

Petri 网规则表示方法在操作票专家系统中的应用

杨以涵¹, 吴琼¹, 刘文颖¹, 李永²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 陕西电力调度通讯中心, 陕西 西安 710004)

摘要: 规则表示和推理机制是计算机形成操作票过程中的关键问题, 分析了在操作票专家系统中广泛采用的产生式规则表示方法的局限性, 指出推理程序对规则表示的依赖是制约操作票专家系统通用性的根本原因。针对上述问题, 首先研究了产生式规则的 Petri 网表示方法, 提高规则表示的灵活性; 其次, 研究了基于 Petri 网规则表示的推理方法, 使推理程序与规则表示完全分离, 最后, 结合应用实例说明了基于 Petri 网的规则表示方法和推理机制可以有效地提高操作票专家系统的适应能力。

关键词: 专家系统; Petri 网; 操作票; 规则表示; 推理机制

Application of Petri nets rules representation in operation order sheets expert system

YANG Yi-han¹, WU Qiong¹, LIU Wen-ying¹, LI Yong²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

(2. Shaanxi Electric Power Dispatching and Telecommunication Center, Xi'an 710004, China)

Abstract: Rules representation and inference mechanism are key problems in process of generating operation order sheets by computer. This paper analyses the disadvantage of production knowledge representation which has been widely used in operation order sheets expert system, and indicates that dependent relation between inference program and rules is the main reason which restricts the adaptability of operation order sheets expert system. To solve the above problem, firstly, this paper establishes a model of production knowledge based on Petri net, which improves flexibility of rules representation. Secondly, a new inference mechanism is brought forward, which can separate inference program from rules representation. In the end, an applied example is presented to show that Petri nets based rules representation and inference mechanism can improve adaptability of operation order sheets expert system.

Key words: expert system; Petri nets; operating command; rules representation; inference mechanism

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0031-06

0 引言

近年来, 操作票专家系统已成为电力系统运行管理的重要工具, 在生产中得到了广泛的应用^[1-5]。但是, 进一步的推广工作一直较慢, 其主要原因是系统的通用性和可维护性较差, 系统移植过程中往往需要大量修改推理程序, 移植工作量大。规则表示和推理机制不能完全分离是造成上述问题的根本原因。由于产生式规则表示方法具有简单明了、易于理解的优点, 因此在操作票专家系统中得到普遍应用。但是, 随着研究的深入, 产生式规则系统的局限性也越来越明显: ①在描述知识的整体性方面, 单一的规则不能刻画知识的整体情况, 知识库缺乏整体的协调和组织, 不能很好地反映人类知识的条理性和内在的逻辑关系; ②基于产生式规则的推理

方法简单、机械, 推理过程是通过知识库中每一条规则的检索和匹配实现的, 推理程序必须依赖规则的具体形式, 不能实现推理与规则的完全分离, 当规则的描述形式发生变化时, 必须修改推理程序, 因此, 推理的通用性和灵活性较差; ③由于产生式规则不能反映知识的整体性, 因此对规则进行添加、删除时, 很可能造成新规则和原有规则之间发生冲突, 使推理产生歧义结论。

Petri 网是由德国的 Carl Adam Petri 教授于 1962 年首先提出的, 他在博士论文《Communication with Automata》中首创性的将 Petri 网用于描述通讯系统。经过四十余年的发展, Petri 网理论已经发展成为具有严格数学基础, 多种抽象层次的通用型网络理论, 在众多领域得到了广泛的应用, 主要包括: 柔性制造系统^[6]、计算机机械制造系统和智能制造系统的建模、分析、控制和优化设计^[7]; 离散系统的建模和仿真^[8]; 混杂系统建模以及计算机通讯等

项目基金: 国家电网公司科技项目 (SGKJ[2003]01-16)

相关领域^[9]。近年来, Petri 网技术逐步被引入电力系统的研究中, 应用领域主要包括故障诊断^[10,11]、故障恢复^[12]、继电保护系统建模^[13]、电网接线分析^[14]等领域。

Petri 网中有关网络逻辑的理论揭示了 Petri 网与命题逻辑、一阶谓词逻辑、时态逻辑的密切联系, 因而应用 Petri 网来组织产生式的规则是可行和合理的。由于 Petri 网理论建立在严密的数学基础上, 用 Petri 网表示的产生式规则的内部逻辑会更加清晰, 推理机制也更加数学形式化。Petri 网技术用于规则表示具有如下优势: ①由于 Petri 网用图形的方式描述产生式规则, 因此可以反映规则的整体情况以及规则之间的关联关系^[15]; ②基于 Petri 网模型的推理不依赖产生式规则的具体形式, 可以实现规则和推理的完全分离, 使操作票系统的灵活性和适应性得到极大的提高; ③利用 Petri 网对冲突的检测和消解策略可以实现规则的有效维护, 避免推理产生歧义结论^[16]。

综上所述, 将 Petri 网技术引入操作票专家系统, 构建基于 Petri 网的规则模型, 并设计相应的推理机制, 可以提高规则表示的整体性, 推理的灵活性、适应性以及系统的可维护性, 从而达到提高操作票专家系统的适应能力的目的。

1 Petri 网简介

1.1 基本 Petri 网定义^[17]

定义 1: Petri 网的结构

$$PN = \{P, T, F, K, W, M_0\} \quad (1)$$

且 $P \cap T = \Phi, P \cup T \neq \Phi$, 其中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 库所(place)集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 变迁(transition)集合; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 弧(arc)的集合; $K: P \rightarrow N^+ \cup \{\omega\}$, 库所容量函数; $W: F \rightarrow N^+$, 表示弧上的权; $M_0: P \rightarrow N$, 初始状态
其中, (P, T, F) 称为 Petri 网的基网, 记为 N 。

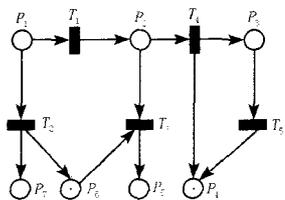


图 1 Petri 网的基本结构
Fig.1 Basic structure of Petri net

如图 1 所示, Petri 网是一种有向图, 一个基本

Petri 网的结构 PNS(Petri-Net Structure)由库所、变迁、连接弧组成。其中的库所节点是静态的, 作用是记录构成系统的诸个体以及系统本身的状态, 并且库所可以被赋予若干个标记, 称为托肯(token), 托肯标志着系统当前的状态; 变迁节点代表系统中发生的事件, 决定着系统中状态改变的规则。通常 PN (Petri-Net) 的结构用有向图表示: 库所以圆表示, 变迁以长方形或粗实线段表示, 弧用来表示流关系, Petri 网的状态由标识 M 表示:

$$M: P \rightarrow N, N = \{1, 2, 3, \dots\} \quad (2)$$

$$\text{且 } \forall P_i \subseteq P, M(P_i) < K(P_i), i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

标识 $M(P_i)$ 表示第 i 个库所的托肯个数, 式(3)表示任何一个库所的托肯数量都不能超过其容量限制, M 是所有标识的标记集。

在图形中用称为托肯的圆点表示, 如图 1 中, 初始状态 $M_0 = \{0101010\}$

2 基于 Petri 网的规则表示和推理机制

电力系统操作是典型的由相互约束的离散事件构成的过程, 难以通过数值计算的方法进行求解, 因此一直采用专家系统和基于知识的方法来解决。操作票专家系统的根本任务就是在满足操作约束的前提下, 实现设备由初始状态到目标状态的转移, 转移的过程就是操作步骤。

通过前面的介绍可知, Petri 网以图形的方式直观地描述了离散事件系统的各种关系和行为, 且以代数理论和网络理论为基础, 可以方便的分析离散事件系统的各种特性。因此, 将 Petri 网技术引入操作票专家系统应该是适用的。

2.1 产生式规则的 Petri 网表示

首先研究用 Petri 网表示产生式规则的一般方法, 然后在此基础上讨论操作票专家系统的 Petri 网模型。

产生式规则采用的是 IF A THEN B 的形式描述命题逻辑, 由许多条这种形式的规则构成了规则库。可以用如下形式描述:

IF A THEN B 表示为 $A \rightarrow B$ (A 和 B 代表命题) 依命题逻辑中的蕴涵等值式和假言易位式对 $A \rightarrow B$ 进行等价变换:

$$A \rightarrow B \Leftrightarrow \neg A \vee B \Leftrightarrow \neg(A \wedge \neg B) \quad (4)$$

其中:

\neg 表示取否定联结词;

\vee 表示析取联结词;

\wedge 表示合取联结词。

利用上述等价变换, 可以将所有的产生式规则

变换为只含有命题 P 和否定联结词及合取联结词的等价形式。通过上述变换方法可以将产生式规则转化为具有统一形式的命题逻辑, 然后在命题逻辑的基础上构造 Petri 网模型, 具体方法如下:

采用简化的 Petri 网 $PN = \{P, T, F, M_0\}$, 即只考虑库所节点、变迁节点、连接弧和初始状态。其中, 库所节点代表产生式规则的条件命题或结论命题, 变迁节点表示产生式规则, 初始状态表示推理开始时库所节点的托肯值。

对于命题 P, Q, A, B , “ $|$ ” 表示 Petri 网中的事件, 即产生式规则。

- ① 对于 P 构造形如 $| \rightarrow P$ 的变迁
- ② 如果 P 不是复合命题, 则这条规则构造完毕
- ③ 如果 $P = \neg Q$ 则构造形如 $| \leftarrow P$ 的变迁
- ④ 如果 $P = A \wedge B$, 对形如 $| \leftarrow P$ 的变迁变换为 $A \rightarrow | \leftarrow B$ 的形式
- ⑤ 如果 $P = A \vee B$, 对形如 $| \rightarrow P$ 的变迁变换为两个形如 $| \rightarrow A$ 和 $| \rightarrow B$ 的变迁
- ⑥ 在如上构造过程中, 保持所有变迁的前集和后集不变, 重复上述过程, 直至所有命题都不是复合命题。
- ⑦ 将代表同一个命题的库所合并为同一个库所。

通过以上算法步骤可以将一条产生式规则用 Petri 网表示。构造整个规则模型的算法步骤如下:

- (1) 将 $IF A THEN B$ 形式表示为 $A \rightarrow B$ 形式。
- (2) 利用 (4) 式将 $A \rightarrow B$ 形式变换为只含 \neg 和 \wedge 及 P 的形式。
- (3) 利用 ①—⑦ 将一条产生式规则用 Petri 网表示。
- (4) 重复 (1)—(3), 并将表示同一命题的库所合并。
- (5) 如果某些变迁不存在前集, 则补充一个带有托肯值的库所作为其前集。

通过以上算法步骤可以将所有的产生式规则用一个 Petri 网表示, 从而建立整个产生式规则库的 Petri 网模型。

应用产生式规则的 Petri 网建模方法, 可以构建操作票专家系统的 Petri 网模型。

对于操作票专家系统来讲, 产生式规则描述的是设备状态转移之间的约束关系, 即: 某一设备由初始状态转移到目标状态的条件是相关设备必须处

于某种状态。因此, 在操作票专家系统的 Petri 网模型中, 可以将设备状态作为库所节点, 用变迁节点描述设备由初始状态到目标状态的转移, 即产生式规则; 网络的初始状态存储在初始向量 M_0 中, 这样, 基于 Petri 网模型的推理任务就是寻找变迁序列 $\{M_0, M_1, M_2, \dots, M_r\}$, 其中 M_r 表示目标状态。

如图 2 所示, 刀闸用圆圈表示, 断路器用矩形表示, 实心表示闭合状态, 空心表示打开状态。以典型的单母分段接线形式的变电站中变压器运行转检修的操作规则为例, 建立相应的 Petri 网模型。

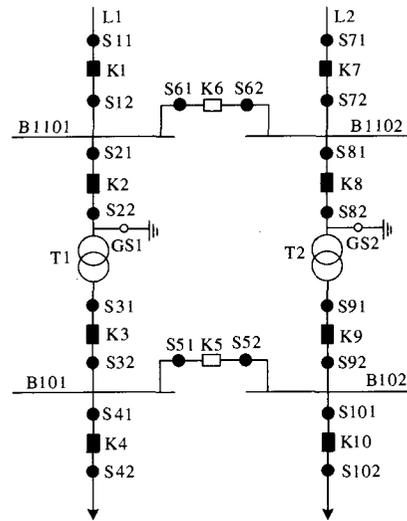


图 2 变电站接线

Fig.2 Connection model of substation

为了简化分析过程, 引入开关刀闸组的概念, 如图 3 所示, 将开关及其两侧的刀闸视为一组, 称为开关刀闸组, 例如图 2 中 K_1, S_{11}, S_{12} 构成一个开关刀闸组 (KS_1), 同时规定开关刀闸组的几种状态: 运行状态 (开关刀闸全部闭合, 表示为 1); 热备用状态 (开关打开, 两侧刀闸闭合, 表示为 2); 冷备用状态 (开关刀闸全部打开, 表示为 3); 检修状态 (开关刀闸全部打开且开关刀闸之间的接地刀闸闭合, 表示为 4)。需要说明的是, 由于接地刀闸 GS_1 在开关组 KS_2 的外侧, 属于变压器的接地刀闸, 所以并未归到开关刀闸组中, 可视为一个独立的设备。



图 3 开关刀闸组

Fig.3 Cluster of breaker and switch

引入开关刀闸组的概念不但可以减少设备的数

量,更重要的是可以将开关刀闸组的各种操作进行封装,重复利用。例如:①运行转热备用的操作为拉开开关;②热备用转冷备用的操作为先拉开负荷侧刀闸,然后再拉开电源侧刀闸;③冷备用转热备用的操作为先闭合电源侧刀闸,然后再闭合负荷侧刀闸;④热备用转运行的操作为闭合开关。

按照开关刀闸组所处的位置,可以分为以下几类:①进线开关刀闸组(如 KS_1);②变压器高端开关刀闸组(如 KS_2);③变压器低端开关刀闸组(如 KS_3);④负荷开关刀闸组(如 KS_4);⑤低压母联开关刀闸组(如 KS_5);⑥高压母联开关刀闸组(如 KS_6);⑦变压器接地刀闸(如 GS_1)。如图2所示接线形式的变压器停电规则如下:

(1) IF 操作任务为变压器运行转检修(P_0) AND 变压器低压侧开关刀闸组为运行状态(P_1) AND 负荷开关刀闸组为运行状态(P_2) AND 低压母联开关组为热备用状态(P_3) THEN 低压母联开关组转运行(P_4);

(2) IF 变压器低压侧开关刀闸组为运行状态(P_1) AND 负荷开关刀闸组为运行状态(P_2) AND 低压母联开关组为运行状态(P_4) THEN 变压器低压侧开关刀闸组转热备用状态(P_5);

(3) IF 变压器低压侧开关刀闸组为热备用状态(P_5) AND 变压器高压侧开关刀闸组为运行状态(P_6) THEN 变压器高压侧开关刀闸组转热备用状态(P_7);

(4) IF 变压器低压侧开关刀闸组为热备用状态(P_5) AND 变压器高压侧开关刀闸组为热备用状态(P_7) THEN 变压器低压侧开关刀闸组转冷备用状态(P_8);

(5) IF 变压器低压侧开关刀闸组为冷备用状态(P_8) THEN 变压器高压侧开关刀闸组转冷备用状态(P_9);

(6) IF 变压器低压侧开关刀闸组为冷备用状态(P_8) AND 变压器高压侧开关刀闸组为冷备用状态(P_9) THEN 闭合变压器接地刀闸(P_{10})。

将上述六条规则按(4)进行变换得:

$$① P_0 \wedge P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \rightarrow P_4 \Rightarrow \neg[(P_0 \wedge P_1 \wedge P_2 \wedge P_3) \wedge \neg P_4]$$

$$② P_1 \wedge P_2 \wedge P_4 \rightarrow P_5 \Rightarrow \neg[(P_1 \wedge P_2 \wedge P_4) \wedge \neg P_5]$$

$$③ P_5 \wedge P_6 \rightarrow P_7 \Rightarrow \neg[(P_5 \wedge P_6) \wedge \neg P_7]$$

$$④ P_5 \wedge P_7 \rightarrow P_8 \Rightarrow \neg[(P_5 \wedge P_7) \wedge \neg P_8]$$

$$⑤ P_8 \rightarrow P_9 \Rightarrow \neg[P_8 \wedge \neg P_9]$$

$$⑥ P_8 \wedge P_9 \rightarrow P_{10} \Rightarrow \neg[(P_8 \wedge P_9) \wedge \neg P_{10}]$$

用以上的①~⑥式分别对应图3中得 $T_1 \sim T_6$,由这六条规则构成的Petri网模型如图4所示。

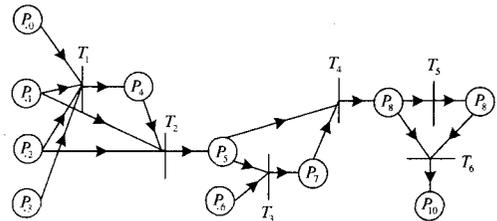


图4 变压器检修的Petri网模型

Fig.4 Petri net of transformer repair

通过上述建模过程可知,将电力系统的操作规则转化为Petri网模型是可行的。Petri网表示的知识系统完整地反映了规则及规则之间地内在联系,具有整体性强,形象直观的优点。

2.2 基于Petri网模型的推理机制

将产生式规则转化为Petri网模型,不仅可以完整地描述规则,突出规则之间的联系,更重要的是可以设计基于Petri网模型的推理机制,使推理数学形式化,实现推理与规则表示的完全分离,提高推理的灵活性和适应性。

由于Petri网用图形的方式描述规则,而图形又可以用矩阵的形式表示,因此基于Petri网模型的推理可以转化为对矩阵的运算,从而实现推理的数学形式化。

Petri网模型的矩阵形式如下:

$$M_r = CU + M_0 \quad \text{其中, } M_r \text{ 表示网络的目标}$$

状态向量, M_0 表示网络的初始状态向量, C 表示Petri网的关联矩阵, U 表示变迁序列。对于操作票专家系统来讲,推理被归结为如下问题:已知 M_r , M_0 和 C ,求取变迁序列 U 。

具体的做法为:搜索Petri网,寻找在初始条件下可以被激活的变迁,修改被激活变迁所指向的库所节点的状态,进一步寻找可以被激活的变迁,继续修改库所节点的状态,如此循环,直至达到目标状态停止,在搜索的过程中记录被激活的变迁,构成变迁序列 U 。

对Petri网的搜索可以通过对关联矩阵 C 的搜索实现,适合计算机应用的算法步骤如下:

(1)形成Petri网的关联矩阵 C ;

(2)在初始条件 M_0 中寻找 1 元素, 标记以 1 元素为序标的行;

(3)从只标记一次的行出发横向查找关联矩阵找到值为-1 的元素;

(4)从-1 的元素开始纵向查找其它为-1 的元素, 若找到则查看是否该行被标记, 若被标记则再次标记, 否则该路径终止;

(5)当所有该列的值为-1 的元素所在行均被标记, 则在该列中查找值为 1 的元素, 标记值为 1 的行, 同时记录状态向量 m_i , 并以 1 元素所在行为当前标记行, 返回(3), 重复上述过程, 直到达到目标状态为止, 搜索过程中得到的变迁序列就是操作步骤。

应用上述方法, 基于变压器检修规则的 Petri 网模型进行推理, 得出变压器检修的操作步骤, 具体过程如图 5 所示:

$$M_0 = \{11110010000\} \quad M_r = \{10001000111\}$$

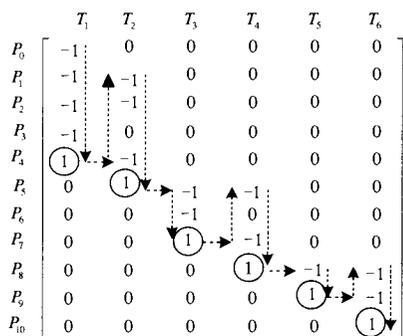


图 5 基于 Petri 模型的推理
Fig.5 Inference based on Petri net model

带箭头的虚线表示推理路径, 圆圈内的元素表示推理的中间结果, 如第 5 行第 1 列的 1 元素表示 $P_0 \wedge P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \rightarrow P_4$; 从图中可以发现, 推理的中间结论一定产生在 1 元素的位置, 这一点也是可以理解的, 因为 1 元素代表连接弧从变迁节点指向库所节点, 此时的库所节点代表产生式规则的结论。推理过程中产生的变迁序列如下:

- ① $P_0 \wedge P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \rightarrow P_4$
- ② $P_1 \wedge P_2 \wedge P_4 \rightarrow P_5$
- ③ $P_5 \wedge P_6 \rightarrow P_7$
- ④ $P_5 \wedge P_7 \rightarrow P_8$
- ⑤ $P_8 \rightarrow P_9$
- ⑥ $P_8 \wedge P_9 \rightarrow P_{10}$

如果图 2 中的变压器 T1 运行转检修, 可以将变迁序列进一步翻译成操作步骤为: ①低压母联开关刀闸组 KS_5 转运行; ②变压器低压开关刀闸组 KS_3 转热备用; ③变压器高压侧开关刀闸组 KS_2 转热备用; ④变压器低压侧开关刀闸组 KS_3 转冷备用; ⑤变压器高端开关刀闸组 KS_2 转冷备用; ⑥闭

合变压器接地刀闸 GS_1 。进一步地, 可以利用开关刀闸组封装的操作将上述步骤转化为具体的开关刀闸操作步骤。

从以上的过程可以看出, 推理是通过对矩阵的搜索实现的, 整个过程是数学形式化的, 与产生式规则的具体结构无关, 当规则变化时, 表现为关联矩阵的结构发生变化, 推理的过程则完全相同, 因此可以实现推理与规则的完全分离, 推理的适应性和灵活性大大提高。

3 结论

本文将 Petri 网技术引入操作票专家系统, 从产生式规则的 Petri 网模型的建立、推理机制和知识库维护方法三个主要方面进行了初步的探索, 可以得出以下结论:

(1)将产生式规则转化为 Petri 网模型是可行的。用 Petri 网模型描述产生式规则具有形象直观、可以反映规则的整体性和内在逻辑性的优点。

(2)基于 Petri 网模型的推理采用数学形式化的方法, 可以实现推理和规则的完全分离, 使推理过程不受规则变化的影响, 推理的适应性强。

(3)采用 Petri 网技术构建的操作票专家系统可以克服一般操作票专家系统无法适应规则变化的弱点, 具有更强的适应能力。

Petri 网技术是一种很有前途的系统建模和分析工具, 随着理论研究的不断深入, 对它的应用将取得更好的应用效果。

参考文献

- [1] 张健, 朱永利, 李东. 操作票专家系统的研究现状及其前景[J]. 电力情报, 2002, 18(1): 61-62.
ZHANG Jian, ZHU Yong-li, LI Dong. Situation and Prospects of Order-sheet Expert System Research[J]. Information on Electric Power, 2002, 18(1): 61-62.
- [2] 李秋燕, 郭伟, 顾飞飞. 基于分层规则的市级调度操作票自动生成系统[J]. 继电器, 2006, 34(4): 61-66.
LI Qiu-yan, GUO Wei, GU Fei-fei. Urban Dispatching Operation Instruction System Based on the Hierarchy Rules[J]. Relay, 2006, 34(4): 61-66.
- [3] 胡耀垓, 张晓星, 陶劲松, 等. 面向对象的操作票专家系统[J]. 继电器, 2004, 32(21): 45-49.
HU Yao-gai, ZHAO Xiao-xing, TAO Jin-song, et al. An Object Oriented Simulate Operation Expert System of Substation[J]. Relay, 2004, 32(21): 45-49.
- [4] 王林川, 焦燕莉, 邓集祥. 一种新的灵活实用的操作票专家系统[J]. 继电器, 2004, 28(4): 35-38.
WANG Lin-chuan, JIAO Yan-li, DENG Ji-xiang. A Flexible and Practical Expert System for Scheduling

- Operation Card[J]. Relay, 2004, 28(4): 35-38.
- [5] 杨继涛, 胡明, 吴琼, 等. 电网调度操作票专家系统的设计与开发[J]. 继电器, 2004, 32(15): 46-47. YANG Ji-tao, HU Ming, WU Qiong, et al. Design and Development of Dispatching Sheet Expert System for Power Network[J]. Relay, 2004, 32(15): 46-47.
- [6] Cavalieri S. Improving Performance of a Flexible Manufacturing System by Petri net Based Modelling and Simulation[A]. In: Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE[C]. Nagoya(Japan):2000.
- [7] Lee J, Member S. Modeling Uncertainty Reasoning with Possibilistic Petri Net[J]. IEEE Trans on System Man and Cybernetics-part B: Cybernetics, 2003, 33(2): 16-19.
- [8] Retchkiman Z. Stability and Stabilization Techniques for Discrete Event Systems Modeled by Coloured Petri Nets[A]. In: Control Applications, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference[C]. Anchorage (USA): 2000.
- [9] Gotesman M, Lopez-Benitez N. Petri Net-based Modeling of Hybrid Dynamic Systems[A]. In: Emerging Technologies and Factory Automation, 1996 IEEE Conference[C]. Kauai(Hawaii): 1996.
- [10] 孙静, 秦世引, 宋永华. 一种基于 Petri 网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13):10-14. SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. A Fault Diagnosis Method for Power System Based on Petri Nets and Probability Information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13):10-14.
- [11] 赵洪山, 米增强, 杨奇逊. 基于冗余嵌入 Petri 网技术的变电站故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2002, 24(4): 32-35. ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, YANG Qi-xun. Substation Fault Diagnosis Based on Petri Nets Embedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 24(4): 32-35.
- [12] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法[J]. 电网技术, 2005, 29(3):23-28. MA Qian, YANG Yi-han, LIU Wen-ying, et al. Method of Power System Restoration Based on Object-oriented Petri-net Technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(3):23-28.
- [13] 王磊, 万秋兰. 扩展时序 Petri 网在仿真保护及自动装置动作逻辑中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 71-74. WANG Lei, WANG Qiu-lan. Extended Time Petri Net Applied in Action Logic Simulation of Protection and Automation Equipment in DTS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6):71-74.
- [14] 赖晓平, 周鸿兴. 电力系统网络拓扑分析的有色 Petri 网模型[J]. 电网技术, 2000, 24(12):5-10. LAI Xiao-ping, ZHOU Hong-xing. Coloured Petri-net Model for Topology Analysis of Power Network[J]. Power System Technology, 2000, 24(12):5-10.
- [15] 傅荣, 罗键. 产生式知识表示的 Petri 网模型及其推理规则[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2000, 39(6):748-749. FU Rong, LUO Jian. A Petri-net Model for Production Knowledge Representation and the Reasoning Rule[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2000, 39(6):748-749.
- [16] 刘晓霞. 基于 Petri 网的知识库维护方法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 1997, 18(7):74-77. LIU Xiao-xia. A Study on the Maintenance of a Rule Base Using Numerical Petri Nets[J]. Mini-Micro Systems, 1997, 18(7):74-77.
- [17] 董红斌, 杨巨庆. Petri 网: 概念、分析方法和应用[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1999, 15(5):59-60. DONG Hong-bin, YANG Ju-qing. Petri Net: Concept, Analysis Method and Application[J]. Journal of Harbin Normal University, Nature Science, 1999, 15(5):59-60.

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2007-05-08

作者简介:

杨以涵(1927-), 男, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制, 人工智能在电力系统中的应用, 光学互感器;

吴琼(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统调度自动化, 人工智能在电力系统中的应用等; E-mail:bjwq7972@126.com

刘文颖(1955-), 女, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制, 调度自动化等。

(上接第 30 页 continued from page 30)

收稿日期: 2007-01-18; 修回日期: 2007-06-10

作者简介:

杨丽(1981-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统数字化, 以及优化算法、模式识别等方面的研究; E-mail:

rainbow1981@163.com

黄彦全(1961-), 男, 教授, 从事变电所综合自动化、微机保护和电力系统状态估计等方面的研究;

肖健(1950-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为计算机控制系统、鲁棒控制, 电传动控制系统等。