

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201512025



格值自动机的产生式推理建模方法

戴茵茵, 彭翔, 王飞

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对多规则多结论的复杂产生式推理, 将形式化语言识别能力和产生式推理结合起来, 提出一种基于格值自动机的产生式推理建模方法. 首先, 利用格值自动机理论优点, 将复杂产生式推理过程用格值自动机的格值语言描述出来, 从而建立通用的产生式推理模型; 其次, 给出模型的规则间逻辑正确性验证方法, 以及模型随规则库更新而更新的方法; 最后, 用实例验证建模方法的正确性. 结果表明: 该方法可以充当专家系统的辅助决策系统, 具有较好的现实意义和实用价值.

关键词: 产生式推理; 格值自动机; 正确性验证; 故障诊断; 辅助决策

中图分类号: TP 271.8; TP 206.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0092-06

Modeling of Production Inference Based on Lattice Automata

DAI Yinyin, PENG Xiang, WANG Fei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A modeling of complex production inference based on lattice automata is presented by combining the ability of the speech recognition and production inference. Firstly, production reasoning can be described by lattice automata languages using the theoretical advantage of the lattice automata, so a general model can be built. Then, the correctness verification of the logic among invoking rules is presented. Also the model updating method through the rules' increase and decrease is put forward. Finally, an instance analysis is made to verify the modeling validity. The result shows that the modeling method can be used as an aided decision-making system of fault diagnosis expert system. It has a good practical significance and value.

Keywords: production inference; lattice automata; correctness verification; fault diagnosis; aided decision-making

产生式规则推理在许多领域的专家系统中都能得到应用,但也存在推理效率较低、无法表示结构性知识等缺点^[1-2]. Pan 等^[3]用确定性自动机构建了继电器控制电路的产生式推理故障诊断模型,并用于区分控制电路中故障的种类. Kilic 等^[4]用模糊自动机构建了变压器故障诊断模型,结合故障的模糊产生式规则,确定故障的种类.然而,文献[3-4]都是针对特定的系统构建的模型,没有给出泛化的产生式推理建模方法. Chen^[5]利用 Petri 网构建了泛化的模糊加权产生式系统推理模型,但没有给出相应的模型更新或规则间逻辑正确性验证方法,实际运用起来有一定的局限性. 本文在文献[6]的基础上做出理论延伸,降低模型维数,增加逻辑正确性验证与模型更新方法,使之适于复杂的产生式系统.

收稿日期: 2015-12-21

通信作者: 戴茵茵(1976-),女,讲师,博士,主要从事电机设计、控制及电力电子应用的研究. E-mail: crystle@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203040)

1 问题的描述

对于电力网络,“设备”和“断路器”表示的拓扑结构^[7],如图 1 所示.图 1 中:CB①~CB⑨为断路器;L1~L3 为线路;B1~B4 为母线.当故障发生时,相应点的线路保护动作引起对应的断路器动作,切除故障点与电网的联接,从而达到保护电网的目的.同时,数据采集与监视控制(SCADA)系统采集各线路保护动作与断路器动作的数据,通过数据定位故障点,由推理系统完成.线路故障的产生式规则,如表 1 所示.

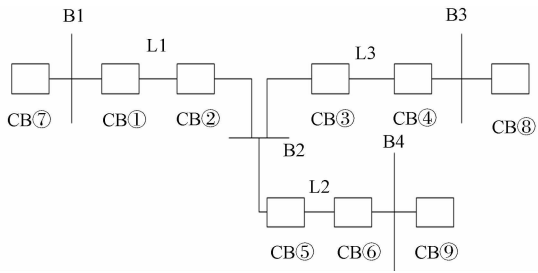


图 1 输电线路实例

Fig. 1 Instance model of electricity networks

表 1 线路保护动作与断路器动作的产生式规则

Tab. 1 Production rules of protection and circuit breaker

规则	前件	后件
1	if 线路送端主保护和受端主保护均动作	then 保护方式 1 正常
2	if 线路送端主保护和受端近后备保护均动作	then 保护方式 2 正常
3	if 线路送端近后备保护和受端主保护均动作	then 保护方式 3 正常
4	if 线路送端近后备保护和受端近后备保护均动作	then 保护方式 4 正常
5	if 线路送端主保护和受端远后备保护均动作	then 保护方式 5 正常
6	if 线路送端远后备保护和受端主保护均动作	then 保护方式 6 正常
7	if 线路送端近后备保护和受端远后备保护均动作	then 保护方式 7 正常
8	if 线路送端远后备保护和受端近后备保护均动作	then 保护方式 8 正常
9	if 保护方式 1 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
10	if 保护方式 2 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
11	if 保护方式 3 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
12	if 保护方式 4 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
13	if 保护方式 5 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
14	if 保护方式 6 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
15	if 保护方式 7 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障
16	if 保护方式 8 正常且对应的断路器均跳闸	then 线路故障

将产生推理系统中的规则、每条规则前提中的条件,以及结论中的每个小结论进行排序,分别记为前提集 $A=\{a_{ij} \mid i \text{ 为第 } i \text{ 条规则}, j \text{ 为该条规则的第 } j \text{ 个条件}\}$ 与结论集 $C=\{c_{m_n} \mid m \text{ 为第 } m \text{ 条规则}, n \text{ 为该条规则的第 } n \text{ 个结论}\}$. 在一个产生式规则中,若前提和结论不止一个,则将多个前提看作是一个个条件,前提中的每个条件都满足,则该规则前提满足;同样,结论也可能是多个.当前提满足时,则所有的小结论满足.以规则 1 为例,if a_{1_1} and a_{1_2} , then C_{1_1} .

由产生式规则相关定义可知,若存在前提与结论关联的情况,即若 $\exists a_{ij} \in A, c_{m_n} \in C$,使得 $a_{ij} = c_{m_n}$ ($m, n, i, j=1, 2, 3, \cdots$),则当 $i \neq m$ 时, $a_{ij} = c_{m_n}$ 成立.故得如下定义 1.

定义 1 在产生式系统推理中,某些规则中的前提或前提中的条件的满足需要其他规则的结论或结论中的一个小结论成立,则称这样的结论或结论中的小结论为中间结论.

中间结论所对应的既是某个规则结论,也是另外某个规则的条件,记 $B=\{b_{m_n} \mid \exists a_{ij} \in A, c_{m_n} \in C, \text{使得 } a_{ij} = b_{m_n} = c_{m_n}, \text{其中}, i \neq m; m, n, i, j=1, 2, 3, \cdots\}$, $C_d=\{c_{m_n} \mid c_{m_n} \in C, \forall c_{m_n} \neq b_{k_1}\}$ 为不含中间结论的后件集, $A_d=\{a_{ij} \mid a_{ij} \in A, \forall a_{ij} \neq b_{m_n}\}$ 为不含中间结论的前件集.易知 $B=\{b_{1_1}, b_{2_1}, b_{3_1}, b_{4_1}, b_{5_1}, b_{6_1}, b_{7_1}, b_{8_1}\}$, $A_d=\{a_{ij} \mid \text{当 } i \in \{9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\} \text{ 时}, j \neq 1\}$.

基于中间结论,可得如下定义 2.

定义 2 在规则产生式推理中,系统从推理开始到推理结束,经过多个前置结论,进而能获得任一个最终结论的路径,称为推理路径.

基于格值自动机^[8-9],推理机模型定义为

$$G = (Q, E, \delta, \Sigma, L, q_0, q_f, Q_c, \alpha).$$

(1)

式(1)中: $E = E_r \cup \{f\}$, f 为推理结束事件, $E_r = \{e_{m_n} \mid m \text{ 为第 } m \text{ 条规则}, n \text{ 为该条规则的第 } n \text{ 个结论}\}$ 为给定规则触发事件集; $\Sigma = A_d \cup \{\sigma\}$ 为有限综合条件集, σ 是 Σ 的么元, 表示条件输入结束; $L = (2^\Sigma, \subseteq)$ 为格值自动机推理模型的有限格; $q_0 \in Q$ 为初始状态, 表示推理机的准备就绪状态; $q_f \in Q$ 为终止状态, 表示推理机的推理结束状态; $Q_c = \{q_{m_n} \mid m \text{ 为第 } m \text{ 条规则}, n \text{ 为该条规则的第 } n \text{ 个结论}\} \in Q$ 为结论成立状态集, 表示到此状态得到对应的结论; $\alpha: Q_c \rightarrow C$ 为映射, 满足 $\alpha(q_{m_n}) = c_{m_n}$.

按上述定义, 规则 1 与规则 9 的构造推理机, 如图 2, 3 所示.

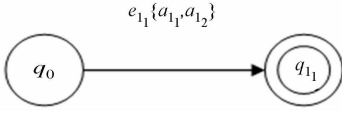


图 2 规则 1 的推理机

Fig. 2 Inference engine of rule 1

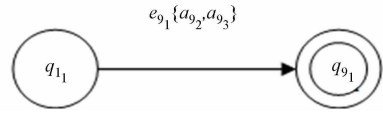


图 3 规则 9 的推理机

Fig. 3 Inference engine of rule 9

对于每个规则的推理机, 构造转移 $\delta(q_{m_n}, f) = q_f$, 其中, $m = 9, \dots, 16; n = 1$.

2 建模流程

格值自动机的逻辑且关系的构建, 如图 4 所示. $L(a_1) = \{1\}$, $L(a_2) = \{2\}$. 由图 4 可知: 若 a_1 在 a_2 前面, 则 $L(a_1) = L(a_2) \cup L(a_1) = \{1, 2\}$; 反之, 则 $L(a_2) = \{1, 2\}$. 将两个条件的且关系推广到 n 个条件, 那么, 任一路径开头接受的格值语言输入为所有且关系格值的并集. 即有 $L_a = L(a_1) \cup L(a_2) \cup \dots \cup L(a_n)$, 对于任一路径中的事件 a_n , 按照其位置, 更新 $L(a_n)$ 如下, 即

1) 令 $L_{pre} = \emptyset, x = 1$;

2) 按此路径事件的先后顺序, 取第 x 个事件 $a_y, y \in \{1, 2, \dots, n\}$,

令 $L(a_y) = L_a - L_{pre}, L_{pre} = L_{pre} \cup \{a_y\}$, 若 $x < n, x = x + 1$, 转 2);

3) 若 $x = n$, 则结束.

按照上述方法, 将会产生 A_n^n 个事件状态序列, 即为 A_n^n 条路径.

定义 3 基于一般自动机的输入等价原则^[10], 格值自动机在进行状态合并前, 原状态输入事件的格值对应相等, 称为格值自动机的输入等价原则.

建模有如下 5 个步骤.

步骤 1 对于每个规则触发事件, 构造映射 $e_{m_n} \rightarrow L$, 若 $\exists a_{m_j} \in A_d$, 则 $L(e_{m_n}) = \{a_{m_j} \mid a_{m_j} \in A_d\}$; 若 $\forall a_{m_j} \notin A_d$, 则 $L(e_{m_n}) = \emptyset$.

步骤 2 令 $Q_{old} = Q_c$, 构造产生式推理系统中每一个结论所需输入条件的转移关系如下, 即

1) 若 $Q_{old} = \emptyset$, 则转步骤 4; 若 $Q_{old} \neq \emptyset$, 则转步骤 2.

2) 任取 $q_{m_n} \in Q_{old}, Q_{old} = Q_{old} - q_{m_n}$. 如果 $\forall a_{m_j} \in A_d$, 则 $\delta(q_0, e_{m_n}) = q_{m_n}$, 转步骤 1; 如果 $\exists a_{m_j} \notin A_d$, 转步骤 3.

3) 必然存在一个或多个 $a_{m_j} = \alpha(q_{k_l})(j, k, l = 1, 2, 3, \dots)$, 对于任一个 $a_{m_j} = \alpha(q_{k_l})$, 令 $\delta(q_{k_l}, e_{m_n}) = q_{m_n}, L(e_{k_l}) = L(e_{k_l}) \cup L(e_{m_n})$. 若存在多个 $a_{m_j} (j = 1, 2, 3, \dots)$, 使得 $a_{m_j} = \alpha(q_{k_l})(k, l = 1, 2, 3, \dots)$, 对于其中任一 $a_{m_j} = \alpha(q_{k_l})$, 令 $\delta(q_{k_l}, e_{m_n}) = q_{m_n}, L(e_{k_l}) = L(e_{k_l}) \cup L(e_{m_n})$. 同时, 把 q_{k_l} 所对应的 e_{k_l} 按逻辑且关系处理, 将所得的任一路径的最后一个状态替为 q_{m_n} , 转步骤 1.

4) 构造 $\delta(q_{m_n}, f) = q_f, s. t. \alpha(q_{m_n}) \in C_d$, 结束.

步骤 3 从上述结论对应所需条件的转移关系可知, 总存在从 q_0 到 q_f 的状态事件序列, 形成推理路径, 若其可接受的格值为 L_a , 则更新此条路径的所有条件的格值. 同时, 利用输入等价原则合并初始状态 q_0 与终止状态 q_f , 对合并后的结论状态 q 的映射 $\alpha(q)$ 取并集.

步骤 4 获得所有 $\delta(q_0, e_{m_n}) = q_{m_n}$, 令 e_{m_n} 的格值 $L(e_{m_n}) = \Sigma$, 如果有 $L(e_{m_n}) \neq \emptyset$, 那么, 增加 e_{m_n} , 满足 $\delta(q_{i_j}, e_{m_n}) = q_{m_n}$, 并有 $q_{i_j} \in Q_c, L(e_{i_j}) \not\subseteq L(e_{m_n})$.

步骤 5 对于结论状态 q_{m_n} , 若有 $L(e_{m_n}) \neq \emptyset$, 则在该状态上引入 e_{m_n} 的自循环, 并添加输出事件 f , 使得 $\delta(q_{m_n}, f) = q_f$.

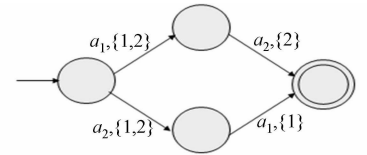


图 4 逻辑 a_1 且 a_2

Fig. 4 Logic a_1 and a_2

利用上述建模步骤,可获得 8 条从 q_0 到 q_f 的推理序列. 合并序列,并更新每个事件的格值,根据输入的等价原则化简,可获得模型,如图 5 所示(只画出 q_{11} 的所有输入和 $f\{\sigma\}$ 输出事件,但没有标示具体的事件). 图 5 中: $L(e_{1_1})=\{a_{1_1}, a_{1_2}, a_{9_2}, a_{9_3}\}; L(e_{2_1})=\{a_{2_1}, a_{2_2}, a_{10_2}, a_{10_3}\}; L(e_{3_1})=\{a_{3_1}, a_{3_2}, a_{11_2}, a_{11_3}\}; L(e_{4_1})=\{a_{4_1}, a_{4_2}, a_{12_2}, a_{12_3}\}; L(e_{5_1})=\{a_{5_1}, a_{5_2}, a_{13_2}, a_{13_3}\}; L(e_{6_1})=\{a_{6_1}, a_{6_2}, a_{14_2}, a_{14_3}\}; L(e_{7_1})=\{a_{7_1}, a_{7_2}, a_{15_2}, a_{15_3}\}; L(e_{8_1})=\{a_{8_1}, a_{8_2}, a_{16_2}, a_{16_3}\}; L(e_{9_1})=\{a_{9_2}, a_{9_3}\}; L(e_{10_1})=\{a_{10_2}, a_{10_3}\}; L(e_{11_1})=\{a_{11_2}, a_{11_3}\}; L(e_{12_1})=\{a_{12_2}, a_{12_3}\}; L(e_{13_1})=\{a_{13_2}, a_{13_3}\}; L(e_{14_1})=\{a_{14_2}, a_{14_3}\}; L(e_{15_1})=\{a_{15_2}, a_{15_3}\}; L(e_{16_1})=\{a_{16_2}, a_{16_3}\}.$

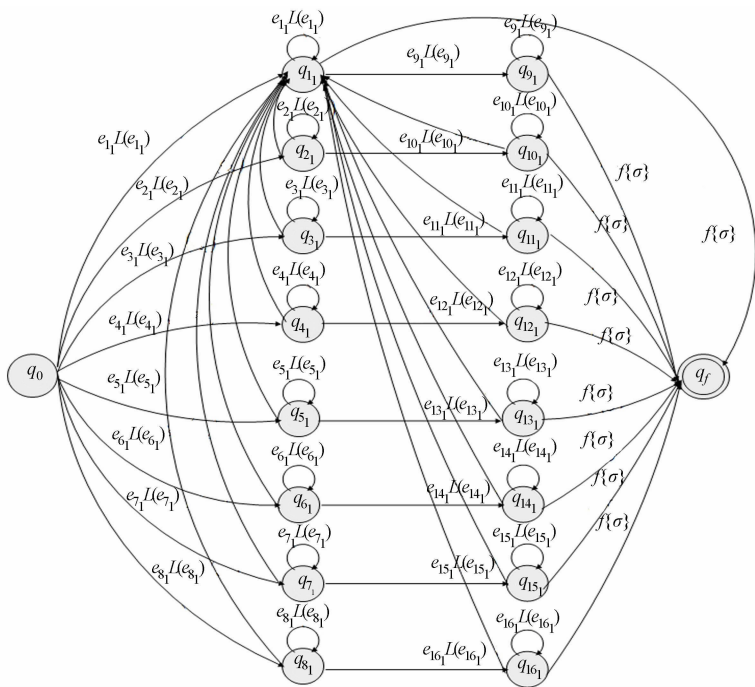


图 5 线路故障诊断模型
Fig. 5 Fault diagnosis model of line

3 规则间逻辑正确性的验证

由于模型基于规则库构建的,若规则间的前提与结论存在逻辑性的错误,则影响推理的正确性. 因此,须先验证规则间逻辑正确性. 基于格值语言而进行的逻辑上的正确性验证,是基于模型检测的一种形式化方法^[11].

由建模的过程可知:对于任意一个格值自动机模型 G 中的任一推理路径 $q_0 e_x q_x \cdots e_y q_y f q_f (e_x, e_y, q_x, q_y$ 分别代表推理系统中某些规则的条件与对应的某个结论),由于 q_f 为标识状态,则有相应的标识格值语言 $L_M(G)=L(e_x) \cap \cdots \cap L(e_y) \cap L(f)$;同时,根据系统中的规则与规则间的关系,构建包含关系 $L(f) \subseteq L(e_y) \subseteq \cdots \subseteq L(e_x)$,若 $L_M(G) \neq \emptyset$,则说明包含关系是正确的,即该事件状态序列所包含的规则与规则间的逻辑关系是完整且正确的. 据此,有如下结论 1.

结论 1 对于使得 $(q_0, \theta) = q_f$ 的规则事件串 θ ,若其所对应的标识格值语言 $L_M(\theta) \neq \emptyset$,则该模型对应的产生式系统规则间的逻辑是正确的.

由前述模型,易知前述 16 个规则间的逻辑关系正确.

4 推理的实现方法

由推理模型的构造方法可知,格值自动机初始状态可接受的格值语言输入是 A_d 上的串 ω_d 及输入结束标志 σ (σ 是输入信息后自动添加的),则在初始状态下,其可接受的输入为 $\omega = \omega_d \cdot \sigma$,并由状态转移关系,给出如下结论 2,3.

结论 2 若 $\forall a_{m_j} \in A_d$, 有 $a_{m_j} \in \omega_r$, 则第 m 条规则的第 n 条结论所对应的规则触发事件 e_{m_n} 触发, 使 $\delta(q, e_{m_n}) = q_{m_n}$ 成立, 自动机进入状态 q_{m_n} . 若 $\forall a_{m_j} \notin A_d$, 则 $\delta(q, e_{m_n}) = q_{m_n}$ 也成立, 自动机进入 q_{m_n} 状态.

结论 3 当格值自动机处于任意状态 q 时, 接受格值输入结束标志 σ , 若 $\delta(q, f)$ 存在, 则 $\delta(q, f) = q_f$, q_f 即为推理结束状态; 若 $\delta(q, f)$ 不存在, 则说明输入条件有误, 无法获得推理结果, 无法到达推理结束状态 q_f , 推理结束.

若输入条件后, 格值自动机从初始状态转移到了终止状态, 那么, 在得到的从 q_0 到 q_f 的状态序列中, 所有状态的并集构成输入条件后所得到的 Q_c , 由映射 $\alpha: Q_c \rightarrow C$, 可得结论集合 C , 由此获得多规则多结论的产生式推理目标.

对于格值自动机模型, 综合前件集 $\Sigma = A_d \cup \{\epsilon\}$, 则初始可接受格值为 2^Σ . 易知当输电线路某处发生故障时, 若 SCADA 系统采集到断路器 CB①, CB③, CB⑤的动作信息, 并采集到线路 L1 的送端主保护、L2 的送端远后备保护和 L3 的送端远后备保护动作. 根据当前的故障信息及图 5 可知: 线路 L1 或母线 B3 可能故障. L1 保护动作及对其应断路器动作事件表, 如表 2 所示.

表 2 L1 保护动作及对其应断路器动作事件表
Tab. 2 Event list of L1's protection and corresponding circuit breaker

保护种类	送端主保护	受端主保护	送端近后备保护	受端近后备保护	送端远后备保护	受端远后备保护
对应断路器代号	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5	CB6

结合线路 L1 的物理意义与故障诊断模型, 易得线路 L1 的故障推理模型. 将采集的故障信息输入线路 L1 的推理模型中, 此时模型接受的格值输入为 $a_{2_1} a_{2_2} a_{10_2} a_{10_3} \epsilon$, 状态事件序列为 $q_0 e_{2_1} q_{2_1} e_{10_1} q_{10_1} f q_f$, 得到线路 L1 的保护方式 2 正常启动. 同时, 格值自动机转移到终止状态, 表示线路 L1 发生了故障, 至此诊断结束.

5 模型的更新方法

当系统或设备的运行策略发生改变时, 需增减部分规则, 此时, 对部分事件状态进行增减, 可以减少建模的复杂性, 具体更新有如下 2 个步骤.

步骤 1 规则库中增加规则.

- 1) 对于新增的所有规则, 若一条规则有 n 条结论, 那么, 将其分为 n 个单结论的规则.
- 2) 对于新增的每一条单结论规则, 将其前件、后件分别纳入前提集、结论集、中间结论集中.
- 3) 对于新增的每一条单结论规则, 设转移触发事件为 e_x , 结论成立状态为 q_x . 构造 $\delta(q_x, f) = q_f$, 若其前件需要其他规则的结论成立, 则可构造状态转移, 见节 2 建模过程中的步骤 2 中 3); 若其前件不需要其他规则的结论成立, 则直接构造转移 $\delta(q_0, e_x) = q_x$. 构造完毕后, 在包含 $e_x q_x$ 的事件状态序列的推理路径上, 将处于 $e_x q_x$ 之前的事件格值进行更新.

步骤 2 规则库减少一条规则.

若此条规则的条件或结论中存在中间结论, 则在该规则所属的所有推理路径中, 将规则之后的所有事件状态序列剔除, 并对存在的每一条推理路径上的前一状态上添加事件输出 f , 然后, 进行模型整合; 若此条规则的条件或结论中不存在中间结论, 则剔除该条规则相关的事件状态.

规则库减少规则后应当进行模型的逻辑正确性验证, 若有 $L_M(\theta) = \emptyset$, 则说明减少该规则会使得推理模型出现逻辑错误.

在原产生式规则中加入推断母线 B3 故障的相关规则, 如表 3 所示. 母线 B3 的保护对应断路器代号为 CB2, CB3, CB5.

表 3 母线保护动作与断路器动作的产生式规则
Tab. 3 Production rules of protection and circuit breaker

规则	前件	后件
17	if 与母线直接相连的线路保护均动作	then 保护方式 9 正常
18	if 保护方式 9 正常且对应的断路器均跳闸	then 母线故障

按照上述模型更新方法, 对新增的两条规则, 构造推理机模型, 如图 6 所示.

将构造好的推理机模型进行模型合并整合, 得到的 L1 与母线 B3 的故障诊断模型, 如图 7 所示(部分状态的输入输出事件未画出)。

图 7 中: $L(e_{18_1}) = \{a_{18_2}, a_{18_3}, a_{18_4}\}$; $L(e_{17_1}) = \{a_{17_1}, a_{17_2}, a_{17_3}, a_{18_2}, a_{18_3}, a_{18_4}\}$ 。由图 7 可知: 当故障信息输入模型后, a_{17_2} 与 a_{17_3} 也包含在格值输入内; CB③与 CB⑤在规则 2 中对应的是线路 L1 的近后备保护, 即 a_{2_2} ; 母线 B3 的保护对应的是与母线相连的两个断路器保护, 在规则 17 中分别对应 a_{17_2} 与 a_{17_3} 。由于 e_{17_1} 事件发生的条件是 $a_{17_1}, a_{17_2}, a_{17_3}$ 同时存在于格值输入的串中, 所以 e_{17_1} 不会发生, 自动机的状态也不会转移到 q_{17_1} 状态, 更不会转移到 q_{18_1} 。综上所述, 母线 B3 没有发生故障, L1 发生故障。

6 结束语

在文献[6]的基础上, 作了理论的扩展。用格值自动机构建了产生式系统的推理模型, 并结合格值自动机的语言, 给出了产生式规则间逻辑正确性验证方法与模型随规则库更新的方法。这种方法拓宽了用自动机对产生式系统建模与推理的应用范围, 并且能更好地满足实际应用的需要。

参考文献:

[1] 李雷. 基于产生式规则的变压器故障诊断专家系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 9-52. DOI: 10. 7666/d. y1431429.

[2] 陈帅均. 基于专家系统的飞行器评估系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 66-82.

[3] PAN Xinglong, HE Guo, ZHANG Chaojie. Fault diagnosis of relay control circuit based on discrete event system [C]//International Workshop on Intelligent Systems and Applications. Wuhan: IEEE Press, 2009: 1-4. DOI: 10. 1109/IWISA. 2009. 5072866.

[4] KILIC E, OZGONENEL O, ULUTAS M. Fault identification in transformers through a fuzzy discrete event system approach[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems. London: IEEE Press, 2007: 1-6. DOI: 10. 1109/FUZZY. 2007. 4295575.

[5] CHEN S M. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2002, 14(2): 386-397. DOI: 10. 1109/69. 991723.

[6] 彭翔, 王飞. 有限状态自动机产生式推理的一般性建模方法[J]. 自动化仪表, 2014, 34(5): 9-12. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0380. 2014. 05. 004.

[7] 杨建维. 基于模糊 Petri 网的电网故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 37-66. DOI: 10. 7666/d. y2109084.

[8] 李永明. 格值自动机与语言[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2003, 13(4): 1-6. DOI: 10. 3321/j. issn: 1672-4291. 2003. 04. 001.

[9] HALAMISH S, KUPFERMAN O. Minimizing deterministic lattice automata[C]//Foundations of Software Science and Computational Structures. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 199-213. DOI: 10. 1145/2631915.

[10] WARE S, MALIK R. Conflict-preserving abstraction of discrete event systems using annotated automata[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2012, 22(4): 451-477. DOI: 10. 1007/s10626-012-0133-3.

[11] 朱少民. 软件测试方法和技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 70-76.

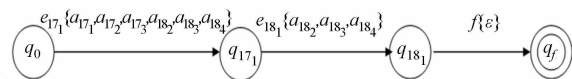


图 6 新增的推理机模型
Fig. 6 New inference engine

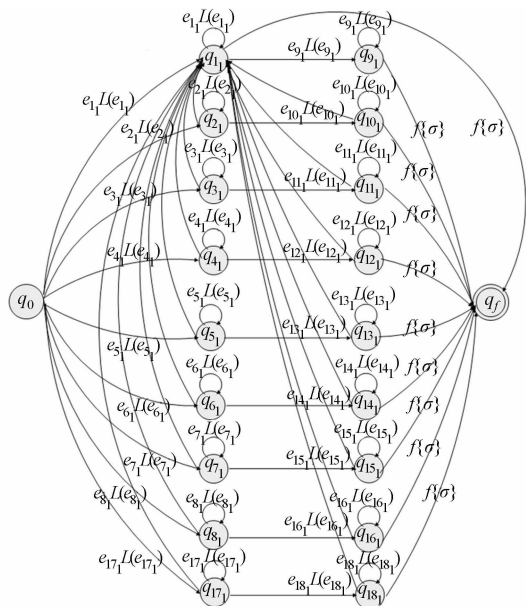


图 7 线路 L1 与母线 B3 的故障诊断模型
Fig. 7 Fault diagnosis model of L1 and B3