

doi: 10.7690/bgzdh.2019.11.001

面向武器装备体系的系统价值分析方法

赵 华^{1,2}, 潘 帅², 王 琨²

(1. 国防科技大学系统工程学院, 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 75837 部队, 广州 510000)

摘要: 针对武器装备体系中系统价值的新特点, 提出一种基于网络模型的系统网络价值综合分析方法。构建武器装备体系的系统价值分析框架, 运用多级模糊综合评价方法, 结合系统的个体价值和网络价值分析方法, 通过定量描述网络簇系数的系统价值综合方法, 得到系统的综合价值。分析结果表明: 该方法可以解决武器装备体系建设过程中系统价值的分析问题, 是一种能够综合考虑系统价值分析的方法。

关键词: 武器装备体系; 系统价值; 综合分析

中图分类号: TP11 **文献标志码:** A

System Value Analysis Method for Weapon System-of-systems

Zhao Hua^{1,2}, Pan Shuai², Wang Kun²

(1. School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. No. 75837 Unit of PLA, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the new characteristics of system value in weapon system-of-systems, a comprehensive analysis method of system network value based on network model is proposed. The system value analysis framework of weapon system-of-systems is constructed. The system value synthesis method is obtained by quantitatively describing the network cluster coefficient through the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method, combining the individual value of the system with the network value analysis method. The analysis results show that this method can solve the problem of system value analysis in the process of the construction of weapon system-of-systems and is a method that can comprehensively consider system value analysis.

Keywords: weapon system-of-systems; system value; comprehensive analysis

0 引言

武器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, 由功能上相互联系、相互作用、性能上相互补充的各种武器装备系统, 按一定结构综合集成的更高层次武器装备系统^[1]。传统的系统价值分析方法倾向于将系统看成一个独立的个体, 存在较大的局限性。在信息化条件下, 武器装备体系在执行作战任务时, 体系中的各种武器装备系统并非孤立存在, 通常都要进行信息交互且协同运行。通过一系列交互与协同, 多个武器系统构成一个武器装备体系; 因此, 武器装备体系中各武器系统的价值分析(简称系统价值分析)应该综合考虑系统的独立个体价值(简称系统个体价值)和系统在体系中与其他系统相互作用过程中体现出来的网络价值(简称系统网络价值)。

笔者提出一个武器装备体系中系统价值分析的思路, 将系统价值分解为系统个体价值和系统网络

价值 2 个分量, 分别通过系统个体价值和系统网络价值分析得到 2 种价值分量的排序, 最后利用一个综合算法得到系统价值的最终排序。该方法可以在一定程度上为体系建设过程中系统重点投入提供有效的定量分析, 科学有效地指导体系的建设, 优化配置资源, 达到提高体系整体作战能力的目的。

1 武器装备体系的系统价值分析框架

要对武器装备体系中的系统进行价值分析, 就要基于整个体系, 综合分析系统的个体性因素和体系执行任务过程中系统间相互作用的因素。如图 1 所示, 基于武器装备体系的特点, 笔者提出一个武器装备体系的系统价值分析框架。武器装备体系有向图模型^[2]是系统价值分析的前提和基础, 体系的系统价值分析也可以看作是体系结构信息的再处理过程。笔者将系统价值分解为系统个体价值和系统网络价值 2 个分量, 系统个体价值分量由系统自身的属性决定, 系统网络价值分量由系统的个体价值和体系的网络拓扑结构信息共同决定, 而体系的网

收稿日期: 2019-07-12; 修回日期: 2019-08-25

作者简介: 赵 华(1984—), 男, 浙江人, 硕士, 工程师, 从事系统规划与管理决策技术研究。E-mail: MagicZhao@outlook.com。

络拓扑结构以有向图的形式来表示。初始建立的体系有向图模型，包含系统的个体属性信息和体系的网络拓扑信息，作为系统价值分析方法中系统个体价值分析和系统网络价值分析的基础。运用系统价值分析方法得到系统价值排序最终又作为武器装备体系有向图模型中信息的一部分，用于指导武器装备体系结构的建设和优化。

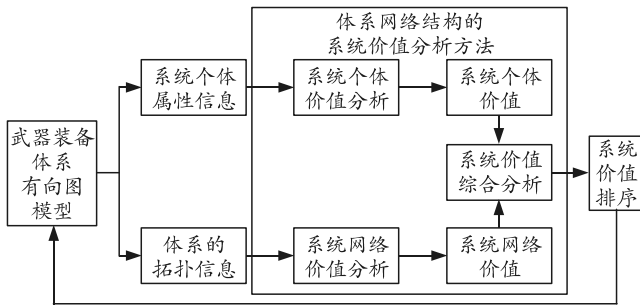


图 1 面向武器装备体系的系统价值分析框架

2 体系网络结构的系统价值分析方法

如图 2 所示，笔者提出体系网络结构的系统价值分析方法，是武器装备体系的系统价值分析框架中的核心部分。

该方法主要包括 3 个步骤：

- 1) 基于体系结构产品^[3]可以得到系统的个体属性、功能等信息，然后通过分析计算得出系统的个体价值排序。
- 2) 在已经得出系统个体价值的基础上，对体系的网络拓扑结构进行分析，获得系统网络价值排序。
- 3) 针对具体作战任务背景，综合系统个体价值和网络价值，得到最终系统的价值排序。

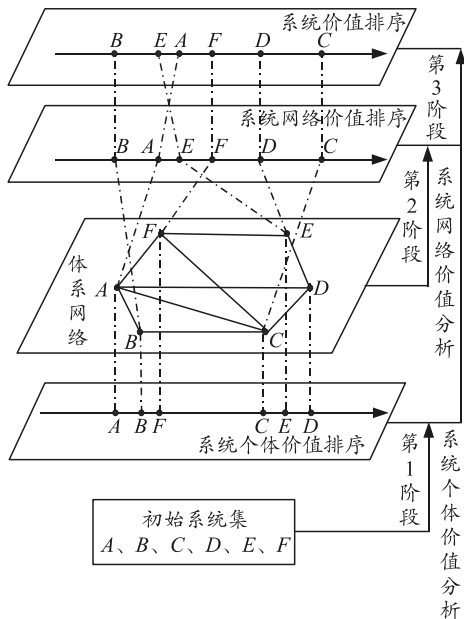


图 2 体系网络结构的系统价值分析方法

2.1 系统个体价值分析

目前，研究个体价值分析方面的文献较多^[4-7]，笔者利用模糊综合评判模型^[7]计算系统的个体价值，并改进其中关于各因素权重的确定方法，采用基于离差修正的方法确定各因素权重。

离差是反映观测值或估计量的平均值与真实值差异程度的一个重要指标^[8]。假设作战指挥人员已经依据自身的经验判断为各系统给出了一组权重系数向量 $\omega_0 = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ ，各系统对因素集的隶属度矩阵为：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix}。$$

其中，系统 s_i 与其他系统关于第 j 个因素 u_j 的离差可以表示为：

$$f_{ij}(\omega_0) = \sum_{k=1}^n |r_{ij}\omega_j - r_{kj}\omega_j| = \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| \omega_j。 \quad (1)$$

各系统对因素 u_j 的总离差为

$$f^{u_j}(\omega_0) = \sum_{i=1}^n f_{ij}(\omega_0) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| \omega_j。 \quad (2)$$

设修正系数向量为 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ ，则

$$\alpha_i = \frac{mf^{u_i}(\omega_0)}{\sum_{j=1}^m f^{u_j}(\omega_0)}。 \quad (3)$$

最后得出因素 u_j 的权重值为

$$\omega = \frac{\omega_0 \alpha^T}{\omega_0 \alpha^T}。 \quad (4)$$

2.2 系统网络价值分析

2.2.1 体系有向图模型

从上文可知，由多个系统组成的武器装备体系可以用有向图的形式来进行刻画。其中图的顶点代表体系中的系统，边代表系统之间的信息交互，边的权值由系统之间的信息交互强度确定，顶点权值由系统个体价值确定。

2.2.2 拓扑势概念

笔者利用节点拓扑势^[9]的概念，描述武器装备的体系网络拓扑结构中的某个系统受自身和近邻系统共同影响所具有的势值。在体系的网络拓扑结构中，利用拓扑距离计算系统通过网络拓扑传递所产

生的势。

给定武器装备体系的网络拓扑 $G=(S,E)$ 。其中： $S=(s_1, \dots, s_n)$ 为关于系统的非空有限集； $E \in S \times S$ 为系统偶对或边的集合， $|E|=m$ 。根据数据场的势函数定义，任意系统 $s_i \in S$ 的拓扑势可表示为：

$$\varphi(s_i) = \sum_{j=1}^n \left(m_j \cdot e^{-\left(\frac{d_{ij}}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (5)$$

其中： d_{ij} 为系统 s_i 与 s_j 间的网络拓扑距离；影响因子 σ 用于控制每个系统的影响范围； $m_i \geq 0$ 为系统 $s_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的质量，可以用来描述每个系统的固有属性。

2.2.3 系统网络价值计算方法

笔者提出了一种基于改进拓扑势的系统网络价值分析方法来计算体系中各系统的网络价值，在式(1)基础上，考虑作用系统双方质量属性，即

$$\varphi(s_i) = \sum_{j=1}^n \left(m_i \cdot m_j \cdot e^{-\left(\frac{d_{ij}}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (6)$$

在进行系统价值分析过程中，由计算体系网络拓扑势的公式可知：系统质量 m_i, m_j 表示系统个体价值 $\text{value}_{\text{self } i}, \text{value}_{\text{self } j}$ ； d_{ij} 表示系统间加权最短路径； $\varphi(v_i)$ 即为系统的网络价值。由此得出系统网络价值的计算公式：

$$\text{value}_{\text{net } i} = \sum_{j=1}^n \left(\text{value}_{\text{self } i} \cdot \text{value}_{\text{self } j} \cdot e^{-\left(\frac{d_{ij}}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (7)$$

系统网络价值计算算法步骤：

- 1) 计算系统节点的个体价值；
- 2) 计算任意两系统节点间的最短路径长；
- 3) 将 1)和 2)得到的系统个体价值及系统间最短路径长，代入式(7)，即得到系统的网络价值。

笔者采用 Disjkstra 方法计算体系中任意两系统间最短路径。由于体系有向图边的权值是表示两系统间的信息交互强度，所以求两系统间的最短路问题就是求两系统间所有路中边权值乘积最大的一条边，即要使两系统节点通过各条路计算得到的信息交互强度乘积最大。在运用 Disjkstra 方法之前，需对体系有向图的网络边权值进行变换。

$$\omega_{ij}' = -\lg \omega_{ij} \quad (8)$$

对原边权值 ω_{ij} 序列求积转变为对新权值 ω_{ij}' 序

列求和，满足 Disjkstra 方法求最短路算法的要求，计算出的结果再经过逆变换 $\omega_{ij} = -e^{\omega_{ij}'}$ ，得到系统间信息交互强度的最大值。

2.3 基于网络簇系数的系统价值综合方法

对于武器装备体系的网络拓扑结构来说，体系的簇系数^[10]可以表示为，各系统节点直接相邻的系统节点间实际存在的边数目占最大可能存在边数的比例，计算公式为

$$C_i = \frac{2l_i}{k_i(k_i-1)} \quad (9)$$

式中： l_i 为系统节点 i 的邻接系统节点之间存在的边数； k_i 为系统节点 i 的度。

体系网络的簇系数用所有系统节点簇系数的算术平均值表示：

$$\tilde{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (10)$$

笔者采用对系统个体价值和系统网络价值进行加权求和的方法来求得最终系统价值：

$$\text{Value} = (\text{Value}_{\text{self}}, \text{Value}_{\text{net}}) \boldsymbol{\omega}^T \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_{\text{self}}, \omega_{\text{net}})$$

其中： $\boldsymbol{\omega} = (\omega_{\text{self}}, \omega_{\text{net}})$ 为系统价值权重系数， $\omega_{\text{self}}, \omega_{\text{net}}$ 分别反映系统个体价值和系统网络价值在系统综合价值中的比重， $\omega_{\text{self}} + \omega_{\text{net}} = 1$ ；极端情况当 $\omega_{\text{self}} = 1$ ， $\omega_{\text{net}} = 0$ 时，系统价值排序是按个体价值排序，相反，当 $\omega_{\text{self}} = 0$ ， $\omega_{\text{net}} = 1$ 时，系统价值排序是按网络价值排序。针对不同武器装备体系的特点和具体作战应用背景， $\boldsymbol{\omega}$ 取不同值。

当武器装备体系的集成度越高，即体系构成网络的簇系数越大时，系统的个体价值就表现得更加重要。例如，当体系网络为全连接图时，任何一个系统的不稳定对整个体系的网络拓扑结构影响都不大，此时系统的网络价值对综合价值的贡献就少；相反，网络簇系数越小，则在计算系统价值时，网络价值分量就会占主导地位。可以将网络簇系数作为系统价值中个体价值的权重值，从而得到系统价值权重系数向量：

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_{\text{self}}, \omega_{\text{net}}) = (\tilde{C}, 1 - \tilde{C}) \quad (12)$$

基于网络簇系数的系统价值综合算法步骤：

- 1) 利用式(9)循环计算各系统节点的簇系数；
- 2) 利用式(10)计算体系的网络簇系数；

- 3) 利用式(12)计算系统价值权重系数向量;
- 4) 利用式(11)计算系统的综合价值。

3 案例分析

3.1 案例描述

假设我方对敌目标精确打击体系由 20 类武器系统组成(其中各系统属性清楚), 体系的网络拓扑结构如图 3 所示, 网络中边的权值表示系统间的信息交互强度, 取值范围为[0, 1], 用来衡量数据交换量的大小和交换的频率。我方拟选出重要性较高的系统进行重点建设, 在此, 采用笔者提出的方法计算各系统的综合价值。

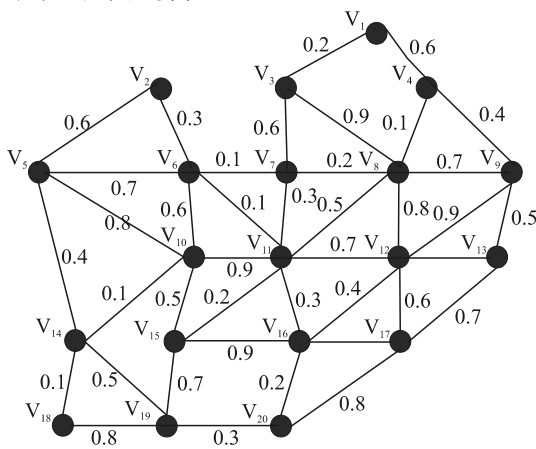


图 3 精确打击体系网拓扑结构

3.2 案例计算

通过系统个体价值模糊综合评价模型计算得出各系统的个体价值如表 1 所示。

表 1 系统个体价值

序号	个体价值	序号	个体价值	序号	个体价值	序号	个体价值
1	0.534 5	6	0.530 6	11	0.412 3	16	0.453 6
2	0.468 8	7	0.534 9	12	0.499 5	17	0.830 1
3	0.711 5	8	0.288 1	13	0.605 9	18	0.530 4
4	0.591 7	9	0.678 6	14	0.546 9	19	0.381 5
5	0.533 8	10	0.619 3	15	0.403 1	20	0.728 9

通过基于改进拓扑势的系统网络价值分析方法计算得到系统网络价值如表 2 所示。

表 2 系统网络价值

节点序号	网络价值	节点序号	网络价值	节点序号	网络价值	节点序号	网络价值
1	0.117 0	6	0.451 5	11	0.527 4	16	0.352 5
2	0.253 0	7	0.160 3	12	0.871 7	17	0.206 6
3	0.650 2	8	0.738 2	13	0.250 5	18	0.276 9
4	0.196 6	9	0.835 2	14	0.167 5	19	0.351 7
5	0.706 4	10	0.590 0	15	0.373 8	20	0.202 9

计算图 3 所示精确打击体系网络的簇系数为:

$$\bar{C} = 0.332。$$

进而得到系统价值分量的权重系数向量为:

$$\omega = (\omega_{\text{self}}, \omega_{\text{net}}) = (\bar{C}, 1 - \bar{C}) = (0.332, 0.668)。$$

综合表 1、表 2 数据, 得到系统综合价值如表 3 所示。

表 3 系统综合价值

序号	综合价值	序号	综合价值	序号	综合价值	序号	综合价值
1	0.255 6	6	0.477 8	11	0.489 2	16	0.386 1
2	0.324 6	7	0.284 7	12	0.748 1	17	0.413 6
3	0.670 6	8	0.588 8	13	0.368 5	18	0.361 1
4	0.327 8	9	0.783 2	14	0.293 5	19	0.361 6
5	0.649 1	10	0.599 7	15	0.383 5	20	0.377 5

依据各系统综合价值, 得到该精确打击体系各系统综合价值的排序为: 9、12、3、5、8、11、6、17、16、15、20、13、19、18、4、14、7、1。

3.3 结果分析

依据公式计算得到的数据, 笔者绘制系统个体价值、网络价值和综合价值的对比如图 4 所示。

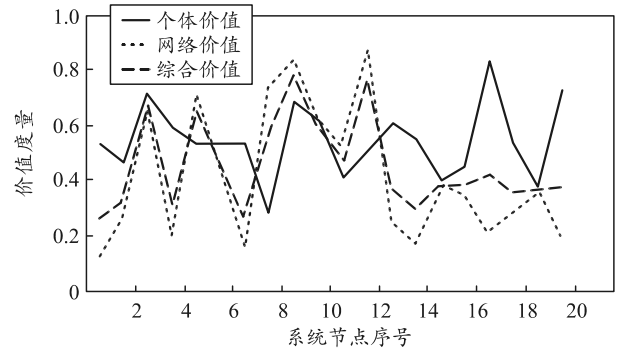


图 4 系统价值的 3 种价值比较

分析图 4 可以发现, 系统综合价值显著地平衡了个体价值和网络价值分量。几个典型系统如系统 17 和系统 20, 虽然个体价值最高, 但由于其网络价值很小, 使其最终价值较低。系统 8 虽然个体价值较低, 但其较高的网络价值弥补了个体本身的不足。

绘制系统综合价值与个体价值、网络价值的差值对比如图 5 所示。

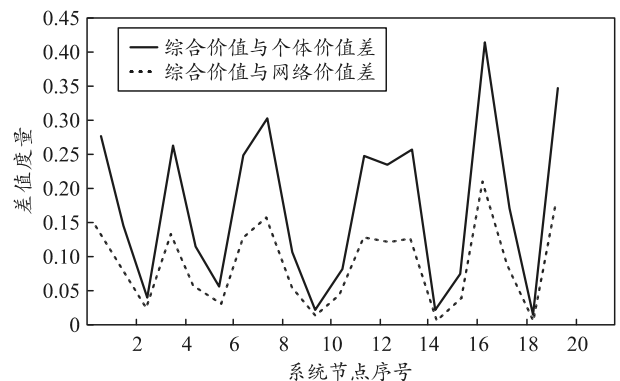


图 5 系统综合价值与个体价值、网络价值差值对比

[13] 梁建刚, 刘晓平, 王刚, 等. 基于改进蚁群算法的自动导引运输车全局路径规划方法研究[J]. 机电工程, 2018, 35(4): 431-436.

[14] GE B, SHENG H. Ant colony optimization based on combined optimization for path planning[C].

International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science, Paris: Atlantis Press, 2015.

[15] 秦东各, 王长坤. 一种基于 2-opt 算法的混合型蚁群算法[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(1): 98-100.

(上接第 4 页)

分析图 5 可以发现, 系统综合价值更加偏向于网络价值。这是因为案例中体系网络的簇系数为 0.332, 当簇系数较小时, 体系的网络拓扑结构容易因某些关键系统的故障发生重大变化, 此时系统的网络价值对系统综合价值的贡献更大。

总的来说, 系统最终价值是受其个体价值和网络价值综合影响的。传统体系中系统价值分析方法较少分析系统的网络价值, 存在局限性, 而笔者提出的面向武器装备体系的系统价值分析方法, 从武器装备体系出发, 既考虑了系统的个体性价值, 又考虑了网络价值, 分别对系统的个体价值和网络价值进行了定量分析, 得出系统最终价值的定量描述。这种方法具有可行性, 在一定程度上也符合具体的作战情况和背景。

4 结束语

笔者提出的面向武器装备体系的系统价值分析方法, 在一定程度上突破了传统的系统价值分析方法中忽视网络价值的局限性, 进一步贴近实际作战情况。通过案例分析表明了该方法的可行性, 为解决武器装备体系建设过程中系统价值的分析问题提供一种途径。影响体系中系统价值的因素还有很多,

笔者只是讨论了其中一部分, 还有待更深入的研究。

参考文献:

[1] 姜静波, 黄建新, 樊惠军, 等. 适应未来联合作战装备发展要求大力加强武器装备体系研究[C]. 北京: 全军武器装备体系研究第一届学术研讨会, 2006.

[2] 赵华, 陈英武. 基于自然连通度的武器装备体系生存能力评估方法[C]. 江苏: 中国系统工程学会决策科学专业委员会第八届学术年会, 2009.

[3] 赵华. 基于体系结构产品的阻击式防空体系作战能力评估方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009: 17-28.

[4] 周永生. 战役战术导弹目标价值排序的模糊综合评判法[J]. 战术导弹技术, 2006(4): 36-39.

[5] 刘刚, 马多胜, 张东升. 战场目标价值评判的神经网络方法[J]. 兵工自动化, 2007, 26(11): 11-12, 15.

[6] 李桥兴. 多属性决策中指标权重确定的理论与应用[D]. 南宁: 广西大学, 2004.

[7] 胡良明, 徐诚, 李峰. 基于模糊综合评判的战场目标价值研究[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(2): 55-57.

[8] 王应明. 运用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J]. 系统工程与电子技术, 1998(7): 36-38.

[9] 涂文燕, 赫南, 李德毅, 等. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241-2254.

[10] 郭天柱. 复杂网络中心性及其对灾害传播影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.