

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.007

基于 MC 的电子对抗情报系统 ESCPN 模型性能分析

熊杰, 刘湘伟, 周国辉

(电子工程学院 软件工程中心, 安徽 合肥 230037)

摘要: 针对基本 Petri 网对电子对抗情报系统描述能力不够的缺点, 采用层次化的结构和面向对象的思想, 提出一种扩展的随机着色 Petri 网 (Extended Stochastic Coloured Petri Net, ESCPN) 模型。对 Petri 网结构、建模元素、执行规则等进行扩充, 分析基于 MC 状态方程的各项性能指标, 以电子对抗情报系统中的初级电子目标生产子系统 ESCPN 模型为例, 应用所建立的性能指标对系统的时间性能进行分析。分析表明, ESCPN 模型和连续时间的马尔可夫链 (MC) 是同构的, 能加强模型的描述和分析能力。

关键词: 电子对抗情报系统; 扩展的随机着色 Petri 网; 马尔可夫链; 时间性能

中图分类号: TN97; N945.12 **文献标识码:** A

Performance Analysis of Electronic Countermeasure Intelligence System ESCPN Model Based on MC

Xiong Jie, Liu Xiangwei, Zhou Guohui

(Software Engineering Center, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: A kind of extended stochastic colored Petri net (ESCPN) is put forward which combines the hierarchy and object-oriented idea concerning the defects of Petri net that it is inadequate to describe electronic countermeasure intelligence system. The structure of Petri net, modeling elements and run rules are extended in the ESCPN model. Its performance indexes based on the state equation of Markov chain (MC) are analyzed. Then the ESCPN model of electronic target intelligence producing is given and the time performance is analyzed. It is shown that ESCPN is same as a continuous time Markov chain, and the description and analysis abilities of Petri net model are enhanced.

Keywords: electronic countermeasure intelligence system; extended stochastic colored Petri net; Markov chain; time performance

0 引言

电子对抗情报系统是包括信息处理和信息传输活动的离散事件系统, 主要特征包括: 组成要素多层次和大规模; 各组成要素之间或各子系统之间的关联形式多种多样; 工作过程中充满大量的随机性、偶然性和并发性, 故很难用数学方程来描述和分析电子对抗系统的各项性能。Petri 网是描述具有同步、并发、冲突特征系统的一种有效工具^[1], 非常适合对电子对抗情报系统进行建模与评估, 但基本 Petri 网对电子对抗情报系统描述能力还不够^[2]。故采用层次化的结构和面向对象的思想, 提出一种扩展的随机着色 Petri 网 (Extended Stochastic Coloured Petri Net, ESCPN) 模型, 以证明 ESCPN 模型同构于连续时间的马尔可夫链 (MC)。

1 ESCPN 模型的形式化定义

扩展随机着色 Petri 网的定义为八元组 $ESCPN = (\Sigma, P, T, \Pi, A, C, \Pi, M_0)$, 其中:

- 1) Σ 表示有限非空颜色集;
- 2) $P = PP \cup IOP$ 为库所集, 其中 PP 为扩展后的有色库所集, IOP 为系统 (超变迁) 与外界进行消息交换的输入库所及输出库所集合;
- 3) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为扩展后的变迁集;
- 4) $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i\}$ 为超变迁的有限集合, 每个 $\Pi_i \in \Pi$ 都表示一个扩展的随机有色 Petri 网 $ESCPN_i = (\Sigma_i, P_i, T_i, \Pi_i, A_i, C_i, \Pi, M_{0i})$;
- 5) $A = P \times T \cup T \times P$ 为连接库所与变迁的又向弧集, 且 $A = A_b \cup A_r \cup A_f$, 其中 A_b 为基本弧集, A_r 为约束弧集, A_f 为柔性弧集;
- 6) $C: P \cup T \rightarrow \phi(\Sigma)$ 为颜色函数, $\phi(\Sigma) \in \Sigma_{MC}$, 对于 $\forall p \in P$, $C(p)$ 是 p 上所有可能的出现色集, 对于 $\forall t \in T$, $C(t)$ 是 t 上所有可能的出现色集;
- 7) $\Pi: T \rightarrow F$, $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 对应为每个随机变迁的时延分布函数集。如在 Molly 提出的连续

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-04-06

作者简介: 熊杰 (1982-), 男, 湖南人, 博士研究生, 从事军事信息系统建模与电子战效能评估研究。

时间 SPN 模型^[5]中, 相关于每个转移的分布函数定义为一个指数分布函数 $\forall t_i \in T: F_i = 1 - e^{-\lambda_i x}$, 其中, 实参数 $\lambda_i > 0$ 是转移 t_i 的平均实时速率, 变量 $x > 0$, 则 SPN 模型的时延分布函数集可以表示为 $\Pi: T \rightarrow \lambda, \lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$;

8) $M_0: P \rightarrow \Sigma_{MS}$ 为初始标识集。

2 同构于连续时间的马尔可夫链

在扩展随机着色 Petri 网的定义 $ESCPN = (\Sigma, P, T, \Pi, A, C, \Pi, M_0)$ 中, $\Pi: T \rightarrow F$, $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 对应为每个随机变迁的时延分布函数集, 在连续 ESCPN 中, 一个变迁 T 变成可实施到实施之间的时间被看成一个连续随机变量 x_i (正实数), 且服从分布函数: $F_i(x) = P\{x_i \leq x\}$, 如果变迁延时 x_i 服从参数为 λ_i 的指数分布, 这样 ESCPN 就跟马尔可夫链(MC)联系起来。

定理 1^[3]: 2 个随机转换系统是同构的, 当且仅当下列条件成立:

1) 在 2 个系统中的状态之间存在 1 个一对一的满射函数 F ;

2) 在 1 个系统中存在 1 个状态转换 $S_i \rightarrow S_j$, 当且仅当在另一个系统中存在 1 个状态转换 $F(S_i) \rightarrow F(S_j)$;

3) 对于任意状态, 概率 $P[S_i \rightarrow S_j, \tau] = P[F(S_i) \rightarrow F(S_j), \tau]$ 。

此定义考虑的是 ESCPN 的状态序列, 而不是变迁序列, 即从一个标识 M_i 到另一个标识 M_j 可分别实施多个变迁, 那么这些变迁是不可区分的, 它们的动作就好像单个变迁一样, 为系统的分析带来很大的方便。

定理 2^[4]: 任何具有有限位置、有限变迁的连续时间的 SPN 同构于 1 个一维连续时间的马尔可夫链 (MC)。

引理: ESCPN 是对 SPN 库所和变迁中加入颜色并对基本建模元素进行扩展形成的, 根据定理 1 可以推断: 有限位置、有限变迁、连续时间的 ESCPN 同构于 1 个一维连续时间的马尔可夫链 (MC)。

证明: 假设 $ESCPN = (\Sigma, P, T, \Pi, A, C, \Pi, M_0)$ 为有界、连续时间的扩展随机着色 Petri 网, 而 ESCPN 在初始标识下是可达的, 那么

$\forall M \in [M_0 > ; \forall s_i, s_j \in S (0 \leq i, j \leq K)$, 有: 1) ESCPN 是可达的, 记可达标识集为 $R(M_0)$, $R(M_0)$ 可以看成是马尔可夫链的状态集 M_i , 所以, 库所跟马尔可夫链的状态就对应起来了, 库所状态的改变对应于马尔可夫链的状态的改变, 满足满射关系; 2) 若存在库所状态的转变: $s_i \rightarrow s_j$, 那么有马尔可夫链状态的转变: $M(s_i) \rightarrow M(s_j)$; 3) 在一个标识 M 下, 如果有 N 各可实施的变迁, 则某一时刻这 N 个变迁的实施都是可能的, 对某一个变迁 $t_i \in N$ 实施的可能性为 $P(M[t_i >]) = \lambda_i / \sum_{t_k \in N} \lambda_k$, 所以有

$$P[S_i \rightarrow S_j, t] = P[M(S_i) \rightarrow M(S_j), t] = \lambda_i / \sum_{t_k \in N} \lambda_k。综合 1)、$$

2)、3), 由定理 1 可知, 有限位置、有限变迁、连续时间的 ESCPN 同构于 1 个一维连续时间的 MC。故可应用基于 MC 的方法对 ESCPN 模型进行性能分析。

3 基于 MC 状态方程的性能指标

3.1 获取 ESCPN 同构的 MC

假定随机时延 x_i 是一个连续且服从指数分布的随机变量, 其分布函数为 $\forall t \in T, F_i = 1 - e^{-\lambda_k x_i}, \lambda_k > 0$ 是变迁 t_i 的平均实施速率, 变量 $x_i \geq 0$ 。ESCPN 同构的 MC 的获取如下: 求出 ESCPN 模型的可达图, 将其每条弧上的标注的实施变迁 t_i 换成其平均实施速率 λ_k , 即可得到 MC。假设 $[M_0 >$ 有 n 个元素, MC 中有 n 个状态。

3.2 求解 MC 的稳定状态概率^[3]

首先, 定义一个 $n \times n$ 阶的转移矩阵 $Q = [q_{i,j}], 1 \leq i, j \leq n$ 。

1) $i \neq j$ 时,

$$q_{i,j} = \begin{cases} d(1 - e^{-\lambda_k \tau}) / d\tau|_{\tau=0} = \lambda_k, \exists t_k \in T: M_i[t_k > M_j; \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

2) $i = j$ 时,

$$q_{i,i} = d \prod_k [1 - (1 - e^{-\lambda_k \tau})] / d\tau|_{\tau=0} = d(e^{-\tau} \sum_k \lambda_k) / d\tau|_{\tau=0} = -\sum_k \lambda_k。$$

其中, $k \neq i$ 且 $\exists M' \in [M_0 >, \exists t_k \in T: M_i[t_k > M']$, λ_k 是 t_k 的速率。

设 MC 中 n 个状态的稳定状态概率是一个行向

量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 根据马尔可夫过程有下列线性方程组:

$$\begin{cases} XQ = 0 \\ \sum_i x_i = 1, \quad 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (1)$$

求解上述线性方程组, 可得到每个可达标识的稳定概率 $P[M_i] = x_i (1 \leq i \leq n)$.

3.3 求解 ESCPN 的性能指标

在求得稳定概率的基础上, 可进一步分析以下性能指标:

1) 标记概率密度函数

在稳定状态下, 每个位置中所包含的标记数量的概率。对 $\forall s \in S, \forall i \in N$, 令 $P[M(s) = i]$ 表示位置 s 中包含 i 个标记的概率, 则可从标识的稳定求得位置 s 的标记概率密度函数如下:

$$P[M(s) = i] = \sum_j P[M_j] \quad (2)$$

其中, $M_j \in [M_0 > \text{且 } M_j(s) = i]$.

2) 在位置中的平均标记数

对于 $\forall s_i \in S$, \bar{u}_i 表示在稳定状态下, 位置 s_i 在任一可达标识中平均所含有的标记数, 则有:

$$\bar{u}_i = \sum_j j \times P[M(s_i) = j] \quad (3)$$

一个位置集 $S_j \subseteq S$ 的平均标记数是 S_j 中每一个位置 $s_i \in S_j$ 的平均标记数之和, 记为 \bar{N}_j , 则有:

$$\bar{N}_j = \sum_{s_i \in S_j} \bar{u}_i \quad (4)$$

3) 变迁的利用率

$\forall t \in T$ 的利用率 $U(t)$ 等于使 t 可实施的所以标识的稳定概率之和。

$$U(t) = \sum_{M \in E} P(M) \quad (5)$$

其中, E 是使 t 可实施的所有可达标识集合。

4) 变迁的标记流速

$\forall t \in T$ 的标记流速是指单位时间内流入 t 的后置位置 s 的平均标记数 $R(t, s)$:

$$R(t, s) = W(t, s) \times U(t) \times \lambda \quad (6)$$

其中, λ 是 t 的平均实施速率。

4 实例分析

4.1 电子目标初级情报生产子系统

以电子对抗情报系统中的电子目标初级情报生产子系统为例, 建立了 ESCPN 模型如图 1, 图 1(a) 为电子目标情报生产的顶层 ESCPN 模型, 图 1 中, Π_1 、 Π_2 、 Π_3 、 Π_4 为超变迁, 分别表示信号预处理、初级目标处理、目标属性分析和初级情报管理子系统, 超变迁可以进一步分解为详细的 ESCPN 子模型, 其中, 信号预处理子系统分解后的详细模型分别如图 1(b)。其中, 图 1 的右半部分为根据 Petri 网模型层次分解和化简技术^[6]对所建立的 ESCPN 模型进行化简的结果, 主要解决马尔可夫链构造及状态方程求解过程中的状态空间爆炸问题。

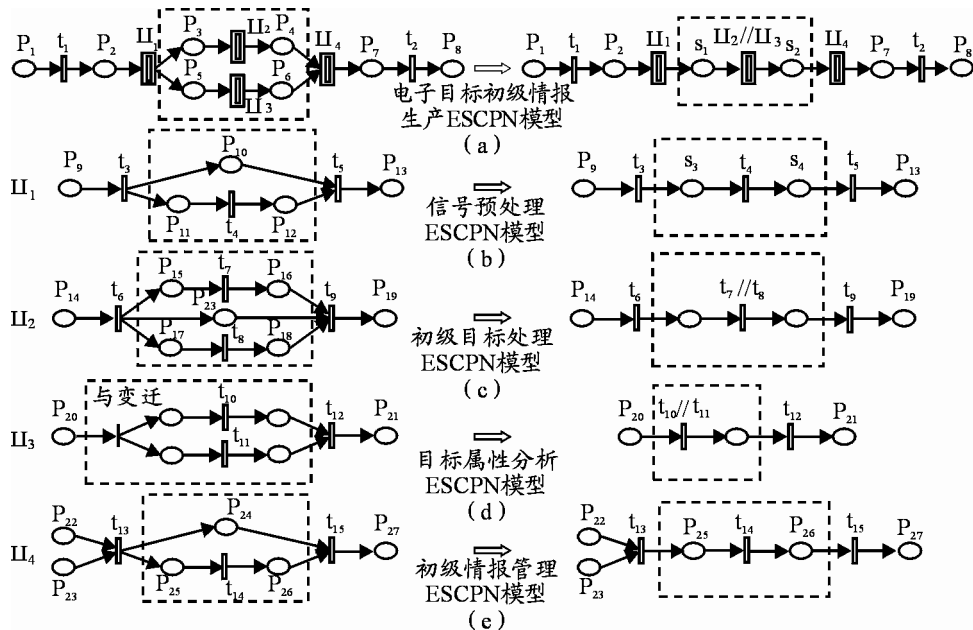


图 1 电子目标初级情报生产 ESCPN 模型及化简

图 1 中各变迁的含义分别是: t_1 : 信号录入, t_2 : 初级情报分发, t_3 : 提取已知信号, t_4 : 剔除未知信

号, t_5 : 信号结论分析, t_6 : 全脉冲分选, t_7 : 目标定位, t_8 : 目标识别, t_9 : 关联确认, t_{10} : 目标分类统计, t_{11} : 目标参数分析, t_{12} : 综合分类统计, t_{13} : 初级情报管理, t_{14} : 目标关联, t_{15} : 电子目标型号分析。

4.2 系统 ESCPN 模型同构的 MC 及性能求解

这里只以信号预处理 ESCPN 模型(图 1(b)右半部分)为例, 说明 MC 的同构及各性能指标的求解过程。首先, 在库所 p_{13} 和 p_9 之间添加变迁 t_1^* , 使得信号预处理系统变成一个连续、有界的封闭回路, 这样, 模型中的时间变迁集为 $T_1 = \{t_3, t_4, t_5, t_1^*\}$, 定义每个时间变迁对应的引发速率为 $\lambda = \{\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_1^*\}$ 。从信号预处理的可达标识图得到同构的 MC 如图 2。

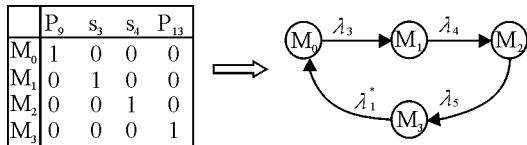


图 2 信号预处理 ESCPN 模型的 MC

由式 (1) 列出信号预处理 ESCPN 模型的状态方程组并求解如下:

$$\begin{cases} \lambda_3 x_0 = \lambda_1^* x_3 \\ \lambda_4 x_1 = \lambda_3 x_0 \\ \lambda_5 x_2 = \lambda_4 x_1 \\ x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_0 = \lambda_4 \lambda_5 \lambda_1^* / R_1 \\ x_1 = \lambda_3 \lambda_5 \lambda_1^* / R_1 \\ x_2 = \lambda_3 \lambda_4 \lambda_1^* / R_1 \\ x_3 = \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 / R_1 \\ R_1 = \lambda_3 \lambda_4 \lambda_1^* + \lambda_3 \lambda_5 \lambda_1^* + \lambda_4 \lambda_5 \lambda_1^* + \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \end{cases} \quad (7)$$

用 f_1^* 表示单位时间内输入信号预处理模块并完成处理的全脉冲数据批数, 即单位时间内通过变迁 t_1^* 输出的标识个数, 则 $T_1^* = 1/f_1^*$ 就是扩展网系统(包括变迁 t_1^*)的延时时间, 用 T_1^* 减去变迁 t_1^* 的平均引发延时时间 $1/\lambda_1^*$ 就是信号预处理系统完成每一批全脉冲数据处理的平均服务时间 T_1 。

由式 (6) 可以得到 f^* 的表达式如下:

$$f_1^* = \lambda_1^* \cdot P[M(p_{13} = 1)] = \lambda_1^* \cdot P[M_3] = \frac{\lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_1^*}{R} \quad (8)$$

由式 (8) 可以得到信号预处理系统完成每一批全脉冲数据处理的平均服务时间 T_1 :

$$T_1 = \frac{1}{f_1^*} - \frac{1}{\lambda_1^*} = \frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4} + \frac{1}{\lambda_5} \quad (9)$$

同理, 可求得初级目标处理、目标属性分析及初级情报管理子系统对每一批输入数据的平均服务时间分别为 T_2 、 T_3 、 T_4 。对电子目标初级情报生产顶层 ESCPN 模型, 可再次建立马尔可夫状态方程进行性能评估, 顶层模型中非基本变迁可用细化的子网模型等效替换, 其中, Π_1 、 Π_2 、 Π_3 、 Π_4 的引发速率分别为 $\frac{1}{T_1}$ 、 $\frac{1}{T_2}$ 、 $\frac{1}{T_3}$ 、 $\frac{1}{T_4}$, 可以求得电子目标初级情报生产系统对每一批数据的平均服务时间 $T = \frac{1}{\lambda_4} + T_1 + T_2 + T_3 - \frac{T_2 T_3}{T_2 + T_3} + T_4 + \frac{1}{\lambda_2}$ 。

4.3 时间性能分析及改进措施

在仿真设置中, 假设每小时向电子目标初级情报生产系统输入 15 批全脉冲数据, 即 $\lambda^* = 15$, 其中, 每批全脉冲数据包括 3 000 条全脉冲记录, 设置各时间变迁所对应引发速率的参考值如表 1。

表 1 各引发速率的参考值

引发速率	参考值	引发速率	参考值	引发速率	参考值	引发速率	参考值	引发速率	参考值
λ_1	60	λ_5	12	λ_8	4	λ_{11}	8	λ_{14}	9
λ_3	19	λ_6	3.5	λ_9	6.5	λ_{12}	10	λ_{15}	7
λ_4	17	λ_7	5	λ_{10}	14	λ_{13}	25	λ_2	30

求得电子目标初级情报生产系统及各子系统对每一批全脉冲数据的平均服务时间如表 2。

表 2 各情报处理系统平均服务时间

各情报处理系统	平均服务时间 T_i/h
信号预处理子系统	0.194 79
初级目标处理子系统	0.778 45
目标属性分析子系统	0.250 97
初级目标管理子系统	0.293 97
电子目标初级情报生产系统	1.378 4

由表 2 可以看出, 系统对每一批全脉冲数据的平均处理时间为 1.378 4 h, 很难达到实时处理的要求, 同时, 可以看出初级目标处理子系统为电子目标初级情报生产过程中占用时间最多、最为关键的环节, 即制约整个系统情报处理速度的瓶颈所在, 可通过提高初级情报处理系统中全脉冲辅助分选、目标定位和目标识别的自动化水平, 加强在情报分析过程中对初级情报处理的人力及系统资源的投入缩短电子目标初级情报生产系统平均处理时间。

由式 (3) 可以得出稳定状态下电子目标初级情报生产系统中各库所中的平均标识个数如表 3 (其中 s_1 、 s_2 为抽象库所)。

表 3 各库所中的平均标识数

库所	平均标识个数	库所	平均标识个数
P ₁	0.011 5	s ₂	0.203 4
P ₂	0.134 8	P ₇	0.023 1
s ₁	0.581 0	P ₈	0.046 2

由表 3 看出, 库所 s₁ 中标识数较多, 易形成瓶颈, 这是由于初级目标处理子系统执行速率过慢的原因, 可以通过 2 种途径来提高初级目标处理子系统的执行速率: 一是提高子系统中关键时间变迁(对应于各类情报处理活动)的执行速率, 如将全脉冲辅助分选活动的执行速率 $\lambda_6 = 3.5$ 提高到 $\lambda_6 = 10$, 则整个系统的平均服务时间将加快 10 min; 二是改善系统结构, 增加多个子系统并行处理, 如在系统中令 3 个性能相同的初级情报处理子系统并行处理, 则整个系统的平均服务时间将加快 27 min。

5 结束语

该模型对基本 Petri 网中的托肯、库所、变迁、有向弧进行了扩展, 并引入了超变迁的概念, 大大加强了模型的描述和分析能力, 证明了 ESCPN 模型和连续时间的马尔可夫链是同构的, 从而可以利

(上接第 15 页)

[11] Przemieniecki J S. Mathematical methods in Defense Analyses[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.1801 Alexander Bell Drive,Reston: VA, 2000: 20191-4344.

[12] 雷中原, 梁义芝, 王哲. 基于模糊综合评判的舰艇电子战系统作战效能评估[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(4): 42-45.

[13] 苑立伟, 阳家宏, 赵保军. 基于模糊理论的防空导弹武器系统综合评估模型[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 15(6): 24-29.

[14] James J Buckley, Esfandiar Eslami, Thomas Feuring. Fuzzy Mathematics in Economics and Engineering[M]. Heidelberg: Physical-Vedag, 2002.

[15] 郑昌, 董文洪, 牛庆功, 等. 基于 AHP 和模糊综合评

用基于 MC 状态方程的各种性能指标对电子对抗情报系统的性能参数进行分析, 进而找出电子对抗情报系统在工作过程中的瓶颈并提出有效的解决方案。实例中仅对时间性能参数进行了详细分析, 下一步, 将利用 MC 状态方程求解的各种性能指标对电子对抗情报系统其它多项性能参数进行分析, 如: 情报资源利用率、各子系统情报处理的吞吐量等。

参考文献:

[1] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] GiraultC, ValkR. 系统工程 Petri 网—建模、验证与应用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[3] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[4] Zuberek W K. Performance evaluation using unbound timed Petri nets[C]. Proceeding of the 3rd International Workshop on Petri Nets and Performance Models. Kyoto:[s. n.], 1989: 180-186.

[5] 王继曾, 张彦龙, 罗靖宇. 一种随机着色 Petri 网及模型的性能分析[J]. 计算机应用, 2008, 28(2): 292-293.

[6] 涂波. 基于 Petri 网的产品开发过程建模及系统性能分析[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2007.

[7] 尚书怀, 李敬辉, 黄高明, 等. 基于多 Agent 系统联合信息作战情报处理系统[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 124-125.

判的无人机效能评估[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(6): 71-75.

[16] Heilpern S. Representation and Application of Fuzzy Number[J]. Fuzzy Sets and System, 1997, 97(5): 259-268.

[17] 邓可, 戴耀. 舰舰导弹武器系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(3): 75-79.

[18] 吴智辉, 张多林. AHP 法评估地空导弹武器系统效能[J]. 战术导弹技术, 2003, 26(4): 8-12.

[19] 徐奕航, 原超, 王洪胜. 基于排队论的舰空导弹武器系统反导射击效能模型[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(1): 77-80.

[20] 吴豫杰, 郑国民, 陈建宏. 防空兵指挥信息系统效能评估[J]. 四川兵工学报, 2009(3): 30-32.

(上接第 17 页)

即在外界传统攻击不改变的前提下, 若装备机械系统和电子系统单独失效的概率之和等于同时失效的概率, 则两系统形成“共振”, 互相关系数取得最大值, 不利于战场生存, 设计时应避免。

4 结束语

装备战场失效模型能为相关设计人员提供参考。但应注意: 在装备设计时, 应减小 p_{00} , 可增加战场生存概率; 在外界传统攻击不变的前提下, 如

相互关系系数是最大值, 即不利于战场生存。

参考文献:

[1] MIL-HDBK-338B. Military Handbook -Electronic Reliability Design Handbook[S]. Washington, Department of Defense, 1998.

[2] GJB/Z 299B-98. 电子设备可靠性预计手册[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1998.

[3] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[4] Electronic Parts Reliability Data[DB]. (EPRD-97) Reliability Analysis Center (RAC), 1997.