航空集群构型控制及其演化方法

梁晓龙^{1*}, 何吕龙², 张佳强¹, 柏鹏²

1. 空军工程大学国家空管防相撞技术重点实验室, 西安 710051;

2. 空军工程大学陕西省电子信息系统综合集成重点实验室, 西安 710051

* E-mail: afeulxl@sina.com

收稿日期: 2017-11-28; 接受日期: 2018-05-16; 网络版发表日期: 2019-02-25

国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金(批准号: 61472443, 61703427)和陕西省自然科学基金(编号: 2013JQ8042)资助项目

摘要 基于交感网络的适应性能力涌现是航空集群的基本特征, 其构型控制与演化是产生适应性能力涌现的关键. 根据航空集群构型演化与控制的基本原则和需求, 将航空集群构型控制组织结构分为任务层、决策层、执行层, 提出基于事件触发-规则驱动的构型演化机制; 针对航空集群以实现面向任务的适应性能力涌现为目标的构型设计准则, 提出将复杂任务按照能力需求分解为原子任务; 以航空集群协同反隐身、无源定位、空战攻击为例, 分析航空集群典型能力-构型的映射关系, 结果表明, 不同的构型将涌现出不同类型和层次的能力; 基于多智能体系统一致性理论设计了航空集群构型生成与保持控制协议. 最后, 通过仿真和搭建航空集群作战演示验证系统, 对所提出的理论结果进行了验证.

关键词 航空集群, 能力涌现, 构型控制, 构型演化, 事件触发, 规则驱动

1 引言

航空集群是由一定数量的单功能或多功能、有人或无人航空飞行器共同组成, 以交感网络为基础, 整体具有能力涌现和行为可测、可控、可用特点的空中移动系统^[1]. 航空集群可看作是一个典型的亚复杂系统, 基于交感网络的能力涌现是其基本特征, 也是实现“集群化”与“智能化”作战的关键^[2]. 航空集群能力涌现是指多个航空器平台或多个子系统, 通过科学的方法聚集后, 产生了新的能力或原有能力发生了质的变化. 航空集群系统中不同航空器的功能耦合, 不同构型的结构效应以及不同战场态势下的环境因素3方面共同

造就其涌现性^[3]. 其中, 功能耦合和环境因素是产生航空集群能力涌现的基础, 但也仅仅提供了涌现产生的客观可能性^[4]. 只有将各个航空器按照一定的“构型”组织起来, 使之发生交互与反馈、激励与响应等交感行为, 才可能实现系统能力的整体涌现, 即航空集群的构型决定了其能力涌现的类型和层次. 从系统论的观点来看, 能力涌现的本质是“由小生大, 由简入繁, 由无到有”, 是航空器平台在特定构型(即系统结构)和战场环境下的交感作用积累到一定程度时所表现出的现象^[5,6]. 因此, 对航空集群的构型控制及其演化方法进行研究, 对发展航空集群作战系统(图1)具有极为重要的现实意义. 航空集群系统的构型包括航空器平台

引用格式: 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强, 等. 航空集群构型控制及其演化方法. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 277–287

Liang X L, He L L, Zhang J Q, et al. Configuration control and evolutionary mechanism of aircraft swarm (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 277–287, doi: 10.1360/N092017-00414

图1 航空集群作战示意图

之间的交感拓扑和空间拓扑^[2]。因此, 构型控制的本质是一个切换交感拓扑的编队控制问题, 其目的是在特定的交感拓扑下, 通过分布式协同使集群内部所有个体的速度、位置与主节点保持期望的偏差。目前, 航空集群构型演化及其控制可供借鉴的技术成果主要集中在多智能体系统(multi-agent system, MAS)和无人机编队控制领域。多智能体系统的建模方法、协同控制、通信交互机制为航空集群研究提供了良好的理论依据与可靠的研究手段^[7~10]。近年来, 国内外有关研究机构在无人机编队控制方面也展开了积极研究, 取得了一定的创新性成果。这些成果主要集中在对特定作战任务背景下的多无人机编队控制问题进行数学建模、算法优化、仿真试验等方面^[11~16]。从现有文献来看, 对动态执行任务过程中多架无人机自主协同编队的研究相对较少, 而且都只针对同构平台进行研究, 对异构平台之间的协同编队控制研究不足。针对有人、无人平台共同组成的航空集群能力涌现、构型控制及其演化方法研究还未见到公开报道。

本文从航空集群的作战任务和能力出发, 设计了航空集群构型控制的层级化组织结构, 提出了基于事件触发-规则驱动的构型演化控制策略。在此基础上, 进一步分析了航空集群典型能力-构型的映射关系, 然后设计基于多智能体系统一致性理论的航空集群构型生成与保持控制协议。最后, 通过仿真和搭建航空集群演示验证系统, 对所提出的理论结果进行了验证。

2 航空集群构型控制组织结构与演化机制

2.1 航空集群构型控制分层组织结构

针对航空集群作战中敌我双方态势变化的高动态性, 航空集群构型的演化和重构首先以战史、演习、仿真、兵棋推演、情报等获取的数据为依据, 离线设计不同场景、不同态势、不同任务、不同阶段的最优构型, 并将这些构型与相应的激活条件匹配, 以规则形式保存; 然后, 根据战场态势, 搜索规则库寻求适用规则子集, 确定适应当前态势的构型; 最后, 根据群内个体先验知识库完整度、信息处理能力、占位、态势等条件推选主节点(master)作为构型重构参考, 其他平台作为从节点(slave)通过调整相对位置、速度和交感拓扑, 形成期望构型。

根据航空集群构型演化过程可知, 要实现航空集群自主、智能的进行构型控制与演化, 产生“适应性”能力涌现, 其组织结构与演化机制设计是关键^[17]。航空集群构型控制与演化向上必须坚持面向任务的基本原则, 向下需要兼容不同动力学特性的异构平台, 同时每架航空器都具有一定的自主决策和独立执行能力, 能够根据战场态势或任务需求, 智能、自主地进行构型的变换和演化。因此, 可将航空集群构型控制组织结构分为任务层、决策层和执行层, 如图2所示。其中, 任务层是航空集群系统的主控层, 主要完成集群规则库构建, 任务分解和行动序列生成等工作, 按照能力

图2 航空集群构型分层控制结构与事件触发-规则驱动演化机制示意图

需求自上而下将复杂任务分解为不同原子任务(Atom-Task), 将任务规划结果或指挥控制指令发送给集群主节点, 主节点通过交感网络间接获取任务信息. 决策层是航空器的“大脑”, 负责根据当前任务的能力需求和战场态势, 按照预先提取的能力-构型映射规则, 战场态势评估规则等生成期望构型, 在交感、战术、协同及行为等规则的驱动下进行信息处理和自主决策, 实现分布式任务分配(身份、角色等)和集群协同策略优选, 调用相应的构型生成、保持、重构规则生成速度、位置和交感拓扑等控制指令. 执行层具备独立执行能力, 能够根据决策层的输出结果, 由飞行员或自动驾驶仪控制航空器达到期望的状态, 最终实现相应的构型.

2.2 基于事件触发-规则驱动的航空集群构型演化机制

航空集群作为一个行为可控、可用的亚复杂系统, 其产生适应性涌现的关键在于遂行作战任务的航空集群能够针对特定的触发事件, 以预定规则为驱动, 进行构型变换与重构演化. 在战场环境(态势)觉察、理解、预测中, 事件是指在一定的条件下战场目标(群)所发生的具有某种军事意义的行为. 为了实现战场环境-事件的映射和表达, 需要首先建立战场基本事

件模型, 主要包含事件类型、平台(事件主体)、时间、空间、触发条件等; 然后, 根据战场基本事件模型中定义的事件类型和事件主体过滤态势数据, 对符合要求的数据进行事件提取, 判断主体是否满足事件触发条件, 最终建立战场环境-事件的映射关系.

规则库是基于航空集群作战需求和特点而建立的形式化的集群及平台作战规则集合, 它明确地描述了任务空间相关要素与系统状态转移之间的关联关系, 使一些定性的原则具体化为定量的规则. 事件-条件-动作(event-condition-action, ECA)规则是一种将事件触发和规则驱动结合的方法, 具有强大的语义表达能力, 可以用来描述航空集群构型演化机制. ECA规则库的建立来源于两方面的数据: (1) 专家知识库数据(经验数据/主观数据), 即领域专家的经验数据, 主要指根据军事专家与情报得到的关于敌、友、我军的作战条例、战斗部署与作战风格等方面的数据; (2) 战场的一级融合数据(态势感知数据/客观数据), 即根据战场事件(包括战史、演习、仿真、兵棋推演等)获取的数据.

由于用于提取规则的数据的模糊性和不确定性, 提取的规则可能会表现出同一结果对应多种不同甚至冲突的属性, 需要通过多属性决策树、模糊集等确定和区分属性的效用以便获得较合适的决策规则.

航空集群构型演化的事件触发-规则驱动机制可用ECA规则描述为^[18,19]

$$\begin{aligned} \text{On } E_k^j &: < \text{Event}_k^1 \odot \dots \odot \text{Event}_k^m > \\ \text{If } C_k^j &: < \text{Condition}_k^1 \odot \dots \odot \text{Condition}_k^m > \\ \text{Then } A_k^j &: < \text{Action}_k^1 \wedge \dots \wedge \text{Action}_k^m > \end{aligned} \quad (1)$$

其含义为: 对集群内编号为 j 的航空器, 如果事件 E_k^j 发生且满足约束条件 C_k^j , 则由规则 A_k^j 驱动航空集群运动直到事件 E_{k+1}^j 发生, $\odot \in \{\wedge, \vee\}$, 其中 $\wedge, \vee$ 分别表示与运算和或运算。

通过式(1)可知, 航空器 j 通过交感网络与集群内部其他个体之间保持信息一致, 是实现任务一致的前提, 即个体必须基于一致的触发事件信息, 才能决策出一致的驱动规则, 最终实现任务一致。根据触发事件的不同, 航空集群构型重构可分为面向任务的主动重构和面向战场态势的应激重构。对于由指挥控制行为产生的任务指令触发事件, 主要依据能力-构型映射规则, 从能力需求的类型、层次、等级等方面确定航空集群的期望构型; 对于由自组织行为产生的态势触发事件, 主要根据集群失效规模、能力缺失、性能衰减等进行航空集群构型-态势适应度评估, 确定是否需要重构及重构的规模、时机等。

3 典型能力涌现-构型映射

不同于传统的以几何关系为标准的编队构建, 航空集群构型设计以实现面向任务的适应性能力涌现为目标。因此, 需要通过量化不同构型的能力指标, 找到满足能力需求的最优构型, 建立作战能力与构型的映射关系, 才能最终实现航空集群能力涌现与任务需求相适应。下面以航空集群协同反隐身、无源定位、空战攻击3种典型能力为例, 分析航空集群能力涌现的类型、层次和等级与构型的关系。

3.1 航空集群协同反隐身构型

隐身飞机正面雷达反射截面积小, 在其来袭方向上难以被探测发现。现有空中预警探测系统在反隐身作战中存在探测距离近、发现难和跟踪难等问题。隐身飞机主要使入射雷达波在前向具有较大程度的衰减, 但在其他方向仍具有较大的雷达散射截面积(RCS)

且随雷达视角的变化非常灵敏^[20,21]。利用航空集群灵活、敏捷的构型生成与重构能力, 以集群内任一成员机载雷达作为发射阵元, 其他成员机载雷达作为接收阵元, 构建多部双基雷达, 利用雷达收、发分置带来的空间分集优势, 在隐身目标不同方位探测其散射的电磁波, 可以形成对隐身飞机的稳定探测与跟踪能力, 其基本构想如图3(a)所示, 发射机、接收机以及隐身飞机之间的位置关系如图3(b)所示^[22]。

在考虑方向图传播因子、损耗因子的情况下, 双基雷达方程为^[23]

$$(R_T R_R)^2_{\max} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma_B F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 P_{R\min} L_T L_R} \quad (2)$$

记双基地雷达性能参数为

$$B_{\text{bistatic}} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 P_{R\min} L_T L_R} \quad (3)$$

则

$$(R_T R_R)^2_{\max} = B_{\text{bistatic}} \sigma_B \quad (4)$$

式中, R_T, R_R 分别为发射和接收雷达与隐身飞机的距离, σ_B 为隐身飞机的双基雷达散射截面积, 是隐身飞机的双基地姿态角的函数^[24]:

$$\sigma_B = \sigma(\alpha_T, \beta_T, \alpha_R, \beta_R),$$

式中, α_T 和 α_R 分别表示发射机、接收机方位角, β_T 和 β_R 分别为发射机、接收机在三维坐标下的俯仰角。

通过比较接收机端的信号功率(P_R)与最小接收机功率($P_{R\min}$)大小, 以此来判定隐身目标是否被探测到。如果满足 $P_R > P_{R\min}$, 则认为隐身目标被探测到, 否则不能。

不考虑大气衰减因子的影响, 当 B_{bistatic} 确定后, 双基雷达的探测空域由 R_L 和 σ_B 决定。以“1发3收”协同探测构型为例, 发射机位于坐标原点且具备接收功能, 2部接收机对称分布于发射机两侧。取机载发射, 接收雷达性能参数 $B_{\text{bistatic}} = 3.2552 \times 10^4$, 发射机迎头探测距离 $r_T = 52 \text{ km}$ (r_T 与发射机距离隐身飞机距离 R_T 不同), 假设隐身飞机鼻锥方向正对发射机且迎头RCS为 $\sigma_B = 0.0069 \text{ m}^2$ 。计算得到不同构型下的探测区域如图4所示。其中, 红色区域表示发射机自发自收的探测区域。

图 3 航空集群协同反隐身示意图. (a) 航空集群协同反隐身构想; (b) 隐身目标与集群收、发射雷达的位置关系

图 4 “1发3收”不同构型下的协同探测区域. (a) $R_L = r_T, \theta = 0^\circ$; (b) $R_L = r_T, \theta = 22.5^\circ$

3.2 航空集群协同无源定位构型

航空集群协同无源定位是通过3个或3个以上机载平台对辐射源的信号进行无源截获接收, 提取角度和时间等信息, 通过交感网络进行协同解算完成对敌目标的定位和跟踪, 最终可实现无源态势感知和火控级引导攻击. 在集群飞行器自身定位精度、参数测量精度一定的情况下, 航空集群无源探测定位效能的发挥与集群构型密切相关. 以典型的三机协同无源定位为例, 其基本构想如图5所示^[25]. 图中, S_0 为主节点, S_1, S_2 为从节点, T 为辐射源. $S_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 0, 1, 2$ 表示主、从节点的位置, $T = (x, y, z)$ 表示敌机的位置. 利用主、从节点接收到辐射信号的时差可确定一条半边双曲线, 三架航空器确定了两条半边双曲线, 即时差线1和2, 通过对两条时差线交点进行求解便可得到辐射源位置, 其定位方程为

$$\begin{cases} \Delta r_i = r_0 - r_i = c\Delta t_i, \\ r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}, \\ r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}, \end{cases} \quad (5)$$

式中, r_i 为辐射源 T 到第 i 架航空器的空间距离, Δr_i 为 T

到主节点 S_0 与从节点 S_i 之间的距离差, c 为光速, Δt_i 为辐射信号 T 从到主站主节点 S_0 与从节点 S_i 之间的时间差. 通过解式(5)即可得到辐射源的位置.

取飞机的高度 $z_0 = 6 \text{ km}$, $z_1 = z_2 = 10 \text{ km}$, 飞机自身定位误差 $\sigma_s = 30 \text{ m}$, 时差 $\sigma_t = 15 \text{ ns}$, 相关系数 $\eta = 0.35$, 假设三机在水平面内的投影成等腰三角形布局, 基线 $l = 40 \text{ km}$, 基线夹角 $\beta = 60^\circ$. 仿真计算得到 $z = 10 \text{ km}$ 高度层内的定位等精度线分布, 如图6所示.

3.3 航空集群协同空战攻击构型

通过集群内成员间的相互配合, 航空集群协同攻击可以有效提高攻击任务完成的质量以及航空武器使用的效率. 航空集群空空导弹联合攻击区是航空集群协同攻击的重要内容, 其含义为: 航空集群携带的空空导弹在航空集群协同探测支持下, 基于共享战场态势信息, 在单机或协同制导模式下形成的空间整体杀伤区域.

假设航空集群有 n 架携带空空导弹的载机, 第 i 架载机的位置为 P_i , 则载机在空间上的分布可表示为

$$C_n = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n). \quad (6)$$

图5 航空集群协同无源定位构想

影响空空导弹攻击距离的主要因素包括: 载机与机动目标的高度 h_i 和 h_t , 载机与机动目标的速度 v_i 和 v_t , 目标机动过载 n_t , 目标进入角 q_i , 导弹运动状态 X_{mi} 以及协同制导参数 ρ_c 等。假设第 i 架载机对目标的最远和最近攻击距离分别为 $R_{\max}(i)$ 和 $R_{\min}(i)$, 则

$$\begin{cases} R_{\max}(i) = f_{\max}(h_i, h_t, v_i, v_t, n_t, q_i, X_{mi}, \rho_c, \xi), \\ R_{\min}(i) = f_{\min}(h_i, h_t, v_i, v_t, n_t, q_i, X_{mi}, \rho_c, \xi), \end{cases} \quad (7)$$

式中, ξ 为系统误差和随机干扰。由于航空集群空空导弹攻击区是集群内所有成员最大攻击范围的集合, 因此, 航空集群空空导弹攻击区可表示为

$$S_{\text{range_maneuver}} = F_{\max}(X_t, X_{mi}, X_{fi}, C_n, \rho_c, \xi), \quad (8)$$

式中, $S_{\text{range_maneuver}}$ 为航空集群空空导弹攻击区边界, X_t 和 X_{fi} 分别为机动目标和集群载机的运动状态, 具体表示为

$$\begin{cases} X_t = (x_t, y_t, h_t, v_t, n_t, \varphi_t, \psi_t, \gamma_t), \\ X_{fi} = (x_i, y_i, h_i, v_i, q_i, \varphi_i, \psi_i, \gamma_i), \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\varphi_t, \psi_t, \gamma_t$ 和 $\varphi_i, \psi_i, \gamma_i$ 分别为目标和载机的俯仰角、航向角和滚转角。

采用上述模型, 假设目标高度为10000 m, 保持300 m/s匀速直线运动, 方向正对2号机, 飞机、导弹初始高度均为10000 m, 速度280 m/s, 导弹射程最大80 km, 最大过载30g, 对两种典型构型下的航空集群空空导弹联合攻击区进行数值计算, 结果如图7所示。

4 构型控制协议设计

在构型控制层面, 可将每架航空器视为一个质点并通过二阶线性系统进行描述。考虑由1个主节点和 N 个从节点组成的航空集群系统, 主节点的动力学特性可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_0(t) = \mathbf{v}_0(t), \\ \dot{\mathbf{v}}_0(t) = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (10)$$

从节点的动力学特性可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t), \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{x}_i(t) \in R^n$, $\mathbf{v}_i(t) \in R^n$ 分别表示航空器的位置和速度矢量, $\mathbf{u}_i(t) \in R^n$ ($i = 1, \dots, N$)表示控制输入。定义 $F = \{1, \dots, N\}$, 表示所有僚机的集合。

航空集群的构型可表示为 $C \triangleq \langle G, h_F \rangle$, 其中 G 和 h_F 分别表示航空集群的交感拓扑和空间拓扑。航空器之间的交感拓扑可用有向图 $G = (V, A)$ 进行描述, 每架航空器可看作图 G 中的一个节点, V 表示所有航空器

图6 不同构型的定位误差(GDOP)分布等值线图. (a) 主节点在后($l = 40$ km, $\beta = 60^\circ$); (b) 主节点在前($l = 40$ km, $\beta = 150^\circ$)

图 7 (网络版彩图)不同构型航空集群空导弹联合攻击区示意图. (a) 箭形; (b) V形

的集合, 邻接矩阵 $A = [a_{ij}]_{(N+1) \times (N+1)}$ 表示航空器之间的交感拓扑, $a_{ij} > 0$ 表示航空器 i 能够通过交感网络获取航空器 j 的状态信息, 否则 $a_{ij} = 0$. 图 G 的拉普拉斯(Laplacian)矩阵 L 定义为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}, & i = j, \\ -a_{ij}, & i \neq j, \end{cases}$$

假设 G 有生成树, 则 0 是 L 的代数重数为 1 的特征值, 且剩余 N 个特征值的实部均为正, 即

$$0 = \lambda_0 < \text{Re}(\lambda_i), i \in F.$$

航空集群的空间拓扑可表示为

$$\mathbf{h}_F(t) = [\mathbf{h}_{F_x}^T(t), \mathbf{h}_{F_v}^T(t)]^T,$$

其中,

$$\mathbf{h}_{F_x}(t) = [h_{1x}(t), \dots, h_{Nx}(t)]^T, \mathbf{h}_{F_v}(t) = [h_{1v}(t), \dots, h_{Nv}(t)]^T.$$

$h_{ix}(t), h_{iv}(t)$ ($i \in F$) 分别表示航空器相对于长机(编队参考点)的位置和速度偏差. 令

$$\mathbf{h}_i(t) = [h_{ix}(t), h_{iv}(t)]^T \quad (i \in F),$$

$$\xi_i(t) = [x_i(t), v_i(t)]^T \quad (i \in \{0, \dots, N\}).$$

针对航空集群交感拓扑切换的情况, 采用如下基于位置、速度信息的分布式控制协议^[26]:

$$u_i(t) = \mathbf{K} \sum_{j=1}^N a_{\sigma(i)}^{ij} ((\xi_i(t) - \mathbf{h}_i(t)) - (\xi_j(t) - \mathbf{h}_j(t))) + \gamma_i \mathbf{K} (\xi_i(t) - \mathbf{h}_i(t) - \xi_0(t)) + \dot{\mathbf{h}}_{iv}(t), \quad (12)$$

其中, $\mathbf{K} = [-\alpha, -\beta]$, $\alpha, \beta > 0$ 常数, $\gamma_i = 1$ ($i \in F$) 表示 i 能够获得长机信息, 否则 $\gamma_i = 0$.

5 仿真与实验

通过仿真和搭建航空集群作战演示验证系统, 对航空集群作战过程的时序关系、空间关系、逻辑关系等进行仿真与实验, 验证所提出的理论方法. 试验系统按照图2所示的航空集群构型分层控制结构进行设计, 总体架构如图8所示. 其中, 地面站1与任务层对应, 负责发布任务与指挥控制指令, 地面站2作为冗余备份设计, 直接对无人机平台执行层进行控制, 且其控制指令优先级高于地面站1, 主要负责处理实验中可能出现的各类突发情况; 决策层由协同控制器构成, 负责进行信息处理和自主决策, 生成速度、位置和交感拓扑等控制指令; 执行层主要由PIX自驾仪构成, 独立执行决策层输出的决策指令, 对无人机平台的姿态、速度、位置进行控制.

无人机决策层之间以及决策层与任务层之间通过 Zigbee 自组网模块实现信息交互, 决策层将生成的决策信息通过基于 Mavlink 协议的串口发送给执行层. 无人机执行层与地面站2之间通过数传连接. 采用双数据链, 双地面站的设计能够有效增强系统的稳定性和可靠性. 系统按照集中管理, 分层运行, 分散控制的方式进行, 地面站负责任务管理与调度, 每架航空器只需根据预定规则进行自主信息处理与决策, 并独立执行自身决策层输出的控制指令, 使得系统具有极强的适应

图8 (网络版彩图)系统总体架构

性、兼容性、扩展性。

以包含5架飞机(编号 $A_i, i \in I, I = \{0, 1, 2, 3, 4\}$)的航空集群前往某空域(坐标: (400 km, 0))执行对某隐身目标的截击任务为背景, 假设飞机由同一机场起飞, 在指定空域进行集结, 初始位置坐标分别为(45 km, 0 km), (40 km, 45 km), (30 km, -45 km), (0 km, 10 km), (0 km, -10 km), 初始速度分别为200, 150, 160, 150和120 m/s, 方向均指向x轴正方向, 初始加速度均为0 m/s², 最大速度680 m/s, 最大加/减速度 ± 25 m/s², 期望速度为280 m/s, 取 $\alpha = 0.1, \beta = 1$ 。由于实验场地、费用等条件的限制, 验证过程采用仿真与实验相结合的方式, 主要验证航空集群的分布式控制、智能决策能力以及组织结构, 事件触发-规则驱动的构型演化机制。为适应战场环境的高动态性和决策结果的确定性, 在实际集群作战中, 航空集群构型的重构和演化主要依据战场态势匹配并调用规则进行决策以及构型调整到位的过程, 不涉及具体构型的设计与优化, 这部分工作是在离线训练和学习中完成的。构型演化过程中的任务分配以及协同决策过程描述如下:

(1) 根据作战预案, 按照能力需求将任务分解为集群协同无源定位(AtomTask1)、协同反隐身探测(AtomTask2)以及协同空战攻击(AtomTask3) 3个原子任务, 分别取图4(b), 图3(b)和图5(b)作为原子任务AtomTask1, AtomTask2和AtomTask3对应的构型, 规定当集群内所有飞机的位置误差 $p_{\text{error}} < 1$ km且速度误差 $v_{\text{error}} < 10$ m/s时认为构型生成完毕并转入构型保持状态。

$$E_0^{j \in I} = \{\emptyset\}, C_0^{j \in I} = \{\emptyset\}, A_0^{j \in I} = \{\emptyset\}.$$

(2) 指挥中心发布任务开始指令, 航空集群收到指令后进行主节点的推选, 标准包括先验知识库完整度、信息处理能力、占位、态势、重构代价等。由于验证所用的无人机完全相同, 所以主节点推选主要依据占位、态势和重构代价。从作战角度来看, 总是希望同集群内各架飞机飞行距离基本相当, 以便在最短时间内完成构型重构, 因此将规则设定为距离集群空间分布几何中心最近的 A_0 作为主节点。

Rule1 :

On $E_1^{j \in I} :< \text{CmdEvents} \wedge \text{SituationEvents} >$

If $C_1^{j \in I} :< \text{Cmd.MissionState} = \text{Activate}$
 $\wedge \text{arcmindis.toCenter} = A_0 >$

Then $A_1^{j \in I} :< A_0.\text{Role} = \text{Master}$
 $\wedge A_{1,2,3,4}.\text{Role} = \text{Slave} >$

(3) 按照重构代价最小原则, A_0 与 A_1, A_2 自组织生成无源定位构型向目标空域飞行, A_3, A_4 在 A_0 后方50 km, 与 A_0 成等边三角形, 担任掩护(Cover)任务:

Rule 2 :

On $E_2^{j \in I} :< \text{CmdEvents} \wedge \text{SituationEvents} >$

If $C_2^{j \in I} :< \text{Cmd.MissionState} = \text{Continue}$
 $\wedge \text{Stn.Task} = \text{To_AtomTask_1} >$

Then $A_2^{j \in I} :< A_{0,1,2}.\text{Config} = \text{PassiveLoaction}$
 $\wedge A_{3,4}.\text{Config} = \text{Cover} >$

(4) 基于作战行动规则, 为保证在目标进入探测范围之前完成构型重构, 当主节点距离目标空域250 km时, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 开始重构为“1发3收”反隐身探测构型, A_4 作为备份机与 A_0 相对位置不变, 待命。

Rule 3 :

On $E_3^{j \in I} :< \text{CmdEvents} \wedge \text{SituationEvents} >$

If $C_3^{j \in I} :< \text{Cmd.MissionState} = \text{Continue}$

$\wedge \text{Stn.dis.toTarget} \leq 250\text{km} >$

Then $A_3^{j \in I} :< A_{0,1,2,3} \cdot \text{Config} = \text{AntiStealth}$

$\wedge A_4 \cdot \text{Config} = \text{Cover} >$

(5) 当主节点距离目标空域140 km时, 隐身目标即将进入我方集群空导导弹攻击区, 我方集群再次进行构型重构, A_0 , A_1 , A_4 生成三机协同空战攻击构型, A_2 , A_3 前出到两侧掩护, 5机形成V形攻击构型。

Rule 4 :

On $E_4^{j \in I} :< \text{CmdEvents} \wedge \text{SituationEvents} >$

If $C_4^{j \in I} :< \text{Cmd.MissionState} = \text{Continue}$

$\wedge \text{Stn.dis.toTarget} \leq 120\text{km} >$

Then $A_4^{j \in I} :< A_{0,1,4} \cdot \text{Config} = \text{AirCombat}$

$\wedge A_{2,3} \cdot \text{Config} = \text{Cover} >$

将系统的空间关系(位置、速度)参数均按照1:1000进行缩比, 保证所有事件的时序关系、逻辑关系不变, 任务过程中的触发事件由主节点 A_0 根据整个集群的运动情况做出决策并通过自组网通信发送给各架僚机, 地面站实时监控集群内各架飞机的运动状态, 实验结果如图9所示。

图9(a)为航空集群构型演化过程中的触发事件(Event)和决策结果对应的驱动规则(Action), 可以看出航空集群系统针对指令事件和态势事件(构型生成完毕, 原子任务切换)做出了恰当的决策并激活了构型生

图9 构型演化仿真与实验结果。(a) 触发事件-驱动规则(Event-Action); (b) 轨迹; (c) X 方向速度变化; (d) Y 方向速度变化

成、保持、重构规则. 图9(b)为集群内飞机的轨迹, 相同的符号表示同一时刻飞机的位置, 黑色曲线给出了飞机之间的交感拓扑. 从图中可以看出, 通过基于事件触发-规则驱动的自组织协同机制, 集群内各架飞机采取转弯、盘旋、加速、减速等运动方式, 实现了构型的生成、保持和重构, 满足了各个原子任务的构型控制, 演化要求. 图9(c)和(d)分别表示飞机在 X 和 Y 方向速度随时间的变化, 可以看到在构型保持阶段所有僚机都实现了对长机速度稳定跟随, 保证了航空集群系统的稳定. 由于航空集群构型的设计和优化是在离线学习阶段完成的, 因此在构型控制与演化过程中, 系统的全局任务性能可以用构型跟踪误差来衡量. 图10给出了系统误差($\sum \xi_i^T(t)\xi_i(t)$)随时间变化的曲线, 表明在不同的原子任务中, 航空集群能够进行自主决策并收敛到期望构型, 产生“适应性能力涌现”.

6 总结

根据航空集群构型控制与演化的基本原则和作战需求, 将航空集群构型控制组织结构分为任务层、决策层、执行层, 提出了基于事件触发-规则驱动的构型

图10 (网络版彩图)系统构型跟踪误差

演化机制; 针对航空集群以实现面向任务的适应性能涌现为目标的构型设计准则, 分析了航空集群协同反隐身、协同无源定位和协同攻击3种典型作战能力与构型的映射关系; 采用二阶线性系统建立了航空集群构型控制的一般模型, 基于一致性理论设计了集群构型控制协议; 以航空集群执行对某隐身目标的截击任务为背景, 通过仿真和搭建航空集群演示验证系统对航空集群在整个任务过程中的构型控制及演化过程进行仿真和实验, 验证了本文所提方法的可行性和有效性.

参考文献

- 1 梁晓龙, 李浩, 孙强. 空中作战发展特征及对策. 空军工程大学学报: 军事科学版, 2014, 14: 4-7
- 2 柏鹏, 梁晓龙, 王鹏, 等. 新型航空集群空中作战体系研究. 空军工程大学学报: 军事科学版, 2016, 16: 1-4
- 3 贝塔朗菲. 一般系统论: 基础、发展和应用. 林康义, 译. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 4 黄吉平. 复杂系统中基于场与结构耦合效应的一些涌现特性及其物理机制. 上海理工大学学报, 2011, 33: 418-424
- 5 约翰·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性. 周晓牧, 韩晖, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2000
- 6 约翰·霍兰. 涌现: 从混沌到有序. 陈禹, 译. 上海: 科学技术出版社, 2001
- 7 Han L, Dong X, Li Q, et al. Formation-containment control for second-order multi-agent systems with time-varying delays. *Neurocomputing*, 2016, 218: 439-447
- 8 Dong X, Yu B, Shi Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2014, 23: 340-348
- 9 段海滨, 罗琪楠, 余亚翔. 基于交哺网络控制的多无人机协同编队方法研究. 中国科学: 技术科学, 2013, 43: 767-776
- 10 Viragh C, Vasarhelyi G, Tarcai N, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots. *Bioinspir Biomim*, 2014, 9: 025012
- 11 Dehghani M A, Menhaj M B. Communication free leader-follower formation control of unmanned aircraft systems. *Robot Auton Syst*, 2016, 80: 69-75
- 12 Ambroziak L, Gosiewski Z. Two stage switching control for autonomous formation flight of unmanned aerial vehicles. *Aerosp Sci Tech*, 2015, 46: 221-226
- 13 Yang A, Naeem W, Irwin G W, et al. Stability analysis and implementation of a decentralized formation control strategy for unmanned vehicles. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2014, 22: 706-720

- 14 Yao P, Wang H, Su Z. Real-time path planning of unmanned aerial vehicle for target tracking and obstacle avoidance in complex dynamic environment. *Aerosp Sci Tech*, 2015, 47: 269–279
- 15 Duan H B, Luo Q N, Yu Y X. Trophallaxis network control approach to formation flight of multiple unmanned aerial vehicles. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 1066–1074
- 16 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制. *科技导报*, 2017, 35: 17–25
- 17 范彦铭. 无人机的自主与智能控制. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47: 221–229
- 18 Shanbin L, Bugong X. Co-design of event generator and controller for event-triggered control system. In: *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*. Yantai, China: IEEE, 2011. 175–179
- 19 Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus. *Automatica*, 2013, 49: 245–252
- 20 赵培聪. 2010年隐身与反隐身技术发展情况. *现代雷达*, 2011, 33: 9–12
- 21 Fu L Q, Yang L S, Tang H, et al. Anti-stealth radar with spread spectrum technology. *Key Eng Mater*, 2011, 474–476: 2079–2084
- 22 张佳强, 梁晓龙, 尹忠海, 等. 航空集群协同反隐身构型与机动策略. *系统工程与电子技术*, 2016, 38: 2518–2522
- 23 Stimson G W. *Introduction to Airborne Radar*. 2nd Ed. Raleigh: SciTech Publishing, 1998
- 24 黄沛霖, 姬金祖, 武哲. 飞行器目标的双站散射特性研究. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 35: 140–143
- 25 Yu H, Huang G, Gao J, et al. Practical constrained least-square algorithm for moving source location using TDOA and FDOA measurements. *J Syst Eng Electron*, 2012, 23: 488–494
- 26 Dong X, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems subjected to switching topologies with application to quadrotor formation flying. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64: 5014–5024

Configuration control and evolutionary mechanism of aircraft swarm

LIANG XiaoLong¹, HE LyuLong², ZHANG JiaQiang¹ & BAI Peng²

¹ National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

² Shaanxi Province Laboratory of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

The adaptive ability emerging based on the sympathetic network is a basic feature of aircraft swarm, and the critical points lie in the configuration control and evolutionary mechanism. According to the basic principles and requirements of configuration control and evolution, a three-level hybrid architecture with the mission managing level, decision making level and aircraft control level was proposed, and an event-triggered & rules-driven evolutionary mechanism was also designed. In order to achieve the mission-oriented configuration design goal of “adaptive ability emerging”, complex mission was decomposed into a sequence of atom tasks based on ability requirements. The cooperative anti-stealth, passive location and air-to-air attack were given as examples to show the mapping relationships between ability and configuration. The results indicate that different configurations can “emerge” different types and levels of ability. The configuration approaching and keeping control protocol was designed based on the consensus theory of multi-agent system. Finally, theoretical results were verified by simulations and experiments with a demonstration system.

aircraft swarm, ability emerging, configuration control, configuration evolution, event trigger, rules driven

doi: [10.1360/N092017-00414](https://doi.org/10.1360/N092017-00414)