

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.017

无人机集结问题主要性能指标

王元鑫¹, 温家鑫², 袁涛¹, 何云凤²

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266100; 2. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为全面地对无人机编队的综合性能指标进行测评, 构建一套针对无人机集结问题的完整性能指标。对无人机的集结过程进行分析, 建立评价无人机集结性能指标体系及其数学模型, 通过对快速性、准确性、稳定性、安全性、生存能力、应急能力、通信性能 7 个无人机集结主要性能指标的探讨, 给出一次集结任务完成情况的判断。分析结果表明: 该性能指标体系能涵盖无人机集结的过程, 具有一定的参考价值。

关键词: 无人机; 集结问题; 性能指标

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Main Performance Index of UAV Aggregation Problem

Wang Yuanxin¹, Wen Jiabin², Yuan Tao¹, He Yunfeng²

(1. Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266100, China;

2. College of Shore Defense, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to evaluate the comprehensive energy index of the UAV formation, a set of complete energy index for the problem of UAV aggregation is constructed. The process of UAV aggregation is analyzed, the index system and its mathematical model are established to evaluate the main performance of the UAV aggregation, such as rapidity, correctness, stability, security, survivability, emergency capability, and communication performance. The judgment for one aggregation task is given. The results show that the performance index system can cover the process of unmanned aerial build-up and has some reference value.

Keywords: UAV; aggregation problems; performance index

0 引言

无人机的机动性好、续航时间长、不存在人的生理限制, 可以像有人机一样执行任务; 所以无人机目前在军用和民用 2 个领域前景广阔, 已经成为进行大量重复性和危险条件下工作的最佳选择^[1]。受限于性能, 某些任务无法由单架无人机完成, 需要以无人机编队形式执行任务, 而集结问题就是形成编队的第一步。编队集结问题是指编队从任意一种初始状态开始, 依据某个性能指标和约束条件, 通过改变各个无人机的飞行参数, 使编队中所有的无人机可以在有限时间之内到达某集结点^[2]。

目前, 国内外对集结问题的相关性能研究很少, 还没有文献系统地对无人机集结从各个性能方面进行评价。文献[3]针对无人机编队航迹规划问题时, 提到了最小集结时间的概念; 文献[4]在解决无人机集结问题时, 提到了协调一致时间的概念; 文献[5]针对无人机航迹规划问题, 提到了要对无人机位置与姿态精确控制; 文献[6]在对飞机的生存力的影响因素进行分析时, 提到了飞机可靠性的概念; 文献

[7]在研究无人机防撞冲突检测时, 提到了安全半径的概念; 文献[8]在对有人机的作战效能进行评估时, 提到了生存能力的概念; 文献[9]针对无人机远程遥控技术问题, 研究了无人机通信的性能指标。整理、归纳、总结并且科学、全面地构建无人机集结的性能指标体系就变得非常重要。

1 问题分析

目前, 无人机市场竞争激烈, 促进了单机方面性能提升。对于多个无人机来说, 如何协同完成任务, 任务的完成情况如何, 还没有相关的论文专门研究多无人机整体方面的性能。作为多无人机编队完成任务的第一步, 无人机集结的完成情况及怎样去评价一次集结任务的相关性能指标就显得尤为重要。

如图 1 所示, 笔者分析无人机集结性能指标中的快速性、准确性、稳定性、安全性、生存能力、应急能力、通信性能 7 个主要性能指标, 并归纳总结其他问题, 以期完善无人机集结相关性能指标体系, 明确未来相关技术发展方向。

收稿日期: 2020-05-02; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 青年科学基金(61903374); 国家自然科学基金(61473306)

作者简介: 王元鑫(1993—), 男, 山东人, 硕士, 助教, 从事飞行器综合导航技术、航空仪表与控制研究。E-mail: wyx13@163.com。

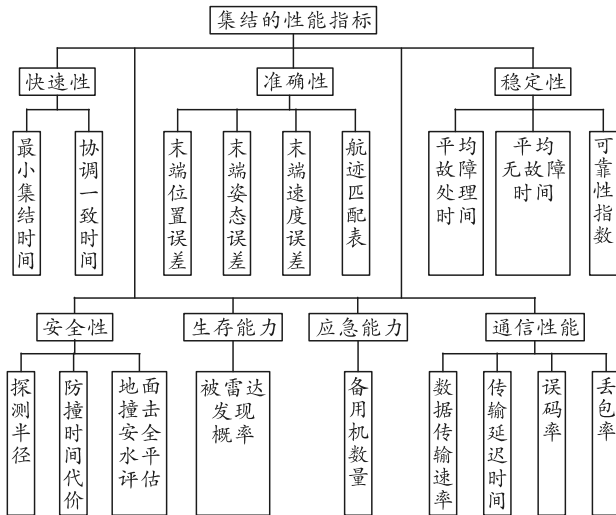


图 1 集结性能指标

2 各性能指标的建立

假设有 n 架无人机分布在某一出发区域，第 i 架无人机 U_i 的起始位置为 (x_i^s, y_i^s, z_i^s) ，准备到指定集结区域集合，每架无人机都有自己的目标位置 (x_i^t, y_i^t, z_i^t) 。 n 架无人机要同时到达指定位置。

2.1 集结快速性

对于无人机编队同时集结来说，快速性是考虑的首要问题。快速性是反映无人机集结快慢的一项指标，笔者提出采用最小集结时间 T_a 和协调一致时间 T_c 来衡量其快速性。

2.1.1 最小集结时间

遇上紧急任务时，需要以最快的速度出动和集结无人机群，最直接的指标就是最小集结时间 T_a 。最小集结时间指接到集结指令开始，直到各无人机到达指定位置完成同时集结所需的最小时间。

要使完成集结的时间达到最小，通常通过航迹规划来实现。在工程实践中，往往通过简单的策略来进行实现航迹规划，主流的航迹规划策略步骤如下：

1) 总共 n 架无人机，首先为每架无人机规划 k 条路径，并将其路径长度按升序排列。

2) 第 i 架无人机第 j 条航迹长度为 $L_{i,j}$ ，那么沿此航迹的到达时间范围为 $T_{i,j} \in [L_{i,j} / v_{\min}, L_{i,j} / v_{\max}]$ ，此无人机的到达时间范围

$$T_i = T_{i,1} \cup T_{i,2} \cup \dots \cup T_{i,k} \quad (1)$$

3) 由于多无人机要同时到达且集结时间越短越好，所以确定集结时间为

$$T_a = \min \{T_1 \cap T_2 \cap \dots \cap T_n\} \quad (2)$$

4) 确定了集结时间 T_a 之后，第 i 架无人机从第一条航迹开始执行判断 $L_{i,j} / v_{\max} \leq T_a \leq L_{i,j} / v_{\min}$ ， $j \in [1, \dots, k]$ ，一旦满足，则执行该条航迹（在集结时间最短的情况下让航程尽量最短），并将其长度记为 $L_{i,a}$ ，那么该无人机的飞行速度定为

$$v_i = L_{i,a} / T_a \quad (3)$$

这样就输出了最小集结时间，以及每一架无人机的路径和速度。

2.1.2 协调一致时间

最小集结时间是直接反映编队集结速度的指标，是一种结果上的快速性；编队集结时的协调一致时间能够反映编队协调的快速性，是一种过程上的快速性。接下来对协调一致时间 T_c 进行描述。

设第一架无人机接收到指令的时间为起点，第 i 架无人机在 t 时刻与自己的目标位置剩余路径的长度记为 L_i ，第 i 架无人机在 t 时刻的速度记为 v_i ，那么每架无人机预计到达时间 (estimate time of arrival)：

$$T_{ETA}^i = L_i / v_i + t \quad (4)$$

整个编队完成同时集结任务后，可得到编队的集结时间 T_e 。在已经实现同时集结的前提下，每架无人机肯定在同时到达之前的某一时刻，所有无人机的 T_{ETA}^i 已经趋于一致，即 $T_{ETA}^i \rightarrow T_e$ ，将这个时刻定义为协调一致时间 T_c 。这样的描述只是定性的，以下给出协调一致时间 T_c 的定量计算过程。

第 i 架无人机的预计到达时间为 T_{ETA}^i ， T_{ETA}^i 是随时间 t 变化的，将整个编队的集结时间 T_e 与 T_{ETA}^i 的差记为协调一致时间误差：

$$E_i(t) = T_c - T_{ETA}^i(t) \quad (5)$$

当 n 架无人机的协调一致时间误差的平方和等于 δ 时， $t = T_c$ ，即

$$\sum_{i=1}^n E^2(T_c) = \delta \quad (6)$$

其中 δ 是一个误差接受程度常数。

2.2 集结准确性

对于无人机编队来说，到达指定集结区域之后，对无人机的集结末端状态加以约束可以更好、更快地进入编队飞行状态。同时，在设定的某点位置上速度是否达到指定要求，会对下一步编队飞行产生很大影响。笔者用末端位置误差 e_p 、末端姿态误差 e_a 、末端速度误差 e_v 来描述集结的末端准确性。关

于实际航迹与预定航迹的误差，可以用航迹误差 e_m 来表示。

2.2.1 末端位置误差

第 i 架无人机到达集结时间 T_e 时，将无人机的实际位置 (x_i^a, y_i^a, z_i^a) 与目标位置 (x_i^t, y_i^t, z_i^t) 的距离定义为单机末端位置误差 e_{pi} ，即

$$e_{pi} = \sqrt{(x_i^a - x_i^t)^2 + (y_i^a - y_i^t)^2 + (z_i^a - z_i^t)^2}。 \quad (7)$$

整个编队的末端位置误差是编队中所有位置误差的平均值，即

$$e_p = \frac{\sum_{i=1}^n e_{pi}}{n}。 \quad (8)$$

2.2.2 末端姿态误差

第 i 架无人机到达集结时间 T_e 时，将无人机的实际姿态 $(\theta_i^a, \varphi_i^a, \gamma_i^a)$ 与末端约束姿态 $(\theta_i^t, \varphi_i^t, \gamma_i^t)$ 的距离定义为单机末端姿态误差 e_{ai} ，即

$$e_{ai} = \sqrt{(\theta_i^a - \theta_i^t)^2 + (\varphi_i^a - \varphi_i^t)^2 + (\gamma_i^a - \gamma_i^t)^2}。 \quad (9)$$

整个编队的末端位置误差是编队中所有姿态误差的平均值，即

$$e_a = \frac{\sum_{i=1}^n e_{ai}}{n}。 \quad (10)$$

2.2.3 末端速度误差

第 i 架无人机到达集结时间 T_e 时，将无人机的实际速度 v_i^a 在 3 个方向上的分量 $(v_{xi}^a, v_{yi}^a, v_{zi}^a)$ 与规划速度 v_i^t 在 3 个方向上的分量 $(v_{xi}^t, v_{yi}^t, v_{zi}^t)$ 的差值定义为末端速度误差 e_{vi} ，即

$$e_{vi} = \sqrt{(v_{xi}^a - v_{xi}^t)^2 + (v_{yi}^a - v_{yi}^t)^2 + (v_{zi}^a - v_{zi}^t)^2}。 \quad (11)$$

整个编队的末端位置误差是编队中所有速度误差的平均值，即

$$e_v = \frac{\sum_{i=1}^n e_{vi}}{n}。 \quad (12)$$

2.2.4 航迹误差

将第 i 架无人机到达集结地点时无人机的实际航迹 W_i^a 与原计划航迹 W_i^t 进行对比，可以得到第 i 架无人机的航迹匹配度

$$e_{mi} = 1 - W_i^t / W_i^a。 \quad (13)$$

整个编队的航迹匹配度 M 是编队中所有无人机的匹配度的平均值，即

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^n e_{mi}}{n}。 \quad (14)$$

2.3 集结可靠性

可靠性是指系统在限定的条件下与限定的时间之内实现规定功能的能力。无人机集结的可靠性主要指无人机完成集结任务的成功率。在评价集结任务的指标中，可靠性是首要的指标。当无人机可靠性无法保证的时候，其他的性能都是多余。笔者用可靠度 P 来表示无人机集结的可靠性。

首先引入一个概念：平均故障间隔时间 T_{mbr}^i (mean time between failures)。这是反映无人机编队稳定性的一个重要指标，在无人机飞行的过程中，不可避免地会出现一些问题，而平均故障间隔时间就是反映出现这些问题的概率。可靠度与飞机的平均故障间隔有直接相关，也与执行飞行任务的时间相关，则第 i 架无人机的可靠度计算公式为

$$P^i = T_{mbr}^i / T^i。 \quad (15)$$

其中： T^i 为第 i 架无人机飞行时间； P^i 是第 i 架无人机的可靠度，再对整个编队的无人机可靠度取平均数，

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P^i}{n}。 \quad (16)$$

从而得到整个无人机编队的可靠度，可以用可靠度来描述无人机群的可靠性。

2.4 集结安全性

伴随着无人机的使用范围扩大，飞行环境动态性、执行任务复杂性，无人机的航空器系统(简称为无人机系统)事故频繁发生，美国国防分析报告称无人机系统故障概率约为 F16 的 50 倍，为普通航空器的 100 倍，安全性成为设计及验证的难点。

关于无人机的安全性，在这里设置无人机的探测半径 R_t ，时间代价 Δt ，地面撞击安全水平评估。

2.4.1 探测半径

无人机的安全半径如图 2 所示。设无人机周围有一个半径为 R 的安全圆，将无人机作为参照，如果当障碍物运动轨迹和安全圆有交点，就可以认为碰撞发生。探测半径为 R_t 的机载设备对周围进行扫描，可以获得障碍物相对无人机的位置坐标，并且以此来进行冲突行为检测；因此，探测半径对无人机的安全水平影响很大。

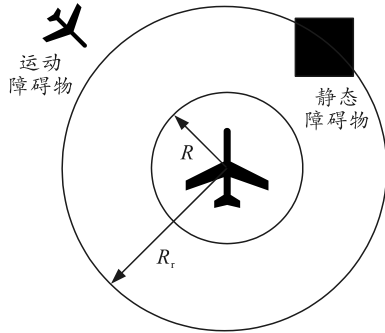


图 2 无人机的探测半径

2.4.2 时间代价

考虑防撞的时间代价,面对可以运动的障碍物,无人机可以采取的策略包括改变高度和速度。2 种方法如何确定要按照预测的交点时刻,无人机与障碍物之间的相对高度差和速度差。如果无人机的高度大,那么使用增加高度的防撞策略;否,则使用降低高度的防撞策略,速度同理。第 i 架无人机防撞所用的时间为

$$\Delta t_i = \Delta h/v_h = |l/v_i - l/v'_i| \quad (17)$$

其中: Δh 为高度差; v_h 为无人机爬升/下降的速度; l 为无人机的调整距离; v'_i 为改变后的速度。显然, Δt_i 越小,说明无人机处理紧急事件的能力越强,这次避障对编队集结造成的影响越小; Δt_i 越大,则说明影响越大。

2.4.3 地面撞击安全水平评估

地面撞击的安全水平评估,无人机系统的要求是要构建与载人航空器接近的目标安全水平(target level of safety, TLOS),而目前法规对于无人机系统的目标安全水平没有明确规定。在目前的规章中,主要对无人机的地面撞击和空中碰撞进行安全性分析,得出期望安全水平(except level of safety, ELOS),来满足整个系统的目标安全水平。地面撞击产生结果的严重程度和系统可靠性指标是相关的。 T_{mbf}^i 是用来反映整个系统可靠性的一个重要指标。使用此种方法 ELOS 可以等价于 TLOS。地面撞击期望安全水平的公式如下

$$P_{elos}^i = \frac{1}{T_{mbf}^i} A_{exp} \rho P_{pen} (1 - P_{mit}) \quad (18)$$

式中: i 为无人机中第 i 架无人机; T_{mbf}^i 为第 i 架无人机的平均故障间隔时间, h; A_{exp} 为无人机撞击地面造成损失的面积, m^2 ; ρ 为地面撞击处平均人口密度, 人/ m^2 ; P_{pen} 为假设地面撞击的地方存在防护措施与遮挡物,碎片穿过遮挡物的击穿概率;

P_{mit} 为减缓因子,通常 $P_{mit}=0$ 。原公式化简为

$$P_{elos}^i = \frac{1}{T_{mbf}^i} A_{exp} \rho P_{pen} \quad (19)$$

为了简化分析过程,上述模型基于完全确定的假设,不考虑参数变化与不确定性:1) 不考虑人口密度 ρ 的变化;2) 不考虑地上遮挡物的变化引起 P_{pen} 的变化。把 T_{mbf}^i 当作保证目标安全水平可控因素,要保证地面撞击 $P_{elos}^i = 10^{-7}$ 。

2.5 生存能力

无人机生存能力包括无人机的隐身性能等方面。

隐身性能可以简单地用无人机所被发现概率 P_{it} 来表示。则第 i 架无人机被发现概率为:

$$P_{it} = \begin{cases} 1 - \left[1 + (c_2 R_L^4 / \sigma)^{c_1} \right]^{-1} & (R_d \geq R_L) \\ 0 & (R_d \leq R_L) \end{cases} \quad (20)$$

其中: P_{it} 为被发现概率; R_L 为某一时刻无人机相对于雷达斜距; σ 为 RCS; c_1 、 c_2 为雷达参数。RCS 反映无人机目视特征与无人机的翼展、全长和对雷达的姿态相关。

2.6 应急能力

当编队中无人机出现严重故障或者被击落不能完成集结任务时,需要备用机起飞完成原先任务。这时,备用机的数量 N 可以反映编队的应急能力。

2.7 通信性能

数据传输的实时性是无人机的通信系统重要要求,通过分析数据链相关性能,可以设计出符合需求的无人机的数据链系统。在整个设计过程中,需要分析的指标主要为实时性和有效性指标。

2.7.1 实时性

传输速率是实时性的一个重要指标,机载设备的工作性能决定了其值的大小,以及数据链传输能力受指控系统的传输机制影响程度大小,反映了传输过程的通信能力强弱,当然它还与传播距离有关。它定义为一个比值计算关系,分子为接收到的数据总比特数,分母为接收所用时间,表达了在一定的范围里指控系统借助无线数据链所传输的数据量,第 i 架无人机的传输速率公式如下:

$$R_{IC} = L_{IRA} / T_{IRA} = L_{IRA} / (t_{IRN} - t_{IRI}); \quad (21)$$

$$R_C = \sum_{i=1}^n R_{IC} / n \quad (22)$$

式中： R_{iC} 为传输速率； L_{iRA} 为接收到的总比特数； t_{iRN} 为数据接收完成时间； t_{iR1} 为数据接收开始时间； R_C 为无人机编队的平均传输速率。在实际处理过程中，后两者的值由相关数据录取设备给出。求得 R_{iC} 值一般为均值，实际应用中数据传输量可能会有波动，应该重点关注瞬时最大值能达到多少。

传输延迟指发送端到接收端数据传输所花费的时间，也是笔者主要研究的对象。数据链是按包发送数据，第 i 架无人机的数据包的传输延迟时间计算公式为：

$$t_{id} = t_{ir} - t_{is}; \quad (23)$$

$$t_d = \frac{\sum_{i=1}^n t_{id}}{n}. \quad (24)$$

式中： t_{id} 为包的延迟时间； t_{ir} 为数据包接收时间； t_{is} 为数据包发送时间； t_d 为无人机编队整体延迟时间。同理， t_{ir} 和 t_{is} 的值由数据录取设备提供。

2.7.2 有效性

数据链的传输过程有效性体现在误码率、丢包率和吞吐量 3 个方面，其中丢包率的大小受误码率的影响；因此，误码率和吞吐量是衡量数据链有效性的基本指标。误码率一般定义为一个比例值，分子为在传输过程中数据传输的错误量，分母为数据总传输量。传统的信道进行传输误码率测试仅统计收到的数据中错误的比特数，即使用收到的数据和发送的数据对比，而没有考虑到未收到数据时的情况。无视缺失的信息对统计结果造成了缺陷，可能出现发送几百包数据而只收到几十包完整数据的情况，此刻误码率为零，但是丢失了很多数据信息，对于实际应用没有任何意义，不能反映数据链的准确有效性。从全面考虑数据链传输的有效性角度出发，给出传输误码率的定义：数据链传输数据的过程中接收的错误数据与丢失比特数之和，与发送总比特数之间的比值。则第 i 架无人机的误码率计算公式为：

$$P_{iE} = \frac{(L_{iSA} - L_{iRA}) + L_{iRE}}{L_{iSA}}; \quad (25)$$

$$P_E = \frac{\sum_{i=1}^n P_{iE}}{n}. \quad (26)$$

式中： P_{iE} 为传输的误码率； L_{iSA} 为发送的总比特数； L_{iRA} 为接收数据总比特数； L_{iRE} 为接收数据错误比特数； P_E 为无人机编队整体误码率。

除了误码率对数据链有效性的影响，丢包率则会对信息传输的完整性产生影响，接收到错误的指令后作出响应，造成的损失将难以预料。第 i 架无人机的丢包率的计算公式如下：

$$R_{iL} = (N_{iSA} - N_{iRA}) / N_{iSA} = 1 - N_{iRA} / N_{iSA}; \quad (27)$$

$$R_L = \sum_{i=1}^n R_{iL} / n. \quad (28)$$

式中： R_{iL} 为丢包率； N_{iSA} 为发送的数据总包数； N_{iRA} 为接收到的数据总包数； R_L 为无人机编队整体丢包率。

3 结束语

通过对无人机集结的性能指标进行测试，笔者给出了 7 个指标，可以对一次集结任务完成情况作出判断。可以预见：未来无人机将会以编队形式来执行任务，而集结任务的完成情况将对后续编队执行任务情况产生影响，掌握无人机集结完成情况将成为无人机编队执行任务前必须进行的基本工作。

参考文献：

- [1] 张庆杰. 基于一致性理论的多 UAV 分布式协同控制与状态估计方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [2] 王国强, 罗贺, 胡笑旋, 等. 无人机编队管理的研究综述[J]. 电光与控制, 2013(8): 52-57, 98.
- [3] 倪良巧, 王道波, 蒋婉玥. 时间协同多无人机编队航迹规划[J]. 机械与电子, 2016, 34(2): 9-13.
- [4] 符小卫, 高晓光, 崔洪杰. 多无人机集结问题分布式求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1791-1802.
- [5] 刘流, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 考虑速度约束的无人机 Dubins 路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 52-56, 60.
- [6] 李寿安, 张恒喜, 李曙林, 等. 飞机生存力评估与综合权衡方法研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 62-66.
- [7] 许云红, 周锐, 夏洁, 等. 无人机自动防撞冲突检测与优化控制方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(1): 1-6.
- [8] 张毅, 王和平, 党荣军. 高空长航时无人机系统的总体方案评价准则研究[J]. 计算机仿真, 2006(5): 32-34.
- [9] 张铭扬. 大延迟条件下无人机远程控制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.