

10-14-2020

Chemical Cluster Cooperative Patrolling Strategy Based on Game Theory

Feiran Chen

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

Bin Chen

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

Zhengqiu Zhu

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

Xiaogang Qiu

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

See next page for additional authors

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.

Chemical Cluster Cooperative Patrolling Strategy Based on Game Theory

Abstract

Abstract: Industrial production activities in the chemical cluster pose great threats to the surrounding atmospheric environment and human health. It is necessary for the management team to strictly supervise the chemical production processes and monitor the gas emissions to ensure the air quality. One of the effective means is to patrol chemical plants in the chemical cluster. The cooperative patrolling strategy of multiple patrol vehicles based on game theory is studied. A *greedy deployment algorithm* to determine the initial deployment of patrol vehicles is proposed. The *static partition cooperation method* is used to partition the chemical cluster into multiple small areas. A *patrolling game model* between the patrol vehicles and chemical plants is constructed, and the Stackelberg equilibrium of the game is obtained through the MultiLPs algorithm. The Antwerp Chemical Cluster is selected for a case study. The results show that the patrol vehicles can increase the payoff by 8.08% to 35.24%.

Keywords

cooperative patrolling, patrolling strategy, game theory, chemical cluster

Authors

Feiran Chen, Bin Chen, Zhengqiu Zhu, Xiaogang Qiu, Yiduo Wang, and Zhao Yong

Recommended Citation

Chen Feiran, Chen Bin, Zhu Zhengqiu, Qiu Xiaogang, Wang Yiduo, Zhao Yong. Chemical Cluster Cooperative Patrolling Strategy Based on Game Theory[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1903-1909.

基于博弈论的化工园区合作巡逻策略研究

陈斐然, 陈彬, 朱正秋, 邱晓刚, 王一多, 赵勇

(国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 化工园区的生产活动对周围的大气环境和居民健康构成了巨大威胁, 需要园区管理团队对化学生产过程和气体排放进行严格监管以保证空气质量, 对各化工厂进行巡逻是一种有效的方法。基于博弈论研究多辆巡逻车的合作巡逻策略, 提出了贪婪部署算法确定巡逻车的初始部署, 采取静态分区的方法将化工园区划分成多个小区域, 在化工厂和巡逻车之间构建巡逻博弈模型, 通过 MultiLPs 算法计算得到博弈的 Stackelberg 均衡解。选取 Antwerp 化工园区进行案例研究, 结果表明巡逻车可以将收益提高 8.08%~35.24%。

关键词: 合作巡逻; 巡逻策略; 博弈论; 化工园区

中图分类号: O225

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 10-1903-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0475

Chemical Cluster Cooperative Patrolling Strategy Based on Game Theory

Chen Feiran, Chen Bin, Zhu Zhengqiu, Qiu Xiaogang, Wang Yiduo, Zhao Yong

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Industrial production activities in the chemical cluster pose great threats to the surrounding atmospheric environment and human health. It is necessary for the management team to strictly supervise the chemical production processes and monitor the gas emissions to ensure the air quality. One of the effective means is to patrol chemical plants in the chemical cluster. The cooperative patrolling strategy of multiple patrol vehicles based on game theory is studied. A greedy deployment algorithm to determine the initial deployment of patrol vehicles is proposed. The static partition cooperation method is used to partition the chemical cluster into multiple small areas. A patrolling game model between the patrol vehicles and chemical plants is constructed, and the Stackelberg equilibrium of the game is obtained through the MultiLPs algorithm. The Antwerp Chemical Cluster is selected for a case study. The results show that the patrol vehicles can increase the payoff by 8.08% to 35.24%.

Keywords: cooperative patrolling; patrolling strategy; game theory; chemical cluster

引言

随着化工产业的飞速发展, 大量高度依赖上下

游工厂的化工厂区集聚在一起, 化工园区建设迅速兴起^[1]。然而, 化工园区内的化学工业活动是导致大气环境恶化的主要因素之一, 未经处理的空气污染物被排放到空气之中^[2], 对园区周边居民的健康造成了不良影响, 同时由于安全风险较大, 对园区安全乃至社会稳定都构成了巨大威胁。因此, 化工园区的管理者必须对园区的空气质量 and 气体排放进行严格监管, 除了固定监测站, 利用巡逻车对化



收稿日期: 2020-03-30 修回日期: 2020-07-11;
基金项目: 国家自然科学基金(71673292, 21808181, 61673388, 71673294), 国家重点研发计划(2018YFC0806900), 国家社会科学基金(17CGL047);
作者简介: 陈斐然(1995-), 男, 江苏淮安, 硕士生, 研究方向为系统仿真; 陈彬(1981-), 男, 安徽芜湖, 博士, 副研究员, 研究方向为系统仿真, 平行应急管理。

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

• 1903 •

工园区进行巡逻也是一种有效的方法^[3]。然而目前常用的固定巡逻策略中巡逻路线单一, 智能的攻击者通过长期观察就可以掌握巡逻路线, 了解巡逻者的动向, 得不到最佳的巡逻效果。

随着博弈论的发展和完善, 该理论已经在公共安全领域得到广泛应用。在安防领域的巡逻问题上, 已有将博弈论应用于解决城市轨道交通网络安全调度问题^[4]和化工园区内管道系统的巡逻路径安排问题^[5]。但是目前的研究无法有效解决如化工园区这样大规模区域的巡逻问题, 巡逻车无法实现对整个区域的有限时空覆盖。而在安防领域的巡逻过程中, 应急响应的及时性是一个重要指标。

根据前人的研究, 多 agent 系统可以有效满足快速响应和有效覆盖的需求^[6]。也就是说, 化工园区管理者需要同时派出多辆巡逻车。如果巡逻车之间没有合作, 那么在巡逻过程中可能会出现重复巡逻的情况, 浪费巡逻资源。目前的合作有微观和宏观 2 个层面, 微观层面主要研究多机器人系统中个体之间的通信和避碰, 可行巡逻路线的计算是指数增长问题, 给问题求解带来巨大挑战。宏观层面合作的一个有效的方法是区域划分。

本文提出了化工园区合作巡逻博弈模型, 利用区域划分实现多辆巡逻车的协作巡逻, 为巡逻车提供具体的巡逻路径。对于区域划分问题, 本文还提出了贪婪部署算法用于确定初始巡逻车的初始部署。最终选取 Antwerp 化工园区进行案例研究。

1 合作巡逻策略建模

本文从宏观层面考虑巡逻车的合作, 即采取静态分区的方法。首先要将区域划分问题转化为图划分问题, 对化工园区进行图建模, 然后提出贪婪部署算法确定巡逻车的初始部署, 最后对区域进行划分, 并对每个小区域构建巡逻转移图。

1.1 化工园区图建模

化工园区图建模要将化工园区的布局图转化

建模成无向图 $D(N, S)$, 其中 N 为节点, 表示道路交叉口或化工厂车辆出入口, S 为连边, 表示化工园区内连接不同化工厂的道路以及化工厂内部连接不同出入口的道路, 一个化工厂的多个车辆出入口之间必然有道路相连。各巡逻车从不同节点出发, 在节点和连边上巡逻和转移, 当到达化工厂出入口节点时, 巡逻车可以进入该化工厂巡逻检查 t^p 时间, 也可以耗时 t^m 通过一条边移动到其他节点, 当巡逻时间达到最大预算 T 时巡逻结束。其中, t^p 表示巡逻车在化工厂内的巡逻时间, t^m 表示巡逻车在道路上的移动时间。

为了简化模型, 需要离散化时间。将时间段 $[0, T)$ 分成多个相等的时间片, 且每个时间片的长度是 1 min。将所有时间相关参数(t^p 和 t^m 等)都进行离散化处理, 四舍五入为最接近的整数。基于图模型 D 定义超邻接矩阵 $M(i, j)$ 以表示图模型中任意 2 个节点之间的连接关系, 当 2 个节点表示某个化工厂的 2 个不同车辆出入口时, 则表示巡逻车巡逻检查该化工厂所需时间 t^p , 其他情况矩阵元素表示为巡逻车从一个节点移动到另一个节点所需时间 t^m 。

1.2 确定巡逻车初始部署

在复杂路网环境下, 巡逻开始时巡逻车的数量和位置会影响整个巡逻的覆盖率和效率, 因此需要提前确定巡逻车的初始部署, 即需要 n 辆巡逻车, 分别从位置 l 出发。本文提出了贪婪部署算法, 以化工园区大气污染物历史排放数据为基础, 提出 3 个指标: 节点度 d_i 、总覆盖率 c^p 以及重复覆盖率 c^r 。

首先定义参数节点范围 C_i , 用一个集合表示, 其中的元素为与化工厂 i 直接相连的所有化工厂(包括化工厂 i)。

(1) 节点度

本研究中的节点度不是传统意义的相连的边的数量, 而是与节点 i 直接相连的化工厂(包括化工厂 i)的数量, 即集合节点范围 C_i 中元素的个数。

$$d_i = |C_i| \quad (1)$$

(2) 总覆盖率

定义参数节点覆盖率 c_i^p : 化工园区中一共有 N 个化工厂, 节点覆盖率为节点 i 的节点范围 C_i 中化工厂的数量在 N 中的占比。

$$c_i^p = \frac{d_i}{N} \quad (2)$$

总覆盖率 c^p 即为多个节点的节点范围内所有不同化工厂的数量在化工厂总数 N 中的占比。

$$c^p = \frac{|\bigcup C_i|}{N} \quad (3)$$

(3) 重复覆盖率

多个节点的节点范围中可能包含相同的化工厂。将重复覆盖率 c^r 定义为多个节点的节点范围内相同化工厂的数量占不同化工厂总数的比例。

$$c^r = \frac{|\bigcap C_i|}{|\bigcup C_i|} \quad (4)$$

确定巡逻车初始部署的贪婪部署算法如下:

step 1: 计算每个节点的节点度 d_i , 并按照节点度从大到小进行排序;

step 2: 如果有节点度相等的情况, 根据化工园区大气污染物历史排放数据找到经常违规排放污染物的化工厂, 利用最短路径算法计算所有节点到这些化工厂节点的最短距离, 将节点按照最短距离之和从小到大重新排序并获得节点序列;

step 3: 节点序列中的第一个节点是第一辆巡逻车的巡逻出发位置 l_1 ;

step 4: 计算节点的总覆盖率 c^p , 如果高于阈值 th_1 , 则跳至 step 6 执行; 否则选取节点序列的下一个节点;

step 5: 计算这个节点和已确定的巡逻出发位置节点的重复覆盖率 c^r , 如果高于阈值 th_2 , 那么剔除该节点, 选择节点序列中下一个节点, 跳至 step 5 执行; 否则设置该节点为下一辆巡逻车的巡逻出发位置 l_k , 跳至 step 4 执行;

step 6: 算法结束, 得到所需巡逻车的数量 n 及相应的巡逻出发位置 $(l_1, l_2, \dots, l_n)$ 。

1.3 区域划分

根据巡逻车的初始部署, 将化工园区划分为 n 个小区域, 在每个小区内只分配一辆巡逻车, 这样可以避免多辆巡逻车同时在化工园区内巡逻时产生冲突的情况, 从而避免巡逻资源的浪费。

对于化工园区的区域划分, 本研究提出了以下几个原则:

(1) 中心原则: 区域划分以每辆巡逻车的巡逻出发位置 $l_k (1 \leq k \leq n)$ 为中心;

(2) 同厂同区原则: 因为单个化工厂的多个不同车辆出入口之间是完全连接关系, 因此这些车辆出入口要划分在相同的区域中;

(3) 距离优先原则: 计算每个节点 i 到各个巡逻出发位置 l_k 的最短距离, 将距离最近的节点和该巡逻出发位置节点划分在一个区域。对于有多个车辆出入口的化工厂, 计算多个出入口节点到某个巡逻出发位置节点距离时只取其中的最短距离;

(4) 均衡原则: 当出现一个节点到多个巡逻出发位置的相同距离的情况, 暂时先不划分该节点, 先分配其他节点, 最后再将该节点分配给节点较少的小区, 确保每个小区内节点数量均衡。

通过以上 4 个原则可以将化工园区划分成 n 个小区域, 对每个小区域进行图建模, 得到图模型 $D_1(N_1, S_1), D_2(N_2, S_2), \dots, D_n(N_n, S_n)$ 。同时, 超邻接矩阵 $M(i, j)$ 也被划分成 n 个小区的超邻接矩阵 $M_1(i, j), M_2(i, j), \dots, M_n(i, j)$ 。

1.4 巡逻转移图建模

对于任意小区域 k 的图模型 $D_k(N_k, S_k)$, 根据超邻接矩阵 $M_k(i, j)$ 构建巡逻转移图 $tD_k(tN_k, tS_k)$, 给出巡逻车所有可行的行动, 包括时间和位置 2 个信息。

2 巡逻博弈建模

2.1 博弈建模

以下依次对化工园区巡逻博弈模型中的参与者、策略和收益 3 个重要因素进行建模。

参与者分别是“防守者”化工园区管理团队派出的多辆巡逻车和“攻击者”化工厂。巡逻车在博弈中是“领导者”，先采取巡逻策略，化工厂是“跟随者”，采取手段掌握巡逻车的巡逻信息，希望不经净化设备处理违规排放过量污染物以提高收益，管理团队希望通过优化巡逻车的巡逻方案，在控制投入成本的同时以更高的概率发现化工厂的违规行为。假设参与者是完全理性行为人。

攻击者的纯策略由违规排放污染物的开始时间和排放持续时间 2 部分组成。区域 k 中攻击者的纯策略可以表示为公式(5)，其中 t 为开始时间， $dt_{k,i}$ 为排放持续时间。

$$s_a^{k,i} = (t, dt_{k,i}) \quad (5)$$

防守者有多个，但在每个不同的区域中只有一个。区域 k 的防守者的纯策略为该区域的巡逻转移图中一条完整的巡逻路径。

$$s_d^k = \Pi_{(a,b) \in tD_k} c_k(a,b) \quad (6)$$

式中： $c_k(a,b)$ 为区域 k 中的巡逻车从状态 a 到状态 b 的边际覆盖率； Π 为巡逻转移图 tD_k 中可行巡逻行动的笛卡尔积。

最后对攻击者和防守者的收益进行建模。对抗的结果有 2 种：攻击成功和攻击失败。在区域 k 中，如果攻击失败，那么攻击者损失 $P_a^{k,i}$ ，防守者获得奖励 $R_d^{k,i}$ ；如果攻击成功，那么攻击者获益 $G_a^{k,i}$ ，防守者将承担损失 $L_d^{k,i}$ 。

$$u_d^k = R_d^{k,i} \cdot f^k - L_d^{k,i} \cdot (1 - f^k) \quad (7)$$

$$u_a^{k,i} = G_a^{k,i} (1 - f^k) - P_a^{k,i} \cdot f^k \quad (8)$$

式中： f^k 为攻击者攻击失败的概率，也就是巡逻车成功发现化工厂违规排放的概率。

2.2 博弈求解

在化工园区巡逻博弈模型中，假设攻击者会收集巡逻车巡逻路线的信息。比如攻击者通过长期的观察或者通过偷窃巡逻车的巡逻计划获得巡逻路线的信息，因此假设该博弈模型是序贯进行的。在区域 k 中，对攻击者每个策略 $(t, dt_{k,i})$ 通过公式(7)

和(8)计算攻击者和防守者的收益，假设攻击者采取的策略是最佳响应，如公式(9)所示：

$$u_a^k(t^{\#}, dt_{k,i}^{\#}, \bar{c}_k^{\#}) \geq u_a^k(t, dt_{k,i}, \bar{c}_k), \forall (t, dt_{k,i}) \in S_a^k \quad (9)$$

防守者的目标是最大化自身收益，见式(10)：

$$Pof_d(t^{\#}, dt_{k,i}^{\#}, \bar{c}_k^{\#}) = \max_{\bar{c} \in S} u_d^k(t^{\#}, dt_{k,i}^{\#}, \bar{c}_k) \quad (10)$$

求解式(10)可以得到巡逻博弈的均衡解：

$$(\bar{c}_k^*, (t^*, dt_{k,i}^*)) = \operatorname{argmax}_{(t, dt) \in S} Pof_d(t^{\#}, dt_{k,i}^{\#}, \bar{c}_k^{\#}) \quad (11)$$

最终得到的边际覆盖向量 $\bar{c}_k^*$ 即为防守者的最优巡逻策略。因此，可以利用 MultiLPs 算法计算求解化工园区巡逻博弈的 Stackelberg 均衡解。

3 说明性案例实验

本文选取比利时的 Antwerp 化工园区为真实案例进行研究。

3.1 实验设置

图 1 给出了 Antwerp 化工园区的一部分布局。在图中，8 个化工厂区域被标记为区域 A、区域 B 等。图中的白色虚线表示现实中的道路，巡逻车只在道路上行驶。



图 1 Antwerp 化工园区部分区域布局

Fig. 1 Layout of part of the Antwerp Chemical Cluster

图 2 显示了图 1 所示的化工园区的图模型。如我们所见，化工厂的出入口(A1、A2、B1、C1 等)

和交叉路口(Cr1、Cr2 和 Cr3)被建模为节点。根据这些节点的实际连接关系, 边 e_1 至 e_{17} 依次连接以反映车辆道路。在这些边中, 边 3、7 和 12 被添加因为他们属于同一个化工厂内部的道路。

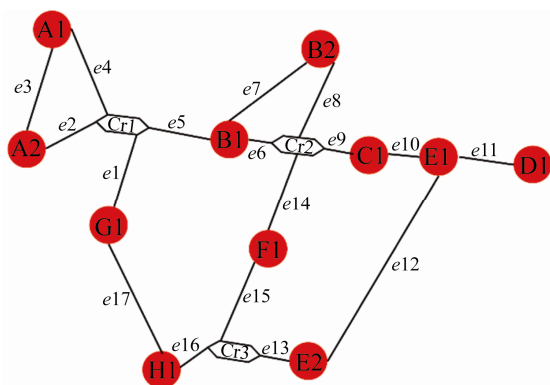


图 2 Antwerp 化工园区图模型
Fig. 2 Graph model of Antwerp Chemical Cluster

接下来确定巡逻车的初始部署。在本研究中, 将总覆盖率和重复覆盖率 2 个阈值分别设置为 0.7 和 0.2 (实验发现, 达到同等巡逻效果下这样设置阈值可以有效控制巡逻资源的数量)。按照 1.2 节中的算法, 计算得到该场景初始巡逻车的数量为 3, 巡逻出发位置节点分别为节点 Cr2、Cr1 和 E1。经过分区得到 3 个小区域, 每个小区的图模型见图 3。

根据每个区域的图模型和超邻接矩阵构建巡逻转移图。在化工园区合作巡逻博弈模型中, 将巡逻车每次的最大预算巡逻时间 T 设置为 30 个时间片。为了简化模型, 本文假设攻击者的攻击持续时间 $d_{k,i}$ 都为 10 个时间片。案例中关于收益的模型输入参数见表 1, 这些参数的具体数值均由化工安全领域的专家提供。

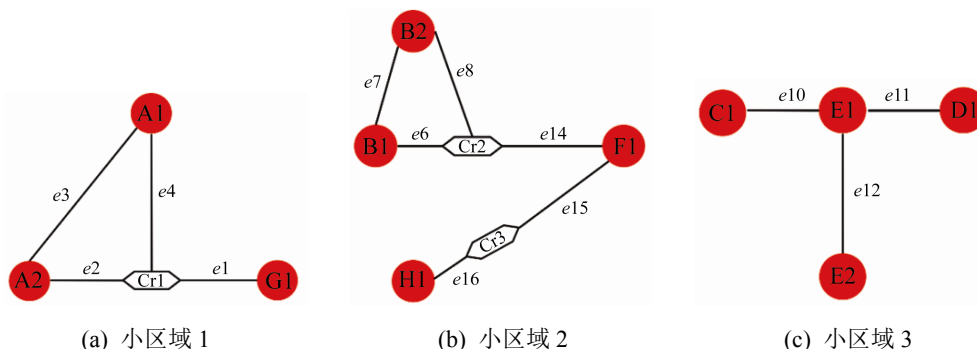


图 3 各个已划分区域的图模型
Fig. 3 Graph model of each partitioned area

表 1 Antwerp 化工园区案例的模型输入
Tab. 1 Model inputs of Antwerp Chemical Cluster case/ $k \in$

区域	节点	$R_d^{k,i}$	$I_d^{k,i}$	$G_a^{k,i}$	$P_a^{k,i}$
1	'A'	1	15.0	8.0	3
2	'B'	1	18.0	10.5	3
3	'C'	1	13.2	8.0	3
3	'D'	1	13.0	7.7	3
3	'E'	1	14.4	7.9	3
2	'F'	1	16.0	8.6	3
1	'G'	1	12.0	7.2	3
2	'H'	1	11.6	8.1	3

3.2 实验结果

图 4 显示了 Antwerp 化工园区区域 1 的巡逻博

弈 Stackelberg 均衡解。其中黑色的加粗线段表示巡逻车的最佳巡逻策略。在 Stackelberg 均衡解中, 攻击者的最佳策略是在时间 0 攻击化工厂 G, 见图 4 中红色的加粗线段。图 4 中最上方的蓝色线段是巡逻车可能采取的所有策略中与攻击者策略有重叠的行动。计算得到防守者的收益为 -5.638 1, 攻击者的收益为 2.208 3。

在现实巡逻过程中, 一些巡逻车会选择固定的巡逻路线进行巡逻。图 5 给出了在 Antwerp 化工园区区域 1 中, 用 MultiLPs 算法求得的巡逻车选取的固定巡逻路线的策略(黑色加粗线段)和攻击者的策略(红色线段)。从图 5 中可以看出, 攻击者选

择在时间 21 攻击化工厂 G。在这种情况下, 防守者和攻击者的收益分别为-10.02 和 4.83。和巡逻博弈的结果相比, 巡逻车选择博弈策略得到的收益高于固定策略, 同时对攻击者的收益有更好的限制。因为巡逻博弈策略给出的是一组可行巡逻路线, 具有一定的随机性, 巡逻计划和固定巡逻策略相比更不容易被攻击者获取掌握。

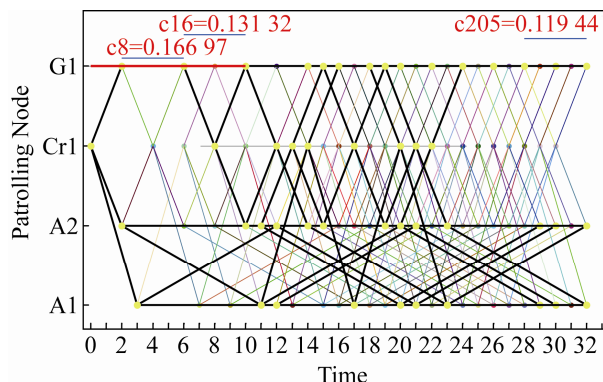


图 4 区域 1 中巡逻车的最优巡逻策略和攻击者的最佳响应

Fig. 4 Optimal patrolling strategy and attacker's best response in partitioned area 1

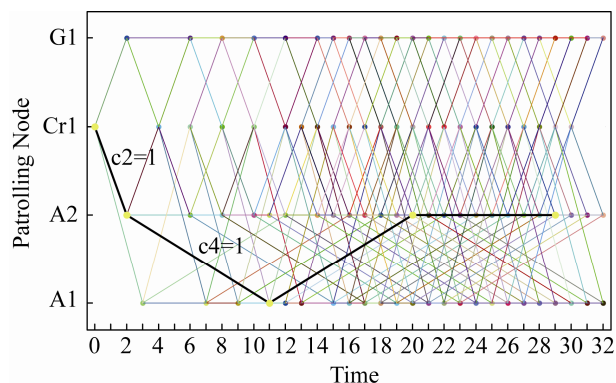


图 5 区域 1 中巡逻车的最优固定巡逻策略和攻击者的最佳响应

Fig. 5 Optimal fixed patrolling strategy and attacker's best response in partitioned area 1

计算另外 2 个小区域以及分区前攻击者和防守者在巡逻博弈策略下的收益, 结果见表 2。和分区前的结果进行比较, 可以发现, 分区后每个小区内防守者的收益和分区前相比都有所提高, 而分区后每个小区内攻击者的收益均低于分区前。

表 2 分区前后参与者在合作巡逻博弈下的收益

Tab. 2 Payoffs of attacker and defender under the cooperative patrolling game before and after partition

区域	Ua	Ud
1	2.208 3	-5.638 1
2	3.215 1	-7.747 2
3	2.002 8	-5.458 1
分区前	3.699 2	-8.428 6

化工园区经过分区, 每辆巡逻车负责的小区域内包含的化工厂数量有所下降, 从整体上来说, 每辆巡逻车可以实现对化工厂更有效的时空覆盖, 因此, 多辆巡逻车对整个化工园区的巡逻效果更好。

由此可见, 本文提出的合作巡逻博弈模型可以有效提高巡逻车的收益, 降低化工厂的收益, 从而降低化工厂违规排放污染物的概率。

4 结论

针对化工园区巡逻问题, 为了保证巡逻车实现对化工厂的时空覆盖和快速响应, 本文提出了化工园区合作巡逻博弈模型, 利用静态分区方法实现化工园区内巡逻车的协作巡逻。对于分区问题, 本文提出了贪婪部署算法以确定巡逻车的初始部署。通过 Antwerp 化工园区的实例研究证明本文提出的合作巡逻博弈比目前常用的固定巡逻策略更有效, 另外静态分区后也可以将巡逻车的收益提高 8.08%~35.24%, 同时降低攻击者的收益, 有效降低化工厂违规排放污染物的概率, 降低了发生安全事故的风险。

参考文献:

- [1] Reniers G. An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters[J]. Journal of Hazardous Materials (S0304-3894), 2010, 177(1/3): 167-174.
- [2] Fabio A, Phoebe K, Nikos T. Information Sharing and Environmental Policies[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health (S1661-7827), 2010, 7(10): 3561-3578.
- [3] Chen X, Yum T S P. Patrol districting and routing with

- security level functions[C]// IEEE International Conference on Systems Man & Cybernetics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010.
- [4] Yolmeh A, Melike B G. Urban rail patrolling: a game theoretic approach[J]. Journal of Transportation Security (S1938-7741), 2018, 11(1/2): 23-40.
- [5] Rezazadeh A, Zhang L, Reniers G, et al. Optimal patrol scheduling of hazardous pipelines using game theory[J]. Process Safety & Environmental Protection (S0957-5820), 2017, 109: 242-256.
- [6] Sugiyama A, Sea V, Sugawara T. Emergence of divisional cooperation with negotiation and re-learning and evaluation of flexibility in continuous cooperative patrol problem[J]. Knowledge and Information Systems (S0219-1377), 2019, 60(3): 1587-1609.