

# 面向演化的装备体系方案选择的 不确定性决策方法

赵青松, 王晓攀, 熊伟涛

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

**摘要:**分析了装备体系的背景复杂性、方案多样性和结构演化性特征。面向上述特征,给出了装备体系方案选择问题的环境变量、决策变量等决策要素,描述了面向演化的武器装备体系方案选择的决策过程;利用贝叶斯理论建立了面向演化的装备体系方案选择的不确定性决策模型,确定了模型中的节点、边和概率关系,给出了模型的求解步骤,并进行了案例分析。该方法基于贝叶斯网络的条件独立假设,使得装备体系方案决策人员只需要考虑当前决策要素,降低了思考问题的复杂度,提高了决策的有效性。

**关键词:**演化;装备体系;方案选择;不确定决策

**本文引用格式:**赵青松,王晓攀,熊伟涛.面向演化的装备体系方案选择的不确定性决策方法[J].四川兵工学报,2015(11):65-69.

**Citation format:**ZHAO Qing-song, WANG Xiao-pan, XIONG Wei-tao. Uncertain Decision Method for Evolution-Oriented Weapon System of Systems Scheme Selection[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(11):65-69.

中图分类号:E917

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)11-0065-05

## Uncertain Decision Method for Evolution-Oriented Weapon System of Systems Scheme Selection

ZHAO Qing-song, WANG Xiao-pan, XIONG Wei-tao

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The features of the weapon system of systems (WSoS), including the complexity of the background, the diversity of the scheme and the evolution of the structure were analyzed. Based on the features, the decision factors including the environment variables and the decision variables in the WSoS scheme selection were proposed. The uncertain decision model for evolution-oriented WSoS scheme selection was built and the solving steps were given. The feasibility of the foregoing method was demonstrated with an illustrative example. Based on the conditional independence assumption of Bayesian Network method, only the current decision factors needed to be considered instead of all the decision factors during the process of the WSoS scheme selection, which decreases the complexity of the WSoS scheme selection and improves the effectiveness of the WSoS scheme selection.

**Key words:** evolution; weapon system of systems; scheme selection; uncertain decision

随着社会的进步和发展,一些系统和组织呈现出越来越复杂的结构特性。随着系统复杂程度的增加,体系(System-of-System)的概念也就应运而生。体系是在一段时间内,由

多个独立机构和个人开发的一个大量的、复杂的、持久的独立系统(称为体系的组分系统)的组合实体,该实体能够通过提供多种不同能力支持完成多项任务<sup>[1]</sup>。体系的演化是指

收稿日期:2015-06-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71331008)

作者简介:赵青松(1975—),男,博士,副教授,主要从事装备采办与体系工程管理研究。

体系会随着组分系统的功能和组成的变化而不断的变化,体系的演化特性给体系结构的设计与优化带来了与传统系统工程方法不同的新的挑战。为了处理体系设计中的不确定问题,使得体系所处环境发生变化的时候仍然能够提供完成使命目标

所需的必要能力,Donna H 提出了 Epoch-Era 分析方法,方法将体系设计面临的不确定要素描述为一系列的场,并基于此场序列进行了体系的设计与优化<sup>[2]</sup>。D. Chattopadhyay 将 Multi-Attribute Tradespace Exploration (MATE) 与 Epoch-Era 分析方法结合,建立了 System of Systems Tradespace Exploration Method (SoSTEM) 分析方法,对体系结构方案的演化过程进行了权衡分析与设计<sup>[3]</sup>。装备体系方案的选择是一个不确定环境下的多目标问题,而贝叶斯方法是一种有效地不确定性推理方法,可以直观地提供给决策者各种信息,规范决策过程。王爱文等提出了基于因果贝叶斯网络的风险建模与分析<sup>[4]</sup>。蔡志强等在贝叶斯网络的基础上进行扩展,提出了不确定多阶段多目标决策模型来求解不确定环境下的多阶段多目标决策问题<sup>[5]</sup>。本研究针对面向演化的装备体系方案选择的不确定性、多阶段性等特征,建立了装备体系方案选择的不确定性决策模型,以降低装备体系方案选择的复杂性。

## 1 装备体系

装备体系是指在国家安全和军事战略指导下,按照建设信息化军队、打赢信息化战争的总体要求,适应一体化联合作战的特点和规律,为发挥最佳的整体作战效能,而由功能上相互联系、性能上相互补充的各种装备系统,按一定结构综合集成的更高层次的装备系统<sup>[6]</sup>。

为了能够构建出能够完成特定使命任务的装备体系,需考虑以下装备体系的特征:

1) 场景复杂性。装备体系是在一定的政治、人文和地理环境下,面对特定的作战对手来完成一定的使命任务的装备组合。因此,其所处的政治、人文、地理环境以及对手情况都会对装备体系是否能够完成使命任务产生影响,而这些因素出现的可能性和影响性都是难以明确的估计的。因此,在装备体系方案构建的时候也必须考虑到这种场景的复杂性以及考虑到各种复杂场景因素的各种不确定性对体系方案的影响。

2) 方案多样性。体系不同于系统的一个很重要的特征就在于体系可以通过组成系统的多种组合方式来实现相同或者不同的能力需求。在给定的装备选择性,装备体系方案可以有多种,这些体系方案可能在某些场景下所提供的能力是类似的,在另一些场景下所提供的能力是不同的。因此,在装备体系方案构建的时候也必须考虑到这种体系方案的多样性,选择能够应对更多复杂场景的装备体系方案。

3) 结构演化性。演化性是指装备体系的结构、状态、行为、能力等随着时间的推移而发生的变化。装备体系的构建过程以及使用过程都是要经历相当长的一段时期,在这个长

期的过程中,外部环境的改变以及体系自身组成系统的退出和新的系统的加入都会造成装备体系方案的改变,即结构的演化。随着体系结构的演化,体系方案的能力、构建时间和构建成本等也会产生不同的变化,形成不同的演化轨迹,如图 1 所示。而在这种演化过程中,有些体系能够维持能力的稳定而能够支撑使命任务的完成,而有些会产生比较大的能力波动,甚至能力的缺失,无法继续完成使命任务。因此,在装备体系方案构建的时候也必须考虑到这种体系结构的演化性,选择能够更好地适应这种结构演化的装备体系方案。

装备体系的建设是一个长期的过程,是一个从无到有,逐步演变的过程。最初构建的装备体系必然会随着时间的推移而产生变化,如背景的变化、组分系统的故障或者退出等,为了使装备体系能够适应新的要求或者维持已有的能力,必须对体系结构进行调整(可能是原有组分系统的重组或者是新的组分系统的加入和旧的组分系统的退出),这些调整是需要花费时间和经费的。需要注意的是,这种体系方案调整所需要的时间和成本的投入以及调整后体系能力水平的高低很大程度上取决于最初的装备体系方案设计的是否合理,是否预计到了未来出现的各种不确定因素。即在装备体系方案构建的初期,就要考虑到环境的变化,要从面向演化的角度来整体考虑装备体系方案的选择。

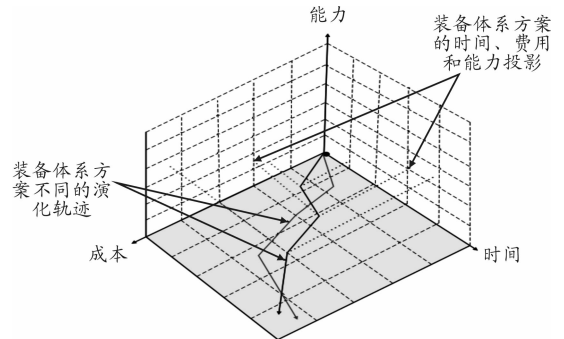


图 1 装备体系方案能力、构建成本和构建时间的演化关系

## 2 面向演化的装备体系方案选择的不确定决策

### 2.1 面向演化的装备体系方案选择的决策过程

面向演化的装备体系方案的选择就是要在给定的若干个装备体系可能会面临的作战背景下,在现有装备集合的基础上,选择能够适合各种作战背景的构建时间短,经费投入少,支撑能力大的装备体系方案。

面向演化特征的装备体系方案选择问题可以描述为图 2 所示的决策过程,图形的下半部分描述了装备体系在面向不同的场景下随时时段的变化而发生的演化过程,图形的上半部分给出了面向此演化过程的装备体系方案选择的不确定性决策过程。

整个决策过程包括以下要素:

1) 体系未来可能面临的  $l$  种作战场景集合。这是在装

备体系方案构建之前,对未来的一种预测,场景内的每种作战场景可能出现,也可能不会出现。

2)  $CW$  代表当前可能使用的武器装备集合。由于武器装备功能的发挥依赖于一定的外部环境,因此每种武器装备在不同的场景下可能可以使用,也可能无法使用。

3)  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  代表装备体系在未来的  $m$  个演化阶段的集合。每个阶段内装备体系的构成是不变的。由于新的装备的加入或者老的装备的退出等原因造成装备体系构成的变化过程也就是阶段的变化过程。

4)  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$  代表面向装备体系在未来的  $m$  个演化阶段所作出的方案选择决策。在每一个演化阶段  $T_i, i = 1, 2, \dots, m$ , 都需要对装备体系的改变做出选择  $D_i, i = 1, 2, \dots, m$ , 如是否选择新装备加入体系或者老装备退出体系, 装备变化的数量等。

5)  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_{m-1}\}$  代表进行了装备体系方案选择决策之后形成的体系在能力上的欠缺集合。 $E_i, i = 1, 2, \dots, m - 1$ , 代表在  $D_i, i = 1, 2, \dots, m - 1$ , 阶段决策之后的体系能力欠缺。

6)  $O = \{O_1, O_2, O_3\}$  代表装备体系方案选择时需要考虑的评价目标集合,其中  $O_1$  代表装备体系方案构建所需要花费的时间, $O_2$  代表装备体系方案构建所需要的经费投入, $O_3$  代表装备体系方案构建后所能提供的能力。其中第  $j$  个目标  $O_j$  有  $q^j$  种可能的取值  $O_j = \{O_j^1, O_j^2, \dots, O_j^{q^j}\}, j = 1, 2, 3$ 。

7)  $V = \{V_1, V_2, V_3\}$  代表各个评价目标对武器装备体系所带来的效用集合,其中  $V_1$  代表装备体系方案构建所需要花费的时间效用, $V_2$  代表装备体系方案构建所需要的经费投入效用, $V_3$  代表装备体系方案构建后所能提供的能力效用。

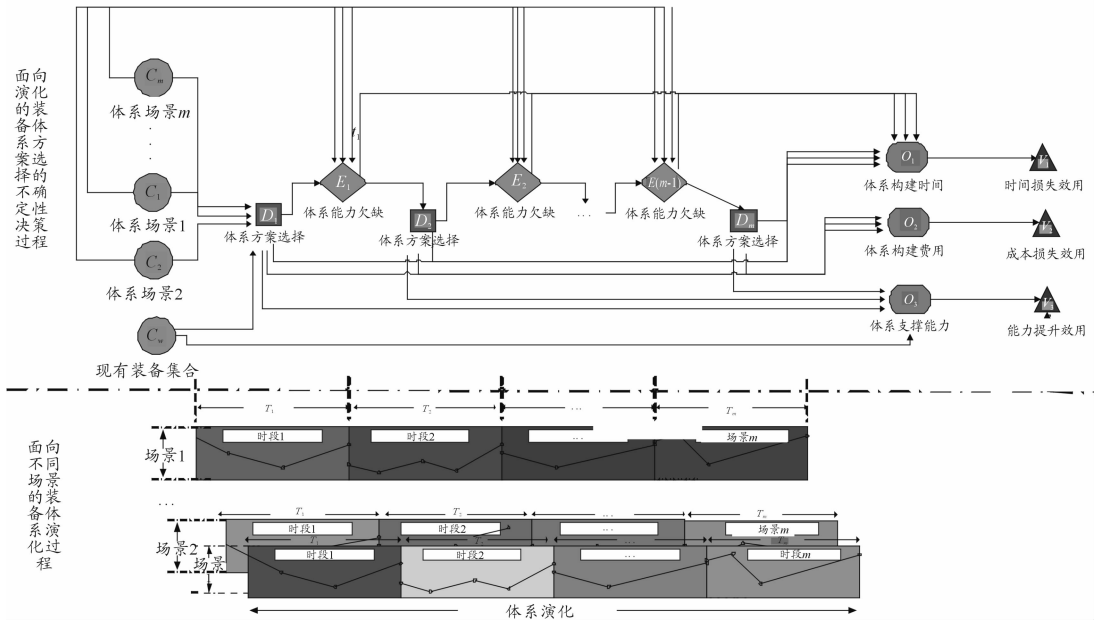


图2 面向演化的装备体系方案选择的不确定性决策过程

## 2.2 面向演化的装备体系方案选择的决策模型

为了更好地让决策者能够清楚地了解到体系方案选择时所面临的各种不确定因素,将面向演化的装备体系方案选择的决策模型定义为三元组:

$$\langle X, A, P \rangle$$

其中: $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  是贝叶斯网络中表达与装备体系方案选择相关的节点变量集合,即决策变量; $A = \{[a_{ij}], 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n\}$  是连接各个决策节点的有向边集合, $a_{ij}$  表示一条从节点  $X_i$  到  $X_j$  的有向边; $P = \{P(X_i | \pi(X_i)), X_i \in X\}$  是网络中与节点有关的条件概率分布,表示两个决策变量之间的影响程度。其中  $\pi(X_i) \in \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  表示  $X_i$  的父节点集合。

根据面向演化的装备体系方案选择的决策过程可知,决策变量为  $X = CUCWUDUEUOUUV$ ;  $A$  包括了图3所示的决策过程中决策变量节点之间的逻辑关系。

面向演化的装备体系方案选择的决策模型的求解过程如下:

1) 根据历史数据和专家经验等知识,确定各种外部环境节点出现的可能性,用先验概率分布  $P_{now} = (P(C_1 = True) = 0.9, \dots, P(C_l = True))$  进行表示。

2) 从外部环境节点的先验概率分布开始,依次确定各个阶段装备体系方案选择,得到装备体系方案选择的决策方案  $S_i = (D_1, D_2, D_m)$ 。

3) 利用贝叶斯模型进行推理,得到在给定的环境节点信息下,采用决策方案  $S_i$  所带来的体系各目标状态发生的概率为:  $P(O_j = O_j^k | S_i, C_{now}) = P(O_j = O_j^k | \pi(O_j)) \times P(\pi(O_j) | S_i, C_{now})$ 。

4) 根据上述后验概率,计算所有体系价值节点的取值之和,得到该决策方案的效用:  $\gamma(S_i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{q^j} W_j^k \times P(O_j =$

$O_j^k | \pi(O_j)) \times P(\pi(O_j) | S_i, C_{now})$ 。其中  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  表示在体系方案选取时各种评价准则的权重。

5) 改变各个阶段体系方案选择节点的方案选择, 得到各种可行的装备体系方案的决策方案  $\{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ , 对每一个决策方案重复步骤 3) 和 4), 得到各个决策方案的效用  $\{\gamma(S_1), \gamma(S_2), \dots, \gamma(S_p)\}$ , 供决策者选择。

### 3 实例

当前某国在东部某海域存在一些突发情况, 可能会存在安全威胁, 决策人员需要在现有装备的基础上构建装备体系应对未来可能存在的危机。决策人员可以选择构建不同等级的体系方案(高等方案, 中等方案, 低等方案), 高等方案提供的能力支撑可能更大, 同时所需要的构建时间可能更长、花费的费用可能更大, 低等方案可能正好相反。由于危机的不确定性(出现或不出现), 因此体系方案的选择会存在一定的风险(如果危机出现, 低等级方案提供的能力支撑可能无法应对危机; 如果危机不出现, 高等级方案所花费的时间和费用就会出现浪费)。不同等级的体系方案所需要的装备也不是相同的, 高等级的体系方案需要的装备可能更多, 对装备的要求可能更高, 因此可能出现装备短缺的情况, 如果采购了新的装备, 那么体系的构建时间可能会缩短, 提供的支撑能力可能会增大。甚至如果不进行装备采购, 基于现有装备构建的体系方案可能无法提供所需的能力来应对危机的发生。

表 1 装备体系方案选择的决策节点

类别	节点	标示	离散状态
环境节点	东部沿海危机	$C_1$	Yes, No
	现有装备	$C_w$	Ok, Fault
选择节点	方案调整等级	$D_1$	Per, Imp, Min
	装备采购	$D_2$	Yes, No
传递节点	体系能力欠缺	$E_1$	Yes, No
目标节点	体系构建时间	$O_1$	Long, Mid, Short
	体系构建费用	$O_2$	High, Mid, Low
	体系支撑能力	$O_3$	Ok, Fault
价值节点	构建时间效用	$V_1$	$W_1^L, W_1^M, W_1^S$
	构建费用效用	$V_2$	$W_2^H, W_2^M, W_2^L$
	支撑能力效用	$V_3$	$W_3^O, W_3^F$

首先确定装备体系方案选择问题中的各影响因素, 如表 1 所示。然后建立网络结构如图 3 所示。

当决策者选择的体系构建方案等级不同时, 体系方案所能提供的能力支撑也就不同。如果东部沿海危机出现, 构建的体系方案出现能力欠缺的概率分布如表 2 所示。

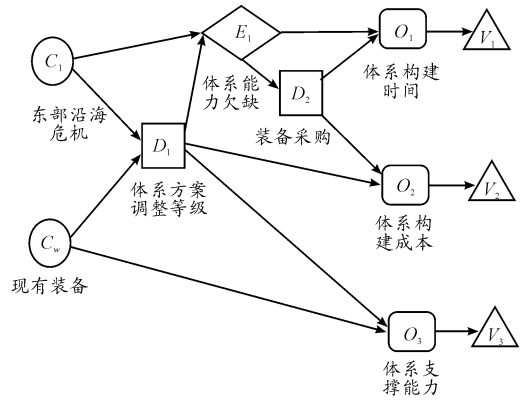


图 3 体系方案选择的贝叶斯模型网络结构

表 2 体系能力欠缺的概率分布

东部沿海危机	体系方案调整等级	体系能力欠缺	
		No	Yes
Yes	Per	100%	0%
Yes	Imp	100%	0%
Yes	Min	100%	0%
No	Per	0	100%
No	Imp	70%	30%
No	Min	95%	5%

如果在体系构建时需要采购一些新的装备, 那么体系构建时间可能会缩短。比如通过高炮装备来实现某个战场的防控, 可能需要雷达部队、高炮部队长期的训练才能形成战斗力, 而通过先进的防空导弹系统的引入, 那么防空能力可以更快地形成。体系构建时间条件概率分布如表 3 所示。

表 3 体系构建时间概率分布

体系能力欠缺	装备采购	体系构建时间		
		Short	Mid	Long
Yes	Yes	10%	80%	10%
Yes	No	0%	10%	90%
No	Yes	100%	0%	0%
No	No	100%	0%	0%

不同的体系等级选择决定了体系构成装备的不同, 以及是否需要采购新的装备, 从而造成了体系构建费用的不同。体系构建费用的条件概率分布如表 4 所示。

现有装备是否能够支撑体系的构建以及采用何种体系方案的构建决定了最终体系方案的能力的不同, 体系方案支撑能力是否满足任务需要的条件概率分布如表 5 所示。

表4 体系构建费用概率分布

体系方案 调整等级	装备 采购	体系构建费用		
		Low	Mid	High
Per	Yes	0%	0%	100%
Per	No	0%	50%	50%
Imp	Yes	0%	100%	0%
Imp	No	50%	50%	0%
Min	Yes	70%	30%	0%
Min	No	100%	0%	0%

表5 体系支撑能力概率分布

现有 装备	体系方案 调整	体系支撑能力	
		Ok	Fault
Ok	Per	100%	0%
Ok	Imp	100%	0%
Ok	Min	100%	0%
Fault	Per	100%	0%
Fault	Imp	70%	30%
Fault	Min	0%	100%

由于装备体系方案构建的时间长短会影响到战略部署等各个方面,会造成战略利益等效用的不同,如表6所示,装备体系方案选择所造成的时间效用为:  $V_1 = \sum_i^{L,M,S} P(O_1 = i) \times W_1^i$ 。

表6 体系构建时间效用条件概率分布

体系构建 时间	Long	Mid	Short
	$W_1^L$	$W_1^M$	$W_1^S$
时间效用	0	0.15	0.3

装备体系方案费用花费的不同所带来的效用如表7所示,装备体系方案选择所造成的费用效用为:  $V_2 = \sum_i^{H,M,L} P(O_2 = i) \times W_2^i$ 。

装备体系方案支撑能力的不同所带来的效用如表8所示,装备体系方案支撑能力的效用为:  $V_3 = \sum_i^{O,F} P(O_3 = i) \times W_3^i$ 。

设当前装备体系方案决策的环境为  $P((C_1 = No) = 1, (C_2 = Ok) = 0.6)$ ,根据式计算各个装备体系方案选择的最终效用如表9所示,采用第4种装备体系方案的效用最大。

表7 体系构建费用效用条件概率分布

体系构建 费用	High	Mid	Low
	$W_2^H$	$W_2^M$	$W_2^L$
费用效用	0	0.1	0.2

表8 体系支撑能力效用条件概率分布

体系支撑 能力	Ok	Fault
	$W_3^O$	$W_3^F$
能力效用	0.5	0

表9 不同装备方案选择的效用对比

序号	体系方案调整等级	装备采购	效用
1	Per	Yes	0.65
2	Per	No	0.565
3	Imp	Yes	0.795
4	Imp	No	0.804
5	Min	Yes	0.762
6	Min	No	0.786

## 4 结束语

装备体系的背景复杂性、方案多样性和结构演化性决定了装备体系方案选择是一个不确定条件下的多阶段决策问题。针对面向演化的装备体系方案选择过程中的不确定性问题及多阶段问题,提出了一种面向演化的装备体系方案选择的不确定性决策方法。该方法基于贝叶斯网络理论,将装备体系方案选择中的背景、装备、体系方案调整等级等表示成网络结构,并依此建立方案的最终效用。在装备体系方案选择这种大规模的不确定性决策中,通过贝叶斯网络结构模型,可以大大降低决策者思考问题的复杂度,提高决策的有效性。

## 参考文献:

- [1] Jeremy Kaplan. A New Conceptual Framework for Enterprise-Wide, Net-Centric System-of-Systems Engineering [C]//2nd Annual System of Systems Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.], 2006, 3(7): 76-89.
- [2] Donna H. Rhodes, Adam M. Ross. Anticipatory Capability: Leveraging Model-Based Approaches to Design Systems for Dynamic Futures [C]//Second Annual Conference on Model-based Systems. Haifa: [s.n.], 2009.
- [3] Debarati Chattopadhyay. a Method for Tradespace Exploration of Systems of Systems [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [4] 王爱文, 杨敏, 段华蕾. 基于因果贝叶斯网络的风险建模与分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(5): 1023-1030.
- [5] 蔡志强, 孙树栋, 司书宾, 等. 不确定环境下多阶段多目标决策模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(9): 1622-1628.
- [6] 赵青松, 杨克巍, 陈英武, 等. 体系工程与体系结构建模方法与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.