

# 一种基于模糊 Petri 网的 CGF 决策方法研究

陈 坚, 廖守亿<sup>†</sup>, 杨艳丽, 张金生

(第二炮兵工程大学 控制工程系, 西安 710025)

**摘要:** 计算机生成兵力(CGF)系统除了要建立其物理行为模型之外,还要建立反映其主观意识行为的智能决策模型。以弹道导弹攻防对抗 CGF 系统为对象,分析了影响 CGF 决策的相关因素,建立了一种模糊 Petri 网,用于 CGF 决策系统建模。最后提出了一种相应的推理算法,并以弹道导弹攻防对抗为例,分析了其目标选择决策行为。

**关键词:** 计算机生成兵力; 决策; 模糊 Petri 网; 弹道导弹; 攻防对抗

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)01-0111-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.026

## Decision-making method of computer generated forces based on fuzzy Petri-net

CHEN Jian, LIAO Shou-yi<sup>†</sup>, YANG Yan-li, ZHANG Jin-sheng

(Dept. of Control Engineering, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** According to CGF system, both of physical behavior model and intelligence decision-making model should be built. Under the background of ballistic missile countermeasure CGF decision-making system, this paper analysed the key factor that affect CGF decision-making. Secondly, it proposed a fuzzy Petri net(FPN) for CGF decision-making system modeling. Finally, it introduced a reasoning algorithm for fuzzy Petri net, which was used to analyze decision-making behavior of target choice for ballistic missile countermeasure.

**Key words:** computer generated forces(CGF); decision-making; fuzzy Petri net(FPN); ballistic missile; countermeasure

计算机生成兵力(CGF)<sup>[1,2]</sup>模拟真实世界的兵力,需要模拟作战人员的思维活动,因而 CGF 实体具有自治性、社会性、反应性、主动性等特征,具有高度的智能性。由多个 CGF 实体组成的 CGF 模型具有分布性、社会组织性和开放性等特点。传统的 CGF 建模采用面向对象的分析与设计方法,通过 if-then 方式建立各种实体的行为模型。这种条件式判断方法表现能力有限,随着环境复杂度的增加,系统实现的工作量呈指数增加,难以适应 CGF 建模的需求。同时,由于 CGF 是一个复杂的分布式系统,这种方法很难描述战场兵力的群体智能行为,模型的可移植性差,可重用度低。

从分布式人工智能领域发展起来的多 agent 系统(multi-agent systems, MAS)<sup>[3]</sup>理论和方法为分布式作战仿真系统的 CGF 建模提供了一种有效的解决方案<sup>[4-6]</sup>。由于 CGF 实体行为最显著的特征是模拟人的智能性,因此利用  $\pi$  演算<sup>[7,8]</sup>描述的 Petri 网<sup>[9,10]</sup>非常适合用于建立基于 MAS 的 CGF 系统模型。

决策系统是 CGF 的核心和关键,它决定了系统行为的有效性和灵活性。由于战场态势是动态变化的和非确定的,要求作战实体 agent 的智能决策实时性较高;由于虚拟战场范围较大、情况复杂,导致作战实体 agent 对当前战场状态的了解不确定且不完全,无法用数学语言对 CGF 智能决策系统进行精确的描述。因此,建立符合 CGF 作战实体 agent 决策过程的模型,用于指导 agent 决策行为的分析和实现,具有重要意义。

CGF 系统中常用的决策方法包括基于人工智能技术的决

策方法和基于效用理论的决策方法。考虑到决策的实时性、对抗性、实效性和信息不确定性等要求,本文采用可以直接将人类知识用于决策过程的模糊产生式规则来研究 CGF 的决策行为,避免了对复杂的决策行为进行分析和建模的过程,计算量小,实时性好且简便高效。

### 1 CGF 作战指挥决策因素

在 CGF 中,指挥 agent 必须根据敌我双方的态势,把各种信息融合成简明而准确的对军事形势的概括认识,辅助进行态势分析和威胁评估,进而快速、准确地作出决策,规划、指挥部队实施作战行动。对于一个攻防对抗 CGF 决策系统,必须能够根据敌方作战单元类型、航路属性、武器载荷等估计出敌方的战术意图,然后估计出敌方武器的威胁度;根据我方作战单元作战效能、阵地位置、发射方式等因素估计出我方作战单元消耗度。本文主要研究敌目标威胁度和 CGF 目标选择决策问题,忽略其他因素的影响,其层次关系如图 1 所示。

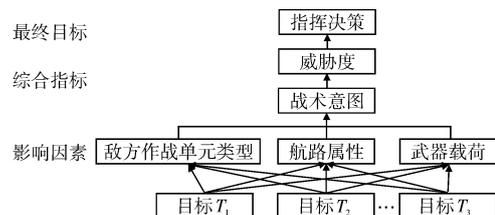


图1 指挥决策层次关系

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-05-29

**作者简介:** 陈坚(1969-),男,湖北赤壁人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为导航、制导与控制,计算机仿真;廖守亿(1974-),男(通信作者),重庆人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为复杂系统建模与仿真、导弹精确制导与控制(lsy\_nudt@sohu.com);杨艳丽(1980-),女,河南卫辉人,讲师,硕士,主要研究方向为基于网络的控制;张金生(1980-),男,河南南阳人,讲师,博士,主要研究方向为导弹精确制导与控制。

由图 1 可以看出,在敌目标的威胁度评估中,其战术意图判别是关键因素,也是攻防对抗 CGF 辅助决策的智能性所在。建立层次分明、结构简洁的敌目标战术意图库,有助于在 CGF 的决策系统中快速、有效地识别敌目标的战术意图。通常可将敌目标的战术意图分解为属性类型层次、战术类型层次、威胁类型层次和任务类型层次<sup>[11]</sup>。

要准确地判断敌目标的战术意图,需要侦察情报单位依据战时情报作战保障条例,协同其他各级情报单位汇总情报信息,建立相应规则进行求解,并应用基于知识的推理算法来完成,其前提是建立相应的战术信息库。战术信息库中的知识主要包括敌目标战术规则库和敌目标战术意图库。敌目标战术规则库为推理敌目标可能战术意图提供推理规则,而敌目标战术意图库包含了敌目标全部可能战术意图。根据敌目标的属性信息和战术信息,通过推理机推理,可得出敌目标可能的战术意图。建立敌目标战术规则库时,由于知识的不确定性和模糊性,而且对于这些概念和条件很难给出严格的内涵和外延,极大地影响了对信息的抽象和推理,并导致不能较精确地估计目标战术意图。因此,可以采用模糊产生式规则表示战术信息库内的信息,然后推导出目标的战术意图。

## 2 基于模糊 Petri 网的 CGF 决策知识表达方法

由于 CGF 决策中存在较多的不确定性因素,很难对各种数据进行精确描述,因此为了恰当地描述 CGF 决策所涉及的知识,本文采用了模糊产生式规则。模糊产生式规则描述的是两个命题之间的模糊关系。设  $R$  为一个模糊产生式规则集合,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ , 则第  $i$  个模糊产生式规则一般可表达为

$$R_i: \text{IF } d_j \text{ THEN } d_k \text{ (CF} = \mu_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中:a)  $d_j$  与  $d_k$  为命题,通常包括高、矮、胖、瘦等模糊变量,命题的真值度是 0 至 1 之间的实数;b)  $\mu_i$  为确定性因子(certainty factor, CF)的数值,  $\mu_i \in [0, 1]$ , 它表征模糊产生式规则的置信度。

模糊产生式规则无法用数学公式精确表示,因此具有图形描述能力且与模糊集合理论相结合的模糊 Petri 网就成为模糊产生式规则建模的理想工具。模糊 Petri 网(fuzzy petri nets, FPN)能够使知识的表示简单、清晰,且能够表现出知识库系统中规则之间的结构化特性;同时还具有模糊系统的模糊推理能力,便于知识的分析、推理、测试和决策支持等。

将 FPN 用于知识表示,利用库所表示模糊产生式规则中的命题,变迁表示模糊产生式规则,但其推理过程与 FPN 的形式是分离的<sup>[12]</sup>;在此基础上对其模型和算法进行改进,用于判断两个命题之间是否存在因果关系,推理算法还可利用基于可达树的方法实现<sup>[13,14]</sup>;另外,从不同的角度提出 FPN,也可建立相应的推理算法<sup>[15-17]</sup>。

在 FPN 中,其拓扑表示模糊产生式规则的知识结构,模糊产生式规则中的命题可以用库所表示,库所包含 0 或 1 个 Token,表示命题的真值度;FPN 变迁的发射过程表示规则的推理,并且规则的置信度与变迁相关联;命题与推理规则之间的因果联系用库所和变迁之间的有向弧表示。

### 2.1 模糊 Petri 网基本定义

定义 1 模糊 Petri 网是一个八元组,  $\text{FPN} = (P, T, D, F,$

$W, \lambda, \alpha, \beta)$ 。其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  为库所的有限集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  为变迁的有限集合; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  为命题的有限集合,  $P \cap T \cap D = \varnothing, |P| = |D|; F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  为库所和变迁之间的输入输出弧的有限集合; $W: F \rightarrow [0, 1]$  为输入输出弧上的权值,其中变迁输入弧上的权值  $W_i$  满足  $\sum W_{i_m} = 1$ ,表示各个输入对于输出的贡献度,输出弧上的权值  $W_o$  表示规则的置信度; $\lambda: T \rightarrow [0, 1]$  为变迁发射的阈值; $\alpha: P \rightarrow [0, 1]$  为库所  $P$  的一个关联函数,表示命题的真值度; $\beta: P \rightarrow D$  为库所  $P$  的一个关联函数,表示库所与命题间的映射函数。

指定了初始化标志(token)的模糊 Petri 网称为标志网,初始化标志记为  $M_0(p)$ ,表示系统的初始状态,token 用实心圆点表示。库所  $p_i$  中的 token 值表示为  $\alpha(p_i), \alpha(p_i) \in [0, 1]$ 。

尽管在结构上模糊产生式规则的描述与普通 Petri 网的结构类似,但知识的推理过程是命题真值的传递,而不是普通 Petri 网表示的状态转移,因此用于知识表达与推理的 FPN 不同于普通 Petri 网<sup>[16]</sup>:a)在 FPN 中,库所中的 token 不能超过一个,而且 token 的值与 0 和 1 之间的一个实数相关联,表示命题的真值度,与普通 Petri 网中 token 表示资源的概念不同;b)在 FPN 中,变迁的发射意味着命题真值度的传递,因此 token 不从变迁的输入库所中移除,故而 FPN 不存在传统 Petri 网中的并发冲突问题。

FPN 变迁的使能和发射规则如下:

定义 2 设模糊 Petri 网  $\text{FPN} = (P, T, D, F, W, \lambda, \alpha, \beta)$ ,那么:

a) 对于一个变迁  $t \in T$ ,若  $\forall p \in {}^*t: M(p) = 1 \wedge \alpha(p) \cdot W_i(t) \geq \lambda$ ,则称变迁  $t$  在标志  $M$  下为使能的,记为  $M[t >]$ 。

b) 若  $M[t >]$  成立,则  $t$  发射后,产生另一新标志  $M'$ ,记为  $M[t > M']$ ,且有

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) & p \in {}^*t \wedge \bullet \\ F(M(p) + \alpha(p) \times W_o(p)) & p \in t \setminus \bullet \\ M(p) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

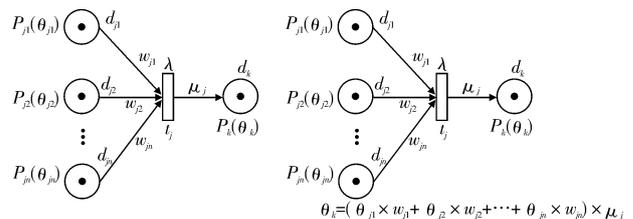
其中  $F(x) = \begin{cases} x & \text{若 } 0 < x < 1 \\ 1 & \text{若 } x \geq 1 \end{cases}$ 。

### 2.2 复合模糊产生式规则的模糊 Petri 网模型

复合模糊产生式规则是包含“AND”或“OR”运算符的模糊产生式规则。复合模糊产生式规则可以分为以下几类:

a) 第一类

IF  $d_{j_1}$  AND  $d_{j_2}$  AND  $\dots$  AND  $d_{j_n}$  THEN  $d_k$  (CF =  $\mu_i$ ), 相应的模糊 Petri 网模型如图 2(a) 所示,其推理过程如图 2(b) 所示。



(a) 变迁  $t_j$  发射前 (b) 变迁  $t_j$  发射后

图 2 第一类模糊 Petri 网模型

b) 第二类

IF  $d_j$  THEN  $d_{k_1}$  AND  $d_{k_2}$  AND  $\dots$  AND  $d_{k_n}$  (CF =  $\mu_i$ ), 相应的模糊 Petri 网模型如图 3(a) 所示,其推理过程如图 3(b) 所示。

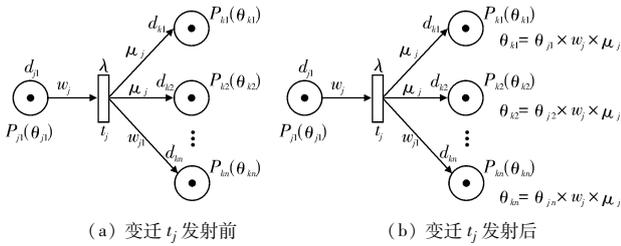


图 3 第二类模糊 Petri 网模型

c) 第三类

IF  $d_{j1}$  OR  $d_{j2}$  OR...OR  $d_{jn}$  THEN  $d_k$  ( $CF = \mu_i$ ), 相应的模糊 Petri 网模型如图 4(a) 所示,其推理过程如图 4(b) 所示。

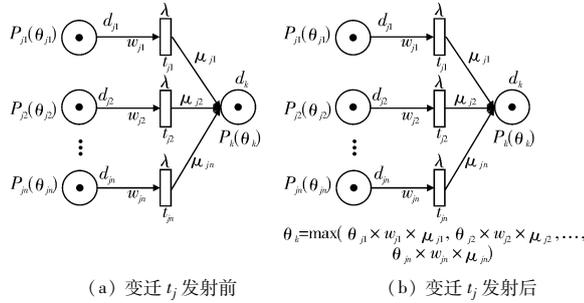


图 4 第三类模糊 Petri 网模型

d) 第四类

IF  $d_j$  THEN  $d_{k1}$  OR  $d_{k2}$  OR...OR  $d_{kn}$  ( $CF = \mu_i$ ), 这种形式的规则不能进行演绎推理,没有特定结论产生,所以这种规则在知识库中不允许出现。

2.3 基于模糊 Petri 网的推理算法

根据 FPN 模型及其使能与发射规则,可以研究推理算法,并依据命题的真值度获得规则最终的推理结果,因此 CGF 决策系统可以利用相关的知识作出相应的决策,由此可见,推理算法至关重要<sup>[16,18]</sup>。

定义 3 模糊 Petri 网的矩阵形式定义如下:

- a) 模糊 Petri 网的输入矩阵为  $\Delta = \{W_{l,nm}\}$ ,表示库所  $P_n$  到变迁  $T_m$  上的输入关系和权值,若  $P_n$  不是  $T_m$  输入时,  $W_{l,nm} = 0$ ;
- b) 输出矩阵为  $\Gamma = \{W_{o,nm}\}$ ,表示变迁  $T_m$  到库所  $P_n$  上的输出关系和规则的置信度,若  $P_n$  不是  $T_m$  输出时,  $W_{o,nm} = 0$ ;
- c)  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$  为定义在库所集  $P$  上的状态向量,表示命题的真值度,  $\alpha_0$  表示命题的初始真值度;
- d)  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]^T$  为变迁集  $T$  上的阈值。

为了形式化地表示模糊 Petri 网的发射规则,引入三个算子。

定义 4 设  $A, B, C, D, E$  均为为矩阵

- a) 加法算子  $\oplus: A \oplus B = C, c_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ ;
- b) 乘法算子  $\otimes: A \otimes B = D, d_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik} \cdot b_{kj}\}, i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, n$ ;
- c) 比较算子  $\Theta: A \Theta B = E$ , 若  $a_{ij} > b_{ij}, e_{ij} = a_{ij}$ ; 若  $a_{ij} < b_{ij}, e_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。

设某个推理过程中有  $n$  个命题、 $m$  个推理规则,则其 FPN 模型中有  $n$  个库所和  $m$  个变迁,FPN 的输入和输出矩阵、真值度向量和阈值分别根据定义 3 给出。

模糊 Petri 网推理算法步骤如下:

- a) 计算命题库所输入真值度

$$E = \Delta^T \cdot \alpha_0 \quad (3)$$

其中  $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ 。

- b) 命题库所输入真值度与变迁阈值的比较

$$G = E \Theta \lambda \quad (4)$$

其中  $G$  为  $m$  维列向量。当命题输入真值度大于变迁阈值时,  $g_j = e_j$ , 否则  $g_j = 0, j = 1, 2, \dots, m$ 。

- c) 计算输出命题库所的真值度

$$\alpha^1 = \Gamma \otimes G \quad (5)$$

$\alpha^1$  表示经过第一轮推理后得到的结论命题的真值度。在  $\alpha^1$  中,不能直接推理得到不是结论命题的库所,可信度为零。

- d) 计算当前可得到的所有命题库所的真值度

$$\alpha_1 = \alpha_0 \oplus \alpha^1 \quad (6)$$

第一步推理结束。

e) 令式(6)中的  $\alpha_1$  代替式(3)中的  $\alpha_0$ , 利用式(3) ~ (6) 进行迭代。经过  $k$  次推理后,命题的真值度为  $\alpha_k = \alpha_{k-1} \oplus \alpha^k$ 。

- f) 若  $\alpha_k = \alpha_{k-1}$ , 推理过程结束。

根据以上步骤,可以得出模糊 Petri 网用于推理的完整算式为

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} \oplus (\Gamma \otimes ((\Delta^T \cdot \alpha_{k-1}) \Theta \lambda)) \quad (7)$$

从以上的推理过程可以看出,采用 FPN 的推理过程是并行的,推理计算的迭代步数只与推理进行的最大深度有关,而与规则的多少无关。

3 CGF 目标决策选择分析实例

实例:弹道导弹攻防对抗 CGF;

决策目标:敌方目标的战术意图;

决策指标:战术意图的可信度和威胁度;

决策依据:导弹部队司令部作战情报保障条例;

决策意见提出单位:导弹部队侦察情报部门。

弹道导弹攻防对抗 CGF 形式化模型如图 5 所示。

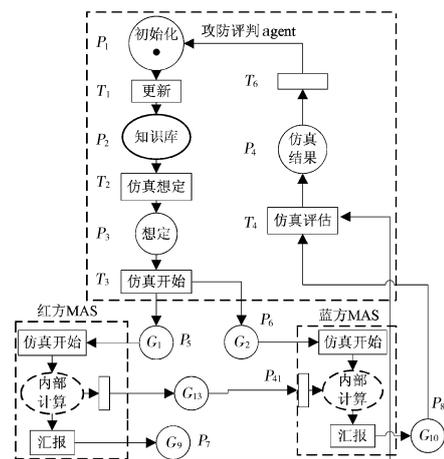


图 5 弹道导弹攻防对抗 CGF 形式化模型

假设在上述弹道导弹攻防对抗 CGF 系统中,蓝方作战区域发现有三类红方目标,分别为弹道导弹、侦察机和战斗机。设红方目标的战术意图估计框架为  $\Phi = \{A, C, S\}$ , 其中  $A$  表示攻击,  $C$  表示战斗掩护,  $S$  表示侦察。根据红方目标战术意图及其所表现的相关状态信息,可以得到以下模糊产生式规则:

规则 R1: IF  $T$  is  $t_1$  AND  $R$  is  $r_1$  AND  $W$  is  $w_1$ , THEN  $\Phi$  is  $A$ , 可信度为 0.8, 阈值为 0.6;

规则 R2: IF  $T$  is  $t_2$  AND  $R$  is  $r_2$  AND  $W$  is  $w_2$ , THEN  $\Phi$  is  $C$ , 可信度为 0.8, 阈值为 0.6;

规则 R3: IF  $T$  is  $t_3$  AND  $R$  is  $r_3$  AND  $W$  is  $w_3$ , THEN  $\Phi$  is  $S$ , 可信度为 0.8, 阈值为 0.6;

规则 R4:IF  $\Phi$  is A AND  $P$  is  $p_1$ , THEN  $M$  is  $H$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6;

规则 R5:IF  $\Phi$  is A AND  $P$  is  $p_2$ , THEN  $M$  is  $G$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6;

规则 R6:IF  $\Phi$  is C AND  $P$  is  $p_1$ , THEN  $M$  is  $G$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6;

规则 R7:IF  $\Phi$  is C AND  $P$  is  $p_2$ , THEN  $M$  is  $L$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6;

规则 R8:IF  $\Phi$  is S AND  $P$  is  $p_1$ , THEN  $M$  is  $G$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6;

规则 R9:IF  $\Phi$  is S AND  $P$  is  $p_2$ , THEN  $M$  is  $L$ ,可信度为 0.8,阈值为 0.6。

其中  $T$  表示红方目标类型,  $t_1$  表示弹道导弹,  $t_2$  表示战斗机,  $t_3$  表示侦察机;  $R$  表示辐射强度,  $r_1$  表示强,  $r_2$  表示中,  $r_3$  表示弱;  $W$  表示武器载荷,  $w_1$  表示大,  $w_2$  表示中,  $w_3$  表示小;  $P$  表示目标航路捷径,指红方目标飞行轨迹在地面上的投影与发射阵地之间的最小距离,  $p_1$  表示近,  $p_2$  表示远;  $M$  表示红方目标的威胁度,  $H$  表示大,  $G$  表示中,  $L$  表示小。

根据规则,红方目标战术意图推理的输入命题为:

$T$  is  $t_1(P_1)$ 、 $R$  is  $r_1(P_2)$ 、 $W$  is  $w_1(P_3)$ 、 $T$  is  $t_2(P_4)$ 、 $R$  is  $r_2(P_5)$ 、 $W$  is  $w_2(P_6)$ 、 $T$  is  $t_3(P_7)$ 、 $R$  is  $r_3(P_8)$ 、 $W$  is  $w_3(P_9)$ 、 $P$  is  $p_1(P_{10})$ 、 $P$  is  $p_2(P_{11})$ ;

输出命题为: $\Phi$  is A( $P_{12}$ )、 $\Phi$  is C( $P_{13}$ )、 $\Phi$  is S( $P_{14}$ )、 $M$  is H( $P_{15}$ )、 $M$  is G( $P_{16}$ )、 $M$  is L( $P_{17}$ );规则的推理过程用变迁表示。

以上模糊产生式规则的模糊 Petri 网模型如图 6 所示,其中弧的权值及变迁的阈值标记在模型上。

首先输入  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_{10}$  和  $P_{11}$  的初始真值度,分别为 0.9、0.8、0.9、0.8 和 0.2,然后根据定义 3,化为矩阵形式进行计算,根据式(7)的形式化推理算法进行迭代运算,最终结果如下:

$$\alpha_{11} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.696 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\alpha_{21} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.696 & 0 & 0 & 0.59 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\alpha_{31} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.696 & 0 & 0 & 0.59 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

由于第 2、3 次迭代结果相同,所以推理结束,其结果为

$$\alpha_1 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.696 & 0 & 0 & 0.59 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

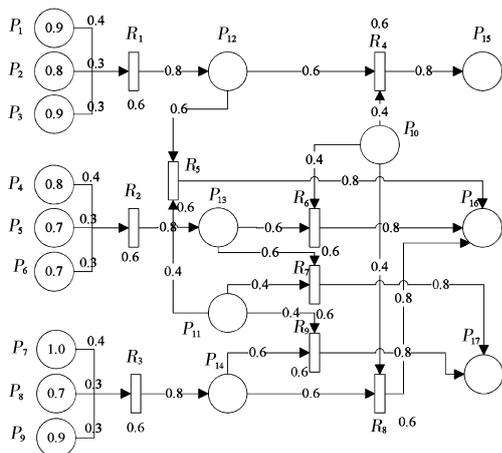


图 6 战术意图决策模糊 Petri 模型

即红方弹道导弹产生高威胁度的真值度为 0.59。

同理,分别输入  $P_4 \sim P_{11}$  的初始真值度,可以求出战斗机的中威胁度的真值度为 0.54,侦察机产生的中威胁度的真

值度为 0.593,从而可以看出红方侦察机对蓝方造成的威胁要高于战斗机。综合以上结果,由这三种红方目标产生的威胁度由高到低分别为弹道导弹、侦察机和战斗机,因此蓝方作战单元选择攻击目标的顺序为弹道导弹、侦察机和战斗机。

从以上推理过程可以看出,图 5 的模糊 Petri 网模型最大深度为两层,所以迭代只需要进行两步就可完成推理过程。

### 4 结束语

影响 CGF 目标选择决策的因素很多,由于 CGF 中知识的不确定性和模糊性,需要采用模糊产生式规则进行知识表示。本文建立了一种模糊 Petri 网对模糊产生式规则的建模,建立了复合模糊产生式规则的模糊 Petri 网模型,模糊 Petri 网的推理过程采用矩阵运算的形式进行,使得模糊推理过程更加简单、快速和易于实现。最后利用模糊 Petri 网对弹道导弹攻防对抗 CGF 的目标选择决策进行了建模实践和分析。

### 参考文献:

- [1] 宋巍,慕晓东,余安欣,等. 基于 Petri 网的弹道导弹攻防对抗仿真系统 CGF 模型[J]. 火力指挥与控制,2012,37(3):99-102.
- [2] 宦婧,周伟祝,鲁华杰. 一种 CGF 动态协作模型研究[J]. 舰船电子工程,2012,32(6):40-42.
- [3] 李慧琴,薛雷. 多 agent 系统仿真平台[J]. 计算机系统应用,2012,21(5):8-11.
- [4] 黄柯棣,刘宝宏,黄健. 作战仿真技术综述[J]. 系统仿真学报,2004,16(9):1887-1895.
- [5] 贾连兴,单维峰,鲁云军. 作战仿真研究热点及发展[J]. 系统仿真学报,2007,19(14):3148-3157.
- [6] 路建伟,康晓予,唐松浩. 美军作战实验室发展现状及其启示[J]. 电光与控制,2007,14(2):81-88.
- [7] MILNER R, PARROW J, WALKER D. A calculus of mobile processes[J]. Journal of Information and Computation,1992,100(1):1-77.
- [8] 周巢尘. 形式语义学引论[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1985.
- [9] 余晓,吴敬章,王巍. 基于颜色 Petri 网的服务组合建模与验证[J]. 计算机系统与应用,2012,21(9):108-112.
- [10] 于振华. 多 agent 系统形式化建模方法研究[D]. 西安:西安交通大学,2006.
- [11] 宋元,章新华,郭徽东. 空中目标战术意图层次推理框架及实现[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2005,27(5):63-66.
- [12] LOONEY C G. Fuzzy Petri nets for rule-based decision-making[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics,1988,18(2):178-183.
- [13] CHEN S M, KE J S, CHANG J F. Knowledge representation using fuzzy Petri nets[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,1990,2(3):311-319.
- [14] CHEN S M. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,2002,14(2):386-397.
- [15] GAO Mei-mei, ZHOU Meng-chu, HUANG Xiao-guang, et al. Fuzzy reasoning Petri nets[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans,2003,33(3):314-324.
- [16] LI Xiao-ou, YU Wen, LARA-ROSANO F. Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy Petri net framework[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews,2000,30(4):442-450.
- [17] 贾立新,薛韵义,茹峰. 采用模糊 Petri 网的形式化推理算法及其应用[J]. 西安交通大学学报,2003,37(12):1263-1266.