doi:10.11887/j.cn.201902027 http://journal.nudt.edu.cn

空陆攻防博弈的动态武器目标分配*

张先剑
(国防科技大学 智能科学学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:大规模作战具有高动态、非完全信息和不确定性,在分析归纳目前解决动态武器目标分配问题的一系列方法的基础上,尝试构建基于双方动态博弈的攻防对抗综合数学模型,并利用纳什均衡和帕累托最优算法进行分阶段求解。结果表明,该数学模型和博弈论方法结合能够有效解决武器目标动态分配问题。

关键词:动态武器目标分配;指挥决策;纳什均衡;帕累托最优
中图分类号:E911 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)02-185-06

Land defense weapon versus target assignment against air attack

ZHANG Xianjian
(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Considering the high-dynamics, incomplete information and uncertainty of massive operations, on the basis of the analysis and induction of a methods was proposed to solve the problem of dynamic weapon target assignment, a comprehensive mathematical of dynamic game based on both sides was made in structure, a phased solution was provided based on Nash equilibrium algorithm and Pareto optimization. The results validate that combining the mathematical model with the game theory method can effectively deal with the problem of dynamic weapon target assignment efficiently.

Keywords: dynamic weapon target assignment; command and decision-making; Nash equilibrium; Pareto optimization

武器目标分配是现代大规模攻防作战的核心问题,它的最终目的是期望通过最优的武器目标分配方案,充分发挥武器系统的整体效能,以实现攻防作战的最佳结局。传统研究主要利用动态规划算法、粒子群优化、蚁群优化、类电磁算法等方法解决静态或动态武器目标分配问题,但大部分研究[1-8]均把目标设想为无智慧、无对抗能力的被动防御对象,单一从己方角度考虑武器目标分配问题,忽略对手的策略和利益,没有充分考虑实战中的动态博弈特征——作战双方行动和策略的关联性。攻击与防御是互相对立的双方,共存于博弈的统一体中,相互制约、相互激励,没有考虑对抗双方动态博弈特性的攻防决策难以应用于实战。具体到武器目标分配问题研究,必须同时兼顾作战双方的战术策略[9-10]、效能指标等重要因素,这正是使用博弈论方法的优势之处。

针对动态武器目标分配问题,本研究将重点聚焦对抗建模,构建了基于双方动态博弈的综合数学模型,并利用纳什均衡和帕累托最优算法进行求解。

1 基于纳什均衡的武器目标分配

1.1 双方博弈

博弈中竞技者(决策主体)都是理性的,在选择决策的时候都有着明确的"使自己的利益最大化"的目标。博弈论就是专门研究博弈现象中各方是否存在最合理的行动方案,以及如何找到合理的行动方案即均衡解的数学理论和方法。而这里的均衡解,就是一个能够得以维持的结果,或者说是所有竞技者不得不接受而又不可能更好的结果[11]。

定义1 博弈可以描述为式(1)所示数学形式[12]。

$$\Gamma=[N,P,\{S_K\},J,\{J(x^K)\}] \tag{1}$$

式中:N 为任意的竞技者集合;P 为联合组织(机构)的集合;K 表示具有共同行动和利益的竞技者小组;S_K 为联合 $K\in P$ 的任意策略集合;J 为在 P 上的所有博弈结果的任意集合;$J(x^K)$ 为如果联合 K 采取策略 x^K,那么在 P 上可能的结果集合。

一般情况下,博弈可以简化为包含竞技者、策

* 收稿日期:2018-01-28
基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M562571,2015T81131)
作者简介:张先剑(1984—),男,辽宁瓦房店人,讲师,博士,E-mail:ruszxj@163.com

略和盈利(损失)函数的表达形式。

$$\boldsymbol{\Gamma}=[\boldsymbol{N},\boldsymbol{S},\boldsymbol{J}] \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{N}=[1,2,\cdots,n]$,$\boldsymbol{S}=[S_1,S_2,\cdots,S_n]$,$\boldsymbol{J}=[J_1,J_2,\cdots,J_n]$。

定义2 策略 $q^r=(q^{r,1},\cdots,q^{r,m_k})$ 是指标函数 J 的纳什均衡解,如果对于任意的 $q^i\in S_i$,有

$$J_i(q^r\|q^i)\leqslant J_i(q^r),\ i\in M_K=\{1,2,\cdots,m_k\} \tag{3}$$

式中,M_K 为指标向量 $\boldsymbol{J}$ 的索引集合,$(q^r\|q^i)=\{q^{r,1},\cdots,q^{r,i-1},q^i,q^{r,i+1},\cdots,q^{r,m_k}\}$。[12]

1.2 武器目标分配模型

设甲乙两方进行攻防对抗,甲方有 N 类目标参与作战,$N=\{1,2,\cdots,n\}$,乙方有 M 类目标参与作战,$M=\{n+1,n+2,\cdots,n+m\}$。$P_{ij}^{\theta\psi}$ 表示位于 θ 点的第 i 个目标攻击位于 ψ 点的第 j 个目标的命中率,它取决于使用的武器类型和攻击的目标类型与射击条件($0.2\leqslant P_{ij}^{\theta\psi}\leqslant 0.9$)。

命中率与作战双方组态特征因素有关:$P_{ij}^{\theta\psi}=f(P_{ij0}^{\theta\psi},\ r_{ij}^{\theta\psi},\ \eta_{ij}^{\theta\psi},\ t_{ij},\cdots)$。其中,$P_{ij0}^{\theta\psi}$ 为初始命中率,$r_{ij}^{\theta\psi}$ 为斜距,$\eta_{ij}^{\theta\psi}$ 为不动点 θ 和 ψ 间的方位角,t_{ij} 为飞近时间。初始命中率有以下选择范围:

$$P_{ij0}^{\theta\psi}=\begin{cases}0.2\sim0.3,\ \text{最小区间}\\0.4\sim0.7,\ \text{平均区间}\\0.8\sim0.9,\ \text{最大区间}\end{cases}$$

基于方位角 η 的 $P_{ij}^{\theta\psi}$ 可以表示为:当 $|\eta|\leqslant\eta_k$,$P_0\leqslant P(\eta)\leqslant 0.9$ 时,$P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)=P_{ij0}^{\theta\psi}+(1-|\eta|/\eta_k)\cdot(0.9-P_{ij0}^{\theta\psi})$;当 $\eta_k\leqslant|\eta|\leqslant 2\eta_k$,$0\leqslant P(\eta)\leqslant P_0$ 时,$P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)=(2-|\eta|/\eta_k)\cdot P_{ij0}^{\theta\psi}$。

某时刻拦截武器位于点 A,坐标为 $(x^{\mathrm{A}},y^{\mathrm{A}},z^{\mathrm{A}})$,向量 $\overrightarrow{OA}$(O 为探测点)坐标为 (θ,ψ),拦截目标位于点 B,坐标为 $(x^{\mathrm{B}},y^{\mathrm{B}},z^{\mathrm{B}})$,向量 $\overrightarrow{OB}$ 坐标为 (φ,χ),A、B 点间的方位角 η 满足:

$$\cos\eta=\frac{\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OB}}{|\overrightarrow{OA}||\overrightarrow{OB}|}=\cos\theta\cdot\cos\varphi\cdot\cos(\psi-\chi)+\sin\theta\cdot\sin\varphi$$

并且有

$$r_{ij}^{\theta\psi}=\sqrt{|x_i^{\mathrm{A}}-x_j^{\mathrm{B}}|^2+|y_i^{\mathrm{A}}-y_j^{\mathrm{B}}|^2+|z_i^{\mathrm{A}}-z_j^{\mathrm{B}}|^2}$$

考虑距离因素,如

$$P_{ij}^{\theta\psi}(\eta,r)=\begin{cases}P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)+\left(1-\dfrac{r_{ij}^{\theta\psi}}{r_{ijmax}}\right)\cdot[0.9-P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)],\\ r_{\max}<r_{\max\text{防线}}\\ P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)+\left(1-k\dfrac{r_{ij}^{\theta\psi}}{r_{ijmax}}\right)\cdot[0.9-P_{ij}^{\theta\psi}(\eta)],\\ r_{\max}\geqslant r_{\max\text{防线}},1\leqslant k\leqslant r_{ijmax}/r_{ij}^{\theta\psi}\end{cases} \tag{4}$$

当 $P(\eta)\leqslant P(r_{\max})\leqslant 0.9$ 时,$1\leqslant k\leqslant\dfrac{r_{ijmax}}{r_{ij}^{\theta\psi}}$,$r_{ij}^{\theta\psi}\neq 0$。

那么,被击中的第 j 类目标平均数量为:

$$P_{ij}^{\theta\psi}\nu_{ij}X_i=\sum_{\psi=1}^{X_j}\sum_{\theta=1}^{X_i}P_{ij}^{\theta\psi}\gamma_{ij}^{\theta\psi},\ \forall i=\overline{1,n},j=\overline{1,m}$$

$$\sum_{\psi=1}^{X_j}\sum_{\theta=1}^{X_i}\gamma_{ij}^{\theta\psi}=\nu_{ij}X_i$$

其中:ν_{ij} 表示第 i 类武器攻击第 j 类目标的配额,$0\leqslant\nu_{ij}\leqslant 1$,$\sum_{j=1}^{m}\nu_{ij}=1$;$X_i$ 表示第 i 类武器当前数量;$\overline{1,n}$ 表示1至 n 中的任何一个数;$[\gamma_{ij}^{\theta\psi}]$ 为指派矩阵,并有如式(5)所示含义。

$$\gamma_{ij}^{\theta\psi}=\begin{cases}1,\ \text{如果目标}j\text{位于点}\psi,\ \text{目标}i\text{从点}\theta\text{攻击}j\\0,\ \text{否则}\end{cases} \tag{5}$$

在第 $t_k(k=\overline{1,K})$ 战斗时刻结束后未被击中的目标数量为:

$$X_j(t_{k+1})=X_j(t_k)-\sum_{\psi=1}^{X_j(t_k)}\sum_{\theta=1}^{X_i(t_k)}P_{ij}^{\theta\psi}\gamma_{ij}^{\theta\psi} \tag{6}$$

式中,$t_{k-1}\rightarrow t_k$ 为多个导弹发射装置单次齐射周期。

定义 a_{es} 为权重系数,表示甲方(乙方)攻击乙方(甲方)被动目标的战术优先级,有 $\sum a_{es}=1$;$e=1,s=\overline{1,m}$;$e=2,s=\overline{1,n}$。

那么目标损失函数可以表示为:

$$J_e(\nu)=\sum a_{es}J_{es}$$

$$J_{es}=[X_i^2(t_{k+1})-X_j^2(t_{k+1})]$$

$$\begin{cases}\text{当 }e=1,s=\overline{1,m}\text{ 时},i=\overline{n+1,n+m},j=\overline{1,n}\\ \text{当 }e=2,s=\overline{1,n}\text{ 时},i=\overline{1,m},j=\overline{n+1,n+m}\end{cases}$$

其中,索引 i,j 分别代表主动武器和被动目标。

损失函数有这样的思想,即每一方都期望敌方主、被动目标最终数量最小,而使己方主、被动目标数量最大化,并且通过权重系数控制敌方主动武器数量的衰减速度。那么有 $J_{\text{甲}}\rightarrow\min$,$J_{\text{乙}}\rightarrow\min$。

1.3 武器目标动态分配算法

使用纳什均衡的武器目标分配算法共分四个阶段:在第一阶段获取作战双方的目标信息,如数量、速度、距离、飞近时间、方位等;在第二阶段根据目标信息和命中率函数计算命中率;在第三阶段构建策略空间和策略收益;在第四阶段寻找最优策略。

1.3.1 获取作战双方武器目标信息

在作战期间,侦察预警探测系统全天候实时监测各种飞行目标,并获得如出发位置、数量、速

度、距离、实时空间位置、方位等信息,对获取的敌方信息进行鉴别,如判断是否佯攻、使用欺骗手段和制造假象等。分析敌方作战行动意图、策略和可能攻击目标区域。

在获取目标信息后,可以利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)等方法根据目标速度、高度、距离和方位角等因素进行多因素综合威胁排序。

1.3.2　计算命中率

基于 1.2 节中获得的距离、方位等信息,根据式(4)计算命中率。在计算命中率时,还应综合考虑电子对抗环境对于导弹命中率的影响,比如地面防御系统电子干扰装置会对空袭目标的命中率产生直接积极影响,也可能会对己方拦截导弹产生微弱消极影响。电子对抗影响因素主要跟电子干扰装置的功率有关。

$$P_{ij} = P_{ij_{\max}} \cdot e^{-\mu_i \cdot \lambda_d} \cdot e^{-\mu_j \cdot \lambda_k} \tag{7}$$

1.3.3　构建策略空间和策略收益

策略空间与控制参数的数量和取值步长有关,设步长为 l,控制参数 ν_{ij} 数量为 q,则单次齐射目标分配策略空间数为 $(1/l)^q$。

1.3.4　寻找最优策略

首先获得所有符合策略收益的策略解集合,然后根据纳什均衡解定义,在有效解的集合中选取符合作战双方目标损失函数的均衡解。在均衡解的选取过程中应注意,纳什均衡解可能有一个或多个,此时应根据极大极小原理进行筛选(基于最坏情况考虑,争取最好的结果)。

2　实例分析

2.1　基本想定

作战想定:攻击方首先使用陆、海、空平台发射若干战术导弹打击防御方地面防御系统,企图瘫痪或消灭防御方防空力量,然后指派战斗机编队护航轰炸机编队对防御方重要目标实施打击。防御方实施分层分段拦截,轰炸机的威胁指数最高,战术导弹其次。

所研究的目标动态分配是指在连续动态作战中不同阶段的目标分配,阶段划分是由地面拦截导弹的射程决定的,比如首先是远程拦截,而后进行中近程拦截(如图 1 所示)。

2.2　模型构建

设甲乙两方参与攻防作战,甲方为空袭系统,组成包括轰炸机、导弹、战斗机和电子战飞机;乙方为地面防御系统,组成包括导弹发射装置、雷达站、电子对抗装置和指令站等。

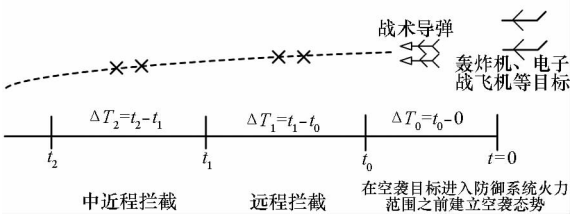


图 1　阶段划分示意图

Fig. 1　Illustration of stage division

甲乙双方对抗关系如图 2 所示。图中:$X_1(t_0)$ 为反辐射导弹的数量,攻击地面电子对抗装置、雷达站等目标;$X_2(t_0)$ 为来袭巡航导弹的数量,攻击地面所有目标;$X_3(t_0)$ 为电子战装置的数量,它们会对导弹命中率产生影响;$X_4(t_0)$ 为轰炸机、空中指挥机等的数量,它们对地面防御目标威胁最大;$X_k(t_0)$ 为战斗机携载干扰弹数量,它们可以保护轰炸机;$X_5(t_0)$ 为地空导弹发射装置数量,$X_{51}(t_0)$ 为中近程导弹数量,$X_{52}(t_0)$ 为远程导弹数量;$X_6(t_0)$ 为电子对抗装置的数量,它们会对来袭导弹和拦截导弹的命中率产生影响;$X_7(t_0)$ 为多功能相控阵雷达站的数量,雷达站可以同时跟踪多个空中目标;$X_8(t_0)$ 为指挥所雷达站数量。其中,$X_i(N_i)$,$i=\overline{1,8}$;$X_k(N_k)$ 为当前初始数量。X_i 给出了每种类型目标的数量,ν_{ij} 表示第 i 类武器

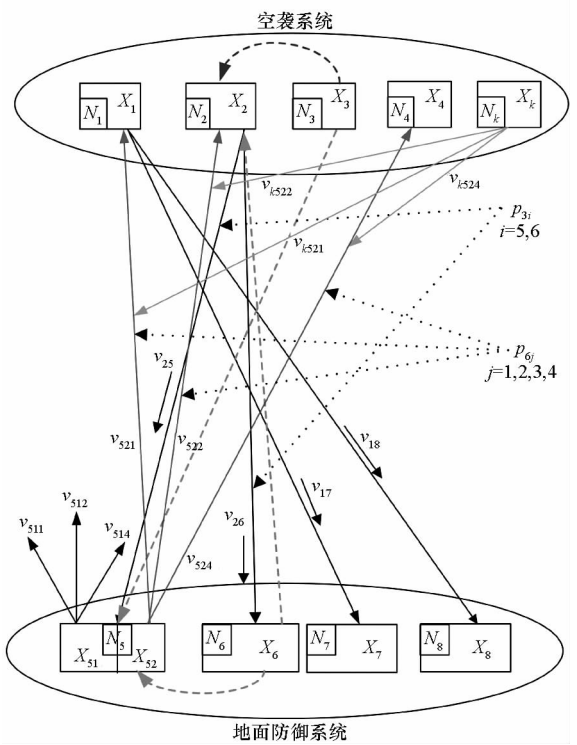


图 2　甲乙双方对抗关系示意图

Fig. 2　Illustration of A-B counters relationship

以标准命中率 p_{ij} 打击第 j 类目标的配额。

首轮(远程拦截防御阶段)双方对抗过程如图 3 所示,空袭系统首先发射导弹打击地面防御系统,防御系统远程导弹实施拦截打击。

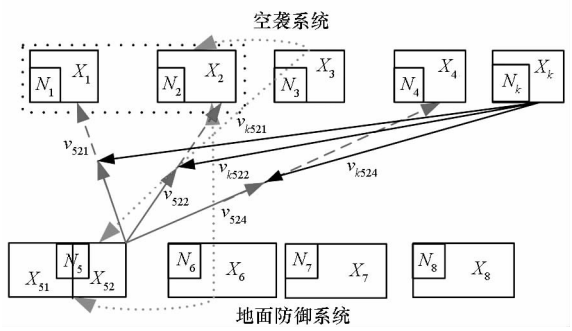


图 3 首轮甲乙双方对抗关系示意图

Fig. 3 Illustration of A-B counters relationship in the first round

综合数学模型有:

$$\begin{cases} X_1(t_1) = X_1(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_1(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{521}(t_d)} P_{521}^{\theta\psi}\gamma_{521}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{521}^D \\ X_2(t_1) = X_2(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_2(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{522}(t_d)} P_{522}^{\theta\psi}\gamma_{522}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{522}^D \\ X_4(t_1) = X_4(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_4(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_{524}(t_d)} P_{524}^{\theta\psi}\gamma_{524}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{524}^D \\ \underset{(D)}{\text{目标分配}}: \begin{cases} \sum_{\theta,\psi} P_{ij}^{\theta\psi}\cdot\gamma_{ij}^{\theta\psi} \to \max \\ \sum_{\theta,\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = X_i(t_d) \\ i = 52, j = 1,2,4 \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} X_{521}(t_d) = \nu_{521}\cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{521}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_k(t_0)} P_{k521}^{\theta\psi}\gamma_{k521}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{k521}^K \\ X_{522}(t_d) = \nu_{522}\cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{522}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_k(t_0)} P_{k522}^{\theta\psi}\gamma_{k522}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{k522}^K \\ X_{524}(t_d) = \nu_{524}\cdot X_{52}(t_0) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{524}(t_0)} \sum_{\theta=1}^{X_k(t_0)} P_{k524}^{\theta\psi}\gamma_{k524}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{k524}^K \\ \underset{(K)}{\text{目标分配}}: \begin{cases} \sum_{\theta,\psi} P_{ij}^{\theta\psi}\cdot\gamma_{ij}^{\theta\psi} \to \max \\ \sum_{\theta,\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = \nu_{ij}\cdot X_k(t_0) \\ i = k, 52, j = 1,2,4 \end{cases} \end{cases} \tag{9}$$

次轮(中程拦截防御阶段)双方对抗过程如图 4 所示,首轮拦截打击之后,由中近程导弹负责对成功突防的导弹和轰炸机进行拦截。

综合数学模型有:

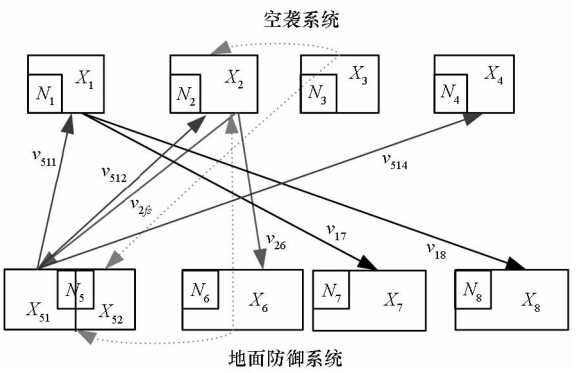


图 4 次轮甲乙双方对抗关系示意图

Fig. 4 Illustration of A-B counters relationship in the second round

$$\begin{cases} X_1(t_{2d}) = X_1(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_1(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{511}^{\theta\psi}\gamma_{511}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{511}^D \\ X_2(t_{2d}) = X_2(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_2(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{512}^{\theta\psi}\gamma_{512}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{512}^D \\ X_4(t_2) = X_4(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_2(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_{51}(t_1)} P_{514}^{\theta\psi}\gamma_{514}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{514}^D \\ \underset{(D)}{\text{目标分配}}: \begin{cases} \sum_{\theta,\psi} P_{ij}^{\theta\psi}\gamma_{ij}^{\theta\psi} \to \max \\ \sum_{\theta,\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = \nu_{ij}\cdot X_{51}(t_1) \\ i = 51, j = 1,2,4 \end{cases} \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} X_{fs}(t_2) = X_{fs}(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_{fs}(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_{2d})} P_{2fs}^{\theta\psi}\gamma_{2fs}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{2fs}^K \\ X_6(t_2) = X_6(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_6(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_2(t_{2d})} P_{26}^{\theta\psi}\gamma_{26}^{\theta\psi}\right)\cdot l_{26}^K \\ X_7(t_2) = X_7(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_7(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_1(t_{2d})} P_{17}^{\theta\psi}\gamma_{17}^{\theta\psi}\right) \\ X_8(t_2) = X_8(t_1) - \left(\sum_{\psi=1}^{X_8(t_1)} \sum_{\theta=1}^{X_1(t_{2d})} P_{18}^{\theta\psi}\gamma_{18}^{\theta\psi}\right) \\ \underset{(K)}{\text{目标分配}}: \begin{cases} \sum_{\theta,\psi} P_{ij}^{\theta\psi}\gamma_{ij}^{\theta\psi} \to \max \\ \sum_{\theta,\psi} \gamma_{ij}^{\theta\psi} = \nu_{ij}\cdot X_2(t_{2d}) \\ i = 2, j = fs, 6 \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

2.3 实验分析

假设初始条件如下:$X_1 = 14$, $X_2 = 14$, $X_3 = 12$, $X_4 = 14$, $X_5 = 8$, $X_{51} = 24$, $X_{52} = 32$, $X_6 = 2$, $X_7 = 4$, $X_8 = 2$; $a_{11} = 0.25$, $a_{12} = 0.25$, $a_{13} = 0.45$, $a_{14} = 0.05$, $a_{21} = 0.35$, $a_{22} = 0.35$, $a_{23} = 0.25$, $a_{24} = 0.05$, $P_{521} = 0.5$, $P_{522} = 0.5$, $P_{524} = 0.5$, $P_{3521} = 0.5$, $P_{3522} = 0.5$, $P_{3524} = 0.5$。

首轮对抗结果如表 1 ~3 所示。

表 1　首轮对抗后数量变化

Tab. 1　Quantity variation after the first round combat

	武器装备		初值	Nash	Pareto
目标类型	反辐射导弹	X_1	14	8. 93	8. 86
	巡航导弹	X_2	14	8. 8	8. 86
	轰炸机	X_4	14	11. 27	11. 27
	地空导弹	X_{52}	32	13	13
		X_{521}		10. 14	10. 27
		X_{522}		10. 4	10. 27
		X_{524}		5. 46	5. 46
	P_3	X_3	12	0	0

表 2　首轮打击配额

Tab. 2　The first-round strike quota

	配额	打击对象	Nash	Pareto
空中打击配额	v_{3521}	$X_3 \rightarrow X_{521}$	0. 39	0. 315
	v_{3522}	$X_3 \rightarrow X_{522}$	0. 4	0. 315
	v_{3524}	$X_3 \rightarrow X_{524}$	0. 21	0. 37
陆上打击配额	v_{521}	$X_{52} \rightarrow X_1$	0. 39	0. 38
	v_{522}	$X_{52} \rightarrow X_2$	0. 4	0. 38
	v_{524}	$X_{52} \rightarrow X_4$	0. 21	0. 24

表 3　首次对抗损失和收益

Tab. 3　Countering losses and gains of the first round

	指标	Nash	Pareto
空中损益	J_K	0. 495 26	0. 495 24
	$J1a/J2a$	0. 67/0. 75	0. 71/0. 71
	$J3a/J4a$	0. 20/1	0. 2/1
陆上损益	J_D	0. 447 23	0. 447 11
	$J1b/J2b$	0. 33/0. 25	0. 29/0. 29
	$J3b/J4b$	0. 8/0. 88	0. 8/0. 88
指标和	$J_K + J_D$	0. 942 5	0. 942 4

从表 1 ~3 中可以看出,基于纳什均衡和帕累托最优方法的实验结果较为相近,攻击方共有 13 个目标被拦截。从打击配额来看,两种方法的打击策略略有差异,纳什均衡方法分配了 79% 的火力(高于权重期望系数 0. 7)用于拦截导弹类目标,而分配了 21% 的火力(低于权重期望系数 0. 3)用于拦截轰炸机和空中指挥机;帕累托最优方法分配了 76% 的火力拦截导弹类目标,分配了 24% 的火力拦截指挥机和轰炸机。帕累托最优方法更接近决策意志。在实际作战中,由于指挥机、轰炸机的威胁相对更大,往往会优先重点拦截轰炸机和指挥机,从这个角度来看帕累托最优算法相对更优,更符合打击策略分配需求。从攻击方的角度来看,由于轰炸机、指挥机的价值更大,所以投入更多的干扰弹进行防护(37% >21%),帕累托最优方法获得的策略显然优于纳什均衡方法。因此,在首轮对抗中,双方的最优策略分别是 $\nu_{K,D}^{P}$(0. 315, 0. 315,0. 37;0. 38,0. 38,0. 24)。

次轮对抗结果如表 4 ~6 所示。

表 4　次轮对抗后数量变化

Tab. 4　Quantity variation after the second round combat

	武器装备		初值	Nash	Pareto
目标类型	反辐射导弹	X_1	9	2	3
	巡航导弹	X_2	9	2	2
	轰炸机	X_4	11	1. 46	0. 38
	地空导弹	X_{51}	24	0	0
	电子对抗装置	X_6	2	2	2
	多功能雷达站	X_7	4	1. 93	3. 57
	指令站	X_8	2	2	0
	发射装置	X_5	8	5. 3	5. 39

表 5　次轮打击配额

Tab. 5　The second round strike quota

	配额	打击对象	Nash	Pareto
空中打击配额	v_{17}	$X_1 \rightarrow X_7$	1	0. 16
	v_{18}	$X_1 \rightarrow X_8$	0	0. 84
	v_{26}	$X_2 \rightarrow X_6$	0	0
	v_{25}	$X_2 \rightarrow X_5$	1	1
陆上打击配额	v_{511}	$X_{51} \rightarrow X_1$	0. 27	0. 2
	v_{512}	$X_{51} \rightarrow X_2$	0. 2	0. 21
	v_{514}	$X_{51} \rightarrow X_4$	0. 53	0. 59

表 6　次轮对抗损失和收益

Tab. 6　Losses and gains of the second round

	指标	Nash	Pareto
空中损益	J_K	0. 492 33	0. 484 95
	$J1a/J2a$	0. 53/0. 06	0. 27/0. 11
	$J3a/J4a$	0. 84/0. 44	0. 99/0. 45
陆上损益	J_D	0. 466 47	0. 458 2
	$J1b/J2b$	0. 47/0. 94	0. 73/0. 89
	$J3b/J4b$	0. 16/0. 82	0. 01/1
指标和	$J_K + J_D$	0. 958 8	0. 943 1

从表4~6可以看出,地空导弹全部耗尽,在纳什均衡算法下轰炸机仍然剩余1架,而在帕累托最优算法下分配了59%的导弹拦截轰炸机,轰炸机被完全击毁,地面防御系统受到轰炸机威胁最小(帕累托最优算法占优)。同时,从攻击方角度来看,在纳什均衡下把全部配额都用来打击多功能雷达站,却又未将其完全击毁,而在帕累托最优算法下将84%的配额用来打击指令站是相对较优的选择,指令站已经全部被击毁。因此,在次轮对抗中,双方的最优对抗策略是 $\nu_{K,D}^{P}$(0.16,0.84,0,1;0.2,0.21,0.59)。最后,地面防御方指令站被全部击毁,地空拦截导弹消耗殆尽并丧失拦截能力,攻击方没有了空中轰炸能力,损失巨大。

3 结论

本文指出了国内现有针对武器目标分配问题研究的优势和不足之处,重点阐述使用基于双方动态博弈的思想解决大规模作战武器目标分配问题的科学性和合理性,构建了基于双方博弈的攻防对抗综合数学模型,并以实例证明使用纳什均衡、帕累托最优方法可以有效解决动态武器-目标分配问题。

1)基于博弈论方法综合考虑作战双方的策略和行动方案,保证了决策方案在实战应用中的科学有效性。

2)提出新颖的建模思维,通过引入状态变量、控制参数和权重系数来构建策略空间和策略收益,对武器目标分配问题进行了求解,获得了作战双方各自最优战术策略。

参考文献(References)

[1] 刘振林, 唐苏妍, 葛伟. 创造性思维粒子群优化的武器目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 4-9.
LIU Zhenlin, TANG Suyan, GE Wei. Particle swarm optimization based on creative thinking four solving weapon target assignment problem[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 4-9. (in Chinese)

[2] 方卫国, 石小艳. 多层防御模式下武器目标分配决策的群体智能优化算法[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(7): 76-84.
FANG Weiguo, SHI Xiaoyan. Swarm intelligence optimization algorithms for weapon target allocation problem in multilayer defense scenario[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(7): 76-84. (in Chinese)

[3] 杨晓凌, 邱涤珊, 彭黎, 等. 改进类电磁算法在武器目标分配问题中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(6): 150-153.
YANG Xiaoling, QIU Dishan, PENG Li, et al. Application of modified electromagnetism-like algorithm in weapon-target assignment problem[J]. Chinese Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(6): 150-153. (in Chinese)

[4] 张涛, 于雷, 魏贤智, 等. 改进遗传算法的超视距协同多目标攻击决策[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5): 137-140.
ZHANG Tao, YU Lei, WEI Xianzhi, et al. Decision-making for cooperative multiple target attack based on adaptive pseudo-parallel genetic algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(5): 137-140. (in Chinese)

[5] 刘传波. 基于Memetic算法的动态武器目标分配问题研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 34-37.
LIU Chuanbo. Research on dynamic weapon target assignment problem with a kind of Memetic algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(10): 34-37. (in Chinese)

[6] 雷兴明, 邢昌风, 吴玲. 基于分布式约束优化的武器目标分配问题研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 128-130.
LEI Xingming, XING Changfeng, WU Ling. Research on weapon target assignment problem based on distributed constraint optimization[J]. Computer Engineering, 2012, 38(7): 128-130. (in Chinese)

[7] 彭星光, 高晓光. 基于记忆辅助动态UMDA的UCAV编队动态目标分配[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(10): 2166-2170.
PENG Xingguang, GAO Xiaoguang. Dynamic target assignment method for UCAV feet using memory enhanced dynamic UMDA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(10): 2166-2170. (in Chinese)

[8] 杨山亮, 黄健, 刘洋, 等. 基于遗传算法的联合火力WTA问题研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(3): 61-63, 136.
YANG Shanliang, HUANG Jian, LIU Yang, et al. Analysis of weapon target assignment problem in joint fire strike solving by genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2012, 29(3): 61-63, 136. (in Chinese)

[9] 马飞, 曹泽阳, 刘晖. 基于博弈论的目标分配策略空间构建与搜索[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9): 1941-1945.
MA Fei, CAO Zeyang, LIU Hui. Construction and search of strategy space of target assignment based on game theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(9): 1941-1945. (in Chinese)

[10] 张毅, 姜青山, 陈国生. 基于模糊-灰色非合作Nash博弈的多组动态武器-目标分配方法[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 26-32.
ZHANG Yi, JIANG Qingshan, CHEN Guosheng. An approach of basing-on fuzzy-grey noncooperative Nash games to multi-team dynamic weapon-target assignment[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2012, 34(1): 26-32. (in Chinese)

[11] 熊义杰. 现代博弈论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
XIONG Yijie. The foundation of modern game theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[12] Чжан Сяньцзянь. Конфликтно-оптимальное управление ресурсами многообъектных систем летательных аппаратов наземного и воздушного базирования[D]. Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2013.
ZHANG Xianjian. Conflict optimal resource management of ground and air-based multi-object aircraft[D]. Russia: Bauman Moscow State Technical University, 2013. (in Russian)