

算法测试报告

一、项目背景

在现代战争中，无人机（UAV）的应用愈加广泛，其自主化和智能化的空中博弈决策成为任务执行的关键因素。空中博弈的复杂性主要体现在不确定性、信息不完备性以及动态性等多个方面，这使得多无人机协同作战成为一个极具挑战性的课题。无人机在复杂对抗环境中的机动决策能力，直接影响其作战效能和任务完成度。

空中博弈中，无人机需要面对多个挑战，包括规避区、其他无人机以及目标飞行器的存在。在这种复杂的环境下，无人机必须具备高度的自主决策能力。

首先，无人机需要能够在规避区中规避障碍物，确保飞行安全。其次，无人机需要与其他无人机协同飞行，避免相互碰撞，并能够通过数据链共享探测信息，形成协同作战的能力。最后，无人机需要对目标飞行器进行探测和攻击，具备在复杂动态环境中进行精准打击的能力。此外，无人机的性能限制，如机动能力、载弹能力、最大飞行时间等，也对决策过程提出了更高的要求。无人机在执行任务时，需要在有限的机动能力下做出快速反应，最大限度地发挥载弹能力，合理利用飞行时间，实现任务目标。目标飞行器的机动能力和规避策略，进一步增加了作战环境的复杂性。

本项目提出的研究课题，旨在解决智能空中博弈中的无人机协同决策问题。需要在指定的无人机性能、空域和目标飞行器集群条件下，

设计合理的策略和算法，以实现对目标飞行器的协同探测和攻击，从而达到最优的作战效能。参赛者需要综合考虑无人机的各项性能指标，通过先进的算法和策略，实现无人机之间的高效协同，确保在规避区、其他无人机和目标飞行器的多重约束下，完成任务目标。

二、战法描述

（一）初始配置

开局时确定一架僚机和三架主机的初始高度、方向和速度。僚机负责引诱敌方导弹，其高度设置在中间位置（8 公里），速度为 0.9。主机分别设置在前排和后排，拉升至 12 公里以留出机动空间。

（二）探测敌方

使用传感器探测敌方无人机和导弹，根据探测信息进行战术调整。

（三）规避导弹

当探测到敌方导弹时，快速进行机动动作以躲避。例如，S 型机动

（四）开火策略

根据测试项目中不同高度导弹命中率，确定最佳的开火距离和时机。

（五）动态调整

在战斗过程中，根据敌我双方的位置和态势，动态调整无人机的高度、速度和方向，避免被敌方锁定，同时保持对敌方的持续照射。

三、测试环境

（一）软硬件环境

硬件：模拟无人机控制系统。

软件：Python 编程语言，仿真平台。

（二）数据集和场景

测试场景包括多种高度、方向和速度的敌我双方无人机，具体测试案例涵盖：

（1）相同高度和不同高度差有效探测距离：了解相同高度和不同高度下的有效探测距离可以帮助优化无人机的战术部署。在战斗中，合理配置无人机的高度和相对位置，能够有效提升探测能力和战斗效能。例如，高空无人机可以提供更广阔的视野和更远的探测距离，而低空无人机则可以在较低高度隐蔽接近敌方。

（2）导弹命中情况：测试相同高度和不同高度下导弹的命中情况。导弹命中率直接影响作战效能。通过测试可以识别出在不同战术条件下的最佳作战方式，从而提升无人机的整体作战效能。高命中率意味着更少的导弹浪费和更高的打击成功率。了解敌方导弹在不同条件下的命中率，有助于制定有效的规避和防御策略。通过模拟和测试，可以找出最有效的规避动作和最佳防御措施，从而提高无人机的生存能力。在无人机协同决策技术中，多架无人机需要协同作战。通过测试导弹命中率，可以优化多架无人机之间的协调和配合。例如，一架无人机可以吸引敌方火力，另一架则利用高命中率的机会进行攻击，从而提高整体作战效能。

（3）有效开火距离：根据探测距离和导弹射程确定开火距离。决

策算法基于探测距离和导弹射程，可以更加准确地评估何时何地发起攻击。通过这些数据，算法可以进行实时调整，提高决策的准确性和有效性，确保无人机在最佳时机发起攻击。通过探测距离和导弹射程的确定，可以协调各无人机的攻击时机和位置，避免重复攻击或攻击空白区，从而提升整体作战效能和协同作战能力。

(4) 机动动作与探测关系：不同机动动作对探测和被探测的影响。了解不同机动动作对探测和被探测的影响，能够帮助无人机在面对敌方攻击时选择最佳的规避动作，从而提高生存能力。在协同作战中，多架无人机需要配合进行复杂的机动动作。通过测试机动动作与探测关系，可以协调无人机的动作，使其在规避和探测方面相互配合，避免互相干扰，提升整体作战效能。

(5) 边界条件：红方最左边飞机距离左边界 51.9 公里时探测范围与左边界相切。

(6) 被动探测：被动探测告警信息和距离，确定是否静默或开启雷达。测试被动探测告警信息和距离的数据可以为无人机的决策算法提供重要的参考信息。无人机可以根据探测到的信号强度和来源，判断敌方的位置和意图，从而制定更精确的作战计划和规避策略。在协同作战中，多架无人机需要共享探测信息以进行协调行动。无人机在不同被探测到次数和被多少架敌机探测到的情况下应采取不同的策略。通过科学合理地选择静默或开启雷达状态，红方无人机可以在复杂的战场环境中提高隐蔽性和生存能力，增强整体作战效能。

(三) 评价指标

- (1) 探测距离：不同高度差下的有效探测距离。
- (2) 命中情况：不同高度和相同高度下导弹的命中情况。
- (3) 规避成功率：探测到导弹后规避成功的次数。
- (4) 有效开火距离：基于探测结果的有效开火距离。

四、实验结果

(一) 单元性能测试结果

- (1) 探测距离：在相同高度和不同高度差情况下的有效探测距离

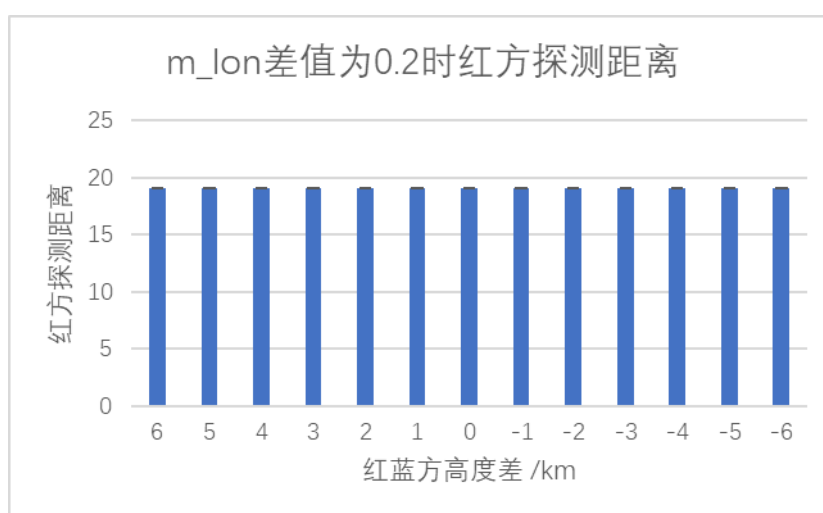


图 1 m_lon 差值为 0.2 时红方探测距离

如图 1 所示，当红蓝飞机之间 m_lon 差值为 0.2 时，对所有高度差的有效探测距离为 19.0，如上表所示。

经测试，飞机有效探测距离与高度无关，但与飞机之间的相对角度有关，在测试用例中，红方飞机 plane.m_lat 一律为 43.6，蓝方的 plane.m_lat 一律为 44。

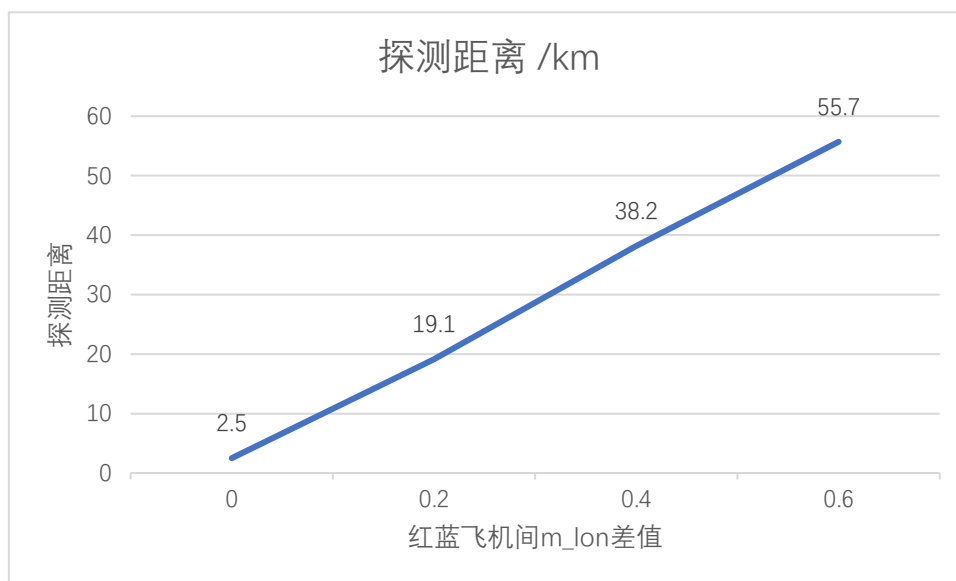


图 2 探测距离随 m_lon 差值变化情况

如图 2 所示，随着红蓝双方飞机间的经度差增加，红方探测距离显著增加。这一趋势可能是由于飞机在不同经度位置上，视野和信号覆盖范围的变化所致。

在实际操作中，增加经度差可以有效提升探测距离，从而实现长距离侦察和监视。红方飞机可以通过调整自身位置，增大与蓝方飞机的经度差，达到更远距离探测敌方的目的。理解这一关系也有助于制定更有效的规避策略。当红方想要避免被探测到，可以通过减少与蓝方的经度差来缩短探测距离，从而增加隐蔽性。

根据经度差对探测距离的影响，优化无人机的飞行路线和位置选择，提升探测效率和准确性。

(2) 导弹命中情况：

红蓝方战机距离分布：

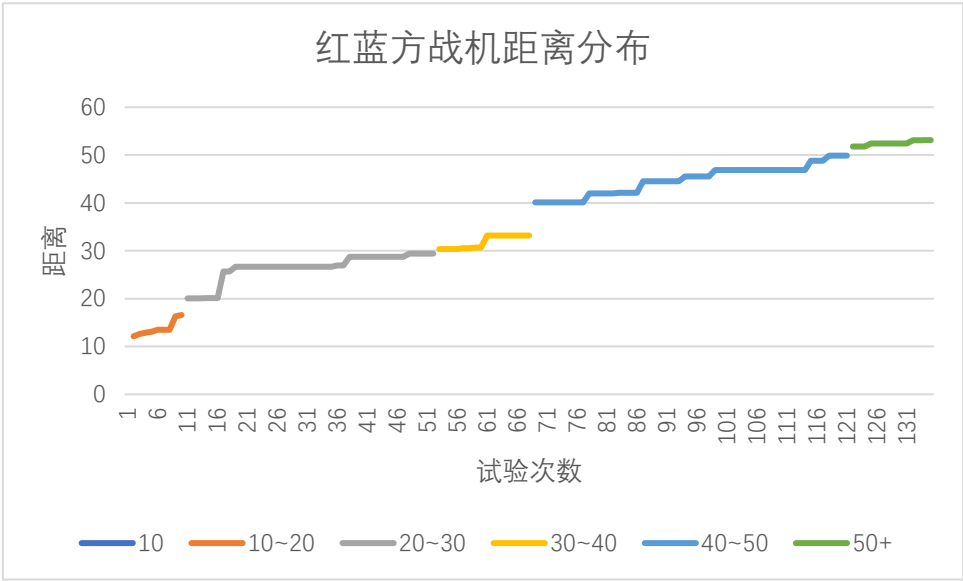


图 3 导弹命中情况下红蓝方战机距离分布

图 3 中，线越水平代表导弹命中时红蓝方战机距离数据越集中在这一区间。

如图 3 所示，在 130 余次的导弹命中试验中，红蓝方距离分布总体比较平均，相对较为集中在上图中 20-30km（灰色区间）和 40-50km（蓝色区间）。

测试结果表明，当红蓝方战机之间的距离在 20-30 公里和 40-50 公里时，导弹的命中率最高。这可能是因为在这类距离范围内，导弹的飞行时间和飞行轨迹处于最优状态，能够更精确地追踪并命中目标。特别是在 20-30 公里范围内，导弹可以在较短时间内接近目标，减少被目标规避的可能性。而在 40-50 公里范围内，导弹的飞行轨迹相对稳定，能保持较高的命中精度。

在实际作战中，可以利用这一发现优化无人机的攻击策略。无人机应尽量保持与敌方目标在上述距离范围内，并在此距离内发射导弹，以最大化命中率。这种策略不仅可以提高打击成功率，还能有效减少导弹的浪费，提升整体作战效能。

红蓝方战机 CmdHeadingDeg 差值：

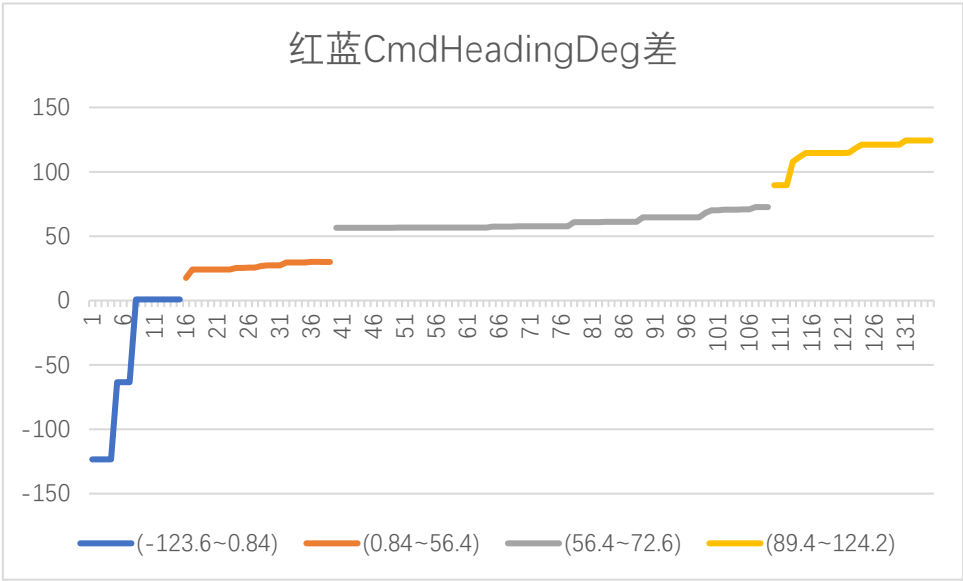


图 4 导弹命中情况下红蓝方 CmdHeadingDeg 差值分布

图 4 中，线越水平代表导弹命中时红蓝方战机 CmdHeadingDeg 差值数据越集中在这一区间。

由图 4 可知，在 130 余次的导弹命中试验中，红蓝方战机 CmdHeadingDeg 差值在 56.4-72.6（灰色区间）中出现的最多最集中。

测试结果显示，导弹在 CmdHeadingDeg 差值为 56.4-72.6 度的范围内，命中率显著提高。这可能是因为这一角度差范围相对较大，探测系统能够更有效地锁定并追踪目标，而目标的规避动作相对较难摆脱导弹的追击。适当大小的角度差有助于红方飞机探测，增加导弹命中率。

红蓝方战机高度差：

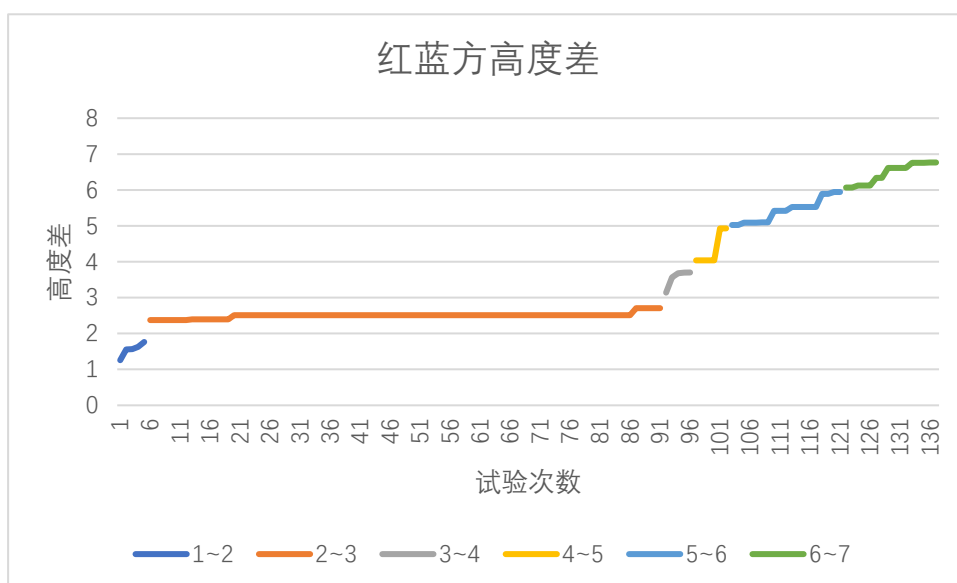


图 5 导弹命中情况下红蓝方高度差分布

图 5 中线越水平代表导弹命中时红蓝方战机高度差值数据越集中在这一区间。

如图 5 所示，在 130 余次的导弹命中试验中，当红蓝方战机高度差值在 2-3km（橙色区间）中出现的最多最集中。

测试结果表明，红蓝方战机的高度差在 2-3 公里范围内时，导弹的命中率最高。这可能是因为在这一高度差范围内，导弹的攻击角度和飞行轨迹最为理想，能够更容易地接近并命中目标。较大的高度差使得导弹能够从上方或下方接近目标，减少目标的水平规避空间，提高命中率。

在作战中，无人机应尽量利用高度差进行攻击。当敌方无人机处于较低高度时，红方无人机可以从较高高度发起攻击，反之亦然。这种策略不仅能增加导弹的命中概率，还能使无人机在不同高度层次上形成交叉火力网，增强打击效果。同时，无人机在规避敌方导弹时，也应注意避免进入这一高度差范围，从而减少被敌方导弹命中的风险。

（3）有效开火距离：

根据探测距离和导弹命中情况的分析，可以确定以下几个步骤来计算适当的有效开火距离：

最优探测距离：根据 m_{lon} 差值与探测距离的关系，无人机应尽量保持在适当的经度差范围内，以确保最佳探测效果。在实际操作中，可以选择 m_{lon} 差值为 $0.4-0.6^{\circ}$ ，对应的探测距离为 38.2-55.7 公里。

最优开火距离：在确定探测距离后，可以进一步确定有效开火距离。根据导弹命中率的数据分析，导弹在 20-30 公里和 40-50 公里的距离范围内命中率较高。因此，有效开火距离可以选择在这两个范围内。

基于上述分析，在具体作战时，红方无人机应尽量保持与敌方目标在 20-30 公里或 40-50 公里的距离范围内，以最大化导弹的命中率。可以通过调整飞行路径和速度，实现这一目标。在进入上述有效开火距离区间后，无人机应迅速锁定目标并发射导弹，以确保在最佳距离内进行攻击。特别是在 20-30 公里的范围内，导弹的命中率最高，应优先选择在这一距离内开火。在作战过程中，无人机应根据实时探测信息和敌方位置，动态调整自身的飞行路径和高度，以保持在有效开火距离内。同时，要避免进入敌方导弹的最佳打击范围，保持灵活的机动性，以使得无人机能够更好地控制战场局势，选择更有利的攻击位置和时机，从而提高作战效果。

(4) 被动探测告警信息、被动探测距离：

表 1 所测相关数据集

被探测到次数	敌方距离	静默时告警次数	开启雷达状态下告警次数	CmdHeadingDeg差值
2	10.4	1	3	30
4	19.4	2	4	45
5	28.6	2	4	60
6	38.2	4	9	70
3	49.6	4	7	85
3	58.2	3	6	100

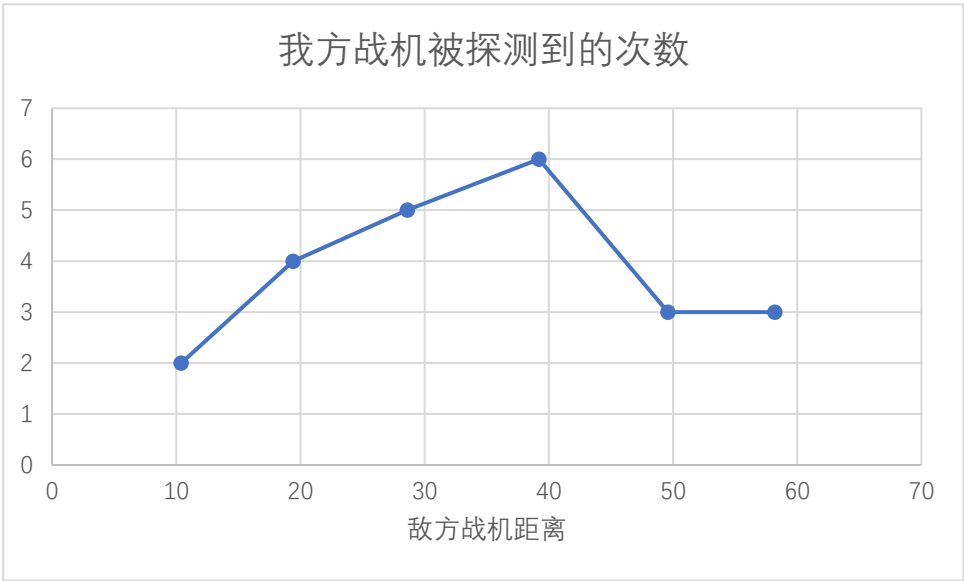


图 6 我方战机被探测到次数随距离的变化情况

基于表 1 分析，随着敌方距离的增大，被探测到的次数和告警次数都是呈现一个先增大后减小的趋势，在敌方距离为 38.2km 时，被探测到次数和告警次数都呈最大值，与此值偏离的越大，被探测到的可能性就逐渐减小。

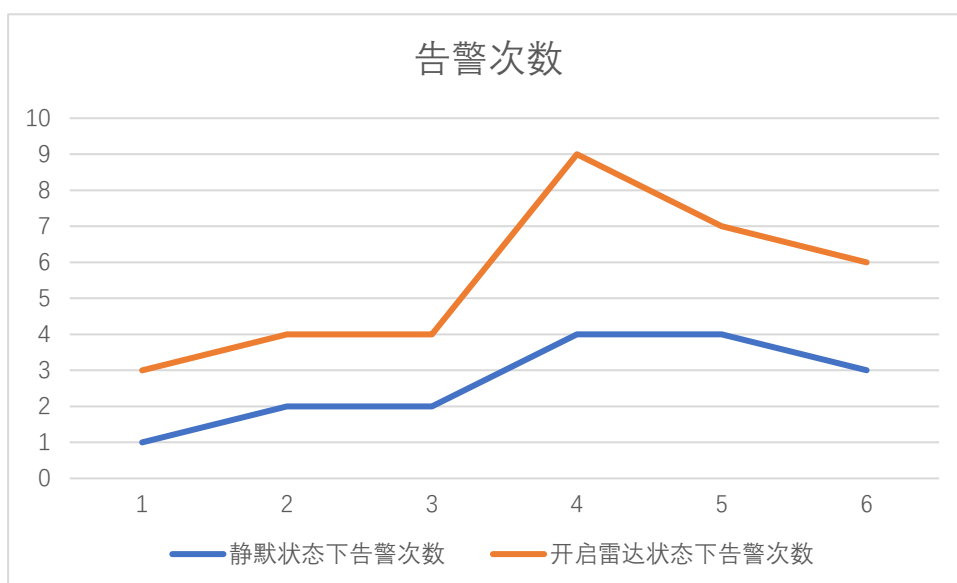


图 7 不同情况下告警次数分布

图 7 显示，在不同敌方距离下，静默状态和开启雷达状态下的告警次数也存在明显差异。例如，在敌方距离为 28.6 公里时，静默状态下红方无人机发出的告警次数为 2 次，而开启雷达状态下发出的告警次数为 4 次。这表明开启雷达能够显著提高告警次数，但同时也可能暴露自身位置。

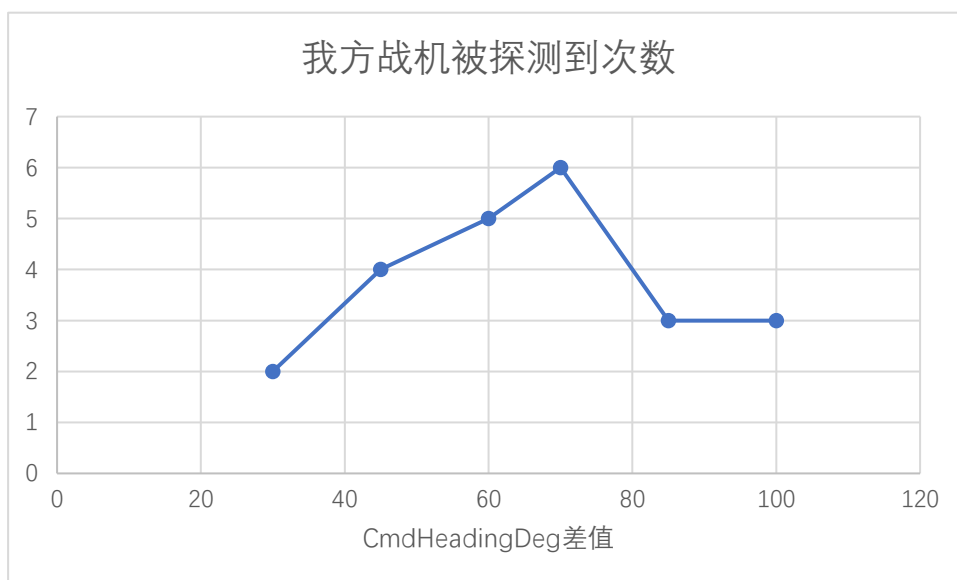


图 8 不同 CmdHeadingDeg 差值下我方战机被探测到次数的分布

图 8 显示，当 CmdHeadingDeg 差值接近 70 度时，红方无人机最容易被探测到，例如在距离 38.2 公里，CmdHeadingDeg 差值为

70 度时，被探测到的次数最多。随着 CmdHeadingDeg 差值远离 70 度，被探测到的概率逐渐降低。例如，在 CmdHeadingDeg 差值为 30 度和 100 度时，被探测到的次数相对较少。

在此分析的基础上，也可总结得出在被探测到次数较低（2-3 次）时，红方无人机应尽量保持静默，以减少自身被探测的风险。在被探测到次数较高（4-6 次）时，红方无人机可以选择开启雷达，以提高发现敌方的概率，从而在更远距离上进行规避和攻击。

分析总结得出的战术建议如下：

1) 被探测到次数小于 3 次时保持静默：在被探测到次数较低的情况下，红方无人机应尽量保持静默，避免暴露自身位置。在这种情况下，可以通过被动探测获取敌方大致位置，然后进行规避或等待更佳时机。

2) 被探测到次数大于等于 3 次时开启雷达：当被探测到次数较高时，红方无人机可以选择开启雷达，以提高发现敌方的概率。在这种情况下，红方无人机可以更早发现敌方并采取相应的战术动作。

3) 动态调整策略：根据实时被探测到的次数和敌方位置，动态调整静默和开启雷达的策略。例如，在探测到敌方次数逐渐增加时，可以逐渐从静默状态过渡到开启雷达状态，以确保在最佳时机进行攻击。

4) 飞机路线优化：尽量避免在 cmdHeadingDeg 差值为 70 度左右或是敌我距离 40km 左右的情况下飞行，因为在这个角度和距离

下红方无人机最容易被探测到。应通过调整飞行路线和方向，使得相关数值远离最容易被攻击的区间，以降低被探测的概率。若是在我们所提出的战法中作为诱饵的飞机，也可主动趋近这个区间，并在进入该区间之后采取适当的机动（如 S 型机动等）进行对即将到来的敌方导弹的躲避动作。

（二）比赛指标测试结果

（1）指标具体数值

根据比赛测试指标文件中的定义，以下是使用本战法时的比赛测试指标数据

表 2 所测比赛指标及其具体数值

指标	值
红方无人机初始数量	4
蓝方无人机初始数量	4
击落蓝方无人机数量	4
红方无人机损失数量	2
红方无人机攻击次数	12
红方无人机有效攻击次数	4
作战时间	8min

交换比 x_1 =(击落蓝方无人机数量+1)/(红方无人机损失数量+1) = (4+1)/(2+1)=1.6667

有效攻击比率 x_2 =红方无人机全部有效攻击次数/红方无人机初始数量=4/4=1

有效攻击效率 x_3 =红方无人机全部有效攻击次数/(红方无人机初始数量*作战时间)=4/(4*8)=0.125

攻击成功率 x_4 =击落蓝方无人机数量/红方无人机攻击次数=4/12=0.3333

$$\text{总分} = A * \frac{x_1 * 100}{\text{蓝方初始无人机数量} + 1} + B * \frac{x_2 * 100}{\text{红方单无人机最大载弹量}} + C * \text{Sigmoid}(x_3) * 100 + D * x_4 * 100$$

其中 A:B:C:D = 5:1:1:3

总分≈269.79

(2) 指标分析

1) 交换比：交换比是指红方无人机每损失一架能够击落的蓝方无人机的数量。高交换比表明红方无人机在战斗中更加有效，能够在损失较少的情况下给敌方造成更多的损失。交换比可以帮助制定更有效的战术策略，确保无人机能够在作战中保持较高的战斗效能。本战法的交换比为 2 意味着每损失 1 架红方无人机，能够击落约 2 架蓝方无人机，表明红方无人机在战斗中具有较高的交换效率。

2) 有效攻击比率：有效攻击比率是指红方无人机平均每架进行的有效攻击次数。该指标反映了无人机在战斗中的攻击活跃度和参与度。高有效攻击比率表明无人机在战斗中积极参与攻击，并且能够有效命中目标。有助于评估无人机在战斗中的表现和执行任务的能力。高有效攻击比率意味着无人机能够在战斗中保持高效的攻击节奏。该指标可以帮助规划无人机的攻击任务和分配资源，确保无人机能够在战斗中发挥最大效能。每架红方无人机平均进行了 1 次有效攻击，显示了

较高的攻击活跃度和战斗参与度。

3) 有效攻击效率：有效攻击效率是指红方无人机平均每分钟进行的有效攻击次数。该指标反映了无人机在战斗中利用时间进行有效攻击的能力。高有效攻击效率意味着无人机能够在有限的时间内进行更多的有效攻击。有助于评估无人机在长时间作战中的持续攻击能力。高有效攻击效率表明无人机能够在整个作战过程中保持高效攻击。该指标可以帮助制定战斗节奏和时间管理策略，确保无人机能够在适当的时机进行高效攻击。

4) 攻击成功率：攻击成功率是指红方无人机攻击次数中成功击落敌方无人机的比例。该指标反映了无人机攻击的精确度和打击效果。高攻击成功率表明无人机能够更准确地击中目标，提高攻击的有效性。有助于评估无人机的战斗效能和打击能力。高攻击成功率意味着无人机能够在较少的攻击次数内实现更多的战果。该指标可以帮助优化无人机的攻击策略和技术，确保每次攻击能够取得最大的效果。攻击成功率为 0.3333，即每 1 次攻击中有 1 次能够击落敌方无人机，这一成功率显示了攻击精确度较高，但仍有提升空间。

(3) 综合评估与改进建议

1) 交换比：可以优化无人机在告警时的机动动作以提升红方无人机的规避能力，减少损失数量，从而进一步提高交换比。

2) 攻击成功率：攻击成功率为 0.3333，表明在每次攻击中有一定的失误率。需要进一步优化无人机的攻击策略，提升每次攻击的成功概率。

3) **有效攻击效率**：虽然红方无人机的有效攻击次数较为良好，但在作战中的有效攻击效率较低。未来需要优化作战算法，提高无人机的持续攻击能力，确保在整个作战过程中保持高效攻击。

五、总结与展望

无人机在现代战争中的应用越来越广泛，其自主化和智能化的决策能力成为任务执行的关键。无人机需要在面对多个挑战时展现出高度的自主决策能力，包括规避障碍物、与其他无人机协同作战，以及对目标飞行器进行探测和攻击。测试项目旨在解决智能空中博弈中的无人机协同决策问题，通过设计合理的策略和算法，实现对目标飞行器的协同探测和攻击，以达到最优的作战效能。

（一）本次测试主要结果

（1）**探测距离**：测试数据表明，无人机的探测距离与其相对经度差有关，随着经度差的增加，探测距离显著增加。这一发现可以用于优化无人机的飞行路径和位置选择，提升探测效率和准确性。

（2）**导弹命中情况**：在 20-30 公里和 40-50 公里的距离范围内，导弹的命中率最高。优化无人机的攻击策略，应尽量在这些距离范围内发射导弹，以最大化命中率。在 56.4-72.6 度的角度差范围内，导弹命中率显著提高。这一发现可以用于调整无人机的飞行方向，使其保持在这一角度差范围内，提高攻击的有效性。在 2-3 公里的高度差范围内，导弹的命中率最高。无人机应利用这一高度差进行攻击，同时规避敌方导弹时应避免进入这一高度差范围。

(3) 有效开火距离：通过分析探测距离和导弹命中情况，确定了有效开火距离为 20-30 公里和 40-50 公里。无人机应根据实时探测信息，动态调整自身的飞行路径和高度，确保在最佳距离内进行攻击。

(4) 被动探测告警信息和被动探测距离：被探测到次数与敌方距离和 CmdHeadingDeg 差值相关，在距离约为 40 公里、CmdHeadingDeg 差值约为 70 度时最容易被探测到。在被探测到次数较低（2-3 次）时，红方无人机应保持静默；在被探测到次数较高（4-6 次）时，可以开启雷达以提高发现敌方的概率。

(二) 比赛指标数据

根据测试数据和比赛指标公式计算，总分为 269.79。这一分数反映了无人机在比赛中的综合表现，包括交换比、有效攻击比率、有效攻击效率和攻击成功率。

(三) 未来可执行的进一步优化

(1) 提升攻击成功率：优化导弹打击精度和无人机的攻击策略，提升每次攻击的成功概率。

(2) 优化协同作战能力：增强无人机之间的协同作战能力，通过共享探测信息和协同攻击，提升整体作战效能。

(3) 改进规避策略：改进无人机的机动动作（如 S 型机动）以提升红方无人机的规避能力，减少损失数量，从而进一步提高交换比。

通过上述改进措施，可以有效提升红方无人机在比赛中的综合表现，实现更高的作战效能和最终得分。本次测试提供了详实的数据和分析，为无人机的智能化和自主化作战提供了宝贵的参考。未来将继续

续优化算法和策略，提升无人机在复杂战场环境中的综合作战能力。