

基于粗糙集理论的离散事件系统不透明性的验证算法

刘富春[†], 赵毅澎, 赵 锐

(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

摘要: 近年来, 离散事件系统的不透明性研究引起了国内外众多学者的广泛关注. 本文针对离散事件系统的不透明性, 提出了一种将粗糙集理论作为知识提取工具来处理离散事件系统不透明性验证的方法. 先对离散事件系统的不透明性进行形式化, 再利用粗糙集理论对离散事件系统以信息表及决策表的形式进行表示, 得到一个关于离散事件系统不透明性的充分必要条件. 在此基础上, 给出一个验证离散事件系统不透明性算法. 与现有方法相比, 该验证算法既适用于对强不透明性的验证, 又适用于对弱不透明性的验证, 并且在时间复杂度上也有较明显改进.

关键词: 离散事件系统; 不透明性; 粗糙集理论; 决策表

引用格式: 刘富春, 赵毅澎, 赵锐. 基于粗糙集理论的离散事件系统不透明性的验证算法. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1259 – 1264

DOI: 10.7641/CTA.2018.80215

Verification algorithm for opacity of discrete-event systems with rough set theory

LIU Fu-chun[†], ZHAO Yi-peng, ZHAO Rui

(School of Computers, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: In recent years, the opacity of discrete-event systems (DESSs) has received considerable attention. This paper aims to propose an approach for verification of opacity in DESSs by means of rough set theory as a knowledge extraction tool. Firstly, the notion of opacity for DESSs modeled by finite state automation is formalized. Then DESSs are formalized as information tables and decision tables under the framework of rough set theory. A necessary and sufficient condition of verifying opacity is presented and an algorithm is proposed to verify opacity of DESSs. Compared with the existing methods, the algorithm proposed in this paper can be used to deal with the verification for both strong opacity and weak opacity, and it has lower computational complexity.

Key words: discrete-event system; opacity; rough set theory; decision table

Citation: LIU Fuchun, ZHAO Yipeng, ZHAO Rui. Verification algorithm for opacity of discrete-event systems with rough set theory. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(8): 1259 – 1264

1 引言

近年来, 离散事件系统的不透明性研究引起了国内外众多学者的广泛关注. 直观上, 具有不透明性的系统满足以下条件: 对于任意一条到达系统秘密状态的路径, 至少存在另一条从相同状态出发到达非秘密状态的路径, 使得这两条路径具有相同的投影. 因此, 不透明性系统能够有效抵御入侵者的攻击而保护隐私, 因为入侵者仅根据其观测结果无法确定系统到达的状态是秘密状态还是非秘密状态.

文献[1]首次在离散事件系统框架下提出不透明性概念. 为保护离散事件系统中的不同类型隐私, 众多学者提出了多种不透明性概念, 最具代表性的有基于语言的不透明性^[2]、当前状态的不透明性^[3]以及 K -步不透明性等^[4]. 尤其是在文献[2]中提出了一种不透明性的验证算法, 它不仅将不透明性应用于安全性与隐私性研究, 还将它应用于解决其他信息流相关问题, 如系统的可诊断性等^[5]. 但是, 该算法属于指数复杂度算法. 为降低算法复杂度, 文献[6]提出了一种

收稿日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-10-11.

[†]通信作者. E-mail: fliu2011@163.com; Tel.: +86 13725145446.

本文责任编辑: 赵千川.

国家自然科学基金项目(61673122), 广东省教育厅省级重大项目(2014KZDXM033), 广东省公益研究与能力建设专项资金项目(2015A030402006), 广东工业大学计算机学院重大奖项培育项目(2016PY01)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61673122), the Provincial Major Program of Guangdong (2014KZDXM033), the Public Welfare Research and Capacity Building Project of Guangdong (2015A030402006) and the Major Awards Incubation Project of School of Computers of Guangdong University of Technology (2016PY01).

用检测器来代替观察器的改进验证算法。

本文运用粗糙集理论研究离散事件系统的不透明性。粗糙集理论首次由Pawlak提出^[7],它可以高效分析和处理不确定、不一致或不完整问题,在机器学习、数据挖掘、人工智能等领域得到了广泛应用^[8-9]。值得指出的是,用粗糙集理论进行故障诊断是近年来发展起来的一种新方法。而基于模型的故障诊断方法有着明显优势,它能将不同系统的故障诊断方法转化为相同形式的故障诊断方法^[10-12]。文献[13]研究了用粗糙集理论进行的不完备离散事件系统的故障诊断问题,根据传感器监测到的不完整模型和观测值,提出了一种通过优化不完备模型来获取完整模型的基于模型的故障诊断方法。

本文继续文献[13]的工作,针对离散事件系统的不透明性,提出一种将粗糙集理论作为知识提取工具处理离散事件系统不透明性验证的方法。先对离散事件系统的不透明性进行形式化。再利用粗糙集理论以信息表以及决策表的形式对离散事件系统进行表示,得到一个关于离散事件系统不透明性的充分必要条件,并且由此给出一个验证离散事件系统不透明性的算法,实现对系统不透明性的验证。而本文提出的验证算法既适用于强不透明性的验证,又适用于弱不透明性的验证,并且在时间复杂度上也有明显改进。因此,本文提出的运用粗糙集理论作为研究工具探讨不透明性问题的方法,在解决不透明性验证问题的同时,也为离散事件系统不透明性研究提供一种新思路。

2 粗糙集理论及离散事件系统

先简要介绍粗糙集理论的一些相关知识^[7]。

定义 1 一个信息系统(information system, IS)是一个四元组 $S = (U, A, V, f)$,其中: U 是非空有限集合,称为论域,其元素称为对象; A 是非空有限集合,其元素称为属性; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$, V_a 是由属性 a 的取值构成的集合,称为 a 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 称为信息函数,它为每个对象关于每个属性赋予一个信息值,且对于任意 $x \in U, a \in A$,有 $f(x, a) \in V_a$ 。

定义 2 设 $T = (U, A, V, f)$ 是一个信息系统,如果满足 $A = C \cup D$ 和 $C \cap D = \emptyset$,则 T 是一个决策表(decision table, DT),其中, C 为条件属性, D 为决策属性。

下面再给出离散事件系统的一些相关概念^[5]。

一个离散事件系统 G 是指有限状态自动机(finite state machines, FSM) $G = (\Sigma, X, \delta, x_0, X_m)$,其中: Σ 为事件集,它可分为可观察事件集 Σ_o 和不可观察事件集 Σ_{uo} ,即 $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$; X 为状态集, $x_0 \in X$ 为初始状态; $X_m \subseteq X$ 为标记状态集; δ 为状态转移函数 $\delta: X \times \Sigma \rightarrow X$ 。如果 $\delta(x, \sigma)$ 有定义,可记为 $\delta(x, \sigma)!$ 。

通常转移函数可推广为 $\delta: X \times \Sigma^* \rightarrow X$,其中 Σ^* 为 Σ 的克林闭包。离散事件系统 G 的行为可通过 G 的生成语言以及标记语言来描述。其中 G 的生成语言定义为

$$L(G) = \{s \in \Sigma^* : \delta(x_0, s)!\}, \quad (1)$$

G 的标记语言定义为

$$L_m(G) = \{s \in L(G) : \delta(x_0, s) \in X_m\}. \quad (2)$$

为研究离散事件系统的不透明性,我们给出可观映射的定义如下:

$$\theta: \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*, \quad (3)$$

它表示如果在系统中发生了事件串 s ,观察者将看到 $\theta(s)$ 。而文献[5]使用的自然投影 $P: \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ 是可观映射 θ 的一种特例。一般来说, θ 可以为任意的可观映射,而并不限制为自然投影。另外,可观映射 θ 可从事件串推广至语言。对于一个语言 $L \subseteq \Sigma^*$,它的映射可定义为

$$\theta(L) = \{t \in \Sigma^* : (\exists L)t = \theta(s)\}. \quad (4)$$

对于一个语言 $J \subseteq \Sigma^*$,它的反映射可定义为

$$\theta^{-1}(J) = \{t \in \Sigma^* : \theta(t) \in J\}. \quad (5)$$

根据上述可观映射 θ ,可将系统 G 中转移的可观性用映射 $\Psi: cX \rightarrow 2^\Sigma$ 表示:若 $\sigma \in \Psi(x)$,则表示转移 $\delta(x, \sigma)$ 为可观转移。否则, $\delta(x, \sigma)$ 为不可观转移。为此,也可将 G 表示为

$$G = (\Sigma, X, \delta, \Psi, x_0, X_m). \quad (6)$$

基于 Ψ ,则可观投影 θ 可递归定义如下:

$$\begin{cases} \theta(\varepsilon) = \varepsilon, \text{ 其中 } \varepsilon \text{ 为空串,} \\ \theta(s\sigma) = \begin{cases} \theta(s)\sigma, & \text{如果 } \sigma \in \Psi(\delta(x_0, s)), \\ \theta(s), & \text{否则.} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

3 离散事件系统的不透明性

在文献[2]中,Lin给出在离散事件系统框架下强不透明性与弱不透明性概念。

定义 3 给定两个语言 $L, K \subseteq L(G)$,称 L 关于 K 与 θ 为强不透明,如果下列条件成立:

$$L \subseteq \theta^{-1}\theta(K). \quad (8)$$

直观上, L 关于 K 与 θ 为强不透明是指 L 中的每一个串在 θ 下与 K 中的部分串会使观察者不可分辨。

定义 4 给定两个语言 $L, K \subseteq L(G)$,称 L 关于 K 与 θ 为弱不透明,如果下列条件成立:

$$L \cap \theta^{-1}\theta(K) \neq \emptyset. \quad (9)$$

如果 L 关于 K 与 θ 不是弱不透明的,则称 L 关于 K 和 θ 不具有不透明性,即

$$L \cap \theta^{-1}\theta(K) = \emptyset. \quad (10)$$

直观上, L 关于 K 与 θ 为弱不透明是指 L 中的部分串在 θ 作用下与 K 中的部分串会使观察者无法分辨.

由于对于语言 $L, K \subseteq L(G)$, 有

$$L \subseteq \theta^{-1}\theta(K) \Leftrightarrow \theta(L) \subseteq \theta(K), \quad (11)$$

$$L \cap \theta^{-1}\theta(K) \Leftrightarrow \theta(L) \cap \theta(K) \neq \emptyset. \quad (12)$$

因此, 强不透明性和弱不透明性可分别通过判断 $\theta(L) \subseteq \theta(K)$ 或 $\theta(L) \cap \theta(K) \neq \emptyset$ 是否满足来验证.

4 粗糙集理论下的离散事件系统不透明性验证

对于 $L, K \subseteq L(G)$, 先构造 L 的自动机

$$G_1 = (\Sigma, X_1, \delta, \Psi_1, x_{10}, X_{1m}), \quad (13)$$

其中 $L_m(G_1) = L$. 由于对于包含语言 L 的原系统 G 来说, 系统中既存在可观转移, 也存在不可观转移. 因此, 为确定 G_1 的可观转移, 可根据 G 的可观转移来对 G_1 进行优化, 结果如下:

$$\begin{aligned} G_3 &= (\Sigma, X_3, \delta_3, \Psi_3, x_{30}, X_{3m}) = \\ &\text{ref}(G, G_1) = \\ &\text{Ac}(\Sigma, X \times X_1, \delta \times \delta_1, \Psi \cap \Psi_1, (x, x_0), (X \times X_{1m})), \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\text{ref}(\cdot)$ 表示优化结果, $\text{Ac}(\cdot)$ 表示可达部分, 对于 $x_3 = (x, x_1) \in X_3 = X \times X_1$, 有

$$\begin{aligned} \delta_3(x_3, \sigma) &= \delta((x, x_1), \sigma) = \\ &\begin{cases} (\delta(x, \sigma), \delta_1(x_1, \sigma)), & \text{若 } \delta_1(x_1, \sigma) \neq \emptyset, \\ \text{无定义}, & \text{否则;} \end{cases} \\ \Psi_3(x_3) &= \Psi((x, x_1)) = \Psi(x) \cap \Psi_1(x_1) = \Psi(x). \end{aligned}$$

由上述定义可知, $L_m(G_3) = L_m(G_1) = L$ 以及 $\sigma \in \Psi_3(x_3)$ 当且仅当转移 $\delta_3(x_3, \sigma)$ 可观.

同样地, 可构造 K 的生成器 G_2 为

$$G_2 = (\Sigma, X_2, \delta, \Psi_2, x_{20}, X_{2m}), \quad (15)$$

其中 $L_m(G_2) = K$, 并根据 G 的可观转移来对 G_2 进行优化, 得到优化后的自动机 G_4 如下:

$$G_4 = (\Sigma, X_4, \delta, \Psi_4, x_{40}, X_{4m}). \quad (16)$$

定义5 有限状态机信息系统(finite state machines-information system, FMS-IS)是一个信息系统. 其中论域 U 中的元素为有限状态机运行的路径, 属性 C 为有限状态机中的可观事件.

若属性 C 的值为 n (n 为自然数), 则它表示经过 θ 投影后的路径中的可观事件发生的次序. 如果经过 θ 投影后的路径中不存在的可观事件, 则属性值为0, 它表示没有可观事件在此路径中发生. 下面再用决策属性的值描述系统路径是否为秘密路径.

定义6 一个有限状态机决策表(finite state

machines-decision table, FSM-DT) 是一个决策系统, 其中论域 U 中的元素为有限状态机运行的路径, 条件属性 C 为有限状态机中的可观事件, 决策属性 D 为路径的秘密结果, 用 dia 表示, 如果所要表示的路径为秘密路径, 则 dia 的值为 L , 否则, dia 的值为 K .

根据 L 与 K 构造的自动机可分别得到的两个有限状态机决策表, 可将其合并为新的有限状态机决策表(finite state machines-decision table with L and K , FSM-DT- L, K).

定义7 给定一个决策表 $T = (U, A, V, f)$, 定义 $d_X: A \rightarrow V$ 为决策函数, 使得 $d_X(a) = a(x)$, 其中 $a \in A, X \subseteq U, x \in U$, 称 d_X 是 T 上的一条决策规则. 若 $a \in C \subset A$, 则记 $d_X|C$, 它是决策规则的条件部分; 若 $a \in D \subset A$, 则记 $d_X|D$, 它是决策规则的结论部分.

定义8 如果对于任一元素 $y \neq x, d_X|C = d_Y|C \rightarrow d_X|D = d_Y|D$, 则称 d_X 是一致的, 否则 d_X 是不一致的.

一致性决策规则说明条件值相同必须隐含着决策值相同, 即决策规则完全依赖于条件值.

定理1 给定两个语言 $L, K \subseteq L(G)$, L 关于 K 与 θ 为强不透明当且仅当在FSM-DT- L, K 表中, 任意 $d_X|D = L$ 的元素 x , 其 d_X 是不一致的.

证 先用反证法证明必要性. 设 L 关于 K 和 θ 为强不透明, 且在FSM-DT- L, K 表中, 存在一个 $d_X|D = L$ 的元素 x , 使得其 d_X 是一致的. 根据定义8可知, 对于任一元素 $y \neq x$, 如果 y 与 x 的条件值相同, 那么它们对应的决策值必须相同且都为 L . 由于元素 x 与 y 的条件值相同且为有限状态机中路径 s_1 与 s_2 关于 θ 的投影, 因此路径 s_1 与 s_2 的 θ 投影相等. 由此可知 K 中不存在任一路径 s_3 , 使得路径 s_1 与 s_3 的 θ 投影相等, 即 $\theta(L) \not\subseteq \theta(K)$, 这与假设 L 关于 K 与 θ 为强不透明矛盾.

下面再用反证法证充分性. 设在FSM-DT- L, K 表中, 任意 $d_X|D = L$ 的元素 x , 其 d_X 是不一致的, 且 L 关于 K 与 θ 不为强不透明. 根据定义3可知, L 中至少存在一条路径 s_1 不能与 K 中任一路径 s_2 在 θ 投影下相等. 而路径 s_1 与 s_2 的 θ 投影分别为元素的 x 与 y 的条件值, 其中 $d_X|D = L, d_Y|D = K$. 根据上述可知元素 x 与 y 在决策值不相等时, 条件值不能相等. 相反, 对于元素 x 与任一元素 $y \neq x$, 在 x 与 y 的条件值相等的情况下, 其决策值必定相等. 根据定义8可知, d_X 是一致的, 这与假设相矛盾.

定理2 给定两个语言 $L, K \subseteq L(G)$, L 关于 K 与 θ 为弱不透明当且仅当在FSM-DT- L, K 表中, 存在一个 $d_X|D = L$ 的元素 x , 其 d_X 是不一致的.

证 先用反证法证明必要性. 设 L 关于 K 与 θ 为弱不透明, 且在FSM-DT- L, K 表中, 任意一个 $d_X|D =$

L 的元素 x ,其 d_x 是一致的.根据定义8可知,对于任一元素 $y \neq x$,如果 y 与 x 的条件值相同,那么它们对应的决策值必须相同且为 L .由于元素 x 与 y 的条件值相同且为有限状态机中路径 s_1 与 s_2 的 θ 投影,因此路径 s_1 与 s_2 的 θ 投影相等.由此可知在 K 中都不存在一路径 s_3 ,使得任意 s_1 与 s_3 的 θ 投影相等,即 $\theta(L) \cap \theta(K) = \emptyset$,这与假设 L 关于 K 与 θ 为弱不透明矛盾.

下面再用反证法证充分性.设在FSM-DT- L, K 表中,存在一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是不一致的,且 L 关于 K 与 θ 不为弱不透明.根据定义4可知, L 中任意一条路径 s_1 ,都不能与 K 中任一路径 s_2 在 θ 投影下相等.而路径 s_1 与 s_2 的 θ 投影分别为元素 x 与 y 的条件值,其中 $d_x|D=L, d_x|D=K$.根据上述可知元素 x 与 y 在决策值不相等时,条件值不能相等.相反,对于任意 $d_x|D=L$ 的元素 x 和任意元素 $y \neq x$,都有 $d_x|C=d_y|C \rightarrow d_x|D=d_y|D$ 成立.根据定义8可知,其 d_x 是一致的,这与假设存在一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 为不一致的矛盾.

定理3 给定两个语言 $L, K \subseteq L(G), L$ 关于 K 与 θ 不具有不透明性当且仅当在FSM-DT- L, K 表中,任意一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是一致的.

证 先用反证法证明必要性.设 L 关于 K 与 θ 不具有不透明性.且在FSM-DT- L, K 表中,存在一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是不一致的.根据定理2可得, L 关于 K 与 θ 为弱不透明,这与假设 L 关于 K 与 θ 不具有不透明性矛盾.

下面再用反证法证充分性.设在FSM-DT- L, K 表中,任意一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是一致的,且 L 关于 K 与 θ 具有不透明性.若 L 关于 K 与 θ 为弱不透明,根据定理2可得,在FSM-DT- L, K 表中,存在一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是不一致的.这与假设相矛盾.若 L 关于 K 与 θ 为强不透明,根据定理1可知,在FSM-DT- L, K 表中,任意 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是不一致的,这也与假设相矛盾.

下面具体给出验证离散事件系统是否具有不透明性算法.

算法1 关于离散事件系统 G 是否具有不透明性的验证方法.

输入:

$$G = (\Sigma, X, \delta, x_0, X_m),$$

$$G_1 = (\Sigma, X_1, \delta, \Psi_1, x_{10}, X_{1m}),$$

$$G_2 = (\Sigma, X_2, \delta, \Psi_2, x_{20}, X_{2m}),$$

其中: $L_m(G_1) = L, L_m(G_2) = K$.

输出:

强- L 关于 K 和 θ 为强不透明;

弱- L 关于 K 和 θ 为弱不透明;

否- L 关于 K 和 θ 不具有不透明性.

第1步 根据式(14),构建 $G_3 = \text{ref}(G, G_1)$;

第2步 根据式(18),构建 $G_4 = \text{ref}(G, G_2)$;

第3步 根据定义6分别得到 G_3 与 G_4 的决策表,然后将其合并得到关于 L 与 K 的决策表FSM-DT- L, K ;

第4步 若在FSM-DT- L, K 表中,任意 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 都不一致,则输出为“强”(即 L 关于 K 和 θ 为强不透明),若存在一个 $d_x|D=L$ 的元素 x ,其 d_x 是一致的,则输出为“弱”(即 L 关于 K 和 θ 为弱不透明),否则输出为“否”(即 L 关于 K 和 θ 不具有不透明性),算法结束.

注1 在算法1中,对于给定系统 G ,第1步和第2步中的 $G_3 = \text{ref}(G, G_1)$ 和 $G_4 = \text{ref}(G, G_2)$ 操作的复杂度分别为 $O(|X||X_1||\Sigma|)$ 和 $O(|X||X_2||\Sigma|)$,其中 $|X|$ 为系统 G 的状态数, $|X_1|$ 为系统 G_1 的状态数, $|X_2|$ 为系统 G_2 的状态数, Σ 为系统 G 的事件数.第4步则主要是通过元素比较来寻找FSM-DT- L, K 中的不一致元素,而该操作的复杂度为 $O(|t|^2|A|)$,其中 t 为语言 L 与 K 中字符串的数量之和, A 为决策表FSM-DT- L, K 的属性数.因此,算法1的复杂度为 $O(|X|(|X_1|+|X_2|)|\Sigma|+|t|^2|A|)$.该算法与文献[2]与[5]的方法相比,不仅适用于强、弱两种不透明性的验证,而且在算法复杂度上也具有明显的提高.

5 实例分析

下面通过具体实例阐述上述离散事件系统不透明性的验证方法.

例1 考虑如图1所示离散事件系统 G ,其中:

$$\Sigma_o = \{a, b, c, d, e\},$$

$$\Sigma_{uo} = \{u_1, u_2\}.$$

假设

$$L = \{au_1bd, abdu_1, abc u_2d\},$$

$$K = \{abu_2d, abcdu_1, abccdu_1e\}.$$

下面根据算法1验证 L 与 K 之间的不透明性.

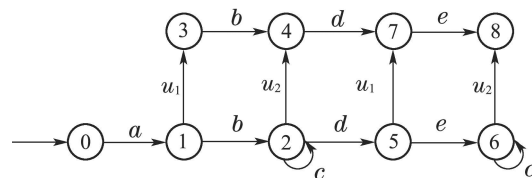


图1 离散事件系统 G

Fig. 1 Discrete-event system G

根据给定的语言 L 与 K ,先构造系统 G_1 与 G_2 ,如图2-3所示(其中用双圆圈表示可接受状态),然后根据式(14)和式(18)得到对应的自动机 G_3 与 G_4 ,见图4-5(其中用双方框表示可接受状态).根据定义7,可分别得出与的有限状态机信息系统,如表1-2所示.

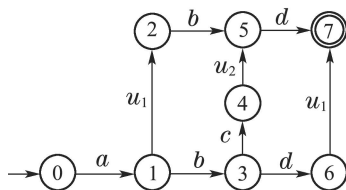


图 2 自动机 G_1
Fig. 2 Automata G_1

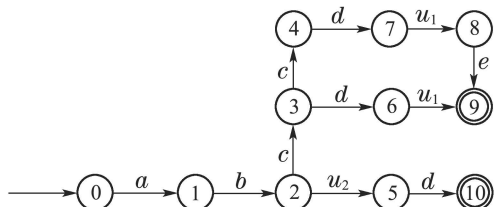


图 3 自动机 G_2
Fig. 3 Automata G_2

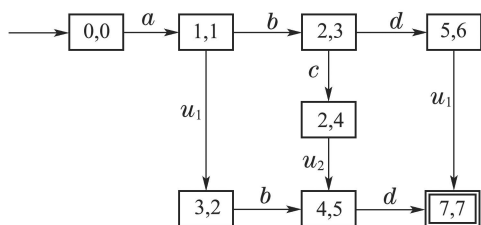


图 4 自动机 G_3
Fig. 4 Automata G_3

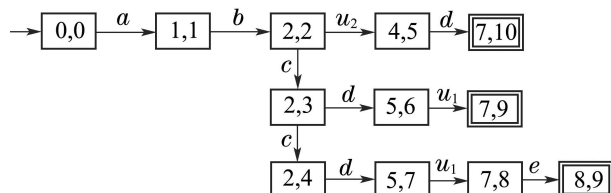


图 5 自动机 G_4
Fig. 5 Automata G_4

表 1 系统 G_3 的 FMS-IS
Table 1 FMS-IS of G_3

U	a	b	c	d	e
1	1	2	0	3	0
2	1	2	0	3	0
3	1	2	3	4	0

表 2 系统 G_4 的 FMS-IS
Table 2 FMS-IS of G_4

U	a	b	c	d	e
1	1	2	0	3	0
2	1	2	3	4	0
3	1	2	3,4	5	6

根据得到的自动机 G_3 与 G_4 的有限状态机信息表, 先为其分别加入决策属性值设为 L 与 K 的决策属性,

从而分别得到自动机 G_3 与 G_4 的有限状态机决策表, 接着将其进行合并, 得到关于 L 与 K 的决策表 FSM-DT- L, K , 如表 3 所示.

表 3 例 1 中关于 L 与 K 的决策表 FSM-DT- L, K
Table 3 FSM-DT- L, K with respect to L and K

U	a	b	c	d	e	结果
1	1	2	0	3	0	L
2	1	2	0	3	0	L
3	1	2	3	4	0	L
4	1	2	0	3	0	K
5	1	2	3	4	0	K
6	1	2	3,4	5	6	K

由表 3 可知, $d_x|D=L$ 的元素分别为元素 1、元素 2 以及元素 3. 对于元素 1 与元素 2, 它们都与元素 4 都具有相同的条件值 (1 2 0 3 0), 但与元素 4 的决策值不相同. 而对于元素 3, 它与元素 5 具有相同的条件值 (1 2 3 4 0), 但与元素 5 的决策值不相同, 即元素 1, 2 和 3 都是不一致的. 因此, 根据算法 1, L 关于 K 和 θ 为强不透明.

例 2 考虑例 1 中的离散事件系统 G , 假设

$$L = \{au_1bd, abdu_1e, abc u_2d\},$$

$$K = \{abu_2d, abcd u_1, abc u_2de\}.$$

类似例 1 可构造关于 L 与 K 的 FSM-DT- L, K 表以验证 L 与 K 之间的不透明性, 如表 4 所示.

表 4 例 2 中关于 L 与 K 的决策表 FSM-DT- L, K
Table 4 FSM-DT- L, K with respect to L and K

U	a	b	c	d	e	结果
1	1	2	0	3	0	L
2	1	2	0	3	4	L
3	1	2	3	4	0	L
4	1	2	0	3	0	K
5	1	2	3	4	0	K
6	1	2	3	4	5	K

由表 4 可知, $d_x|D=L$ 的元素分别为元素 1、元素 2 与元素 3. 对于元素 1, 它与元素 4 具有相同的条件值 (1 2 0 3 0). 对于元素 2, 由于不存在任何元素 y 与元素 2 条件值相同而决策值不同, 所以元素 2 是一致的. 对于元素 3, 它与元素 5 具有相同的条件值 (1 2 3 4 0), 而与元素 5 的决策值不相同. 因此, 根据算法 1 得, L 关于 K 和 θ 具有弱不透明性, 但不具有强不透明性.

为将算法 1 与文献 [2] 与文献 [6] 中算法进行对比, 我们将文献 [2] 与文献 [6] 的算法施加于例 1 与例 2, 根据它们运行时的状态转移数和所使用的存储空间, 分别得到各算法验证例 1 与例 2 中系统不透明性的时间复杂度和空间复杂度, 如表 5 所示 (由于文献 [6] 中的算

法只能用于验证弱不透明性, 所以它对例1的强不透明性验证不适用).

表5 算法复杂性对比

Table 5 Comparison of the complexity of algorithms

	例1时间 复杂度/ms	例2时间 复杂度/ms	例1空间 复杂度/B	例2空间 复杂度/B
本文算法	26	26	86	86
文献[2]算法	58	57	234	230
文献[6]算法	—	233	—	782

由表5可知, 算法1与文献[2]与文献[6]中的算法相比, 在时间复杂度与空间复杂度上均有较大降低.

6 总结

本文将粗糙集理论作为知识提取工具, 提出了一种基于粗糙集理论的离散事件系统不透明性验证方法. 利用粗糙集理论对离散事件系统以信息表以及决策表的形式进行表示, 得到一个关于离散事件系统不透明性的充分必要条件, 并由此给出了一个验证离散事件系统不透明性的算法.

参考文献:

- [1] BRYANS J W, KOUTNY M, RYAN P Y A. Modelling opacity using petrinets. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2005, 121: 101 – 115.
- [2] LIN F. Opacity of discrete event systems and its applications. *Automatica*, 2011, 47(3): 496 – 503.
- [3] SABOORI A, HADJICOSTIS C N. Notions of security and opacity in discrete event systems. *IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007: 5056 – 5061.
- [4] SABOORI A, HADJICOSTIS C N. Verification of K-step opacity and analysis of its complexity. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(3): 549 – 559.
- [5] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(9): 1555 – 1575.

- [6] ZHANG B, SHU S, LIN F. Polynomial algorithms to check opacity in discrete event systems. *Chinese Control and Decision Conference*. Taiyuan: IEEE, 2012: 763 – 769.
- [7] PAWLAK Z. Rough sets: Basic notion. *Computer and Information Sciences*, 1982, 11(5): 341 – 356.
- [8] KE Konlin, FENG ZonXian. Five-category classification of loan risk based on integration of rough sets and neural network. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 759 – 763.
(柯孔林, 冯宗宪. 基于粗糙集和神经网络集成的贷款风险5级分类. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 759 – 763.)
- [9] WANG Guoyin, YAO Yiyu, YU Hong. A survey on rough set theory and applications. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(7): 1229 – 1246.
(王国胤, 姚一豫, 于洪. 粗糙集理论与应用研究综述. 计算机学报. 2009, 32(7): 1229 – 1246.)
- [10] ZHAO R, LIU F, LIU Z. Relative diagnosability of discrete-event systems and its opacity-based test algorithm. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2017, 15(4): 1693 – 1700.
- [11] LIU Fuchun. Realization of bisimilarity control of nondeterministic discrete event systems. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(1): 75 – 79.
(刘富春. 非确定离散事件系统双模拟控制的实现. 控制理论与应用. 2015, 32(1): 75 – 79.)
- [12] LIU Fuchun, LUO Ping. Polynomial-time verification of safe diagnosability of discrete event systems. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(6): 717 – 722.
(刘富春, 罗苹. 具有多项式时间复杂性的离散事件系统安全诊断. 控制理论与应用, 2017, 34(6): 717 – 722.)
- [13] GENG X, OUYANG D, ZHANG Y. Model-based diagnosis of incomplete discrete-event system with rough set theory. *Science China (Information Sciences)*, 2017, 60(1): 012205.

作者简介:

刘富春 教授, 博士生导师, 目前研究方向为算法分析与设计、离散事件系统监控与故障检测理论与应用, E-mail: fliu2011@163.com;

赵毅澎 硕士研究生, 目前研究方向为算法分析与设计、离散事件系统监控与故障检测理论与应用, E-mail: 3241984272@qq.com;

赵锐 讲师, 目前研究方向为算法分析与设计、离散事件系统监控与故障检测理论与应用, E-mail: zhaorui118204@163.com.