是 LBFC 网系统, 则称网 N 是形式良好的自由选择(well-formed free choice, 简称 WFFC)网(参考文献[2]中的定义 2.23).

关于 WFFC 网,有若干重要特性:

结论 2.2(WFFC 网的性质). (1) 所有 WFFC 网都是强连通的(参考文献[2]中的定理 2.25);(2) N 是 WFFC 网, 则网系统 (N, M_0) 是 LBFC 的, 当且仅当 N 的每个 S_组件(Petri 网 N 的子网 N' 是 N 的一个 S_组件, 当且仅当 N' 是强连通的 S_网, 且 N' 中每个库所的前驱与后继变迁都包含在 N' 中在初始标识 M_0 下至少有 1 个库所含有托肯(参见文献[2]中的定理 5.8).

文献[2]中给出 WFFC 网的一个可靠完备化简规则集 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$. ϕ_A 称为抽象规则, 它是化简本地动作和状态的操作; 而 ϕ_S 和 ϕ_T 是线性相关规则, 它们分别从网中删除一个特定库所和变迁. 图 1 给出 ϕ_A 的图形化描述, 分别称 p 与 t 为 ϕ_A 的目标库所与变迁. ϕ_A 可看作通过合并变迁 t 与 $\bullet p$ 隐藏本地动作 t , 或通过合并库所 p 与 $t \bullet$ 隐藏本地状态 p 的化简操作. 在给出 3 个规则的形式化定义之前, 需要介绍非负线性相关库所与变迁的概念.

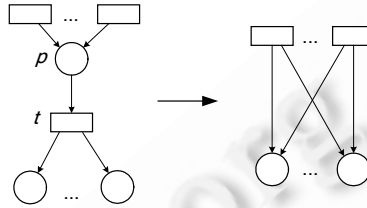


Fig.1 Abstraction rule ϕ_A
图 1 抽象规则 ϕ_A

定义 2.8(非负线性相关库所和变迁). 在 Petri 网 $N=(P, T, F)$ 中, 若存在向量 $A:P \rightarrow Q$ (有理数集合) 使得 $p \in P$ 在 N 的关联矩阵 C 中的行向量 $r(p)$ 满足 $r(p)=A \cdot C$ 且 $A(p)=0, A \geq 0$, 则称 p 是 N 的非负线性相关库所; 若存在向量 $A:T \rightarrow Q$ 使得 $t \in T$ 在 C 中的列向量 $l(t)$ 满足 $l(t)=C \cdot A$ 且 $A(t)=0, A \geq 0$, 则称 t 是 N 的非负线性相关变迁(参见文献[2]中的定义 7.2).

表 1 给出了 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 的形式化定义(分别参见文献[2]中第 7.2 节的规则 1~规则 3), 每条规则都由应用条件和网结构的改变两部分组成.

Table 1 Formal definition of ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T
表 1 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 的形式化定义

	应用条件	改变
ϕ_A	$\exists p \in P \wedge \exists t \in T$ 使得: (1) $\bullet p \neq \emptyset, p^* = \{t\}$; (2) $t^* \neq \emptyset, t = \{p\}$; (3) $(\bullet p \times t^*) \cap F = \emptyset$.	(1) $P' = P \setminus \{p\}$; (2) $T' = T \setminus \{t\}$; (3) $F' = (F \cap ((P' \times F') \cup (F' \times P'))) \cup (\bullet p \cup t^*)$.
ϕ_S	(1) N 包含至少两个库所; (2) N 包含一个非负线性相关库所 p ; (3) $\bullet p \cup p^* \neq \emptyset$.	$N' = N \setminus \{p\}$, 即 N' 是由 N 中除 p 外的所有节点生成的 N 的子网.
ϕ_T	(1) N 包含至少两个变迁; (2) N 包含一个非负线性相关变迁 t ; (3) $\bullet t \cup t^* \neq \emptyset$.	$N' = N \setminus \{t\}$, 即 N' 是由 N 中除 t 外的所有节点生成的 N 的子网.

定义 2.9(WFFC 网的 3 个化简规则). 令 N 与 N' 是自由选择网, 其中 $N=(P, T, F), N'=(P', T', F')$, 当 N 满足表 1 中某条规则的应用条件时, 可以将其化简为 N' .

结论 2.3(WFFC 网化简规则强可靠性与规则集完备性定理).

- (1) ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 对于 WFFC 网都是强可靠的(分别参见文献[2]中的定理 7.1、定理 7.3、定理 7.4);
- (2) 规则集 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 对于 WFFC 网是完备的, 任意一个 WFFC 网都能由 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 化简为与 $(\{s\}, \{t\}, \{(s, t), (t, s)\})$ 同构的网, 即 WFFC 的原子网(参考文献[2]中的定理 7.13).

根据 WFFC 网与 LBFC 网系统的关系, WFFC 网的强可靠规则应用于 LBFC 网系统时, 只保持了底层网是 WFFC 网的特性, 因此需要更多的约束条件以保持结论 2.2(2) 中对于初始标识的要求, 才能满足对 LBFC 网系统

的强可靠性.文献[9]中给出了 LBFC 网系统的化简规则 R_1, R_2, R_3, R_4 .其定义与 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 相比,在应用条件与网系统的改变处都要增加对标识的处理,详细定义可参见文献[9].

当只关注底层网的变化时,由于 $R_3(R_4)$ 是删除非负线性相关库所(变迁)的动作, R_3 与 $\phi_S(R_4$ 与 $\phi_T)$ 是相对应的规则.考虑对初始标识的约束, R_3 要求待化简网系统的每个非空虹吸在初始标识下都被标记, R_4 无特殊要求;在网系统标识的改变中, R_3 和 R_4 都保留了原初始标识的托肯分布状况. R_3 及 R_4 对 LBFC 网系统都是强可靠的(参见文献[9]中的定理 4.9、定理 4.10),因此,它们对于底层的 WFFC 网也是强可靠的.

3 SFCW 网的可靠完备化简规则集

首先,通过改造 WFFC 网的化简规则 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 得到 LBFC 短路网系统的 3 个规则 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$,并证明其强可靠性;再根据工作流网与短路网系统的对应关系,在 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 的基础上定义 SFCW 网的化简规则 R_A, R_S, R_T .利用 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 的强可靠性证明 R_A, R_S, R_T 对于 SFCW 网的强可靠性;然后,通过建立 SFCW 网与 WFFC 网两者的规则集在各自任意模型上的可应用性间的联系,证明规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对 SFCW 网是完备的;最后,以一个工作流网为例说明化简规则在 SFCW 网上的应用.

3.1 WFFC 网的化简规则应用于 LBFC 短路网系统

为了得到 LBFC 短路网系统的强可靠化简规则,首先限制 WFFC 网化简规则 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 的应用,以保持短路网的结构特征,还要添加必要的应用条件,使其底层网在指定标识下是 LBFC 的特征被保持.一个 LBFC 短路网系统的底层网是 WFFC 短路网,当 WFFC 网的规则 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 可在其上应用时,根据短路网的定义,只要保留原网的源库所 i 、漏库所 o 和短路变迁 t^* (下文中源库所、漏库所及短路网变迁都默认分别用 i, o, t^* 表示), ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 对于 WFFC 短路网就是强可靠的.由于 LBFC 短路网系统的底层网要求必须在特定的初始标识 $M_0=i$ 下是 LBFC 的,因此,要从 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 出发得到 LBFC 短路网系统的强可靠化简规则,需要额外考虑如何保持 WFFC 短路网在 $M_0=i$ 下满足 LBFC 要求的特性.

下面在 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 的基础上给出 LBFC 短路网系统的化简规则 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$,每条规则的定义由对底层网的操作及标识相关的变化两部分组成.令 (\bar{N}, i) 是自由选择的短路网系统,经化简得到网系统 (\bar{N}', M'_0) .规则 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 对底层网 \bar{N} 的化简操作分别基于 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 定义,每条规则的应用条件通过改造原规则的应用条件获得.表 2 给出对原规则的具体改动.

Table 2 Modification on the application conditions of ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T by $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$
表 2 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 对 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 应用条件的改动

规则	增加的应用条件	省略的应用条件
ϕ'_A	目标库所不能是 i 和 o ,目标变迁不能是 t^* .	无
ϕ'_S	(1) 目标库所不能是 i 和 o ; (2) 对于目标库所 p ,存在一个使其满足非负线性相关库所定义的向量 $A:A(i)=0, A \neq 0$.	(1) N 包含至少 2 个库所; (2) $\bullet p \cup p^* \neq \emptyset$.
ϕ'_T	目标变迁 t 不能是 t^* .	(1) N 包含至少 2 个变迁; (2) $\bullet t \cup t^* \neq \emptyset$.

因为短路网系统一定包含至少 2 个库所和变迁,且无孤立节点,所以 ϕ'_S 和 ϕ'_T 分别省略 ϕ_S 和 ϕ_T 中与此相关的条件.转换所得底层网 \bar{N}' 也如 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 中定义.标识相关的变化定义为所有库所保持原系统的标识.由于 \bar{N}' 中源库所 i 得以保留,因此 $M'_0 = i$. 综上,化简所得网系统为 (\bar{N}', i) .下面证明 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 对 LBFC 短路网系统是强可靠的.首先,在受限的 ϕ_A 对 WFFC 短路网的强可靠性前提下,通过说明化简前后两个网的 S_组件集合间的一一对应关系,结合结论 2.2(2)证明 ϕ'_A 的强可靠性,如引理 3.1 所述.

引理 3.1. ϕ'_A 对于 LBFC 短路网系统是强可靠的.

证明:令 (\bar{N}, i) 是自由选择的短路网系统,因为目标库所不是 i 和 o ,化简所得的 (\bar{N}', i) 仍是短路网系统.由 ϕ_A 对 WFFC 网的强可靠性可知, \bar{N} 是 WFFC 短路网当且仅当 \bar{N}' 是 WFFC 短路网.令 ϕ_A 在 \bar{N} 中的目标库所 p ,目标变迁 t, p 以及 t^* 中某个库所 p_i 构成的子网为 N_i ,则 \bar{N} 的 S_组件分为两类:包含子网 N_i 和不含 N_i 的.在 \bar{N}' 中, N_i 被化简为由 $\bullet p$ 及 p_i 构成的子网 N'_i ,则 \bar{N}' 的 S_组件也分为两类:不含子网 N'_i 的,它们与 \bar{N}' 中不含 N_i 的 S_组件完

全相同;包含子网 N'_i 的,它们与 \bar{N}' 中包含子网 N_i 的 S _组件相比,库所集合中只缺少 p .因此, \bar{N} 的每个 S _组件都包含源库所 i 当且仅当 \bar{N}' 的每个 S _组件都包含 i .再由结论 2.2(2)可知, (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统当且仅当 (\bar{N}', i) 是 LBFC 短路网系统. \square

对 ϕ'_t 的强可靠性证明与 ϕ'_i 类似,通过证明对于删除非负线性相关变迁前后的两个短路网,它们的 S _组件集合间存在双射关系,说明 ϕ'_t 对短路网系统的 LBFC 特性的保持,如引理 3.2 所述.

引理 3.2. ϕ'_t 对于 LBFC 短路网系统是强可靠的.

证明:令 (\bar{N}, i) 是自由选择的短路网系统,由于 t^* 不是 ϕ'_t 的目标变迁,化简所得的网系统 (\bar{N}', i) 仍是短路网系统.由 ϕ'_t 对 WFFC 网的强可靠性可知, \bar{N} 是 WFFC 短路网当且仅当 \bar{N}' 是 WFFC 短路网.设 ϕ'_t 的目标变迁为 t ,下面证明 \bar{N} 与 \bar{N}' 的 S _组件之间存在一一对应关系:首先,对于 \bar{N} 的任意一个 S _组件 C ,若 C 不包含 t ,则它也是 \bar{N}' 的 S _组件;若 C 含有 t ,则由引理 2.2(1)可知, \bar{N} 满足强连通性当且仅当 \bar{N}' 是强连通的,再结合 S _组件的定义可知,从 C 中删除 t 既不会改变子网的连通性,也不影响它满足 S _网的定义,加上 t 本身就不是 \bar{N}' 的变迁,因此,从 C 中删除 t 所得的子网仍然是 \bar{N}' 的 S _组件.对于 \bar{N} 的任意一个不满足 S _组件定义的子网 C' ,若它不包含 t ,则它也不会是 \bar{N}' 的 S _组件;若 C' 含有 t ,则根据 S _组件的定义,不会通过删除 C' 中的变迁 t 得到 \bar{N}' 的 S _组件.综上, \bar{N} 的所有 S _组件都能映射到 \bar{N}' 的 S _组件上,而 \bar{N}' 的 S _组件只能通过 \bar{N} 的某个 S _组件得到,两个 S _组件集合间是双射关系.因此, \bar{N} 的每个 S _组件都包含源库所 i 当且仅当 \bar{N}' 的每个 S _组件都包含 i .再由结论 2.2(2)可知, (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统当且仅当 (\bar{N}', i) 是 LBFC 短路网系统. \square

ϕ'_s 的定义要特别考虑.若对 ϕ_s 中的非负线性相关库所不加限制,就会出现如图 2 所示的情况:在删除网 \bar{N} 的非负线性相关库所 p_3 后,不满足活性的短路网系统 (\bar{N}, i) 被化简为 LBFC 短路网系统 (\bar{N}', i) . ϕ_s 在结构更加受限的短路网系统上反而不适用,这是由于它定义在有向网而不是网系统上,它的强可靠性只能保持 WFFC 网的特性,对具体的初始标识不做要求.而 LBFC 短路网系统 (\bar{N}, i) 不仅要求底层网 \bar{N} 是 WFFC 网,而且要求短路网必须在指定的初始标识即 $M_0=i$ 下满足活性和有界性.由于 ϕ_s 不能对特定标识做出改动,可能造成某个 WFFC 短路网在 $M_0=i$ 下不满足活性和有界性要求.例如,图 2 中两个短路网系统的底层网都是 WFFC 网, (\bar{N}', i) 的初始标识 $M_0=i$ 能使网 \bar{N}' 满足活性和有界性,而网 \bar{N} 在 $M_0=i$ 下就不满足,只有在 p_3 中添加托肯才可满足.

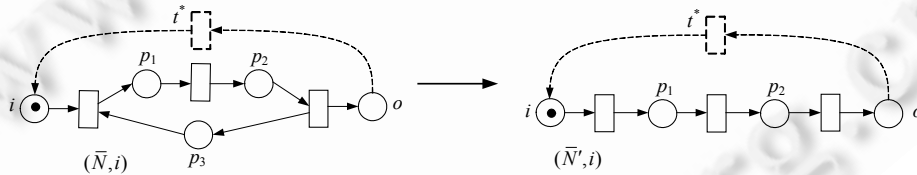


Fig.2 ϕ_s reduced a non-LBFC short-circuited system to a LBFC short-circuited system

图 2 ϕ_s 将一个非 LBFC 短路网系统化简为 LBFC 短路网系统

根据以上分析,对删除非负线性相关库所的化简规则提出更高的要求.因此, ϕ'_s 在 ϕ_s 上增加应用限制:要求待删除库所在满足非负线性相关定义的所有非负向量中存在一个非零向量 λ ,且它在源库所 i 处的分量值 $\lambda(i)$ 为 0.这样, ϕ'_s 在 (\bar{N}, i) 中的目标库所 p 只能与 1 个含 i 的库所集合形成 S _组件,由此保证 \bar{N} 的所有含 p 的 S _组件都包含 i .根据引理 2.2(2),特定标识 $M_0=i$ 下的活性和有界性被保持,从而避免图 2 中的情况.结合 ϕ_s 对 WFFC 网的强可靠性及化简前后两个底层网的 S _组件间的关系, ϕ'_s 对 LBFC 短路网系统的强可靠性得证,如引理 3.3 所述.

引理 3.3. ϕ'_s 对于 LBFC 短路网系统是强可靠的.

证明:令 (\bar{N}, i) 是自由选择的短路网系统,则化简所得的网系统 (\bar{N}', i) 仍是短路网系统.

1) (\Rightarrow)若 (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统,则根据结论 2.2(2), \bar{N} 的每个 S _不变量都包含源库所 i .根据 S _不变量的定义, \bar{N}' 的 S _不变量一定也是 \bar{N} 的 S _不变量,所以 \bar{N}' 的所有 S _不变量也都包含 i .由 ϕ_s 对 WFFC 网的强可靠性可知, \bar{N}' 是 WFFC 网,再根据结论 2.2(2)可知, (\bar{N}', i) 是 LBFC 短路网系统;

2) (\Leftarrow)若 (\bar{N}', i) 是 LBFC 短路网系统,由 ϕ_s 对 WFFC 网的强可靠性可知, \bar{N} 也是 WFFC 网.根据 WFFC 的 S _

组件覆盖定理(文献[2]中的定理 5.6), ϕ_S 的目标库所 p 一定包含在 \bar{N} 的一个 S_- 组件中,不妨设为 S_1 ,令 I 是由 S_1 导出的非负 S_- 不变量(文献[2]中的定理 5.7), C 是 \bar{N} 的邻接矩阵,则有 $I \cdot C=0, I(p)=1$. 令 \bar{N}' 的邻接矩阵为 C' ,则有:

$$C = \begin{pmatrix} C' \\ r(p) \end{pmatrix}, I \cdot C = (I' I(p)) \cdot \begin{pmatrix} C' \\ r(p) \end{pmatrix} = I' C' + A \cdot C = I' C' + (A' \cdot 0) \cdot \begin{pmatrix} C' \\ r(p) \end{pmatrix} = (I' + A') \cdot C' = I'_1 \cdot C' = 0.$$

得到 \bar{N}' 的 S_- 不变量 I'_1 ,由 $A \geq 0, A \neq 0$ 可知, $I'_1 \geq 0, I'_1 \neq 0$,则有 $I'_1 \cdot M_0 = A'(i) + I'(i) > 0$ (文献[2]中的定理 2.30). 已知 $A'(i)=A(i)=0$,则 $I'(i)=I(i)>0$,即 S_1 一定包含源库所 i .另外, \bar{N} 中不含 p 的 S_- 组件因为同时也是 \bar{N}' 的 S_- 组件而一定含 i ,所以 \bar{N} 中所有 S_- 组件都包含 i .再根据结论 2.2(2)可知, (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统. \square

化简规则 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 在应用于自由选择短路网系统时,都不会造成 i, o 及 t^* 上流关系的变化,加上初始标识变化的特殊性, $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 对短路网系统造成的改变能够以工作流网的结构改变来表示,因此,应用于短路网系统的规则 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 能够移植到工作流网上.下面以 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 为基础来定义 SFCW 网的化简规则.

3.2 SFCW网的化简规则集及可靠性

定义 3.1(SFCW 网的化简规则集). 令 $N=(P, T, F)$ 是自由选择工作流网, \bar{N} 是其短路网, N 经过表 3 中定义的规则化简为网 $N'=(P', T', F')$.

Table 3 Definition of the reduction rules of SFCW nets

表 3 SFCW 网化简规则的定义

	应用条件	改变
R_A	$\exists p \in P \wedge \exists t \in T$ 使得: (1) $p \neq \emptyset, p^* = \{t\}$; (2) $t \neq \emptyset, t^* = \{p\}$; (3) $(p \times t^*) \cap F = \emptyset$.	(1) $P' = P \setminus \{p\}$; (2) $T' = T \setminus \{t\}$; (3) $F' = (F \cap ((P' \times F') \cup (F' \times P'))) \cup (p \cup t^*)$.
R_S	N 包含一个非负线性相关库所 p , 且存在一个使 p 满足非负线性相关库所定义的向量 $A: A(i)=0, A \neq 0$.	$N' = N \setminus \{p\}$
R_T	\bar{N} 包含一个非负线性相关变迁 t .	$N' = N \setminus \{t\}$

由 R_A 及 R_T 的定义容易得知, R_A, R_T 分别在自由选择工作流网 N 上可以应用,当且仅当短路网系统 (\bar{N}, i) 分别满足 ϕ'_A, ϕ'_T 的应用条件. R_S 将待删除的非负线性相关库所从定义在短路网 \bar{N} 上改为直接定义在工作流网 N 上,这是由于 N 与 \bar{N} 的非负线性相关库所间存在一一对应的关系,如引理 3.4 所述.

引理 3.4. 若 $M_1=o$ 是自由选择工作流网 N 在 $M_0=i$ 下的可达标识,则向量 A 使 N 中库所 p 满足非负线性相关库所的定义,当且仅当 A 使 p 在短路网 \bar{N} 中是非负线性相关库所.

证明:令 C, C' 分别是网 N 和 \bar{N} 的邻接矩阵,则有 $C'=(C \ l(t^*)), l(t^*)$ 是 t^* 在 C' 中的列向量,它在源库所 i 和漏库所 o 处的分量分别是 1 和 -1,在其余库所处分量为 0.由短路网系统的结构可知, $M_1=o$ 也是短路网系统 (\bar{N}, i) 的可达标识.当向量 A 使 p 满足无论是 N 还是 \bar{N} 中的线性相关库所的定义时,都有 $p \notin \{i, o\}$,因为:

- 若 p 是源库所 i ,则 $M_1(p)=M_0(i)+A \cdot (M_1-M_0)=1+A(o) \geq 1$,与 $M_1(i)=0$ 矛盾;
- 若 p 是漏库所 o ,则 $M_1(p)=M_0(o)+A \cdot (M_1-M_0)=0-A(i) \leq 0$,与 $M_1(o)=1$ 矛盾.

因此, p 在 C 中的行向量 $r(p)$ 和在 C' 中的行向量 $r'(p)$ 满足 $r'(p)=(r(p) \ 0)$.

再由 $M_1(p) = M_0(p) + A \cdot (M_1^{-p} - M_0^{-p}) = 0 - A(i) + A(o) = 0$ 可知 $A(i)=A(o)$.

1) (\Rightarrow) 已知 $\exists A \geq 0$ 使 p 满足 $r(p)=A \cdot C$,则有 $A \cdot C'=(A \cdot C \ A \cdot l(t^*))=(r(p) \ A(i)-A(o))=r'(p)$,即 p 是 \bar{N} 的非负线性相关库所.

2) (\Leftarrow) 已知 $\exists A \geq 0$ 使 p 满足 $r'(p)=A \cdot C'$,则有 $A \cdot C=(A \cdot C \ A \cdot l(t^*))=r'(p)=(r(p) \ 0)$,推出 $r(p)=A \cdot C$,即 p 是 N 的非负线性相关库所. \square

N 与 \bar{N} 的非负线性相关变迁间不存在如上的对应关系:由于短路变迁 t^* 是 \bar{N} 的邻接矩阵 C' 中线性独立的变迁,因此 N 的非负线性相关变迁一定是 \bar{N} 的非负线性相关变迁,而此命题反过来不成立.因此,只有规则 R_T 的应用条件仍需考察短路网的结构.

在 N 上分别应用规则 R_A, R_S, R_T 与在 (\bar{N}, i) 上分别应用 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 造成的变化实质是相同的,只是描述对象不同.由于 (\bar{N}, i) 分别经 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 化简所得的短路网系统对应的工作流网正好由 N 分别经 R_A, R_S, R_T 化简所得,再联

系 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 对 LBFC 短路网系统的强可靠性, R_A, R_S, R_T 对 SFCW 网的强可靠性得以保证. 下面给出化简规则对于 SFCW 网强可靠性的定义以及 R_A, R_S, R_T 强可靠性的形式化证明.

定义 3.2(SFCW 网化简规则的强可靠性). 对任意的自由选择 workflow 网 N , 若规则 R 将其化简为 N' , 且 N 是 SFCW 网当且仅当 N' 是 SFCW 网, 则称 R 对 SFCW 网是强可靠的, 即 $(\Sigma, \Sigma') \in R \Rightarrow (\Sigma \in \text{SFCW} \Leftrightarrow \Sigma' \in \text{SFCW})$.

定理 3.1. R_A, R_S, R_T 对于 SFCW 网都是强可靠的.

证明: 令 N 是自由选择 workflow 网, (\bar{N}, i) 是它的短路网系统.

(1) 当 R_A 可在 N 上应用时, 由于 $\bullet i = o^* = \emptyset$, i 和 o 不会是目标库所, 再由 ϕ'_A 的定义可知, (\bar{N}, i) 满足 ϕ'_A 的应用条件; 当 R_T 可在 N 上应用时, 由于 t^* 不在 N 中, 可知 ϕ'_T 可应用在 (\bar{N}, i) 上. 令 N 经 R_A 化简为网 N' , 相应地, (\bar{N}, i) 经 ϕ'_A 化简得到短路网系统 (\bar{N}', i) , 且短路网 \bar{N}' 删除 t^* 后正好是 N' . 根据 ϕ'_A 对 LBFC 短路网系统的强可靠性, N 是 SFCW 网当且仅当 N' 是 SFCW 网. 类似地, 能够证明 R_T 对 SFCW 网的强可靠性.

(2) 令 N 经 R_S 化简为网 N' , 若已知 N 是 SFCW 网, 则 $M_1 = o$ 是 N 在 $M_0 = i$ 下的可达标识. 由引理 3.4 可知 ϕ'_S 可应用在 (\bar{N}, i) 上, 由于 (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统, 则化简所得短路网系统 (\bar{N}', i) 是 LBFC 的, 因此, N' 也是 SFCW 网. 若已知 N' 是 SFCW 网, 则 $M_1 = o$ 是 N' 在 $M_0 = i$ 下的可达标识. 由于 N' 是删除 N 的线性相关库所得到的网, 则 $M_1 = o$ 也是 N 在 $M_0 = i$ 下的可达标识. 由引理 3.4 可知, ϕ'_S 可应用在 (\bar{N}, i) 上, 再根据 (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统, 可知短路网系统 (\bar{N}, i) 是 LBFC 的, 因此, N 也是 SFCW 网. R_S 对于 SFCW 网的强可靠性得证. \square

规则 R_A, R_S, R_T 在 N 上的可应用性以 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 在 (\bar{N}, i) 上的可应用性为基础, 由于 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 在 \bar{N} 上的可应用性判定是多项式时间的, 而附加条件的判断在常数时间内就能完成, 所以 R_A, R_S, R_T 在自由选择 workflow 网上的可应用性也能在多项式时间内得出结论.

3.3 SFCW 网化简规则集的完备性

要证明规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对 SFCW 网是完备的, 首先给出它的原子网及规则集对它的完备性定义.

定义 3.3(SFCW 网化简规则集的完备性). (1) SFCW 网的原子网是只执行 1 个动作的 workflow 网, 它与 $AN = (\{i, o\}, \{t\}, \{(i, t), (t, o)\})$ 同构; (2) 若任意的 SFCW 网能够通过一个化简规则集化简为原子网, 则称此规则集对 SFCW 网是完备的.

相应地, 原子的 LBFC 短路网系统的底层网与 $(\{i, o\}, \{t, t^*\}, \{(i, t), (t, o), (o, t^*), (t^*, i)\})$ 同构, 且初始标识满足 $M_0 = i$. 由于所有化简规则都会使网节点个数减少, 若能证明一个化简规则集可在任意非原子的 SFCW 网上应用, 则对一个非原子的 SFCW 网持续应用这个化简规则集, 最终会得到 SFCW 网的原子网. 由此可将规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 的完备性证明转化为证明命题: $\{R_A, R_S, R_T\}$ 中某个规则一定能够在任意非原子的 SFCW 网上应用. 根据 ϕ_A, ϕ_S, ϕ_T 分别与 $\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T$ 的对应关系, 可首先证明任意非原子的 LBFC 短路网系统满足 $\{\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T\}$ 中某条规则的应用条件. 要证明此命题, 需借助文献[2]中关于 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 对于 WFFC 网完备性的重要结论:

结论 3.1(WFFC 网化简规则集完备性相关定理). N 是非原子的 WFFC 网, (1) $\phi_S(\phi_T)$ 可应用于 N 当且仅当 N 包含一个库所 p (变迁 t) 使得网 $N \setminus \{p\}$ ($N \setminus \{t\}$) 是强连通的 (参见文献[2]中的命题 7.12); (2) $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中的某条规则可应用于 N (参见文献[2]中的定理 7.13).

根据结论 3.1(2) 可知, $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中的某条规则可应用于任意非原子 LBFC 短路网系统 (\bar{N}, i) 的底层网 \bar{N} , 要通过 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 在 \bar{N} 上的可应用性证明 $\{\phi'_A, \phi'_S, \phi'_T\}$ 在 (\bar{N}, i) 上能够应用, 需要考虑到 ϕ'_S 对目标库所的特殊要求, 能够证明 (\bar{N}, i) 中所有的非负线性相关库所一定满足这个要求, 如引理 3.5 所述.

引理 3.5. 若 LBFC 短路网系统 (\bar{N}, i) 包含一个非负线性相关库所 p , 则存在一个使 p 满足非负线性相关库所定义的向量 $\lambda: \lambda(i) = 0, \lambda \neq 0$.

证明: 已知 \bar{N} 是 WFFC 网且包含非负线性相关库所 p , 则应用 ϕ_S 将其化简为 WFFC 网 \bar{N}' . 根据 WFFC 的 S_{-} 组件覆盖定理, p 一定包含在一个 \bar{N} 的 S_{-} 组件 S_1 中, 令 I_1 是 S_1 导出的 S_{-} 不变量, I_1 的支撑集为 $P_1 \cup \{p\}$, 由于 i 不是 \bar{N} 的非负线性相关库所 (删除 i 使 \bar{N}' 不再强连通), 且 S_1 一定含有 i , 则 $i \in P_1$. 且有 $\forall s \in P_1 \cup \{p\}: I_1(s) = 1$, 其余分量为 0. P_1 在 \bar{N}' 中可与某个不相交的库所集合 P_2 构成 S_{-} 组件 S_2 , 则 $i \notin P_2$. 令 I_2 是 S_2 导出的 \bar{N}' 的 S_{-} 不变量, 则有

$\forall s \in P_1 \cup P_2: I_2'(s) = 1$, 其余分量为 0. 令 \bar{N} 和 \bar{N}' 的邻接矩阵分别为 C 和 C' , $I_1 \cdot C = 0, I_2' \cdot C' = 0$. 令 $C = \begin{pmatrix} C' \\ r(p) \end{pmatrix}$, 则向量 $I_2 = (I_2' \ 0)$ 也是 \bar{N} 的 S_- 不变量. 令 $I = I_2 - I_1$, 则有 $I \cdot C = (I' - 1) \cdot \begin{pmatrix} C' \\ r(p) \end{pmatrix} = I' \cdot C' - r(p) = 0$, 且向量 I' 满足 $\forall s \in P_2: I'(s) = 1$, 其余分量为 0. 取 $A = (I' \ 0)$, 则它满足 $A(i) = A(p) = 0, A \neq 0$ 且 $A \cdot C = I' \cdot C' = r(p)$. 即得证. \square

接下来阐述 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对于 SFCW 网的完备性: 首先, 结合引理 3.5 证明 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中某条规则可应用于任意 LBFC 短路网系统的底层网时, 这个网系统一定满足 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中某条规则的应用条件; 然后, 通过 $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 与 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 的对应关系说明它的 SFCW 网一定满足 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 中相应规则的应用条件, 再由化简规则对网节点个数的单调递减性证明完备性, 如定理 3.2 所述.

定理 3.2. 化简规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对于 SFCW 网是完备的.

证明:

(1) 令 N 是非原子的 SFCW 网, 则 (\bar{N}, i) 是非原子的 LBFC 短路网系统. 由 ϕ_S 保持 WFFC 网的强连通性可知, 库所 i 和 o 及短路变迁 t^* 不是 WFFC 网 \bar{N} 的线性相关节点. 根据结论 3.1(2), $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中某条规则可应用于 \bar{N} . 当 \bar{N} 满足 ϕ_A 的应用条件时, 在目标库所不是 i 或 o 的前提下, ϕ_A 可在 (\bar{N}, i) 上应用. 若 ϕ_A 只能以 i 和 o 为目标库所, 如图 3 所示, 由于 (\bar{N}, i) 是非原子的, 则 \bar{N} 一定存在子网 N_1' . 依次以 i 和 o 为目标库所应用 ϕ_A 化简 \bar{N} , 得到 WFFC 网 N_1 , 则 N_1 中也包含子网 N_1' . 此时, N_1 中不再有 ϕ_A 可缩减的目标节点, 根据结论 3.1(2), ϕ_S 或 ϕ_T 可应用于 N_1 . 令此时的目标节点为 x , 则删除 x 后所得网 $N_1/\{x\}$ 仍是 WFFC 网. 因为 $N_1/\{x\}$ 是强连通的, 结合 \bar{N} 与 N_1 的结构特征可知 $\bar{N}/\{x\}$ 也是强连通的. 根据结论 3.1(1), ϕ_S 或 ϕ_T 可应用于 \bar{N} .

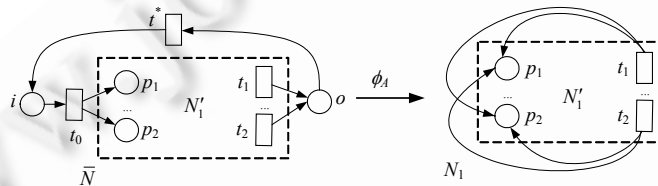


Fig.3 Apply ϕ_A to \bar{N} with i and then o as the target place
图 3 依次以 i 和 o 为目标库所在 \bar{N} 上应用 ϕ_A

当 ϕ_S 可应用于 \bar{N} 时, 它的目标库所 p 不会是 i 或 o , 结合引理 3.5 可知, p 满足 ϕ_S' 中对线性相关库所的要求, 则 ϕ_S' 可在 (\bar{N}, i) 上应用. 当 \bar{N} 满足 ϕ_T 的应用条件时, 由 t^* 不会是 ϕ_T 的目标变迁可知, 此时 ϕ_T' 可在 (\bar{N}, i) 上应用. 综上, $\{\phi_A, \phi_S, \phi_T\}$ 中的某条规则可应用于 (\bar{N}, i) .

(2) 当 ϕ_A 可应用于 (\bar{N}, i) 时, 根据 R_A 的定义, i 和 o 不会是它在 N 中的目标库所, 则 R_A 可应用于 N . 当 ϕ_S 可应用于 (\bar{N}, i) 时, 由于 (\bar{N}, i) 是 LBFC 短路网系统, 标识 $M_1 = o$ 是网 N 在标识 $M_0 = i$ 下可达的, 则根据引理 3.4 可知, N 满足 R_S 的应用条件. 当 ϕ_T 可应用于 (\bar{N}, i) 时, 由于 t^* 不是 N 中的节点, 则 N 满足 R_T 的应用条件. 联系(1)中的结论可知, $\{R_A, R_S, R_T\}$ 中的某条规则可应用于 N .

(3) 由于任意一条化简规则对于函数 $f: SFCW \rightarrow N^2, f(P, T, F) = (|P|, |T|)$ 都是单调递减的, 可在 N 上持续应用 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 中的规则, 最终得到节点个数最少的 SFCW 网即 SFCW 的原子网, 因此, 规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对于 SFCW 网是完备的. \square

图 4 演示了应用规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 化简一个复杂 SFCW 网的过程. 图 4(a) 中的 SFCW 网 N_1 由文献[4]中一个复杂 workflow 图转换得到, 它是化简的起始. 在 N_1 中有 $r(p_7) = r(p_2) + r(p_4), r(p_8) = r(p_1) + r(p_3)$, 分别在 p_7, p_8 上应用 R_S 得到 N_2 ; 由于 N_2 满足 $l(t_3) = l(t_4) + l(t_8), l(t_6) = l(t_5) + l(t_7)$ (在 N_2 的短路网中也成立), 应用两次 R_T 分别删除 t_3, t_6 得到 N_3 ; 在 N_3 中, 分别以 p_1, t_4 和 p_2, t_5 为目标节点应用 R_A , 得到 N_4 . 化简过程可在 N_4 上持续进行, 直至得到一个 SFCW 原子网. 由于化简是节点个数减少的过程, $N = (P, T, F)$ 化简到 SFCW 原子网的过程不会超过 $|P| - 2 + |T| - 1$ 次步骤.

由以上化简过程可看出, 应用特定于 SFCW 网的可靠化简规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 能够保证每次化简的结果都是

SFCW 网.当流程模型的化简并不仅仅以验证工作流网的合理性为目的时,化简过程无须进行到原子网就会结束,若化简规则不可靠,则可能得到一个不再是流程模型的化简结果,使后续分析工作难以进行.因此,保证规则的可靠性至关重要.

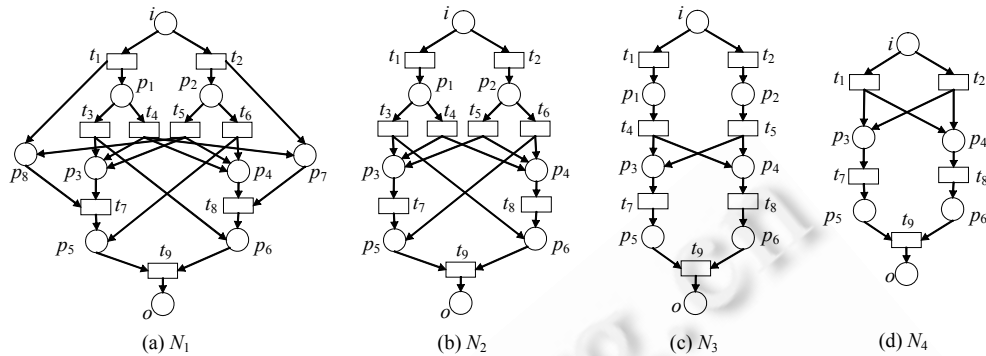


Fig.4 Reduction of a complex SFCW net
图 4 一个复杂 SFCW 网的化简

3.4 与已有流程化简规则集的比较

表 4 给出了 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 与相关工作中具有代表性的流程模型化简规则集的比较.因为 Aalst 在文献[10]中将工作流图转化为自由选择工作流网,因此文献[10]的化简对象被归类为工作流网.比较分别从可靠性、完备性及规则个数这 3 个方面进行.

Table 4 Comparison between $\{R_A, R_S, R_T\}$ and some reduction rule sets of process models
表 4 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 与若干流程模型化简规则集的比较

	非形式化模型			基于 Petri 网的形式化模型					
	工作流图			工作流网				Petri 网变种	
	Sadiq ^[3]	Lin ^[4]	Li-Lu ^[5]	Verbeek ^[8]	Aalst ^[10]	Li-Fan ^[11]	Our work	3DWFN ^[13]	WF-Logic ^[14]
可靠性	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓
完备性	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	×
个数	5	7	4	8	4	8	3	14	12

第一,在以工作流图为对象的化简方法^[3-5]中,Sadiq 的规则集是不完备的.这 3 组化简规则都是基于图形的,且只能处理不含循环结构的工作流图.另外,Lin 的方法中,用于代替交叠规则的 3 条规则定义复杂,不易实现自动化.与之相比, $\{R_A, R_S, R_T\}$ 的定义基于 Petri 网理论,对可靠性和完备性有更严格的形式化证明,且没有对循环的限制,规则个数少.

第二,在以工作流网为对象的 3 组规则集^[8,10,11]中,Verbeek 采用 Murata 提出的 8 条 Petri 网化简规则,对于工作流网并不完备.Aalst 与 Li-Fan 的方法都采用了 LBFC 网系统的规则集,Aalst 的目的是验证工作流网的合理性,因此不关心化简过程中是否破坏短路网系统的结构.Li-Fan 在将规则 R_3 移植到自由选择工作流网上时,删除了 R_3 对标识的要求,会产生如图 2 所示的将不合理的工作流网化简为合理的情况.因此,文献[10,11]中的规则集都是不可靠的.与两者相比,本文在移植 WFC 网的化简规则集时,提出的限制条件在不影响规则集完备性的前提下,能够保持 SFCW 网的特征.

第三,在以 Petri 网变种为流程模型的方法中,文献[13]中的 3DWFN 比工作流网多出语义信息,因此与本文相比能够验证语义冲突.文献[13]中的规则 R_5 和 R_6 在化简交叠模式时,对“或/与结构交叉情况”考虑不够充分,因此是不完备的.文献[14]为 WF-logic 提出 12 条化简规则,并给出了其可靠性的严格证明.这些规则的目的是简化流程模型以缩减可达图的规模,因此不考虑完备性.

4 SFCW 网的可靠完备合成规则集

在上一节化简规则的基础上定义 SFCW 网的可靠合成规则 S_A, S_S, S_T , 并证明合成规则集 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 的完备性, 以一个实际中的流程模型为例说明应用 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 合成一个 SFCW 网的过程.

4.1 SFCW 网的合成规则集及可靠性

合成规则 S_A, S_S, S_T 分别通过反转 R_A, R_S, R_T 得到, 通常, 待合成的一定是 SFCW 网, 则 S_A, S_S, S_T 只需满足可靠性的要求. 由于 R_A, R_S, R_T 定义在自由选择工作流网上, 因此由 SFCW 网经 S_A, S_S, S_T 合成的网首先需满足自由选择工作流网的定义, 才能保证 S_A, S_S, S_T 对 SFCW 网是可靠的. 能够证明, 反转 R_A 和 R_S 后的合成规则保持自由选择工作流网的结构要求, 因此, S_A 和 S_S 的定义分别通过直接反转 R_A 和 R_S 得到. S_T 在反转 R_T 的基础上要求: 新增的非负线性相关变迁 t 满足在合成所得网的邻接矩阵中的列向量 $l(t)$ 在 i 处对应的分量小于等于 0, 在 o 处对应的分量大于等于 0. 定理 4.1 通过说明以上 3 条合成规则对自由选择工作流网结构的保持, 结合 R_A, R_S, R_T 的强可靠性证明它们的可靠性.

定义 4.1(SFCW 网合成规则的可靠性). 对任意的自由选择工作流网 N , 若通过规则 S 合成得到网 N' , 且 N 是 SFCW 网时 N' 也是 SFCW 网, 则称 S 对 SFCW 网是可靠的.

定理 4.1. S_A, S_S, S_T 对于 SFCW 网都是可靠的.

证明: (1) 首先证明在 SFCW 网 N 上分别应用 S_A, S_S, S_T 生成的网 N' 都是自由选择工作流网. 将图 1 中的箭头反转可知 S_A 如何造成 N 的结构变化, 这种变化不会造成 N' 违反自由选择工作流网的定义. 当依照 S_T 的定义向 N 中添加其短路网 \bar{N} 的非负线性相关变迁 t 时, 由于在 \bar{N} 中添加 t 后所得网是强连通的, 则 t 在 N' 中的前集和后集都不为空. 再根据 S_T 对 t 的约束条件, N' 不会有 i 上的输入流和 o 上的输出流, 则它一定是自由选择工作流网. 当依照 S_S 的定义向 N 中添加库所 p 时, 根据 R_S 中对 p 的特殊要求, p 在合成所得网的前集和后集都不为空, 因此 N' 一定自由选择工作流网. (2) 已知在 SFCW 网 N 上应用 S_A, S_S 或 S_T 生成自由选择工作流网 N' , 则由 S_A, S_S, S_T 的定义可知, N' 满足 R_A, R_S 或 R_T 的应用条件, 且化简生成的网正是 N . 根据 R_A, R_S, R_T 对 SFCW 网的强可靠性可知, N' 是 SFCW 网. 因此, S_A, S_S, S_T 对于 SFCW 网都是可靠的. \square

4.2 SFCW 网合成规则集的完备性

本节证明任意一个非原子 SFCW 网都能从一个原子 SFCW 网开始通过规则集 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 逐步合成得到, 即 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 对于 SFCW 网是完备的. 当任意一个 SFCW 网 N 分别通过 R_A, R_S, R_T 化简为网 N' 时, N 也一定能够通过 N' 上分别应用 S_A, S_S, S_T 合成得到. 因此, 根据 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对 SFCW 网的完备性证明可知, 任意的非原子 SFCW 网一定能够由某个节点个数更少的 SFCW 网合成得到; 再由合成规则对网节点的单调递增性可知, 合成起点一定是节点个数最少的 SFCW 网, 从而证明 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 的完备性, 如定理 4.2 所述.

定义 4.2(SFCW 网合成规则集的完备性). 若任意非原子的 SFCW 网都能通过一个合成规则集从原子 SFCW 网开始逐步合成得到, 则称此合成规则集对 SFCW 网是完备的.

定理 4.2. 合成规则集 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 对于 SFCW 网是完备的.

证明: 对于任意非原子的 SFCW 网 N, R_A, R_S, R_T 中的某条规则 R_X 一定能将其化简为 SFCW 网 N' . 根据 S_A, S_S, S_T 的定义, N 也一定能够通过 N' 上应用 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 中与 R_X 对应的规则 S_X 合成得到. 因此, 任意非原子的 SFCW 网一定能够由另一个节点数较少的 SFCW 网经 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 中的某条规则合成. 由于合成规则对于函数 $f: \text{SFCW} \rightarrow \mathcal{N}^2$ 是单调递增的, 因此, 以 f 的取值下限 $f(AN) = (2, 1)$ 为起始, 任意非原子的 SFCW 网总能由 SFCW 的原子网开始, 通过若干次应用规则 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 合成得到. \square

SFCW 网的可靠完备合成规则集 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 提供了 SFCW 网的另一种定义方式, 即能够通过 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 由原子网 $AN = (\{i, o\}, \{t\}, \{(i, t), (t, o)\})$ 逐步生成的所有工作流网的集合. 观察图 4 中的化简过程, 由于每步化简的逆操作都满足相应合成规则的应用条件, 整个化简的逆过程就是如图 4(a) 所示的复杂 SFCW 网 N_1 由 N_4 按照规则集 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 逐步合成的过程. 在商业流程模型的设计及精化过程中, 合成规则能够在逐步生成复杂 SFCW 网模型

的过程中为设计者提供可参考的指导原则.图 5 以一个网上购物付款并生成订单流程的工作流网为例,说明应用合成规则 S_A, S_S, S_T 逐步精化一个 SFCW 网的过程.图中带标记的变迁表示可执行的动作,其含义如图所示.从如图 5(a)所示的比较简单 SFCW 网开始,依次应用合成规则 $\{S_A, S_S, S_T\}$ 得到如图 5(e)所示的 SFCW 网.

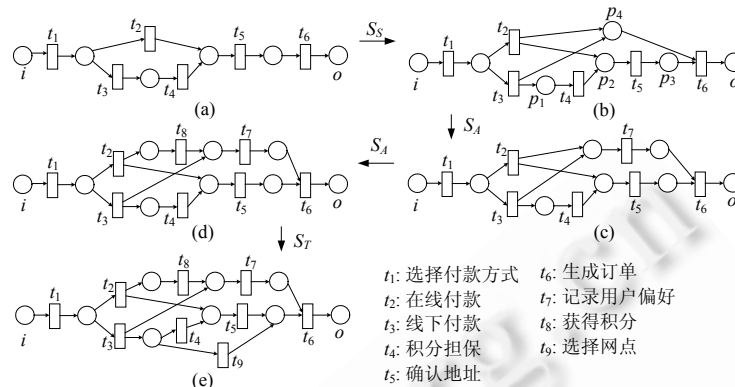


Fig.5 Synthesis procedure of a SFCW net

图 5 一个 SFCW 网的合成过程

5 结 论

流程模型化简是缓解状态空间爆炸问题的重要模型分析方法之一,而自由选择工作流网作为众多商业流程模型的理论支撑,针对它的化简技术对流程的控制流模型分析具有积极意义.本文通过改造并移植 WFFC 网的可靠完备化简规则集,给出 SFCW 网的化简规则集 $\{R_A, R_S, R_T\}$,并证明它们对 SFCW 网的强可靠性;再通过建立 SFCW 网与 WFFC 网两者的规则集在各任意模型上的可应用性间的联系,保证 $\{R_A, R_S, R_T\}$ 对 SFCW 网的完备性.提出了基于 Petri 网的更契合于流程模型分析的化简理论,并给出可靠完备的合成规则集,为流程模型的设计与精化提供参考.下一步的工作将探讨其他类型工作流网的可靠完备化简规则集等问题.

References:

- [1] van der Aalst WMP. Verification of workflow nets. In: Azema P, Balbo G, eds. Proc. of the 18th Application and Theory of Petri Nets. LNCS 1248, Berlin: Springer-Verlag, 1997. 407-426. [doi: 10.1007/3-540-63139-9_48]
- [2] Desel J, Esparza J. Free Choice Petri Nets. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [3] Sadiq W, Orłowska ME. Analyzing process models using graph reduction techniques. Information Systems, 2000,25(2):117-134. [doi: 10.1016/S0306-4379(00)00012-0]
- [4] Lin H, Zhao Z, Li H, Chen Z. A novel graph reduction algorithm to identify structural conflicts. In: Proc. of the 35th Annual Hawaii Int'l Conf. on System Science. Washington: IEEE Computer Society, 2002. 289-298. [doi: 10.1109/HICSS.2002.994506]
- [5] Li PW, Lu ZD, Fu XL. Reduction techniques of workflow verification and its implementation. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2004,11(1):109-113.
- [6] Touré F, Baïna K, Benali K. An efficient algorithm for workflow graph structural verification. In: Meersman R, Tari Z, eds. Proc. of the OTM 2008, Part I. LNCS 5331, Berlin: Springer-Verlag, 2008. 392-408. [doi: 10.1007/978-3-540-88871-0_26]
- [7] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE, 1989,77(4):541-580. [doi: 10.1109/5.24143]
- [8] Verbeek HMW. Verification of WF-nets [Ph.D. Thesis]. Nuenen: Eindhoven University of Technology, 2004.
- [9] Esparza J. Reduction and synthesis of live and bounded free choice Petri nets. Information and Computation, 1994,114(1):50-87. [doi: 10.1006/inco.1994.1080]
- [10] van der Aalst WMP, Hirschnall A, Verbeek HMW. An alternative way to analyze workflow graphs. In: Pidduck A, Mylopoulos J, Woo C, et al., eds. Proc. of the 14th CAISE. LNCS 2348, Berlin: Springer-Verlag, 2002. 535-552. [doi: 10.1007/3-540-47961-9_37]

- [11] Li JQ, Fan YS. Research of Petri net based workflow model reduction methods. Information and Control, 2001,30(6):492–497 (in Chinese with English abstract).
- [12] Hu NJ, Zhao L, Hu JH. Verification of evolution rules on workflow net based on Petri-net. Journal of Chinese Computer Systems, 2007,28(6):1076–1079 (in Chinese with English abstract).
- [13] Zhou JT, Shi ML, Ye XM. A method for semantic verification of workflow processes based on Petri net reduction technique. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2005,16(7):1242–1251 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1242.htm> [doi: 10.1360/jos161242]
- [14] Huang Y, Wang HP, Zhao W, Xu CX. A practical method to analyze workflow logic models. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2008,20(1):41–60. [doi: 10.1002/cpe.1210]
- [15] Wang HQ, Zeng QT. Modeling and analysis for workflow constrained by resources and nondetermined time: An approach based on Petri nets. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2008,38(4):802–817. [doi: 10.1109/TSMCA.2008.923056]
- [16] Wynn MT, Verbeek HMW, van der Aalst WMP, ter Hofstede AHM, Edmond D. Soundness-Preserving reduction rules for reset workflow nets. Information Sciences, 2009,179(6):769–790. [doi: 10.1016/j.ins.2008.10.033]
- [17] van Hee K, Sidorova N, Voorhoeve M. Soundness and separability of workflow nets in the stepwise refinement approach. In: van der Aalst WMP, Best E, eds. Proc. of the 24th Application and Theory of Petri Nets. LNCS 2679, Berlin: Springer-Verlag, 2003. 337–356. [doi: 10.1007/3-540-44919-1_22]
- [18] Dong LD, Cheng XH, Zheng H. Properties research of Petri nets safety place substitution based on workflow nets. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010,44(9):1711–1718 (in Chinese with English abstract).
- [19] Xia CL, Jiao L, Lu WM. Petri net refinement and its application in system design. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2006, 17(1):11–19 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/11.htm> [doi: 10.1360/jos170011]
- [20] Zhang M, Duan ZH, Wang XB. Analysis and transformation of overlapped patterns in BPEL modeling. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(11):2684–2697 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4075.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04075]

附中文参考文献:

- [11] 李建强,范玉顺.基于 Petri 网化简方法的工作流模型验证.信息与控制,2001,30(6):492–497.
- [12] 胡乃静,赵亮,胡金化.基于 Petri 网的工作流结构正确性化简验证方法.小型微型计算机系统,2007,28(6):1076–1079.
- [13] 周建涛,史美林,叶新铭.一种基于 Petri 网化简的工作流过程语义验证方法.软件学报,2005,16(7):1242–1251. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1242.htm> [doi: 10.1360/jos161242]
- [18] 董利达,程曦浩,郑寒.基于工作流的安全库所替换网特性研究.浙江大学学报(工学版),2010,44(9):1711–1718.
- [19] 夏传良,焦莉,陆维明.Petri 网精细化操作及其在系统设计中的应用.软件学报,2006,17(1):11–19. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/11.htm> [doi: 10.1360/jos170011]
- [20] 张曼,段振华,王小兵.BPEL 流程建模中的交叠模式分析与转换.软件学报,2011,22(11):2684–2697. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4075.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04075]



张曼(1984—),女,陕西西安人,博士,讲师,主要研究领域为商业流程建模,workflow网.
E-mail: mzhang@xidian.edu.cn



王小兵(1979—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为 Web 服务建模与验证.
E-mail: xbwang@mail.xidian.edu.cn



段振华(1948—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络计算,可信软件理论和技术.
E-mail: zhhduan@mail.xidian.edu.cn