

基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型研究

朱悦妮 郑 征 刘 伟

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100083)

摘 要 现代战争中,多架战机协同攻击已成为一种重要的作战模式。面对复杂的敌方网络系统,目标选择及战机资源的优化分配是决定空袭效果的关键因素。针对此类问题,通过分析空袭环境下攻守双方的主要特征,建立了基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型,其中上层决策者以中断敌方网络系统关键服务设施节点为目标,下层决策者以提高己方机群战场生存率和目标击中率为目标。通过求解该模型,对选定目标节点的战机分配策略进行综合优化。最后,通过实例分析和仿真实验,验证了该模型的可行性和有效性。

关键词 主从决策,关键设施攻击,多机协同

中图法分类号 TP182 **文献标识码** A

Research on a Bilevel R-median Facility Interdiction Model for Air Attack Formation

ZHU Yue-ni ZHENG Zhen LIU Wei

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract Target selection and optimal resource allocation have become key factors of the effect of air-raid in modern warfare. We formulated a bilevel r-median facility interdiction model for air attack formation, based on an analysis of the main characteristics of attackers and defenders. In the bilevel formulation, the top level decision maker intends to make the most disruptive attack by identifying and interdicting the critical infrastructure in the target system; the lower level decision makers concerns the improvement of air attack formation safety and the accuracy of hit rate; the model is aimed to weigh the benefits of both top and low level decision makers and reach the optimal strategy of air attack formation allocation. Computational results on a simulation experiment show the effectiveness of the proposed methodology for providing optimal strategies of this problem.

Keywords Leader-follower hierarchical decision, Critical infrastructure attack, Cooperative team air combat

1 引言

纵观近期几场高技术局部战争和武装冲突,高技术空袭已成为一些军事强国发动战争的主要作战样式。在空袭作战中目标选择至关重要,直接关系到空袭意图的最终实现与否^[1]。海湾战争、巴以战争以及美伊战争等实例均表明,选择敌方网络系统中的军工厂、炼油厂、铁路枢纽等关键设施进行攻击摧毁,可迅速瘫痪敌方战略体系,甚至直接取得战争胜利。

近几年来,这种网络关键设施识别的问题越来越受到人们的重视。但到目前为止,研究者的关注焦点多放在如何提高中断后网络系统的鲁棒性和恢复力上,而空袭者的决策行为往往被概括简化处理。在现代及未来战争中,空袭任务的具体执行者通常为有人或无人机群,以多机为对象、网络关键设施为目标的空袭优化策略研究同样十分重要,具有广泛的应用前景。本文针对这一问题,提出基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型。模型以对敌网络造成最大损

伤为主要目的,并在此基础上综合考虑了机群的生存问题和攻击任务执行质量对最终空袭效果的影响,通过求解和实例分析,验证了模型的可行性和有效性。

2 相关工作评述

空袭作战环境中,在攻击资源有限的前提下,指挥者需要对攻击任务进行决策和指派。首先是如何识别网络中的关键基础设施进行攻击,使整个网络系统的运行效率损失最大化;其次是如何对机群进行目标指派,以达到最优空袭效果。

在已有工作中,这种有预谋攻击下的网络关键设施的识别问题常用中断模型(Interdiction model)来描述。中断模型最早在军事领域开始研究,主要用于评估交通网络中损失关键链路和节点的情况下所带来的影响。早期研究都是以网络最大流或最小费用流为目标的网络关键弧的识别问题。其中, Wollmer^[2]和 Wood^[3]对网络中具有最大流量的路径进行中断所带来的影响进行了研究。Cormican 等^[4]提出了这类问题在随机情况下的模型。Fulkerson 和 Hardingy^[5]以及

到稿日期:2010-03-05 返修日期:2010-06-19 本文受国家自然科学基金(60904066),航空科学基金(2008ZG51092),中国科学院智能信息处理重点实验室开放基金(IIP2009-4)资助。

朱悦妮(1988—),女,硕士生,主要研究方向为主从决策、关键设施防护等,E-mail: zhyn88@126.com;郑 征(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为智能决策等;刘 伟(1981—),男,博士生,主要研究方向为主从决策、路径规划等。

Iaraeli 和 Wood^[6]分析了移除两个节点间的最短路径后所带来的影响。近几年来,一些研究者将关注焦点放在网络关键节点的识别(中断)问题上,它们的失效会对整个系统所提供的服务、供给带来严重的威胁。2004 年,Church 和 Scaparra^[7]提出 RIM 和 RIC 两种识别网络关键设施节点的中断模型,用来确定对提供服务影响最大的设施;杨琚等^[8]对 RIM 模型的求解算法进行了研究,对贪婪搜索、邻域搜索和禁忌搜索 3 种算法的求解效果进行了比较。Church 和 Scaparra^[9]还提出 RIMF 模型,探讨了当系统遭受长期的严重干扰时,如何对给定物流网络做出经济有效的关键设施防护策略。最近,有学者开始尝试应用双层规划的思想来研究中断问题并建立模型。Church 和 Scaparra^[10]建立了一个双层混合整数规划模型,从防御方的角度考虑对攻击方所有可能的中断策略进行预计,并由此采取预先防护策略以尽量减小中断后系统运行效率的降低。王世伟^[11]研究了最坏失效状况下的 P -中值选址问题,建立了双层规划模型,并运用基于禁忌搜索的遗传算法对其进行求解。

现有中断模型能够识别网络系统中的薄弱环节,从理论上予以攻击方或防御方决策者一定的指导和参考。但是,这些模型不能直接用于制定实际的机群指挥决策,主要原因是它们缺乏对很多实际因素的综合考虑,其中包括:

(1) 在实际空袭环境下,对某个关键设施进行防护时,是否成功具有一定的概率,而在现有模型中则假设防御方选择防护的节点不可能被中断;

(2) 对于防御方而言,在整个网络中各关键设施(服务节点)的重要程度不可能是完全相同的,相应的防御资源也往往不会予以平均指派;因此以 0-1 变量来简单地表示“未防护”和“防护”信息是不充分的;

(3) 由于真实情况下执行空袭任务的通常是机群而非单架战机,因此对具体的攻击任务指派问题也需要优化决策,仅以 0-1 变量来表示“不中断”或“中断”只能作为宏观的整体空袭任务制定,而无法针对每一目标节点的布防情况进行战机数量的指派。

(4) 如果防御资源为地空导弹等具有杀伤力的武器,那么攻击方还需要考虑其对己方战机可能造成的损伤。也就是说在完成任任务同时,还要顾虑自身安全问题,以尽量减低战争军费的巨大损耗。

从上述几点可以看出,实际的空袭环境十分复杂,涉及攻守两方信息且包含多种元素、多重结构。空袭指挥者以最大限度地破坏敌方网络为空袭最终目的,但又不能仅仅依据这一个目标就做出决策,还要适度考虑执行者即机群的利益。因此,本文将采用双层主从决策的方法对问题进行建模和求解。相较于传统单层规划方法,其多层次和多价值准则的思想与本文所研究问题的真实情况更加吻合。

3 基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型

3.1 问题分析

双层主从决策(Bilevel Leader-Follower Hierarchical Decision)是主从决策理论中一个重要的分枝和基础。决策者根据其决策权限大小分为上、下两层,其数学模型的一般表述形式为^[12]

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} F(x, y) \\ & \text{subject to } G(x, y) \leq 0 \\ & \min_{y \in Y} f(x, y) \\ & \text{subject to } g(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

式中, $x \in X \subseteq R^n$, $y \in Y \subseteq R^m$, 分别称为上层决策变量和下层决策变量,集合 X, Y 表示变量 x, y 相应的取值范围;函数 $F, f: R^n \times R^m \rightarrow R^1$, 分别称为上层目标函数和下层目标函数;函数 $G: R^n \times R^m \rightarrow R^p$ 和 $g: R^n \times R^m \rightarrow R^q$, 分别称为上层约束条件和下层约束条件。虽然上层决策者和下层决策者都有其各自的目标和约束函数,但是在某种程度上,上层的决策空间受到下层求解结果的影响。由于一方的行为影响另一方的策略选择和目标的实现,并且任何一方不能完全控制另一方的选择行为,因此上层决策者要根据下层的反应做出符合自身利益的最终决策^[13]。

在机群攻击任务的指派问题中,决策者期望能对敌方网络系统造成的(预期)损失最大化,这是空袭的最终目的所在。由于攻击资源(机群总数)限制了可以攻击的节点数目,因此需要将空袭力量集中于对网络运行影响最为重要的节点上。但是,基于同样的原因,防御方也会在这些节点上布置较强的兵力进行防御反击。如果不顾己方战机的生存问题而直接强攻,就有可能造成两败俱伤的结果。

因此,在尽量对敌造成最大破坏的前提下,决策者在决策时还要考虑两个问题:一是绕开防御火力过于猛烈的关键节点,以提高己方战机的生还几率;二是对于火力相对较弱或没有进行防御的关键节点,在资源总量允许的情况下,分派两架或两架以上战机对同一目标进行攻击,以提高完成任务(即摧毁该节点)的几率。除了从总体上制定策略以实现空袭意图外,对机群可能的执行情况也要进行预估,才能达到整体最优的效果。这是一个自然呈现主从结构的问题,因此本文将在下节中采用双层主从决策方法对其进行建模。

3.2 模型的数学描述

首先,基于本文 3.1 节中的分析,并且参考实际战场资料,抽取问题中攻守两方的主要特征作假设如下:

1. 空袭方基本情况

(1) 资源假设

- 资源总量(即机群数量)有限,不足以中断敌方网络系统中的所有服务设施;

- 为避免资源分配出现局部冗余的情况,规定对未防护目标节点最多指派一架战机对其进行攻击。

(2) 情报假设

- 发动空袭前,攻方已完全探明守方的布防情况。

(3) 交战假设

- 每架战机击中目标节点的概率和被地空导弹击中的概率均为常量;

- 忽略多机协同作战与上述两个概率值的关系,即认为执行任务时每架战机间相互独立,互不影响;

- 网络中各服务设施节点间的距离足够远,不存在相互火力支援和掩护的情况,即战机在攻击特定节点时不会遭到位于其它网络节点的火力攻击。

2. 空袭对象(敌方地面网络系统)基本情况

(1) 网络运行规则假设

- 设施在为需求点提供服务(或物资)时遵循“就近原

则”,即始终指派当前距离每个需求点最近的设施为其提供服务;这种就近指派约束最早由 Church 和 Cohon^[14]用于能源设施选址。

(2) 布防假设

· 守方会根据网络节点的重要程度和拥有资源总量来指派地空导弹等防御资源,对其中的关键设施进行保护;

· 由于实际情况中空袭方和地面防御方机动性差异较明显,在交战过程中认为守方布防情况不会发生变动。

(3) 中断失效假设

· 网络中的服务节点一旦被击中就完全失效,即不考虑被中断后节点尚余部分服务能力的情况。

基于上述假设,应用双层主从决策理论,将机群任务指派问题视作一个 Leader-Follower 的问题:空袭任务指挥者是领导者(Leader),机群作为一个执行任务的总体是跟随者(Follower)。

上层决策者的任务是识别网络关键设施节点,并据此制定整体性空袭策略,以最大限度地降低敌方网络系统运行效率,甚至使系统瘫痪为目标。这一部分问题可以直接应用现有中断模型^[7]进行描述。网络运行效率的衡量标准(即上层目标函数)定义为网络各服务设施节点向需求点输送物资或提供服务的距离权重总和。

下层决策者考虑的问题则是尽可能提高自身的“执行质量”,这里“执行质量”包含两方面的意义:一是尽量增加战机的战场生存概率,二是尽可能提高完成任务(击中指定目标)的概率。这是两个相互矛盾的目标,因此下层规划实际上还是一个多目标问题。定义下层目标函数为战机完成任务且生还的概率总和。

接下来进行主要参数和变量的定义,如表 1 和表 2 所列。

表 1 已知参数定义

P	系统网络中服务设施节点总数
U	系统网络中需求节点的集合
F	系统网络中服务设施节点的集合
i	第 i 个需求节点
j	第 j 个服务设施节点
a_i	需求点 i 的需求量
d_{ij}	服务设施节点 j 与需求节点 i 间的最短距离
T_{ij}	距离需求点 i 比服务设施 j 远的所有节点(不包括 j)的集合,定义 $T_{ij} = \{k \in F k \neq j, d_{ik} > d_{ij}\}$
q_j	分布于服务设施节点 j 的防御资源量, $q_j \in N$
R	机群总数
k	单架战机击中目标节点概率
b	单位防御资源击中单架战机概率

* 本文中 N 为自然数集合,无特殊意义。

表 2 决策变量定义

s_j	上层中断 0-1 变量, $s_j=1$ 表示选定节点 j 为攻击目标
z_{ij}	上层指派 0-1 变量, $z_{ij}=1$ 表示中断后指派点 j 为点 i 提供服务
u_j	下层指派整数变量,表示指派到节点 j 实施攻击的战机数量

建立基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型:

$$\max \sum_{i \in U, j \in F} a_i d_{ij} z_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in F} z_{ij} = 1 \quad \forall i \in U, j \in F \quad (2)$$

$$\sum_{j \in F} s_j = R \quad (3)$$

$$\sum_{h \in T_{ij}} z_{ih} \leq s_j \quad \forall i \in U, j \in F \quad (4)$$

$$s_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in F \quad (5)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in U, j \in F \quad (6)$$

$$\max \sum_{i \in U, j \in F} [1 - (1-k)^{u_j}] \cdot F(q_j) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in F} u_j = R \quad (8)$$

$$u_j \leq 1 \quad \forall q_j = 0, j \in F \quad (9)$$

$$u_j \in N \quad \forall j \in F \quad (10)$$

其中,式(1)表示上层目标为最大化敌方网络运行的加权成本(距离)总和;式(2)保证了每个需求点都有且仅有一个设施对其提供服务;式(3)表明空袭中能够攻击的节点总数不会超过机群总数,且为了尽可能达成上层目标,在制定上层任务时暂时认为对每个选中节点均指派一架战机,因此能够攻击的节点数就等于机群总数;式(4)是服务就近原则的体现,确保中断后将每一个需求点指派给距其最近的设施,或者说此条约束规定了如果点 j 没有被中断($s_j \neq 0$),那么就不可以指派距离点 i 比 j 远的设施为点 i 提供服务;式(5)、式(6)为上层变量的整数约束;式(8)规定指派到目标节点的战机数量总和等于执行本次空袭任务的机群总数,没有战机会被闲置;式(9)对应于相应假设,规定最多指派一架战机攻击未防护节点;式(10)是下层变量的整数约束。

需要特别说明的是式(7)。该式对下层目标进行了描述,函数以乘积和的形式表示对提高机群生还几率和完成攻击任务概率两个目标的权衡优化策略。在这个和式的每项中,前一部分因子表示成功击中该目标节点的概率,后一部分因子则用于表示每架战机的生还几率对总体目标的影响。如果地空导弹对战机击中概率 b 较高,那么战机的生存概率将随着目标节点 j 处地空导弹数量 q_j 的递增而以指数速度 $(1-b)^{q_j}$ 迅速衰减,对结果影响较大,甚至可能“掩盖”另一个目标因子对总体目标的贡献。因此,定义生存重视函数 $F = F(q_j)$,将指数衰减形式映射到其它函数形式,以适度限制该目标因子对总体目标的影响。在实际应用中,可以根据决策者对战机生存这个因素的重视程度而给出该函数相应的具体表达式。在下面给出的实例中,为验证方便,依然保留指数衰减形式,即简单取 $F(q_j) = (1-b)^{q_j}$,以下式代替模型中的式(7):

$$\max \sum_{i \in U, j \in F} [1 - (1-k)^{u_j}] \cdot (1-b)^{q_j} \quad (11)$$

3.3 模型求解步骤

双层主从决策模型的决策机制是:上层决策者在尝试做决策 x 来最优化他们的目标函数 F 之前,首先要预估下层决策者所有可能的反应,即对上层变量 x 的任一可能的取值 x_i ,通过求取决策变量值 y_i^* 来得到与之相对应的下层最优策略 $f(x_i, y_i^*)$,这些策略的集合被称为下层合理反应集^[15]。基于下层的这些反馈信息,上层决策者在允许的范围内求取决策变量值 x_0 ,使上层目标函数 F 达到最优;同时,下层最优解的值 $f(x_0, y_0^*)$ 也随之确定。决策 (x_0, y_0^*) 就是模型最终希望求取的整体最优决策。基于这一过程,我们可以分两步对上述机群任务指派模型进行优化求解:

(1) 列出上层所有可能下达的任务,求取下层合理反应集;即对任一给定空袭任务,机群根据自身利益对指定目标节点作出最优的机群数量分配策略;

(2) 根据下层合理反应集,上层决策者求取对应的上层目标函数值,其中最大值所对应的策略就是模型最优解。

4 实例分析

4.1 实例描述及求解

假设作为空袭对象的网络系统由 5 个服务设施和 12 个需求点构成,在给定范围内对上述节点进行随机布局,其中每

个需求点的物资需求量 a_i 从 1,3,5 三个值中随机抽取。假设防御资源为 5 枚地空导弹,依据初始情况下(即中断前)各服务设施节点的关键程度,模拟防御方系统指挥者进行布防,得到敌方网络总体示意,如图 1 所示。假设执行任务的机群数量为 3,参考文献[16]中的数据,设每架战机击中目标节点概率为 0.8,被地空导弹击中的概率为 0.7。

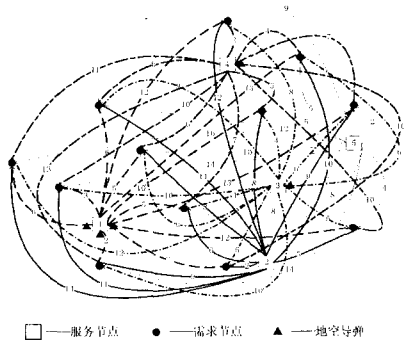


图1 网络系统布局及布防示意

依据本文 3.3 节所述步骤对本例进行求解,过程中得到的下层合理反应集如表 3 所列。最终计算得出的最优策略为 ③-1,④-1,⑤-1,即各派一架战机攻击节点③,④和⑤。

表3 下层合理反应集(4.1 节例)

目标节点号---布置地空导弹数			目标---指派战机数量		
①--3	②--0	③--1	①-0	②-1	③-2
①--3	②--0	④--1	①-0	②-1	④-2
①--3	②--0	⑤--0	①-1	②-1	⑤-1
①--3	③--1	④--1	①-0	③-2	④-1
①--3	③--1	⑤--0	①-0	③-2	⑤-1
①--3	④--1	⑤--0	①-0	④-2	⑤-1
②--0	③--1	④--1	②-1	③-1	④-1
②--0	③--1	⑤--0	②-1	③-1	⑤-1
②--0	④--1	⑤--0	②-1	④-1	⑤-1
③--1	④--1	⑤--0	③-1	④-1	⑤-1

* 注:加圈数字表示网络系统中服务设施节点编号;“--”后数字表示相应节点布置的地空导弹数量;“-”后数字表示对应上层指定攻击的各目标节点,(下层)机群依据本层利益决定分派的战机数量。

由于基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型是在现有单层中断问题的基础上构建的,为了更清楚明确地反映下层规划对上层网络关键设施攻击策略的作用,考察主从关系的引入对整体空袭任务制定的影响,同时检验模型的有效性,本文围绕上述实例设计了一组仿真实验。我们将该实例结果记作“实验 1”,通过调整某一个(类)模型参数或变更一个条件,观察中间过程以及最终结果的变化。仿真实验内容如下,对应的求解结果如表 4 所列。

表4 仿真实验结果统计

实验编号	最优策略			上层目标值	下层目标值
1	③-1	④-1	⑤-1	179	1.28
2	①-1	②-1	⑤-1	184	1.6216
3	①-1	②-1	③-1	190	0.944
	①-1	③-1	④-1	190	0.384
4	①-1	②-1	③-1	190	1.3
5	①-1	②-1	③-1	190	(1.0616)*
	①-1	③-1	④-1	190	(0.5016)*

* 注:第 5 组实验是单层模型计算结果,只能得到单(上)层目标最优值;下层目标最优值是用双层模型计算的结果,以便于 4.2 节分析,故以括号括起。

实验 2 修改实验 1 中网络部分需求节点的需求量,同

时保持需求总量不变,其它数据和实验 1 相同;

实验 3 改变敌方布防为 ①-2,②-0,③-2,④-1,⑤-0,其它数据和实验 1 相同;

实验 4 减小战机被导弹击中的概率,设 $b=0.5$,其它数据和实验 1 相同;

实验 5 用单层中断模型去掉实验 1 中的下层目标、约束函数及变量,重新求解多机任务指派问题。

4.2 结果分析

将各组仿真实验结果分别与实验 1 对比,经过分析得出结论,归纳为如下两个方面:

1. 模型参数对目标函数值以及最优决策的影响

(1) 网络系统中需求点的需求量大小

网络中需求量较大的节点对上层目标函数最优值的确定占有较大比重,因此网络节点需求量分布的不同可能间接导致最终空袭任务的较大差异(实验 1 与实验 2)。所以在对这种供求网络系统发动空袭前,正确评估各需求节点的需求量十分重要。

(2) 网络各节点火力布防是否均衡

观察本文 4.1 节中表 3 数据可以发现,如果上层指定对战机生存威胁较大的节点①作为攻击节点,那么下层决策者在大多数情况下会选择不在该节点指派战机,这样将导致预期摧毁的最大节点数减小为 2;如果在敌方各节点火力分布较为均衡的情况下(实验 3 与实验 5),则不容易出现此种情况;上层决策者当然希望对敌造成的破坏越大越好,但从整体角度权衡,应当酌情选择牺牲一些上层利益来确保己方机群的“执行质量”。

(3) 网络关键节点防御火力强弱

如果敌方在服务设施节点处布置的防御火力对战机威胁较小(实验 4),那么下层决策者作出上层所期望的机群指派决策的可能性就高,或者更明确地说下层决策者趋向于在上层所希望中断的每一个关键节点处都指派一架或以上的战机,而不易出现绕开某个节点的情况。因此,在执行空袭任务之前或交战时,指挥者可以考虑采取干扰等辅助手段,降低地空导弹等敌方地面防御武器对战机的击中概率,以间接提高空袭质量。

2. 双层模型相对于单层中断模型的应用优势

如果只求解单层中断问题,那么决策者给出的最优策略只能是各派一架战机对求解得到的指定关键节点进行攻击。在本文所述实例中,这个最优策略是各派一架战机攻击节点①,②和③或节点①,③和④(实验 5)。

与基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击双层模型相比,首先,中断模型没有提供进一步从两个决策中择其一的办法;像这种出现两个或两个以上最优解的情况(实验 3),在本文提出的双层模型中,就可以利用下层目标函数值的差异作为确定最优策略的合理有效参考。

其次,在本文 4.1 节初始预设的敌方网络系统布防情境下,如果上层决策者下达这一攻击指令,下层决策者将根据本层利益对节点①采取不攻击的决策,导致最终的整体空袭效果远不如预期,像这样的情况是单层中断模型没有办法顾及到的。

从另一个角度看,当敌方完全平均指派防御资源时,无论

(下转第 235 页)

同理,可以求得表3中的决策规则为:

规则1 $a(1)c(0) \rightarrow D(1)$

规则2 $a(1) \vee b(1), c(1) \rightarrow D(0)$

规则3 $b(2) \rightarrow D(2)$

以上提取的规则正确率和覆盖率均为100%。

为了进一步验证本算法,本文从UCI机器学习数据库中选取了著名的Iris数据集进行试验。Iris数据集只包含有连续属性的数据,每个实体包含有petal-length, petal-width, sepal-length, sepal-width共4个连续型属性;该数据库中共有150个实体,共分为Iris-setosa, Iris-versicolor, Iris-virginica共3个类别。经过本算法处理后,得到的规则如表4所列。

结束语 本文就规则提取中的属性约简和属性值约简问题进行了研究。应用粗糙集中的不可分辨关系将原始信息表转换成可辨识向量组,利用可辨识向量加法运算实现属性约简。同时又根据属性值在规则中的重要性,实现规则提取。从数值实例和数据库的运算结果可以看出本算法是有效可行的。

参考文献

[1] Pawlak Z. Rough Set[J]. International Journal of Computer and

Information Science[J]. 1982(1):341-356

[2] 武森,高学东, Bastian M. 数据仓库与数据挖掘[M]. 冶金工业出版社,2003

[3] 王国胤. Rough集理论与知识获取[M]. 西安:西安交通大学出版社,2003

[4] 张文修,吴伟志,梁吉业,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001

[5] Hu X H, Cerccone N. Learning in relational databases: a rough set approach[J]. Computational Intelligence, 1995, 11(2): 323-337

[6] Jelonek J, Krawiec K, Slowinski R. Rough set reduction of attributes and their domains for neural networks[J]. Computational Intelligence, 1995, 11(2): 339-347

[7] 苗夺谦,胡桂荣. 知识约简的一种启发式算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(6): 681-684

[8] 孟庆生. 信息论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986

[9] 常犁云,王国胤,吴渝. 一种基于Rough set理论的属性约简及规则提取方法[J]. 软件学报, 1999, 10(11): 1206-1211

[10] Ohrn A. Discernibility and Rough Sets in Medicine: Tools and Applications[D]. N-749 Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, Department of Computer and Information Science, 1999: 53

(上接第213页)

上层采取何种攻击策略,下层目标函数值都是相同的,即此时模型退化为单层中断问题。也就是说本文提出的双层模型扩大了原有中断模型的应用范围。

综上所述,策划对敌网络系统实施空袭时,应用基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型能够在一定程度上有效解决多机攻击任务分配的优化决策问题。模型中上层决策对下层目标值的影响显著,说明在敌方防御火力会对己方战机造成伤害的前提下,决策者在策划空袭任务时,只有充分预估机群可能的执行情况,才能尽量避免己方资源不必要的损失,同时高质量地完成任务;而下层目标在某些情况下会与上层目标发生较大冲突,如果决策者采取某些手段使模型特定参数发生变化,则可以改善这一矛盾,使上下层目标趋于一致,进而使整体(预期)空袭效果更优。

结束语 本文对空袭作战环境下网络关键设施节点的攻击问题进行了新的研究。考虑空袭任务执行者的自主性,提出了基于双层主从决策的多机协同关键设施攻击模型。模型在现有中断问题的基础上,通过引入上下层主从决策关系,在下层规划中对机群的战场生存几率和任务执行质量进行分析和建模,使其能够依据敌方网络火力的布防情况自主选择是否绕开目标节点以避免自身损失过重,从而优化整体空袭策略。文中构造实例验证了模型的可行性和有效性,研究了模型参数变化与上下层利益冲突的关系,分析了模型和原单层中断模型相比在实际应用中的优势,证明了本模型能够对真实空袭实战策划的制定有一定的帮助。考虑到实际空袭问题中所涉及的数据量可能要远远大于文中举例,目前算法的计算效率较低,本文下一步要进行的工作是研究更为快速高效模型的求解算法。

参考文献

[1] 张寒梅. 高技术空袭下重点经济目标的防护[J]. 中国高新技术企业, 2008, 16: 132-132

[2] Woilmer R. Removing Arcs from a Network[J]. Operations Re-

search, 1964, 12(6): 934-940

[3] Wood R K. Deterministic network interdiction [J]. Mathematical and Computer Modeling, 1993, 17: 1-18

[4] Cormican K J, Morton D P, Wood R K. Stochastic network interdiction[J]. Operations Research, 1998, 46(2): 184-197

[5] Fulkerson D R, Harding G C. Maximizing the minimum source-sink path subject to a budget constraint[J]. Mathematical Programming, 1977, 13: 116-118

[6] Israeli E, Wood R K. Shortest-path network interdiction [J]. Networks, 2002, 40: 97-111

[7] Church R L, Scaparra M P, Middleton R S. Identifying critical infrastructure: the median and covering facility interdiction problems[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(3): 491-502

[8] 杨磊,张敏. 基于P-中位模型的网络关键设施识别问题的算法设计与实现[J]. 管理科学, 2008, 21(4): 46-53

[9] Church R L, Scaparra M P. Protecting critical assets: the r-interdiction median problem with fortification[J]. Geographical Analysis, 2006

[10] Scaparra M P, Church R L. A bilevel mixed program for critical infrastructure protection planning[J]. Computers & operations research, 2008, 35: 1905-1923

[11] 王世伟. 最坏失效状况下的P中值选址问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009

[12] Bard J F. Practical bilevel optimization: algorithms and applications[M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 1998

[13] 张苗. 基于双层规划的多目标校车路径优化研究[D]. 四川:西南交通大学, 2008

[14] Church R L, Cohon J L. Multiobjective location analysis of regional energy facility siting problems[R]. BNL 50567. US Energy Research and Development Administration. 1976

[15] 王广民,万仲平. 二(双)层规划综述[J]. 数学进展, 2007, 36(5): 513-529

[16] Cruz J B Jr, Simmaan M A. Moving Horizon Nash Strategies for a Military Air operation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 989-998