

基于 DSM 与信息熵的装备体系结构贡献率分析

魏东涛^{1,2}, 刘晓东^{1,*}, 周 骏², 陈玉金¹

(1. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051;

2. 空军勤务学院航材四站系, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 针对装备体系构成复杂等特点, 构建了基于设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)和信息熵的装备体系结构贡献率评估模型。首先, 基于“整体、动态、对抗”的思想, 建立装备体系贡献率评估的动态—静态 DSM 评价模型; 其次, 以单一能力最小为粒度对作战过程进行分解, 依据元活动序列对装备体系能力结构进行网络化建模; 然后, 采用信息熵方法计算装备能力灵敏度。以某航空作战装备体系为例, 验证了本方法的可行性和合理性。

关键词: 设计结构矩阵; 能力; 元活动; 自信息量

中图分类号: N 936

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.06.19

Evaluation of equipment's structure contribution rate to system-of-systems based on DSM and information entropy

WEI Dongtao^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,*}, ZHOU Jun², CHEN Yujin¹

(1. College of Equipment Management and UAV Engineering, Air Force Engineering University,

Xi'an 710051, China; 2. Air Force Material and Four-Stations Department,

Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Aiming at the complex structure of the equipment system-of-systems and other characteristics, an equipment system structure contribution rate evaluation model based on the design structure matrix (DSM) and information entropy is constructed. First, based on the idea of “all-round, dynamic, and confrontational”, the dynamic-static DSM evaluation model for the assessment of the contribution rate of the equipment system is established; second, the combat process is decomposed with the smallest single capability as the granularity, and the capability structure of the equipment system is analysed according to the meta activity sequence. After the networked modeling is carried out, the information entropy method is used to calculate the sensitivity of equipment capabilities. Taking a certain aviation combat equipment system as an example, the feasibility and rationality of this method are verified.

Keywords: design structure matrix (DSM); capability; meta activity; self-information

0 引 言

架构通常被理解为某一事物的基本的或统一的结构^[1], 按照系统科学的思维方法^[2], 任何系统都是由元素和结构组成的。装备体系可以看成是一种特殊系统, 采用体系结构来描述装备体系的架构, 装备体系结构是指构成武器装备体系的各类武器系统及其相互关系, 主要分为功能

结构和信息结构两大类^[3]。体系结构贡献率是指被评装备对作战体系任务完成能力的贡献量^[4], 结构贡献率评估既是装备体系规划论证需解决的关键问题, 也是提升装备体系建设效益的基础。

装备对体系结构贡献的外在形态是对形成各系统及其结构的作用, 本质上是对体系决策、结构柔性和要素性能的作用^[5]。当前, 结构贡献率一般根据装备加入体系前后体

收稿日期:2021-04-25; 修回日期:2021-10-28; 网络优先出版日期:2022-03-14。

网络优先出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220314.1602.008.html

基金项目:国家自然科学基金(52074309)资助课题

* 通讯作者。

引用格式: 魏东涛, 刘晓东, 周骏, 等. 基于 DSM 与信息熵的装备体系结构贡献率分析[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 1927-1933.

Reference format: WEI D T, LIU X D, ZHOU J, et al. Evaluation of equipment's structure contribution rate to system-of-systems based on DSM and information entropy[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(6): 1927-1933.

系能力/效能的变化来测度。文献[6]提出基于作战环的装备体系结构描述与建模方法,通过对目标的影响能力^[7]、作战环数量变化^[8]、作战过程信息熵分析^[9]来计算装备体系结构贡献率。由于作战体系是一个开放、动态复杂系统,对同一个作战目标,有多种装备组合方案和作战模式,基于特定作战想定且面向单一任务的体系贡献率分析缺乏普适性。文献[10]基于复杂网络理论,建立了武器装备体系作战网络模型,通过计算装备网络变化前后相关拓扑结构指标的变化来度量体系结构贡献率^[11-12]。但装备体系由数量众多、类型不同装备的构成,装备间关系复杂,如何对装备体系进行合理建模和选取合适的度量指标是研究体系结构贡献率的关键,需要做进一步的研究和探索。文献[13]分析总结了现有装备体系结构贡献率的评估现状,提出了基于故障树(故障树是一种倒立树状的因果关系逻辑图,由逻辑门与事件构成)理论航空装备体系结构贡献率模型,但需假设装备体系结构故障树中的各底事件(底事件是位于故障树最底层的事件,是某个逻辑门的输入事件^[14])相互独立,且底事件的缺失概率较难计算。

综上所述,针对现有体系结构贡献率评估中存在体系建模描述不完善,主观性强等问题,本文提出基于设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)和改进信息熵的装备体系结构贡献率评估方法。首先,从“整体、动态”的视角对传统 DSM 进行拓展,建立体系结构贡献率评估框架。其次,基于“面向任务,基于能力”的思想,采用单一能力最小为粒度的原则将体系作战过程分解为元活动序列。然后,根据元活动序列构建体系能力链网络模型。最后,从“对抗”视角,基于自信息量,采用信息熵分析方法计算能力灵敏度,进而计算装备体系结构贡献率。

1 基本思路

DSM 是一种表示系统中元素及其相互作用的结构化建模工具,用方阵表示系统中元素及元素之间的串行、并行和耦合关系^[15-16],广泛应用于复杂系统的结构设计、分析和管理中^[17-18]。文献[19-20]通过度量不同部件之间关键性能参数间的输入/输出关系,来表示部件之间的依赖关系,建立了复杂产品设计和研发模型。

装备体系是由不同类型装备通过一定的方式综合集成的具有更高结构层次的系统,基于整体观点,本文将装备体系视为一个复杂装备系统,将装备看成是体系的“部件”,各“部件”之间互联、互通、信息共享。即装备体系是由具有相对独立功能的“部件”组成的一个复杂系统。由于能力是装备体系的整体特性和固有属性,因此可通过度量部件之间能力的输入/输出关系,来表示装备间的关联强度,建立相应的装备体系结构设计矩阵。DSM 中每一行表示该行所对应的装备需要其他各列装备的支持信息,每一列表示该列装备对其他各行装备的输出或者支持信息,行列信息之和反映了该装备在整个装备体系中的重要性,其值越大,该装备越重要,即装备的体系结构贡献率越大。

作战任务执行和完成需要体系各装备协同合作,主要包括 3 种类型:依赖型、独立型、耦合型。以装备 A 和装备

B 为例,协同 DSM 如图 1 所示,图 1 左边装备间的依赖关系,可以表示为右边 DSM 矩阵。

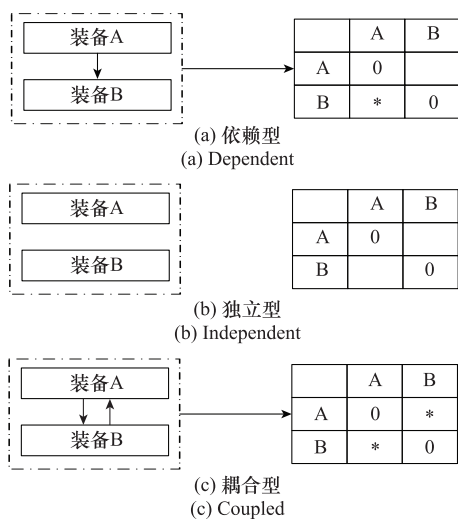


图 1 装备协同 DSM

Fig. 1 Equipment collaborative DSM

装备协同 DSM 是一个 $m \times m$ 矩阵(m 为装备的个数),对角线元素“0”表示装备对自身的依赖关系,非对角线元素“空”表示装备之间没有依赖关系,该“空”行列对应的两个装备是独立型关系,“*”表示装备之间存在依赖关系,行列对应的两装备是依赖型关系或耦合性关系。为适应装备体系结构的动态变化和装备多功能特性,基于动态观念,将传统的 DSM 扩展成两个视图,如图 2 所示。

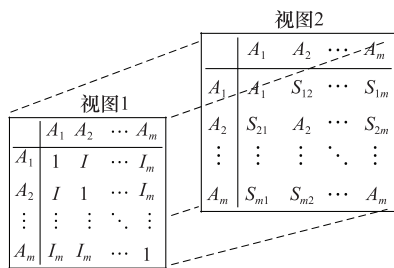


图 2 DSM 扩展图

Fig. 2 DSM expansion diagram

视图 1 中, $S_{ij} (i, j \in [1, m])$ 为装备 A_j 对装备 A_i 的重要度,称为静态 DSM。视图 2 中, S_{ij} 为装备 A_j 对装备 A_i 输出的关键能力集合,随着装备能力改变或关键设计参数改变而变更,称为动态 DSM。

通过计算装备输入关键能力的灵敏度,建立视图 2 与视图 1 的映射关系^[19],具体步骤如下。

步骤 1 检索动态 DSM 中第 i 行的非零和非对角元素,得到向装备 A_i 输入的关键能力集合 $S = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}\}$,其中 $S_{ik} = \{c_1, c_2, \dots, c_{a_k}\}$, $1 \leq k \leq m$, a_k 为装备 A_k 向装备 A_i 输入关键能力的数量。

步骤 2 基于“对抗”观点,采用信息熵方法,计算 S 中每个装备能力对装备 A_i 的绝对灵敏度 p_{ij}^l 。 p_{ij}^l 表示装备 A_j 第 l 个能力的绝对灵敏度, $1 \leq l \leq a_j$ 。

步骤 3 计算 S 中装备 A_j 对装备 A_i 的重要度 I_{ij} ：

$$I_{ij} = \sum_{l=1}^{a_j} p_{lj}^i \tag{1}$$

步骤 4 通过步骤 1~步骤 3, 计算其他装备之间的能力灵敏度, 完成动态 DSM 向静态 DSM 的映射。

步骤 5 计算装备体系结构贡献率 $\text{con } A_i$ ：

$$\text{con } A_i = \frac{\sum_{j=1}^m I_{ij} + \sum_{i=1}^m I_{ji}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m I_{ij}} \tag{2}$$

从上述分析步骤可知, 采用 DSM 方法对装备体系结构贡献率进行计算, 关键需解决两个问题: 一是装备能力的分解粒度, 装备体系建设和发展的目标是执行和完成体系承担的使命任务, 能力分解粒度应与作战过程所需能力相对应; 二是装备能力的灵敏度分析。在体系作战中, 装备作战能力的大小, 不仅与装备自身性能有关, 而且与紧邻连接装备的性能有关, 应以作战任务完成效果-作战效能来度量能力的灵敏度。

2 “面向能力, 基于任务”的装备能力分解

装备体系能力一般用多指标构成的具有层次结构的指标系统来刻画, 一般包括顶层能力层、子能力层、性能指标层。根据装备在作战过程中的作用, 可以将体系内的装备分为 3 类: 侦察类实体、决策类实体、攻击类实体, 体系所有作战行动都须依托于这 3 类实体进行。按照“能力-任务”相匹配的原则, 将体系能力划分为侦察能力、决策能力、攻击能力 3 类。

由于现代化装备具有多功能特点, 如侦察类实体具有侦察、探测、监视等功能, 决策类节点具有指挥、控制、决策等功能, 攻击类实体具有打击、干扰等功能, 因此, 根据装备实体功能多少, 抽象成多个单一功能的能力模块, 能力模块从功能上属于且属于侦察、决策、攻击 3 类作战能力之一, 如图 3 所示。其中, m 个装备抽象分解成 n ($n \geq 1$) 个具有单一功能的能力模块, 例如, 装备 1 可以抽象分解为能力模块 F_1 和能力模块 F_2 。

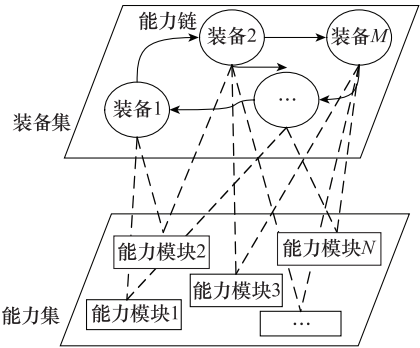


图 3 装备体系组成

Fig. 3 Composition of equipment system-of-systems

装备能力的分解粒度, 应以体系承担的使命任务为核心、单一能力最小为原则进行。

首先, 根据装备体系的使命任务, 构建典型作战背景下的作战想定, 通过使命任务的逐层分解及其与体系能力的

关联映射, 将使命任务分解为总任务、子任务和元活动。元活动是作战行动过程中具有原子性事物处理性质的最小活动单元, 元活动不受作战平台单元所限, 是能力指标与作战任务在微观层面的连接点^[21]。如果一个元活动有多个能力支撑, 则需要对该活动进行再次分解, 直至分解到一个元活动对应着一个能力为止。

其次, 根据元活动执行水平(衡量尺度或任务标准), 通过元活动-能力指标映射, 得到表征能力的关键性能参数, 如图 4 所示。

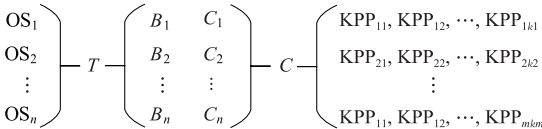


图 4 装备体系指标结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the index structure of the equipment system-of-systems

图 4 中, T 表示体系承担的使命任务, C 表示体系能力, C_i 表示执行第 i 个元活动对应的体系子能力; B 表示元活动, 实现任务 T 的元活动向量为 $[B_1, B_2, \dots, B_n]$, n 为任务 T 包含元活动的数量 $n \geq 1$; OS 表示元活动的衡量尺度及其对应的标准; KPP 表示关键性能参数, 子能力 C_i 用关键性能参数向量表示为 $[KPP_{i1}, KPP_{i2}, \dots, KPP_{ik_i}]$, ($k_i \geq 1$) 为表征能力 C_i 的关键性能参数的数量。

关键性能参数是有效实现某一预期能力而必须考虑的最小装备性能参数集合^[15]。关键性能参数选取, 应遵循以下原则:

- (1) 该指标是某一项能力需求定义所必须的性能指标, 该指标的改进会引起某一项作战能力的大幅提高;
- (2) 该指标可以实现, 并且能度量 and 被测试。

然后, 将装备能力按与元活动相匹配的单一能力进行分解, 若某一能力模块的关键性能参数与执行元活动的能力相关联时, 该能力模块不再继续分解。

通过上述方法, 将体系能力分解为若干子能力, 多功能装备抽象为若干子能力组成的整体。在体系能力分解中, 不同能力模块可能存在部分关键参数相同, 但如果 2 个能力模块中的关键性能参数完全相同, 则被认为是同一能力模块。

根据装备的使用特点和用途, 同一能力模块在不同装备中具有不同的重要性, 采用模糊评判法、层次分析法等方法, 确定各能力模块在各装备中的权重 w_j^i (装备 A_i 中能力模块 c_j 的权重)。

3 基于改进信息熵的能力灵敏度分析

由于作战行动本身的逻辑关系以及作战指挥体制的上下级关系, 决定了元活动序列的有向性。根据复杂网络理论, 将执行元活动的装备能力模块抽象成复杂网络中的节点, 按照元活动执行顺序, 构建相应的体系能力链网络模型, 网络的边抽象网络节点发挥各自作用完成相应元活动的过程。

边作战效能主要受其对应关键性能指标值影响^[22-23], 假设节点 v_i 到 v_j 有单向边相连, 共有 n 个关键性能参数,

由图6可知,通过将典型作战任务进行分解,得到元活动作战序列,根据元活动-能力映射该体系能力划分为12种作战能力。其中,能力12主要是指作战活动之间的信息关联,在体系作战过程中,装备均能通过数据链等方式进行信息互联。根据能力-功能映射,将多功能航空装备分解成若干个能力模块。为方便网络化建模,在分解过程中,能力12分别与其他能力集成,即装备能力分解得到的能力模块不仅能提供特定能力,而且能与其他能力模块进行信息互联,如表1所示。

表1 航空装备功能分解表

Table 1 Functional breakdown of aviation equipment			
编号	装备名称	能力模块 F	能力权重 $F_{1(12)}$
A_1	JJ1	$F_{1(12)}, F_{7(12)}, F_{9(12)}$	$w_1=0.2, w_7=0.2, w_9=0.6$
A_2	JJ2	$F_{1(12)}, F_{7(12)}, F_{9(12)}$	$w_1=0.15, w_7=0.15, w_9=0.7$
A_3	JH1	$F_{1(12)}, F_{7(12)}, F_{10(12)}$	$w_1=0.1, w_7=0.3, w_9=0.6$
A_4	HZ1	$F_{1(12)}, F_{7(12)}, F_{11(12)}$	$w_1=0.2, w_7=0.1, w_9=0.6$
A_5	YJ1	$F_{4(12)}, F_{5(12)}, F_{6(12)}, F_{7(12)}, F_{8(12)}$	$w_4=0.2, w_5=0.1, w_6=0.2, w_7=0.2, w_8=0.3$
A_6	YJ2	$F_{4(12)}, F_{5(12)}, F_{6(12)}, F_{7(12)}, F_{8(12)}$	$w_4=0.2, w_5=0.15, w_6=0.15, w_7=0.25, w_8=0.25$
A_7	GR1	$F_{3(12)}, F_{6(12)}$	$w_3=0.8, w_6=0.2$
A_8	ZC1	$F_{2(12)}, F_{6(12)}$	$w_2=0.8, w_6=0.2$
A_9	ZC2	$F_{2(12)}, F_{6(12)}$	$w_2=0.6, w_6=0.4$

表1中,战斗机JJ1可抽象成由能力1、能力7、能力9、能力12构成的装备实体,可分解为3个能力模块 $F_{1(12)}, F_{7(12)}, F_{9(12)}$;干扰机GR1抽象成由能力3、能力7、能力12构成的装备实体,分解为2个能力模块。根据装备特点和用途,采用层次分析法对装备分解的各能力模块进行赋权,确定能力模块在不同装备中的权重,如表1所示。

按照使命任务分解后的元活动序列,建立该体系的作战网络模型,如图7所示。

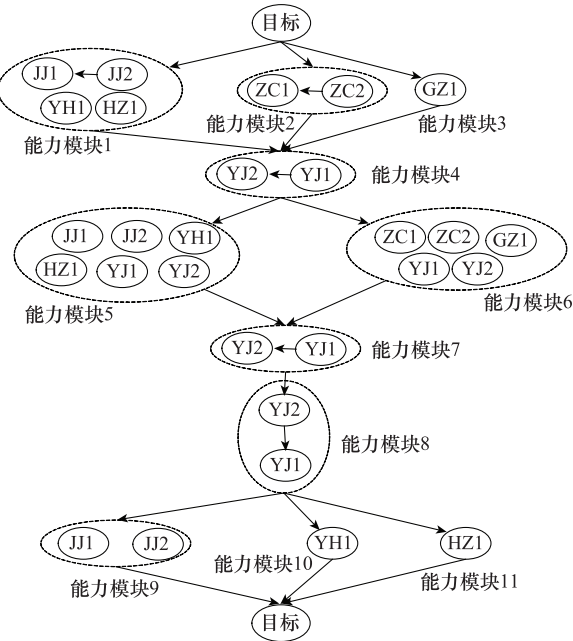


图7 航空作战装备体系网络

Fig. 7 Aviation combat equipment system-of-systems network

装备体系结构贡献度的步骤如下:

(1) 根据表1和图6,遍历体系内装备能力模块之间的组合,建立动态DSM。

(2) 以预警机YU2为例,计算S集中各个能力模块对预警机JJ2的灵敏度。向预警机YU2输入能力的装备集合为 $S=\{S_{61}, S_{62}, S_{63}, S_{64}, S_{65}, S_{67}, S_{68}, S_{69}\}$,输入的能力集合如表2所示。

表2 能力灵敏度分析数值表

Table 2 Ability sensitivity analysis numerical table					
装备名称	输入能力	网络边	能力绝对灵敏度 P	权重 I	
JJ1	c_1, c_5	l_{14}, l_{57}	$p_{11}^6=0.050, p_{51}^6=0.035$	$I_{62}=0.085$	
JJ2	c_1, c_5	l_{14}, l_{57}	$p_{12}^6=0.057, p_{52}^6=0.042$	$I_{62}=0.097$	
JH1	c_1, c_5	l_{14}, l_{57}	$p_{13}^6=0.025, p_{53}^6=0.062$	$I_{63}=0.087$	
HZ1	c_1, c_5	l_{14}, l_{57}	$p_{14}^6=0.024, p_{54}^6=0.052$	$I_{64}=0.078$	
YU1	c_4, c_7	l_{44}, l_{77}	$p_{45}^6=0.034, p_{75}^6=0.038$	$I_{65}=0.072$	
GR1	c_3, c_6	l_{34}, l_{67}	$p_{37}^6=0.034, p_{67}^6=0.028$	$I_{67}=0.062$	
ZC1	c_2, c_6	l_{24}, l_{67}	$p_{28}^6=0.045, p_{68}^6=0.035$	$I_{68}=0.080$	
ZC2	c_2, c_6	l_{24}, l_{67}	$p_{29}^6=0.034, p_{69}^6=0.047$	$I_{69}=0.081$	

根据装备各能力模块对应的关键性能参数和能力需求满足度,依据式(3)~式(9),分别计算各装备输出能力的绝对灵敏度(每个专家的因素分析结果不在此列出,如表2所示)。

(3) 建立静态DSM,根据式(1)将动态DSM映射到静态DSM,如图8所示。

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
A_1	A_1	0.057			0.057	0.066			
A_2		A_2			0.065	0.075			
A_3			A_3		0.051	0.059			
A_4				A_4	0.032	0.058			
A_5	0.092	0.086	0.082	0.058	A_5	0.098	0.052	0.075	0.066
A_6	0.085	0.097	0.087	0.078	0.042	A_6	0.062	0.080	0.081
A_7					0.056	0.082	A_7	0.032	
A_8					0.059	0.069		A_8	
A_9					0.025	0.055			A_9

图8 静态DSM

Fig. 8 Static DSM

(4) 其他装备的动态DSM采用同样方法计算。

(5) 利用式(3),计算装备体系结构贡献率为
 $\text{con } A=(0.084, 0.09, 0.066, 0.053, 0.235, 0.277, 0.067, 0.074, 0.054)$

为了便于分析,绘制各装备体系结构贡献率直方图,如图9所示。

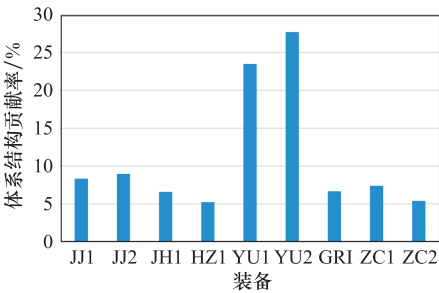


图9 航空装备体系结构贡献率直方图

Fig. 9 Histogram of contribution rate of aviation equipment architecture

计算结果分析如下所示。

(1) 针对同类型装备,性能较优的装备型号,其结构重要度要大于低性能的装备型号。本文通过采用自信息量衡量装备任务完成可能性,以信息熵衡量装备作战效能,通过比较信息熵大小,可以判断同类型装备结构贡献率的高低。如图 9 所示,四代机 JJ2 优于三代机 JJ1,战略预警机 YJ2 优于战术预警机。

(2) 针对不同类型装备,遍历装备之间能力模块组合,以总作战效能为标准衡量装备间关联强度,并推导计算能力的绝对灵敏度,具有一定的合理性和可行性。

(3) 在装备作战体系中,指控类装备的重要度明显大于作战装备。针对本文想定案例,预警机作为体系的核心装备,结构贡献率应最高。如图 8 所示,预警机 JJI、JJ2 结构贡献率均高于体系内其他装备,结果符合装备重要度比较的相关原则。

5 结束语

装备体系作为一个复杂系统,不同的装备、部件单元相互关联提供特定能力,实现特定功能和完成特定任务。本文从体系功能和运行两方面梳理装备与体系整体作战能力贡献追溯链路。通过引入 DSM 和信息熵理论,不仅体现了装备之间的关联关系,而且刻画了体系作战的层次结构,符合装备体系结构化特点。案例分析结果表明,本文所提方法能够评估装备体系结构贡献率,扩展了现有贡献率评估方法,可以为装备体系规划论证提供决策支撑。

参考文献

- [1] 拉里·雷尼,安德利亚斯·图尔克. 建模与仿真在体系工程中的应用[M]. 张宏军,李宝柱,刘广,等译. 北京:国防工业出版社,2019.
LARRY R, ANDREAS T. Modeling and simulation support for system of systems engineering applications[M]. ZHANG H J, LI B Z, LIU G, et al. Trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [2] 张宏军,韦正现,鞠鸿彬,等. 武器装备体系工程原理与工程方法[M]. 北京:电子工业出版社,2019.
ZHANG H J, WEI Z X, JU H B, et al. Engineering principles and engineering methods of weapon equipment system of systems[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2019.
- [3] 罗小明,何榕,朱延雷. 武器装备体系结构贡献度评估[J]. 装甲兵工程学院学报,2016,30(4): 1-6.
LUO X M, HE R, ZHU Y L. Evaluation of the contribution of weapon equipment architecture[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(4): 1-6.
- [4] 李小波,王维平,林木,等. 体系贡献率评估的研究框架、进展与重点方向[J]. 系统工程理论与实践,2019,39(6): 1623-1634.
LI X B, WANG W P, LIN M, et al. Research framework, progress and key directions of system contribution rate evaluation[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2019, 39(6): 1623-1634.
- [5] 张先超,马亚辉. 体系能力模型与装备体系贡献率测度方法[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(4): 843-849.
ZHANG X C, MA Y H. System capability model and equipment system contribution rate measurement method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 843-849.
- [6] 谭跃进,张小可,杨克巍. 武器装备体系网络化描述与建模方法[J]. 系统管理学报,2012,21(6): 781-786.
TAN Y J, ZHANG X K, YANG K W. Networked description and modeling method of weapon equipment system[J]. Journal of Systems Management, 2012, 21(6): 781-786.
- [7] 孟俊勇. 基于作战环的武器装备体系目标毁伤概率研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2016.
MENG J Y. Research on target damage probability of weapon equipment system based on combat ring[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [8] 李小波,林木,束哲,等. 体系贡献率能效综合评估方法[J]. 系统仿真学报,2018,30(12): 4520-4528.
LI X B, LIN M, SHU Z, et al. Comprehensive evaluation method of system contribution rate and energy efficiency[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4520-4528.
- [9] 刘鹏,赵丹玲,谭跃进,等. 面向多任务的武器装备体系贡献度评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(8): 1763-1770.
LIU P, ZHAO D L, TAN Y J, et al. Multi-task-oriented weapon equipment system contribution evaluation method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1763-1770.
- [10] LI J C, TAN Y J, YANG K W, et al. Structural robustness of combat networks of weapon system-of-systems based on the operation loop[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 48(3): 659-674.
- [11] 王宏宇,吴纬,魏艳艳. 基于超网络模型武器装备体系抗毁性分析[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(8): 1782-1787.
WANG H Y, WU W, WEI Y Y. Invulnerability analysis of weapon equipment system based on hyper-network model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(8): 1782-1787.
- [12] 张强,李建华,沈迪,等. 复杂网络理论的作战网络动态演化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(10): 106-112.
ZHANG Q, LI J H, SHEN D, et al. Combat network dynamic evolution model based on complex network theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(10): 106-112.
- [13] 罗承昆,陈云翔,何桢,等. 基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法[J]. 国防科技大学学报,2021,43(1): 155-162.
LUO C K, CHEN Y X, HE Z, et al. Evaluation method of contribution rate of aviation equipment architecture based on fault tree analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 155-162.
- [14] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2011.
LUO H. Research on some key problems of fault tree analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [15] 杨青,吕佳芮,索尼亚. 基于设计结构矩阵(DSM)的复杂研

发项目建模与优化研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 989-1002.

YANG Q, LYU J R, SONIA. Research progress on modeling and optimization of complex R&D projects based on design structure matrix (DSM)[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2016, 36(4): 989-1002.

[16] 李洪波, 徐哲, 于静. 基于 DSM 的研发项目流程多目标仿真优化[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(1): 142-149.

LI H B, XU Z, YU J. Multi objective simulation and optimization of R & D project process based on DSM[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2015, 35 (1): 142-149.

[17] 刘建刚, 唐敦兵, 杨春, 等. 基于物理 DSM 与行列变换的产品结构聚类划分[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1904-1908.

LIU J G, TANG D B, YANG C, et al. Product structure clustering division based on physical DSM and row-column transformation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(10): 1904-1908.

[18] 杨青, 吕杰峰, 黄健美. 基于 DSM 的复杂研发项目价值流优化[J]. 管理评论, 2012, 24(3): 171-176.

YANG Q, LYU J F, HUANG J M. Value stream optimization of complex R&D projects based on DSM[J]. Management Review, 2012, 24(3): 171-176.

[19] 杨青, 唐尔玲. 研发项目产品与流程架构的跨领域集成与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1525-1532.

YANG Q, TANG E L. Cross-domain integration and optimization of R&D project product and process architecture[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2014, 34(6): 1525-1532.

[20] 贡智兵, 李东波, 于敏健. 基于设计结构矩阵变更的设计过程动态规划[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3): 437-441.

GONG Z B, LI D B, YU M J. Dynamic planning of design process based on change of design structure matrix[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007, 13(3): 437-441.

[21] 陈英武, 豆亚杰, 程贲, 等. 基于作战活动分解的武器装备体系能力需求生成研究[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(S1): 154-163.

CHEN Y W, DOU Y J, CHENG B, et al. Study on demand generation of weapon equipment system capability based on the decomposition of combat activities[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2011, 31(S1): 154-163.

[22] 鲁延京, 程贲, 陈英武, 等. 基于 BN 的武器装备体系能力重要度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1605-1612.

LU Y J, CHENG B, CHEN Y W, et al. Analysis of the importance of weapon equipment system capabilities based on BN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(8): 1605-1612.

[23] 商慧琳. 武器装备体系作战网络建模及能力评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

SHANG H L. Research on modeling and capability evaluation method of weapon equipment system combat network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

作者简介

魏东涛(1985—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为军事装备学、装备经济性分析与评估。

刘晓东(1966—),男,教授,博士,主要研究方向为军事装备学、管理学。

周 骏(1980—),男,副教授,硕士,主要研究方向为军事装备学、航空四站保障与勤务。

陈玉金(1996—),男,博士研究生,主要研究方向为管理学。