

## 基于集散式模型预测控制的多无人机协同分区搜索

吴青坡<sup>†</sup>, 周绍磊, 刘 伟, 尹高扬

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对多无人机在对大范围目标区域执行协同搜索任务时搜索资源分配不均、容易因频繁转场造成资源浪费等问题, 借鉴集中式控制和分布式控制结构的优点, 建立了集散式多无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)协同搜索结构体系, 通过聚类分析和V图划分等方法对目标区域进行分区, 结合各子区域任务特点对无人机群进行搜索任务分配, 并采用一种经改进后可有效增大UAV预测范围的预测控制模型, 研究了动态环境下多UAV集散式协同分区搜索问题, 最后, 将所提方法与常见几种协同搜索方法进行对比仿真, 获取仿真结果验证了所提方法在目标发现概率和搜索效率方面的有效性和优越性。

**关键词:** 集散式体系结构; 协同搜索; 时敏目标; 多无人机; 区域分割

中图分类号: V279 文献标识码: A

## Multi-unmanned aerial vehicles cooperative search based on central-distributed model predictive control

WU Qing-po<sup>†</sup>, ZHOU Shao-lei, LIU Wei, YIN Gao-yang

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China)

**Abstract:** When multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) implement their surveillance and search operations in a broad-expanse uncertain environment, there exists resource-wasting on repetitive searching or frequent transition from one cell to another based on some traditional search algorithms. Promoted by the advantages in the central and distributed control architectures, we propose a multi-UAV cooperative search strategy to partition the target area by clustering analysis and voronoi partitioning. An improved predictive model is presented to design the multi-UAVs search strategy under dynamic environment. Finally, comparing various simulation results demonstrate the validity of the proposed cooperative search strategy.

**Key words:** centrally-distributed control architecture; cooperative search; time-critical targets; multi-unmanned aerial vehicles (UAVs); area decomposition

### 1 引言(Introduction)

目前, 无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)已被广泛应用于侦察监视<sup>[1]</sup>、目标跟踪<sup>[2]</sup>、对地打击、电子对抗、战效评估等军事领域, 但从各国无人系统发展来看, 执行情报、侦察与监视任务仍然是当前无人系统的基本使命<sup>[3-4]</sup>, 多UAV协同搜索与监视依然是国内外多平台协同控制领域的一个研究热点<sup>[1, 5-6]</sup>。

多UAV协同搜索主要有固定编队与航线搜索和自由飞行搜索两种模式, 前者模式中多UAV组成固定编队并按固定航线执行搜索任务, 如扫描式搜索方式<sup>[7-8]</sup>、内螺旋方式<sup>[9]</sup>等搜索方法, 主要应用在相对简单环境下对静态目标的覆盖搜索, 文献[10]虽采用横队垂线和横队斜线扫描式搜索算法可对运动目标进行区域覆盖搜索, 但在UAV速度与目标速度比值较

小、传感器探测宽度较窄、编队飞行两边界距离较长等情况下, UAV编队有效搜索区域将明显降低甚至不能有效完成任务. 自由飞行搜索模式主要采用基于信息素图<sup>[11-12]</sup>、概率图<sup>[13-14]</sup>、回报率<sup>[15]</sup>等目标区域信息的搜索图方法, 可以利用实时探测信息, 在线求解UAV的搜索航迹, 对动态环境搜索有较好的效果. Hu等<sup>[16]</sup>研究了基于分布式迭代概率图更新模型的多UAV对多个地面静态目标搜索问题, 并在探测和通信受限情况下, 将基于3维视觉的多UAV协同搜索移动地面目标问题转换为协同区域覆盖优化控制问题<sup>[6]</sup>. Meng等<sup>[17]</sup>在考虑UAV动力学特性及多UAV避碰的基础上, 对分散式覆盖算法进行改进, 综合研究了多UAV起飞、目标搜索、任务分配、目标跟踪等任务模式. 文献[18]利用动态数据驱动应用系统(dyna-

mic data-driven application system, DDDAS)结构平台, 研究了基于智能体仿真的多UAV动态协同清洁方面的集群控制问题. 文献[19]在目标大概位置已知情况下, 采用搜索和监视两种不同任务类型无人机相互配合的方式, 依据概率图动态规划和质心 $V$ 图划分方法研究了在多UAV分布式协同搜索与覆盖问题. 自由搜索模式要求较高的多UAV协同控制与决策技术, 在大规模系统中易出现计算量大, 求解复杂度高不足<sup>[14]</sup>, 且所采用搜索策略大都以贪婪搜索策略为基础改进, 容易因频繁转场等原因造成资源浪费. 为降低搜索难度, 质心 $V$ 图划分<sup>[20]</sup>、模糊 $c$ 均值聚类<sup>[21]</sup>、多边形分割<sup>[22]</sup>等方法被用来把目标区域分割为与UAV等数量的子区域, 将多架UAV协同搜索问题转换为单架UAV搜索和监视问题. 该分区方法遇到有UAV不能继续执行搜索任务时, 需及时进行重新分区和任务分配, 此外, 在UAV编队协同执行复杂任务情况下, 该方法也不利于多UAV编队协同执行后续目标跟踪、目标攻击、毁伤评估等任务.

为更好地解决大区域多UAV协同搜索问题, 针对分布式控制具有较好的可量测性和鲁棒性, 但获得全局最优解则较为困难, 然集中式控制虽具有全局控制和决策能力的优势, 但在大规模系统中存有计算量大、求解复杂度高、中央节点故障容易导致系统崩溃等特点, 对将两种控制结构进行有机结合, 突出双方优点的集散式控制结构进行改进, 建立起多UAV集散式协同搜索结构, 并通过聚类分析和 $V$ 图划分的方法对目标区域进行分区, 依各子区域任务情况对UAV编队进行分组, 各组UAV采用改进的模型预测方法进行协同搜索决策, 最后通过仿真分析, 表明所提方法可以有效地完成大目标区域情况下多UAV协同搜索任务.

## 2 协同搜索问题描述(Description of cooperative search problem)

假设有地面控制站、通信卫星、多架UAV、操作人员等组成多UAV系统对某一广阔且地形复杂任务区域 $Q$ 执行协同目标搜索任务, 区域内各种类型目标总数为 $N_t$ , 其中静止目标、运动目标和潜在时间敏感目标个数分别为 $N_j$ ,  $N_m$ 和 $N_s$ , 使用 $N_v$ 架UAV利用机载传感器对区域进行协同搜索, 一定通信范围内各UAV之间, UAV与地面指挥控制中心有一定的信息交互能力, 多UAV协同搜索任务的主要目的就是要找取一种方法, 在一定时间内, 在保证UAV安全的前提下, 以最小的搜索代价探测到尽可能多的目标信息.

### 2.1 协同搜索问题分析(Problem analysis)

多UAV搜索问题需要考虑环境、目标及多UAV系统自身等诸多复杂因素, 涉及UAV的自主控制与决策、UAV之间的协同、UAV在线调整与决策能力等方面, 是一类复杂的动态优化与控制问题. 多UAV的

协同搜索是UAV不断根据环境、目标、自身等信息进行自主决策的过程, 其决策过程可看作是由建立信息描述、预测未来行为、在线搜索决策、执行决策等相关环节构成的动态循环过程. 常见的多UAV的协同搜索决策问题求解控制系统结构有集中式控制结构和分布式控制结构两种, 两种控制结构下多UAV协同控制问题可看作式(1)–(2)所描述的最优决策问题<sup>[5]</sup>:

$$U^*(k) = \arg \max_{U(k)} J(X(k), U(k)),$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x(k+q|k) = f \begin{pmatrix} x(k+q-1|k) \\ u(k+q-1|k) \end{pmatrix}, \\ x(k|k) = x(k), \\ x(k+q|k) \in \Xi, i = 1, 2, \dots, N_V, \\ u(k+q|k) \in \Theta, \\ G(X(k), U(k)) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$U_i^*(k) = \arg \max_{U_i(k)} J_i \begin{pmatrix} X_i(k), X_{-i}(k) \\ U_i(k), U_{-i}(k) \end{pmatrix},$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_i(k+q) = f_i \begin{pmatrix} x_i(k+q-1|k) \\ u_i(k+q-1|k) \end{pmatrix}, \\ x_i(k|k) = x_i(k), \\ x_i(k+q|k) \in \Xi, i = 1, 2, \dots, N_V, \\ u_i(k+q|k) \in \Theta, \\ x_i(k+N|k) \in \Xi_{\text{if}}, \\ G(X_i(k), X_{-i}(k), U_i(k), U_{-i}(k)) \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $J(X(k), U(k)) = \lambda_1 J_e + \lambda_2 J_t + \lambda_3 J_c$ 为搜索性能指标函数,  $X(k)$ 是多UAV系统的状态变量,  $U(k)$ 是UAV的决策序列;  $J_e$ 用于描述UAV在搜索过程中的环境搜索收益,  $J_t$ 用于描述UAV飞到目标位置过程中的发现目标收益,  $J_c$ 用于描述UAV之间协同搜索收益;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为对应各项分指标的权重系数, 各性能指标类型及权重依搜索问题特征而定.  $x(k+1)$ 和 $x_i(k+1)$ 分布表示UAV系统和UAV $i$ 的状态方程,  $X_{-i}(k)$ 为UAV $i$ 感知的临近UAV的预测状态,  $U_{-i}(k)$ 为其它UAV的预测控制输入.  $\Xi$ 和 $\Theta$ 分别表示UAV的可行状态集和容许输入集,  $\Xi_{\text{if}}$ 表示UAV的状态约束集,  $G(X(k), U(k)) \leq 0$ 代表UAV搜索问题中的各类约束条件. 在每个决策周期内, 通过求解上述描述的最优决策问题, 即可获得下一时刻UAV的搜索行为序列.

不难看出, 式(1)所示的集中式问题模型结构对多UAV系统进行统一建模, 并统一求解系统的最优搜索决策, 该方式虽然具有较好的全局性能, 但缺乏鲁棒性, 此外, 所有的计算都集中于中央节点, 涉及计算量、求解复杂度等问题, 限制了多UAV系统的规模. 式(2)所示的分布式体系结构模型具有良好的鲁棒性和容错性, 将整个UAV系统的复杂问题转化为各个节点分别求解的子问题, 可充分发挥各UAV的自治能力, 但其要求各UAV有较强的自适应能力或通信能力, 获取全局最优解困难.

### 2.2 多UAV协同集散式控制结构(Centrally-distributed control architecture of multi-UAV)

多UAV系统的控制体系结构在很大程度上影响着系统的灵活性及作战效能,集散式结构则可将集中式结构和分布式结构有机地结合起来,弥补彼此的缺点,突出双方的优点,可以更好地解决UAV协同控制问题.如图1所示,各架UAV之间构成分布式体系结构,控制中心与各UAV形成集中式体系结构,控制中心与整个UAV群形成集散式体系结构.

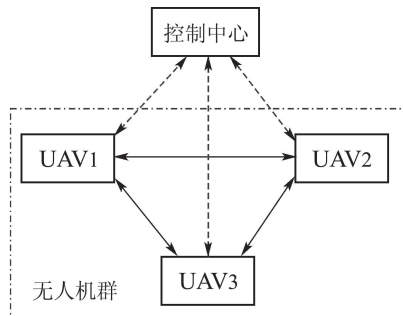


图1 一般集散式体系结构

Fig. 1 Centrally-distributed control architecture

控制中心实时监控各UAV,可以随时通过发布指令进行操控.在没有接收到控制中心指令情况下,各UAV在分布式体系下执行任务.该体系结构将集中管理和分散控制调节结合起来,采用自治和协作的方法解决全局控制问题,面对动态复杂环境下,可有效

提高多UAV系统的协同搜索控制性能.

### 3 改进的多UAV集散式控制结构(Improved centrally-distributed control architecture)

集散式结构将集中式结构和分布式结构有机地结合起来,可以更好地解决多UAV协同控制问题.然一般集散式体系结构要求系统中的UAV都具有较强的自适应能力和通信能力,考虑协同搜索问题的特点,这里采用一种改进的多UAV集散式体系结构执行协同搜索任务.

如图2所示,改进的集散式控制结构分为远程操作层、任务规划层、任务协调层、任务执行层四层,其中远程操控层为地面站,负责对UAV编队搜索情况发布指令,对整个编队进行远程操控;UAV群被分成若干个组,并从每组成员中按一定规则或随机选取一架UAV作为组长,从各组长之间再按相关规则或随机选取UAV群团队领导来执行任务规划层功能,异构UAV机群情况下一般由性能较高或接近几何中心的UAV担任,负责为各组UAV分配相关搜索任务,并在搜索资源出现分配不合理情况下(如出现UAV不能进行执行搜索任务情况时),对个别UAV组间的搜索任务进行调整;任务协调层为各UAV组的组长,负责各组员间的信息交互及航迹协调;任务执行层为执行搜索任务的各架UAV,利用内部探测、通信、信息融合模块对搜索信息整理,由决策模块进行自主决策,决策结果经协调层优化后,执行搜索目标的任务.

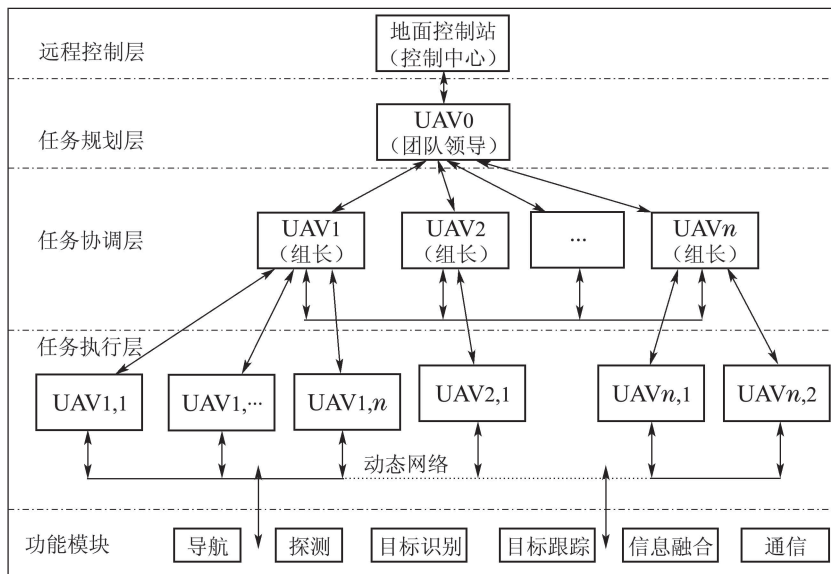


图2 改进的多UAV协同搜索集散式体系结构

Fig. 2 The improved centrally-distributed control architecture of multi-UAVs cooperative search

为减少各UAV的通信压力,采用黑板模型结构进行UAV间平行信息的数据共享,黑板模型中的控制单元和黑板由各组组长担任,同层UAV之间通过

黑板模型结构进行信息交互,控制中心通过上层模型中的黑板UAV进行信息交互,从而达到地面站与UAV群间的信息交互.任务执行层属于同一组

的UAV间采用黑板模型进行信息交互, 非同一组的UAV之间则依据通信距离的限制情况通过动态网络进行局部信息交互。

改进后的协同搜索集散式体系结构, 能够满足地面站与UAV、UAV与UAV之间的正常信息交互; 整个系统为一个开放、可伸缩的系统, 支持UAV的动态加入和退出, 便于UAV执行搜索任务与其它任务之间转换; 整个系统逻辑上分层递阶, 所有UAV集合组成团队可划分若干子团队, 各子团队还可继续划分子团队, 直到满足任务要求, 可很好减轻由于UAV数量增长带来的复杂性; 系统的结构、组成依据任务需要而设计, 根据任务的分解、细化情况进行相应数量的UAV分组, 可很好适应不同搜索环境; 整个系统支持团队重构及动态任务的重新分配, 地面站及任务规划层UAV可依据任务环境及任务特性的变化, 及时调整团队体系结构; 在地面站与UAV通信中断情况下, 团队具有自组织能力, 可以继续完成搜索任务. 由以上分析可知, 改进的集散式控制结构满足UAV系统体系结构的功能需求, 能够完成动态复杂环境下多UAV协同搜索任务。

#### 4 多UAV协同分区搜索(Multi-UAV cooperative partitioned search)

由于搜索范围比较广阔, 在贪婪策略及分布式搜索策略下, 编队中UAV的搜索行为比较灵活, 总是向着高收益目标区域运动, 故此容易因频繁转场产生搜索资源的浪费(如图3(a)); 同时各UAV可能在同一高收益搜索区域集结, 如图3(b)所示<sup>[23]</sup>, 执行搜索任务的所有UAV均集结于左下方目标区域内, 由于低收益区域阻隔, 其它高收益区域没有被及时搜索, 容易失去发现时间敏感目标的时机. 此外, 存在时间敏感目标情况下, 目标有可能会在UAV已经搜索过的区域中出现, 多UAV系统决策过程也会随着UAV数量增多而产生计算和通信方面的压力, 不利于编队搜索效率提升. 在改进的多UAV集散式控制体系结构下, 采用协同分区搜索的方法可有效提高多UAV编队的协同搜索效率。

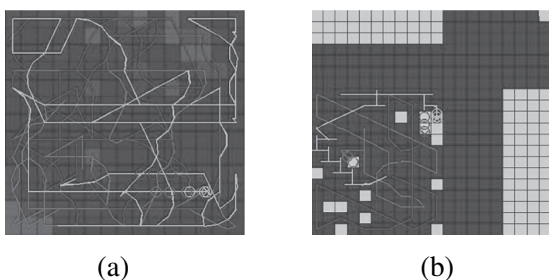


图 3 UAV编队搜索面临的问题

Fig. 3 Problem faced by traditional UAVs cooperative search

#### 4.1 多UAV协同分区搜索决策(Multi-UAV cooperative partitioned search decision)

多UAV协同分区搜索实现过程如图4所示。

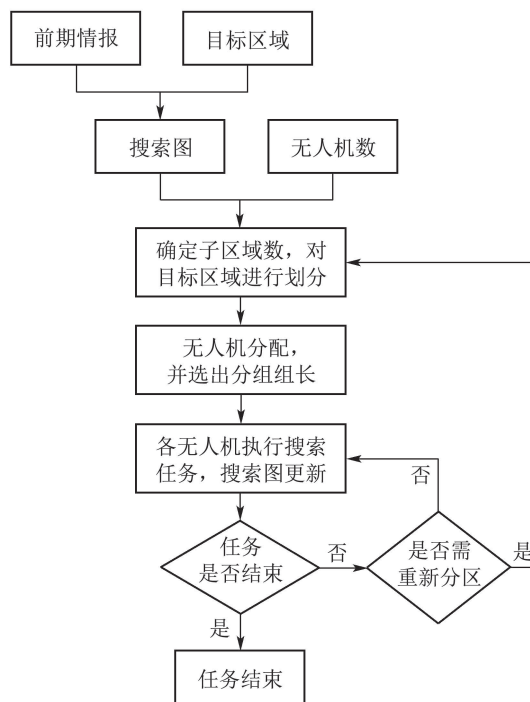


图 4 多UAV协同分区搜索过程

Fig. 4 Process of multi-UAV cooperative partitioned search

具体实现步骤如下:

**步骤 1** 采用离散环境描述方法, 把任务区域  $Q$  划为  $L_x \times L_y$  离散网格, 这里采用目标存在概率  $p$  和目标区域环境确定度  $\sigma$  来组成UAV执行搜索任务的区域搜索图<sup>[14]</sup>, 由前期侦察目标区域信息为搜索图赋初值  $P$ 。

**步骤 2** 结合UAV数量  $N_v$ 、目标区域范围  $L_x \times L_y$  及搜索图初值  $P$  按一定规则确定或者人为指定搜索范围分区子区域数  $c$ 。

**步骤 3** 首先, 以各网格的搜索图值为特征值, 采用模糊聚类方法将目标区域所有网格分为高价值区域和低价值区域, 表征聚类的性能目标函数及聚类准则如文献[21]所示; 其次, 以网格的位置为观测样本, 采用动态聚类的方法对所有高收益价值网格进行第二次聚类划分, 将所有高价值网格分成  $c$  类; 最后, 以各高价值新类的几何中心为站点, 采用V图划分方法将整个目标区域划分为  $c$  个子区域。

**步骤 4** 任务规划层UAV依据各子区域面积大小, 搜索价值及UAV数量等信息对UAV群进行分组, 使得每个子区域都对应一个UAV组, 定义分组目标函数为



$$\begin{cases} \min_{N_F^*} J_F = \sum_{i=1}^c \left| \frac{p_i}{P} - \frac{n_i}{N_v} \right|, \\ \text{s.t. } p_i = f(S_i, M_i), P = f(S, M), \\ n_i \in \mathbb{Z}^+, \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $N_F^* = \{n_1, \dots, n_c\}$  表示最佳分配序列,  $P$  是一个与搜索区域面积及区域搜索价值相关函数, 表示搜索任务的总搜索价值,  $p_i$  和  $n_i$  分别表示子区域  $i$  的总搜索价值和各区对应 UAV 组的成员数,  $S_i$  和  $M_i$  分别表示子区域  $i$  的面积和搜索图值, 分组完成后, 按位置为观测样本, 对各子区域进行聚类分析, 得各 UAV 初始搜索位置  $(x_{i0}, y_{i0})$ .

**步骤 5** 各 UAV 组在各子区域内执行搜索任务, 在每个决策周期内, 各 UAV 依据所得信息自主决策, 并将决策结果发送至组长, 这里选取各组内最靠近几何中心位置的 UAV 为组长, 组长对各 UAV 决策结果进行协调, 并将组内最优决策结果在黑板上公示, 各 UAV 按协调后决策执行搜索任务.

**步骤 6** 随着搜索任务的进行, 执行任务 UAV 将探测信息发送给各组长, 各组长将探测结果进行组间的信息交互, 地面站可通过组长间信息交互黑板模型获取整个编队执行任务情况, 任务规划层 UAV 对各区域搜索情况进行整理分析, 按固定周期或在遇到 UAV 不能继续搜索、战场环境有较大变化等情况下, 在考虑分区转化代价的基础上判断是否需要重新分区, 并将 UAV 探测及决策结果在组长间黑板上公示, 各组长读取后再各自组内黑板上信息进行更新, 便于各 UAV 进行搜索决策, 如需进行重新分区, 则转至步骤 3, 否则执行步骤 5, 随着搜索时间推进, 不断迭代进行上述搜索过程, 直到搜索任务完成.

#### 4.2 多 UAV 协同分区搜索决策 (Multi-UAV cooperative partitioned search decision)

由第 4.1 节多 UAV 协同分区搜索过程可以看出, 基于集散式模型的多 UAV 协同分区搜索主要有任务规划层 UAV 对各子区域内 UAV 组搜索任务的调整规划周期和各 UAV 组内每架 UAV 的搜索决策周期两个不同的决策周期, 前者区域规划方面仅需在第 4.1 节初始分区基础上考虑预测分区后各 UAV 的转场代价, 这里主要针对后者多 UAV 协同分区搜索决策展开.

由于研究重点是协同搜索过程中多 UAV 协作策略和优化算法, 故这里对 UAV 的底层飞行控制问题进行简化, 视 UAV 平台为受一定运动约束的质点, 对 UAV 的运动轨迹使用以下简化方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i(t) \\ \dot{y}_i(t) \\ \dot{v}_i(t) \\ \dot{\varphi}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i(t) \cos \varphi_i(t) \\ v_i(t) \sin \varphi_i(t) \\ u_i^v(t) \\ u_i^\varphi(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ , 为 UAV  $i$  在搜索平面上的位置状态;  $v_i(t)$ ,  $\varphi_i(t)$  分别为 UAV  $i$  的速度和偏航角, 受运动学约束  $v_i(t) \in [V_{\min}, V_{\max}]$ ,  $u_i^\varphi(t) = \mu_i \eta_{\max_i}$ ,  $\mu_i$  为 UAV  $i$  的决策变量,  $\eta_{\max_i} \in \mathbb{R}$  为 UAV  $i$  的最大转弯角度约束; 最小转弯半径  $R_{\min_i} = v_{\min_i} / \eta_{\max_i}$ . 因本文主要研究集散式控制结构下多 UAV 的协同搜索问题, 为分析方便, 假定 UAV 速度  $v_i(t)$  恒定不变, 即  $|u_i^v(t)| = 0$ , 航向角控制方面取  $\mu_i \in \{1, 0, -1\}$  分别表示以最小转弯半径左转、直行、右转.

各子区域内 UAV 协同搜索的过程, 是不断根据环境、目标和自身信息进行自主决策的过程, UAV 搜索决策过程模型如图 5 所示, UAV 获取当前搜索信息, 结合其它 UAV 状态, 依据一定最优搜索策略进行自主决策, 通过进行在线任务与航迹调整来执行搜索任务.

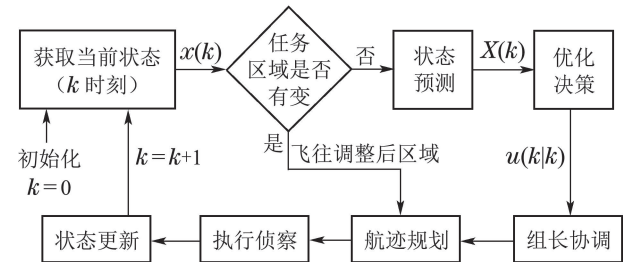


图 5 UAV 搜索决策过程

Fig. 5 Process of UAV search decision-making

在每个离散决策时刻  $k$ , UAV 依据自身获取的状态信息判断是否在任务区域内进行搜索任务, 如不在, 则按照动力学条件约束进行航迹规划, 按规划结果边侦察边飞往目标区域, 否则基于当前状态和系统模型, 预测未来若干阶段的状态, 通过使目标收益函数最优来寻出最优控制序列, 并将自身最优决策序列发送给组长 UAV, 组长 UAV 进行协调规划, 从而获取更好的整体搜索效能, 最后, 各 UAV 依照接收到决策结果, 执行侦察任务, 并进行状态更新. 随着搜索任务的进行, 整个决策过程采用滚动时域的方式不断进行循环决策, 直至搜索任务结束.

UAV 模型预测控制的核心就是滚动优化求解, 根据系统的状态方程和目标函数, 建立  $N$  步的多 UAV 滚动优化模型. 传统模型方法中, 预测时间窗长度  $N$  的选取比较关键, 选取  $N$  越大, 相应系统求解的性能较好, 但随着  $N$  的增多, 系统的计算复杂度成指数增长, 故一般模型预测控制过程中,  $N$  的选取

比较有限, 这里采取一种  $N + 1$  步预测方法来进行多 UAV 的协同搜索决策模型, 即预测  $N$  步探测收益加 1 步大预测范围收益相结合的方法, 不仅可以近似扩展 UAV 预测控制的范围, 而且计算方面只是改变了 UAV 状态进行  $N$  步预测后位置  $x_{p_i}(k + N)$  的探测范围, UAV 探测范围示意如图 6 所示. 图 6 中:  $x_{p_i}(k)$  表示  $k$  时刻 UAV 位置, 方形区域  $s(k + 1)$  表示 UAV 在决策量  $u(k|k)$  控制下, 由  $x_{p_i}(k)$  到位置  $x_{p_i}(k + 1)$  过程中 UAV 所探测到目标区域范围,  $s(k + N + 0) \subseteq s(k + N)$  表示 UAV 位置为  $x_{p_i}(k + N)$  时所探测到的目标区域,  $s(k + N + T_k)$  则表示 UAV 到达位置  $x_{p_i}(k + N)$  后, 再运行  $T_k$  段时间内的所有可能探测区域, 这里采用扇形区域进行近似. 改进后的  $N + 1$  步预测方法增加的探测部分为  $s(k + N + T_k)$  与  $s(k + N + 0)$  的差集.

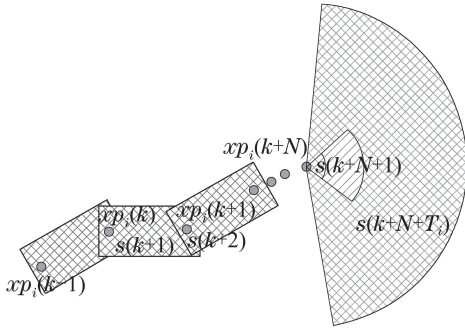


图 6 UAV 的探测模型示意图

Fig. 6 Sketch map of UAV detection model

这里给定系统  $x(k + 1) = f(x(k), u(k))$  相应的预测状态序列和决策序列记为

$$\begin{cases} X(k) = \{x(k + 1|k), \dots, x(k + N|k)\}, \\ U(k) = \{u(k|k), \dots, u(k + N - 1|k)\}, \end{cases} \quad (5)$$

在决策时刻  $k$ , 状态  $x(k)$  和输入  $u(k)$  下, 系统性能指标为  $J(x(k), u(k))$ , 即在状态  $x(k)$  下, 采用控制输入  $u(k)$  后, 编队所获得的综合收益. 它综合考虑了多 UAV 在搜索过程中的目标发现收益  $J_1(k)$ 、环境搜索收益  $J_2(k)$  和执行代价  $J_3(k)$  等的多目标函数. 各目标收益具体表示如下:

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \sum_{(x,y) \in S_i} [(P_D - P_F) \cdot p_{xy}(k) + P_F], \\ J_2(k) &= \sum_{(x,y) \in S_i} [\chi(x, y, k + 1) - \chi(x, y, k)], \\ J_3(k) &= \sum_{q=0}^{N-1} \|\varphi_v^i(k + q) - \varphi_v^i(k + q + 1)\|, \\ J &= \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3, \end{aligned}$$

其中:  $S_i$  为传感器探测区域范围,  $p_{xy}(k) \in [0, 1]$  和  $\chi(x, y, k) \in [0, 1]$  为  $k$  时刻离散网格  $(x, y)$  处目标存在概率和环境确定度,  $P_D$  和  $P_F$  分别为传感器的目

标探测概率和虚警概率. 由于各 UAV 速度恒定, 这里执行代价  $J_3(t)$  主要指 UAV 转弯代价.  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为权重, 不同取值反应不同侧重, 应用时依据具体要求选值.

改进预测控制模型下, UAV 在状态  $x(k + N|k)$  处再运行  $T_k$  段时间的所有可能探测区域记为  $S_{T_k}$ , 由于  $S_{T_k}$  为近似值, 在计算目标函数时需进行相应调整, 记

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \alpha \sum_{(x,y) \in S_{T_k}} [(P_D - P_F) \cdot p_{xy}(k) + P_F], \\ J_2(k) &= \beta \sum_{(x,y) \in S_{T_k}} [\chi(x, y, k + 1) - \chi(x, y, k)], \end{aligned}$$

其中:  $\alpha, \beta$  取值与目标区域位置相对 UAV 在状态  $x(k + N|k)$  相关, 距离越近, 偏航角越小, 取值越大.

对于集中式算法来讲, 中央节点需掌握所有 UAV 的状态信息  $X(k) = \{x_1(k), \dots, x_{N_v}(k)\}$ , 并计算出 UAV 编队最优任务决策

$$U(k) = \{u_1(k), \dots, u_{N_v}(k)\},$$

UAV 数量  $N_v$  的增大, 会使所涉及变量增多, 预测步数的增大使得集中式方法的计算量成指数增加; 分布式算法将大规模系统优化问题转化为小规模优化问题, 相当于将集中式中央节点任务进行分散, 但需要较高的网络通信条件进行保障; 集散式控制结构同样将初步计算任务分配给各 UAV, 采用黑板模型可有效减少系统通信量, 各组长进行决策协调可保证组内决策优化性能, 任务规划层对各子区域内搜索任务的定期调整规划可保证系统搜索资源的充分利用. 在优化求解过程中, 对一般性非凸优化问题的最优求解缺乏有效的理论保证, 这里采用粒子群智能优化算法进行子问题求解, 各 UAV 的优化决策变量相对独立, 组内各 UAV 通过黑板信息协调, 可以保证决策结果收敛到局部最优解, 从而可保证整个系统的求解方法是一种次优解.

## 5 仿真分析(Simulation analysis)

为验证本文方法的有效性, 将本文多 UAV 集散式协同搜索策略与传统“Z”字形扫描搜索方法、基于 V 图划分的搜索方法、分布式协同搜索方法分别进行仿真, 并根据仿真结果对各种策略搜索效能进行分析.

基于 MATLAB 7.8 仿真平台, 将  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  目标区域  $Q$  划为  $50 \times 50$  个  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  网格; UAV 数量  $N_v = 10$ ,  $v = 100 \text{ m/s}$ ,  $R_{\min_i} = 2 \text{ km}$ ; 传感器探测宽度  $2 \text{ km}$ ,  $P_D = 0.95$ ,  $P_F = 0.05$ . 目标函数权值  $\omega_1 = 0.7$ ,  $\omega_2 = 0.2$ ,  $\omega_3 = 0.1$ . UAV 决策时间间隔  $10 \text{ s}$ , 集散式协同搜索方法分区数为  $c = 3$ , 预测时间窗

口 $N = 3, T_k = 30$  s. 为验证算法区域搜索能力, 图7给出在不含目标信息情况下算法运行中目标区域搜索图值变化情况, 可以看出本文算法可有效完成目标区域的搜索任务, 且没有搜索不均或频繁转场情况发生.

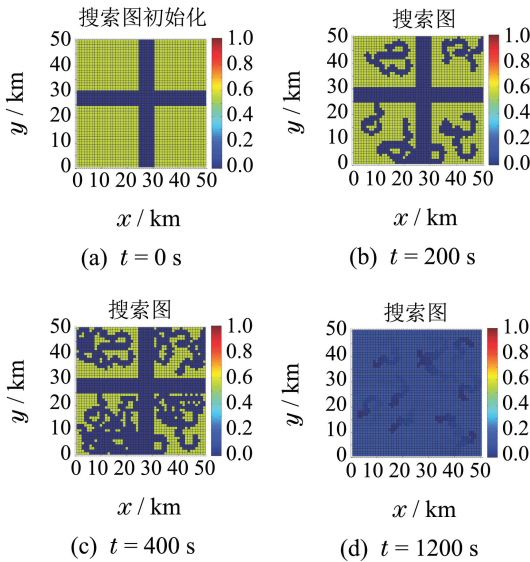


图7 无目标信息情况下搜索图变化情况

Fig. 7 Process of search map changing

考虑已知部分目标信息情况下, 假定目标总数 $N_t = 30$ , 静止目标 $N_j = 5$ , 位置随机分布; 运动目标 $N_m = 10$ , 最大运动速度为 $v_t = 25$  m/s, 初始位置服从以 $(x_t^0, y_t^0)$ 为中心的二维正态分布, 其中有3个机动目标的速度大小已知, 航向未知, 4个目标的速度和航向已知, 但有误差; 时间敏感目标 $N_s = 15$ 出现时间随机, 其中10个目标在出现后开始运动, 速度大小及方向未知. 为避免这种随机性的影响, 本文进行了100次仿真, 目标随机生成, 每次仿真运行1900 s. 通过仿真将本文方法与传统“Z”字形扫描搜索方法、基于V图划分的搜索方法、分布式协同搜索方法比较, 所得结果如图8-9所示.

图8所示为3种不同类型目标发现个数随搜索时间变化情况, 其中图(c)中时敏目标的统计时间为时敏目标出现到其被发现之间的搜索时间, 当UAV搜索到时敏目标所在位置时, 如果时敏目标尚未出现, 则认为UAV不能发现该目标. 从图8中可以看出, 由于扫描方式对整个区域进行全覆盖搜索, 本文搜索方法对静态目标的搜索概率最终不及“Z”字形扫描方式, 但针对不同类型的目标, 不论从发现目标概率上还是从搜索效率方面, 本文方法搜索均略优V图分区方法和分布式协同方法.

图9所示为平均目标发现数量随搜索时间变化关系, 横队“Z”字形搜索中平均发现目标个数曲线

之所以有两段平坦阶段主要是由于UAV编队转弯期间搜索区域范围较少原因所致.

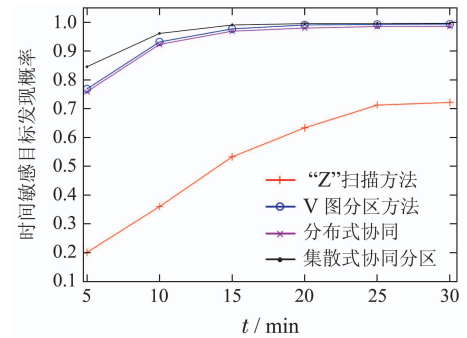
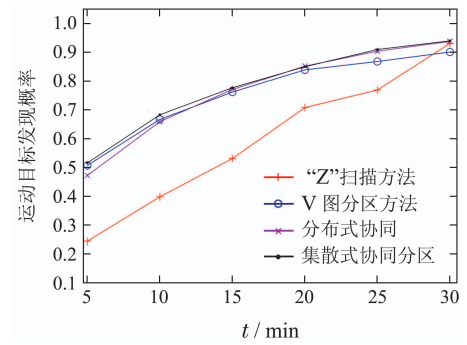
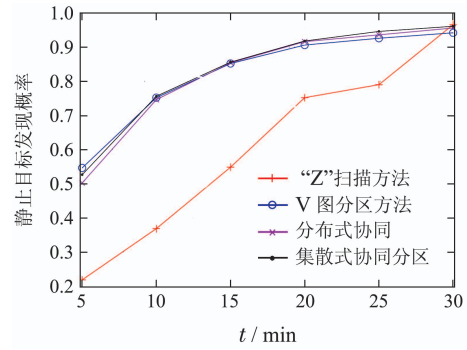


图8 不同时间窗口下目标发现概率情况对比  
Fig. 8 Comparison of different search results for various targets

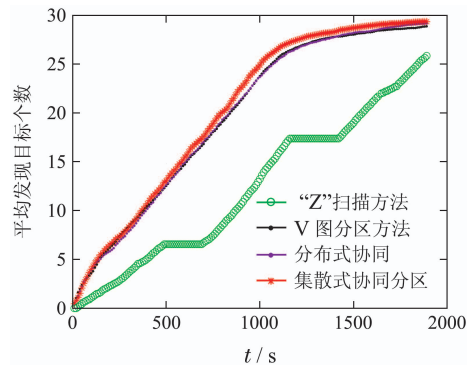


图9 各搜索策略下平均发现个数随搜索时间关系  
Fig. 9 Comparison of the number of targets found as a function of search time by different search strategies

由图9可知, 基于本文方法、V图分区方法和分



布式协同方法的搜索效率明显高于“Z”字形扫描搜索方法,且本文方法搜索效果要略优于V图分区方法和分布式协同方法,可以较好的完成多UAV协同搜索任务。

## 6 结论(Conclusions)

本文针对大范围内多UAV协同搜索问题,在改进的集散式控制框架下,采用分区搜索的方法,利用改进预测模型进行多UAV的协同搜索决策.通过与传统“Z”字形扫描搜索方法、基于V图划分的搜索方法、分布式协同搜索方法所得仿真结果对比分析,显示了所提方法的在目标发现概率和搜索效率方面的有效性和优越性.下一步的工作将考虑存在禁飞区、通信延迟等复杂情况对系统决策的影响以及多UAV协同执行多类型任务方面进行研究。

## 参考文献(References):

- [1] NIGAM N. The multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: a review [J]. *Machines*, 2014, 2(1): 13 – 72.
- [2] 王林, 彭辉, 朱华勇, 等. 复杂环境下多无人机协作式地面移动目标跟踪 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 300 – 308.  
(WANG Lin, PENG Hui, ZHU Huayong, et al. Cooperative tracking of ground moving target using unmanned aerial vehicles in cluttered environment [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 300 – 308.)
- [3] Office of the Secretary of Defense. *Unmanned systems integrated roadmap FY2013-2038* [R]. Washington D.C.: Department of Defense, 2013.
- [4] United States Air Force. *RPA vector: vision and enabling concepts 2013-2038* [R]. Washington D.C.: Department of Defense, 2014.
- [5] 沈东, 魏瑞轩, 祁晓明, 等. 基于MTPM和DPM的多无人机协同广域目标搜索滚动时域决策 [J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1391 – 1403.  
(SHEN Dong, WEI Ruixuan, QI Xiaoming, et al. Receding horizon decision method based on MTPM and DPM for multi-UAVs cooperative large area target search [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(7): 1391 – 1403.)
- [6] HU J W, XIE L H, XU J, et al. Multi-agent cooperative target search [J]. *Sensors*, 2014, 14(6): 9408 – 9428.
- [7] MAZA I, OLLERO A. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms [C] //ALAMI R, CHATILA R, ASAMA H. *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Tokyo, Japan: Springer, 2007: 221 – 230.
- [8] ALTSHULER Y, YANOVSKY V, WAGNER I, et al. Efficient cooperative search of smart targets using UAV swarms [J]. *Robotica*, 2008, 26(4): 551 – 557.
- [9] CHAKRAVORTY, S, RAMIREZ, J. Fuel optimal maneuvers for multispacecraft interferometric imaging systems [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2007, 30(1): 227 – 237.
- [10] 轩永波, 黄长强, 吴文超, 等. 运动目标的多无人机编队覆盖搜索决策 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 539 – 544.  
(XUAN Yongbo, HUANG Changqiang, WU Wenchao, et al. Coverage search strategies for moving targets using multiple unmanned aerial vehicle teams [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(3): 539 – 544.)
- [11] ERIGNAC C A. An exhaustive swarming search strategy based on distributed pheromone maps [C] //Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference and Exhibit. Rohnert Park, CA, USA: AIAA, 2007: AIAA – 2007 – 2822.
- [12] PARUNAK H V D, BRUECKNER S A, ODELL J A. Swarming coordination of multiple UAVs for collaborative sensing [C] //Proceedings of the 2nd AIAA Unmanned Unlimited Conference and Workshop and Exhibit. San Diego, CA, USA, 2003: AIAA – 2003 – 6525.
- [13] YANG Y L, POLYCARPOU M M, MINAI A A. Multi-UAV cooperative search using an opportunistic learning method [J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, 129(5): 716 – 728.
- [14] 彭辉. 分布式多无人机协同区域搜索中的关键问题研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
(PENG Hui. *Research on distributed cooperative area searching of multiple unmanned aerial vehicles* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.)
- [15] BAUM M L, PASSINO K M. A search-theoretic approach to cooperative control for uninhabited air vehicle [C] //Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Monterey, California: AIAA, 2002: AIAA – 2002 – 4589.
- [16] HU J W, XIE L H, LUM K Y, et al. Multiagent information fusion and cooperative control in target search [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1223 – 1235.
- [17] MENG W, HE Z, TEO R, et al. Integrated multi-agent system framework: decentralised search, tasking and tracking [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2015, 9(3): 493 – 502.
- [18] MCCUNE R, MADEY G. Swarm control of UAVs for cooperative hunting with DDDAS [C] //Proceedings of 2013 International Conference on Computational Science. Barcelona Spain: Elsevier, 2013: 2537 – 2544.
- [19] SHARIFI F, MIRZAEI M, ZHANG Y M, et al. Cooperative multi-vehicle search and coverage problem in an uncertain environment [J]. *Unmanned Systems*, 2015, 3(1): 35 – 47.
- [20] 轩永波, 黄长强, 吴文超, 等. 多无人机协同搜索随机目标决策 [J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 711 – 715.  
(XUAN Yongbo, HUANG Changqiang, WU Wenchao, et al. Cooperative search strategies of multi-UAVs for random targets [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(5): 711 – 715.)
- [21] 严明强, 刘博. 基于模糊C均值聚类的多无人机协同搜索策略 [J]. 战术导弹技术, 2013(1): 55 – 63.  
(YAN Mingqiang, LIU Bo. Multiple UAVs cooperative search strategy based on fuzzy C-mean cluster [J]. *Tactical Missile Technology*, 2013(1): 55 – 63.)
- [22] 于骝男, 周锐, 夏洁, 等. 多无人机协同搜索区域分割与覆盖 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 167 – 173.  
(YU Sinan, ZHOU Rui, XIA Jie, et al. Decomposition and coverage of multi-UAV cooperative search area [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(1): 167 – 173.)
- [23] LUM C. *Coordinated searching and target identification using teams of autonomous agents* [D]. Washington D.C.: University of Washington, 2009.

## 作者简介:

**吴青坡** (1985–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体协同控制、非线性滤波理论, E-mail: qingpo@yeah.net;

**周绍磊** (1963–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为协同控制理论和飞行器测试与故障诊断技术研究, E-mail: Zhoulsd@sina.com;

**刘伟** (1986–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多智能体系统协同控制研究, E-mail: weiliu.sd.china@hotmail.com;

**尹高扬** (1986–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多无人机协同路径规划研究, E-mail: ygy3632@163.com.