

4-16-2020

Cost-Efficiency Analysis of Weapon System Portfolios for Effect Based Operation

Zhong Lin

1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China;;

Mingan Tong

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;;

Zhang Jian

1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China;;

Jianhai Liang

1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cost-Efficiency Analysis of Weapon System Portfolios for Effect Based Operation

Abstract

Abstract: In consideration of the cost-efficiency analysis of weapon system mainly for the target based operation, the uncertainties about preferences and possible interactions of different weapon systems, *a cost-efficiency analysis method weapon system portfolios for effect based operation is presented.* The framework of weapon system assignment for effect based operation is presented, the Bayesian network is used to build up the connection between effects and targets, and the cost-efficiency analysis model based on robust portfolio optimization is carried out. In view of the combinatorial explosion, *the approximation algorithm based on the Tchebycheff norm and the linear integer programming is proposed.* The simulation results show the method is effective.

Keywords

effect based operation, cost-efficiency analysis, weapon system, robust portfolio

Recommended Citation

Zhong Lin, Tong Mingan, Zhang Jian, Liang Jianhai. Cost-Efficiency Analysis of Weapon System Portfolios for Effect Based Operation[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 718-726.

基于效果作战的武器系统组合效费分析

钟麟¹, 佟明安², 张健¹, 梁建海¹

(1. 西京学院理学院, 陕西 西安 710123; 2. 西北工业大学电子信息学院 陕西 西安 710072)

摘要: 武器系统效费分析多用于基于靶基研究中, 同时没有考虑到武器系统之间的相互影响以及偏好不确定性情况。提出了一种基于效果作战的武器系统组合效费分析方法。基于效果作战的武器系统分配框架结构, 运用贝叶斯网络建立目标与效果的联系, 利用鲁棒投资组合模型对武器系统组合效费进行建模。针对鲁棒投资组合问题计算量大的问题, 提出了一种基于切比雪夫范数和线性整数规划近似算法。仿真结果说明了所提出的方法的有效性。

关键词: 基于效果作战; 费效分析; 武器系统; 鲁棒投资组合

中图分类号: O122 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 04-0718-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0379

Cost-Efficiency Analysis of Weapon System Portfolios for Effect Based Operation

Zhong Lin¹, Tong Mingan², Zhang Jian¹, Liang Jianhai¹

(1. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In consideration of the cost-efficiency analysis of weapon system mainly for the target based operation, the uncertainties about preferences and possible interactions of different weapon systems, a cost-efficiency analysis method weapon system portfolios for effect based operation is presented. The framework of weapon system assignment for effect based operation is presented, the Bayesian network is used to build up the connection between effects and targets, and the cost-efficiency analysis model based on robust portfolio optimization is carried out. In view of the combinatorial explosion, the approximation algorithm based on the Tchebycheff norm and the linear integer programming is proposed. The simulation results show the method is effective.

Keywords: effect based operation; cost-efficiency analysis; weapon system; robust portfolio

引言

美国的联合作战司令部把基于效果作战定义为: 在战略、战役和战术层次, 以协调、增效和累积的方式使用全部军事和非军事能力, 获得所期望的战略结果, 或对敌人造成所期望“效果”的

过程^[1]。效果不仅指直接冲击产生的结果, 即摧毁目标, 还指由直接影响所引发的一系列连续的事件或间接的影响。目前在世界各国的军事研究领域, 基于效果作战都是研究的热点之一。但是目前基于效果作战研究大多集中在用状态空间方程^[2]、Petri 网络^[3]、贝叶斯网^[4]等工具进行建模上, 在效费分析方面研究较少。目前效费分析多数集中在基于靶基研究中^[6-10], 多数只涉及单一武器系统的研究^[6-9], 并且没有考虑到武器系统之间的相互影响情况。针对这些问题, 本文提出了基于效果的武器系统分配框架, 在此基础上提



收稿日期: 2018-06-20 修回日期: 2018-10-25;
基金项目: 国家自然科学基金(61371163);
作者简介: 钟麟(1975-), 男, 江西宜春, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统建模等; 佟明安(1936-), 辽宁男, 教授, 研究方向为航空火力控制等; 张健(1964-), 陕西西安, 男, 硕士, 副教授, 研究方向为航路规划等。

<http://www.china-simulation.com>

出基于效果作战系统组合费效分析模型。

1 基于效果的武器系统分配问题

基于效果的作战方式是以使敌方系统失能的效果为标准, 根据武器数量选择若干个产生效果最大的目标进行攻击, 可能仅需摧毁起关键作用的少数目标就能达成使系统失能的效果。基于效果的系统分配问题是以基于效果作战思想为立足点, 以提升作战效能, 缩短作战时间, 减少敌我双方人员和物质损耗为目标, 在一定费用标准下, 将武器系统合理地分配给目标, 使武器系统组合效能最大化, 以达到预期的效果。

基于效果的武器系统分配问题其实就是系统组合问题, 它有 5 个要素, 分别是费用、武器系统、目标、效果以及效果指标。在一定的费用标准下, 将各武器系统分配给各目标, 保证任务得以完成。武器系统攻击目标造成目标状态发生变化, 会产生各种效果, 目标与效果之间的关系由贝叶斯网进行建模, 效果由效果指标进行评估。根据各评估效果的指标, 可以评估武器系统分配方案的优劣。系统分配问题的示意图见图 1。图 1 描述了在费用 C 标准下, 从 m 个武器系统中选择若干个系统, 分配给 k 个目标, 产生了 l 个效果, 用 n 个效果指标来评估的情形。武器系统 2 分配给目标 1, 武器系统 2 攻目标 1 后造成目标 1 损伤, 损伤的后果会产生效果 1、2 和 3, 武器系统 1 分配给目标 2, 产生了效果 1、3 和 4, 武器系统 4 分配给目标 3, 武器系统 3 未分配。效果指标 1, 2, 3 分别用于评估效果 1, 2, 3, 指标 4 和 5 用于评估效果 4。在本文中, 武器系统分配的目的在于最大化效果的评估指标, 同时最小化总费用。由于作战效能提高通常也会导致费用的增加, 因此可能不能获得唯一的武器系统组合。求解办法就是寻找成本效率的武器系统组合, 再根据指挥员(决策者)的偏好以及决策准则, 获得指挥员所需最优武器系统组合。

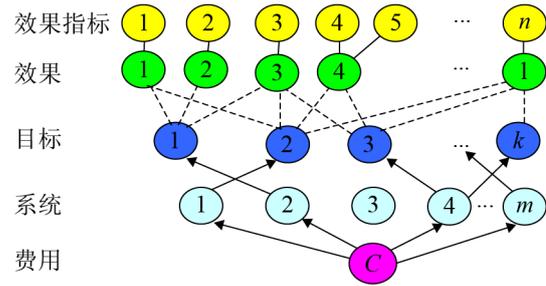


图 1 基于效果的武器系统分配模型示意图

Fig. 1 Weapon system distribution model for effect based operation

2 武器系统组合费效分析

假设有 m 个武器系统, n 个效果评估指标, 则系统组合可以表示为一矩阵 $\mathbf{p} \in \{0,1\}^{m \times n} \in P_F$, 其中矩阵元素 $p_{ij}=1$ 表示武器系统 i 被分配对效果指标 j 有影响, 否则用 $p_{ij}=0$ 表示。 c_{ij} 表示分配武器系统 i 对效果评估指标 j 有影响的费用, v_{ij} 表示使用武器系统 i 相对效果 j 的性能指标, P_F 表示可行组合集合。假设各评估效果的总指标可以近似用可加值函数表示, 则它数学形式为:

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = \sum_{j=1}^n w_j \sum_{i=1}^m p_{ij} v_{ij} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v} \in [0,1]^{m \times n}$ 为效果性能指标矩阵; \mathbf{w} 为权重向量, 其中 $w_j \in S_w = \{w_j \in R_+^n \mid \sum w_j = 1\}$ 为权重, 它表示第 j 个评估效果的重要程度。系统组合的总费用可以用下面的公式计算:

$$C(\mathbf{p}, \mathbf{c}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij} c_{ij} \quad (2)$$

式中: \mathbf{c} 为武器系统的价格向量。

权重 S_w 的评估信息可以由多个专家提供, 性能指标 \mathbf{v} 的评估信息可由仿真数据获得或者专家提供^[3]。与目前使用的费效分析方法不同, 从专家获得的权重很可能不是权重的点估计, 而是一个可行权重集合。对于可行权重集合的处理方法有很多, 比如 RICH 法^[12]。根据该方法, 权重集合用下面的形式表示:

$$S_w = \{w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n, w_j \geq 0, \sum w_j = 1\} \quad (3)$$

定义 1 如果对于所有可行权重, 组合 \mathbf{p}^1 的效

果总指标优于或者等于组合 p^2 的效果总指标, 且至少有一个权重使组合 p^1 的总指标优于组合 p^2 , 则称组合 p^1 支配组合 p^2 , 记为 $p^1 \succ p^2$ 。

数学形式为:

$$p^1 \succ p^2 \Leftrightarrow \begin{cases} V(p^1, v, w) \geq V(p^2, v, w), \forall w \in S_w \\ V(p^1, v, w) > V(p^2, v, w), \exists w \in S_w \end{cases} \quad (4)$$

根据 RICH 法, 仅在权重的极值点比较就可以判断两个组合的支配情况, 详细情况见文献[12]。

定义 2 如果在相同或者更低总费用条件下, 对于所有可行权重来说, 没有其它可行组合的总指标优于 p^1 , 则可认为组合 p^1 是成本效率(cost-efficient)的, 数学的形式为 $[V(p, v, w), -C(p, c)] \geq [V(p^1, v, w), -C(p^1, c)], \forall p \in P_F, \forall w \in S_w$ 。

成本效率集合用 P_{CE} 表示, 而 $P_{CE} \subset P_F$ 。组合满足成本效率的条件较为苛刻, 因此引入核心指数的概念。

定义 3 核心指数 CI 定义为在 (v, S_w) 中对支持组合 p 为成本效率的个数与总数比值, 它的计算公式如下:

$$CI(p) = \frac{\| (v, S_w) \text{ st } p \in P_{CE}(v, S_w) \|}{\| (v, S_w) \|} \quad (5)$$

如果 $CI(p)=1$, 则 p 称为核心组合; 如果 $0 < CI(p) < 1$, 则 p 称为边缘组合, 如果 $CI(p)=0$, 则 p 称为外部组合。

3 目标-效果评估模型

与靶基武器系统效费模型相比, 基于效果的武器系统组合效费模型中的评估指标并不是针对目标的状况, 而是针对武器分配结果所产生效果。评估指标与目标之间联系是通过效果实现的, 因此建立目标与效果模型对于计算评估指标非常重要。在基于效果的作战模型中, 摧毁或杀伤不同目标会产生不同的效果。比如摧毁了一个城市系统的发电厂, 对自来水供给系统、政府系统、指挥系统的功能影响较大, 而摧毁自来水厂对政府系统、指挥系统、防空系统的功能影响较小。

从目前的研究情况看, 并还没有一种统一的目

标-效果评估模型构造步骤。本文在文献[3]基础上, 依据基于效果作战的特点, 总结出目标与效果评估模型构造步骤。构造示意图见图 2, 具体步骤如下: (1) 确定顶层目标(Higher Level Objective); (2) 依据顶层目标确定效果集合, 根据顶层目标确定系统信息; (3) 对系统进行建模, 将其分解为各子系统, 然后将子系统分解为各元素; (4) 确定子系统所产生的预期效果和非预期效果; (5) 建立每一效果与某些元素的联系, 即某些元素的状态会影响效果, 这些元素称为指示元素, 将效果与指示元素相对应; (6) 建立每一效果与某些目标的联系, 即某些目标的状态变化会产生一些效果, 将其与效果相对应; (7) 据各效果、指示元素建立各评估指标, 从而建立目标-效果评估模型。

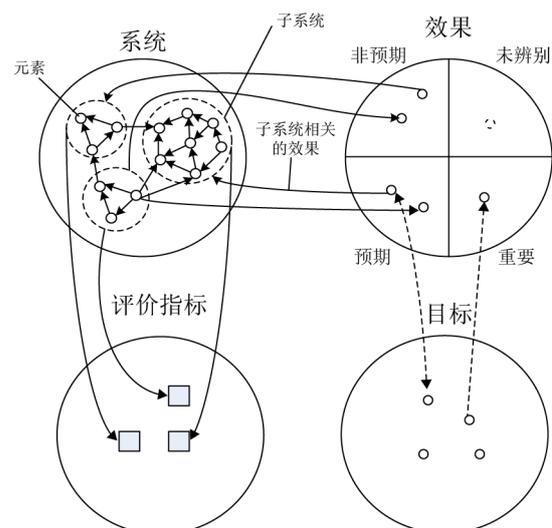


图 2 目标与效果关系示意图
Fig. 2 Relation between targets and effects

本文构建目标-效果模型使用贝叶斯网作为工具, 具体构建步骤如下: (1) 确定各目标和效果, 它们的状态变量分别用机会结点表示; (2) 确定贝叶斯网的拓扑结构, 拓扑结构就是变量之间的关系, 具体方法可见文献[3]; (3) 根据专家知识和背景知识可以画出多个原始贝叶斯网, 再依据打分法从多个贝叶斯网中选择一个最适合的结构, 打分法详见文献[13]; (4) 如果从仿真数据学习中发现结点之间关系存在明显地缺适性, 则将额外的弧加入

到结点之间, 改进原始贝叶斯网; (5) 确定机会结点的概率表。

贝叶斯网概率估计基于观察到的频率, 也就是观测到变量在各取值的次数。在贝叶斯网中, 每一变量 x_i 都有一个条件概率表。如果条件概率表提供每一结点的父结点 Φ_i 各取值的条件概率为 $P(x_i | \Phi_i = l_\Phi)$, 则条件概率 $\theta_i = P(x_i = l | \Phi_i = l_\Phi)$ 的估计值为:

$$\hat{\theta}_i = N_l / N_\Phi \quad (6)$$

式中: N_l 为观测到仿真中 $x_i=l$ 且 $\Phi_i=l_\Phi$ 次数; N_Φ 为观测到仿真中 $\Phi_i=l_\Phi$ 的次数。

建立了目标-效果模型后, 依靠贝叶斯网, 能根据目标状态的变化获得效果的变化, 从而获得效果评估指标值, 用于评估武器系统组合分配的优劣。

4 鲁棒投资组合近似求解算法

在基于效果的武器系统组合效费模型中, 由于仅能提供偏好的不完全信息, 因此多数情况下不存在唯一的最优武器组合, 通常采用支配的概念从可行组合集合中获得非支配组合。随着的目标数目的增加, 可行组合的数量急剧增加。为了解决这个问题, 本文提出了一种基于切比雪夫(Tchebycheff)范数和线性整数规划近似算法。

近似算法基于多目标规划和切比雪夫范数, 核心是构建理想向量 V^* 。理想向量的维数等于权重空间极值点的数目, 且理想向量中每一分量都大于在权重极值点 w^1, w^2, \dots, w^t 上的最大投资组合总指标, 即:

$$V_i^* > \max_{p \in P_T} \{V(p, w^i, \bar{v})\}, i=1, 2, \dots, t \quad (7)$$

式中: \bar{v} 为上界指标矩阵。近似算法的思想是通过最小化投资组合与理想向量的距离, 搜寻非支配投资组合。该距离基于投资组合指标在 t 维权重极值点上的加权切比雪夫范数, 即:

$$d(p, V^*) = \max_{i=1, \dots, t} \{\lambda_i (V_i^* - V(p, w^i, v))\} \quad (8)$$

式中: $\lambda \in \Lambda = \left\{ \lambda \in \mathfrak{R}^t \mid \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^t \lambda_i = 1 \right\}$ 为切比雪夫

范数在 t 维空间的系数。指标定义如下: 假设选择一个可行组合子集 $X^u \subseteq P$, 设置所有 $p^j \in X^u$ 的指标为 $v^j = \bar{v}^j$, 而 $p^j \notin X^u$ 有 $v^j = \underline{v}^j$ 。采用近似算法, 获得投资组合集用 P_T 表示, 它的数学形式为:

$$P_T(\lambda, v) = \arg \min_{p \in P_T} \max_{i=1, \dots, t} \{\lambda_i (V_i^* - V(p, w^i, v))\} \quad (9)$$

现在需要证明 P_T 存在非支配投资组合, 且任一非支配投资组合能找到对应的 X^u 和 λ 。

定理 1 假定信息集 $S = S_w \times S_v$ 相应的非支配集合为 $P_N(S)$ 。而理想向量为 $V^* = [V_1^*, V_2^*, \dots, V_t^*]$, 则有:
(i) 对于任一 $\lambda \in \Lambda$ 和 $v \in S_v$, 有 $P_N(S) \cap P_T(\lambda, v) \neq \emptyset$;
(ii) 如果 $p \in P_N(S)$, 则存在 $\lambda \in \Lambda$ 和 $v \in S_v$, 使 $p \in P_T(\lambda, v)$ 。

证明: (i) 假设 $\lambda \in \Lambda$, $v \in S_v$, $p \in P_T(\lambda, v)$ 且 $p \notin P_N(S)$ 。则存在 $p' \in P_N$, 它满足 $p' \succ p$, 即有
 $V(p', w, v) \geq V(p, w, v) \forall (w^k, v) \in S$
 $\Leftrightarrow V_k^* - V(p', w^k, v) \leq V_k^* - V(p, w^k, v) \forall k = 1, \dots, t$
 $\Leftrightarrow \lambda_k (V_k^* - V(p', w^k, v)) \leq \lambda_k (V_k^* - V(p, w^k, v))$
 $\Leftrightarrow \max_k \lambda_k (V_k^* - V(p', w^k, v)) \leq \max_k \lambda_k (V_k^* - V(p, w^k, v))$
因此 $p' \in P_T(\lambda, v)$, 则 $P_N(S) \cap P_T(\lambda, v) \neq \emptyset$ 。
故定理(i)成立。

(ii) 反证法。假设存在 $p \in P_N(S)$, 而 $p \notin P_T(\lambda, v) \forall \lambda \in \Lambda$ 和 $v \in S_v$ 。设定 $\hat{v} = \begin{cases} \bar{v}^j, p^j \in X^u \\ \underline{v}^j, p^j \notin X^u \end{cases}$ 和 $\hat{\lambda}_k = \beta / [V_k^* - V(p, w^k, \hat{v})]$, 这里 p^i 为组合问题第 i 个方案, 所有方案集合为 P , β 为比例因子, 且有 $\sum_{k=1}^t \hat{\lambda}_k = 1$ 。因为 $p \notin P_T(\hat{\lambda}, \hat{v})$, 则存在 $p' \in P_T$, 使 $\max_k \hat{\lambda}_k (V_k^* - V(p', w^k, \hat{v})) < \max_k \hat{\lambda}_k (V_k^* - V(p, w^k, \hat{v})) = \max_k \frac{\beta (V_k^* - V(p, w^k, \hat{v}))}{(V_k^* - V(p, w^k, \hat{v}))} = \beta$
因此, 对于所有 $\hat{\lambda}_k (k=1, 2, \dots, t)$ 有 $\hat{\lambda}_k (V_k^* - V(p', w^k, \hat{v})) < \beta$, 这说明: $\beta / [V_k^* - V(p, w^k, \hat{v})] (V_k^* - V(p', w^k, \hat{v})) < \beta, V(p', w^k, \hat{v}) > V(p, w^k, \hat{v}), V(p' \setminus p, w^k, \underline{v}) > V(p' \setminus p, w^k, \bar{v})$ 。

因此, $p \in P_F, p' \in P_F, p' \succ p$, 这与支配定义矛盾, 故定理 1(ii)成立。证毕。

基于切比雪夫范数的近似算法如下:

(1) 根据公式(7)确定理想向量 V^* , $\{0\} \rightarrow P_T$;

(2) 随机选取 $\lambda_i \sim \exp(1)$, $i=1, 2, \dots, t$, 并将 $\lambda_i / \sum_{i=1}^t \lambda_i \rightarrow \lambda$;

(3) 随机选取子集 $X^u \subseteq P$, 设置如果 $p^j \in X^u$, 则 $v^j = \bar{v}^j$, 如果 $p^j \notin X^u$, 则 $v^j = \underline{v}^j$;

(4) 求解线性整数规划问题:

$$\begin{aligned} & \min_{p, \Delta \in R} \Delta \\ & \text{s.t. } \Delta + \lambda_i V(p, w^i, v) \geq \lambda_i V_i^*, \forall i = 1, 2, \dots, t \\ & C(p, c) \leq B, A(p) \leq D \end{aligned}$$

求解出问题的最优解 p , $\{p\} \cup P_T \rightarrow P_T$ 。第 2 个约束条件在本文所提出的模型中描述的是费用和武器系统分配受限的情况;

(5) 计算各组合的核心指数;

(6) 重复 2)~5)M 次, 直到获得足够多的非支配组合。

5 仿真

假设红蓝双方在某区域内进行攻防作战, 红方攻击蓝方的设施, 这就武器分配问题。蓝方设施包括 12 种设施: 火电站(Power Plant, 2 个), 变电所(Electrical Substation, 2 个), 防空导弹发射阵地(Anti-Air Missile Site, 3 个), 雷达站(Radar Station, 2 个), 燃料补给站(Fuel Depot, 1 个), 指挥中心(Command Center, 1 个), 空管中心(Air Control, 1 个), 通讯中心(Communication System, 1 个), 水塔(Water Tower, 1 个), 跑道(Runway, 1 条), 天然气管道(Natural Gas Pipeline, 1 条), 政府大楼(Civilian Leadership Building, 1 栋), 示意图见图 3。根据基于效果作战模型的构造步骤^[3], 构建蓝方基于效果作战的系统。该系统可以分解成 7 个子系统, 分别是指挥子系统(Command System), 电力子系统(Power Grid), 政府子系统(Government Function), 自来水供给系统(Water Supply)、防空子

系统(Air Defense System), 监视子系统(Surveillance System)和空军基地子系统(Air Base), 具体步骤见文献[13]。假设红方有 4 种可供选择武器系统, 同时一种武器系统完成一项任务, 即攻击一个目标。任务的完成通过 17 个敌方目标损伤程度进行评估, 每个目标的损伤程度有 4 级: 1-目标没有损伤; 2-目标轻微损伤; 3-目标中度损伤; 4-目标被摧毁, 每个目标损伤程度由 10 位专家提供, 见图 4。图中描述的是各武器系统对各目标杀伤情况, 各损伤级别的概率通过 $p_i = n_i / N$ ($i=1, 2, 3, 4$) 计算, 其中 N 为专家的总人数, n_i 为认为处于该损伤级别的人数。4 种武器系统的单位费用为: 系统 1 为 1.09, 系统 2 为 1.14, 系统 3 为 1.00, 系统 4 为 1.20。

红方选择武器系统组合攻击蓝方的 17 个目标, 产生的效果由 7 个子系统功能受损的程度来评估。根据文献[13]提供的数据, 可以建立了基于贝叶斯网各目标与效果之间的因果关系图, 见图 5。蓝方的 7 个子系统重要程度信息由 19 位专家提供, 具体情况见图 6。根据文献[13]所提出的方法对各目标重要程度进行打分, 从而确定各目标的重要程度, 然后采用 RICH 法计算出各权重的极值点^[12]。由于各专家给出的结果不一致, 根据每一专家给出的偏好信息以及各损伤级别概率, 采用本文提出的近似算法计算核心指数值, 依据成本效率的概念, 获得各系统有效组合。



图 3 蓝方设施示意图

Fig. 3 Blue side's facilities Bayesian network

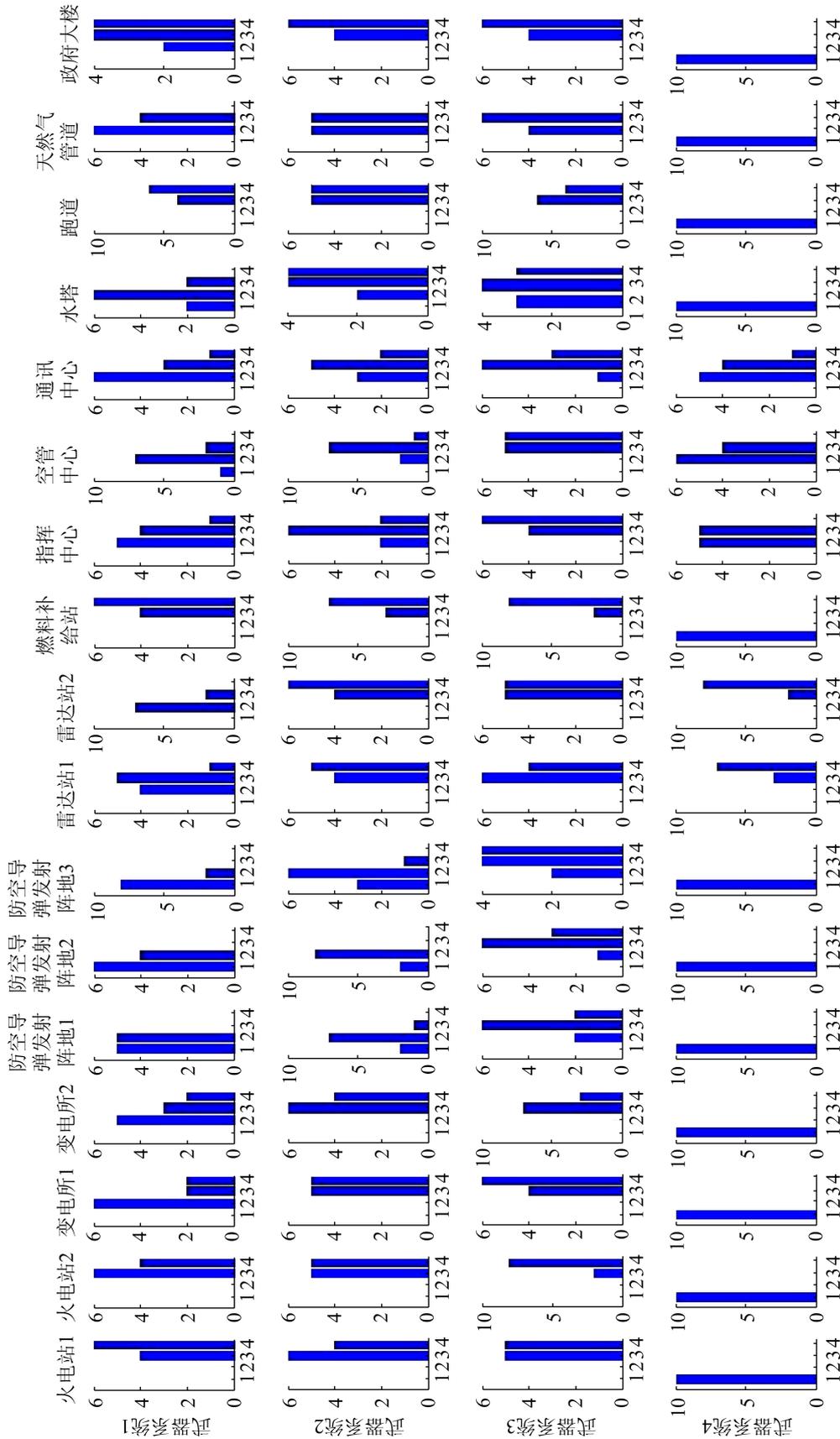


图 4 评判各目标损伤级别的分布
Fig. 4 Distribution of target damage level

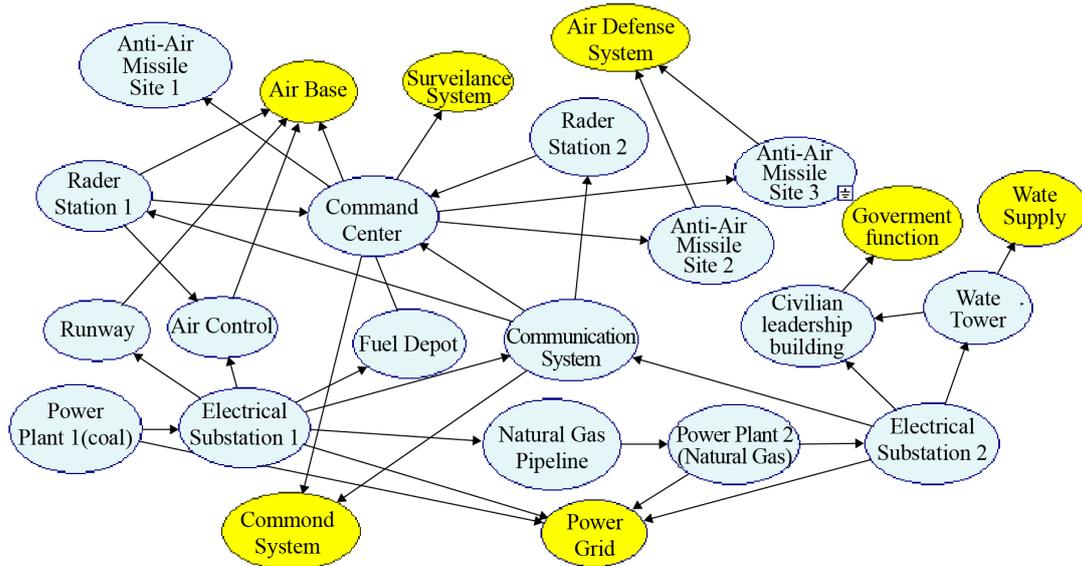


图 5 基于贝叶斯网各目标与效果之间的因果关系图
Fig. 5 Relation between targets and effects

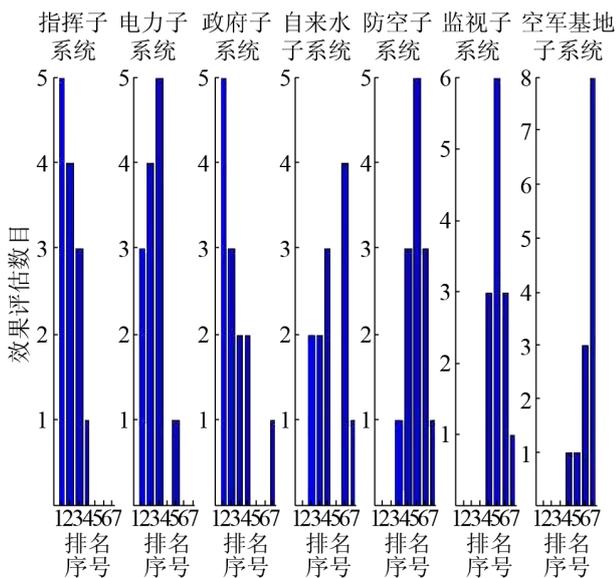


图 6 蓝方各子系统重要程度分布
Fig. 6 Importance distribution of blue side's subsystems

仿真结果见图 7~8、表 1~2。图 7 给出了不同费用标准下，成本效率组合的总效用情况。从图 7 可以看出成本效率组合的总效果随着武器组合费用增加而增加，但是增长速度逐渐减少，总效果存在上界，因此为了获得更高地效果指标，有必要部署不同类型的武器系统或者更多的武器系统数量。表 1 给出了根据指挥员(决策者)不同的偏好获得的最优武器系统组合，成本效率组合按照费用由小到大

大排列的编号。从表 1 中可以看出指挥人员偏好不同，最优武器系统组合可能不同。指挥人员如果不考虑费用，只考虑作战效能，根据乐观准则或中间值准则，选择成本效率集合中第 50 个武器组合(按照费用由小到大的规律进行排列)，则费用达到 5.78，作战效能最高能达到 0.725，选择的是由 3 个武器系统 4、1 个武器系统 3、1 个武器系统 1 组成的组合，分别攻击发电厂 1、发电厂 2、政府大楼、指挥中心和通讯中心。如果依据悲观准则，则认为第 51 个组合最佳，费用达到 5.8，效能最小能达到 5.91。如果指挥员追求最优效费比，依据 3 种决策准则，获得的最优组合各不相同，分别是第 22, 14 和 25 个。图 8 描述了在[4.4, 4.7]费用区间标准下，核心指数(大于 10%条件下)的情况，其中图 8(a)描述了各种武器系统组合的核心指数，图 8(b)描述了各武器系统对各子系统的影响。表 2 给出了近似算法与枚举算法性能比较的结果，两种算法运行在相同的硬件和软件平台，仿真条件次数 1 000 次。从结果可以看出，在相同时间内，近似算法比枚举算法搜索到更多的成本效率组合，同时正确率也很高。如果需要进一步提高正确率，可以对近似算法获得的投资组合用成本效率定义进行检验，剔除非成本效率组合。

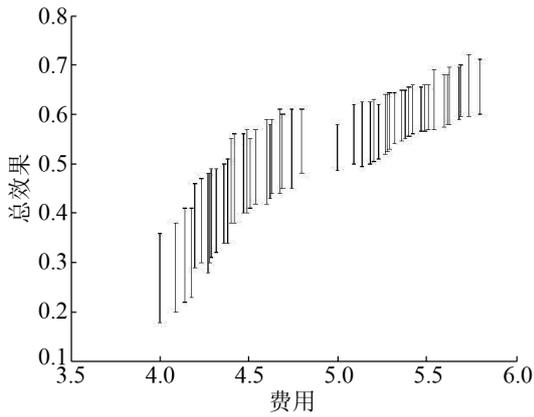
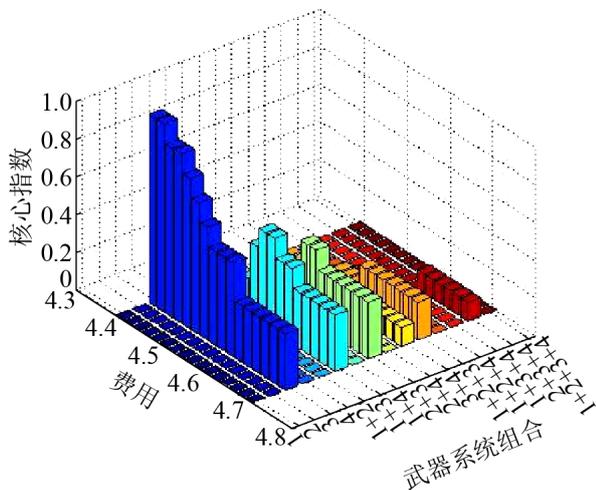
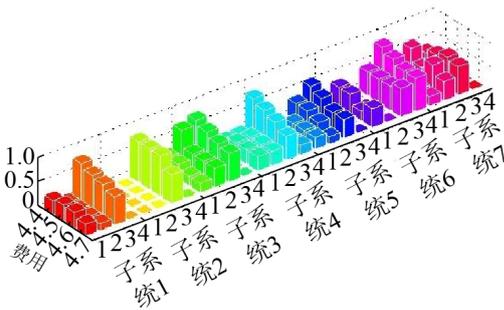


图 7 不同费用标准下成本效率组合
Fig. 7 Cost-efficient portfolios in different expenses standards



(a) 各武器系统组合的核心指数



(b) 武器系统对子系统的影响

图 8 [4.4.4.7]费用标准下核心指数
Fig. 8 Core index in [4.4.4.7]

表 1 偏好下最优组合结果

决策准则	最优效能	最优效费比	最低费用
乐观准则	第 50 个	第 22 个	第 1 个
悲观准则	第 51 个	第 14 个	第 1 个
中间值准则	第 50 个	第 25 个	第 1 个

Tab. 1 Optimal combination results

表 2 近似算法性能(M=1 000)

算法	成本效率组合	内部组合	正确率/%
近似算法	129	108	98.4
枚举算法	73	65	100

6 结论

基于效果作战的费效评估问题经常面临如下一些问题: 首先确定各效果之间的重要程度; 其次是各目标与效果之间建模问题; 最后是求解的高效算法。针对这些挑战, 本文提出了基于效果的武器系统分配框架, 在此基础上提出基于效果作战系统组合费效分析模型。该模型运用贝叶斯网络建立目标与效果的联系, 利用鲁棒投资组合模型对武器系统组合费效进行建模。针对鲁棒投资组合模型求解计算量大的问题, 提出了基于切比雪夫(Tchebycheff)范数和线性整数规划近似算法。较好地解决了以上 3 个问题。今后研究方向是模型涉及费用非确定的情况。

参考文献:

- [1] 范鹏程, 祝利, 高志扬. 美军联合信息作战效果评估及特点[J]. 国防科技, 2016, 37(4): 109-112.
Fan Pengcheng, Zhu Li, Gao Zhiyang. The U.S joint information operation effectiveness assessment and its characteristics[J]. National Defense Science & Technology, 2016, 37(4): 109-112.
- [2] Ngo T, Chen C, Wilson S. ATM network centric operations envisioned in ICAO ASBU and FF-ICE[C]. Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference. Herdon VA, USA: IEEE, 2015: 21-23.
- [3] 钟麟, 房茂燕, 边伟. 基于多目标影响图效果作战模型[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(9): 204-211.
Zhong Lin, Fang Maoyan, Bian Wei. Multi-criteria Influence Diagram for Effect Based Operation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(9): 204-211.
- [4] 张臻, 姜枫, 李彭伟. 基于重心分析的联合作战计划制定方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(3): 38-43.
Zhang Zhen, Jiang Feng, Li Pengwei. Method for Joint Operational Design Based on Gravity Analysis[J]. Command Information System and Technology, 2016, 7(3): 38-43.

- [5] 程呈, 高敏, 程旭德, 等. 基于组合赋权的反坦克导弹武器系统作战效能评估研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(1): 241-251.
Cheng Cheng, Gao Min, Cheng Xude, et al. Research on operational efficiency evaluation of anti-tank missile weapon system based on combination weighting[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2018, 38(1): 242-251.
- [6] 马威, 李梅. 基于关键指标的模糊综合评判法在作战效果评估中的应用[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(4): 12-15.
Ma Wei, Li Mei. A Novel Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Operational Effect Evaluation Based on Key Indices[J]. Ship Electronic Engineering 2018, 38(4): 12-15.
- [7] 段继琨. 基于模糊评判的舰载电子战系统作战效能评估[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(6): 1076-1080.
Duan Jikun. Operational Effectiveness Evaluation of Shipboard Electronic Warfare System Based on Fuzzy Evaluation[J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(6): 1076-1080.
- [8] Suseno P, Sasongko R A. Development of air combat effectiveness simulation and analysis scheme for beyond visual range (BVR) case[J]. Applied Mechanics & Materials (S1660-9336), 2016, 842: 329-336.
- [9] Ruan C W, Liu H Q, Yang H Y. Task assignment under constraint of timing sequential for cooperative air combat[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics (S1004-4132), 2016, 27(4): 836-844.
- [10] 何府强, 王焱. 动态规划在测控装备效费分析中的应用[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(12): 138-144.
He Fuqiang, Wang Yao. Application of dynamic programming in the cost effectiveness analysis of measurement and control equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(12): 138-144.
- [11] O'Brien C L, Sanguino S M, Thomas J X, et al. Feasibility and outcomes of implementing a portfolio assessment system alongside a traditional grading system[J]. Journal of the Association of American Medical Colleges (S1067-5027), 2016, 91(11): 1554-1560.
- [12] 钟麟, 倪世宏, 钟卫. 不确定环境下战斗机采购效能评估模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 194-198.
Zhong Lin, Ni Shihong, Zhong Wei. Procurement effectiveness evaluation model for combat aircraft under uncertainty[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(1): 194-198.
- [13] 杨啸天. 不确定环境下编队协同空战智能决策研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2013: 42-65.
Yang Xiaotian. The research for intelligent decision of team cooperative air combat under uncertainty[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2013: 42-65.