

文章编号: 1001-0920(2007)12-1403-05

基于 Petri net 的故障诊断理论研究

叶 俊, 龙志强

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘 要: 首先将故障概率的概念引入基于 Petri net 的故障诊断方法中, 针对 Place 和 Transition, 提出了 P 概率和 T 概率的概念; 然后给出了它们的定义和计算定理; 最后, 在 P 概率和 T 概率的基础上, 对故障树分析 (FTA) 中“重要度”的概念略加调整, 并将其引入所提出的故障诊断方法中, 为 Place 和 Transition 定义了“重要度”, 同时给出了计算方法。

关键词: Petri net; 故障诊断; 故障概率; 重要度

中图分类号: TP206

文献标识码: A

Fault diagnosis theory based on Petri net

YE Jun, LONG Zhi-qiang

(Engineering Research Center of Maglev Technology, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China. Correspondent: YE Jun, E-mail: yejun.golden@163.com)

Abstract: According to the introduction of the concept of fault possibility into the fault diagnosis theory based on Petri net, the concept of P possibility and T possibility is proposed. A definition and practicable calculation theorem are given. Based on the P/T possibility, the concept of importance of FTA is introduced into the fault diagnosis theory, and a definition is given as well as the method for its calculation.

Key words: Petri net; Fault diagnosis; Fault possibility; Importance

1 引 言

将 Petri net (以下简称 PN) 中的节点赋予故障诊断领域的相关语义, 便得到了基于 Petri net 的故障诊断方法。该方法将 Place 分为 Bottom place, Top place 和 Middle place 3 类。Bottom place 代表某个原子故障事件, 它只能作为 Transition 的输入 Place; Top place 和 Middle place 通常代表某些故障事件的逻辑组合 (如某个系统级故障, 或某个较为宏观的故障事件), 其中 Top place 是整个系统中最关注的故障事件, 位于 Top place 和 Bottom place 之间的都是 Middle place, Middle place 也可以没有逻辑意义。

基于 PN 的故障诊断方法较之传统的故障树方法 (FTA) 具有如下特点:

1) 克服了 FTA 符号过多, 缺乏统一数学模型的问题, 可以充分利用 PN 的数学模型及相关分析方法。例如, PN 的状态变化过程就可以用矩阵运算描述, 这使得它可以对同时发生、次序发生的故障过

程进行定性和定量的描述和分析。

2) PN 中 Token 的取值域是自然数集, 这使得它能够表达故障等级这样的多值逻辑问题, 突破了 FTA 仅表达故障发生与否这样的二值逻辑的限制。

3) PN 是网络图, 突破了 FTA 树形图的限制, 为故障建模带来极大方便。

文献[1, 2]提出将系统故障率引入 PN 的思想; 文献[3, 4]讨论了利用故障率作为故障源搜索问题中的冲突消解信息。本文在此基础上给出了 Place 和 Transition 的故障概率的严格定义和操作性较强的计算定理, 并以此改进了故障源搜索算法。

2 PN 节点的概率

PN 由 Transition, Place, 弧 3 种元素组成, Place 用符号 p 表示, 某个 PN 中所有的 Place 构成一个有限集合, 用 P 表示; Transition 用符号 t 表示, 某个 PN 中所有 Transition 构成一个有限集合, 用 T 表示; Transition 和 Place 统称节点; 弧用 Arc 表示, 某 PN 中所有的弧构成一个有限集合, 用 F 表示。显然,

收稿日期: 2006-08-31; 修回日期: 2006-12-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60404003); 湖南省自然科学基金项目 (03JY3108).

作者简介: 叶俊 (1982—), 男, 江西上饶人, 博士生, 从事故障诊断的研究; 龙志强 (1967—), 男, 江西吉安人, 研究员, 从事磁悬浮控制、故障诊断与容错控制等研究。

$F = (P \times T) \cup (T \times P)$, 其中 $(P \times T)$ 表示从 Place 指向 Transition 的弧集, $(T \times P)$ 表示从 Transition 指向 Place 的弧集. 关于 Place 和 Transition 的集合, 参考文献[5] 给出如下 4 个定义:

定义1 Place p 的前件集 $\{t \mid (t, p) \in F\}$, 记为 $\cdot p$, 其中每个元素称为 p 的前件.

定义2 Place p 的后件集 $\{t \mid (p, t) \in F\}$, 记为 $p \cdot$, 其中每个元素称为 p 的后件.

定义3 Transition t 的前件集 $\{p \mid (p, t) \in F\}$, 记为 $\cdot t$, 其中每个元素称为 t 的前件或输入 Place.

定义4 Transition t 的后件集 $\{p \mid (t, p) \in F\}$, 记为 $t \cdot$, 其中每个元素称为 t 的后件或输出 Place.

2.1 弧

弧是连接 Place 和 Transition 的有向线段. PN 图示中弧用从 Place 指向 Transition 或从 Transition 指向 Place 的有向线段表示.

弧包括一个称为“权重”的属性. 它是一个从弧集 F 到正整数集的映射 $w: F \rightarrow \{1, 2, \dots\}$. 从 Place p 到 Transition t 的弧 (p, t) 的权重用 $w(t, p)$ 表示; 从 Transition t 到 Place p 的弧 (t, p) 的权重用 $w(t, p)$ 表示. PN 图示中权重用标于弧上的数字表示, 如权重为 1, 一般略去不标.

2.2 Place

Place 对应故障事件的状态, 本文的 PN 图示中用一个小方块表示. 本节给出类别、当前状态、 P 概率和重要度 4 个概念, 以它们作为属性来描述一个 Place.

2.2.1 类别

Place 分为 Top place, Middle place, Bottom place 3 类, Place 的类别属性即表明某个 Place 属于 3 类中的哪一类.

2.2.2 当前状态

Place p 的当前状态即其 Token^[1] 的数目, 它是一个非负整数, 本文中用 m_p 表示: m_p 取值为 0, 表示 p 对应故障事件未发生; 否则表示对应故障事件发生. 如果对某个故障划分了故障等级, 则可相应地将 m_p 划分为一些自然数区间, 每个区间对应一个故障等级. 例如下式即将 Place p 划分为一级故障和二级故障. 注意按照这种划分, 一级故障包含二级.

$$m_p \begin{cases} = 0, & \text{没有故障;} \\ \geq 1, & \text{二级故障;} \\ \geq 3, & \text{一级故障.} \end{cases}$$

p 的当前状态用标在代表 p 的小方块内的点表示, 点数取当前状态的值.

2.2.3 P 概率

定义5 设 Place p , 其当前状态 m_p , x 为任意非 0 自然数, 则 $m_p \geq x$ 的概率称为 p 的 P 概率分布函数, 记为 $\Gamma_p(x)$, 即 $\Gamma_p(x) = P\{m_p \geq x\}$.

定义6 设 Place p , p 对应故障事件为 E , 若 E 划分了故障等级, 则 E 处于各个故障等级的概率构成一个向量, 称为 p 的 P 概率, 记为 γ_p , γ_p 在故障等级 l 上的分量记为 γ_p^l ; 若 E 未划分故障等级, 则 E 对应故障事件发生的概率称为 p 的 P 概率, 记为 γ_p , 此时它是一个标量.

由定义可以看出, 某个 Place 的 P 概率即其对于故障事件的故障概率.

定义7 设 Place p , Transition $t \in p \cdot$, 记 $\Gamma_p(w(t, p))$ 为 γ_p^t , 称为 t 在 p 上的使能分量.

对于 Bottom place, 需通过实验分别确定其在各个故障等级上的故障概率. 往往认为某个故障发生的概率服从指数分布 $1 - e^{-\lambda t}$, 其中平均故障时间 $1/\lambda$ 通过实验测得.

定理1 设 Place p , p 对应故障事件为 E , 若 E 划分了故障等级, l 为其某个故障等级, l 对应的当前状态区间是 $[m, n]$, $m, n \in N$ 且 $m \leq n$, 则 γ_p^l 计算公式为

$$\gamma_p^l = \Gamma_p(m) - \Gamma_p(n); \quad (1)$$

若 E 未划分故障等级, 则 E 发生的概率为

$$\gamma_p = \Gamma_p(1). \quad (2)$$

证明

$$\begin{aligned} \gamma_p^l &= P\{m \leq m_p \leq n\} = \\ &P\{m_p \geq m\} - P\{m_p \geq n\} = \\ &\Gamma_p(m) - \Gamma_p(n); \\ \gamma_p &= P\{m_p \geq 1\} = \Gamma_p(1). \quad \square \end{aligned}$$

定义8 设 k 为某个非 0 自然数, p 为某个 Place, T 为满足 $\sum_t w(t, p) \geq k$ 的 Transition 集合, 令所有这样的 T 构成一个集合, 称为 p 的 k 组合, 记为 C_p^k .

例1 如图 1 所示, 求 $C_{p_4}^2$.

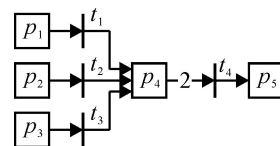


图 1 3 中取 2 关系图

解 由图 1 容易看出, $T_1 = \{t_1, t_2\}$ 满足 $\sum_t w(t, p_4) \geq 2$, $T_2 = \{t_2, t_3\}$ 满足 $\sum_t w(t, p_4) \geq 2$, $T_3 = \{t_1, t_3\}$ 满足 $\sum_t w(t, p_4) \geq 2$, $T_4 = \{t_1, t_2, t_3\}$ 满足 $\sum_t w(t, p_4) \geq 2$.

$t_3\}$ 满足 $\sum_t w(t, p_4) \geq 2$, 此外不再存在 Transition 集合满足要求, 故 $C_{p_4}^2 = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}$.

定理 2 (P 概率局部计算定理) 设 Place p , 则 p 的 P 概率分布函数 $\Gamma_p(x)$ 的近似计算公式为

$$\Gamma_p(x) \approx P\{C_p^x\}, \tag{3}$$

该式等号成立当且仅当网络为树状结构.

证明 由定义 5, $\Gamma_p(x) = P\{m_p \geq x\}$, 假设 PN 是树状结构, 即 p 的前件没有交集, 则 $P\{m_p \geq x\}$ 显然是激发 (见 2.3 节) 后能使 $m_p \geq x$ 的所有 Transition 集合都使能 (见 2.3 节) 的概率, 即 C_p^x 的概率, 故 $\Gamma_p(x) = P\{C_p^x\}$. $\square$

推论 1 (P 概率局部计算推论) 若 Place p 所有的输入弧的权重均为 1, 则 p 的 P 概率分布函数在 1 上的值 $\Gamma_p(1)$ 的近似计算公式为

$$\Gamma_p(1) = 1 - \prod_t (1 - \gamma_t), \tag{4}$$

其中 γ_t 表示 Transition t 的 T 概率 (见 2.3 节).

证明 由 P 概率局部计算定理, 有

$$\begin{aligned} \Gamma_p &= \Gamma_p(1) = P\{C_p^1\} = \\ &P\{p \text{ 中至少一个使能}\} = \\ &1 - P\{p \text{ 中没有一个使能}\} = \\ &1 - \prod_t (1 - \gamma_t). \end{aligned} \tag{5}$$

需要说明的是, 所谓 P 概率局部计算, 是指仅根据网络的局部信息计算 P 概率, 称这样计算得到的 P 概率为局部 P 概率, 与之相对的概念是全局 P 概率. 即考察整个网络, 计算得到 P 概率, 根据 P 概率的定义, 全局 P 概率才是 P 概率的真实值. 如定理 2, 只有当网络是树形结构时局部 P 概率才等于全局 P 概率.

2.2.4 重要度

重要度的概念沿用自 FTA. 在故障树中, 重要度表示故障树的各个底事件 (或最小割集) 对顶事件发生概率的影响. 在基于 PN 的故障诊断方法中, 对重要度的概念作了全局化和局部化两方面的改进. 全局化是指重要度成为 PN 中所有节点 (即 Place 和 Transition) 都具有的一个属性; 局部化是指重要度仅用于描述一个节点对它的后件的影响. 这种改进的目的是为了服务于“故障源搜索算法”.

定义 9 设 Place p , Transition $t \in p$, γ_t 为其 T 概率 (见 2.3.2 节), 则 p 对其后件 t 的重要度用 l_p^t 表示, 定义为

$$l_p^t = d\gamma_t / d\gamma_t. \tag{5}$$

2.3 Transition

Transition 对应故障的发生过程, 本文的 PN 图中用一条粗短线段表示. 本节给出使能状态、T 概

率、重要度 3 个概念, 以它们作为属性来描述 Transition.

2.3.1 使能状态^[1]

定义 10 设 Transition t , 如果其所有输入 Place 当前状态的取值都大于等于从该输入 Place 到 t 的弧的权重 $w(p, t)$, 则称 t 为使能的, 简称使能; 否则, 称为禁能. t 的使能状态用 ε_t 表示, 1 为使能, 0 为禁能, 即

$$\varepsilon_t = \begin{cases} 1, & \forall p \in p(t), m_p \geq w(p, t); \\ 0, & \text{Else.} \end{cases} \tag{6}$$

定义 11^[1] 如果 Transition 为使能的, 则称该 Transition 为可激发的.

定义 12^[1] 设 Transition t 为可激发的, $n \in \mathbb{N}$ 为某个时刻, 在时刻 n 对 t 进行如下操作:

$$m_p(n+1) = \begin{cases} m_p(n), & \forall p \in p(t); \\ m_p(n) + w(t, p), & \forall p \in t. \end{cases} \tag{7}$$

该操作称为 t 的激发.

2.3.2 T 概率

定义 13 Transition 使能的概率称为 Transition 的 T 概率, 设 Transition t , t 的 T 概率用 γ_t 表示.

定理 3 设 Transition t , 则 t 的 T 概率的计算公式为

$$\gamma_t = \prod_p \gamma_p^t. \tag{8}$$

证明 由定义 10, Transition t 使能当且仅当其所有输入 Place 的当前状态值都大于等于从该输入 Place 到 Transition 的弧的权重 $w(p, t)$, 而 Place p 的当前状态大于等于相应弧权重的概率, 即为 $\gamma_p^t = \Gamma_p(w(p, t))$, 故

$$\gamma_t = \prod_p \gamma_p^t. \tag{8}$$

2.3.3 重要度

定义 14 设 Transition $t, p \in p(t)$, t' 为当前搜索路径上 p 的后件, 则在该搜索路径上 t 对 p 的重要度用 l_t^p 表示, 定义为

$$l_t^p = d\gamma_t / d\gamma_p^t. \tag{9}$$

3 P 概率的计算

定理 4 (全局 P 概率逼近定理) 使用推论 1 计算 P 概率的过程中若出现了任何 Place 的 P 概率的幂, 只要将它们都替换为相应的一次项 (即将计算过程出现的 $\gamma_p^n (\forall p \in P, n \geq 2)$ 都替换为 γ_p), 则替换后得到的结果即全局 P 概率.

证明 (1) 首先证明对于图 2 所示的 型 PN, 定理 4 成立.

先计算 P_0 的全局 P 概率. 如图 2 所示, 由关于 Transition 激发的定义 12 可知, $m_{p_0} \geq 1$ 当且仅当

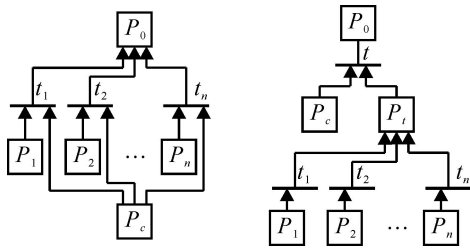


图 2 型 PN

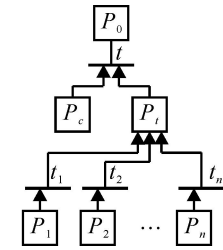


图 3 型 PN 等价型

$m_{P_c} \geq 1$ 且 $\exists i (1 \leq i \leq n, m_{P_i} \geq 1)$, 故图 2 的 PN 与图 3 的 PN 等价. 由图 3 知

$$Y_{P_0} = Y_{P_c} Y_{P_t} = Y_{P_c} \left(1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{P_i}) \right),$$

即图 2 中 $Y_{P_0} = Y_{P_c} \left(1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{P_i}) \right)$.

由推论 1, 有 $Y_{P_0} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{t_i})$, 而 $Y_{t_i} = Y_{P_i} Y_{P_c} (1 \leq i \leq n)$, 故

$$Y_{P_0} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}).$$

下面采用数学归纳法证明

$$\left(1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}) \right) =$$

$$Y_{P_c} \left(1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{P_i}) \right).$$

1) $n = 2, 1 - (1 - Y_{P_1} Y_{P_c}) (1 - Y_{P_2} Y_{P_c}) = (1 - (1 - Y_{P_1} Y_{P_c} - Y_{P_2} Y_{P_c} + Y_{P_1}^2 Y_{P_2} Y_{P_c}^2))$, 将 $Y_{P_c}^2$ 用 Y_{P_c} 替换, 故

$$1 - (1 - Y_{P_1} Y_{P_c}) (1 - Y_{P_2} Y_{P_c}) =$$

$$Y_{P_1} Y_{P_c} + Y_{P_2} Y_{P_c} - Y_{P_c} Y_{P_1} Y_{P_2} =$$

$$Y_{P_c} (Y_{P_1} + Y_{P_2} - Y_{P_1} Y_{P_2}) =$$

$$Y_{P_c} (1 - (1 - Y_{P_1}) (1 - Y_{P_2})).$$

2) 设 $n = k$ 时定理 4 成立, 即

$$\left(1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}) \right) =$$

$$Y_{P_c} \left(1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i}) \right).$$

下面证明 $n = k + 1$ 成立:

令 $Y_{P_t} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i})$, 则

$$1 - \prod_{1 \leq i \leq k+1} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}) =$$

$$1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}} Y_{P_c}) \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}) =$$

$$1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}} Y_{P_c}) (1 - Y_{P_t} Y_{P_c}).$$

参考 $n = 2$ 的证明过程, 有

$$1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}} Y_{P_c}) (1 - Y_{P_t} Y_{P_c}) =$$

$$Y_{P_c} (1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}}) (1 - Y_{P_t})).$$

将 $Y_{P_t} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i})$ 代回, 有

$$Y_{P_c} (1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}}) (1 - Y_{P_t})) =$$

$$Y_{P_c} \left(1 - (1 - Y_{P_{(k+1)}}) \prod_{1 \leq i \leq k} (1 - Y_{P_i}) \right).$$

故 $\left(1 - \prod_{1 \leq i \leq k+1} (1 - Y_{P_i} Y_{P_c}) \right) = Y_{P_c} \left(1 - \prod_{1 \leq i \leq k+1} (1 - Y_{P_i}) \right)$ 成立.

由 1) 和 2) 知, 对于图 2 所示的 PN, 定理 4 成立.

(2) 下面证明对于图 4 所示的 型 PN, 定理 4 成立.

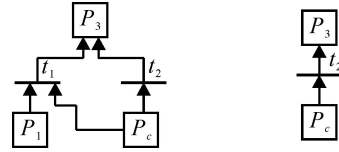


图 4 型 PN

图 5 型 PN 等价型

由 P 概率局部计算定理, $Y_{P_3} = \Gamma_{P_3}(1) = Y_{t_1} + Y_{t_2} - Y_{t_1} Y_{t_2}$, 而 $Y_{t_1} = Y_{P_1} Y_{P_c}, Y_{t_2} = Y_{P_c}$, 代入得到 $Y_{P_3} = Y_{P_1} Y_{P_c} + Y_{P_c} - Y_{P_1} Y_{P_c}^2$. 将 $Y_{P_c}^2$ 替换为 Y_{P_c} , 得 $Y_{P_3} = Y_{P_1} Y_{P_c} + Y_{P_c} - Y_{P_1} Y_{P_c} = Y_{P_c}$.

下面计算 p_3 的全局 P 概率. 由 P 概率的定义, 有

$$Y_{P_3} = P\{t_1 \text{ 使能}, t_2 \text{ 不使能}\} + P\{t_2 \text{ 使能},$$

$$t_1 \text{ 不使能}\} + P\{t_1, t_2 \text{ 都使能}\}.$$

其中: $P\{t_1 \text{ 使能}, t_2 \text{ 不使能}\} = 0$, 因为“ t_1 使能, t_2 不使能”要求 m_{P_c} 既大于等于 1 又小于 1, 这是不可能事件; $P\{t_2 \text{ 使能}, t_1 \text{ 不使能}\} = (1 - Y_{P_1}) Y_{P_c}$; $P\{t_1, t_2 \text{ 都使能}\} = Y_{P_1} Y_{P_c}$. 故 p_3 的全局 P 概率 $Y_{P_3} = Y_{P_c}$. 比较结果, 定理 4 成立.

(3) 下面证明图 6 所示 型 PN, 定理 4 成立.

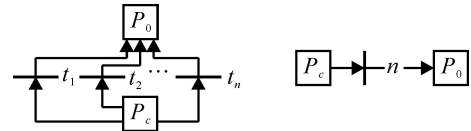


图 6 型 PN

图 7 型 PN 等价型

显然, P_0 的全局 P 概率 $Y_{P_0} = Y_{P_c}$. 而由 P 概率局部计算定理, $Y_{P_0} = 1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - Y_{t_i})$, 其中 $Y_{t_i} = Y_{P_c}, 1 \leq i \leq n$, 故 $Y_{P_0} = 1 - (1 - Y_{P_c})^n$. 下面用数学归纳法证明 $(1 - Y_{P_c})^n = (1 - Y_{P_c})$:

1) $n = 2, (1 - Y_{P_c})^2 = 1 - 2Y_{P_c} + Y_{P_c}^2$, 用 Y_{P_c} 替换, 故 $(1 - Y_{P_c})^2 = 1 - 2Y_{P_c} + Y_{P_c} = (1 - Y_{P_c})$.

2) 设 $n = k$ 成立, 即 $(1 - Y_{P_c})^k = (1 - Y_{P_c})$, 则 $n = k + 1$ 时, $(1 - Y_{P_c})^{k+1} = (1 - Y_{P_c})^k (1 - Y_{P_c}) = (1 - Y_{P_c}) (1 - Y_{P_c}) = (1 - Y_{P_c})^2 = (1 - Y_{P_c})$.

由 1) 和 2), 有 $(1 - Y_{P_c})^n = (1 - Y_{P_c})$, 故

$$Y_{P_0} = 1 - (1 - Y_{P_c})^n = 1 - (1 - Y_{P_c}) = Y_{P_c}.$$

比较结果, 定理 4 成立.

(4) 由相关定义, 图 7 与图 6 显然等价, 其中 P_c 为引起网络中出现环状结构的公共节点; 又由 (2)

的证明过程可知,图 4 与图 5 等价.

(5) 图 8 与图 9 等价,其中 P_c 为引起网络中出现环状结构的公共节点;图 10 与图 9 等价,其中 P_c 为引起网络中出现环状结构的公共节点.

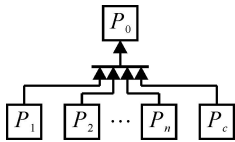


图 8 型非环状 PN

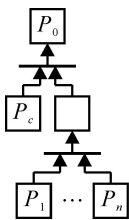


图 9 型非环状 PN

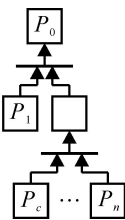


图 10 型非环状 PN

(6) 由(4)和(5)的 PN 等价,考虑到任何 PN 中的环路都可化为形如图 2,图 4 和图 6 中的环路,而对于图 2,图 4 和图 6,定理 4 成立. 所以定理 4 成立.

□

推论 2(全局 P 概率逼近定理推论 A) 在使用推论 1 计算 P 概率的过程中,若出现 $(1 - x \cdot \gamma_p) (1 - \gamma_p)^n (\forall p \in P, x \text{ 为任意式子}, n \geq 1)$,则将其都替换为 $(1 - \gamma_p)$,结果即全局 P 概率.

证明 由定理 4 中(3)的证明 $(1 - \gamma_p)^n = (1 - \gamma_p)$,然后将 $(1 - x \cdot \gamma_p) (1 - \gamma_p)$ 展开即可得证. □

推论 3(全局 P 概率逼近定理推论 B) 设所有 Place 对应故障都没有划分故障等级,且故障概率服从指数分布,则在使用推论 1 计算 P 概率的过程中,若出现 $e^{-n\lambda} (n \geq 2)$,则将其都替换为 $e^{-\lambda}$,结果即全局 P 概率.

证明 Place p 对应故障都没有划分故障等级,且故障概率服从指数分布,即 $\gamma_p = 1 - e^{-\lambda}$;又由推论 2,可得 $e^{-n\lambda} = (1 - \gamma_p)^n = (1 - \gamma_p) = e^{-\lambda}$. □

全局 P 概率逼近猜想 在使用 P 概率局部计算定理 2 计算全局 P 概率的过程中,若出现了任何

Place 的 P 概率的幂,则将它们都替换为相应的一次项(即将计算过程出现的 $\gamma_p^n (\forall p \in P, n \geq 2)$ 都替换为 γ_p),替换后得到的结果即全局 P 概率.

4 结 语

本文提出了 P 概率和 T 概率的概念,给出了相应的定义和计算定理,以解决基于 PN 的故障诊断方法中故障概率的计算问题.“全局 P 概率逼近定理”使得人们可利用网络的局部信息计算出 P 概率在网络中的真实值(全局 P 概率).

参考文献(References):

[5] Tadao Murata. Petri nets-properties analysis and applications[J]. Proc of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.

[1] 胡昌华,许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

(Hu Chang-hua, Xu Hua-long. Design and analysis of fault-tolerant control and fault diagnosis for control system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.)

[2] 胡新革,黄大贵,赵强. 基于 Petri net 的系统故障率分析[J]. 仪器仪表学报,2003,24(增): 552-554.

(Hu Xin-ge, Huang Da-gui, Zhao Qiang. Analyzing the failure rate of system using Petri net[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2003, 24(S): 552-554.)

[3] 陈玉宝,夏继强,邬学礼. Petri net 在故障诊断领域的应用研究[J]. 中国机械工程,2002,11(12): 1386-1388.

(Chen Yu-bao, Xia Ji-qiang, Wu Xue-li. Study on the application of Petri nets to fault diagnosis[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 11(12): 1386-1388.)

[4] 甘正佳,甘正宁. 基于概率 Petri net 的柴油机故障诊断方法研究[J]. 长沙铁道学院学报,2003,21(1): 79-83.

(Gan Zheng-jia, Gan Zheng-ning. A probability Petri-net based approach for diesel engine fault diagnosis[J]. J of Changsha Railway University, 2003, 21(1): 79-83.)