

防空系统建模与目标价值排序方法*

杨 垚¹, 陈 超¹, 刘彦君², 刘 忠¹, 包卫东¹

(1. 国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073; 2. 总后勤部信息中心 北京 100036)

摘 要:针对当前防空系统模型的构建和评估偏向于定性处理以及仅考虑其结构特性而忽视了系统中目标与关系自身属性的问题,在分析现有模型与评估方法的基础上,提出了基于邻接矩阵的防空系统模型,定义了能力评估向量,采用目标对体系能力贡献程度的目标价值综合评价方法,并引用 Pareto 占优中等级前沿和拥挤距离的思想提出了目标等级和目标离散度的概念,形成了非劣性价值排序算法,同时使用加权以及性价比方法和其他网络评估方法排序,采用自身设计以及随机生成案例进行仿真实验,结果验证了基于邻接矩阵的防空系统模型以及价值排序算法的有效性。

关键词:防空系统; 目标价值; 邻接矩阵; 非劣性排序

中图分类号:TP391 **文献标志码:** A **文章编号:**1001-2486(2015)01-179-08

Air defense system modeling and target value ranking

YANG Yao¹, CHEN Chao¹, LIU Yanjun², LIU Zhong¹, BAO Weidong¹

(1. Science and Technology on Information System Engineering key Laboratory,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. PLA Logistics Information Center, Beijing 100036, China)

Abstract: To solve the problem of air defense system modeling and assessing which is partial to determine the nature, only paying attention to system structure and overlooking entity and relation property in system, some efforts have to be done. On the basis of recent model and assess method, put forward air defense system model based on adjacency matrix, define capacity assess vector, use the target value evaluation method that was based on target contribution degree to system capacity and put forward target rank and discrete degree based on Pareto dominance and crowding distance so as to form Non-inferiority rank algorithm, and use the weighting and cost performance and other network access methods as the comparison, establish random examples for simulation, simulation result proves that the air defense system model based on Markov logic and Non-inferiority value rank algorithm are efficiency.

Key words: air defense system; target value; adjacency matrix; non-inferiority rank

防空作战对于新时期的信息化战争具有重要意义,研究防空作战系统的体系能力形成机制将深刻地揭示防空作战系统的运作规律,为我军进行防空系统能力构建以及选择破击敌方防空系统体系具有重要意义。防空系统中目标价值的研究是防空作战系统研究的核心,因此,希望建立防空系统的体系能力模型,并在此基础上对防空系统各目标价值进行排序,为防空系统体系破击中的目标选择提供可靠的参考。

防空系统体系能力主要在于系统中各目标的能力贡献及其结构的黏合作用。目前研究防空系统的典型模型是 FINC (Fire, Intelligence, Networking, Command and Control (C2))^[1-2] 模

型,通过 FINC 方法对防空系统建模,提供对系统信息延迟、协同能力、侦查性能等指标系数来对系统体系能力进行度量。同时应用社会网络分析方法和理论包容防空系统中不同性质不同结构的目标,指出了信息流动对体系能力的倍增作用。但是该模型对体系能力的测度过分侧重于信息流动以及结构可达,忽视了目标自身的能力,因此希望借鉴 FINC 模型的方法论,并在此基础上深化对防空网络中目标与关系的性质描述,同时引入邻接矩阵以及可达矩阵来模拟防空网络的信息流程,建立统一的防空系统体系能力模型。

目标价值评估是防空作战中目标选择的核心,传统的目标价值评估方法将目标的价值等同

* 收稿日期:2014-05-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71101149,91024006)
作者简介:杨垚(1981—),男,北京人,博士研究生,E-mail:gfdluyongzhong@163.com;
陈超(通信作者),男,副教授,博士,E-mail:lyz22552244@163.com

于目标的显著性,并提出核心性和声望两类发现重要目标的指标^[3],度量方法包括节点度、接近度、介数等。美国卡耐基·梅隆大学教授 David Krackhardt 和 Kathleen Carley^[4]提出了基于五个主要关系的 PCANS (Precedence, Commitment of resources, Assignment of individuals to tasks, Networks of relations among personnel)模型的元网络方法,用“认知载荷”和“任务排他性”两个指标来衡量网络中行动者的重要程度。赵毅寰等^[5]认为基于节点移除的方法可能导致网络拓扑结构变化的不足,提出了一种利用节点间关联特性的网络节点重要性评价方法,定义的节点重要性贡献矩阵考虑了不同节点间联系对节点重要度的影响。邓宏钟等^[6]则通过 Multi-Agent 仿真探索拓扑结构对复杂网络抗毁性的影响。而邓志宏等^[7]指出目标的价值取决于目标个体价值和目标网络价值,并基于网络簇系数将目标的这两种价值融合在一起,形成了目标的最终价值。这样的目标价值评估思路已经打破了以往网络节点重要度评估仅仅关注拓扑结构的弊端,但是这种基于抽象概念的价值评估指标无法同网络自身的体系能力进行有效的对接,不能体现体系能力的变化。

1 防空系统建模

1.1 防空系统模型描述

典型的防空系统涉及众多的雷达目标,导弹阵地,指挥中心等性能各异的目标,同时包含了大量的通信关系、上报关系、指控关系等关系。如图 1 所示,我们借鉴 FINC 理论设计了防空系统模型,其中拥有三类实体节点■:表示导弹阵地,●:表示指挥中心,▲:表示雷达目标;以及与防空能力密切相关的两类关系:指挥中心与导弹阵地之间指挥关系与上报关系,指挥中心与雷达目标之间的指挥关系与上报关系,指挥中心与指挥中心之间的指挥关系与上报关系。

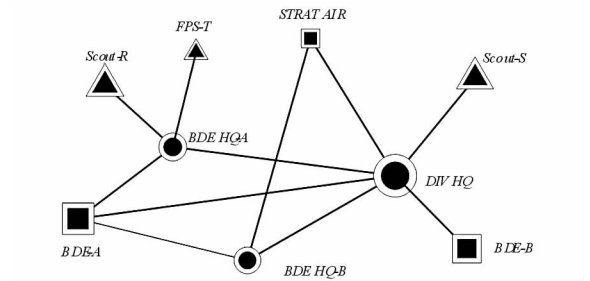


图 1 防空系统模型实例

Fig. 1 An example of air defense system

图 2(a)给出了雷达的性能以及能力指标:雷达的名称、类型、性能以及能力,雷达性能包括位

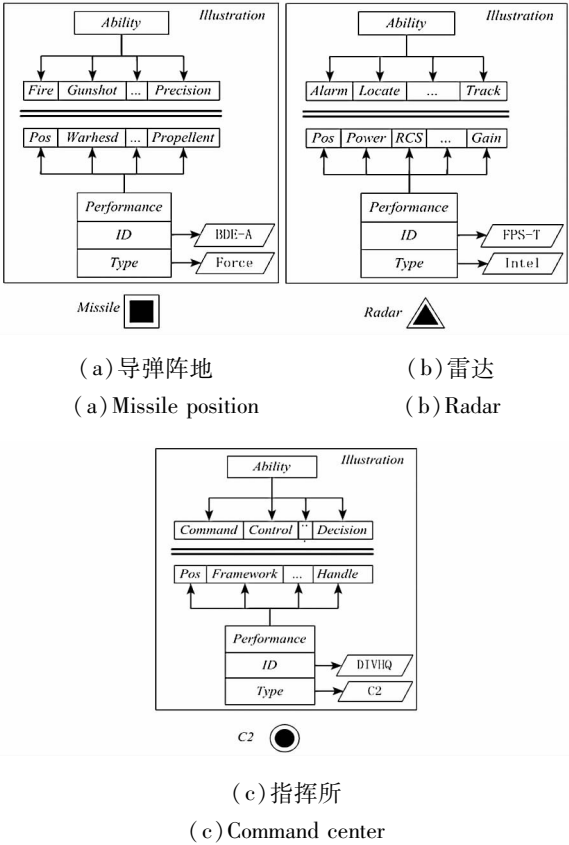


图 2 防空系统目标说明

Fig. 2 Targets illustration of air defense system

置、发射功率、雷达增益、波长、带宽、接收机噪声系数等,雷达能力包括预警、定位、跟踪等;图 2 (b)给出了导弹的性能以及能力指标:导弹的名称、类型、性能以及能力,导弹性能包括位置、分弹头数量、弹头推进剂等,导弹能力包括打击、射程、命中精度等;图 2(c)给出了指挥所的性能以及能力指标:指挥所的名称、类型、性能以及能力,指挥所性能包括位置,人员构成、处理设备等,能力包括指控能力、决策能力等。

图 3(a)(b)(c)分别给出了上级指挥中心与下级指挥中心、指挥中心与导弹阵地、指挥中心与雷达的关系说明:关系的名称(指挥和上报关系)、方向(1 为指挥关系、-1 为上报关系)、性能,指挥与上报关系性能均为命令、成功概率以及优先级。

考虑防空系统防空能力的形成,把防空系统分成防空预警子系统、火力覆盖子系统两个子系统加以考虑。图 4 给出了防空系统中两个子系统的示意图。防空预警子系统运行规则为:系统中各个预警雷达(导弹阵地的预警能力为 0)将预警到的信息传递给与之相关联的指挥中心进行综合处理,然后低级指挥所再传递给上级指挥所,最终最高级指挥所进行最后的警情综合处理,形成整

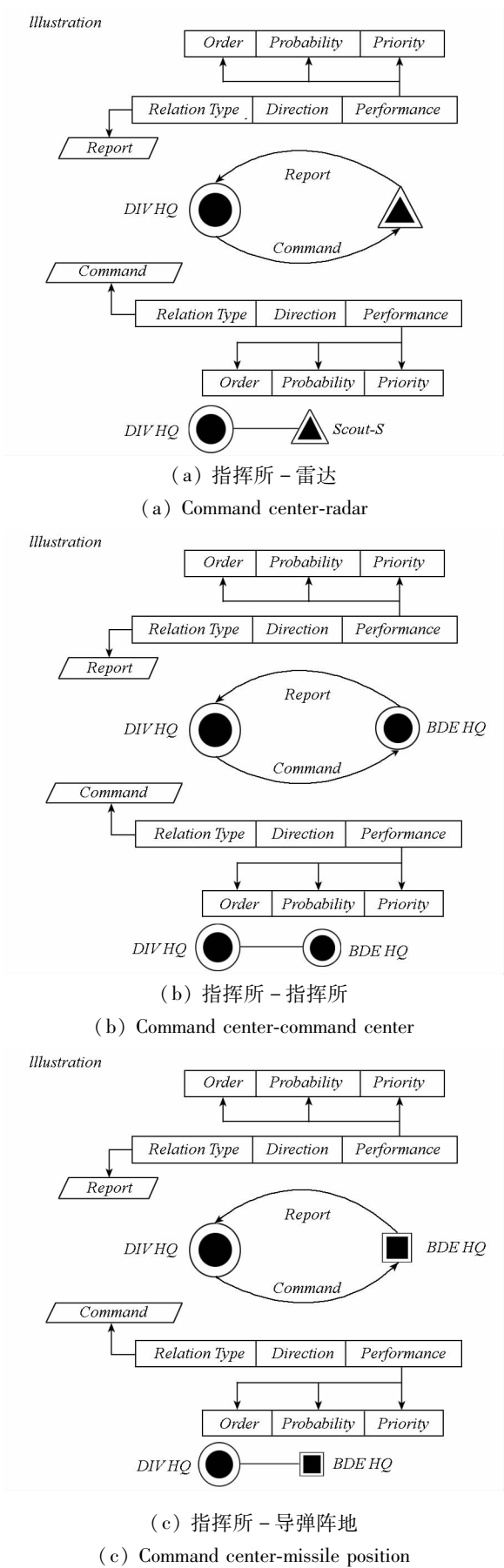


图 3 防空系统关系说明

Fig. 3 Relations illustration of air defense system

个防空系统的防空预警能力;火力覆盖子系统运行规则为:最高级指挥所在综合分析预警信息的基础上,对与之具有指挥关系或者间接具有指挥关系的导弹阵地下达作战命令(雷达的火力覆盖为 0),形成整个防空系统的火力覆盖能力。

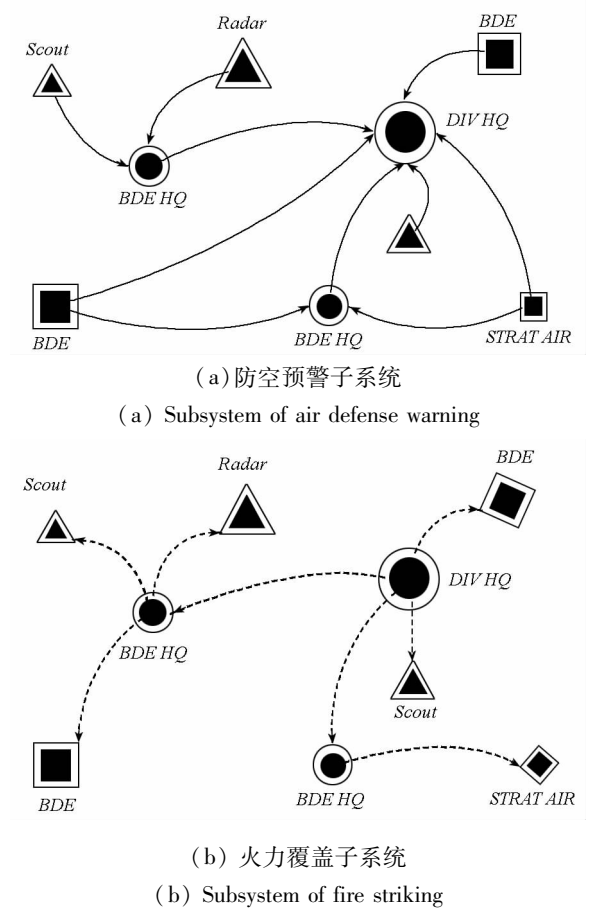


图 4 防空系统子系统示意图

Fig. 4 Illustration for subsystem of air defense system

1.2 防空系统能力向量

对于防空系统防空能力的形成过程来说,防空系统预警雷达工作探测来袭目标,将预警到的信息传递给指挥中心进行处理,指挥中心在分析来袭目标的基础上向导弹阵地下达作战命令,形成防空系统的有效火力覆盖,最终形成整个防空系统的防空能力。为了衡量防空系统,采用包括预警范围、预警时间、拦截纵深、指挥控制等衡量防空系统常用的能力指标来构建防空能力指标向量,其表达式 $\psi_G^{N_G}$ ($N_G = 4$),如式(1)所示, φ_G^i 代表防空系统的第 i 个能力指标,这四个能力指标的数值与能力都是正相关的。

$$\psi_G^{N_G} = [\varphi_G^1, \varphi_G^2, \varphi_G^3, \varphi_G^4] \quad (1)$$

预警范围^[8]主要是由整个防空体系中以雷达经过预警信息融合形成,预警时间^[9-10]主要体现在防空系统对来袭目标预警能力的体现,系统预

警时间由系统中各个雷达预警时间融合而成,拦截纵深^[11-13]体现了系统中火力打击能力的指标,指挥控制^[14-17]能力由 OODA loop^[18]作战流程数量体现。

对于防空系统的具体运行机制以及相应的体系能力的形成,借助邻接矩阵及可达矩阵来处理,其具体过程为:

- 1) 构建系统的邻接矩阵 $\mathbf{M}$, 并计算出可达矩阵 $\mathbf{A}$;
- 2) 从可达矩阵中选出由雷达到指挥中心构成的上报关系子矩阵 $\mathbf{H}$;
- 3) 计算出所有雷达的预警时间向量 $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, k 代表雷达的个数;
- 4) $\mathbf{C}(:, i) = \mathbf{T} * \mathbf{H}(:, i)$, $i = 1:l$, l 代表指挥所的个数;
- 5) $Ct(i) = \max \mathbf{C}(:, i)$, $i = 1:l$; $Ct(i)$ 代表指挥所 i 的预警时间;
- 6) $[CT, j] = \max Ct$; CT 代表防空系统的预警时间, j 代表指挥中心的编号;
- 7) 从可达矩阵中取出由指挥中心 j 可达的导弹阵地以及雷达;
- 8) 根据 7) 中的可达导弹阵地计算拦截纵深;
- 9) 根据 7) 中的可达雷达计算预警区域;
- 10) 遍历可达矩阵 $\mathbf{A}$ 中的 OODA 环路;
- 11) 形成了由预警区域、预警时间、拦截纵深、指挥控制四个指标组成的能力向量 $\boldsymbol{\psi}_G^{Nc}$;

2 基于价值向量的目标价值排序

防空系统的体系能力主要来源于系统中单个目标的能力贡献以及目标间的结构黏合,而评判防空系统中的单个目标的价值也主要取决于其对体系能力的贡献。主流的网络资本、可达性、网络熵等网络测度模型主要关注于网络的拓扑结构,却忽视了网络节点自身的能力贡献;我们认为防空系统的目标价值主要体现在其对体系能力的贡献程度上,而与目标个体价值和结构价值没有直接关系,因此,希望基于防空系统中单个目标被移除系统后体系能力的改变程度来衡量防空系统中目标的价值,并给出两种类型的目标价值排序方法,并对比分析其优缺点及适用范围。

假设防空系统 G 中存在 K 个待评价目标 $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_K\}$, 称为目标集;对目标的价值分析主要考虑上述给出的防空系统能力向量中的四个因素 $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, 称为因素集。那么,如式(2)所示,防空系统目标集中的第 i 个目标 t_i 的价值 V_{t_i} 为,

$$\begin{aligned} V_{t_i} &= 1 - \frac{\boldsymbol{\psi}_{G-t_i}^M}{\boldsymbol{\psi}_G^M} \\ &= 1 - \frac{[u_1(G-t_i) \quad u_2(G-t_i) \quad \dots \quad u_M(G-t_i)]^T}{[u_1(G) \quad u_2(G) \quad \dots \quad u_M(G)]^T} \\ &= 1 - \frac{[\varphi_{G-t_i}^1 \quad \varphi_{G-t_i}^2 \quad \dots \quad \varphi_{G-t_i}^M]^T}{[\varphi_G^1 \quad \varphi_G^2 \quad \dots \quad \varphi_G^M]^T} \\ &= 1 - \left[\frac{\varphi_{G-t_i}^1}{\varphi_G^1} \quad \frac{\varphi_{G-t_i}^2}{\varphi_G^2} \quad \dots \quad \frac{\varphi_{G-t_i}^M}{\varphi_G^M} \right]^T \\ &= \left[1 - \frac{\varphi_{G-t_i}^1}{\varphi_G^1} \quad 1 - \frac{\varphi_{G-t_i}^2}{\varphi_G^2} \quad \dots \quad 1 - \frac{\varphi_{G-t_i}^M}{\varphi_G^M} \right]^T \\ &= [v_{t_i}^1 \quad v_{t_i}^2 \quad \dots \quad v_{t_i}^M]^T \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}_{G-t_i}^M$ 表示防空系统 $G-t_i$ 的 M 维体系能力向量,由式(7)可知,目标 t_i 的价值向量 $\mathbf{V}_{t_i}$ 是一个 4 维向量,称为目标价值向量;并且 $v_{t_i}^i$ 为价值向量的第 i 个分量。

2.1 无偏好的目标价值排序

采用无偏好的排序方法对目标进行评估,这里引用 Pareto 占优的思想对目标价值进行排序。假设目标 t_i 的价值向量为 $\mathbf{V}_{t_i}$, 目标 t_j 的价值向量为 $\mathbf{V}_{t_j}$, 那么,如式(3)~(4)所示,目标 t_i 的等级 R_{t_i} 为:

$$R_{t_i} = \begin{cases} R_{t_i} + 1, & \mathbf{V}_{t_i} \geq \mathbf{V}_{t_j} \\ R_{t_i}, & \mathbf{V}_{t_i} \not\geq \mathbf{V}_{t_j} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{t_i} \geq \mathbf{V}_{t_j} \Leftarrow \forall k, v_{t_i}^k \leq v_{t_j}^k \\ \mathbf{V}_{t_i} \geq \mathbf{V}_{t_j} \Leftarrow \exists k, v_{t_i}^k > v_{t_j}^k \end{cases} \quad (4)$$

根据此模型可知,目标的等级越高,则说明该目标对防空能力的贡献越大,目标价值越高;同时,也会存在大量相同等级的目标,此时引用拥挤距离概念定义目标的离散度,对相同等级的目标进行排序。所谓离散度,是指目标空间上的某一点与同等级相邻两点的分散程度,与同等级相邻两点之间的局部拥挤距离正相关。从定义可以看出,离散度越低的节点,说明与其相邻的节点距离越短,那么该目标被相邻目标代替的可能性就越大;由于目标的可代替高,那么该目标的价值就会降低。因此,离散度的高低体现了目标价值大小,即目标的离散度越高,价值越大,反之价值越小。如式(5)所示,目标 t_i 的离散度 D_{t_i} 的数学定义为,

$$D_{t_i} = \|V_{t_{i-1}} - V_{t_{i+1}}\| = \sum_{k=1}^M |v_{t_{i-1}}^k - v_{t_{i+1}}^k| \quad (5)$$

其中, $\|x\|$ 为向量的范式距离, $|x|$ 为变量的绝对值函数。例如图 5 中目标空间第 i 点的拥挤距离等于它在同一等级相邻两点 $i-1$ 和 $i+1$ 在 f_1 轴和 f_2 轴距离之和,即由点 $i-1$ 和 $i+1$ 组成

的矩形两个边长之和。

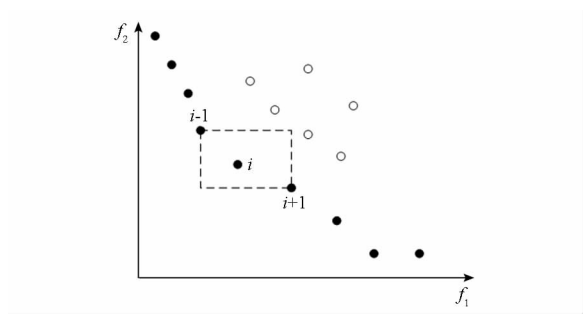


图5 离散度说明
Fig. 5 Illustration of discrete degree

因此根据上述给出的 Pareto 占优思想结合离散度对防空系统中目标进行排序,设计了如下的非劣性排序算法:

算法 1:非劣性目标价值排序

Algorithm 1: non-inferiority target value ranking

```
输出: TargetList
输入: \CalSystemAbility()
1   $\Psi_0 \leftarrow \text{CalSystemAbility}(G)$ 
2  For each  $t_i \in \text{TargetSet}$ 
3     $G[i] \leftarrow$ 从  $G(V, E)$  中移除节点  $t_i$  和与  $t_i$  相关联的边;
4     $\Psi[i] \leftarrow \text{CalSystemAbility}(G[i])$ ;
5     $V[i] \leftarrow (\Psi_0 - \Psi[i]) ./ \Psi_0$ ; //价值向量
6  For each  $p \in V$ 
7     $S_p = \emptyset$ 
8     $N_p = 0$ 
9    For each  $q \in V$ 
10     If  $p$  优于  $q$ 
11        $S_p = S_p \cup \{q\}$ 
12     else if  $q$  优于  $p$ 
13        $N_p \leftarrow N_p + 1$ ;
14     If  $N_p = 0$ 
15        $R_p = 1, F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
16    $i = 1$ ;
17   While  $F_1 \neq \emptyset$ 
18      $Q = \emptyset$ 
19     For each  $p \in F_1$ 
20       For each  $q \in F_1$ 
21          $N_q \leftarrow N_q - 1$ 
22       If  $N_q = 0$ 
23          $R_q = i + 1, Q = Q \cup \{q\}$ 
24      $i = i + 1$ 
25      $F_1 = Q$ 
26   For each  $p \in V$ 
27      $Y[R_p] = Y[R_p] \cup \{p\}$ 
28   For each  $\Gamma \leftarrow Y[i]$ 
29      $l = |\Gamma|$ 
30     For each  $j$ , set  $\Gamma[j]_{\text{divergence}} = 0$ 
31     For each 因素  $m$ 
```

```
30      $\Gamma = \text{sort}(\Gamma, m)$ 
31      $\Gamma[1]_{\text{divergence}} = \Gamma[1]_{\text{divergence}} = \infty$ 
32     For  $j = 2$  to  $(l - 1)$ 
33        $\Gamma[j]_{\text{divergence}} = \Gamma[j]_{\text{divergence}} +$ 
34          $(\Gamma[j + 1]_m - \Gamma[j - 1]_m) / (\max_m - \min_m)$ 
35      $\text{sort}(\Gamma, \text{divergence})$ 
```

由上述算法的伪代码可知,算法首先采用移除法对每一个待评价目标进行评估,得到了价值向量(line 1 – 5);其次,根据 Pareto 占优的原理,对所有目标的价值向量进行了等级的划分(line 6 – 23);之后,根据目标等级将相同等级的目标存放在同一个集合中(line 24 – 25);然后,对每组同等级的目标进行离散度的计算(line 26 – 33);最后,对同等级中的目标按照离散度进行排序。至此,防空系统的目标价值排序在完成等级排序和离散度排序后就全部完成了。

由于上述算法是依据 Pareto 占优原理进行的排序,可以完全摆脱领导者主观偏好的影响,因此其排序结果比较客观公正,但是此算法有一个比较大的缺陷就是排序得出的等级并不能严格地区分其价值的强弱,有可能低等级的目标在某些指标上还要优于高等级的目标。

2.2 有偏好的目标价值排序

2.2.1 加权方法

基于上述模型给出的防空系统价值向量,比较典型的评估方法就是加权方法,我们同样给出一个排序算法, V_{t_j} 为目标 t_j 的价值向量, W_{t_j} 为目标的价值,设目标价值向量的第 i 个指标的权重为 λ_i ,那么有 $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$,其中权重指标 λ_i 依据领导者的偏好来给定。那么可以对目标 t_j 进行价值计算,如式(6)所示。

$$W_{t_j} = \sum_{i=1}^4 V_{t_j}^i * \lambda_i \tag{6}$$

最后根据目标的绝对价值继续排序,这样加权方法的防空系统目标价值排序就完成了。

依据上述加权方法进行的目标价值排序,能够绝对地比较目标之间价值的大小关系,在各价值指标权重准确的基础上,其目标价值排序能够获得不错的效果,但是此方法容易受到领导者主观因素的影响,而且影响很大。

2.2.2 性价比法

同样考虑到加权方法需要获得权重指标,而有些情况下只能给出破击目标的代价,一种比较好的方法即为性价比法,我们给出了排序算法: V_{t_j} 为目标 t_j 的价值向量,目标 t_j 性价比得分为 E_{t_j} , w 为当前

目标的代价, W 为所有目标的总代价,那么可以对目标 t_j 进行性价比的计算,如式(7)所示。

$$E_{t_j} = \sum_{i=1}^4 V_{t_j}^i / \left(4 * \frac{w}{W} \right) \tag{7}$$

最后根据目标的性价比得分继续排序,这样性价比方法的防空系统目标排序就完成了。

依据上述性价比方法进行的目标价值排序,能够给出目标性价比的绝对大小,便于有效计算目标价值以及目标价值之间的比较排序,在获取各目标准确的破击代价的基础上,其目标价值排序能够获得不错的效果,但是此方法需要给出各个目标准确的破击代价,而破击代价确定起来比较困难,对结果影响很大。

3 实验案例

以上文构建的防空系统模型为基础,根据文献 FINC 中各作战要素的数量比例、连接规则,自拟了如图 6 所示的防空系统实例,其中包含 12 个雷达站,7 个指挥所和 12 个导弹阵地,各个作战单元部署相对位置大致如图 6 所示;图中实线箭头表示指挥关系,虚线箭头表示上报关系,其中上报关系是指从下级目标向上级目标传递敌情信息,指控关系是指目标向下级目标下达命令,图 6 所示关系构成了防空系统的基本连接框架。

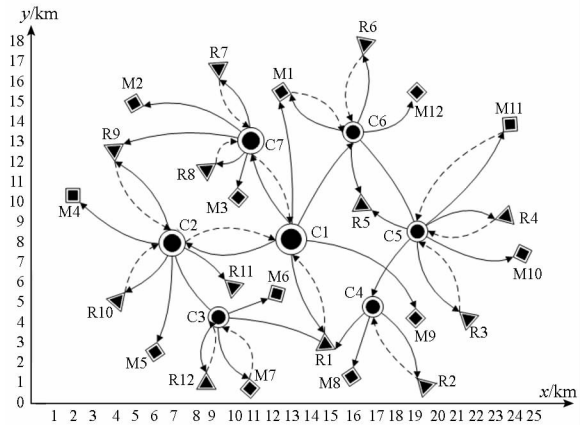


图 6 防空系统实例
Fig. 6 An example of air defense system

根据防空系统作战流程,当某型导弹,其雷达目标截面积 $\sigma = 1\text{m}^2$,初始速度为 1km/s ,从坐标点(4,24)向坐标点(14,5)进行近距离突防时,对防空系统中 31 个目标进行价值评估和排序。按照雷达、指挥所、导弹阵地依次编号,即 1 - 12 号为雷达 R1 - R12,13 - 19 号为指挥中心 C1 - C7,20 - 31 号为导弹阵地 M1 - M12。目标移除之前计算的体系能力为:预警时间 18min,预警面积 518km^2 ,拦截纵深 11.8km,OODA 环 224 个。然后依次计算将单个目标移除该防空系统后的各项

能力指标,求得目标价值,给出目标价值排序。图 7 给出了依次移除节点后,防空系统单项能力的变化,表 1 给出了根据非劣排序算法的目标价值排序前 15 位的结果,表 6 给出了价值向量加权法、Pagerank 方法、节点中心度、中介中心度对防空系统的目标价值排序前 15 位的结果,其中加权法是对价值向量的各个指标赋予均等权重,计算得最终价值排序;Pagerank 为其迭代步数 12 步, P 等于 0.85 时的结果。

由表 1 的实验结果可知,第 13 个目标(指挥所 C1)的价值等级最高,第 17 个目标(指挥所 C5)和第 14 个目标(指挥所 C2)的价值等级紧随其后;第 19 个目标(指挥中心 C7)、第 1 个目标(雷达站 R1)、第 5 个目标(雷达站 R5)同第 18 个目标(指挥中心 C6)的等级均为 8,但是 C6 的离散度最低,因此排位靠后。对 C1、C2、C5、R1、R5、M3 的排序较为合理,但是对于 C7 的排序并不太合理,这主要是因为根据非劣排序的要求,价值等级高并不代表其绝对价值就高,只是相对于这个待排序的集合,其等级较高。例如,C1 的等级为 10,只能说明在这个待排序集合中,C1 的各个要素较其他 10 个目标的各个要素都要好,但并不能说明 C1 较其他所有等级低的目标都要好。因此,非劣排序只是说明了相对于这个集合的一种排序方式,是当用户对各个指标要素没有相对偏好的情况下的一种排序方式。

表 1 依据价值向量进行目标价值排序

Tab. 1 Target value ranking based on value vector

价值排序	目标编号	价值等级	离散度	价值排序	目标编号	价值等级	离散度
1	13	10	Inf	9	6	7	20.72
2	17	9	Inf	10	7	7	20.31
3	14	9	Inf	11	15	7	11.52
4	19	8	Inf	12	9	7	10.02
5	1	8	21.4208	13	11	6	Inf
6	5	8	20	14	21	6	30.91
7	18	8	3.035	15	16	6	21.48
8	22	7	21.97				

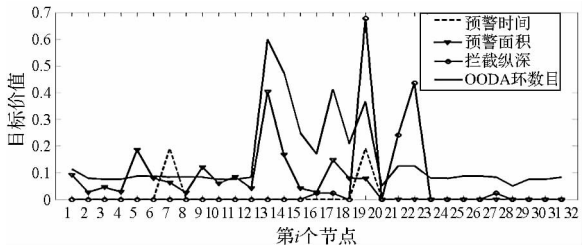


图 7 依次移除目标后系统各项能力变化示意图
Fig. 7 System capability variety after removing targets in order

由下表 2 的实验结果可知,对于加权法来说,第 19 个目标(指挥中心 C7)获得了最高分,其次是第 13 个目标(指挥中心 C1)、第 14 个目标(指挥中心 C2)、第 17 个目标(指挥中心 C5)、第 22 个目标(导弹阵地 M3)、第 21 个目标(导弹阵地 M2)、第 7 个目标(雷达 R7)等,其排序结果较为合理,在可以接受指挥员主观判断的情况下,不失为一种衡量目标价值的好方法。如表 2 中性价比法的排序结果所示,M3 的得分最高,这是因为其

被攻击的代价较小,而且是来袭导弹攻击路径上的一个重要拦截阵地,因此性价比最高,而 C1 和 C7 则得分靠后,主要是因为攻击指挥中心代价过高造成的。同时 Pagerank、节点中心度、中介中心度等衡量网络的方法在衡量防空系统时存在一定偏差,例如 Pagerank 方法排名靠前的均为雷达站,显然与事实不相符合,为节点中心度、中介中心度排名靠前的均为指挥所也与事实存在偏差,而且其区分度较小,不能进行细致的排序。

表 2 各类算法目标价值排序对比
Tab.2 Algorithms comparison for target value ranking

排序	加权法		性价比法		Pagerank		节点中心度		中介中心度	
	编号	得分	编号	得分	编号	得分	编号	得分	编号	得分
1	19	0.328	22	9.402	1	0.107	13	0.197	13	0.205
2	13	0.250	7	5.654	9	0.074	17	0.197	14	0.152
3	14	0.160	19	4.398	5	0.074	14	0.18	17	0.147
4	17	0.145	21	3.066	12	0.059	19	0.164	19	0.097
5	22	0.140	13	2.798	11	0.053	18	0.131	15	0.06
6	21	0.091	6	2.793	10	0.053	15	0.115	18	0.047
7	7	0.084	11	2.674	6	0.053	16	0.098	16	0.042
8	15	0.072	5	2.288	8	0.053	1	0.066	1	0
9	18	0.071	10	2.253	7	0.053	5	0.066	5	0
10	5	0.068	14	2.148	2	0.052	26	0.049	26	0
11	16	0.055	12	2.088	3	0.052	3	0.033	3	0
12	9	0.051	3	2.017	4	0.052	4	0.033	4	0
13	1	0.051	8	1.804	13	0.028	2	0.033	2	0
14	6	0.041	2	1.767	14	0.026	6	0.033	6	0
15	11	0.039	4	1.737	17	0.025	7	0.033	7	0

4 结论

本文提出的防空系统模型,在考虑防空能力向量的基础上,构建了价值向量,并且通过邻接矩阵以及可达矩阵来模拟防空系统的运行情况,真实地反映了防空系统防空能力的形成过程。提出的基于价值向量的非劣性无偏好目标价值排序算法,在充分衡量防空系统性能指标的基础上,通过引入 Pareto 占优以及拥挤距离思想对各个指标进行的综合分析,对防空系统中各目标进行价值排序,其摆脱了主观因素的限制,可以在不知道确切数据的情况下进行排序,并且效果良好。同时也给出了两种有偏好的目标价值排序方法:加权方法和性价比方法,这两种方法在实际中应用广泛,

效果良好,但是其结果受主观影响很大。本文提出的防空系统模型及其排序算法为今后进行防空系统破击目标选择打牢了基础。

本文提出的防空系统价值向量只是给出了衡量防空系统性能的典型指标,更多的指标还需要在下一步的研究中考虑。此外模型中考虑的结构中的邻接矩阵以及可达矩阵还需要引入概率的因素来模拟真实的情况,而不是简单用 0-1 来进行衡量。

参考文献(References)

[1] Dekke A H. Applying social network analysis concepts to military C⁴ISR architectures[J]. Connections, 2002, 24(3): 93-103.

- [2] Dekker A H. C⁴ISR, the FINC methodology, and operations in urban terrain[J]. Journal of Battlefield Technology, 2005, 8(1):223-230.
- [3] 成清. 社会网络的节点重要性评估与社区发现研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
CHEN Qing. Research on node importance evaluation and community discovery in social networks [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] Krackhardt D, Carley K M. A PCANS model of structure in organization[C]// Proceedings of 1998 International Symposium on Command and Control Research and Technology, Monterey, CA, 1998, 113-119.
- [5] 赵毅寰,王祖林,郑晶,等. 利用重要性贡献矩阵确定通信网中最重要节点[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9):1076-1079.
ZHAO Yihuan, WANG Zulin, ZHENG Jing, et al. Finding most vital node by node importance contribution matrix in communication networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(9):1076-1079. (in Chinese)
- [6] 邓宏钟, 吴俊, 李勇, 等. 复杂网络拓扑结构对系统抗毁性影响研究. 系统工程与电子技术, 2008, 12, 30(12):2425-2428. (in Chinese)
DENG Hongzhong, WU Jun, LI Yong, et al. Influence of complex network topologic structure on system invulnerability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(12):2425-2428. (in Chinese)
- [7] 邓志宏. 常规导弹目标选择中目标价值分析方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009.
DENG Zhihong. Research on methods of target value analysis for targeting of conventional missile operation[D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2009. (in Chinese)
- [8] 邵国培, 曹志耀, 何俊. 电子对抗作战效能评估[M]. 北京: 解放军出版社, 1998.
SHAO Guopei, CAO Zhiyao, HE Jun. Electronic countermeasure in operational effectiveness assessment method[M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [9] 呼玮, 杨建军, 龙光正, 等. 基于地基雷达反导预警时间窗口建模与仿真[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(2):51-54.
HU Wei, YANG Jianjun, LONG Guangzheng, et al. Modeling and simulation of antimissile early-warning time window for ground-based radar[J]. Missile and space vehicles, 2010(2): 51-54. (in Chinese)
- [10] 刘彦君, 乔士东, 黄金才, 等. 一种高精度弹道导弹落点预测方法[J]. 弹道学报. 2012, 24(1):22-26.
LIU Yanjun, QIAO Shidong, HUANG Jincai, et al. A method of impact point prediction of ballistic missile[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(1):22-26. (in Chinese)
- [11] 赵建军, 李万宝, 桑德一, 等. 基于弹道仿真的杀伤区计算[J]. 兵工自动化, 2010, 29(6):8-10.
ZHAO Jianjun, LI Wanbao, SANG Deyi, et al. Calculating Killing Zone Based on Trajectory Simulation[J]. Ordnance industry Automation, 2010, 29(6):8-10. (in Chinese)
- [12] 郭张龙, 马拴柱, 李为民. 地空导弹部队集火射击模型[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(4):23-26.
GUO Zhanglong, MA Shuanzhu, LI weiming. Concentrated Firing Model of Groud-to-Air Missile Force[J]. Fire Control & Command Control, 2006, 31(4):23-26. (in Chinese)
- [13] 寇占霖. 地空导弹射击理论及其应用[D]. 西安:空军工程大学, 1992.
KOU Zhanlin. Air defense missile firing theory and application[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 1992. (in Chinese)
- [14] 杨诚, 刘泽平. 基于信息系统的系统作战指挥控制能力评估研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3):1087-1091.
YANG Cheng, LIU Zeping. Research on system combat command & control capability assess based on information system[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(3):1087-1091. (in Chinese)
- [15] 王进耘, 王玉生, 马宏斌, 等. 防空兵战场控制能力评价模型[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(2):22-25.
WANG Jingong, WANG Yusheng, MA Hongbing, et al. A model of air defense forces battlefield control capability analysis evaluation[J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(2):22-25. (in Chinese)
- [16] 刘鹏程, 袁进徐, 吴向前. 防空作战指挥对抗能力评估与分析[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(10):43-48.
LIU Pengcheng, YUAN Jinxu, YUAN Xiangqian. Evaluation and analysis of capability of the operational command opposition for air defense[J]. Fire Control & Command Control, 2007, 32(10):43-48. (in Chinese)
- [17] 刘彦君, 黄金才, 成清, 等. 基于 Markov Logic 的军事系统效能评估[J]. 现代防御技术, 2012, 40(6):87-92.
LIU Yanjun, HUANG Jincai, CHEN Qing, et al. Military system performance evaluation based on markov logic[J]. Modern Defense Technology, 2012, 40(6):87-92. (in Chinese)
- [18] Brehmer B. The dynamic OODA loop: amalgamating boyd's OODA loop and the cybernetic approach to command and control[C]//Proceedings of the 10th International Command and Control Research Technology Symposium, McLean, VA, USA, 2005.