

文章编号: 1001-0920(2005)10-1181-04

模糊推理 Petri 网及其在产品拆卸序列决策中的应用

赵树恩, 李玉玲

(陕西理工学院 机电工程系, 陕西 汉中 723000)

摘 要: 为了在产品拆卸序列决策时, 简化拆卸路径的分析难度, 提出一种以模糊推理 Petri 网为工具的产品拆卸序列决策模型. 采用将模糊推理 Petri 网与矩阵运算相结合的形式化推理算法, 对所提出的决策算法进行了论述. 实例应用结果表明, 此模型在产品拆卸过程规划中具有很强的并行处理能力, 可以根据产品在拆卸过程中零部件的最新信息对每一步操作作出适时的智能化决策, 从而实现将产品中若干零件作为子装配体进行拆卸的自动聚类识别, 减少了产品拆卸的复杂性.

关键词: 拆卸过程规划; 模糊推理算法; Petri 网

中图分类号: TH16; X705 **文献标识码:** A

Fuzzy Reasoning Petri Nets and Its Application to Disassembly Sequence Decision of Products

ZHAO Shu-en, LI Yu-ling

(Department of Mechanical and Electronic Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China Correspondent: ZHAO Shu-en, Email: zse0916@163.com)

Abstract: In order to predigest the analysis difficulties of disassembly path, a decision-making model of product disassembly sequence is proposed based on fuzzy reasoning Petri nets. By combining fuzzy reasoning Petri nets with matrix operation, a reasoning algorithm of formalized is adopted to discuss the model of decision-making. The practical result shows that the model of decision-making has strong parallel operation ability in the disassembly process sequence. It also can make intelligent decisions based on the product information originating from each disassembly step. So it can realize the automatic clustering identification and decrease the complexity of product disassembly.

Key words: Disassembly process planning; Fuzzy reasoning algorithm; Petri nets

1 引 言

废旧产品的回收和再生是解决由其所造成的环境污染和资源匮乏问题的先决条件. 要对退役产品的零件或材料进行回收再生, 就不可避免地涉及到产品的拆卸分析, 即判断产品中零件拆卸的先后顺序以及拆卸路径的决策. 目前, 国内外许多学者采用不同的方法对产品拆卸序列的生成进行了研究, Lambert 等根据产品的几何信息, 提出用 AND/OR 逻辑关系描述产品零部件之间的拆卸关系^[1]; Lozano-Perez 等借助装配图对零件进行两两空间干涉校验, 从而得出拆卸序列^[2]; 李飒等提出了基于图

论的拆卸回收模型^[3]. 这些方法主要根据产品装配图中零部件之间的几何拓扑信息来生成产品的拆卸序列, 然而装配图不能直接提供拆卸分析所需的信息, 尤其当产品零件数目较多或配合较复杂时, 很难将拆卸模型描述清楚, 且易造成拆卸路径的组合爆炸.

本文采用模糊推理 Petri 网建立了产品拆卸序列决策模型, 利用该模型可以实现将产品中若干零件作为子装配体进行拆卸的自动识别, 从而大大减少了产品拆卸的复杂性, 有效地解决了拆卸路径的组合爆炸问题.

收稿日期: 2004-10-18; 修回日期: 2005-03-21.

作者简介: 赵树恩(1973—), 男, 陕西洋县人, 讲师, 硕士, 从事车辆节能与污染控制、绿色汽车技术等研究;

李玉玲(1973—), 女, 四川射洪人, 讲师, 硕士生, 从事先进制造技术的研究.

2 模糊推理 Petri 网模型及其推理算法

2.1 用模糊推理 Petri 网进行知识表达

随着 Petri 网理论的不完善和充实, 它已成为一个图形化的数学建模工具, 被广泛应用于通信、制造、运输等领域。模糊推理 Petri 网 (FRPN) 是在 Petri 网基础上扩展而来的, 非常适合于人类知识的表示和人工智能领域^[4]。但现有的研究成果大多停留在知识和推理规则的表述上, 推理方法仍沿用分步运算加判断的方法, 实现较为繁琐。本文将模糊 Petri 网应用于更具一般性的推理过程中, 运用矩阵运算来实现形式化推理, 使模糊推理过程更加简单和易于实现。

模糊推理 Petri 网的根本出发点是基于知识的表达和逻辑推理功能, 其框架代表基于产生式规则的知识结构, 具有不同于传统 Petri 网的特点。若令 R 为一模糊生成规则集合: $R = \{R_1, R_2, \dots, R_5\}$, 各规则的具体表达式如下。将其转化为模糊推理 Petri 网模型, 则可表示为图 1 的形式。

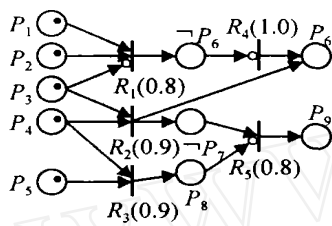


图 1 简单 FRPN 网模型

- 1) R_1 : If P_1 and P_2 and (NOT P_3) Then (NOT P_6), $C = 0.8$;
- 2) R_2 : If P_3 and P_4 Then P_6 and (NOT P_7), $C = 0.9$;
- 3) R_3 : If P_4 and P_5 Then P_8 , $C = 0.9$;
- 4) R_4 : If NOT (NOT P_6) Then P_6 , $C = 1.0$;
- 5) R_5 : If (NOT P_7) and (NOT P_8) Then P_9 , $C = 0.8$;

其中: P_i 表示命题, $i = 1, \dots, 9$; $\neg P_6, \neg P_7$ 分别表示命题 P_6 和 P_7 逻辑“取反”; C 表示规则置信度。

2.2 模糊推理 Petri 网模型

定义一个 8 元组, 可将 FRPN 的模型描述为 $FRPN = (P, R, I, O, H, \theta, Y, C)$ 。

其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所(命题)的有限集合, $n > 0$ 为库所的个数; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 为变迁(规则)的有限集合, $m > 0$ 为变迁的个数; $P \rightarrow R = \Phi$; $I: P \times R \rightarrow \{0, 1\}$ 为 $n \times m$ 维规则的输入矩阵, $I = I(p_i, r_j) \in \{0, 1\}$, 当 P_i 是 R_j 的输入时, $I = I(p_i, r_j) = 1$, 否则 $I = I(p_i, r_j) = 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$; $O: P \times R \rightarrow \{0, 1\}$ 为 $n \times m$ 维规则

的输出矩阵, $O = O(p_i, r_j) \in \{0, 1\}$, 当 P_i 是 R_j 的输出时, $O = O(p_i, r_j) = 1$, 否则 $O = O(p_i, r_j) = 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$; $H: P \times R \rightarrow \{0, 1\}$ 为 $n \times m$ 维从命题到规则的矩阵的“补”, 即存在从“非 p_i ”到 r_j 的有向弧时, $H = H(p_i, r_j) = 1$, 否则 $H = H(p_i, r_j) = 0, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$, 且 $I(p, r) \cdot H(p, r) = 0, \forall p \in P, r \in R$, 亦即 $I^T \cdot H = 0$; $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \theta_i \in [0, 1]$, 表示命题 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的真实度, θ^0 为各命题的初始真实度; $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$ 为标识量, 当命题 p_i 中存在一个托肯时, $Y_i = 1$, 否则 $Y_i = 0$, Y^0 表示初始状态的标识, 托肯在图中常用一个黑点表示; $C = \text{diag}\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 为规则使能的置信矩阵, c_j 为规则 r_j 使能的置信度, $c_j \in [0, 1], j = 1, 2, \dots, m$ 。

2.3 模糊推理 Petri 网的推理算法

FRPN 的推理算法为一迭代算法, 它能够自动生成从起始库所至目标库所的推理路径。本文的推理算法采用一种实用的不确定推理方法——MYCN 置信度方法^[5-8]。它的主要思想是模糊命题合取式的真值取各子式真值的最小值, 模糊命题析取式的真值取各子式真值的最大值。首先引入极小-极大代数中的两个算子:

$\oplus: A \oplus B = D, A, B, D$ 是 $m \times n$ 维矩阵向量, 则 $d_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$;

$\odot: A \odot B = D, A, B, D$ 分别为 $(m \times p), (p \times n), (m \times n)$ 维矩阵, 则 $d_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} (a_{ik} \cdot b_{kj})$ 。

根据 FRPN 的特点, 其具体的推理算法如下:

Step 1: FRPN 的初始输入为 $I, O, H, C, \theta^0, Y^0$ 。

Step 2: 令 $k = 0$ 。

Step 3: 计算

$$\rho^k = (I^T \odot (Y^k \oplus \theta^k)) \oplus (H^T \odot (Y^k \oplus \theta^k)); \quad (1)$$

由 θ^k 计算 θ^{k+1} , 即

$$\theta^{k+1} = \theta^k \oplus [(O \cdot C) \odot \rho^k]; \quad (2)$$

由 Y^k 计算 Y^{k+1} , 即

$$Y^{k+1} = Y^k \oplus [O \odot (I + H)^T \odot Y^k] \quad (3)$$

Step 4: 如果 $\theta^{k+1} = \theta$ 或 $Y^{k+1} = Y$, 令 $k = k + 1$, 返回 Step 3, 否则, 推理结束。

综上所述, 可由系统初始各命题的真实度 θ^0 及初始标识 Y^0 推理得到所有命题的最终真实度。

在以上推理算法步骤中: k 表示第 k 步算法; ρ^k 为 m 维向量, 表示经第 k 步推理后得到的规则 r_j 使能的置信度, $j = 1, 2, \dots, m$; 变量上面加一横线表示该命题的置信度逻辑“取反”, 如 $\overline{\theta} = 1_m - \theta, 1_m$ 为元素全为 1 的 m 维向量。

3 基于 FRPN 的产品拆卸序列决策

对于任何产品或部件, 在进行拆卸序列决策时, 首先要对其重用价值进行评估。如果其重用价值很高, 则可直接进行重用; 否则, 需对其进一步分析评估, 比如零部件拆卸的难易程度、材料的兼容性以及材料有无危害等。图 2 为产品拆卸规划时的决策流程。根据前面所介绍的 FRPN 的知识, 可以将图 2 所示的决策流程图转化为图 3 所示的 FRPN 模型, 再按照 FRPN 的推理算法, 得到各命题的最终真实度。其中真实度最高的命题即为决策结果。

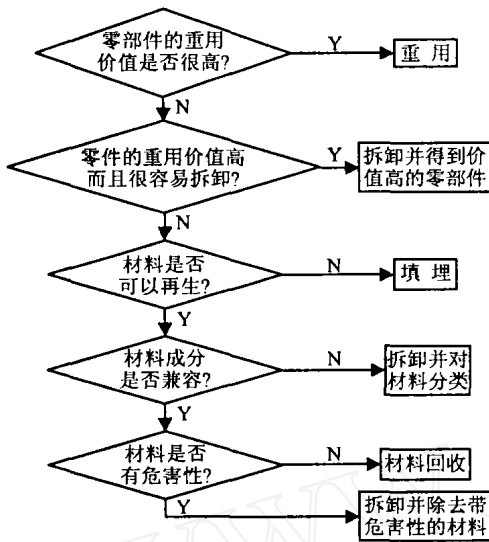


图 2 产品拆卸过程决策流程图

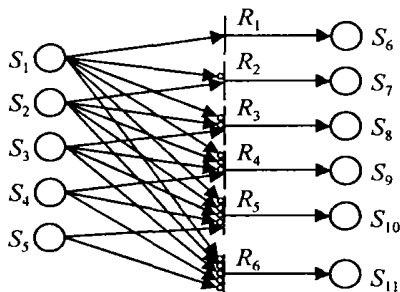


图 3 产品拆卸规则的 FRPN 模型

图 3 中各命题的含义分别为: S_1 表示产品或部件的重用价值很高; S_2 表示部分零件的重用价值很高, 而且很容易拆卸; S_3 表示构成产品或部件的材料没有很高的再生价值; S_4 表示构成产品或部件的材料不全兼容; S_5 表示构成产品或部件的材料中无危害性物质; S_6 表示产品或部件被重用; S_7 表示从产品或零部件中拆卸下重用价值很高的零件; S_8 表示产品或部件被填埋; S_9 表示不同材料成分的部件或零件通过拆卸进行分类; S_{10} 表示对所回收的材料作再生处理而不需再进一步拆卸; S_{11} 表示对有危害的材料进行分离处理。

4 实例应用

以手电筒的拆卸为例, 说明 FRPN 在产品拆卸序列决策中的应用。图 4 为手电筒的结构简图, 图 5 为手电筒拆卸的 Petri 网模型。图中: C 为顶盖, G 为玻璃片, B 为小灯泡, H 为反光镜, M 为电筒筒体, S 为筒体。在拆卸之前, 假设: 1) 重用价值很高的可信度为 0.1; 2) 前盖重用价值很高且拆卸成本很低的可信度为 0.9; 3) 材料有很高的再生价值的可信度为 0.8; 4) 材料成分不全兼容; 5) 无危害性材料。按照图 3 所示的拆卸规则 FRPN 模型, 依据模糊推理 Petri 网模型和推理算法, 有

$$P = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}\};$$

$$R = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6\};$$

$$\theta^0 = [0.1 \ 0.9 \ 0.8 \ 0.2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$\beta^0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

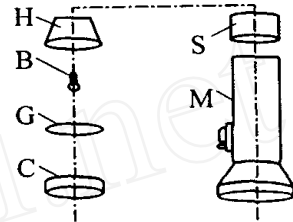


图 4 手电筒简图

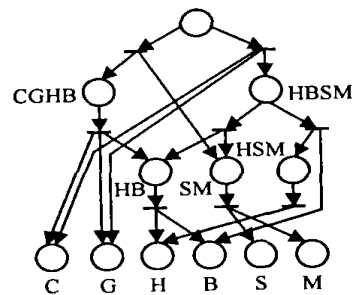


图 5 手电筒拆卸的 Petri 网模型

假定所有规则使能的置信度均为 1, 即 $C = 1_{1 \times 6}$, 根据前面 FRPN 的定义, 则 I, O, H, C 矩阵为

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

由式(2)和(3),可得到经第1步激发后各命题的真实度和标识分别为

$$\theta = [0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 2, \ 1, \ 1, \ 0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 1, \ 0 \ 1, \ 0, \ 0]^T;$$

$$y = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

经第2次激发后各命题的真实度和标识分别为

$$\theta = [0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 2, \ 1, \ 1, \ 0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 1, \ 0 \ 1, \ 0, \ 0]^T;$$

$$y = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T;$$

因为 $\theta = \theta^2, y = y^2$, 故推理结束 所以手电筒拆卸的最终各命题的真实度为 $\theta = [0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 2, \ 1, \ 1, \ 0 \ 1, \ 0 \ 9, \ 0 \ 1, \ 0 \ 1, \ 0, \ 0]^T$.

从计算结果可以看出,应该拆卸产品,以获得重用价值高的零件,因为在命题 $S_6 \sim S_{11}$ 中(见图3), S_7 的真实度 $(\theta) = 0 \ 9$ 为最大,所以应该拆卸手电筒以获得重用价值很高的“顶盖C”.此时,可获得最短的拆卸路径: {HB SM, C, G}, 顶盖和玻璃片作为零件进行重用,HB SM 则作为新的子装配体按上述相似的推理算法进行更进一步的决策判断

假设子装配体“HB SM”的初始各命题真实度为 $\theta_{HB SM} = [0, 0 \ 2, 0 \ 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, 经推理可得子装配体“HB SM”的最终状态为 $\theta_{HB SM} = \theta_{HB SM} = [0, 0 \ 2, 0 \ 1, 1, 1, 0, 0 \ 2, 0 \ 1, 0 \ 8, 0, 0]^T$. 此时在

命题 $S_6 \sim S_{11}$ 中, S_9 的真实度 $(\theta) = 0 \ 8$ 为最大, 应该将不同材料成分的部件或零件通过拆卸进行分类, 亦即需要将“小灯泡B”从子装配体“HB SM”中拆卸下来, 这样便得到了材料成分相兼容的新子装配体“H SM”. 同理, 对于新子装配体“H SM”, 假设初始各命题真实度为 $\theta_{H SM} = [0, 0 \ 2, 0, 0 \ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, 则经过推理可得 $\theta_{H SM} = \theta_{H SM} = [0, 0 \ 2, 0, 0 \ 1, 1, 0, 0 \ 2, 0, 0, 0 \ 8, 0]^T$, 此时 S_{10} 的真实度 $(\theta_0) = 0 \ 8$ 为最大, 表示子装配体“H SM”作为材料直接进行再生, 不需进一步拆卸 到此, 关于手电筒的拆卸决策推理过程全部结束

从上述推理过程可以看出, 采用模糊Petri网的推理过程完全是并行的, 在产品拆卸序列决策时, 它完全可以替代图2所示的判断决策过程, 并能实现产品或部件拆卸的动态决策, 从而简化拆卸过程, 获得最大拆卸效益

5 结 论

拆卸是废旧产品中零部件再制造及材料回收再利用的重要环节 本文在进行产品拆卸序列决策研究时, 运用模糊推理 Petri 网, 并结合推理过程中的所有约束条件, 建立了基于模糊推理 Petri 网的产品拆卸序列决策模型, 并采用矩阵运算的形式化推理算法, 很好地实现了将产品中若干零件作为子装配体进行拆卸的自动决策, 从而大大简化了拆卸路径分析的难度, 有效地解决了拆卸路径的组合爆炸问题 但对于知识的可靠性程度, 模糊推理 Petri 网的自动生成以及最优拆卸序列的确定等, 还有待进一步研究

参考文献(References)

- [1] Lambert A J D. Optimal Disassembly of Complex Product [J]. *Int J of Produce Research*, 1997, 35(9): 2509-2523
- [2] Tang Y, Zhou Meng-chu. An Integrated Approach to Disassembly Planning and Demanufacturing Operation [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2001, 17(6): 773-784
- [3] 李飒. 基于图论的产品拆卸回收管理决策系统[D]. 北京: 清华大学, 2001.
(Li S. *The System of Management and Decision for Product Disassembly and Recycle Based on Graph Theory* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.)
- [4] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 158-167.
(Jiang Z B. *Petri Nets and It's Applications in Modeling and Control of Manufacturing System* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 158-167.)

(下转第 1188 页)

0 4) 共6种算法(每种算法都在10次实验中收敛的最好结果)在运行代数上的比较。从图中可以看到,尽管最终都得到了最优解,但不同的算法在收敛速度上却相差很大,本文提出的免疫遗传算法收敛速度最快,其次是基于相似性矢量距的免疫遗传算法,而收敛速度最慢的是基本遗传算法

4 结 语

本文提出了一种新的免疫遗传算法,该算法具有如下特点:

1) 具有产生多样性个体的能力。利用相似性确定抗体的浓度,通过抗体的相似性矢量距确定其适应度,并将其作为最终抗体的选择机制,将某些具有较高适应度且浓度相对较低的抗体进入到下一代,维持进化过程中个体的多样性,从而提高免疫遗传算法全局搜索能力,避免陷入局部最优解

2) 具有相似性矢量距选择概率的一般性。采用该种抗体的选择机制,通过改变某些参数可以使整个算法在相似性与浓度之间均衡调节,使整个算法既具有免疫算法的优点又包含遗传算法的长处

3) 具有最优个体记忆功能。利用这种抗原记忆识别功能,可加快搜索速度,提高算法的总体搜索能力;

4) 具有快速全局收敛性能。利用免疫疫苗可以提高算法收敛速度的优点,通过在种群进化过程中,从其最佳个体的基因中提取有效信息,进而开辟一条制作免疫疫苗的新途径,使构造出的算法具有快速全局收敛的良好性能,从而克服基本遗传算法易陷入局部最优解的缺点

参考文献(References)

- [1] Castro L N de, Fernando J, Zuben V. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 239-251.
- [2] Gonzalez F, Dasgupta D. Anomaly Detection Using Real-valued Negative Selection [J]. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 2003, 4(4): 383-403.
- [3] Karanikas C, Proios G. A Nonlinear Discrete Transform for Pattern Recognition of Discrete Chaotic System [J]. *Chaos, Soliton and Fractals*, 2003, 5(17): 195-201.
- [4] Hong J, Lin W, Lee S. An Efficient Production Algorithm for Multihead Surface Mounting Machines Using Biological Immune Algorithm [J]. *International J of Fuzzy Systems*, 2000, 2(1): 45-53.
- [5] 赵俊忠, 黄厚宽, 田盛丰. 免疫机制在计算机网络入侵检测中的应用研究[J]. *计算机研究与发展*, 2003, 40(9): 1293-1298.
(Zhao J Z, Huang H K, Tian S F. Immune Principle and its Application in Intrusion Detection [J]. *J of Computer Research and Development*, 2003, 40(9): 1293-1298.)
- [6] Sung-Ling Chen, Ming-Tong Tsay, Hong-Jey Gow. Scheduling of Cogeneration Plants Considering Electricity Wheeling Using Enhanced Immune Algorithm [J]. *Electrical Power and Energy System*, 2005, 27(1): 31-38.
- [7] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. *电子学报*, 2000, 28(7): 74-78.
(Wang L, Pan J, Jiao L C. Immune Algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(7): 74-78.)
- [8] 郑日荣, 毛宗源, 罗欣贤. 基于欧氏距离和精英交叉的免疫算法研究[J]. *控制与决策*, 2005, 20(2): 161-164.
(Zheng R R, Mao Z Y, Luo X X. Artificial Immune Algorithm Based on Euclidean Distance and King-Crossover [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(2): 161-164.)
- [9] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 93-99.
(Wang X P, Cao L M. *Genetic Algorithm—Theory, Application and Software Implementation* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 93-99.)

(上接第1184页)

- [5] 李凡长. 动态模糊Petri网模型及其应用研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2002, 23(7): 853-858.
(Li F Z. Research on a Dynamic Fuzzy Petri Net Model and its Applications [J]. *Mini-Micro Systems*, 2002, 23(7): 853-858.)
- [6] Gao M M, Zhou M C. Fuzzy Reasoning Petri Nets for Demanufacturing Process Decision [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics*, 2001, 31(1): 167-172.
- [7] Gao M M, Zhou M C. Fuzzy Reasoning Petri Nets [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, Cybernetics*, 2003, 33(5): 314-323.
- [8] Fernandez Roberto, Zerhouni Noureddine. Modeling and Analysis of Disassembly Systems Using Continuous Petri Nets [A]. *Proc of the 4th IEEE Int Symposium on Assembly and Task Planning Soft Research Park* [C]. Fukuoka, 2001: 232-237.