

无人机分布式集群态势感知模型研究

高 杨* 李东生 程泽新
(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘要: 以无人机(UAV)为代表的无人系统分布式集群作战是未来战斗力的增长点, 集群态势感知是集群作战的重要环节。该文在典型态势感知模型的基础上, 从理论模型、态势感知一致性、评价方法等方面, 对无人机分布式集群态势感知展开研究。将基于动态系统的 Endsley1995 态势感知(SA)模型中的心智模型修改为人机智能模型, 得到无人机个体的态势感知模型; 基于团体 SA 和分布式 SA(DSA)理论, 按照无人机集群类型, 分别设计同构和异构无人机集群 SA 模型; 对无人机集群 SA 中的一致性问题和评价问题进行分析, 给出同构无人机集群 SA 的一致性形成过程, 异构无人机集群 SA 的一致性判断方法和无人机集群 SA 评价方法的选择流程。分析表明, 建立的集群态势感知模型符合集群协同作战特点, 有一定的积极意义。

关键词: 无人机集群; 集群态势感知; 分布式态势感知; 一致性

中图分类号: E917; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)06-1271-08

DOI: 10.11999/JEIT170877

UAV Distributed Swarm Situation Awareness Model

GAO Yang LI Dongsheng CHENG Zexin

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The distributed swarm operation of unmanned systems represented by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is the growth point of the future war, and the swarm situation awareness is an important part. Based on the typical situation awareness model, the distributed swarm situation awareness of UAV is studied. Firstly, in the individual level, the mental model in the dynamic system of the Endsley1995 Situation Awareness (SA) model is modified as a human-computer intelligent model. Then in accordance with the UAV swarm type, isomorphic and heterogeneous, based on the team SA and Distributed SA (DSA) theory, the UAV swarm SA model are built. Then, the consensus and evaluation problems of UAV Swarm SA are analyzed. The consensus formation process of isomorphic UAV swarm SA and the consensus judgment method of heterogeneous UAV swarm SA are given. And the choice of UAV swarm SA evaluation method is analyzed. The analysis shows that the proposed swarm situation awareness model is corresponding to the swarm cooperative combat characteristics and has certain positive significance.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm; Swarm situation awareness; Distributed Situation Awareness (DSA); Consensus

1 引言

信息化条件下的战场环境呈现出强对抗性、高度动态性、深度不确定性等特点, 以无人机(UAV)为代表的无人系统的分布式集群作战将是未来战争中的重要作战形式。分布式集群态势感知是集群控制和决策的基础, 实现集群态势的协同感知, 需要进行协同目标探测、目标识别和融合估计、协同态

势理解与共享, 以获取完整、清晰、准确的信息, 为决策提供支持^[1]。对无人机的分布式集群态势感知理论模型、方法、技术的研究是必要的。

态势感知(Situation Awareness, SA)研究一般关注理论模型、评价、一致性问题, 其中对理论模型的研究是基础。SA 模型一般有两种分类方法, 一是按照心理、环境和系统的方式^[2], 有 Endsley 三级模型^[3]、situated SA^[4]、分布式态势感知(Distributed SA, DSA)^[5]等; 二是以个体、团体和系统的方式^[6], 有 Endsley 三级模型、团体态势感知模型(团体 SA)^[7,8]、DSA 等。文献[9]对团体 SA 的度量进行研究; 文献[10]对人机共享 SA 模式进行了分析; 文献[11]研究了分布式认知在搜索救援中的应用; 文献[12]研究了 DSA 的评价(度量)问题; 张东

收稿日期: 2017-09-18; 改回日期: 2018-01-10; 网络出版: 2018-03-15

*通信作者: 高杨 gao_yang_mail@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61179036), 国防科技创新特区基金(17-163-11-ZT-004-014-02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61179036), The National Defense Technology Innovation Special Zone Foundation of China (17-163-11-ZT-004-014-02)

戈团队从信息层面和系统获取信息能力等角度对 SA 的评价和一致性问题进行了研究^[13,14]；罗爱民等人^[15]提出基于系统效能分析的战场态势一致性评估方法。

国外聚焦于 SA 模型、评价(使用实验统计学的方法)与应用研究,国内关注基于 Endsley 模型的 SA 评价(从信息域等角度)^[16]、针对具体任务的态势评估方法研究。但对无人机的分布式集群态势感知模型研究尚未见到公开文献。Endsley^[17,18], Stanton^[6,19], Salmon^[20]等 SA 模型的主要研究者对各模型的内涵、适用范围等持有不同意见,文献[21]尝试将 Endsley 三级模型和 DSA 模型结合使用,提供了良好的思路。

无人机分布式集群中的各无人机具有一定的自主能力和智能水平,具备独立进行计算、分析和决策等能力。通过对经典的个体、团体、系统的 SA 模型的总结和无人机集群协同作战的分析,建立同构、异构无人机集群协同 SA 的理论模型;针对 SA 一致性问题,分别给出同构无人机集群协同 SA 一致性过程和异构无人机集群协同 SA 判断方法;对态势感知的评价问题,给出研究方法,并指出下一步工作方向。

2 Endsley 态势感知模型及修改

2.1 Endsley 态势感知模型

Endsley 三级模型^[3]是指:在一定时间和空间的限制下,对环境中的元素进行觉察,理解其涵义,并对将来的状态进行预测。图 1 给出了 Endsley1995 SA 模型的架构、影响因素和工作机制。SA 模型包含“OODA 模型”的观察和调整两部分,SA 模型

是以个人为感知主体,SA 能力取决于长期记忆的训练,也称作心智模型。

2.2 修改模型

经典 SA 模型并不完全契合以无人机为感知主体的 SA 研究,无人机以知识规则为基础的逻辑进行信息处理:一方面,通过人工智能,对获取的态势要素信息进行处理、分析(理解与预测态势),进而决策;另一方面,知识规则针对执行任务、目标等,对态势感知提供指导作用,包括各层次态势感知需要重点关注的信息、缺省信息的提供等。将 Endsley1995 模型中的心智模型修改为人机智能模型,利用知识规则、智能计算方法和机器学习算法,如粒计算、深度学习、强化学习等,替代图式、脚本等。其中,智能计算方法对当前态势与知识规则中的态势知识进行匹配,以辅助决策;机器学习则从知识、规则及当前态势中学习生成新的知识,对知识规则形成补充;智能计算方法和机器学习算法相互支持,以获得好的态势理解与决策支持;知识规则依据目标/任务等,为态势感知提供指导。修改后的模型如图 2 所示。Endsley 在文献[18]中指出 SA 模型是自上而下的目标驱动和自下而上的数据驱动相结合的信息处理模式。对应于无人机,是知识驱动和数据驱动相结合,既能够从低层次 SA 中有效地提取信息以生成高层次 SA,还能够利用包含在知识中的高层次 SA 信息,去指导低层次 SA 的获取。

3 协同系统的态势感知模型

3.1 团体态势感知与分布式态势感知

对团体 SA 尚无规范的定义,被广泛使用的是 Endsley 等人^[22], Salas 等人^[7], Shu 等人^[23]分别提

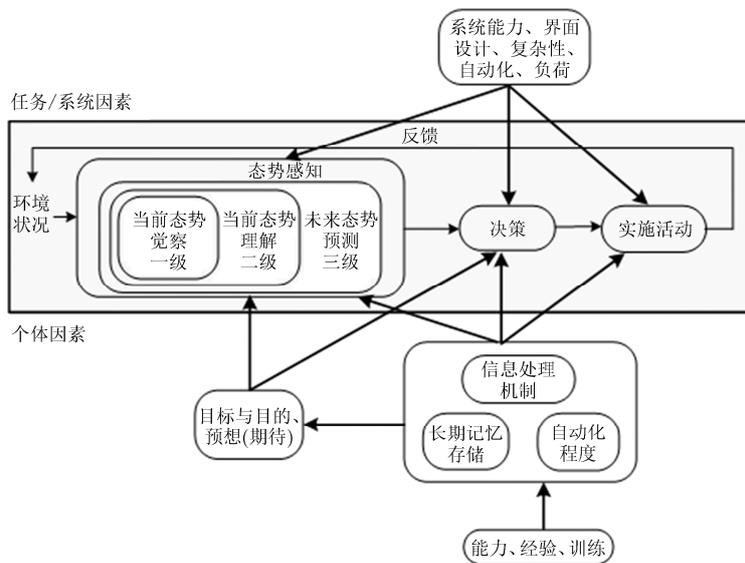


图 1 Endsley1995 三级态势感知模型

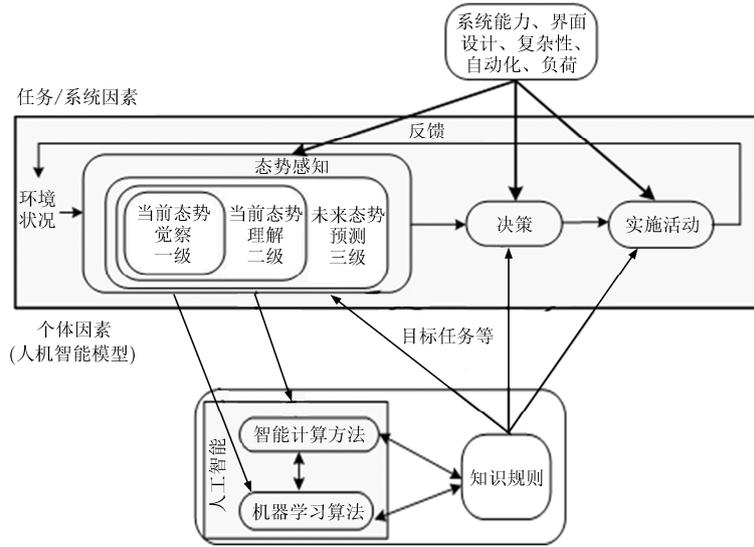


图 2 修改的个体 SA 模型

出的 3 种团体 SA 模型，它们的理论基础中都包括 Endsley 三级 SA 模型。Endsley 等人提出的模型中团体 SA 由个体 SA 和共享态势感知(shared SA)组成，如图 3 所示。好的团体 SA 性能要求个体对各自需要的态势要素有足够的认知，同时对共享的态势要素有相同的认知。但 Salas 等人^[7]提出在团体 SA 中，关键在于团体成员的信息交互过程，即个体形成 SA，交互得到团体 SA，并反馈修正个体 SA，是动态的过程。

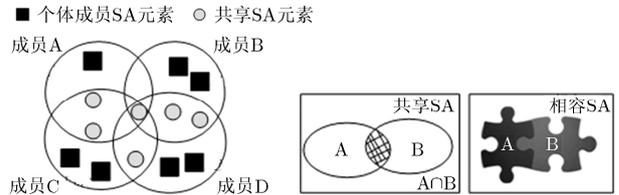


图 3 团体 SA^[22]

图 4 共享 SA 与相容 SA 的区别

DSA 是从系统的角度研究团体 SA，理论基础是图式理论、感知周期模型和分布式认知理论。Stanton 等人定义 DSA 为：系统中与环境状态及其变化相关的特定任务的激活知识，SA 是系统的涌现特性，来自系统中各智能体的交互。DSA 中的各智能体拥有独特的、相容 SA(compatible SA)，且相容 SA 通过交互 SA(transactive SA)形成系统 SA，而不是团体 SA 中的共享 SA(shared SA)。其中共享 SA 暗指成员理解态势或态势要素是以相同的方式，得到相同的 SA；而相容 SA 指系统中成员基于各自不同的目标、任务、能力等去理解态势，每个成员对态势理解不同，但对于特定的任务需求，SA 可以相容。共享 SA 与相容 SA 的区别示意如图 4 所示。

3.2 感知模型对比分析

图 5 给出个体 SA、团体 SA、系统 SA 可处理的问题空间示意图，为具有相应核的阴影空间，核区域表示本方法最适合的区域。图 5 中仅给出了系统 SA 的核区域，表示其可处理空间为全空间。SA 模型的系统性越强，其可求解问题空间越大。当然，

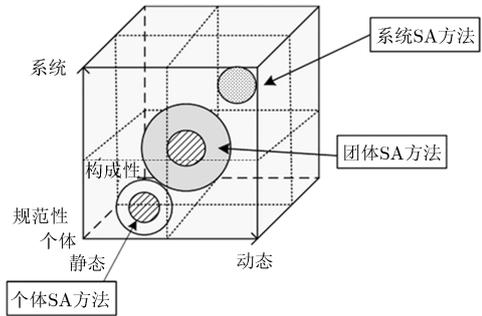


图 5 SA 模型适应问题的特征空间

不排除其他方法对某个具体的问题更适合。关键在于研究问题的特征，以选择合适的模型。

4 无人机分布式集群 SA 模型

4.1 无人机集群协同作战分析

无人机集群的功能分布和鲁棒自愈等特点是其成本优势来实现的，即无人机集群的数量优势。从整体来看，集群的作战范围必然要覆盖作战区域；从局部来看，个体需要尽量交叠覆盖作战子区域，才能充分发挥数量优势，当出现无人机损毁时，及时自组织弥补“空缺”，体现鲁棒性，图 6 为无人机集群作战区域覆盖示意图；从功能看，与传统的大型多功能平台中心式作战相比，无人机集群系统功

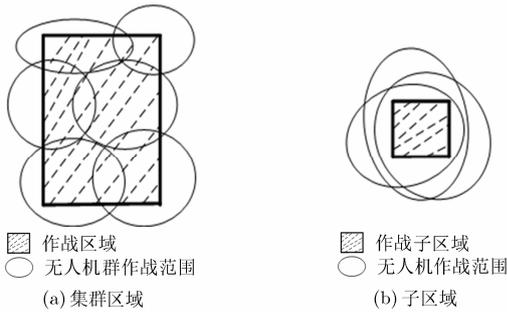


图6 无人机集群作战区域覆盖示意图

能分布在各同构无人机群上，各同构无人机群实现集群系统在执行任务时所需的各种作战能力，协作形成具有完成作战任务所需综合能力的异构无人机群系统。

按照作战任务(主要是察打任务)和功能分布的程度，同构/异构无人机集群 SA 要求不同。传统的多功能平台中心式，往往具有电子侦察、火力打击、遥感探测、电子干扰、毁伤效果评估等能力。相应的多平台功能分布式：当功能分布程度较低，异构无人机集群中，包含察打无人机集群、干扰无人机集群等；当功能分布程度一般，异构无人机集群中，包含侦察无人机集群、打击无人机集群、毁伤评估无人机集群等；当功能分布较高时，异构无人机集群组成有两种可能，其一按照(传感器)载荷类型，集群包含电子侦察无人机集群、通信侦察无人机集群、红外无人机集群、打击无人机集群、毁伤评估无人机集群等；其二按照载荷功能，集群包括目标离散属性(目标类型、目标敌我属性等)侦察无人机集群、目标连续属性(速度、距离、航迹等)侦察无人机集群、打击无人机集群、毁伤评估无人机集群等。同构无人机集群协同 SA 为无人机集群系统提供对某些特定态势要素的协同感知，多种同构无人机集群协同 SA 有机结合产生对作战整体态势要素的感知，即异构无人机集群协同 SA。

4.2 同构无人机集群 SA 模型

对同构无人机集群中的个体来说，在三级 SA 模型中，其人机智能模型是相同的。Endsley 指出共享 SA 包括 4 方面因素：共享 SA 要求，即团体成员对其他成员需求信息的理解程度；共享 SA 背景，即共享的环境等；共享 SA 机制，即共享的心智模型；共享 SA 过程，即分享相关信息的过程。

同构无人机集群 SA 符合共享 SA 的特征：集群中无人机具有相同的人机智能模型；执行相同的作战任务，面临相同的作战子区域；理解集群中其他成员的信息需求；集群中各无人机通信形成一致的 SA。

同构无人机集群 SA 可以借助图 3 的 SA 模型进行分析，但图 3 中共享 SA 没有体现个体间的信息交互，这在强对抗环境中是不合理的。需要考虑 Salas 等人^[7]提出的个体信息交互的重要性。为此，给出图 7 所示同构无人机集群 SA 模型。信息交互包括通信和非通信两种。通信交互可能受到其他 SA 元素的影响，非通信交互关注于共享 SA 元素的信息交互，以通信交互为主。

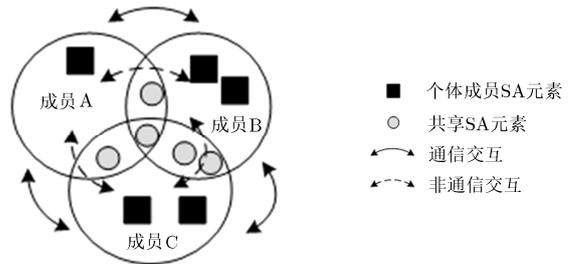


图7 同构无人机集群 SA 模型

4.3 异构无人机集群 SA 模型

异构无人机分布式集群，多种不同类型的无人机(群)协同完成特定的作战任务，不同类型的无人机(群)的目标、子任务、能力等各不相同，对战场态势具有不同的认知，但是能够协同完成作战任务，符合 DSA 的观点。利用 DSA 去研究异构无人机集群 SA 模型，结合同构无人机分布式集群 SA 模型，给出如图 8 所示的异构无人机分布式集群 SA 模型。图 8 中表示了异构无人机集群 SA 模型中相容 SA 的机制，同时交互 SA 不仅是 SA 元素信息的交互，还包括对 SA 理解信息、SA 预测信息的交互，是一种高层次的交互。

5 分布式集群态势感知的一致性与评价方法

5.1 分布式集群 SA 的一致性研究

5.1.1 同构无人机分布式集群 SA 一致性 同构无人机分布式集群 SA 的一致性问题的，可以通过无人机

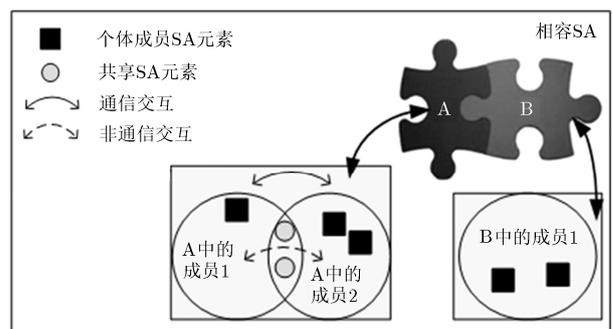


图8 异构无人机集群 SA 模型

对相同态势信息感知的一致性过程进行研究。文献[24]在态势感知框架下，借助群决策的软一致性研究同类型 Agent 的观测不一致问题，给出了反馈调节机制。基于此，给出同构无人机分布式集群 SA 的一致性形成过程，如图 9 所示。主要包括一致性过程和选择过程：一致性过程分为一致性程度计算和一致性调整两部分；选择过程包括集群偏好和结果排序。

多无人机 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, m \geq 2$ 对相同的态势要素进行感知，可能的感知结果为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, n \geq 2$ ，由于战场环境等因素，各无人机对结果的偏好不同，即偏好矩阵 $P^k = (p_{ij}^k), k \in \{1, 2, \dots, m\}; \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 不同，为了满足协同作战需求，需要生成一致的认识。

集群一致性程度的计算：

(1) 每对无人机 $\{e_k, e_l\}, k = 1, 2, \dots, m-1; l = k+1, k+2, \dots, m$ ，其相似性矩阵：

$$SM^{kl} = (sm_{ij}^{kl}), sm_{ij}^{kl} = 1 - |p_{ij}^k - p_{ij}^l| \quad (1)$$

(2) 所有无人机的偏好一致性矩阵：

$$CM = (cm_{ij}), cm_{ij} = \phi(sm_{ij}^{kl}) \quad (2)$$

其中， $k = 1, 2, \dots, m-1; l = k+1, k+2, \dots, m$ ， ϕ 可以是算术平均算子或者中位数算子。

(3) 计算对结果 x_i 的一致性程度：

$$ca_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (cm_{ij} + cm_{ji})}{2(n-1)} \quad (3)$$

(4) 计算偏好关系的一致性程度：

$$cr = \sum_{i=1}^n ca_i / n \quad (4)$$

当 $cr \geq \gamma$ ，进入选择过程，集结生成全局偏好矩阵，计算集群对各结果的排序；当 $cr < \gamma$ 时，进行一致性的调整。对偏离集群偏好较远的无人机偏

好矩阵进行修改，以接近度来表示，即接近度越小，偏好矩阵越需要修改。其中 γ 为一致性阈值，需要结合具体的作战任务、作战环境和无人机集群情况等设置。

无人机 $e^k, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ 的 $P^k = (p_{ij}^k), k \in \{1, 2, \dots, m\}; \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 与集群偏好 $P^c = (p_{ij}^c), \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 之间的接近度计算：

(1) 计算集群偏好：

$$p_{ij}^c = \Phi_W^C(p_{ij}^1, p_{ij}^2, \dots, p_{ij}^m) \quad (5)$$

其中 Φ_W^C 选取文献[25]中定义的基于模糊偏好关系一致性的诱导有序加权平均算子。

(2) (x_i, x_j) 的接近度计算：

$$pp_{ij}^k = 1 - |p_{ij}^k - p_{ij}^c| \quad (6)$$

(3) 对结果 x_i 的接近度计算：

$$pa_i^k = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n pp_{ij}^k + pp_{ji}^k}{2(n-1)} \quad (7)$$

(4) 对偏好关系的接近度：

$$pr^k = \sum_{i=1}^n pa_i^k / n \quad (8)$$

利用接近度选择需要调整的无人机偏好矩阵及相应的偏好值：

(1) 选择需要调整的无人机集合：

$$XCH = \{k | pr^k \leq \gamma\} \quad (9)$$

(2) 选择无人机需要调整的偏好对：

$$ALT = \{(k, i) | k \in XCH \wedge pa_i^k \leq \alpha\},$$

$$\alpha = \sum_{k=1}^m pa_i^k / m \quad (10)$$

(3) 选择需要调整的偏好值 $x_i \in ALT$ ：

$$APS = \{(k, i, j) | (k, i) \in ALT \wedge pp_{ij}^k \leq \beta\},$$

$$\beta = \sum_{k=1}^m pp_{ij}^k / m \quad (11)$$

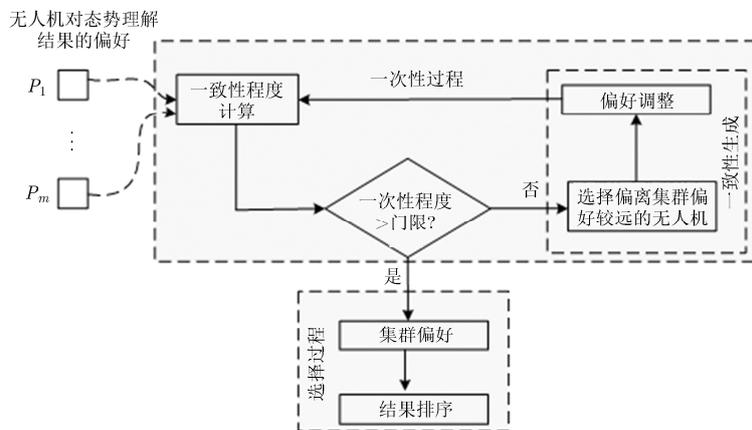


图 9 一致性形成过程

若 $p_{ij}^k < p_{ij}^c$, 增大偏好值; 若 $p_{ij}^k > p_{ij}^c$, 减小偏好值。经过多轮调整后, 集群的一致性程度满足 $cr \geq \gamma$, 计算集群偏好 $P^c = (p_{ij}^c)$, 集结偏好信息, 计算一致性下结果的偏好排序。

5.1.2 异构无人机分布式集群 SA 一致性 异构无人机分布式集群 SA 的一致性, 从 DSA 的角度分析, 系统内各类型无人机(或多种同构无人机集群)协同完成作战任务时, 需要对战场态势具有相对一致的认知。在 DSA 理论中, 对态势的认知主要是通过系统中各部分的交互来完成^[26]。无人机是以知识规则为基础的逻辑对态势信息进行处理, 所以异构无人机分布式集群 SA 的一致性, 可以通过态势信息在 Δt 时间内的变化, 引起的系统各部分知识规则变化的相对一致性进行表征, 建立动力学模型研究异构无人机分布式集群 SA 的一致性。

以无人机分布式集群遂行察打任务为例, 在功能分布程度较高时, 异构无人机集群 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, m \geq 2$ 中包括目标离散属性(侦察)无人机集群 $E_1 = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}, k < m$ 、目标连续属性(侦察)无人机集群 $E_2 = \{e_{k+1}, e_{k+2}, \dots, e_{m-1}\}$ 、打击无人机集群 $E_3 = \{e_m\}$ 等, 其中 E_1, E_2 和 E_3 为同构无人机集群。完成察打任务需要关注 n 个战场态势要素 $\{I_1(t), I_2(t), \dots, I_n(t)\}$, 其中集群 E_1 关注目标类型、目标敌我属性等态势要素 $\{I_1(t), I_2(t), \dots, I_k(t) | k < n\}$, 集群 E_2 关注目标速度、目标距离、目标角度等态势要素 $\{I_{k+1}(t), I_{k+2}(t), \dots, I_l(t) | k < l < n\}$, E_3 关注风速、风向等环境相关的态势要素 $\{I_{l+1}(t), I_{l+2}(t), \dots, I_n(t)\}$ 。各集群通过同构无人机集群一致性过程形成了对关注态势要素的一致性认识, 各自知识规则中被激活或引起变化的部分, 记为 K_1, K_2, K_3 。各态势要素对作战决策(打击计划)的影响权重 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, 各要素对应的态势信息变化差异(可依据态势更新信息数量计算)记为 $\{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ 。同时认为, 态势的变化是连续的, 即态势要素的一个充分小的变化, 就会引起态势信息更新的感知动作, 进而产生新的决策行为(打击计划), $s(t)$ 可以看作是连续的函数^[27]。则异构无人机分布式集群 SA 一致性的动力学模型, 满足条件:

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i s_i(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\Delta R}{\Delta t} \right| < \varepsilon, \left| \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i s_i(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\Delta K_1}{\Delta t} \right| < \varepsilon \quad (12)$$

$$\left| \frac{\sum_{i=k+1}^l \alpha_i s_i(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\Delta K_2}{\Delta t} \right| < \varepsilon, \left| \frac{\sum_{i=l+1}^n \alpha_i s_i(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\Delta K_3}{\Delta t} \right| < \varepsilon \quad (13)$$

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i \Delta K_1 + \sum_{i=k+1}^l \alpha_i \Delta K_2 + \sum_{i=l+1}^n \alpha_i \Delta K_3}{\Delta t} - \frac{\Delta R}{\Delta t} \right| < \varepsilon \quad (14)$$

其中, $s_i(\Delta t), i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 为 Δt 时间内各态势要素引起的态势信息变化; $\Delta K_1, \Delta K_2$ 和 ΔK_3 分别为 Δt 时间内 E_1, E_2 和 E_3 的一致性认知的变化; ΔR 为 Δt 时间内系统决策规则(数)的变化。若系统及各子系统的信息处理足够细致, 即态势信息的细微变化, 就会影响系统的知识规则, 使其产生反应(激活或者改变), 则态势要素的变化与系统及各子系统在 Δt 时间内的认知变化应该一致。但由于系统的处理能力等原因, 系统与各子系统的知识规则的变化只能处于相对一致的状态, ε 为一致性阈值, 结合具体的作战任务、作战环境等进行设置。系统达到相对一致的状态, 即认为异构无人机分布式集群 SA 的一致性能够满足联合作战任务对态势一致性的需求。

5.2 分布式集群 SA 的评价方法

无人机分布式集群 SA 评价, 是指分析影响集群 SA 的关键因素和评价系统性能的过程。由于建立的无人机分布式集群 SA 模型是基于 Endsley 三级模型和 DSA 模型的, 可以借鉴相关方法。Endsley 三级模型的主要方法是 SAGAT, SART, SPAM 等, 可借鉴到单架无人机 SA 能力评价, 如按照 SAGAT 要求, 设计模拟仿真实验, 采用“冻结探针技术”, 检测无人机的感知能力或依据任务完成情况, 表征 SA 能力。

对 DSA 评价的经典方法是系统团队合作事件分析方法^[28](EAST)。EAST 方法有两种形式: 一是按照数据收集、数据分析、关系表示 3 个阶段分析, 如图 10 所示; 二是分别构建任务、信息、交互 3 个网络, 分析影响 DSA 的关键要素。在两种形式中,

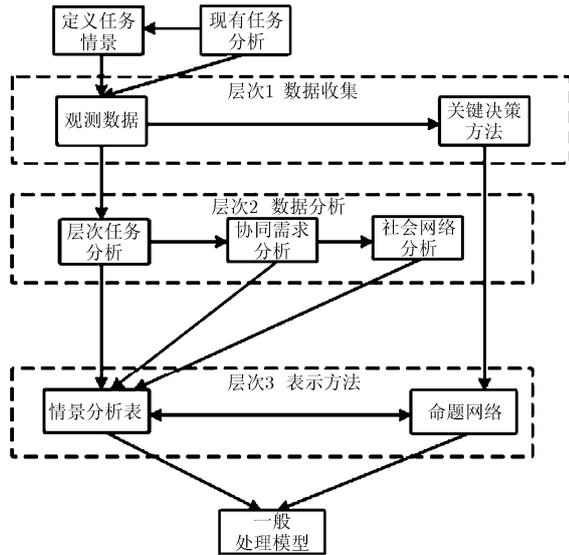


图 10 EAST 的一般方法

定性分析影响 DSA 的关键信息元素, 使用命题网络方法; 定量分析 DSA, 使用社会网络分析法。可以将无人机(群)当作网络分析中的节点, 使用 DSA 的方法分析关键要素、进行评价。可以得到图 11 所示的无人机集群协同 SA 评价方法(认知域方法)的选择流程。

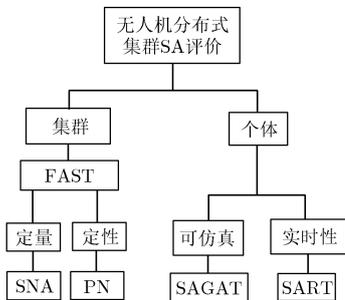


图 11 无人机集群 SA 评价方法示意

6 结束语

无人机分布式集群作战是未来战场的重要样式, 而集群 SA 是执行作战任务的基础。对无人机分布式集群 SA 模型展开研究, 按照个体、团体、协同系统的顺序, 分析典型 SA 模型, 结合无人机集群协同作战分析, 分别建立同构/异构集群 SA 模型, 并研究了分布式集群 SA 的一致性和评价问题, 提供了具体方法和实施流程。下一步的工作将从 3 个方面展开: 一是将建立的模型应用到无人机集群的具体作战场景和任务, 以验证模型的有效性和合理性, 如分布式推理等; 二是深入研究分布式集群 SA 的一致性形成方法和评价方法; 三是结合态势评

估方法, 研究强对抗环境下分布式集群对不确定信息的融合处理。

参考文献

- [1] 余淮, 杨文. 一种无人机航拍影像快速特征提取与匹配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 509-516. doi: 10.11999/JEIT150676.
YU Huai and YANG Wen. A fast feature extraction and matching algorithm for unmanned aerial vehicle images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 509-516. doi: 10.11999/JEIT150676.
- [2] SOREBSEN L J, STANTON N A, and BANKS A P. Back to SA school: Contrasting three approaches to situation awareness in the cockpit[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2011, 12(6): 451-471.
- [3] ENDSLEY M R. Designing for Situation Awareness: An Approach to User-centered Design[M]. Boca Raton, USA, CRC Press, 2016: 13-28.
- [4] CHIAPPER D L, RORIE R C, MORGAN C A, et al. A situated approach to the acquisition of shared SA in team contexts[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2014, 15(1): 69-87.
- [5] STANTON N A, STEWART R, HARRIS D, et al. Distributed situation awareness in dynamic systems: Theoretical development and application of an ergonomics methodology[J]. *Ergonomics*, 2006, 49(12/13): 1288-1311.
- [6] STANTON N A, SALMON P M, WALKER G H, et al. State-of-science: Situation awareness in individuals, teams and systems[J]. *Ergonomics*, 2017, 60(4): 449-466.
- [7] SALAS E, SIMS D E, and BURKE C S. Is there a "big five" in teams work?[J]. *Small Group Research*, 2005, 36(5): 555-599.
- [8] SALAS E, SHUFFER M L, THAYER A L, et al. Understanding and improving teams work in organizations: A scientifically based practical guide[J]. *Human Resource Management*, 2015, 54(4): 599-622.
- [9] SANER L D, BOLSTAD C A, GONZALEZ C, et al. Measuring and predicting shared situation awareness in teams[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2009, 3(3): 280-308.
- [10] KOKAR M M and ENDSLEY M R. Situation awareness and cognitive modeling[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2012, 27(3): 91-96.
- [11] PLANT K L and STANTON N A. Distributed cognition in Search and Rescue: Loosely coupled tasks and tightly coupled roles[J]. *Ergonomics*, 2016, 59(10): 1353-1376.
- [12] SORESENSEN L J and STANTON N A. Inter-rater reliability and content validity of network analysis as a method for measuring distributed situation awareness[J]. *Theoretical*

- Issues in Ergonomics Science*, 2016, 17(1): 42-63.
- [13] 张东戈, 孟辉, 赵慧赟. 态势感知水平的解析化度量模型[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1808-1815. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.15.
ZHANG Dongge, MENG Hui, and ZHAO Huiyun. Analytical measurement model of situation awareness [J]. *System Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1808-1815. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.15.
- [14] 黄匆, 陶九阳, 张东戈, 等. 分布式态势感知一致性分析与度量方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(3): 1-8. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2014.03.001.
HUANG Cong, TAO Jiuyang, ZHANG Dongge, et al. Analyzing and measuring approach on the consensus of distributed situation awareness[J]. *Command Control & Simulation*, 2014, 36(3): 1-8. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2014.03.001.
- [15] 罗爱民, 刘俊先, 刘刚. 基于 SEA 的战场态势一致性评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(2): 40-44.
LUO Aimin, LIU Junxian, and LIU Gang. An evaluation method of situation consistency based on SEA[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(2): 40-44.
- [16] 乔正伟, 羊彦, 侯静. 战场态势感知系统评价方法[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(5): 47-51. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2016.05.009.
QIAO Zhengwei, YANG Yan, and HOU Jing. Evaluation methods of battlefield situational awareness system[J]. *Command Control & Simulation*, 2016, 38(5): 47-51. doi: 10.3969/j.issn.1673-3819.2016.05.009.
- [17] ENDSLEY M R. Final reflections situation awareness models and measures[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, 9(1): 101-111.
- [18] ENDSLEY M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, 9(1): 4-32.
- [19] STANTON N A. Distributed situation awareness[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2016, 17(1): 1-7.
- [20] SAMON P M, WALKER G H, and STANTON N A. Broken components versus broken systems: Why it is systems not people that lose situation awareness[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2015, 17(2): 179-183.
- [21] KALLONIATIS A, ALI I, NEVILLE T, et al. The Situation Awareness Weighted Network (SAWN) model and method: Theory and application[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 61(5): 178-196.
- [22] ENDSLEY M R and ROBERTSON M M. Situation awareness in aircraft maintenance teams[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2000, 26(2): 301-325.
- [23] SHU Y and FURUTA K. An inference method of teams situation awareness based on mutual awareness[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2005, 7(4): 272-287.
- [24] D, ANIELLO G, LOIA V, and ORUIUOLI F. A multi-agent fuzzy consensus model in a situation awareness framework[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 30(5): 430-440.
- [25] CHICLANA F, HERRERA-VIEDMA E, HERRERA F, et al. Some induced ordered weighted averaging operators and their use for solving group decision-making problems based on fuzzy preference relations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(1): 383-399.
- [26] SORENSEN L J and STANTON N A. Keeping it together: The role of transactional situation awareness in teams performance[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2016, 53(5): 267-273.
- [27] 孟辉, 张东戈. 连续态势变化条件下态势感知速度模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2909-2913.
MENG Hui and ZHANG Dongge. Situational awareness velocity model under continuous change conditions[J]. *System Engineering and Electronics*, 2009, 31(12): 2909-2913.
- [28] STANTON N A and HARVEY C. Beyond human error taxonomies in assessment of risk in sociotechnical systems: A new paradigm with the EAST 'broken-links' approach[J]. *Ergonomics*, 2017, 60(2): 221-233.
- 高 杨: 男, 1992 年生, 博士生, 研究方向为粒计算与不确定信息处理、集群态势感知与智能决策、信息融合.
- 李东生: 男, 1963 年生, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为复杂和高速信号处理.
- 程泽新: 男, 1995 年生, 硕士生, 研究方向为分布式态势感知.