

doi: 10.7690/bgzdh.2025.10.018

一种无人机集群编队策略及阻滞方法研究

刘伟¹, 刘景尚², 谭左红¹, 许刚¹

(1. 重庆航天机电设计院, 重庆 400039; 2. 空装成都局驻重庆地区军事代表室, 重庆 400039)

摘要: 针对来袭巡航弹、隐身飞行器、飞行器集群等不同类型目标, 开展无人机集群的编队策略、队形保持与重构、战场态势信息驱动等方法研究。通过模拟来袭目标, 设计试验场景, 对无人机集群编队的编队策略进行初步验证。结果表明: 针对不同来袭目标采用特定类型的防御阵型, 进而采用远距离、多层, 扩张、收敛, 前突、换防等拦截策略, 能对来袭目标进行有效阻滞, 可为防空系统建设提供借鉴。

关键词: 无人机; 集群编队; 阵型; 阻滞

中图分类号: TJ765.2; V279 **文献标志码:** A

Research on Formation Strategy and Blocking Method of a UAV Group

Liu Wei¹, Liu Jingshang², Tan Zuohong¹, Xu Gang¹

(1. Chongqing Aerospace Electromechanical Design Institute, Chongqing 400039, China

2. Chongqing Military Representative Office of Chengdu Bureau of Air Force Equipment, Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at different types of targets such as cruise missiles, stealth aircraft and aircraft cluster, the formation strategy, formation maintenance and reconfiguration, and battlefield situation information driving methods of UAV cluster are studied. By simulating the incoming target and designing the test scenario, the formation strategy of UAV cluster formation is preliminarily verified. The results show that the specific type of defense formation is used for different incoming targets, and then the interception strategies such as long distance, multi-layer, expansion, convergence, forward thrust and change of defense are used to block the incoming targets effectively, which can provide reference for the construction of air defense system.

Keywords: UAV; group formation; formation; blocking

0 引言

随着军事科学技术的不断发展, 隐身飞行器、巡航导弹及无人机集群等现代高科技战术武器开始被大规模运用于现代军事战场中。从俄乌战争可以看出: 俄乌双方的防空系统主要考虑的目标是针对冷战时期的低空突防的战术飞机、直升机, 其设计的防空系统密度、具体系统配置都是针对少数携带有大量防区内攻击武器的敌机, 但如果敌方使用大量的防区外打击武器, 或者面临大量的无人机威胁时就会出现不适应的困难局面, 进而让战场防空承受巨大压力。

我国全空域防空体系主要有远程防空导弹武器系统、中远程防空导弹武器系统、中近程防空导弹武器系统、近程防空导弹武器系统、末端防空导弹武器系统以及便携式防空导弹武器系统等。虽然近年来我国在防空系统建设方面取得了长足进步, 但上述防空武器系统造价高昂, 尚不完全支持军队提出的低成本、快速响应战场实时需要的大规模制造要求。

受益于电子探测系统、接口程序设计、适应性通信协议、自组网和自修复网络技术的发展, 多平台多传感器的无人机网络更促进了无人机集群作战的成熟。机载层次化网络支持多种多样的传感器数据类型, 可以快速形成敌对环境下的复杂战场态势图, 从而能够支持执行边境保护、持续侦察、桥梁和管线的监控等多种任务^[1-6]。

在无人机集群阻滞飞行目标方面, 国内外研究所涉甚少, 大多主要集中于小型无人机打击毁伤目标。为应对体系化、信息化、强对抗的未来战场环境, 笔者开展无人机集群的方法研究, 通过模拟目标, 设计场景, 布置特定类型的防御阵型, 采用远距离、多层、扩张、收敛、前突、换防等拦截策略, 实现了有效阻滞。

1 编队拦截策略研究

1.1 编队拦截策略

拦截策略是否发现目标分为 2 种情景。

1) 在没有目标或没有检测到目标的环境下, 无

收稿日期: 2024-10-07; 修回日期: 2024-11-11

第一作者: 刘伟(1993—), 男, 四川人, 硕士。

人机遵循集群行为的三原则模型——Biod 模型。具体表现为：无人机向邻居中心靠拢，尽量与邻居方向一致，尽量避免碰撞。但仅仅依靠三原则模型，可能会使无人机陷入局部最优；为此，将无人机分散为多个小群体，使每个个体向群体中心靠拢，并在 Biod 模型的基础上加入内聚性。

2) 在有目标或检测到目标的环境下，采取基于势点的协作拦截策略。具体表现为：无人机借助于雷达、卫星等多种探测设备获取来袭目标飞行状态，并飞行至来袭目标同一高度进行拦截，并在目标点前方建立拦截势点，每架无人机占据一个势点，然后收缩阵型，最终形成拦截，其拦截策略流程如图 1 所示。

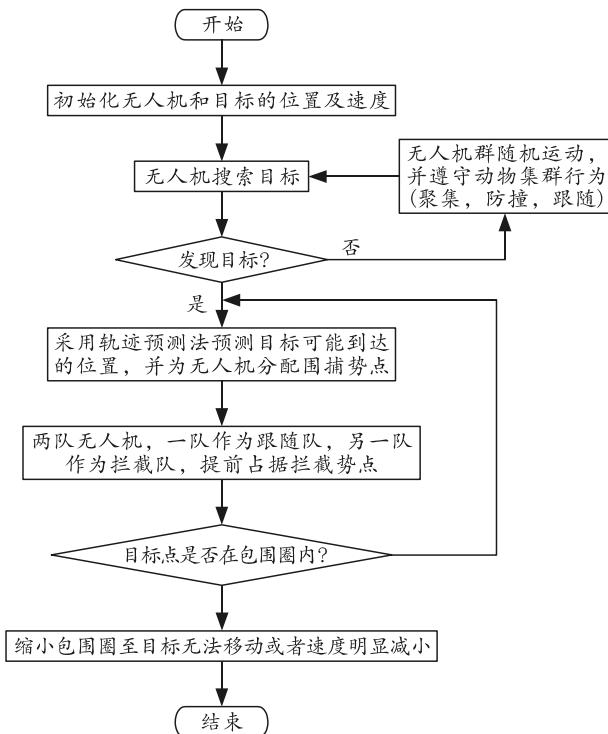


图 1 目标预测的拦截策略

1.2 基于势点的拦截算法

设无人机的架次为 N ，则在目标点前方建立的势点个数为 N ，为避免由于无人机速度 V_1 小于目标速度 V_2 导致的目标点反向逃脱，将 $N/2$ 作为拦截势点， $N/2$ 作为追踪势点，则拦截势点的坐标表示为：

$$x_i = x_e + R \times \sin(\omega + (i - 1) \times (2\pi/N));$$

$$y_i = y_e + R \times \sin(\omega + (i - 1) \times (2\pi/N)). \quad (1)$$

式中： (x_e, y_e) 为 t 时刻后预测的目标点坐标； $(x_i, y_i) \{i=N/2+1, N/2+2, \dots, N\}$ 为拦截势点坐标集合。

综合衡量收敛速度与精确度，笔者选用最小二乘法进行目标轨迹曲线的拟合，进而预测目标下一

刻的位置。采取每隔 t_1 时刻记录一次目标轨迹上的坐标， $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ 共记录形成 k 个相异的坐标点，每当产生新的坐标点 (x_{k+1}, y_{k+1}) ，则丢弃初始点坐标，进而实现目标轨迹曲线的动态预测。通过求取 m 次多项式 $p(x)(m < k)$ ，使 y_k 尽量等于 $p(x_k)$ ，设：

$$p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m (m < k). \quad (2)$$

通过求出系数 a_0, a_1, \dots, a_k ，由 a_0, a_1, \dots, a_k 来预测目标在未来时刻 t_n 的位置 $y_{k+n} = p(x_{k+n})$ 。 n 的取值过小则达不到预测效果，太大预测准确度不高，需通过经验来确定其大小。目标预测的拦截策略如图 2 所示。

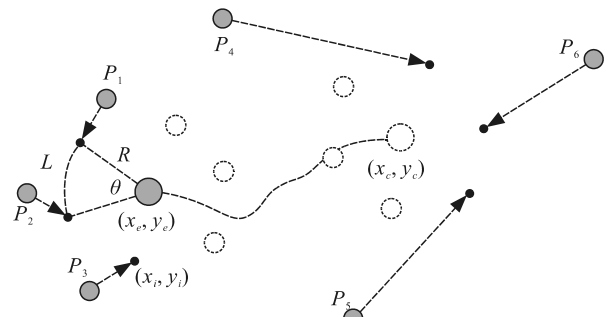


图 2 目标预测的拦截策略

2 阻滞方法研究

2.1 组阵策略

来袭目标种类多样，批次数量不定，飞行高度与飞行速度多变，拦截难度大。无人机集群编队据此采用远景、多层、扩张、收敛、前突、换防的布阵策略，并针对隐身飞行器^[7-8]、巡航弹^[9-10]、飞行器集群等不同来袭目标形成不同的防御阵型，进而达到精确阻滞的效果。

远景、多层拦截策略是指无人机集群由单元小阵型构成大范围远距离拦截面，多个拦截面空间错落布置，形成全方位、多层拦截阵型。

扩张、收敛拦截策略是无人机集群根据目标运动类型采取的拦截行为，以达成对敌对侦查设备进行干扰、迷惑，进一步提高拦截率的效果。当来袭目标种类特性模糊时，无人机集群外层可以进行扩张，扩大拦截范围。当来袭目标轨迹探测精确后，无人机集群拦截层可以进行针对性收敛，形成精确拦截面。

前突、换防拦截策略是对于携带子母战斗部、云爆战斗部的目标，无人机集群外层出动拦截无人机，可以根据来袭目标种类的轨迹进行前突主动控

截；与此同时，内层无人机根据前层无人机拦截情况进行补位、对阵型进行补充换防，尽量保证阵型完整性。

2.2 防御阵型

2.2.1 防御巡航导弹箭头拦截阵型

根据巡航导弹飞行特性和拦截要求，设计纵向 5 层箭头阵型为基础单元阵型，根据目标密度与防御圈大小由基础单元构成多层次立体全方位大集群对巡航导弹进行防御拦截。箭头阵型基础单元拦截阵型如图 3 所示。

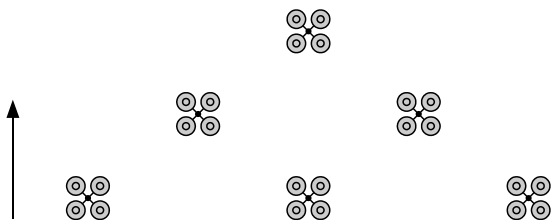


图 3 箭头基础单元拦截阵型

2.2.2 防御隐身飞机矩形拦截阵型

根据隐形飞机特点和拦截要求，设计矩形基础单元拦截阵型，根据目标密度与防御圈大小由基础单元构成多层次立体全方位大集群，针对隐形飞机高速、高隐身特性，矩形基础单元拦截阵型进行间距扩展收敛，多层拦截阵型间距同时进行大范围间距调整，扩张防御区域，提高拦截效果。

矩形基础单元拦截阵型由 6 架无人机 3×2 相同高度排布，无人机编队总宽度为 1~1 000 m，纵深为 1~50 m。矩形基础单元拦截阵型如图 4 所示。

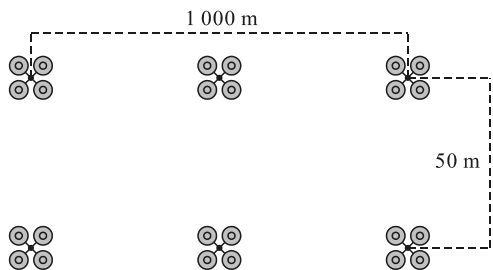


图 4 矩形基础单元拦截阵型

2.2.3 防御无人机集群密集拦截阵型

根据无人机集群特点设计 3 层品字密集拦截基础单元阵型，以 9 架无人机构成空间多层单元阵型，根据目标密度与防御圈大小由基础单元构成大集群进行密集防御。

3 层品字密集拦截基础单元阵型水平投影距离为 10 m，垂直投影距离为 10 m。品字基础单元拦截阵型如图 5 所示。

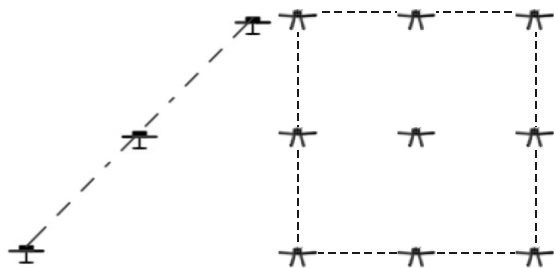
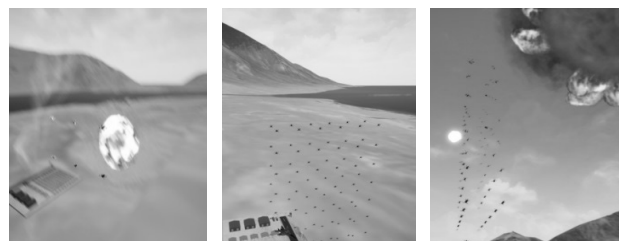


图 5 品字基础单元拦截阵型

3 阻滞效果仿真与评估

为验证适用于隐身飞行器的矩形基础单元拦截阵型、适用于巡航导弹的箭头拦截阵型以及适用于无人机集群的品字密集拦截基础单元阵型，运用 3 维建模与物理运动引擎进行了阻滞效果仿真，其仿真效果如图 6 所示。



(a) 巡航导弹 (b) 隐身飞机 (c) 飞行器集群

图 6 阻滞效果仿真

仿真分别模拟来袭巡航导弹、隐身飞机、飞行器集群进行突防，其相对飞行高度为 500 m，飞行速度为 150 m/s，来袭飞行器集群数量为 300 架次，从任意方向入侵，并假设我方雷达通过探测，将其位置信息传送到我方集群无人机控制系统，集群无人机主动拦截目标。

拦截设定我方无人机飞行速度 10 m/s，高度 500 m，间距 50 m。无人机携带预制破片近炸战斗部，杀伤半径 10 m。分别进行多层多单元拦截阵型对目标进行阻滞仿真。其仿真统计及结果分别如表 1—9 所示。

表 1 箭头拦截阵型对巡航导弹拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	5.56
2	1	12	72	6.25
3	1	48	288	8.33
4	2	12	72	5.56
5	2	24	144	7.14
6	2	96	576	12.50
7	3	18	108	6.25
8	3	36	216	8.33
9	3	144	864	15.50
10	4	144	864	14.33
11	4	288	1 728	42.50
12	4	1 152	6 912	86.67
13	5	180	1 080	35.05
14	5	360	2 160	60.32
15	5	1 440	8 640	100.00

表 2 矩形拦截阵型对巡航导弹拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	4.76
2	1	12	72	5.05
3	1	48	288	7.29
4	2	12	72	5.05
5	2	24	144	6.27
6	2	96	576	12.50
7	3	18	108	6.25
8	3	36	216	7.63
9	3	144	864	10.21
10	4	144	864	8.33
11	4	288	1 728	32.50
12	4	1 152	6 912	69.67
13	5	180	1 080	23.56
14	5	360	2 160	48.50
15	5	1 440	8 640	100.00

表 3 品字拦截阵型对巡航导弹拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	5.00
2	1	12	72	5.35
3	1	48	288	7.28
4	2	12	72	5.35
5	2	24	144	6.67
6	2	96	576	10.20
7	3	18	108	6.67
8	3	36	216	7.69
9	3	144	864	12.50
10	4	144	864	9.69
11	4	288	1 728	35.60
12	4	1 152	6 912	70.30
13	5	180	1 080	30.78
14	5	360	2 160	51.36
15	5	1 440	8 640	100.00

表 4 箭头拦截阵型对隐身飞行器拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	2.50
2	1	12	72	3.05
3	1	48	288	5.67
4	2	12	72	2.86
5	2	24	144	3.87
6	2	96	576	5.63
7	3	18	108	3.13
8	3	36	216	4.26
9	3	144	864	7.59
10	4	144	864	6.35
11	4	288	1 728	9.75
12	4	1 152	6 912	16.11
13	5	180	1 080	8.88
14	5	360	2 160	12.69
15	5	1 440	8 640	25.05

表 5 矩形拦截阵型对隐身飞行器拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	2.86
2	1	12	72	4.35
3	1	48	288	6.09
4	2	12	72	3.23
5	2	24	144	5.00
6	2	96	576	8.35
7	3	18	108	3.57
8	3	36	216	5.88
9	3	144	864	12.50
10	4	144	864	9.76
11	4	288	1 728	7.69
12	4	1 152	6 912	19.67
13	5	180	1 080	11.67
14	5	360	2 160	14.50
15	5	1 440	8 640	33.33

表 6 品字拦截阵型对隐身飞行器拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	2.78
2	1	12	72	3.85
3	1	48	288	6.67
4	2	12	72	3.13
5	2	24	144	4.35
6	2	96	576	9.09
7	3	18	108	3.88
8	3	36	216	5.56
9	3	144	864	9.02
10	4	144	864	9.35
11	4	288	1 728	12.29
12	4	1 152	6 912	17.30
13	5	180	1 080	10.36
14	5	360	2 160	13.85
15	5	1 440	8 640	24.80

表 7 箭头拦截阵型对无人机集群拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	6.32
2	1	12	72	8.95
3	1	48	288	22.32
4	2	12	72	13.45
5	2	24	144	21.42
6	2	96	576	43.55
7	3	18	108	16.65
8	3	36	216	23.03
9	3	144	864	75.36
10	4	144	864	72.32
11	4	288	1 728	100.00
12	4	1 152	6 912	100.00
13	5	180	1 080	100.00
14	5	360	2 160	100.00
15	5	1 440	8 640	100.00

表 8 矩形拦截阵型对无人机集群拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	5.32
2	1	12	72	8.85
3	1	48	288	25.32
4	2	12	72	14.23
5	2	24	144	20.06
6	2	96	576	47.56
7	3	18	108	17.35
8	3	36	216	24.03
9	3	144	864	75.14
10	4	144	864	16.85
11	4	288	1 728	100.00
12	4	1 152	6 912	100.00
13	5	180	1 080	100.00
14	5	360	2 160	100.00
15	5	1 440	8 640	100.00

表 9 品字拦截阵型对无人机集群拦截概率统计

仿真次数	层数	单元数	无人机总数	拦截概率/%
1	1	6	36	7.69
2	1	12	72	10.00
3	1	48	288	28.29
4	2	12	72	16.67
5	2	24	144	25.00
6	2	96	576	50.60
7	3	18	108	19.85
8	3	36	216	26.60
9	3	144	864	80.20
10	4	144	864	82.50
11	4	288	1 728	100.00
12	4	1 152	6 912	100.00
13	5	180	1 080	100.00
14	5	360	2 160	100.00
15	5	1 440	8 640	100.00

仿真结果表明：矩形拦截阵型、箭头拦截阵型

和品字拦截阵型按照相同层数、相同间隔以及相同无人机总数分别对来袭目标进行拦截，具有如下特点：

1) 采用 5 层矩形拦截阵型，总数 8 640 架无人机时，对隐身飞机有效拦截概率达到了 33.33%，已经超过了一般地空导弹的拦截概率。而拦截集群只损失少量无人机，对拦截阵型的完整性影响不大，进而采用矩形拦截阵型对隐身飞机能够持续高效拦截阻滞。

2) 3 种拦截阵型在达到 2 000 架集群规模以上对巡航导弹有良好的拦截效果，其中箭头拦截阵型在数量一致的情况下，拦截概率优于其他 2 种阵型。

3) 3 种拦截阵型在达到入侵目标无人机集群规模 3~4 倍的情况下，对目标集群无人机有绝对的拦截效果，而在集群规模不完全占优的情况下，品字拦截阵型在对等条件拦截概率具有一定的突出优势。

4 结论

笔者通过无人机集群是否发现目标分为 2 种情景拦截策略，制定基于势点的拦截算法研究，依据组网编队和模拟攻防飞行试验仿真，验证了无人机基础单元对模拟目标拦截的可行性，得出了可靠结论：当采用一定的基础单元阵型构建一定规模复合的无人机，通过调整微观基础单元阵型间距和扩张

和收敛宏观防御阵型，能够对多种低空飞行的目标单体和集群进行有效阻滞和拦截。该方法可为防控系统建设提供一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 梁晓龙, 张佳强, 吕娜. 无人机集群[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2018: 10-25.
- [2] 邢冬静. 无人机集群作战自主任务规划方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [3] 李鹏举, 毛鹏军, 耿乾, 等. 无人机集群技术研究现状与趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 25-32.
- [4] 杨庆, 段海滨. 仿鸿雁编队的无人机集群飞行验证[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1599-1608.
- [5] 周宇亮. 无人机集群编队控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [6] 冉惟之. 基于群体智能的无人机集群协同对抗系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] 王春阳, 刘明杰, 曾会勇, 等. 双隐身飞机相干干扰对单脉冲雷达影响及影响有效性研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(7): 755-762.
- [8] 刘占强, 梁路江, 王春阳. 隐身飞机自卫干扰对雷达探测性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2520-2529.
- [9] 丁启伟, 赵晶, 王燊燊, 等. 利用巡航导弹进行饱和攻击研究[J]. 战术导弹技术, 2015(3): 30-45.
- [10] 杨磊, 宋怡然. 巡飞弹: 徘徊在战场上空的幽灵[J]. 中国航天报, 2012(3): 1-2.
- [6] 孟轲. 基于粒计算的攻防体系贡献度方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [7] MOLODTSOV D. Soft set theory-first results[J]. Computers & Mathematics with Applications: An International Journal, 1999, 37(4/5): 19-31.
- [8] 孙智勇, 刘星. 模糊软集合理论在税收组合预测中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(5): 936-943.
- [9] KONG Z, GAO L Q, WANG L F, et al. The normal parameter reduction of soft sets and its algorithm[J]. Computers & Mathematics with Applications: An International Journal, 2008, 56(12): 3029-3037.
- [10] MAJI P K, BISWAS R, ROY A R. Soft set theory[J]. Computers & Mathematics with Applications: An International Journal, 2003, 45(4/5): 555-562.
- [11] 李璟. 战斗力解析[M]. 2 版. 北京: 国防大学出版社, 2013: 225-242.

(上接第 64 页)

参考文献：

- [1] 王飞, 司光亚. 武器装备体系能力贡献度的解析与度量方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(3): 10-15.
- [2] 张庆军, 张明智, 吴曦. 空间作战体系建模和体系贡献度评估研究综述[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 8-12, 17.
- [3] 黄东京, 梁新. 基于非线性 SEM-改进 GRA 的装备体系贡献率研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(7): 173-178.
- [4] 安庆杰, 张伟, 张义, 等. 基于任务边界的武器装备体系贡献率评估方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2023, 14(2): 17-22, 75.
- [5] 管东林, 吴鑫辉, 常歌. 基于模糊层次分析的舰艇编队信息系统体系贡献率评估[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(3): 122-127.