

# 基于 O-PPN 的装备体系任务线程建模与分析

陈宇奇<sup>1</sup>, 徐廷学<sup>1</sup>, 赵潇童<sup>2</sup>, 逄程<sup>3</sup>

(1.海军航空大学 岸防兵学院, 山东 烟台 264000; 2.陆军装备部 驻沈阳地区第二军代室, 辽宁 沈阳 110000; 3.海军装备部 装备保障大队, 北京 100089)

**摘要:**针对当前武器装备体系(weapon system of systems, WSoS)任务建模分析方法难以描述各装备系统多态性的问题,结合 Petri 网与 Markov 过程提出了一种基于 O-PPN 的装备体系任务线程建模与分析方法。在定义武器装备体系的基础上,对装备体系的使命任务进行形式化描述。改进传统 Petri 网,构建一种行动-性能 Petri 网(operation-performance Petri net, O-PPN),以满足装备体系一般任务线程的建模需要,同时针对装备系统性能退化及可能存在“提前”状态的问题,构建基于 Markov 的装备系统性能退化模型,通过输入各装备系统的可靠性参数得到相应的状态概率集合,并根据任务线程中各行动对于各装备系统性能水平的要求,结合作战任务及行动的任务成功与失败准则,计算装备体系整体的任务成功概率,最后通过对案例进行仿真运算,验证了所提方法的可行性。

**关键词:**装备体系;任务线程;Petri 网;Markov 过程;系统性能;性能退化模型

**中图分类号:**TG156      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-2758(2021)01-0197-11

随着“网络中心战”的提出,当前对于单一装备系统的运行性能和作战效能分析与研究无法满足该作战要求,从而产生了体系<sup>[1-4]</sup>(system of systems, SoS)和体系工程<sup>[5-6]</sup>(system of systems engineering, SoSE)的概念,关于体系的定义有很多,但大同小异,本文将武器装备体系(weapon system of systems, WSoS)定义为为完成作战任务,将功能上相互依赖、运行上相互独立的各类武器装备系统以松耦合的形式聚合起来,通过各系统间的协同配合提供所需能力的更高层次网络化复杂系统(以下简称装备体系)。其中,装备体系所能提供的能力是任意单一组成系统不具备的,单一组成系统性能的退化或失效会导致装备体系性能水平或能力发生降级。

装备体系由具体的使命任务驱动,包含相应的任务时间、任务地点等要素,体系内的各装备系统由于任务的相关要求,需要相互配合和交互,通过良好运行提供不同功能,形成装备体系的各种能力,从而保证任务的完成。因此,需要对装备体系的使命任务以及体系内各装备系统承担的相应作战活动进行

描述,构建装备体系的一般任务线程,从而更好地对装备体系的作战效能及作战适应性进行评估和分析。

美国国防部为准确把握体系中各系统间的相互关系,构建了任务线程研讨厅<sup>[7-9]</sup>(the mission thread workshop, MTW),对体系中各任务和相应的参与系统及其交互等信息进行描述。潘星等<sup>[10]</sup>将体系的作战任务描述为包含目标、装备、活动和关系的四元组,从而构建装备体系的任务模型,并进行了相应的仿真。王宏宇等<sup>[11]</sup>以空中突击部队装备体系为例,在美国国防部体系架构框架(department of defense architecture framework, DoDAF)下,建立了相应的任务静态和动态模型。目前在体系任务建模的研究上虽然取得了一定进展,但一般将装备体系中的各系统定义为“二态”系统,未考虑其复杂的性能退化过程,因此对于任务成功与否的判定较为简单,因此,本文将针对装备体系内装备系统的多态性<sup>[12-14]</sup>,构建相适应的装备体系一般任务线程。

# 1 装备体系任务形式化描述

任务线程是为了完成一个或多个装备体系的能力而执行各类作战行动或事件的序列。装备体系根据不同的作战任务需要提供不同的作战能力,而体系的作战能力是体系内各装备系统相互协作、相

互依赖形成的结果,各装备系统在提供相应功能的同时必然产生各类作战行动以支持任务的执行,行动间的时序逻辑关系也会对任务成功与否产生一定影响,因此在构建任务线程之前,首先应对装备体系的作战任务进行形式化描述,主要包含任务目的、任务时序关系、任务执行主体、任务能力、任务活动及任务关系等5类参数,如表1所示。

表1 装备体系任务描述参数

参数类别	参数名称	参数描述
任务目的	作战目标	装备体系任务完成的条件或目标,即装备体系的作战使命,用 $M_T$ 表示
任务时序关系	任务阶段	装备体系任务的进一步分解,由作战目标形成若干个时序上仅存在邻接和串行(不存在并行)的阶段任务,即子任务,对于不同的任务阶段,用 $M_{Si}$ 表示,假设同一作战目标可分为 $n_s$ 个任务阶段,即 $M_T = \{M_{S1}, M_{S2}, \dots, M_{Sn_s}\}$
任务执行主体	装备系统	参与执行各作战任务的装备系统,对于不同的装备系统,用 $M_{Ek}$ 表示。假设体系共包含 $n_e$ 个装备系统
任务能力	系统性能	装备系统所提供的性能水平(系统状态),用 $M_{Pl}$ 表示装备系统 $M_{Ek}$ 的第 $l$ 个性能水平,假设 $M_{Ek}$ 共有 $n_k$ 个性能水平
任务活动	作战行动	作战任务的基本元素,装备系统根据相应的作战流程及规则完成指定活动,以各种逻辑关系相互组合存在于各任务阶段中,假设 $M_{Si}$ 中有 $n_i$ 个作战行动,则作战行动可表示为 $M_{Oj}^i$ ,即为任务阶段 $M_{Si}$ 中的第 $j$ 个作战行动, $j = 1, 2, \dots, n_i$ 且指定每一作战行动的
	行动要求	执行者为单一装备系统 参与某一作战活动的单一装备系统的性能水平要求,用 $M_{Pl}^{Oj}$ 表示能成功执行作战行动 $M_{Oj}^i$ 的装备系统 $M_{Ek}$ 应达到的性能水平
任务关系	行动逻辑关系	作战行动之间的逻辑关系,存在于每一任务阶段中,用 $M_{Ri}$ 表示任务阶段 $M_{Si}$ 中各作战行动的逻辑关系集合

一般来说,要完整描述装备体系作战任务还需其他参数<sup>[15]</sup>,如任务威胁参数、任务时间参数及任务空间参数等,但本文仅考虑体系中各装备系统性能状态水平与作战行动要求之间的相互关系对体系

任务完成能力的影响,故仅选取表1中的参数对体系作战任务进行描述。此外,对于行动间关系而言,主要包含6种关系,具体如表2所示。

表2 行动间关系分类

关系名称	关系描述
顺序关系	某一作战行动结束后另一作战行动才开始执行,用 $R_{seq}$ 表示
与关系	某一作战行动集合中所有作战行动均完成后才开始执行之后的作战行动,用 $R_{and}$ 表示
或关系	某一作战行动集合中任一作战行动完成后即可执行之后的作战行动,用 $R_{or}$ 表示
条件关系	某一作战行动完成后在另一作战行动集合中选择其中一个开始执行,用 $R_{cond}$ 表示
并发关系	某一作战行动完成后使另一个作战行动集合中所有作战行动开始执行,用 $R_{conc}$ 表示
表决关系	某一作战行动集合包含 $n$ 个作战行动,只有 $k$ 个或 $k$ 个以上作战行动完成后才能执行之后的作战行动,用 $R_{vote}$ 表示

由表1和表2可知,作战任务可以被描述成如下形式

$$\begin{cases}
 M = \langle M_T, M_S, M_E \rangle \\
 M_S = \{M_{S1}, M_{S2}, \dots, M_{Sn_s}\} \\
 M_E = \{M_{E1}, M_{E2}, \dots, M_{En_e}\}
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 M_{Si} = \langle M_{Oj}^i, M_{Ri} \rangle \\
 M_{Oj}^i = \{M_{Oj_1}^i, M_{Oj_2}^i, \dots, M_{Oj_{n_i}}^i\} \\
 M_{Ri} \subseteq \{R_{seq}, R_{and}, R_{or}, R_{cond}, R_{conc}, R_{vote}\} \\
 i = 1, 2, \dots, n_s
 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}
 M_{Oj}^i = \langle M_{Ekj}^i, M_{Plk}^i, M_{Dkj}^i \rangle & i = 1, 2, \dots, n_s \\
 M_{Ekj}^i \in M_E & j = 1, 2, \dots, n_i \\
 M_{Plk}^i = \{M_{Pl_1}^i, M_{Pl_2}^i, \dots, M_{Pl_{n_k}}^i\} & k = 1, 2, \dots, n_e
 \end{cases} \quad (3)$$

(1)式表示一个装备体系作战任务  $M$  的总体描

述,包括作战目标  $M_T$ 、任务阶段集合  $M_S$ 、参与任务的装备系统集合  $M_E$ ; (2) 式表示某个任务阶段  $M_{Si}$  的相应描述,包括作战行动集合  $M_{O_i}$  和各作战行动间的关系集合  $M_{R_i}$ ; (3) 式表示某个作战行动的相应描述,包括参与该作战行动的单一装备系统  $M_{E_{kj}}$ 、该装备系统的性能水平集合  $M_{P_{kj}}$  以及该装备系统需要达到的性能水平  $M_{D_{kj}}, M_{E_{kj}}$  为  $M_E$  中某一元素。

## 2 装备体系任务线程建模

从上节可知,装备体系使命任务能否顺利完成,与承担作战行动的装备系统的当前性能水平关系密切,因此需构建一种描述装备系统性能状态的任务线程模型,当前在构建装备体系任务模型的研究中,DoDAF 和 IDEF3 (ICAM definition method) 的应用较为广泛,且取得了不错的进展,DoDAF<sup>[16]</sup> 可以很好地描述体系使命任务中信息、活动、节点、角色和对象等任务要素,构建相应的任务静态模型,IDEF3<sup>[17]</sup> 过程流模型在任务动态和仿真模型的构建方面有着较大的优势,但两者在描述装备系统性能状态方面存在薄弱环节。Petri 网起初作为一种复杂系统网状信息流的表达模型,可以通过严格的数学定义和图形方式描述装备系统性能状态变化,而且根据其构建的理论基础,可以较好描述体系使命任务中各作战行动的执行过程、逻辑关系及完成条件,并能很好体现装备系统性能状态对任务完成与否的影响,因此本节结合上节对体系任务的形式化描述,结合 IDEF 过程流,提出一种基于 Markov 的行动-性能 Petri 网 (operation-performance Petri net, O-PPN) 对装备体系任务线程进行构建。

### 2.1 问题描述与假设

不同装备体系所执行的任务种类有所不同,大体分为确定性任务和不确定性任务。在确定性任务中,存在一类事先计划周详且固定的任务,如巡逻勘察、目标识别、摧毁某固定目标等任务,不存在敌方力量打击和战斗损伤,其任务的成功与否仅与装备系统之间协同成都好坏及自身性能状态好坏决定,为构建考虑装备系统性能状态水平的装备体系任务线程模型,作出如下假设:①装备体系执行任务期间不考虑时间因素,即仅考虑任务及作战行动能否完成,不设定相应的任务持续时间和任务要求时间;②假设装备体系内所有装备系统相互独立,其任意性能状态逗留时间均服从指数分布;③假设装备体系

内所有装备系统均为可修系统,其相应维修过程均服从指数分布,维修方式包括完全维修、不完全维修及视情维修等;④仅针对体系作战任务中的确定性任务,事先进行过充分规划,相应的维修资源充足,不考虑各装备系统间存在维修资源竞争;⑤各装备系统按作战任务要求执行各自的作战行动,没有相应的冗余系统和替代系统。

### 2.2 基于 Markov 的 O-PPN 建模

#### 2.2.1 O-PPN 建模元素的图形化表示

O-PPN 定义:O-PPN 为一七元组  $\Sigma = (P, T; I, O, W, C, M_0)$ , 其中,  $P$  为有限库所集合,  $P = \{P^O, P^S\}$ ,  $P^O$  为作战行动库所,表征作战行动当前状态,包括作战行动未执行状态  $P^O_{down}$  和作战行动开始执行状态  $P^O_{up}$ ,  $P^S$  为系统状态库所,表征装备系统当前性能状态  $P^P$  和任务状态  $P^M$ 。根据上节所述,对于任务阶段  $M_{Si}$  而言,其行动库所分别为  $P^O_{down} = \{P^O_{down}^1, P^O_{down}^2, \dots, P^O_{down}^{n_i}\}$  和  $P^O_{up} = \{P^O_{up}^1, P^O_{up}^2, \dots, P^O_{up}^{n_i}\}$ 。以作战行动  $M_{O_j}$  为例,若参与的装备系统为  $M_{E_k}$ ,则相应系统性能库所为  $P^{P_{kj}} \in \{P^{P_k^1}, P^{P_k^2}, \dots, P^{P_k^k}\}$ 。而对于装备系统  $M_{E_k}$  而言,其当前任务状态库所为  $P^{M_{kj}} = \{P^{M_{on}^{kj}}, P^{M_{off}^{kj}}\}$ ;  $T$  为有限变迁集合,  $T = \{T^R, T^D\}$ ,  $T^R = \{t_1^R, t_2^R, \dots, t_{n_R}^R\}$  为行动变迁,表征行动间逻辑关系,规定任务线程执行序列,  $T^D = \{t_1^D, t_2^D, \dots, t_{n_D}^D\}$  为要求变迁,表征作战行动要求,判断承担相应行动的装备系统当前性能水平是否达到执行要求;  $I$  为库所输入弧集合,  $O$  为库所输出弧集合;  $W: \{I, O\} \rightarrow N^+$  为弧权函数,  $C \in P \times T$  为抑止弧集合,且  $\forall p \in P \wedge \forall t \in T: (p, t) \in \{I, O\} \rightarrow (p, t) \notin C$ ;  $M_0: P \rightarrow N$  为初始标识,满足:  $\forall p \in P: M_0(p) \leq K(p)$ 。

在装备体系任务线程 O-PPN 模型中,其元素、符号以及相应描述如表 3 所示。

表 3 O-PPN 建模元素的图形化表示

元素	符号	相应描述
库所	○	作战行动状态或装备系统当前性能状态,在符号旁添加不同注释予以区分
瞬时变迁	┃	改变不同库所的事件,且延时为 0,在符号旁添加不同注释区分行动变迁和要求变迁
令牌	•	表征状态或资源及其相应数量
有向弧	→	规定局部状态和事件之间的关系
抑制弧	—	控制具备发生条件的变迁是否允许激活,连接库所与变迁

### 2.2.2 装备体系任务线程 O-PPN 建模分析

装备体系的作战任务可分为若干按顺序执行的阶段任务,采取 IDEF3 过程流中的若干泳道表示不同的任务阶段,每个阶段任务包含若干由不同装备系统承担的作战行动,每一个作战行动能否被执行取决于两方面,一是相应装备系统的当前性能水平是否满足该作战行动的性能要求,而装备系统的性能水平受环境和自身因素影响会发生变化,只有装备系统的当前性能状态大于等于所执行作战行动的性能要求,该作战行动才可以被执行。二是之前的作战行动是否按照相应的逻辑关系被成功执行,若失败,则无法激活当前作战行动开始执行。

#### 2.2.2.1 基于 Markov 的装备系统稳态性能分析

如图 1 所示,  $P_{down}^{O_j}$  为任务阶段  $M_{Si}$  中第  $j$  个作战行动未执行状态库所,  $P_{up}^{O_j}$  为其开始执行状态库所,  $P^{P_k^{i,j}}$  为装备系统  $M_{E_{k,j}}$  的当前性能状态库所,代表其若干稳态性能状态之一,所包含的令牌表示当前装备系统正处于当前性能状态,对比装备系统当前性能值和作战行动要求性能值,若  $M_{E_{k,j}}$  当前性能水平

大于等于作战行动性能要求,则令牌经过瞬时要求变迁  $t_1^D$  流入库所  $P_{on}^{M_k^{i,j}}$ ,表示装备系统  $M_{E_{k,j}}$  处于可执行任务状态,产生有向弧作为激活当前作战行动开始执行状态的条件之一,若  $M_{E_{k,j}}$  当前性能水平小于作战行动性能要求,则令牌经过瞬时要求变迁  $t_2^D$  流入库所  $P_{off}^{M_k^{i,j}}$ ,表示装备系统  $M_{E_{k,j}}$  处于不可执行任务状态,产生抑止弧禁止当前作战行动开始执行状态被激活。对于可修的多状态装备系统而言,不同的维修方式导致其处于各稳态性能的概率有所差异,因此本节结合 Markov<sup>[18]</sup> 过程,分别构建各维修方式下的装备系统性能状态模型。文献[19]中指出,部分装备系统由于性能退化等因素可能存在提前状态,如装备系统未开始执行作战任务却过早运行发出信号、信号到来前发生相应动作等,因此对装备体系及其组成系统首先进行如下假设:

- 1) 装备体系内包含  $n_e$  个多状态装备系统,且各装备系统的维修过程和退化过程相互独立,部分装备系统存在提前状态 0;
  - 2) 装备系统  $M_{Em}$  在退化过程中由状态  $i$  到状态  $j$  的转移强度  $\lambda_{i,j}^m$  为常数,在维修过程中由状态  $i$  到状态  $j$  的转移强度  $\mu_{i,j}^m$  也为常数,其中  $i, j \in 0, 1, 2, \dots, n_m$ 。0 为装备系统  $M_{Em}$  的提前状态,1 为装备系统  $M_{Em}$  的完好工作状态,  $n_m$  表示装备系统  $M_{Em}$  的完全失效状态,状态  $2 \sim n_m - 1$  为介于状态 1 和状态  $n_m$  之间的中间状态,而提前状态 0 介于状态 1 与状态 2 之间;
  - 3) 多状态装备系统  $M_{Em}$  的性能状态一般从最佳状态 1 开始,其性能状态转移的初始条件为  $\bar{p}_1^m(0) = 1, \bar{p}_0^m(0) = \bar{p}_2^m(0) = \dots = \bar{p}_{n_m}^m(0) = 0$  (4)
- 根据以上假设,建立如图 2 所示的多状态装备

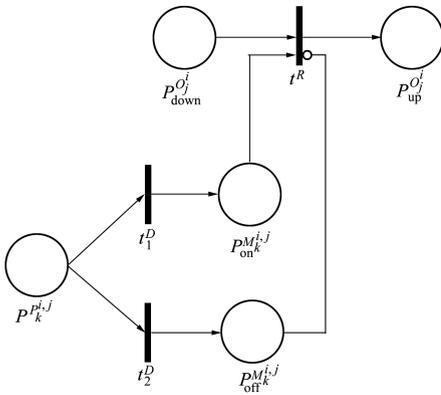


图 1 系统性能与作战行动的关系

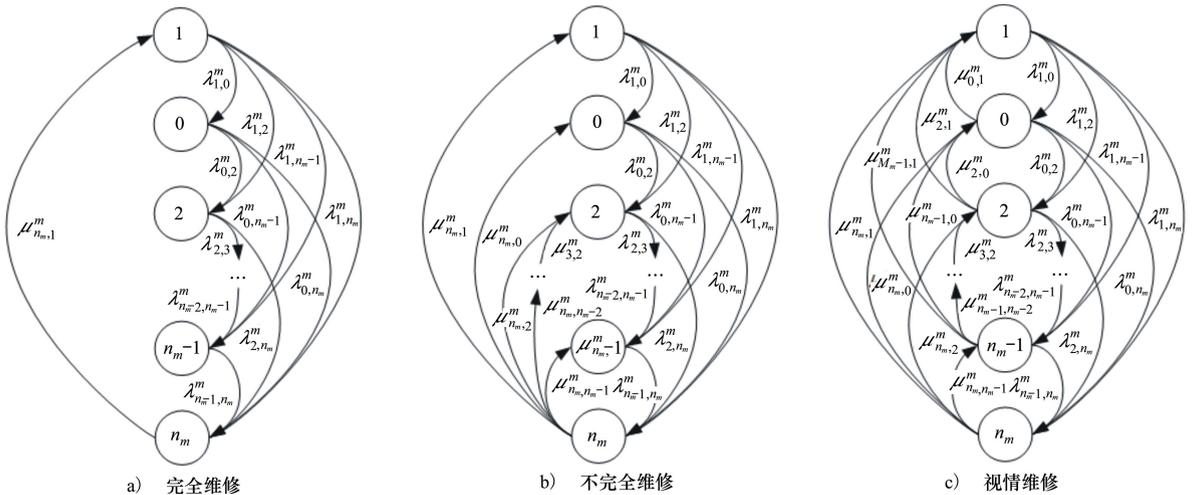


图 2 多状态装备系统在不同维修方式下的 Markov 过程

系统在完全维修、不完全维修及视情维修条件下的性能状态 Markov 过程。

由图 2 可知,完全维修和不完全维修其实可以看作是视情维修的 2 种特殊情况,由于篇幅有限,本节仅针对视情维修条件下装备系统性能状态构建相应的微分方程,文献[20]基于 Markov 模型对视情维修条件下多状态控制单元进行了可用性建模,但未考虑某些系统单元可能存在提前状态的情况,根据假设(2)及图 1 可得,存在提前状态的装备系统  $M_{Em}$  其状态退化顺序为  $1, 0, 2, 3, \dots, n_m$ , 因此对文献[20]中的微分方程组进行一定改进,得到关于装备系统  $M_{Em}$  各状态概率的微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dp_1^m(t)}{dt} = \mu_{0,1}^m p_0^m(t) + \sum_{e=2}^{n_m} \mu_{e,1}^m p_e^m(t) - p_1^m(t) \left( \sum_{e=2}^{n_m} \lambda_{1,e}^m + \lambda_{1,0}^m \right) \\ \frac{dp_0^m(t)}{dt} = \lambda_{1,0}^m p_1^m(t) + \sum_{e=2}^{n_m} \mu_{e,0}^m p_e^m(t) - p_0^m(t) \left( \sum_{e=2}^{n_m} \lambda_{0,e}^m + \mu_{0,1}^m \right) \\ \frac{dp_i^m(t)}{dt} = \sum_{e=0}^{i-1} \lambda_{e,i}^m p_e^m(t) + \sum_{e=i+1}^{n_m} \mu_{e,i}^m p_e^m(t) - p_i^m(t) \left( \sum_{e=i+1}^{n_m} \lambda_{i,e}^m + \sum_{e=0}^{i-1} \mu_{i,e}^m \right), i = 2, 3, \dots, n_m - 1 \\ \frac{dp_{n_m}^m(t)}{dt} = \sum_{e=0}^{n_m-1} \lambda_{e,n_m}^m p_e^m(t) - p_{n_m}^m(t) \sum_{e=0}^{n_m-1} \mu_{n_m,e}^m \end{cases} \quad (5)$$

运用 Laplace-Stieltjes 变换定理和初始条件,即

可对(5)式进行求解,得出多状态装备系统  $M_{Em}$  随时间变化的各性能状态概率函数  $p_i^m(t)$ , 其相应的各稳态状态概率为  $\lim_{t \rightarrow \infty} p_i^m(t)$ , 由于该随机过程可遍历,有

$$\begin{cases} \frac{dp_i^m(t)}{dt} = 0, i = 0, 1, 2, \dots, n_m, \text{ 即} \\ \begin{cases} 0 = \mu_{0,1}^m p_0^m + \sum_{e=2}^{n_m} \mu_{e,1}^m p_e^m - p_1^m \left( \sum_{e=2}^{n_m} \lambda_{1,e}^m + \lambda_{1,0}^m \right) \\ 0 = \lambda_{1,0}^m p_1^m + \sum_{e=2}^{n_m} \mu_{e,0}^m p_e^m - p_0^m \left( \sum_{e=2}^{n_m} \lambda_{0,e}^m + \mu_{0,1}^m \right) \\ 0 = \sum_{e=0}^{i-1} \lambda_{e,i}^m p_e^m + \sum_{e=i+1}^{n_m} \mu_{e,i}^m p_e^m - p_i^m \left( \sum_{e=i+1}^{n_m} \lambda_{i,e}^m + \sum_{e=0}^{i-1} \mu_{i,e}^m \right), \\ \quad i = 2, 3, \dots, n_m - 1 \\ 0 = \sum_{e=0}^{n_m-1} \lambda_{e,n_m}^m p_e^m - p_{n_m}^m \sum_{e=0}^{n_m-1} \mu_{n_m,e}^m \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

结合独立方程  $\sum_{i=0}^{n_m} p_i = 1$  即可对(6)式进行求解,得到装备体系中装备系统各状态的稳态概率。

### 2.2.2.2 作战行动间逻辑关系分析

根据本文对装备体系作战任务的形式化描述,将作战行动间逻辑关系分为顺序关系、与关系、或关系、条件关系、并发关系和表决关系,其具体含义不再赘述。这里规定作战行动库所中的未执行状态库所的激活需要之前的作战行动均处于开始执行状态并按照相应逻辑关系成功执行,而后依据装备系统的性能库所相关信息,决定是否激活作战行动开始执行状态库所。

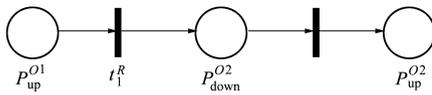


图 3 逻辑“顺序”

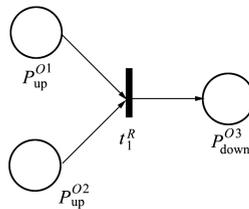


图 4 逻辑“与”

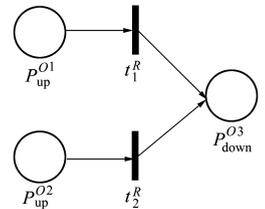


图 5 逻辑“或”

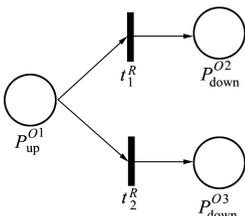


图 6 逻辑“条件”

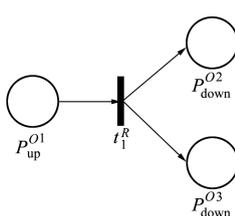


图 7 逻辑“并发”

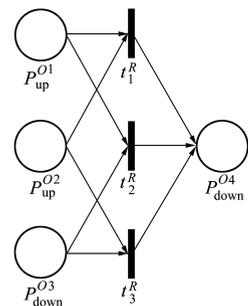


图 8 逻辑“表决”(以 2/3 表决门为例)

1)顺序关系;2)与关系;3)或关系;4)条件关系;5)并发关系;6)表决关系。

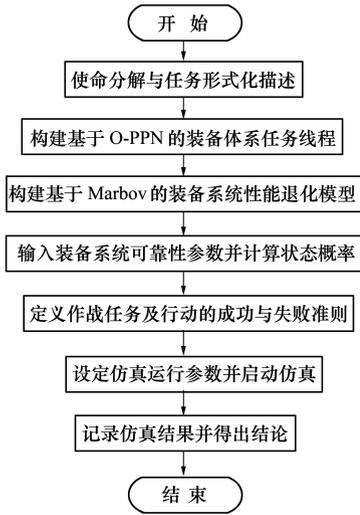


图 9 装备体系任务线程仿真流程

### 2.3 装备体系任务线程仿真

在完成装备体系任务线程建模工作基础上,可利用 matlab 仿真软件,结合相应案例,构建装备体系任务线程仿真模型,其仿真建模流程如图 9 所示。

## 3 案例分析

### 3.1 装备体系任务线程构建

以文献[21]中所给出的航母体系摧毁敌岸基目标任务为例,该任务的形式化描述如表 4 所示。

这里规定任务成功的准则为该任务中所有必经作战行动必须全部完成,任一必经作战行动未完成则视为任务失败。这里不考虑指挥和电子对抗对任务成功的影响,因此假定 EC 和 CC 的可靠度均为 1,且该任务中执行不同作战行动的同一装备系统的性能参数假定一致。

表 4 航母体系摧毁敌岸基目标任务的形式化描述

作战目标 MT	任务阶段 MS	行动间关系集 MR	作战行动 MO	行动要求 MD	装备系统 ME	性能水平 MP	
摧毁敌岸基目标	计划准备	$R_{and}$	战前侦察	$\geq 50$	卫星探测系统(SD)	完好工作状态 1 : 100 降级工作状态 2 : 50 完全失效状态 3 : 0	
					$R_{conc}$	制定飞行计划传递任务 筒令收集气象资料	-
		出航	$R_{seq}$	起飞调运	$\geq 50$	调运系统(DP)	完好工作状态 1 : 100 降级工作状态 2 : 50 完全失效状态 3 : 0
	舰面保障			$\geq 50$	航空保障系统(AS)	完好工作状态 1 : 100 降级工作状态 2 : 50 完全失效状态 3 : 0	
	弹射起飞			$\geq 100$	弹射系统(EJ)	完好工作状态 1 : 100 完全失效状态 2 : 0	
	作战	$R_{and}$	$R_{conc}$	指挥引导	-	指挥控制系统(CC)	-
				即时侦察	$\geq 50$	卫星探测系统(SD)	-
				电子对抗	-	电子对抗系统(EC)	-
				攻击	$\geq 75$	作战系统(FI)	完好工作状态 1 : 100 较好工作状态 2 : 75 堪用状态 3 : 50 完全失效状态 4 : 0
	返航	$R_{seq}$	引导	-	指挥控制系统(CC)	-	
			着舰	$\geq 50$	作战系统(FI)	同上	
			着舰调运	$\geq 50$	调运系统(DP)	同上	
任务后检查			$\geq 50$	作战系统(FI)	同上		

尔后在该任务形式化描述的基础上,结合 O-PPN 建模的相应步骤,构建航母体系摧毁敌岸基目标的任务线程,如图 10 所示。

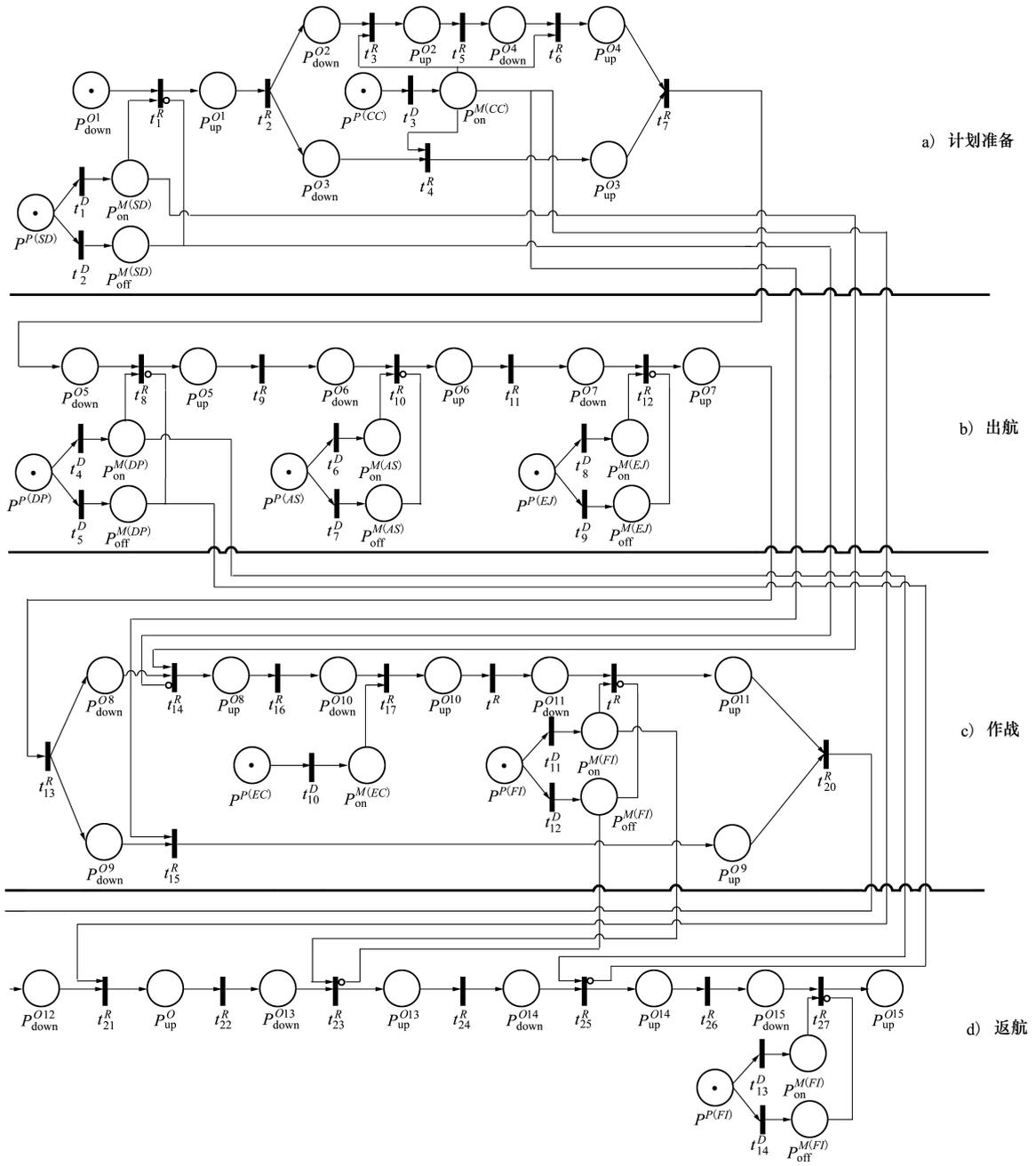


图 10 基于 O-PPN 的航母体系摧毁敌岸基目标任务线程

### 3.2 装备体系任务成功性分析与计算

在该任务中,同一装备系统在不同任务阶段执行不同作战行动需要达到的行动要求可能不同,因此在任务线程中使用不同的要求变迁加以描述,从上图可以看出,除作战系统外,其余各系统在整个任务中的性能要求保持不变。

这里假设各装备系统均处于视情维修条件下,根据各装备系统的性能状态相关信息,可以分别构建各装备系统的基于 Markov 稳态状态模型。表 5 为航母体系内各装备系统不同状态间的转移率参数,图 11 为 SD、DP、FI、AS 及 EJ 处于各自不同状态的概率结果。

表5 体系内装备系统不同状态间的转移率参数

名称	故障率参数/(10 <sup>-3</sup> ·周 <sup>-1</sup> )						维修率参数/(10 <sup>-3</sup> ·周 <sup>-1</sup> )					
	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{1,3}$	$\lambda_{1,4}$	$\lambda_{2,3}$	$\lambda_{2,4}$	$\lambda_{3,4}$	$\mu_{4,1}$	$\mu_{4,2}$	$\mu_{4,3}$	$\mu_{3,1}$	$\mu_{3,2}$	$\mu_{2,1}$
SD	2.88	0.48	-	2.88	-	-	-	-	-	24	9.6	2.4
DP	3.24	0.54	-	3.24	-	-	-	-	-	28.3	11.8	2.7
AS	2.7	0.45	-	2.7	-	-	-	-	-	23.4	10.6	2.25
EJ	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.3
FI	3.78	1.89	0.63	3.78	1.89	3.78	7.88	4.73	3.15	4.73	3.15	3.15

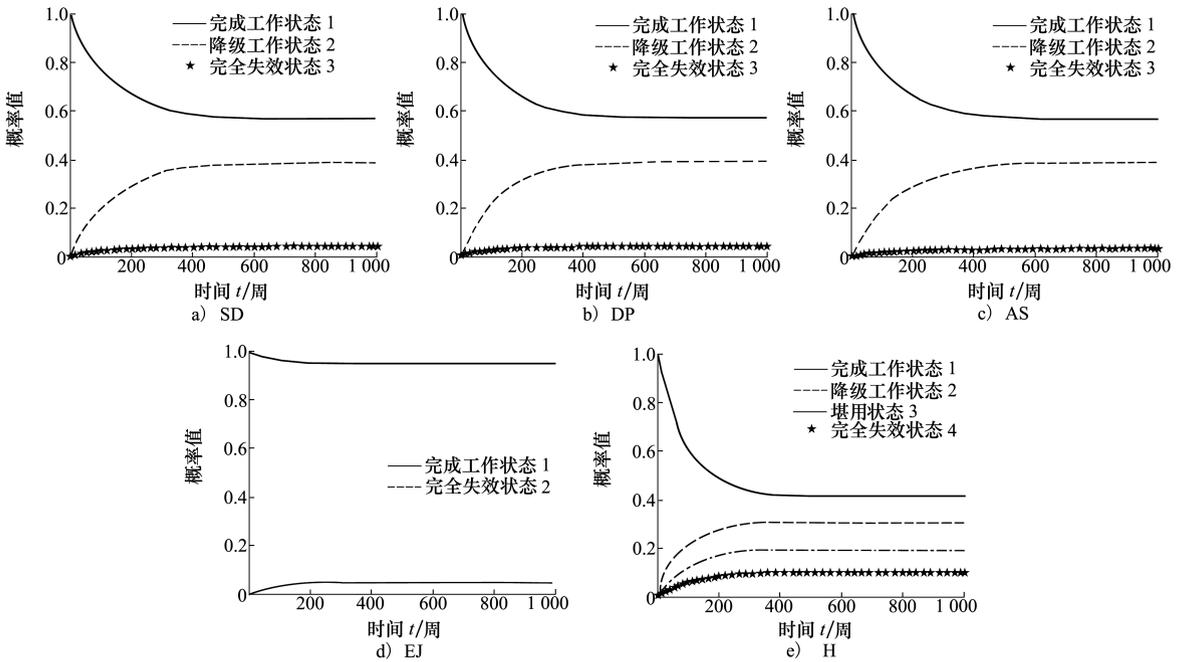


图11 各装备系统处于各自不同状态的概率

通过(4)式、(5)式可得到各装备系统按性能水平由高到低次序排列的稳态概率集合,如表6所示。

表6 装备系统性能状态的稳态概率集合

系统名称	稳态概率集合
SD	{0.572, 0.387, 0.041}
DP	{0.571, 0.390, 0.039}
AS	{0.568, 0.393, 0.039}
EJ	{0.951, 0.049}
FI	{0.414, 0.298, 0.190, 0.098}

根据上述输入数据,运行仿真模型500次,所得仿真结果为任务成功221次,任务失败279次。作战行动能否完成,取决于承担该行动的装备系统当前所处性能状态是否大于活动要求的概率,假设作战行动的成功概率为 $P_{oi}(i=1,2,\dots,n)$ ,根据该案例相应的任务线程,可由下式计算该作战任务的理论

任务成功概率 $P_{理论}$

$$P_{理论} = P_{01}P_{05}P_{06}P_{07}P_{08}P_{011}P_{013}P_{014}P_{015}$$

而该作战任务仿真得出的实际任务成功概率

$P_{实际}$ 为

$$P_{实际} = \frac{\text{任务成功次数}}{\text{任务成功次数} + \text{任务失败次数}} \times 100\%$$

$P_{实际}$ 与 $P_{理论}$ 之间的误差 $\Delta_{误差}$ 的计算公式如下

所示

$$\Delta_{误差} = \frac{|P_{实际} - P_{理论}|}{P_{理论}} \times 100\%$$

由此可得该作战任务的理论任务成功概率 $P_{理论} = 0.4497$ ,实际任务成功概率 $P_{实际} = 0.4420$ ,两者间的误差 $\Delta_{误差} = 1.7\%$ ,因此该结果具有可信性。

### 3.3 与现有建模方法的对比与分析

文献[10]将美国国防部体系结构框架 DoDAF 与 IDEF3 相结合,提出了基于活动建模的装备体系任务静态模型建模方法,由该方法可得本案例中各装备系统完好和故障的稳态概率集合,如表 7 所示。

表 7 装备系统完好和故障的稳态概率集合

系统名称	稳态概率集合
SD	{0.959,0.041}
DP	{0.961,0.039}
AS	{0.961,0.039}
EJ	{0.951,0.049}
FI	{0.902,0.098}

输入上述数据,利用文献[10]的方法进行仿真运算,计算实际任务成功概率,得到相应的任务成功性曲线,并与本文方法进行对比,如图 12 所示。

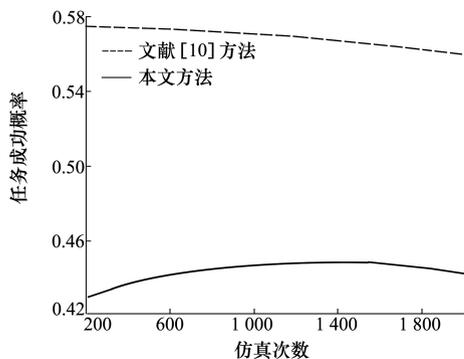


图 12 建模方法所得结果的对比

由图 12 可知,根据文献[10]的方法所得的任务成功概率大约为 0.569,而本文方法所得的任务成功概率约为 0.442,这是因为文献[10]方法未考虑装备系统多态特性,仅简单以装备系统的故障与完好作为体系任务成功与否的判据,忽略了体系任务过程中性能要求的可变性,导致计算结果偏高,不利于后续对装备体系开展相应的维修决策工作,而本文方法针对这一不足进行改进,提高了系统性能分析的精细程度,可为不同装备体系在执行体系作战任务过程中采用何种维修策略提供一定指导。

## 4 结 论

装备体系任务线程建模与分析是对装备体系进行任务成功性分析和维修决策研究的基础和前提。本文基于现阶段装备体系任务建模方面的主要研究成果,给出了考虑系统性能水平的装备体系任务描述模型,并基于 O-PPN 和 Markov 构建装备体系静态任务线程,着重考虑体系内各装备系统多状态的特性,依据所提出的装备体系任务线程仿真步骤对实际案例进行了分析与应用,验证了模型和方法的有效性,为下一步构建考虑时间因素的装备体系动态任务线程提供一定指导。

## 参考文献:

- [1] 罗鹏程,周经纶,金光. 武器装备体系作战效能与作战能力评估分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2014  
LUO Pengcheng, ZHOU Jinglun, JIN Guang. Evaluation and analysis method of operational effectiveness and operational capability of weapon system of systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese)
- [2] United States Government US Army. Manual for the operation of the joint capabilities integration and development system-JCIDS [M]. Charleston, Create Space Independent Publishing Platform, 2014
- [3] NIL K, CIHAN H D. Methodologies for understanding behavior of system of systems[C]//Proceedings of 7th International Conference on Systems Engineering Research, Hoboken, NJ, US, 2007: 14-16
- [4] 张维明,刘忠,阳东升,等. 体系工程理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010  
ZHANG Weiming, LIU Zhong, YANG Dongsheng, et al. Theory and method of system of systems engineering[M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- [5] MARION L B, JAY S P, STEPHEN C V. A system of systems engineering GEOSS: architectural approach[J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(3): 321-332
- [6] KEATING C, ROGERS R, UNAL R, et al. System of systems engineering[J]. Engineering Management Journal, 2003, 15(3): 36-45
- [7] MIKE G, BILL W, TIM M. Introduction to the mission thread workshop[R]. ESC-TR-2013-003, 2013

- [8] PREM P J, BRIAN P. Case study: net-centric mission threads modeling and analysis using BPMN[C]//IEEE 2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems, Irvine, CA, USA, 2008
- [9] MIKE G, BILL W. Mission thread workshop: lessons learned[R]. OMB-0704-0188, 2012
- [10] 潘星, 尹宝石, 温晓华. 基于 DoDAF 的装备体系任务建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1846-1851  
PAN Xing, YIN Baoshi, WEN Xiaohua. Mission modeling and simulation for equipment system of systems based on DoDAF[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1846-1851 (in Chinese)
- [11] 王宏宇, 来国军, 魏艳艳, 等. 空中突击部队装备体系作战任务建模方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5): 107-111  
WANG Hongyu, LAI Guojun, WEI Yanyan, et al. Research on mission modeling for equipment system of army air assault[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(5): 107-111 (in Chinese)
- [12] 潘刚, 尚朝轩, 梁玉英, 等. 随机冲击情况下考虑认知不确定的多态系统可靠性评估[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 29-37  
PAN Gang, SHANG Chaoyuan, LIANG Yuying, et al. Estimation of interval-valued reliability of multi-state system in consideration of epistemic uncertainty under random shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 29-37 (in Chinese)
- [13] 阚琳洁, 张建国, 王丕东, 等. 基于性能退化和通用发生函数的在轨空间机构系统多状态可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 20-28  
KAN Linjie, ZHANG Jianguo, WANG Pidong, et al. Multi-state system reliability analysis of space mechanism in orbit based on performance degradation and universal generating function[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 20-28 (in Chinese)
- [14] 李春洋, 陈循, 易晓山, 等. 基于向量通用生成函数的多性能参数多态系统可靠性分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(12): 1604-1610  
LI Chunyang, CHEN Xun, YI Xiaoshan, et al. Reliability analysis of multi-state system with multiple performance parameters based on vector-universal generating function[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(12): 1604-1610 (in Chinese)
- [15] 董岳. 面向装备保障的使用任务系统建模研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2010  
DONG Yue. Research on modeling of usage mission system for materiel support[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2010 (in Chinese)
- [16] 刘斌. 基于 DoDAF 的装备体系的可靠性建模方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015  
LIU Bin. Modeling method research of mission reliability of equipment system of systems based on DoDAF[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 (in Chinese)
- [17] ZHAO Y P, Zheng H Z. Modeling and simulation for equipment support system based on idef method[C]//Proc of the International Conference on Computer Application and System Modeling, 2010
- [18] XING L, LEVITIN G. Combinatorial analysis of systems with competing failures subject to failure isolation and propagation effects [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 98: 1-6
- [19] 陈宇奇, 徐廷学, 李志强, 等. 基于证据 GO 法的复杂多态系统动态可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(1): 230-237  
CHEN Yuqi, XU Tingxue, LI Zhiqiang, et al. dynamic reliability analysis of complex multi-state system based on evidence GO method[J]. System Engineering and Electronics, 2020, 42(1): 230-237 (in Chinese)
- [20] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 视情维修条件下的多状态控制单元可用性建模与分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2240-2250  
LI Zhiqiang, XU Tingxue, GU Junyuan, et al. Availability modeling and analyzing of multi-state control unit under condition-based maintenance[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(11): 2240-2250 (in Chinese)
- [21] 《深度军事》编委会. 航母战斗群作战指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019  
《Deep Military》Editorial Committee. Operational guidelines for aircraft carrier battle groups[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019 (in Chinese)

# Modeling and analysis of mission thread of weapon system of systems based on O-PPN

CHEN Yuqi<sup>1</sup>, XU Tingxue<sup>1</sup>, ZHAO Xiaotong<sup>2</sup>, LU Cheng<sup>3</sup>

1.Coast Guard College, Navy Aeronautical University, Yantai 264000, China;  
2.The Second Military Representative Office in Shenyang, Department of Army Equipment, Shenyang 110000, China;  
3.Equipment Support Unit, Department of Naval Equipment, Beijing 100089, China

**Abstract:** Aiming at the problem that the current WSoS mission modeling and analysis methods are difficult to describe the property of multi-state of each equipment system, combining with Petri net and Markov process, an O-PPN based mission thread modeling and analysis method is proposed in this paper. Based on the definition of WSoS, the mission of WSoS is formally described. To improve the traditional Petri net, an operation performance Petri net (O-PPN) is constructed, in order to meet the modeling needs of the general mission thread of the WSoS; and aiming at the problems of the performance degradation of the equipment system and the possible "ahead of time" state, the performance degradation model of the equipment system based on Markov is constructed. The corresponding state probability set is obtained by inputting the reliability parameters of each equipment system. And according to the requirements of each operation in the mission thread for the performance level of each equipment system and combined with the mission success and failure criteria of the combat task and operation, the mission success probability of the whole WSoS is calculated. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by the simulation of the case.

**Keywords:** weapon system of systems (WSoS); mission thread; Petri net; Markov process; system performance; performance degradation model

**引用格式:** 陈宇奇, 徐廷学, 赵潇童, 等. 基于 O-PPN 的装备体系任务线程建模与分析[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 197-207

CHEN Yuqi, XU Tingxue, ZHAO Xiaotong, et al. Modeling and analysis of mission thread of weapon system of systems based on O-PPN[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 197-207 (in Chinese)