

军事攻防中的多属性资源分配对策模型*

张骁雄^{1,2}, 葛冰峰¹, 谭跃进¹

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 第六十三研究所, 江苏 南京 210007)

摘要:针对资源受限情形下的两阶段攻防资源分配问题,提出一种基于多属性决策的资源分配对策模型。防守者首先将有限的防护资源分配到不同的目标上,继而进攻者选择一种威胁组合方式对目标实施打击。基于博弈论相关知识,模型的求解结果可以使防守者最小化自身损失,使进攻者最大化进攻收益。同时,针对模型的特点,给出了一些推论和证明。通过一个示例验证了模型的合理性以及相关推论的准确性,能够为攻、防双方规划决策提供辅助支持。

关键词:资源分配;多属性决策;对策模型;博弈论

中图分类号:N945.25; O225 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)05-153-08

Multi-attribute game theoretic model for resource allocation in military attack-defense application

ZHANG Xiaoxiong^{1,2}, GE Bingfeng¹, TAN Yuejin¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The 63rd Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: A multi-attribute game theoretic model was proposed to address a two-stage attack-defense resource allocation problem. That is, under limited resources, the defender first allocates different types of safeguard measures among possible targets, against which the attacker chooses a combination of threats and targets to attack. The proposed model, using game theory, was used to determine the optimal resource allocation for both the defender and attacker. The results can minimize the loss for the defender while maximizing the utility for the attacker. In addition, some lemmas were given on the basis of the particularities of this solving model. An illustrative example was studied to verify the feasibility of the proposed model and the accuracy of the lemmas, which can provide decision support for the resource allocation process.

Key words: resource allocation; multi-attribute decision making; game theoretic model; game theory

“军备竞赛”这一术语主要用于描述存在冲突的两个国家交互发展军力的过程,对于相关现象的研究认定为策略问题,且已经扩展到政治、经济等多个方面^[1]。自从美国“9·11”事件以来,对国土安全防御方面的研究已引起重要关注,主要集中在攻防双方如何合理规划有限的资源以最大化自身的效益^[2]。

针对资源分配问题,不同学者已在不同领域展开了广泛研究,以寻求合理的资源规划方案。张骁雄等^[3]针对装备发展中的科研经费分配问题,建立了一个优化模型,并采用智能优化算法对其进行了求解。Xiong等^[4]针对卫星系统动态调度和资源分配问题提出了一个双目标优化模型,并采用合作进化多目标算法对模型进行求解。魏

心泉和王坚^[5]针对传统算法求解多目标资源优化分配问题收敛慢、Pareto解分布不均匀的问题,提出了一种新的文化基因算法。李阳和王珏^[6]针对管理成本分配对军队人力资源管理绩效问题,从经济学的边际效用递减规律出发,构建了最佳人力资源管理模型,得到最佳成本投入方案。张骏等^[7]通过引入风险管理的概念,提出了一种多目标多决策者的资源分配模型,以解决不确定环境下防空反导装备体系资源分配与优化问题等。

上述学者从多准则决策、智能优化算法、经济效益理论等方面,对不同领域的资源分配问题进行了建模与求解。近些年,博弈论也开始被广泛应用于各种规划分配模型的求解中。在序列博弈

* 收稿日期:2017-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71690233,71571185,71501182)

作者简介:张骁雄(1990—),男,江苏淮安人,助理工程师,博士,E-mail:zxxandxx@163.com

中, Bier 等^[8]最先提出了一种基于博弈理论的资源分配模型,文中假设防守者优先将有限资源分配到不同的目标上,以最大程度减少进攻者针对自身所做出的最佳应对策略所带来的损失。之后学者们陆续提出了不同的博弈模型,尝试更加全面地描述现实情况。Haphuriwat 和 Bier^[9]针对点对点目标防护以及开展多目标统一防护之间的权衡问题展开了研究,结果表明当需保护的目标增多时,开展多目标统一防护更加有效。Nikoofal 和 Zhuang^[10]针对进攻者偏好信息为区间数的情况,提出了一种资源分配的博弈模型,通过利用资金的不确定性和价值的鲁棒性概念,为防守者提供最优均衡解。Golany 等^[11]针对两人零和博弈问题,研究如何将多种资源应用到多个目标上,以应对对手的多种打击方式。Mo 等^[12]在考虑时间和进攻不确定的情形下,提出了一种动态资源分配模型,解决防守者在加强目标防护和构建冗余系统之间的权衡问题,并通过一个实例验证了模型的有效性。还有一些学者考虑了信息不完全、允许信息欺骗隐藏、人在回路等情形下的资源分配问题^[13-15]。

尽管很多学者已提出不同博弈模型以解决防守者的资源分配问题,然而目前大部分研究局限于考虑单威胁对单目标的组合情况,鲜有学者考虑多重威胁对多目标组合情况下的资源分配模型。本文研究序列博弈中攻、防双方的资源分配优化问题:在有限的资源条件下,防守者如何将防护措施合理地分配到不同目标上,以最大化程度降低敌方对自己打击所造成的损伤?而进攻者如何针对防守者的资源分配方案,选择最佳的威胁组合策略对目标实施打击,以获取最大的收益?

1 模型简介

1.1 问题描述

多属性准则下的攻防双方资源分配问题可以描述为一个两阶段问题:防守者将不同的资源(防护措施)分配到不同的目标上,以应对潜在的威胁;进攻者在观察到防守者的分配方案后,选择一种威胁方式组合对目标实施打击,意图造成人员、经济等不同方面的损失。防守者的目标是在考虑进攻者应对自己资源分配方案所做出的最佳应对策略的基础上,通过合理分配防护资源,将目标的总体损伤降到最低。进攻者则针对防守者的资源分配方案,选择最佳的攻击组合,对目标造成最大程度损伤。一个具有 I 种防护措施、 J 个目标和 K 种威胁场景的博弈模型见图 1。

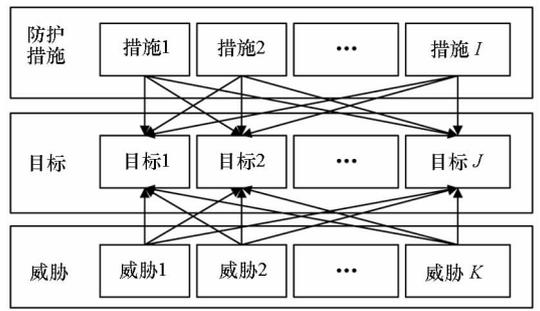


图 1 博弈双方资源分配示意图

Fig. 1 Illustration of resource allocation for two players

本文将利用多属性效用函数,对不同场景下的双方得失情况进行建模和描述。不同威胁对不同目标可造成不同程度的损伤,不同的防护措施既可以降低威胁成功实施的概率,也可以减轻威胁攻击目标造成的损伤。同一种防护措施应用于同一个目标上至多一次,不同防护措施可以应用于同一个目标。每一种威胁最多实施一次,且不同的威胁可以对同一目标实施打击。不同威胁之间以及不同防护措施之间皆相互独立。防守者通过合理分配资源将自身的损失降到最小,而进攻者则选取最佳攻击组合对防守者造成最大程度的损伤。

1.2 符号说明

首先,对文中涉及的符号进行解释说明。

i : 防护措施的指标。

j : 目标的指标。

k : 威胁的指标。

I : 防护措施的种类数目。

J : 目标的数目。

K : 威胁的种类数目。

C : 防守者成本约束。

c_i : 实施第 i 种防护措施的成本。

α_{ik} : 防护措施 i 降低威胁 k 实施成功的概率,且 $\alpha_{ik} \in [0, 1]$ 。

β_{ik} : 防护措施 i 降低威胁 k 造成损伤的程度,且 $\beta_{ik} \in [0, 1]$ 。

λ_{kj} : 威胁 k 成功攻击目标 j 造成的损伤程度,且 $\lambda_{kj} \in [0, 100]$ 。

x_{ij} : 防守者是否将防护措施 i 应用于目标 j ,且 $x_{ij} = 1$ or $x_{ij} = 0$ 。

y_{kj} : 进攻者是否采用威胁 k 攻击目标 j ,且 $y_{kj} = 1$ or $y_{kj} = 0$ 。

\mathbf{x} : 防守者的资源分配策略, $\mathbf{x} = [x_{ij}]_{I \times J}$ 。

\mathbf{y} : 进攻者的攻击策略, $\mathbf{y} = [y_{kj}]_{K \times J}$ 。

w_j^D : 防守者对目标 j 的偏好, $w_j^D \in [0, 1]$ 且

$$\sum_{j=1}^J w_j^D = 1.$$

w_j^A :进攻者对目标 j 的偏好, $w_j^A \in [0, 1]$ 且

$$\sum_{j=1}^J w_j^A = 1.$$

w_D :防守者的偏好, 且 $w_D = [w_j^D]_{1 \times J}$ 。

w_A :进攻者的偏好, 且 $w_A = [w_j^A]_{1 \times J}$ 。

1.3 建模

本小节主要对文中涉及的相关概念进行解释说明,并给出不同效用函数的计算公式。

定义 定义 (x, y) 为一组纯策略解, 其中 x 为防守者将不同防护措施应用到不同目标上的一组资源分配方案, y 为进攻者选择的一种威胁组合对目标实施攻击的进攻方案。

(x, y) 也是本研究所需要的输出结果。对不同威胁组合对目标造成的损失进行定量化描述, 并基于此来表征防守者和进攻者的效用函数。防守者的损失 L 和进攻者的收益 U 都受到 2 个因素的影响: 进攻的成功率 P 和防护措施对目标的保护程度 F 。

首先定义威胁 k 攻击目标 j 的成功概率 p_{kj} 。若对目标不添加任何防护措施, 则任意威胁皆可以成功打击该目标。假设不同防护措施对降低威胁成功实施的效果是可以叠加的。当 x_{ij} 为 1 时, 表示防守者将防护措施 i 应用在目标 j 上, 反之 x_{ij} 为 0。 $1 - \alpha_{ik} \cdot x_{ij}$ 表示采用防护措施 i 后, 进攻者采用威胁 k 攻击目标 j 成功的概率。考虑不同防护措施对降低威胁成功实施所起到的联合作用, 式(1)表示进攻者在防守者的资源分配方案下, 采用威胁 k 打击目标 j 成功的概率。

$$p_{kj} = \prod_{i=1}^I (1 - \alpha_{ik} \cdot x_{ij}) \quad (1)$$

同样, 防护措施可以有效降低不同威胁对目标造成的损伤程度, 且不同防护措施所起到的防护效果具有叠加性。假设威胁 k 成功对目标 j 实施了打击, 式(2)表示防守者的资源分配方案降低目标 j 遭受损伤的程度。

$$f_{kj} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - \beta_{ik} \cdot x_{ij}) \quad (2)$$

通过一个简单示例来解释式(2)。假设有 3 种防护措施 A, B 和 C , 它们有效降低某种威胁造成损伤的程度分别为 0.7, 0.4 和 0.2。如果仅仅采用措施 A , 则该攻击造成的损伤降低为原来的 30%; 假设同时采用措施 A 和 B , 则该攻击造成的损伤只有原来的 $30\% \times 60\% = 18\%$; 如果 3 种措施都采用, 则损伤只有原来的 $30\% \times 60\% \times 80\% = 14.4\%$ 。因此, 防护措施可以有效降低目标遭受损失的程度为 $100\% - 14.4\% = 85.6\%$,

正如式(2)所示。

由于 f_{kj} 表示采用威胁 k 攻击目标 j 被削弱的程度, 故 $1 - f_{kj}$ 为进攻者实施威胁 k 后, 目标 j 剩余的完好程度。基于此, 定义不同威胁组合方案对目标 j 实施打击造成的损伤为:

$$Q_j = \sum_{k=1}^K p_{kj} \cdot (1 - f_{kj}) \cdot \lambda_{kj} \cdot y_{kj} \quad (3)$$

基于以上分析, 结合双方对目标的偏好, 对防守者的损失 L 以及进攻者的收益 U 定义如下:

$$L(x, y, w_D) = \sum_{j=1}^J w_j^D Q_j \quad (4)$$

$$U(x, y, w_A) = \sum_{j=1}^J w_j^A Q_j \quad (5)$$

假设 y^* 为进攻者应对防守者的资源分配方案所采取的最佳攻击策略, 则防守者的目标为:

$$\min L(x, y^*, w_D) \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_i x_{ij} \leq C \quad (7)$$

其中, 式(7)表示防守者所选择的防护措施产生的总费用不能超过总预算。

给定防守者的最佳资源分配策略 x^* , 进攻者必定采取最大化自身收益的进攻策略, 即:

$$y^* = \arg \max_y U(x^*, y, w_A) \quad (8)$$

2 求解与推论

定理 一组解 (x^*, y^*) 是均衡解当且仅当满足以下条件:

$$\begin{cases} \hat{y}(x) = \arg \max_y \{ U(x, y) \} \\ x^* = \arg \min_x L(x, \hat{y}(x)), y^* = \hat{y}(x^*) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\hat{y}(x)$ 表示进攻者针对防守者的策略 x 所采取的最优应对策略。式(9)中第一条表示针对防守者的任意分配方案 x , 进攻者必定采取相应的最优应对策略 $\hat{y}(x)$ 以最大化自身的收益。防守者意识到进攻者一定会采取最优应对策略, 即给定任意资源分配策略, 防守者可以预测到自己的损失。因此, 式(9)中第二条表示在所有可能的“防守策略—最优应对进攻策略”集合中, 防守者选择可以最小化自身损失的策略 x^* 。该模型的求解步骤见算法 1。算法的输出为最优防守策略、最优进攻策略以及该均衡解对应的选手的收益。

推论 1 (x^*, y^*) 为均衡解的必要条件:

$$U(x^*, y^*, w_A) \geq U(x^*, y, w_A) \quad (10)$$

证明: 此推论根据定义即可证明, 表示给定最优防守策略 x^* , 进攻者必定采取可以最大化自身收益的进攻应对策略 y^* 。□

算法 1 计算(子博弈完美)均衡解

Alg. 1 Solving for (a sub-game perfect) equilibrium

输入:相关参数,包括 $\alpha_{ik}, \beta_{ik}, \lambda_{kj}, c_i$ 等,令 $count = 1$;

输出:均衡解及其对应的选手收益;

步骤:

```

1: for each  $x$ 
2:   solve  $\hat{y}(x) = \arg \max_y \{U(x, y)\}$ 
3:   compute  $L = L(x, \hat{y}(x)), U = U(x, \hat{y}(x))$ 
4:   if  $count = 1$  then
5:      $loss \leftarrow -L, gain \leftarrow -U$ 
6:      $x^* \leftarrow x, y^* \leftarrow \hat{y}(x)$ 
7:      $count = count + 1$ 
8:   else
9:     if  $L < loss$  then
10:       $loss \leftarrow -L, gain \leftarrow -U$ 
11:       $x^* \leftarrow x, y^* \leftarrow \hat{y}(x)$ 
12:     end if
13:   end if
14: end for
15: return  $x^*, y^*, loss, gain$ 

```

推论 2 算法 1 的输出为该问题的均衡解。

证明:算法 1 中,步骤 2 保证进攻者针对防守者的策略永远采取最优的应对策略以最大化自身收益,即满足式(9)中第一条。同时,步骤 3~13 保证防守者在所有可能的策略组合中,选取可以使得自身损失最小的策略,满足式(9)中第二条。基于以上两点原因,算法 1 的输出一定是该模型的均衡解。□

推论 3 一定存在一个均衡解 (x^*, y^*) 。

证明:双方在知晓各自偏好的条件下,给定任意的资源分配方案 x ,防守者可以预测进攻者的最佳应对策略 $\hat{y}(x)$,进而可以预测自身损失 $L(x, \hat{y}(x), w_D)$,反之亦然。因为存在资源约束,故防守者可以选择的资源分配方案有限,同时进攻者的攻击方案亦有限。故,必存在一个(子博弈完美)均衡解。其实,对于任何一个完全且完美信息动态博弈,必定存在一个均衡解^[16]。□

推论 4 给定两个不同资源约束 C_1 和 C_2 , $C_1 \geq C_2$,其他参数条件不变,对应的均衡解分别为 (x_1^*, y_1^*) 和 (x_2^*, y_2^*) ,则 $L(x_1^*, y_1^*) \leq L(x_2^*, y_2^*)$ 。即,任意成本约束下对应均衡解中防守者的损失一定不高于任意低于该成本约束下的均衡解中防守者的损失。

证明:由式(9)得知,给定任意防守策略,进攻者总会采取最优应对策略以最大化自身收益。因为 $C_1 \geq C_2$,所以防守者在资源约束 C_1 下,存在

更多的可行分配方案。特别地,当 $x_2^* = x_1^*$ 时,此时两种情形下防守者的损失相等。当 $x_2^* \neq x_1^*$ 时,由定义知,防守者必定在所有的策略组合中选取使得自身损失达到最小的资源分配策略,故得 $L(x_1^*, y_1^*) \leq L(x_2^*, y_2^*)$ 。□

推论 5 给定防守者偏好,当进攻者与防守者的属性偏好权重一致时,防守者的损失达到最大。即给定 $w_D, \alpha_{ik}, \beta_{ik}, \lambda_{kj}$ 等属性值,当 $w_A = w_D$ 时, $L(x^*, y^*, w_D)$ 达到最大。

证明:假设场景 1 下,双方对目标的偏好值相等,即有 $w_A = w_D$,此时均衡解 (x_1^*, y_1^*) 对应的双方效用值为 $\{L(x_1^*, y_1^*, w_D), U(x_1^*, y_1^*, w_A)\}$ 。

现假设有场景 2,双方对目标偏好值不等,同时 $w'_A \neq w_A$ 且 $w'_D = w_D$ 。此时均衡解 (x_2^*, y_2^*) 对应的双方效用值为 $\{L(x_2^*, y_2^*, w'_D), U(x_2^*, y_2^*, w'_A)\}$ 。

假设在场景 2 下,给定防守者策略 x_1^* ,进攻者的最优应对策略为 $y_3 = \hat{y}(x_1^*)$ 。

$\therefore (x_2^*, y_2^*)$ 为场景 2 下均衡解,由式(9)得

$$L(x_2^*, y_2^*, w'_D) \leq L(x_1^*, y_3, w'_D)$$

$$\therefore w'_D = w_D$$

$$\therefore L(x_2^*, y_2^*, w_D) \leq L(x_1^*, y_3, w_D)$$

$$\therefore w_A = w_D$$

$$\therefore L(x_1^*, y_3, w_D) = U(x_1^*, y_3, w_A)$$

$$\therefore (x_1^*, y_1^*) \text{ 为场景 1 下均衡解}$$

$$\therefore U(x_1^*, y_1^*, w_A) \geq U(x_1^*, y_3, w_A)$$

$$\therefore U(x_1^*, y_1^*, w_A) = L(x_1^*, y_1^*, w_D)$$

$$\therefore L(x_2^*, y_2^*, w'_D) \leq L(x_1^*, y_1^*, w_D)$$

故得证。□

推论 6 给定进攻者偏好,当防守者与进攻者的属性偏好权重一致时,进攻者的收益达到最小。即给定 $w_A, \alpha_{ik}, \beta_{ik}, \lambda_{kj}$ 等属性值,当 $w_D = w_A$ 时, $U(x^*, y^*, w_A)$ 达到最小。

该推论的证明思路同推论 5,故不再展开。

3 示例研究

本节设计了多种场景,旨在通过模型的计算求解,验证不同参数设置对攻防双方最优策略的影响。需要指出的是,示例中的数据大多通过专家评分给出,仅供计算使用,单独存在时不具备实际意义,但计算结果却可以用来进行方案的比对和分析。实际应用时,这些数值可以通过历史数据、资料统计等方式给出^[17]。

借鉴文献[2]中的部分数据,假设存在蓝方(防守者)和红方(进攻者)两个实体。蓝方可将

5种不同的防护措施应用在3个目标的防护上,而红方可采取3种不同的威胁对蓝方的目标实施攻击,从而造成人员、经济、设施等方面的损失。具体的假想场景细节见表1。不同的目标根据发展规模及大小,分别设置为都市、城镇以及乡村。 α_{ik} 、 β_{ik} 、 λ_{kj} 、 c_i 等参数的设置分别见表2~5。其中, α_{ik} 和 β_{ik} 的大小受防护措施和威胁种类的影响,而 λ_{kj} 受威胁种类以及目标规模的影响。设置防守者总成本约束为 $C=5000$ 万元。

表1 假想场景细节

Tab.1 Hypothetical scenario details

防护措施	目标	威胁
情报搜集	都市	轰炸办公高楼
目标强化	城镇	瘫痪交通枢纽
加强防护	乡村	攻击基础设施
运输安全		
人员培训		

表2 防护措施降低威胁成功的概率

Tab.2 Reducing probabilities of different safeguard measures on different threats

防护措施	轰炸办公高楼	瘫痪交通枢纽	攻击基础设施
情报搜集	0.2	0.1	0.15
目标强化	0.7	0.75	0.8
加强防护	0.75	0.7	0.8
运输安全	0.15	0.65	0.2
人员培训	0	0	0

表3 防护措施降低威胁造成损伤的程度

Tab.3 Mitigating levels of each safeguard measure on different threats

防护措施	轰炸办公高楼	瘫痪交通枢纽	攻击基础设施
情报搜集	0.8	0.7	0.5
目标强化	0.7	0.65	0.7
加强防护	0.65	0.7	0.6
运输安全	0.2	0.65	0.1
人员培训	0.15	0.15	0.1

表4 威胁成功攻击目标造成的损伤

Tab.4 Destructiveness of each threat on different targets

威胁	都市	城镇	乡村
轰炸办公高楼	90	80	75
瘫痪交通枢纽	80	75	85

攻击基础设施	65	60	55		
表5 防护措施的成本					
Tab.5 Relative unit cost of each safeguard measure					
	万元				
措施	情报搜集	目标强化	加强防护	运输安全	人员培训
成本	700	800	500	400	300

在表6三种不同权重的场景假设下,对模型进行求解与对比分析,验证模型与上述推论的准确性与合理性。

表6 三种不同场景下双方对目标的偏好

Tab.6 Both players' preferences to targets under three different scenarios

场景	都市	城镇	乡村	
场景1	蓝方	0.7	0.2	0.1
	红方	0.6	0.4	0
场景2	蓝方	0.7	0.2	0.1
	红方	0.7	0.2	0.1
场景3	蓝方	0.6	0.4	0
	红方	0.6	0.4	0

3.1 场景1

假设双方对目标的偏好权重如表6中场景1所示。经计算,图2显示了蓝、红双方的最佳策略。图中威胁1、威胁2和威胁3分别代表轰炸办公高楼、瘫痪交通枢纽和攻击基础设施;目标1、目标2和目标3分别代表都市、城镇和乡村;措施1、措施2、措施3、措施4和措施5分别代表情报搜集、目标强化、加强防护、运输安全和人员培训,下文同。

由图2可知,蓝方将所有防护措施都用在了目标1上,将防护措施1、2和3用在了目标2上,对目标3未采取任何防护措施。红方在观察到上述分配方案后,同时采用第1、2种威胁攻击目标2,采用第3种威胁攻击目标1,以造成最大规模伤害。该场景下蓝、红双方的损失/收益为(0.112,0.156)。对应上文中的决策变量,该场景下的均衡解 $\{x_1^*, y_1^*\}$ 可用矩阵表示为: $x_1^* =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, y_1^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

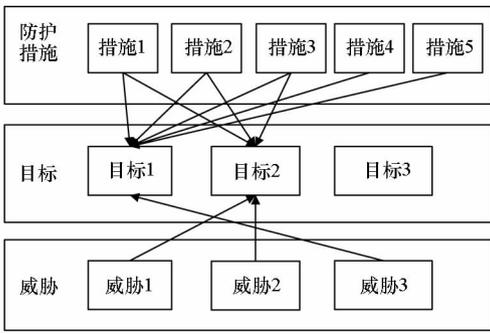


图 2 场景 1 下双方最佳策略

Fig. 2 Equilibrium for both players in Scenario 1

3.2 场景 2

在其他参数不变的情形下,固定蓝方对目标的权重,假设红方对目标的偏好与蓝方保持一致,见表 6 场景 2。此时该问题变成了零和博弈模型,即任何防守者的损失等于进攻者的收益。图 3 显示了双方在该场景下的最佳均衡策略。此时,蓝、红双方对目标 1 的偏好都远远大于其他两个目标。蓝方将防护措施 1、2 和 3 用在了目标 1 上,将防护措施 2、3 和 4 用在了目标 2 上,将防护措施 2 和 3 用在目标 3 上。红方最佳进攻策略为采用第 1 种威胁攻击目标 2,同时采用第 2、3 种威胁攻击目标 1。该场景下蓝、红双方的损失/收益为(0.298, 0.298)。对比场景 1 下防守者的损失,有 $0.298 > 0.112$ 。该场景下蓝方的损失值达到最大,示例结果与推论 5 相符。

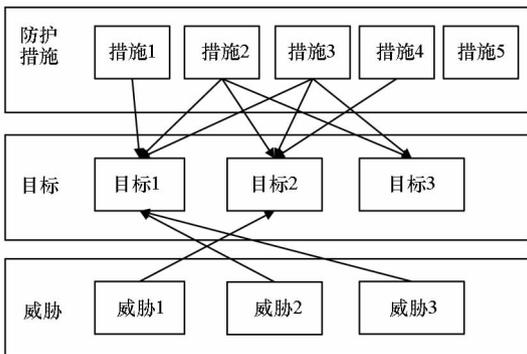


图 3 场景 2 下双方最佳策略

Fig. 3 Equilibrium for both players in Scenario 2

3.3 场景 3

在其他参数不变的情形下,固定红方对目标的权重,假设蓝方对目标的偏好与红方保持一致,见表 6 场景 3。图 4 显示了蓝、红双方在该场景下的最佳策略。蓝方将防护措施 1、2、3、4 分别用在了目标 1 和 2 上,目标 3 没有得到任何防护措施,因为该场景下双方对该目标的进攻或者防护

不产生任何收益。红方同时采用三种威胁攻击目标 1。该场景下蓝、红双方的损失/收益为(0.116, 0.116)。对比场景 1 下进攻者的收益,发现 $0.116 < 0.156$ 。该场景下红方的收益值达到最小,示例结果与推论 6 相符。

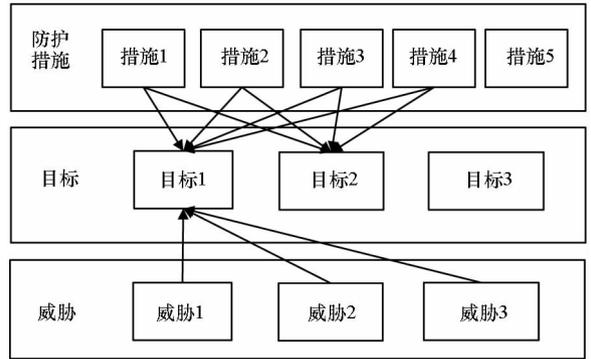


图 4 场景 3 下双方最佳策略

Fig. 4 Equilibrium for both players in Scenario 3

3.4 敏感性分析

将总成本 C 在[2000 万元, 8000 万元]区间内变化,每次变量为 1000 万元,其他参数保持不变。在场景 1 的权重设置下,进行重复实验,观察每种情形下均衡解所对应的双方收益变化情况,如图 5 所示。

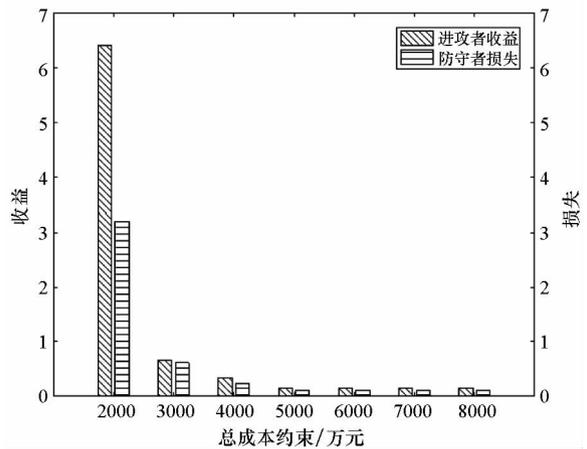


图 5 不同成本约束下双方的收益变化

Fig. 5 Payoffs for both players under different cost constraints

由图 5 可知,随着总成本的增大,进攻者的收益和防守者的损失都呈现递减的趋势。在成本 C 达到 5000 万元之后,双方在不同成本约束下采取均衡解后得到的收益不再变化。由推论 3 可知,任何低成本下产生的均衡解一定是任何相对高成本下的可行解。因此,对于防守者来说,任何高成本下的均衡解对应的损失一定不高于(小于或等于)任何低成本下对应均衡解所对应的损失。

3.5 模型对比

为突出该资源分配对策模型与传统优化模型的区别,继续开展对比实验,将上述问题建模为一个多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min f_1 = L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}_D) = \sum_{j=1}^J w_j^D Q_j \\ \max f_2 = U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{w}_A) = \sum_{j=1}^J w_j^A Q_j \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_i x_{ij} \leq C \end{cases} \quad (11)$$

式中的各项参数含义与前文保持一致。两个目标函数 f_1 和 f_2 分别对应待优化的目标,即最小化防守者损失和最大化进攻者收益,约束条件限制了防守者的资源分配方案。

采用传统的非支配排序的遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 对该问题进行求解,获取 Pareto 解。之后利用逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 从所求得的 Pareto 解中获得一个折中解^[18]。其中,NSGA-II 的核心思想是根据个体的非劣解水平对种群进行分层,指引搜索向 Pareto 最优解集方向进行。TOPSIS 的核心思想是通过比较不同方案与理想方案的接近程度来对方案进行排序。求解算法主要参数设置如下:种群规模为 100,迭代次数为 500,交叉概率设为 0.2,两个目标权重值皆设置为 0.5。求解结果如图 6 所示。

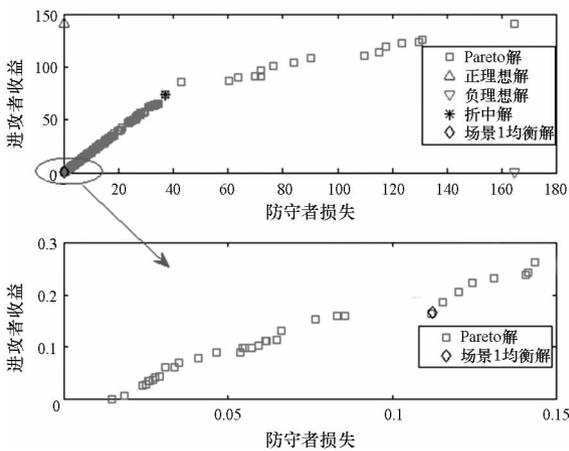


图 6 不同解集对比

Fig. 6 Comparisons between different solutions

图 6 展示了该多目标优化问题的 Pareto 解、理想解、折中解与场景 1 的均衡解。该折中解对应的双方损失/收益为 (37.15, 74.3), 而场景 1 的均衡解对应的双方损失/收益 (0.112, 0.156) 也是该 Pareto 中的非支配解。实质上,该均衡解

是子博弈完美均衡,是基于选手完全理性的前提下,双方为应对对方策略所做出的最佳应对策略。多目标优化模型通过对防守者损失和进攻者收益两个目标函数同时进行优化,生成一系列的非劣解;通过设置不同的目标函数权重,可以得到不同的折中解。本文博弈模型均衡解的求解思路可以为决策者在 Pareto 解集中选择折中解提供一定的参考和借鉴。

4 结论

针对受限条件下的攻防双方资源分配问题,提出了一种基于多属性准则的分配对策模型。借鉴博弈论均衡解的概念,模型可以使防守者最小化自身损失,同时进攻者最大化自身收益。通过例证发现,固定防守者的偏好,零和博弈情形下,防守者的损失达到最大。反之,固定进攻者的偏好,零和博弈情形下,进攻者的收益达到最小。总经费约束对双方的收益情况都存在较为显著的影响,具体表现为在一定范围内,防守者的损失随着总预算的增大而逐渐递减。对比实验表明,该问题下子博弈完美均衡解也是对应多目标优化问题的一个非支配解,可以为求解多目标攻防资源分配问题提供新的思路。本研究结论可为资源受限条件下的分配规划问题提供一定的决策支持。下一步研究可将模型拓展到不确定环境下,引进更多现实约束条件,添加时间因素等。

参考文献 (References)

- [1] Golany B, Kress M, Penn M, et al. Network optimization models for resource allocation in developing military countermeasures[J]. Operations Research, 2012, 60(1): 48-63.
- [2] Paulson E C, Linkov I, Keisler J M. A game theoretic model for resource allocation among countermeasures with multiple attributes[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 610-622.
- [3] 张骁雄,姜江,葛冰峰. 武器装备科研经费分配的规划模型与算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2061-2066.
ZHANG Xiaoxiong, JIANG Jiang, GE Bingfeng. Scheduling model and algorithm for weapon budget allocation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2061-2066. (in Chinese)
- [4] Xiong J, Leus R, Yang Z Y, et al. Evolutionary multi-objective resource allocation and scheduling in the Chinese navigation satellite system project [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(2): 662-675.
- [5] 魏心泉,王坚. 多目标资源优化分配问题的 Memetic 算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 809-814.
WEI Xinquan, WANG Jian. Hybrid effective Memetic algorithm for multi-objective resource allocation problem [J].

- Control and Decision, 2014, 29 (5): 809 – 814. (in Chinese)
- [6] 李阳, 王珏. 基于边际效用函数的最佳人力资源管理模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(1): 106 – 112.
LI Yang, WANG Jue. Marginal utility function based optimal human resource management model [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(1): 106 – 112. (in Chinese)
- [7] 张骏, 姜江, 陈英武. 多目标多决策者环境下防空反导装备体系资源分配与优化[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 171 – 178.
ZHANG Jun, JIANG Jiang, CHEN Yingwu. Air defense and anti-missile weapons allocation in hierarchical systems under multi-objectives and multi decision makers condition [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 171 – 178. (in Chinese)
- [8] Bier V M, Oliveros S, Samuelson L. Choosing what to protect; strategic defensive allocation against an unknown attacker [J]. Journal of Public Economic Theory, 2007, 9(4): 563 – 587.
- [9] Haphuriwat N, Bier V M. Trade-offs between target hardening and overarching protection [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1): 320 – 328.
- [10] Nikoofal M E, Zhuang J. Robust allocation of a defensive budget considering an attacker's private information[J]. Risk Analysis, 2012, 32(5): 930 – 943.
- [11] Golany B, Goldberg N, Rothblum U G. Allocating multiple defensive resources in a zero-sum game setting[J]. Annals of Operations Research, 2015, 225(1): 91 – 109.
- [12] Mo H D, Xie M, Levitin G. Optimal resource distribution between protection and redundancy considering the time and uncertainties of attacks[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 243(1): 200 – 210.
- [13] Zhuang J, Bier V M, Alagoz O. Modeling secrecy and deception in a multiple-period attacker-defender signaling game[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 203(2): 409 – 418.
- [14] Wang C, Bier V M. Expert elicitation of adversary preferences using ordinal judgments [J]. Operations Research, 2013, 61(2): 372 – 385.
- [15] Naseem A, Khan S A, Malik A W. A real-time man-in-loop threat evaluation and resource assignment in defense [J]. Journal of the Operational Research Society, 2017, 68(6): 725 – 738.
- [16] 谢识予. 经济博弈论[M]. 3 版. 上海: 复旦大学出版社, 2002: 119 – 121.
XIE Shiyu. Economy and game theory[M]. 3rd. Shanghai: Fudan University Press, 2002: 119 – 121. (in Chinese)
- [17] Shan X, Zhuang J. Cost of equity in homeland security resource allocation in the face of a strategic attacker[J]. Risk Analysis, 2013, 33(6): 1083 – 1099.
- [18] 张骁雄, 葛冰峰, 姜江, 等. 面向能力需求的武器装备组合规划模型与算法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(1): 102 – 108.
ZHANG Xiaoxiong, GE Bingfeng, JIANG Jiang, et al. Capability requirements oriented weapons portfolio planning model and algorithm [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(1): 102 – 108. (in Chinese)