

周界防护的最优替换调度

梁星星¹, 黄魁华¹, 马 扬¹, 陈 超¹, 孙博良¹, 马 豪², 张广平³, 黄红蓝¹

(1. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410072)

(2. 中国西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

(3. 中国人民解放军 31111 部队, 江苏 南京 210023)

[摘要] 随着 UAV 技术的不断发展, 人们越来越趋向于采用带有摄像功能的 UAV 来进行区域的周界防卫, 从而跟踪监测潜在的入侵或其他监视任务. 考虑 UAV 的电量消耗问题, 本文提出了一种替换策略来保证 UAV 对的跟踪电量尽可能大, 给出了周期性策略的重要性说明, 在这一指导下, 提出了 UAV 数量为奇数和偶数时的替换策略最优的充要条件, 并给出了生成最优策略的方法.

[关键词] 机器学习, 调度问题, 最优替换策略, 周界防卫, UAV

[中图分类号] TP391 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2019)03-0052-06

Optimal Replacement Scheduling for Perimeter Guarding

Liang Xingxing¹, Huang Kuihua¹, Ma Yang¹, Chen Chao¹, Sun Boliang¹, Ma Hao²,
Zhang Guangping³, Huang Honglan¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

(2. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

(3. The PLA 31111 Troops, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the continuous development of UAV technology, people are more and more inclined to use UAV with camera function to defend the perimeter of the area, so as to track and monitor potential intrusion or other surveillance tasks. Considering the power consumption of UAV, this paper proposed a replacement strategy to ensure that the tracking power of UAV pairs is as large as possible. The importance of periodic strategy is explained. Under this guidance, the necessary and sufficient conditions for the optimal replacement strategy when the number of UAV is odd and even are proposed, and the method for generating the optimal strategy is given.

Key words: machine learning, scheduling problem, optimal replacement strategies, perimeter guarding, UAV

小型无人机(unmanned aerial vehicles, UAV)等自治机器人的发展, 为区域周界防护提供了新的防护手段, 人们越来越趋向于采用带有摄像功能的 UAV 来进行区域的周界防卫, 从而跟踪监测潜在的入侵或其他监视任务. 采用自治机器人去完成周界防御包含两个问题: (1) 如何布置; (2) 何时替换. 现有的研究中, 关于如何布置这些机器人有两种方式: (1) 静态布置, 是将这些机器人或者传感器放在固定的位置上, 通过合理的布点, 使得监视范围或者概率最大化, 从而来完成周界任务^[1-2]; (2) 动态布置, 是指确定机器人合理可行的运动策略, 从而克服机器人数量不足导致的区域不能全覆盖问题, 并且可以跟踪可能发生的潜在入侵^[3-5].

本文关注的是第二个问题, 即何时替换. 在场景设置中, 考虑有 n 架 UAV 沿布控区域的周界展开, 这些 UAV 可以是固定在某地静态徘徊, 也可以是沿着确定路线移动, 从而确保最大化地发现目标入侵. 为了完成最大化目标入侵发现概率任务, 需要寻找一种 UAV 替换策略, 该策略不依赖于 UAV 是静态徘徊还是动态运动.

此外, 在某些情境下, UAV 基地可能会有一些备份的 UAV, 用来替换掉那些电量不足的 UAV, 使得任

收稿日期: 2019-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金(71471174)、装备发展部人工智能应用技术领域基金(61403120206).

通讯联系人: 黄魁华, 博士, 副研究员, 研究方向: 智能规划. E-mail: kuihh@163.com

务得以保障. 电量不足的 UAV 将会在基地得到补充,成为新的备份 UAV. 在另外一些情境下,UAV 基地可能没有多余的用来做备份的 UAV,电量不足的 UAV 将不得不飞回基地进行补充,从而使得保障任务的 UAV 数量少于 n 架. 上述两种情况都需要考虑 UAV 的替换问题:一架 UAV 离开,需要另外一架飞入其位置进行补充或者自身快速地加完电量飞回来.

UAV 飞回基地以及补充燃料所花费的时间根据实际情况有很多种情况,为了便于问题研究,本文给出一些前提:在初始时刻,所有的 UAV 电量都是充满的,所有补充电量返回的 UAV 也是满电量;假定侵入目标是从两架 UAV 之间穿过,两架 UAV 都可以发现目标,将派遣可用电量最多的 UAV 对目标进行跟踪,而电量较少的则继续留在原地监视;在所定义的任务当中,即使周界的防卫 UAV 会动态移动,但是 UAV 沿周界分布次序不会改变.

在这一问题研究中,Burdakov O 等^[5]提出了一种周期性策略,对 UAV 数量为奇数和偶数的类型分别给出了一种替换策略,但其并没有给出多种替换策略,没有找到问题的更多解以及全集解. 在这一基础上,Erdelj M 等^[6]针对单个无人机无法满足结构检测任务的问题,提出了一种允许无人机系统提供连续不间断结构检测服务的算法,解决了多无人机结构检测专用航路点任务. Kim D 等^[7]针对无人机救援任务,提出了一种启发式算法解决多 UAV 调度的快速响应. Hartuv E 等^[8]在原文题的基础上,将可替换策略推广到多个备用无人机中,并利用贪婪近似算法对问题进行求解,获得有效的替换策略. Cumino P 等^[9]针对多无人机快速部署,构建组网通信任务,考虑 UAV 的能力与载荷,提出了一种提高视频传输和全球能源效率的无人机合作方案. 段晓稳等^[10]针对拟定警戒时间限定下的防空警戒巡逻策略,提出了一种单/多架同构舰载预警机巡逻策略滚动规划模型,利用多主单从结构的多种群并行自适应-禁忌遗传算法对模型进行了求解. 这些研究都是拓展了原问题的应用范围,在不同的领域对该方法进行扩展,而不是对原文的解进行进一步寻找. 本文的研究是在原问题研究的基础上,对寻找问题的大多数解进行进一步研究,以期找到问题的更多解.

1 问题描述与定义

根据上述分析,在周界防卫问题中定义如下几个概念:

UAV 对:是指相邻的两架 UAV 形成的对,每个 UAV 对都是以当前这个 UAV 编号进行标定,例如编号 4 和 5 的 UAV 对属于 UAV₄ 对,编号 5 和 6 的 UAV 对属于 UAV₅ 对. n 架 UAV 中的最后一架 UAV 和编号为 0 的 UAV 形成 UAV _{$n-1$} 对.

危险跟踪电量:跟踪电量是 UAV 对中电量大的 UAV 的电量,危险跟踪电量是所有 UAV 对中跟踪电量最小的值.

危险守卫电量:守卫电量是 UAV 对中电量小的 UAV 的电量,危险守卫电量就是当前所有 UAV 电量的最低值,这个最低值必须大于 UAV 飞回基地所需的电量.

为了较好地对 UAV 间的次序进行描述,对相关加减运算进行如下定义:

$$i \oplus 1 = \begin{cases} i+1, & \text{if } i \neq n-1, \\ 0, & \text{if } i = n-1. \end{cases}$$

在本文所述研究的问题中,UAV 组成一个封闭的圆环,如图 1 所示,UAV 的编号最大为 $n-1$,在加和的过程中,采用模的概念,即 $i \oplus j = (i+j) \% n$. 同样依此可以类推 \ominus 的含义.

UAV _{i} 的电量 $l_i(t)$ 随时间的线性变化如下式所示:

$$l_i(t) = L - c(t - t'),$$

式中, L 表示 UAV 的满电电量; c 表示电量消耗速率; t' 表示 UAV _{i} 最近一次的充电时间.

UAV _{i} 对的跟踪电量 $\bar{l}_i(t)$ 是指两架无人机中用于跟踪突现目标的无人机电量,即 $l_i(t)$ 、 $l_{i \oplus 1}(t)$ 中电量大的值. $\bar{l}_i(t)$ 随时间的变化过程如下式,式中的 t' 是最近一次的充电时间.

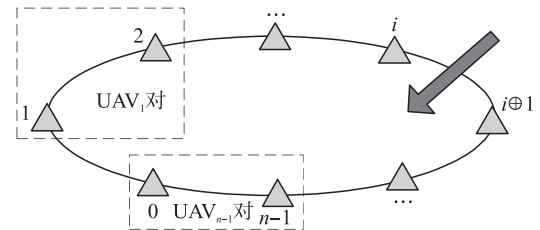


图 1 UAV 对及入侵示意图

Fig. 1 Intrusion schematic and UAV pair

$$\bar{l}_i(t) = \max \{ l_i(t), l_{i \oplus 1}(t) \},$$

$$\bar{l}_i(t) = L - c(t - t').$$

危险跟踪电量 $\bar{l}(s)$, 表示在所有 UAV_i 对用于跟踪的无人机中电量最少的无人机电量. 在策略 s 下的危险跟踪电量 $\bar{l}(s)$ 定义如下式:

$$\bar{l}(s) = \min_{i \in N} \bar{l}_i(t), t \geq 0.$$

危险守卫电量 $l(s)$, 表示在所有 UAV_i 对用于守卫的无人机中电量最少的无人机电量. 策略 s 下的危险守卫电量 $l(s)$ 定义如下式:

$$l(s) = \min_{i \in N} l_i(t), t \geq 0.$$

综上所述, 周界防卫的优化目标定义为下式:

$$\max_{s \in S} \{ \bar{l}(s) : l(s) \geq l_{\min} \},$$

即在所有的策略当中, 寻找满足危险守卫电量满足最低阈值 $l(s) \geq l_{\min}$, 并且危险跟踪电量 $\bar{l}(s)$ 最大的策略.

2 周期性策略定义

定义策略 $s = \{v_0, v_1, \dots\} \in S$ 是周期的, 即对于任意的 v_k , 在 n 步后 $v_{k+n} = v_k$. v_k 是一种映射, 即 $v_k \rightarrow N$.

引理 1 如果 $s \in S$ 是一种周期策略, 那么 $l(s) = L - cT$; 如果 $s \in S$ 不是周期策略, 那么 $l(s) < L - cT$;

$$T = n\tau.$$

Burdakov O 等^[5]在其文章中已经证明这一引理, 本文在此不再赘述.

引理 1 的提出, 引入了时间间隔 τ , 分析可知, 任意周期性策略 s 是可行的, 当且仅当 τ 满足下式: $\tau \leq \frac{L - l_{\min}}{cn}$, τ 值的大小决定着策略的成功与否. 如果 $\tau > \frac{L - l_{\min}}{cn}$, 则意味着在还没有给每架 UAV 都充一次电的情况下, 前期满电量的 UAV 所剩电量已不足以支撑其飞回电量补给站. 同样, τ 也要大于在没有 UAV 备份的情况下, UAV 飞回电量补给站以及进行电量补给的时间和.

为了方便描述, 定义一种映射, $\kappa(i) \rightarrow K, K \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, 表示 UAV_i 在周期性的替换策略中的第 K 个替换. 如图 2, 给出了 8 架 UAV 进行替换的周期性策略 $s = \{0, 3, 6, 1, 4, 7, 2, 5\}$ 的示意图, 则 $\kappa(1) = 3$.

从图 2 中可以发现, 策略是个有向图 $G = (K, E)$, 其中节点 $K = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, 边集 $E = (\kappa(i), \kappa(i \oplus 1))$.

为了方便计算节点在图中的距离, 定义了一种距离计算公式, $d(k', k'') = k'' \ominus k'$, 那么现实相邻的两架无人机 UAV_i 和 UAV_{i ⊕ 1} 在替换策略中的位置间隔为 $d(\kappa(i), \kappa(i \oplus 1))$, 在此定义 UAV_i 在周期策略 s 中的两种距离, 用以区分前后:

$$D_i^+(s) = d(\kappa(i), \kappa(i \oplus 1)),$$

该距离表示正向距离, 即在 UAV_i 充电后, 轮到 UAV_{i ⊕ 1} 充电的间隔数.

$$D_i^-(s) = d(\kappa(i \oplus 1), \kappa(i)),$$

该距离表示负向距离, 即在 UAV_{i ⊕ 1} 充电后, 轮到 UAV_i 充电的间隔数.

为理解上述两类距离定义, 考虑图 2 中的 UAV₄ 对, 观察策略 s 可以发现:

$$D_4^+(s) = d(\kappa(4), \kappa(5)) = d(4, 7) = 3,$$

同理

$$D_4^-(s) = d(\kappa(5), \kappa(4)) = d(7, 4) = 5.$$

定义 UAV_i 的相距距离:

$$D_i(s) = \max \{ D_i^+(s), D_i^-(s) \}.$$

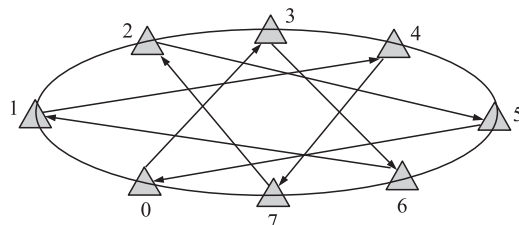


图 2 周期策略 s 的示意图

Fig. 2 Periodic replacement strategies schematic

由引理 1 可以得到 $D_i^+ + D_i^- = n$.

那么可以获得 UAV_i 对的追踪距离的下界:

$$\inf \bar{l}_i(t) = L - c\tau D_i(s),$$

进一步,可以得到 s 策略的全局下界,

$$\bar{l}(s) = L - c\tau \max_{i \in N} D_i(s).$$

通过上述分析,问题转换为求解下式:

$$\min_{s \in S} \max_{i \in N} D_i(s).$$

3 最优替换调度

3.1 策略最优性判定

根据上述分析,依据 $\max_{i \in N} D_i(s)$, 得到策略 s 的 $\bar{l}(s)$ 的上界,现给出引理 2.

引理 2 在式 $\bar{l}_{\text{odd}} = L - \frac{c(n+1)\tau}{2}$ 和 $\bar{l}_{\text{even}} = L - \frac{c(n+2)\tau}{2}$ 中,对于任意的 $s \in S$,如果 n 是奇数,那么 $\bar{l}(s) \leq \bar{l}_{\text{odd}}$,反之 $\bar{l}(s) \leq \bar{l}_{\text{even}}$.

Burdakov O 等^[5]在其文章中已经证明这一引理,本文在此不再赘述.

引理 2 给出了问题的求解上界,现在根据这个上界,对获得的策略分两种情况讨论,分别是 UAV 数量为奇数和为偶数.

接下来将给出推理 1、2,并证明推理的正确性.

推理 1 假设 τ 满足不等式 $\tau \leq \frac{L-l_{\min}}{cn}$,当 n 是一个奇数时,那么周期性策略 $s \in S$ 是最优策略,当且仅当:

$$\kappa(i \oplus 1) = \kappa(i) \oplus D_{i \ominus 1}^+(s), \quad D_{i \ominus 1}^+(s) \in \left\{ \frac{n-1}{2}, \frac{n+1}{2} \right\}. \quad (1)$$

证明 从式(1)可以得到 $D_0^+(s) = D_1^+(s) = \dots = D_{n-1}^+(s)$.

充分性:由引理 2 可知,当 n 为奇数时,上界为 $L - \frac{c(n+1)\tau}{2}$,且任意的 $D_i(s) \leq \frac{n+1}{2}$. 由于 s 为最优策略,则对于任意的 UAV_i,必有 $D_i(s) = \frac{n+1}{2}$,这意味着 $D_i^+(s) = \frac{n-1}{2}$ and $D_i^-(s) = \frac{n+1}{2}$ 或者 $D_i^+(s) = \frac{n-1}{2}$ and $D_i^-(s) = \frac{n+1}{2}$. 那么现在的问题转而求为什么满足式 $\kappa(i) \oplus D_{i \ominus 1}^+(s)$,因为 $\kappa(i) \oplus D_{i \ominus 1}^-(s) = \kappa(i \ominus 1)$,该位置已经被 UAV_{i \ominus 1} 占据,存在占位冲突,因而满足式 $\kappa(i) \oplus D_{i \ominus 1}^+(s)$.

必要性:从式(1)可得, $D_i(s) = \max\left\{\frac{n-1}{2}, \frac{n+1}{2}\right\} = \frac{n+1}{2}$,则 $\bar{l}(s) = \bar{l}_{\text{odd}}$,所以策略 s 为最优调度.

证毕.

偶数情境下的最优策略判定的充要条件由推理 2 给出.

推理 2 假设 τ 满足不等式 $\tau \leq \frac{L-l_{\min}}{cn}$,当 n 是一个偶数时,那么周期性策略 $s \in S$ 是最优策略,当且仅当:

$$\text{如果 } D_{i \ominus 1}(s) = \frac{n}{2}, \text{ 那么 } \kappa(i \oplus 1) = \kappa(i) \oplus D^+(s); \quad (2)$$

$$\text{如果 } D_{i \ominus 1}(s) = \frac{n}{2} + 1, \text{ 那么 } \kappa(i \oplus 1) = \{\kappa(i) \oplus D^+(s) \text{ or } \kappa(i \oplus 1) = \kappa(i) \oplus n/2\}; \quad (3)$$

$$D^+(s) \in \left\{ \frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} + 1 \right\}.$$

证明 充分性:由引理 2 可知,当 n 为偶数时,上界为 $L - \frac{c(n+2)\tau}{2}$,且 $\max_{i \in N} D_i(s) \leq \frac{n+2}{2}$. 由于 s 是最优策略,因而 $\max_{i \in N} D_i(s) = \frac{n+2}{2}$,对于任意的 UAV $_i$,可得 $D_i(s) \leq \frac{n+2}{2}$,由引理 1 可知,由于 s 的周期性,可得 $D_i(s) \geq \frac{n}{2}$. 综上可得 $D_i(s) \in \left\{ \frac{n}{2}, \frac{n+2}{2} \right\}$. 当 $D_{i \ominus 1}(s) = \frac{n}{2}$ 时,则 $D_i(s) = \frac{n+2}{2}$,反之,如果 $D_i(s) = \frac{n}{2}$,则 $\kappa(i) \oplus D_i^+(s) = \kappa(i) \oplus D_i^-(s) = \kappa(i \ominus 1) \neq \kappa(i \oplus 1)$,故 $D_i(s) = \max \{ D_i^+(s), D_i^-(s) \} = \frac{n+2}{2}$. 当 $D_{i \ominus 1}(s) = \frac{n+2}{2}$ 时,则 $\kappa(i \oplus 1)$ 有两种选择,分别对应 $D_i(s) = \frac{n+2}{2}$ 和 $D_i(s) = \frac{n}{2}$,显然,对于式(2)、式(3),策略 s 满足其要求.

必要性:从式(2)、式(3)可得, $\max_{i \in N} D_i(s) = \frac{n+1}{2}$,则 $\bar{l}(s) = \bar{l}_{\text{even}}$,所以策略 s 为最优调度.

证毕.

3.2 策略求解

上述小节通过推理 1 和推理 2 给出了策略的最优性判定,提出了一种求解策略的思路,下面根据策略最优性判定,寻找 UAV 数量为奇数和偶数的两个例子的最优性策略.

(1) UAV 数量为奇数

现假设有 7 架 UAV 沿所负责的周界展开,如图 3 所示.

根据推理 1,首先从 UAV $_0$ 进行策略选择,即 $\kappa(0) = 0$,由于 $n=7$,因而 $D_0(s) = 4$,令 $D_i^+(s) = 4, i \in 0, 1, \dots, 6$,因而

$$\begin{aligned} \kappa(0 \oplus 1) &= \kappa(1) = \kappa(0) \oplus D_0^+(s) = 4, \\ \kappa(1 \oplus 1) &= \kappa(2) = \kappa(1) \oplus D_1^+(s) = 1, \\ \kappa(2 \oplus 1) &= \kappa(3) = \kappa(2) \oplus D_2^+(s) = 5, \\ \kappa(3 \oplus 1) &= \kappa(4) = \kappa(3) \oplus D_3^+(s) = 2, \\ \kappa(4 \oplus 1) &= \kappa(5) = \kappa(4) \oplus D_4^+(s) = 6, \\ \kappa(5 \oplus 1) &= \kappa(6) = \kappa(5) \oplus D_5^+(s) = 3. \end{aligned}$$

采用推理 1 的迭代过程,我们获得了该问题下的最优调度方案,结果见表 1,并在图 3 中进行了展示.

(2) UAV 数量为偶数

现假设有 8 架 UAV 沿所负责的周界展开,如图 4 所示.

根据推理 2,首先从 UAV $_0$ 进行策略选择,即 $\kappa(0) = 0$,由于 $n=8$,因而 $D_0(s) \in \{4, 5\}$. 令 $D_0(s) = 4$,则可得 $D_7(s) = 5$,现令 $D^+(s) = 3$.

由于 $D_0(s) = 4$,可得 $\kappa(1) = 4$.

由于 $D_0(s) = 4$,因而 $D_1(s) = 5$,故用式(2)进行计算,则 $\kappa(2) = 7$.

由于 $D_1(s) = 5$,故而 $D_2(s)$ 有两种选择,令 $D_2(s) = 5$,则 $\kappa(3) = 2$.

由于 $D_2(s) = 5$,故而 $D_3(s)$ 有两种选择,令 $D_3(s) = 5$,则 $\kappa(4) = 5$.

由于 $D_3(s) = 5$,故而 $D_4(s)$ 有两种选择,由于占位,令 $D_4(s) = 4$,则 $\kappa(5) = 1$.

由于 $D_4(s) = 4$,因而 $D_5(s) = 5$,故用式(2)进行计算,则 $\kappa(6) = 6$.

由于 $D_5(s) = 5$,故而 $D_6(s)$ 有两种选择,但此时只剩下一个位置了,令 $D_6(s) = 5$,则 $\kappa(7) = 3$. 此时 $D_7(s) = 5$. 结果见表 2.

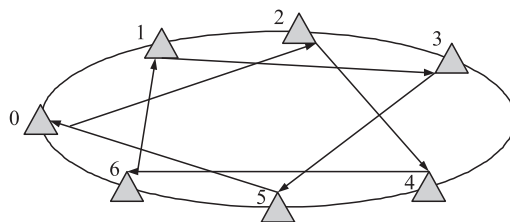


图 3 7 架 UAV 替换策略示意图

Fig. 3 Replacement strategies schematic where the UAV num is 7

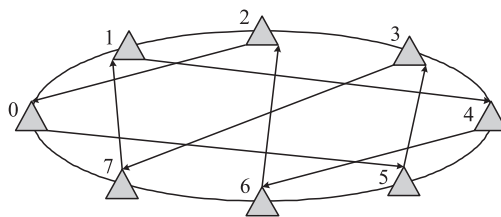


图 4 8 架 UAV 替换策略示意图

Fig. 4 Replacement strategies schematic where the UAV num is 8

表 1 奇数架 UAV 时的替换策略

Table 1 Replacement strategies where the UAV num is odd

编号 i	0	1	2	3	4	5	6
映射 $\kappa(i)$	0	4	1	5	2	6	3

表 2 偶数架 UAV 时的替换策略

Table 2 Replacement strategies where the UAV num is even

编号 i	0	1	2	3	4	5	6	7
映射 $\kappa(i)$	0	4	7	2	5	1	6	3

4 结语

随着小型便携式 UAV 的技术进步,周界防卫在现代安防中的关注度越来越高,对敏感区域进行防御的需求越来越旺盛. 本文对 UAV 周界防卫问题中 UAV 替换策略进行了研究. 首先证明了替换策略周期性的重要性,基于这个结果,分情况讨论了当 UAV 数量为奇数和偶数时的策略最优的充要条件,并给出了证明. 依据这一充要条件,找到了奇数、偶数条件下的最优策略. 在未来的研究中,我们将考虑更多的约束,诸如环境不确定性及偶发事故带来的影响.

[参考文献]

- [1] BULLO F, CORTES J, MARTINEZ S. Distributed control of robotic networks[J]. Dissertations & theses-gradworks, 2008(1): 320–335.
- [2] MOLYBOHA A, ZABARANKIN M. Stochastic optimization of sensor placement for diver detection[J]. INFORMS, 2012, 60(2): 292–312.
- [3] AGMON N, KAMINKA G A, KRAUS S. Multi-robot adversarial patrolling: facing a full-knowledge opponent[J]. AI access foundation, 2011, 42: 887–916.
- [4] ACEVEDO J J, ARRUE B C, MAZA I, et al. Cooperative large area surveillance with a team of aerial mobile robots for long endurance missions[J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2013, 70(1/4): 329–345.
- [5] BURDAKOV O, KVARNSTROM J, DOHERTY P. Optimal scheduling for replacing perimeter guarding unmanned aerial vehicles[J]. Annals of operations research, 2014, 249(1/2): 1–12.
- [6] ERDELJ M, SAIF O, NATALIZIO E, et al. UAVs that fly forever: uninterrupted structural inspection through automatic UAV replacement[EB/OL]. [2019–03–04]. <https://dio.org/10.1016/j.adhoc.2017.11.012>.
- [7] KIM D, LEE K, MOON I. Stochastic facility location model for drones considering uncertain flight distance[EB/OL]. [2019–03–04]. <https://dio.org/10.1007/s10479-018-3114-6>.
- [8] HARTUV E, AGMON N, KRAUS S, et al. Scheduling spare drones for persistent task performance under energy constraints[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Liverpool: International foundation for autonomous agents and multiagent systems, 2018: 532–540.
- [9] CUMINO P, LOBATO JUNIOR W, TAVARES T, et al. Cooperative UAV scheme for enhancing video transmission and global network energy efficiency[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4155.
- [10] 段晓稳, 高晓光, 李波. 综合作战区同构舰载预警机巡逻策略分段滚动规划方法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1301–1310.

[责任编辑: 丁 蓉]