

智能体设计报告

目录

1. 总体设计	4
1.1 博弈论视角下的想定分析	4
1.2 人机协同必要性	6
1.3 人机协同总体方案设计	7
2. 智能体算法实现	9
2.1 总体概述	9
2.2 基础智能体	9
2.2.1 任务部署智能体（Add Mission）	9
2.2.2 条令设置智能体（Doctrine Set）	19
2.2.3 武器挂载智能体（Loadout Set）	20
2.3 核心智能体	21
2.3.1 加油规划智能体（Fuel Assign）	21
2.3.2 战斗机智能体（Fighter）	22
2.3.3 预警机智能体（Warning）	25
2.3.4 自动打击（Auto Attack）	27
2.3.5 任务区动态规划（Dynamic Planning）	28
2.4 性能分析	29
2.4.1 基础智能体（Basic）	29
2.4.2 加油规划智能体（Fuel Assign）	29
2.4.3 战斗机智能体（Fighter）	31
2.4.4 自动打击（Auto Attack）	33
2.4.5 任务区动态规划（Dynamic Planning）	33
3. 对抗效果	34
3.1 实际表现分析	34

3.2 关键帧截图	35
3.3 人机结合效果评估	36
4. 总结与展望	38
4.1 算法可实现性分析	38
4.2 面临挑战与改进方向.....	38
4.3 对人机协同实际应用的价值启示.....	39
参考文献	40

1. 总体设计

1.1 博弈论视角下的想定分析

在前期，我们反复摸索和揣摩了本次兵棋推演“人机协同”赛道的尤卡坦冲突想定，通过实践总结了以下认识：

此次想定聚焦红蓝双方作战对抗，以制空权争夺、制信息权掌控及关键目标打击为核心脉络。红方坐拥更强的对地对海火力优势，空中力量部署更靠近主要交战区，但在态势感知能力与空中技术层面略逊于蓝方；蓝方则凭借先进战机、多样电子支援机形成技术与感知优势，却受限于空军距交战区较远的地理短板。

双方战术均围绕人机协同规则展开，强调条令合理配置与分层任务设置，通过预设突进、夺控、后撤等功能区域，适配战局动态变化，同时搭配电子对抗、侦察、加油等支援任务，保障主战行动高效推进。红方核心目标是趁蓝方未完全掌控中部空域，完成关键目标打击与己方力量掩护，争夺核心空域；蓝方则以阻止红方推进、活用电子支援打赢空战、完成投送任务为关键。整体想定充分考量人机协同的操作限制，突出“集中兵力打击重心”的作战逻辑，双方需在态势感知、火力分配与风险权衡中寻找制胜机会，战术灵活性与任务协同性成为胜负关键。

同时，我们结合专业知识——基于博弈论框架对战场态势进行量化建模与分析，从理论的角度得出以下认识：

本次兵棋推演本质上是一个典型的**双人零和博弈**问题。红蓝双方总分值均为 8285 分，战场得分具有零和特性：在近似不考虑打击中立方失分的情况下，一方得分即意味着另一方失分。

设红方策略集为 $S_R = \{s_R^1, s_R^2, \dots, s_R^m\}$ ，资源集 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{52}) \in \mathbb{R}^{52}$ ；蓝方策略集为 $S_B = \{s_B^1, s_B^2, \dots, s_B^n\}$ ，资源集 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_{60}) \in \mathbb{R}^{60}$ 。策略集定义了红蓝双方在博弈中可选择的所有行动方案组合。每个策略包含部队部署、攻击目标选择、防御配置等决策要素；资源集则是红蓝双方在博弈中各自拥有可支配单元的集合。

我们定义为红方的效用函数：

$$U_r(S_a, S_b) = \sum_{i=1}^{52} \sum_{j=1}^{60} \delta_{ij} r_i b_j + \gamma_r \sum_{i=1}^{52} \alpha_i r_i - \gamma_b \sum_{j=1}^{60} \beta_j b_j$$

其中 δ_{ij} 是红方 i 单元与蓝方 j 单元交战过程中红方单元的交战效用系数， γ_r 是红方单元保全系数， γ_b 是蓝方单元保全系数， γ_r 、 γ_b 满足条件 $\gamma_r + \gamma_b = 1$ 。交战收益项

$\sum_{i=1}^{52} \sum_{j=1}^{60} \delta_{ij} r_i b_j$ ：红方第 i 单元与蓝方第 j 单元交战的净收益， δ_{ij} 为交战效用系数（正值红方占优，负值蓝方占优）；保全收益 $\gamma_r \sum_{i=1}^{52} \alpha_i r_i$ ：己方存活单元的战略价值， α_i 即报表中的

“单个分值”；敌方保全损失 $\gamma_b \sum_{j=1}^{60} \beta_j b_j$ ：敌方存活对己方造成的负效用；约束条件：

$\gamma_r + \gamma_b = 1$ ，反映攻防权重分配。从红方角度来看：若 $\gamma_r > \gamma_b = 1$ ：偏向保全己方（防御态势）；若 $\gamma_r < \gamma_b = 1$ ：偏向歼灭敌军（进攻态势）；若 $\gamma_r = \gamma_b = 1$ ：攻防平衡。由零和特性，蓝方的效用函数为 $-U_r$ 。

由纳什均衡：红方策略目标 $S_R^* = \arg\max_{S_R} \min_{S_B} U_r(S_R, S_B)$ ；蓝方策略目标 $S_B^* = \arg\max_{S_B} \min_{S_R} U_r(S_R, S_B)$ 。这是极大极小策略（Maximin），即假设对手采取对己最不利策略的前提下，选择使己方效用最大化的策略。零和博弈的纳什均衡点即为鞍点解。

作战领域	红方分值	红方占比	蓝方分值	蓝方占比	差异
空中作战	2290	0.2942	1665	0.2139	625
海上作战	1950	0.2505	2750	0.3532	-800
地面防御/ 打击	1525	0.1959	875	0.1124	650
空中支援	1520	0.1952	1835	0.2357	-315
基础设施	350	0.045	450	0.0578	-100
情报	150	0.0193	0	0	150

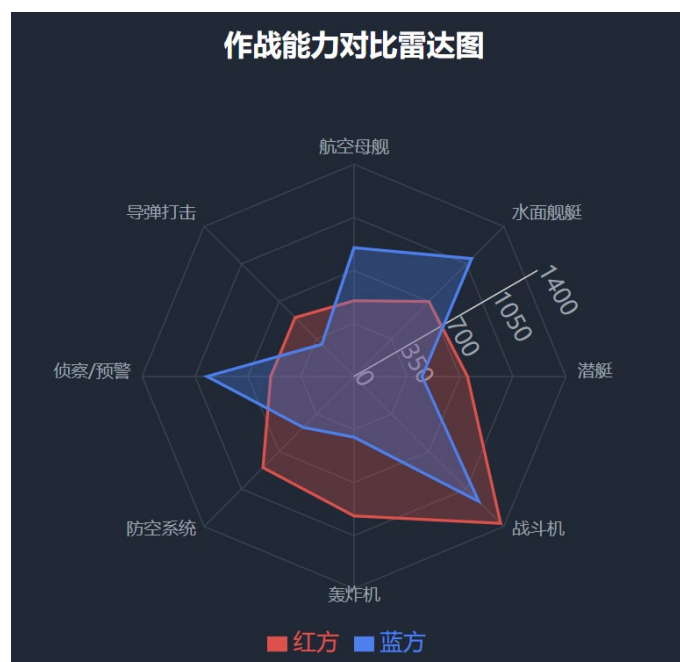
基于效用函数最大化原则，红方应：

- 发挥轰炸机力量优势（+520 分领先）：图-160M 等远程轰炸机执行反舰/对地打击；优先打击蓝方驱逐舰（ $\beta=200$ ）和航母（ $\beta=500$ ）。
- 构建纵深防空体系（+475 分领先）：S-400（200 分）+S-300PS（100 分）+SA-5c（400 分）；形成远中近多层防御。
- 利用潜艇伏击优势（+300 分领先）：亚森级、塞拉级核潜艇反舰作战；威胁蓝方航母战斗群。
- 弹道导弹战略威慑（独有 300 分优势）：舞水端导弹形成区域拒止。

蓝方最优策略方向：

- 确立海上优势（+800 分领先于驱逐舰）：驱逐舰编队控制海域；实施反潜作战限制红方潜艇活动。
- 信息战主导（+350 分领先于侦察）：EP-3E、RC-135X、U-2S 等构建态势感知网络；电子战压制红方防空系统。
- 利用隐身优势：B-2A（250 分）和 F-35 突防能力；打击红方航母和防空节点。
- 两栖投送能力（独有 350 分）：独岛级两栖舰执行登陆/支援作战。

纳什均衡解需要进一步确定交战效用系数矩阵 δ_{ij} 才方可精确求解，由于以上只涉及战略层面的粗略分析，不具备精确求解的必要性，我们不再继续深究。



博弈论视角下作战能力对比图

1.2 人机协同必要性

考虑到该想定的特殊性，包括想定整体复杂、前期部署时间较短、对抗过程倍速较快等等，单纯靠人工手动部署和操作既不利于战局的观察与调控，更与该赛道的“人机协同”理念相违背，所以在本次对抗竞赛中，如何实现“人+机”的良好耦合成为对抗胜利的重中之重。

总结来说，在该想定中人机协同模式的合理性核心在于**精准弥补人类与算法的能力短板，通过分层分工实现“战略决策+高效执行”的闭环**，既适配赛事中手动操作受限的规则，又最大化双方特长价值。

第一个方面，从智能博弈算法与人类选手的协作来看，算法承担“实时数据处理与自动化执行”的核心角色，解决人类在高节奏推演中的操作局限，如算法可基于预设规则动态调度任务、实时计算目标威胁、精准下达打击指令，避免人类在 10 倍速推演中因疲劳漏判或操作延迟失误；而人类选手聚焦战略层决策，为算法提供目标优先级与战术预案，形成“人类定方向、算法找路径”的协作闭环。

第二个方面，在分工设计上遵循“人类管战略、算法管执行”的分层逻辑。人类负责顶层规划，包括设定核心目标、资源取舍、战术预案；算法负责底层落地，包括任务自动化、条令合规、实时风险控制。这种分工既避免人类陷入重复操作的细节陷阱，又防止算法因缺乏全局视野导致战略偏差。

第三个方面，双方的特长分配上实现人类经验与算法效率的互补。人类凭借全局

视野与经验判断，处理算法难以量化的模糊决策；算法依托高效性与精准性，完成人类难以持续胜任的高频任务。二者结合既解决了赛事中手动操作受限的痛点，又避免单一依赖人类或算法导致的效率低下或战略僵化，最终提升作战决策的准确性与执行效率，成为适配该想定的最优模式。

1.3 人机协同总体方案设计

综合以上分析与梳理，我们的核心设计理念是：通过清晰界定人机边界、充分发挥各自优势，构建一个“1+1>2”的智能决策体系，从而在复杂动态的战场环境中占据绝对优势。传统的自动化脚本缺乏弹性，而纯人工操作又难以应对瞬息万变的战场信息。我们的解决方案，正是将人类的战略洞察与算法的精准高效无缝融合。

- 在这一体系下：
- 人类操作手扮演大脑：**负责定下作战决心、设定关键目标、分配核心资源，并在关键节点进行干预决策。
 - 智能博弈体扮演执行臂膀：**负责将人类的战略意图转化为数百个精细的可执行任务，并进行实时、并行的优化控制。

下表详细展示了我们设计的红、蓝双方整体人机协同系统架构：

架构维度	核心内容	对应代码 / 操作支撑
核心目标	维持补给线畅通、削弱敌方空战能力、避免核心资源消耗	想定中“中部加油部署”“机场饱和打击”等任务设定
协同主体	人类（战略决策 / 风险管控）、AI 智能体（战术执行 / 数据运算）	手操规避动作 + fighter.py 自动索敌打击
分工阶段	战前规划、战中执行、战后复盘	agent_doctrine_set.py 初始化 + 实时任务调度 + 战损数据统计
技术支撑	动态任务调度、智能威胁评估、多模态打击适配、弹性资源保障	四大创新算法模块 + 代码间数据交互接口

红方人机协同系统架构

架构维度	核心内容	对应代码 / 操作支撑
核心目标	保障远洋航线安全、保护关键区域（如 R 国机场）、保持制空/制海权优势	想定中“F-35 编队巡逻”“航母战斗群区域防空”等任务设定
协同主体	人类（战略防御部署/高风险行动授权）、AI 智能体	人类授权对地打击 + fighter_blue.py 自动导弹规避 +

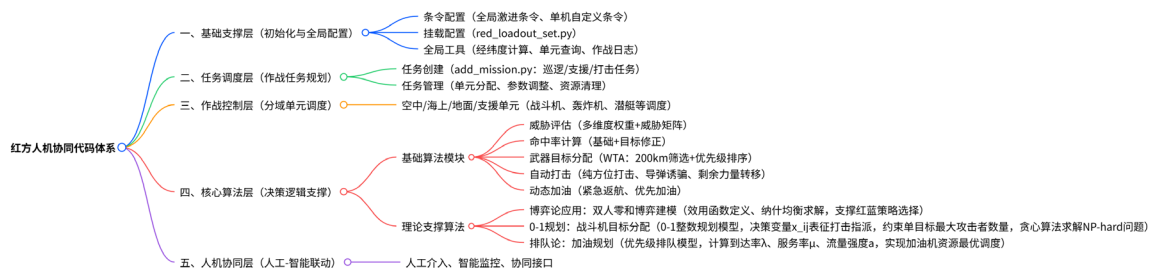
分工阶段	（实时拦截/资源动态调度）	fuel_assign_blue.py 加油机调度
	战前配置、战中响应、战后优化	agent_doctrine_set.py 条令初始化 + add_mission_blue.py 实时任务调整 + 战损数据复盘
技术支撑	自适应决策周期、多维度威胁评估、编队协同攻击、弹性燃油调度、电磁静默突袭	五大创新算法模块（fighter_blue.py/fuel_assign_blue.py 等）+ 模块间标准化数据接口

蓝方人机协同系统架构

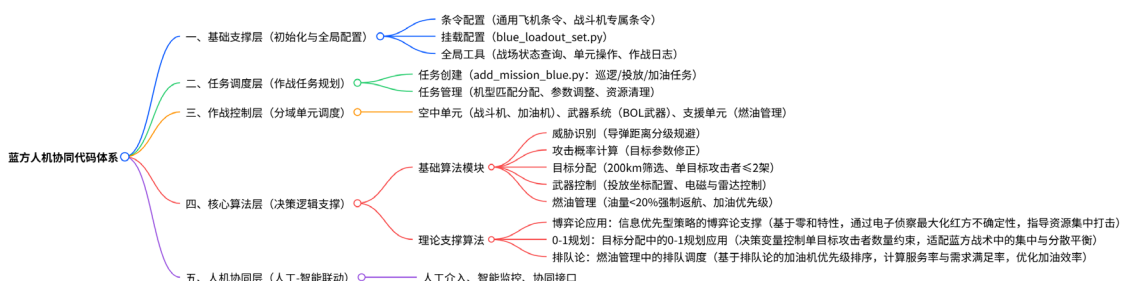
为了具体阐述这一协同模式的合理性与高效性，下文将分别以**红方**和**蓝方**的智能体设计为例，深度解析我们如何根据不同的作战使命，定制化地实现人机协同。

2. 智能体算法实现

2.1 总体概述



红方智能体总体体系



蓝方智能体总体体系

2.2 基础智能体

无论作战时间、作战地点如何变化，调兵遣将的基本准则始终不变。一旦摸清了敌方重要目标所在位置，明确了敌方作战偏好，就必须提前做好战略部署与战术规划，以实现临危不乱、一鼓作气，为瞬息万变的模拟战场做好准备。然而，假若敌方来势汹汹或战术诡谲，我方必须在短时间内做出反应。传统的手动任务部署和条令设置，需要操作手具备充足的作战经验。同时对于同一战局的规划安排，更要求操作手强大的记忆能力和手操速度。这会带来很多不确定性问题：任务体量大而繁多难以确保部署完整；任务防区、飞机航线等精确性能无法保证；难以短时间内配置战场环境满足己方战斗习惯。如此，我们必须开发智能体来扩展和提高人的智能性。基础智能体因此存在。

以下三个智能体：任务部署智能体、条令设置智能体、武器挂载智能体。是通过丰富的实战测试有机整合、彼此关联而形成的战前规划基础智能体群。

2.2.1 任务部署智能体（Add Mission）

红蓝双方任务部署智能体均涵盖了训练、支援和打击等任务。完美实现了东西贯通的纵深防御；建立了空中巡逻、海上反潜、陆地防空等一系列海陆空协同作战体系；

针对不同的战略地形和战场形势特征覆盖了犬牙交错任务区域。以此形成多层次防御体系。与此同时，实现了智能任务定制化、分工专业化、后勤保障完善化、资源分配和武器系统优化。

```
PROCEDURE 创建海面巡逻任务

1. 创建任务
  CREATE_PATROL_MISSION("保护海面", AIR_PATROL,
                        patrol_area_points)

2. 设置追击区域
  ADD_PROSECUTION_ZONE("保护海面", prosecution_zone_points)

3. 分配单位
  units ← FIND_UNITS_BY_NAMES(unit_names)
  ASSIGN_UNITS_TO_MISSION("保护海面", units)

4. 配置参数
  mission ← GET_MISSION_BY_NAME("保护海面")
  CONFIGURE_PATROL_MISSION_PARAMETERS(mission)

5. 等待完成
  WAIT(0.5s)

END
```

任务部署智能体伪代码

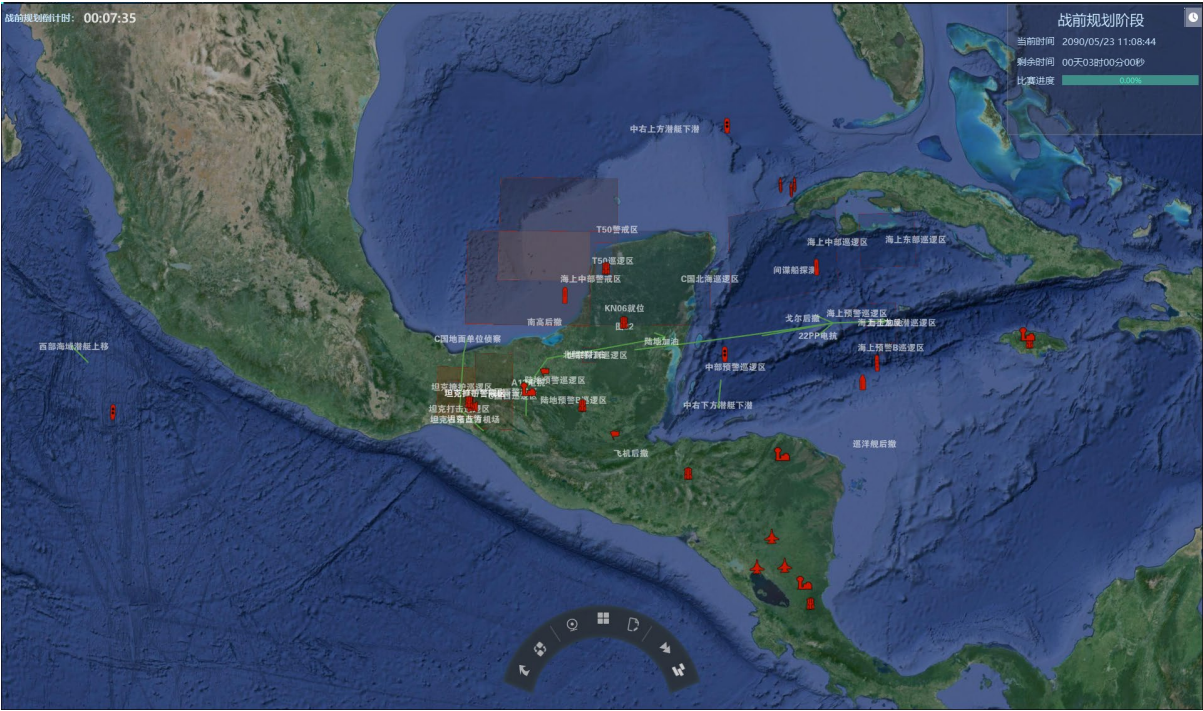
2.2.1.1 红方

- 红方任务大纲

巡逻任务		支援任务		打击任务
东部海面	海上中部	侦察任务	C 国地面单位侦察	鸭嘴兽对地打击
	海上东部		间谍船探测	
	海上苍龙反潜	舰船后撤或进击任务	南高后撤	其余打击任务根据战场状况实时手动创建规划
陆地坦克区	坦克掩护		戈尔后撤	
	坦克打击		飞机后撤	
	C 国西	加油任务	巡洋舰后撤	
半岛海陆交界处	反飞机投送		海上加油	
	世宗探测	陆上打击支援	陆地加油	
	C 国北海		北朝鲜打击	
			KN06 就位	

预警任务	海上预警	特殊任务支援	坦克占领支援	
	海上预警 B		塞拉潜艇下潜	
	中部预警		新浦潜艇下潜	
	陆地预警	亚森潜艇上移		
	陆地预警 B	A12 电抗		
		22PP 电抗		
/	/	电子对抗	Checkmate 渗透	/
/	/		渗透任务	T50 渗透

• 整体任务速览



红方任务总览

• 战区分析与任务介绍

红方作为空中力量式微但海陆力量相对优势的一方，在整场战役的空域夺控方面应该紧紧依托于海陆可打击力量周围，由此诞生了三大战区。

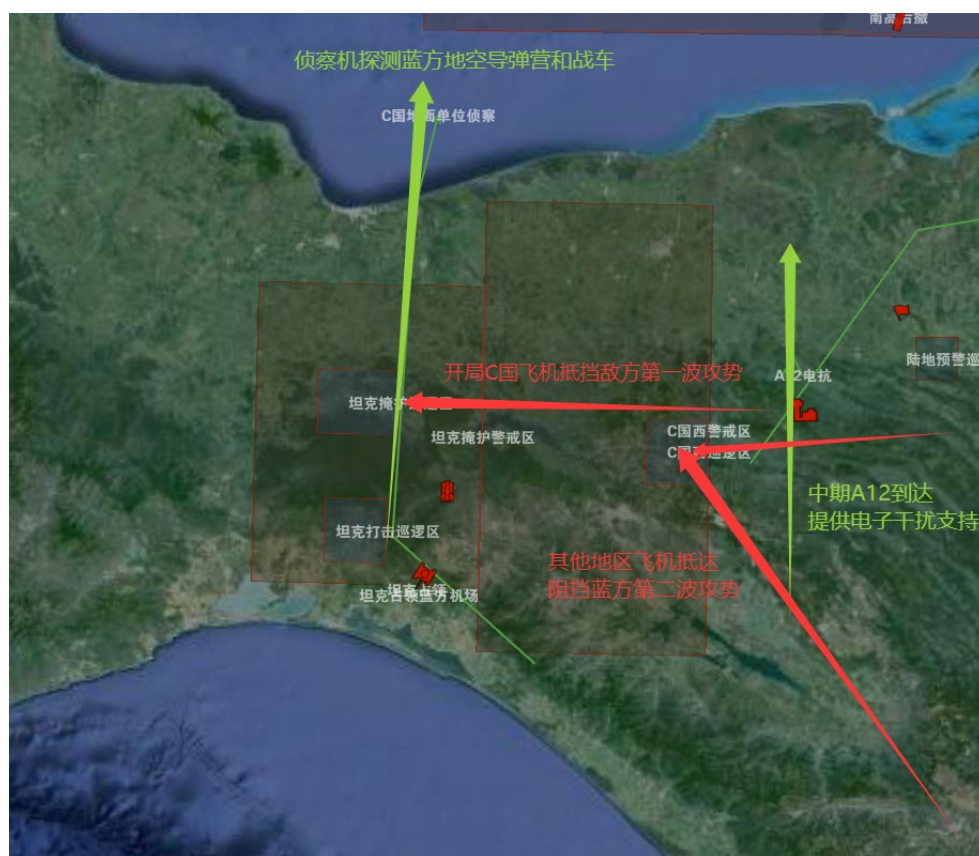
◦ 中左陆上战区

红方初期最重要的任务就是掩护己方坦克顺利抵达机场，而蓝方阻止他们的唯一方式就是 H 国机场的对地打击，这意味着只要能顺利阻挡住蓝方的第一波攻势，基本可以标志着红方坦克占领的成功。同时为了防止蓝方飞机在较下空域潜入，对应的巡逻区当适当深入，保证能及时拦截。

而此后，大约推演进行 45 分钟的时候，蓝方的空军主力将推进至中左空域，

此时 C 国机场的低代机大部分应当已经战损或者燃油耗尽，此时则需要其他机场的飞机前来填补防空力量空缺，保护我方地面单位不被打击的同时打击敌方地面和空中单位。

而更进一步的说，当已经掩护坦克进入占领区域后，其实并没有继续在西侧作战的必要了——除了进一步的探照 H 国的萨德和爱国者（但这并不是必要的，只在条件允许的情况下进行，也就是对方力量比设想中少的情况），此时也应当推演尾声，可以选择飞机大部分后撤，保存我方有生力量。



中左陆上战区任务部署

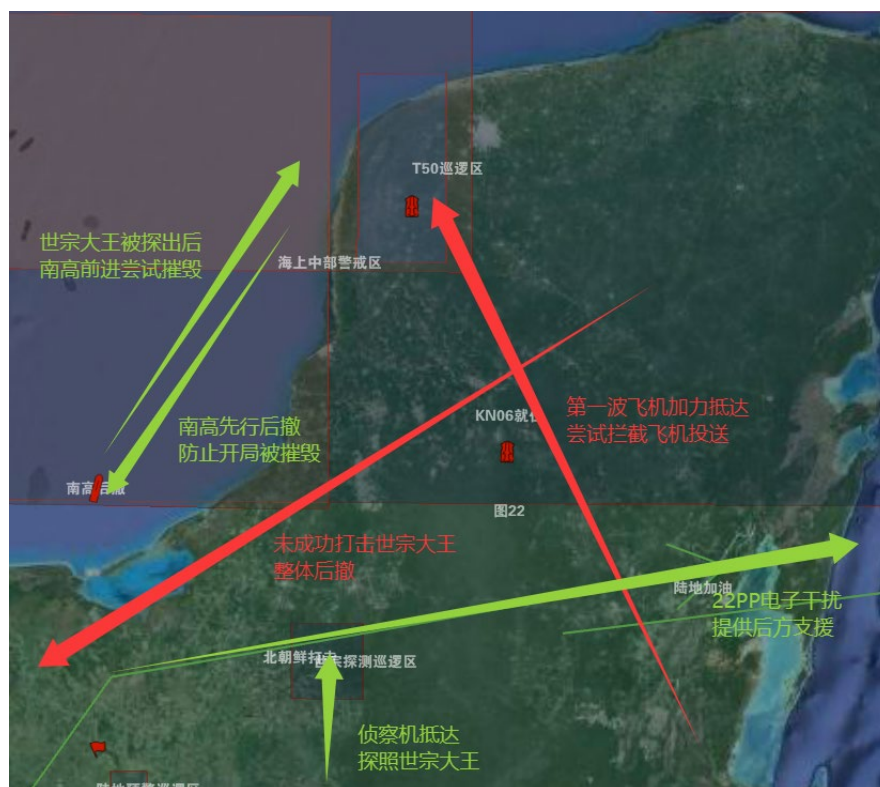
◦ 半岛海陆交接战区

对于半岛区域，无论出于任何目的布置，都绕不开一个问题——即蓝方布置在此具有强大对空对海打击力量的“世宗大王”舰艇，对于红方，无论是为了拦截飞机投送，亦或者是为了打击蓝方由北部海面进入的空中力量，尽可能快的摧毁世宗大王都是很有必要的。

经过测试，最为可行的方法是由 E 国的图 22-MR 侦察机持续照射世宗大王，从而使得红方的南高护卫舰以及 KN-01 地地导弹营实现对世宗大王的打击，进而实现红方下一步的战术布置。

但必须要考虑的是，倘若无法成功摧毁世宗大王，接下来又该怎么做？目前的想法是对于那些性能较差的低代机，将他们派去 C 国机场西部，拦截开局从罗斯

福号起飞的飞机，而对于高性能的高代机，则派他们潜入世宗大王控制区以内，尝试拦截飞机投送，减少损失。



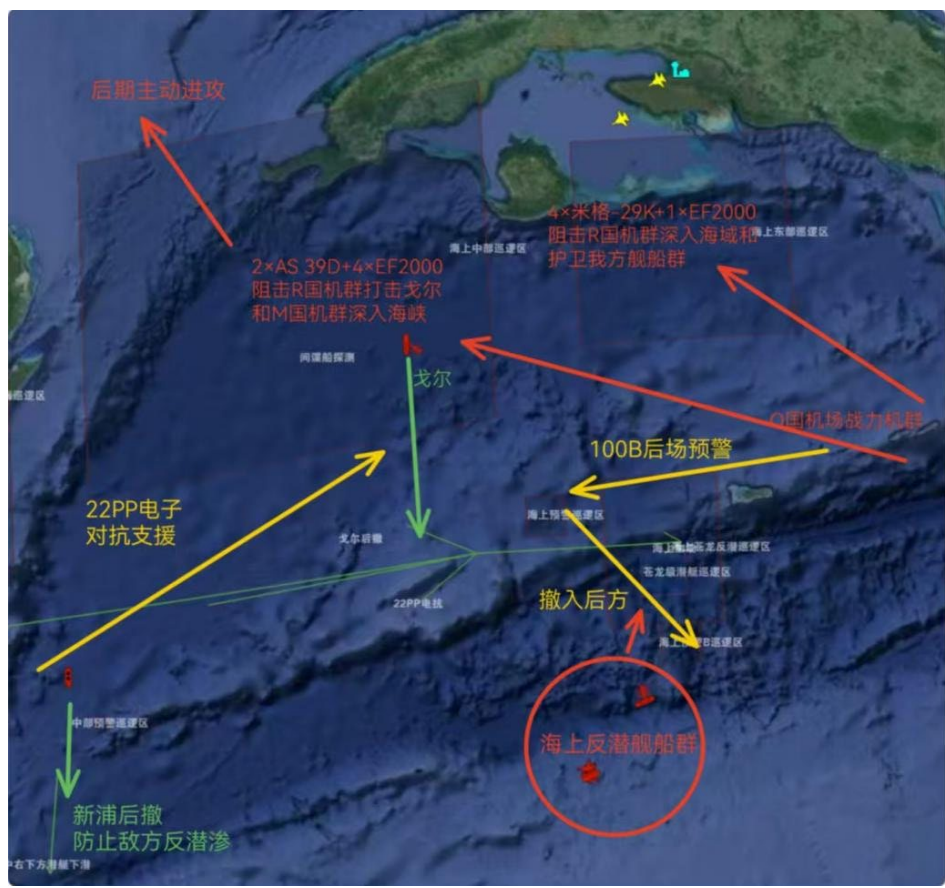
半岛海陆战区任务部署

东部海上战区

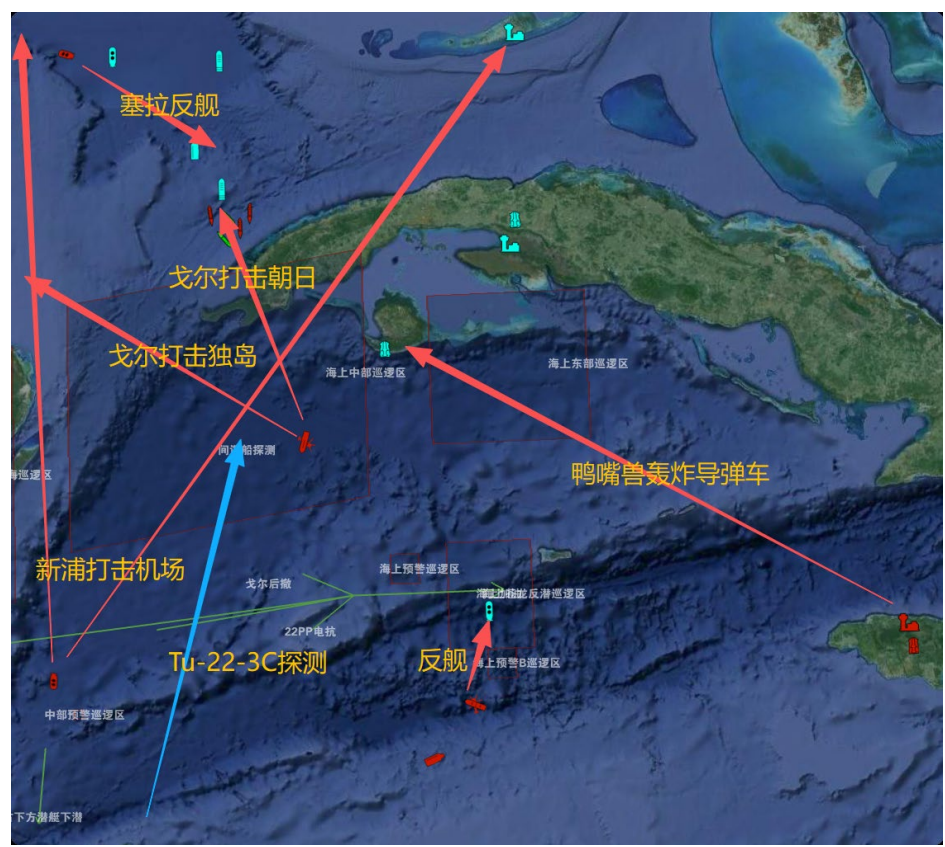
海上东部区域，最核心的任务是保护我方舰船潜艇群，阻击敌方大规模渗透和打击，同时利用我方海陆单元打击敌方海陆单元。

将最东部 O 国分为两个主要战斗机群，一个部署在彼得大帝巡洋舰和库兹航母上方海域，一方面阻击敌方 R 国机群渗透，一方面保护“打击苍龙反潜”任务的执行。第二个战斗群部署在海峡入口海域，一方面阻击敌方轰炸机打击我方戈尔护卫舰，一方面阻止中后期敌方 M 国机群可能进入海峡进行二次反舰。配合关键单元的后撤、预警机后方预警、陆上侦察机支援等实现海域制空。

同时，该海域的对海对陆打击力量也不容小觑，在保护我方单元不被打击的情况下实现对敌有效打击也是任务的关键。



东部海上战区任务部署



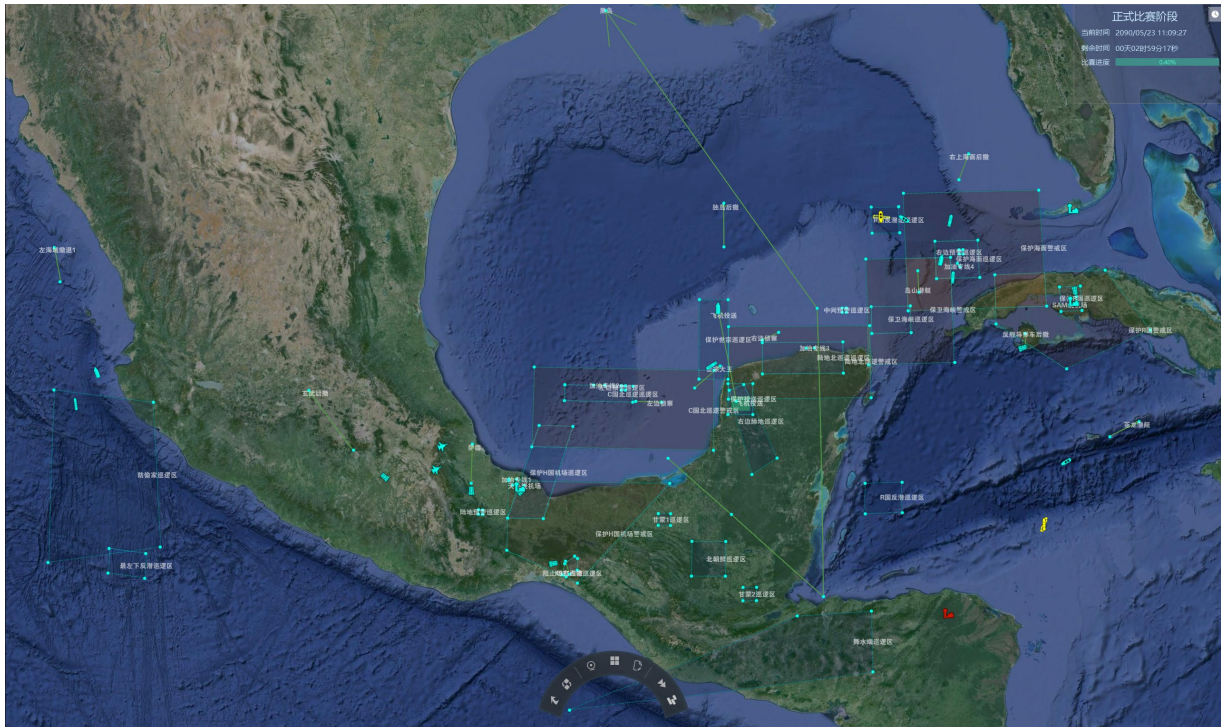
东部海上战区打击规划

2.2.1.2 蓝方

- 蓝方任务大纲

巡逻任务		支援任务		打击任务
东边海面	保护海面	特殊任务	飞机投送	机场防空
	保护 R 国		黑鸟	戈尔必沉
	保卫海峡	侦察任务	左边侦察	南高打击
中部陆地与海面	陆地北巡逻		右边侦察	其余打击任务根据战场状况实时手动创建规划
	C 国北巡逻	加油任务	加油专线 1	
	保护世宗		加油专线 2	
西边陆地	保护 H 国机场		加油专线 3	
	防偷家		加油专线 4	
反潜任务	R 国反潜北	舰船潜艇逃跑或进击任务	右上海面后撤	
	R 国反潜		岛山潜艇	
	最左下反潜		苍龙潜艇	
预警任务	左边预警		世宗大王	
	中间预警		独岛后撤	
	右边预警		玄武后撤	
	陆地预警		左海域撤退 1	
	保护投送		左海域撤退 2	
特殊任务	阻止坦克占领	地面单位任务	萨德	
	右边舔地		天马绕机场	
舔地任务	甘蒙 1		反舰导弹车后撤	
	甘蒙 2		SAM 绕机场	
	北朝鲜		K9 打坦克	
	舞水端		爱国者绕机场	

- 整体任务速览



蓝方任务总览

- 战区分析与任务介绍

- 东边海面（古巴岛西北方，以及古巴岛）

此处停留着蓝方的几艘非常重要的舰船和一艘猎杀潜艇，作战能力强，分值高，但是距离主战区较远，在比赛中发挥不了太大的作用，重点还是在于自我保护。因此，在此处附近分配了众多巡逻区，用以保护海面单位，阻止红方飞机来犯。

此外，猎杀潜艇的作用非常强大，拥有打击陆地单位的玄武 3A 和玄武 3B 导弹各 6 发，是蓝方非常重要的武器资源。初期需要令该潜艇下潜至最深、速度调至最大，以最快的速度向南靠近陆地，从而打击红方的 KN-01 和 KN-06 两个地面单位。

最后，红方在这里有三艘间谍船，如果红方间谍船不使用纯方位打击 DD 119 “朝日”导弹驱逐舰，则在预警机的探测下，蓝方使用“朝日”攻击间谍船（未使用“朝日”的纯方位打击间谍船，因为可能会误伤中立国单位，导致扣分）。



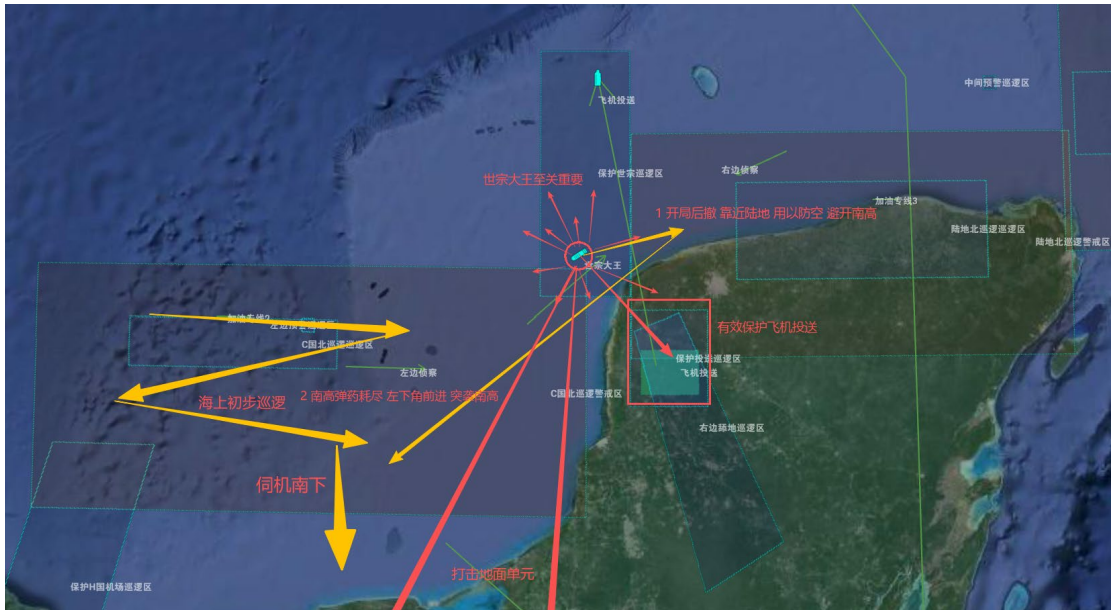
东边海面任务部署

中部陆地与海面

此处停留着蓝方最最重要的海面单位“世宗大王”号导弹驱逐舰[KDX-3]，“世宗大王”具有极强的自卫与防空能力，靠近者皆为死灰，仅凭一个单位，就可以阻止红方飞机前往东边海面，并有效保护飞机投送成功。因此，保住“世宗大王”并发挥出它的作用对蓝方至关重要。

开局“世宗大王”先进行后撤，靠近陆地，用以防空，同时防止红方“南高”级护卫舰打击“世宗大王”。当“南高”武器消耗差不多时，“世宗大王”再选择向左下角前进，突袭“南高”，同时打击地面目标地空导弹分队(SA-5c 型“甘蒙”防空导弹 [S-200M 型“织女星 M”导弹], 2x 营)。

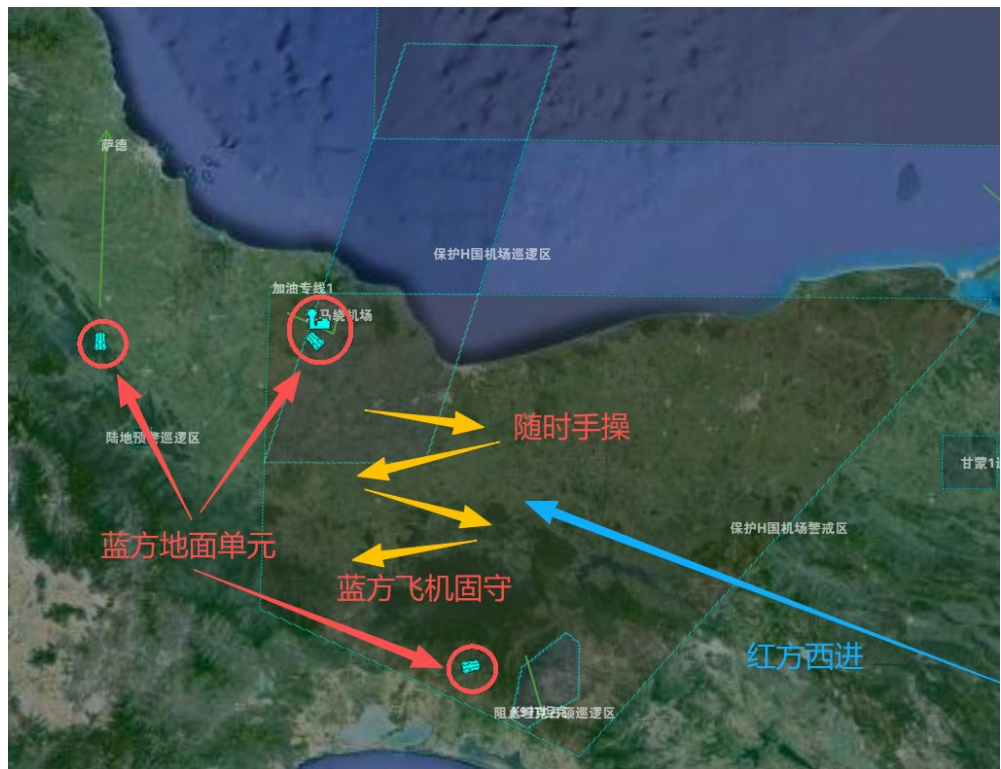
由于蓝方的飞机较晚才能飞到这里，火力不敌红方，因此到达后先不要太靠南，不要进入红方的地面单位防空范围内，在海面上初步巡逻，等到时机合适时（红方地面目标被打掉以后）再南下进行火力输出，赢得制空权。



中部陆地与海面任务部署

◦ 西边陆地（H国机场附近）

此处是红方西进的必经之地，也是蓝方地面单位之所在。若要阻止红方飞机进入此处，进而保护蓝方地面单位，需要蓝方的飞机驻守此处，同时不要进入红方的防空范围内。当蓝方所有飞机抵达该处附近后，需要随时进行手操，保卫西边陆地。



西边陆地任务部署

- 太平洋保卫

此处停留着蓝方几个高价值海面单位，但是在实际作战中，距离主战区太远，发挥不了太大的作用，反而容易被红方派某个侦察机探测后，被 PLA-885M “亚森”级多用途核潜艇打击。因此，此处需要保留一些空中作战单位，并让海面单位后撤，防止被“偷家”。

- 其他任务介绍

- 支援任务-黑鸟：由于 SR-71(Bx) “黑鸟”侦察机飞行速度极快，飞行高度高，不容易被红方打击，因此，开局可以快速派“黑鸟”侦察机探测红方情报，而红方的情报主要分为两部分，一部分是陆地，涉及到后续的舔地任务，另一部分是加勒比海，涉及后续的海面打击。经过对两者的综合分析与测试，打击地面的难度相对较低，因此将黑鸟派往地面进行探测，之后再派送轰炸机对地面进行轰炸打击。（可以进一步优化，让“黑鸟”探测完地面后继续探测加勒比海的几艘红方高分值航母与舰船，进而实现对海面目标的打击）

- 巡逻任务-舔地任务：我们对红方的几个地面单位分别设置了各自的巡逻区（右边舔地、甘蒙 1、甘蒙 2、北朝鲜、舞水端），由于轰炸机弹药较多，打完一个区域后还有剩余，当派的轰炸机打完某区域后，手动分配单元到另一个任务巡逻区，实现对多目标的精准打击。

- 巡逻任务-阻止坦克占领：派送了 F-15K 型，KF-21 Boramae 战斗机 Blk 2 两架拥有对地打击挂载的飞机，对坦克占领所走的路线的巡逻区进行搜索打击。其中 F-15K 型为近战，KF-21 为远程，而且 KF-21 会在发完一次导弹后返回机场，装填下一次打击的武器，在作战时多次起飞多次打击，实现对坦克占领的阻止。

- 支援任务-飞机投送：飞机投送分两波或更多波次，防止第一波被拦截。同时，搭载无人机的“独岛”级两栖攻击舰规划了后撤任务，并延迟执行，防止无人机回去后因没油而坠落。

2.2.2 条令设置智能体（Doctrine Set）

基于双方战场优势的不同之处，红蓝双方智能体各有偏重。蓝方装备资源的优势着重于更强的攻击持续性、更完整的电子战压制、更强的心里威慑效果。红方则相反要求更好的生存能力、更合理的资源管理。蓝方条令适合绝对优势下的速决战，红方条令适合持久战。

PROCEDURE 设置激进作战条令

```
1. 基本交战规则
  SET_ALL_WEAPON_CONTROL(FREE_FIRE)
  SET_ENGAGEMENT_RULES(OPTIMISTIC,
                        ONLY_MISSION_TARGETS)

2. 电磁管控
  SET_EMCON_POLICY(IGNORE_WHILE_ATTACKING)

3. 空中作战
  SET_AIR_DOCTRINES(HIGH_INTENSITY, NO_RETURN,
                    WINCHESTER_USE_GUNS)

4. 反舰反潜
  SET_NAVAL_DOCTRINES(MAINTAIN_STANDOFF, AVOID_CONTACT)

5. 传感器设置
  SET_SENSORS(RADAR_ON, JAMMER_OFF, SONAR_OFF)

6. 发送消息
  SEND_MESSAGE("条令设置完毕")

END
```

条令设置智能体伪代码

2.2.3 武器挂载智能体（Loadout Set）

战前规划部署的重要目标就是为了整合战场资源、优化资源配置。武器挂载既要符合任务要求，又要能满足挂载实体的自身功能特性。红蓝双方智能体的武器挂载方案，是与任务、条令的需求彼此配合而形成的。是经过多维度考虑、多次实战经历才得以形成的。虽然这个智能体的代码体量最小，却举足轻重。

PROCEDURE武器挂载智能体

```
1. 初始化方法
  CALL_PARENT_INIT(camp_name)
  LOG_INFO("{camp_name}开始运行")

2. 设置飞机挂载配置
  unit_list = GET_UNITS_FROM_SITUATION(situation[0])
  FOR EACH unit IN unit_list:
    IF unit.type != "飞机", CONTINUE
    GET_UNIT_ID_AND_NAME(unit)

    IF IS_C_COUNTRY_AIRCRAFT(unit):
      SET_LOADOUT_BY_ID(unit.id)
    IF IS_E_COUNTRY_AIRCRAFT(unit):
      SET_LOADOUT_BY_ID(unit.id)
    IF IS_CARRIER_AIRCRAFT(unit):
      SET_LOADOUT_BY_ID(unit.id)

END
```

武器挂载智能体伪代码

2.3 核心智能体

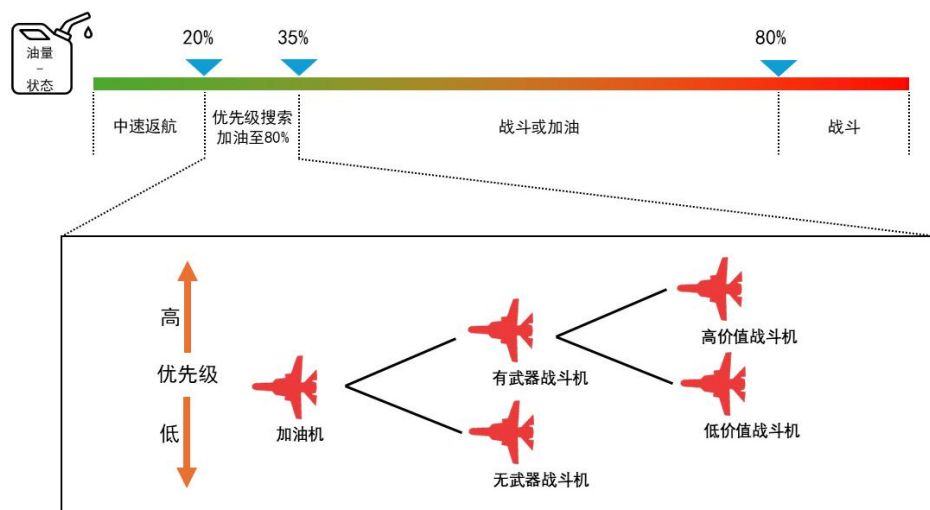
只有充分挖掘战场信息，时刻洞察战场态势；打造符合战斗需要，匹配战斗条件的智能体，才能实现智能博弈、出奇制胜。核心智能体围绕后勤保障、任务动态规划、作战智慧化三个关键目标开发。使得在有限时间，有限人手的情况下能高效、及时、准确的对战场做出实时响应、精准决策。如果没有核心智能体的支持，面临纷繁复杂的众多单元，操作手将承受极大的身心压力，难以指挥全局。

以下智能体都是在实操过程中应操作手需求而产生的；经过多次调试多次实战检验的。是切实解决战场需求，赋能战场实战的有效算法。

2.3.1 加油规划智能体（Fuel Assign）

在现代化战争中，加油机与战斗机编队出动能延长作战半径、增加留空时间、提高出动率、支援远程部署、增强战术灵活性。就本次人机协同想定而言，制空权将带来充足的战场信息和绝对的主动权。战斗机必须要应对高速机动，远程打击和油量有限的矛盾问题。加油机的授油过程一定得实现效率和价值的权衡，实现己方综合优势最大化。加油机解决的主要问题在于：什么时候加油？给谁加油？

如下述图示，全局加油机由同一个智能体统一指挥。实时监测与之相依附战斗机的油量现状。



当战斗机油量低于 35%时战机主动向加油机发出授油请求。如果在加油机进行加油过程中，无法满足全部战机的需求。低于 20%的加油机中速返航，以保存实力、保护己方单元。

战机发出授油请求后，还需由智能体进行资源分配调度。智能体将待加油的战斗机首先根据是否具备战斗能力（有无武器）进行第一次优先级分类，再对有战斗能力的战斗机进行分值搜索。加油机依优先级进行加油工作。

同时，为了防止出现受油机附近有其他已被分配加油任务的加油机，从而导致受油机选择了错误的加油机，智能体将实时对受油机的位置进行检查，只有确定受油机已经抵达加油地点，才会开放其加油权限，最大程度地减少加油机资源的浪费。

在加油完成后，为了避免由于操作手无法及时将飞机分配回原任务而导致的资源浪费，在代码中专门创建了储存受油机、加油机原任务的空间，在检测到加油完成时即可将加油任务中的飞机分配回原任务，从而实现效率提升，减少人力浪费。

```
PROCEDURE 动态空中加油分配

1. 紧急返航
  IF fuel < 20% THEN RETURN_TO_BASE()

2. 加油需求优先级排序
  needy_list ← FILTER( $20\% \leq \text{fuel} < 35\%$ )
  priority ← fuel / score (有弹药优先)
  SORT(needy_list, priority, ASC)

3. 动态匹配加油机
  FOR each fighter IN needy_list DO
    tanker ← FIND_NEAREST_AVAILABLE()
    rendezvous ← MIDPOINT(fighter, tanker)
    CREATE_REFUEL_MISSION(rendezvous)

4. 加油完成恢复
  IF fuel > 80% THEN RESTORE_ORIGINAL_MISSION()

END
```

加油规划智能体伪代码

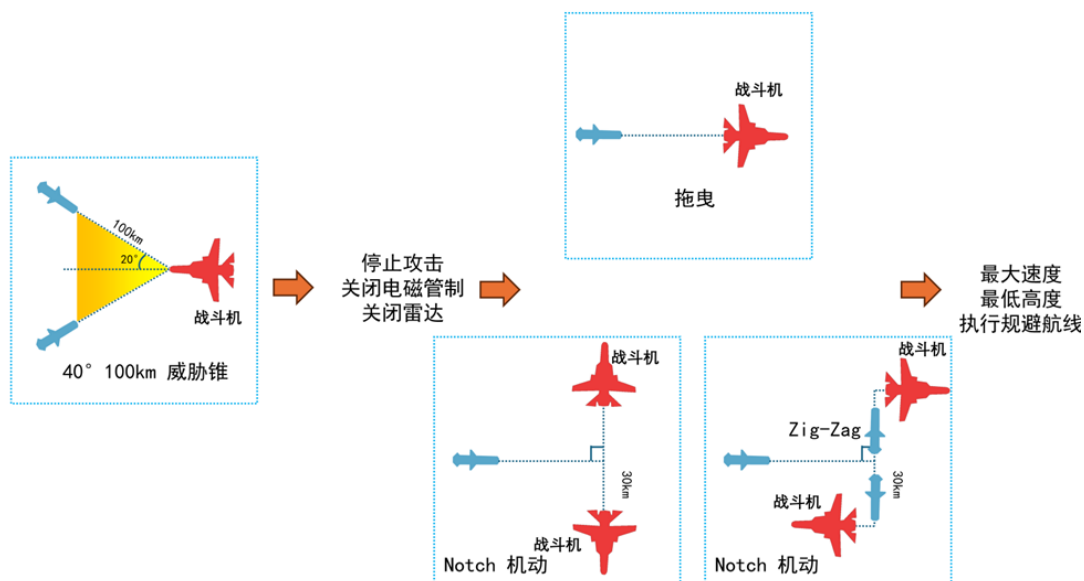
2.3.2 战斗机智能体 (Fighter)

现代化战争中，战斗各方谁夺取并维持制空权谁就主宰了比赛。在对地、对海精确打击；情报、监视与侦察；电子战与信息战；战略威慑与力量投送中都得依靠战斗机的空中力量。为了满足多种空中任务，尽可能减少死亡率；为了实现对地方的有力打击，我们以生存优先、智慧打击为主要策略。

- **生存优先**

战斗机智能体在推演的每一步过程中都将实时获取战斗机信息和战场态势信息。如果检测到地方导弹进入到战斗机航向 100km 40°的威胁锥内，即认为是攻击导弹。

检测到威胁后，战斗机立刻停止攻击、关闭电磁管控、关闭雷达。关闭主动探测和攻击，使得战斗机被识别概率大大减小，实现“隐身”。



战斗机智能体-生存优先示意图

最后，为了完全摆脱导弹的追踪，战斗机将提高速度、降低高度执行两阶段规避方案。第一阶段，战斗机与导弹通向航行，消耗导弹燃料并尽可能逃离导弹打击范围；第二阶段，战斗机迅速朝着导弹与战机连线垂直方向转弯，将导弹摆脱；当导弹再次跟踪到战斗机时又进行垂直转弯。逃脱路线呈“之”字形。

PROCEDURE 生存优先_导弹规避

1. 威胁检测
SCAN_MISSILES(range=80km, threat_cone=15°)
2. 进入规避状态
SET_WEAPON_CONTROL(HOLD)
SET_RADAR(OFF)
3. Zig-Zag机动规避
evasion_heading ← PERPENDICULAR_TO_MISSILE(±90°)
EXECUTE_ZIG_ZAG_MANEUVER(heading, MAX_SPEED, MIN_ALT)
4. 脱离后恢复
IF NO_THREAT() THEN RESUME_MISSION()

END

战斗机智能体-生存优先伪代码

• 智慧打击

在智能体确定战斗机脱离威胁后，将恢复战斗机的任务执行。战机分配是一个典型的 0-1 指派问题。0-1 整数规划（IP）建模如下：

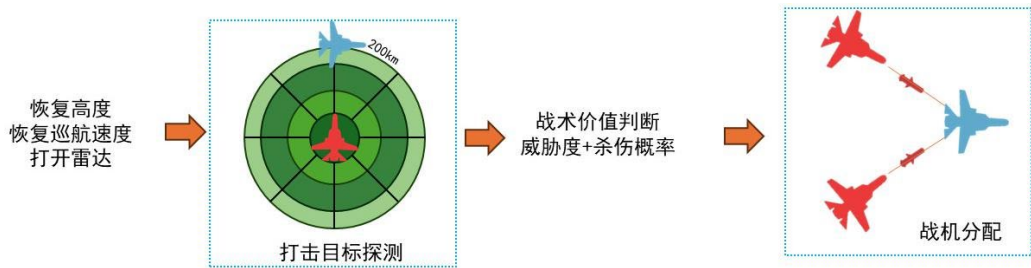
定义决策变量 x_{ij} 。 $i \in \mathcal{F}$ 是我方战斗机集合， $j \in \mathcal{T}$ 是敌方战斗机集合。 x_{ij} 取值 0 或者 1 代表是否指派我方 i 单位打击敌方 j 单位。采取策略，一个单元打击一个目标，一个目标最多分配 K_{max} 个打击单元。示性函数 I_{ij} ，当敌我距离 d_{ij} 小于等于最大打击范围 D_{max} 时 x_{ij} 可以取 1，否则只能取 0：

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, d_{ij} \leq D_{max} \\ 0, d_{ij} > D_{max} \end{cases}$$

定义战斗机状态价值 $V = \xi \cdot v_j + \varsigma \cdot p_{ij}$ ，是敌方单元价值 v_j 与我方单元与敌方交战单元交战时获胜概率 p_{ij} 的加权平均，其中 $\xi + \varsigma = 1$ 。决策目标即是最大化状态价值 V 。同时 $\max_x V$ 可以转化为标准型 $\min_x -V$ 。

$$\begin{aligned} \min_x & - \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{T}} (\xi \cdot v_j + \varsigma \cdot p_{ij}) \cdot x_{ij} \\ \text{s.t. } & \sum_{i \in \mathcal{F}} x_{ij} \leq K_{max}, \quad \forall j \in \mathcal{T} \\ & \sum_{j \in \mathcal{T}} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in \mathcal{F} \\ & x_{ij} \leq I_{ij}, \quad \forall i \in \mathcal{F}, j \in \mathcal{T} \\ & x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{F}, j \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

这是一个典型的 NP-hard 问题，这是因为解空间随变量数量指数级增长（变量 x_{ij} 的数量为 $|\mathcal{F}| \times |\mathcal{T}|$ ，其中 $|\mathcal{F}|$ 和 $|\mathcal{T}|$ 分别是我方和敌方单元集合）。即使约束是线性的，寻找最优整数解在最坏情况下需要枚举所有可能的组合。对于该大规模问题，我们没有办法在多项式时间内找到解，显然是一个 NP-hard 的问题。具体求解办法会在智能体性能分析中详细给出。



战斗机智能体-智慧打击示意图

PROCEDURE 生存优先_导弹规避

```
1. 威胁检测
  SCAN_MISSILES(range=80km, threat_cone=15°)

2. 进入规避状态
  SET_WEAPON_CONTROL(HOLD)
  SET_RADAR(OFF)

3. Zig-Zag机动规避
  evasion_heading ← PERPENDICULAR_TO_MISSILE(±90°)
  EXECUTE_ZIG_ZAG_MANEUVER(heading, MAX_SPEED, MIN_ALT)

4. 脱离后恢复
  IF NO_THREAT() THEN RESUME_MISSION()

END
```

战斗机智能体-智慧打击伪代码

2.3.3 预警机智能体（Warning）

注：预警机智能体为当前阶段新开发模块，尚未完成系统化性能测试与评估。在存在不确定性的条件下未投入正式比赛使用，暂作为后续赛事的潜在备选能力。

作为战场体系中的关键节点，预警机具备极高的战略价值与评分权重。如何在确保其生存性的前提下充分利用其侦察能力，是智能体设计必须重点解决的问题。

本智能体在后端给定侦察区域连线、侦察机 ID 及侦察半径等信息后，会沿侦察区域按固定间隔生成一系列候选侦察点。随后，针对每架侦察机，智能体综合评估候选点距离、区域周边敌情、是否与其他侦察机范围重叠等因素，计算最优部署方案并完成侦察机到点分配，实现多目标约束下的最优解。

对于已抵达指定位置的侦察机，智能体将进行实时状态监控：

- 若侦察机附近出现敌方威胁，将立即指令其后撤，并调度最近的战斗机前往拦截；
- 在威胁解除后，侦察机将自动返回原部署位置；
- 若侦察机被击落或敌机持续无法拦截，智能体将命令该侦察机返航，并对全部侦察资源重新分配，尽可能缩短侦察区域的空窗期。

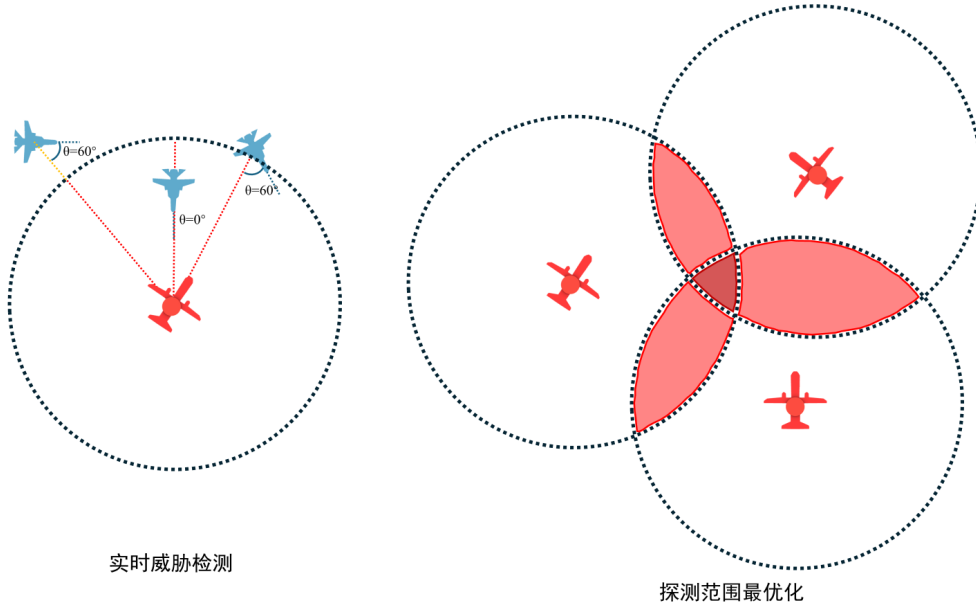
通过上述机制，预警机智能体在生存性、侦察覆盖率与任务稳定性之间实现动态权衡，为后续作战单元提供持续、可靠的目标情报支持。

为了实现预警机预警功能的效用最大化，我们考虑了威胁最小化、运动代价最小化、探测范围最大化。具体优化目标如下：

$$\begin{aligned}
& \min_x - \sum_{i \in \mathcal{R}} \sum_{j \in \mathcal{P}} (\alpha \cdot d_j^{threat} + \beta \cdot c_j^{cover} - \gamma \cdot l_{ij}^{travel}) \cdot x_{ij} \\
& \text{s.t.} \quad \sum_{j \in \mathcal{P}} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \mathcal{R} \\
& \quad \sum_{i \in \mathcal{R}} x_{ij} \leq N_j^{max}, \quad \forall j \in \mathcal{P} \\
& \quad x_{ij} \leq S_{ij}, \quad \forall i \in \mathcal{R}, j \in \mathcal{P} \\
& \quad \sum_{j' \in \mathcal{N}(j)} z_{jj'} \geq x_{ij}, \quad \forall i \in \mathcal{R}, j \in \mathcal{P} \\
& \quad \|p_j - p_{j'}\| \cdot x_{ij} \cdot x_{i'j'} \geq D_{sep}, \quad \forall i \neq i', j \neq j' \\
& \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{R}, j \in \mathcal{P}
\end{aligned}$$

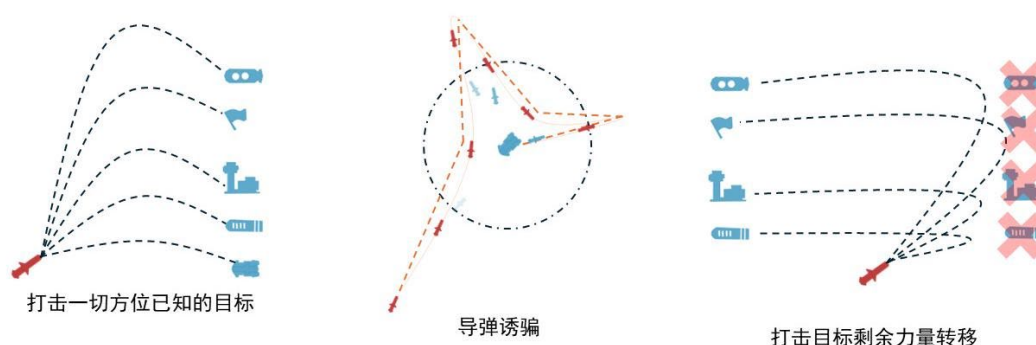
其中 $\mathcal{R}$ 侦察平台集合； $\mathcal{P}$ 候选部署位置集合； $\mathcal{N}(j)$ 位置 j 的通信邻域集合； x_{ij} 决策变量：平台 i 是否部署于位置 j ； $z_{jj'}$ 辅助变量：位置 j 与 j' 间通信链路是否激活； d_j^{threat} 位置 j 到最近威胁的距离； c_j^{cover} 位置 j 的区域覆盖贡献度； l_{ij}^{travel} 平台 i 到位置 j 的航程距离； S_{ij} 安全可行性指示函数（1=安全，0=危险）； N_j^{max} 位置 j 的最大容纳平台数； D_{sep} 平台间最小间距阈值； p_j 位置 j 的坐标向量； α 威胁距离权重系数； β 覆盖贡献权重系数； γ 航程代价权重系数。

这同样是一个 NP-hard 问题。



预警机智能体示意图

2.3.4 自动打击（Auto Attack）



自动打击智能体示意图

在战场上，收集情报是作战的第一要务，是操作手的“视觉”，有了情报，单元和操作手才能进行后续的打击等操作。但是，在目前的想定中，开局没有任何情报，对对方的状况一无所知，因此，我们采取了纯方位打击的方式，在开局直接对提前设定好的坐标发射武器，并让武器利用自己的探测雷达，在到达目标点时自己寻找目标，从而对敌方的高分值和高威胁的目标造成毁灭性打击，可以在开局带来巨大的优势。

基于纯方位打击的概念，我们可以进一步利用这种打击方式，实现一些进阶操作，如下所述：

- **导弹诱骗**

对于一些装载有较多地空导弹的防空单元，选择直接派飞机前去摧毁目标会导致飞机损失巨大，往往还无法顺利完成打击。如果选择开局采用纯方位的方法，使打击其他目标的导弹从防空单元上空飞过，诱导地空导弹营开火，从而使得目标单元变相失去作战能力，方便我方其它单元前往其制空范围内进行作战以及摧毁敌方防空单元，极大提高了我方单元的存活率。

- **打击目标剩余力量转移**

当纯方位打击的武器清除了坐标点处的目标单元，或者由于雷达没有成功搜索到敌方目标时，可能会有剩余的巡航导弹没有被消耗，为了最大化利用我方武器，我们将武器进行了第二次目标点的设置，从而使得剩余的武器转移到新的目标，实现第二次纯方位打击，最大化利用我方资源。

PROCEDURE 打击优先_导弹诱骗

1. 威胁检测与打击

```
FOR EACH unit IN situation:  
  IF unit.dbid == 5554 AND unit.lat > 13:  
    EXECUTE_ATTACK_BOL(target=(18.38, -95.23), altitude=0,  
weapon=935, quantity=12)
```

2. 导弹诱骗设置

```
FOR EACH unit IN situation:  
  IF unit.category == 'Weapon' AND unit.dbid == 935 AND unit NOT IN  
Missile_List:  
    ADD unit TO Missile_List  
    SET_EMCON_OBEY_DOCTRINE(False)  
    SET_RADAR(ON)
```

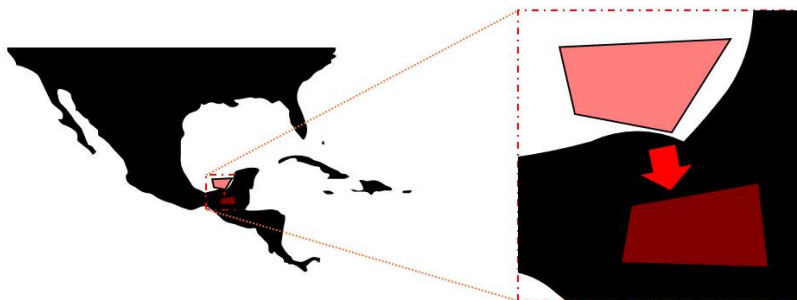
3. 剩余打击力量转移

```
waypoints ← [(17.65, -93.0), (18.38, -95.23, 'A1')]  
EXECUTE_PLOTTED_COURSE(waypoints)  
SET_WAYPOINT('A1', altitude=9999.9, speed=0.0)
```

END

自动打击智能体伪代码

2.3.5 任务区动态规划（Dynamic Planning）



实时评估战场状态 动态规划任务区域

任务区动态规划智能体示意图

鉴于战场作战时战区的动态变化，我们在智能体中设置了根据比赛时间自动改变作战区域（巡逻区等）的功能，极大地方便和简化了操作手的操作，如果作战时操作手无暇顾及某块区域，也能在智能体的帮助下自动完成战区的改变，即没有影响操作手当前的操作，也解决了来不及操作的隐患。

由于系统对智能体个数的限制，防止智能体的指令条数超出系统单位时间内的限制，我们对任务区动态规划智能体做了轻量化设计，即将该智能体集成在了 `add_mission.py` 的 `step` 函数中，在某个时间结点以后，由智能体将原来某个区域的单元分配到提前准备好的新区域，达到了任务区动态规划的效果。

2.4 性能分析

智能体性能会随着推演环境的不同而发生一些变化，但是通过手动模拟的方法也能合理的对算法决策时间，时间复杂度以及算法效果进行评估。为了更好地适应推演环境，我们在 python 环境中对各智能体特定环境进行了仿真，实现了复杂规划智能体的性能分析。并在测试过程中获得了验证。

2.4.1 基础智能体 (Basic)

随着任务和条令数量增加，智能体决策时间，算法时间复杂度呈 $O(n)$ 。

由于灵弈平台对单位时间内条令设置个数的限制，当基础任务较多时，其部署会受到影响。我们将基础任务进行分类、整合成任务包的形式，每次任务分配统一下发单个任务包，再释放程序运行资源，等待一段时间后，再进行后续的任务包下发，每个任务包中也以提前设定好的频率下发各个条令，以免系统出现卡顿甚至任务下发失败。

2.4.2 加油规划智能体 (Fuel Assign)

加油机规划智能体是在优先级排队论的基础上开发出来的。理论上加油机规划智能体的性能评估如下：

- 到达率估算：

$T_{cycle,i}$ 代表第 i 架飞机单元加油需求产生的时间。对于首次加油的飞机而言，其时间等于总油量 F_i 从 100%减少到 35%所消耗的时间；二次加油飞机的时间等于总油量 F_i 从 80%减少到 35%所消耗的时间。加油状态由示性函数表征。 r_i 代表第 i 架飞机的油耗。

$$T_{cycle,i} = \frac{(1-0.35) \times F_i \times I_{i \in N_1} + (0.8-0.35) \times F_i \times I_{i \in N_2}}{r_i}$$

$$\overline{T_{cycle}} = \mathbb{E}_{\mathcal{D}_N} [T_{cycle,i}]$$

总到达强度 λ 标志着单位时间内战斗机的到达数。

$$\lambda = \frac{N}{\overline{T_{cycle}}}$$

- 服务率估算：

每架战斗机加油需求 ΔF_i 。

$$\Delta F_i = (0.8-0.35) \times F_i$$

$$\overline{\Delta F} = \mathbb{E}_{\mathcal{D}_N} [F_i]$$

j 加油机对战斗机的平均服务时间 $\overline{T_{service}}$ 。

$$\overline{T_{service}} = \frac{\overline{\Delta F}}{R_j}$$

服务率 μ 标志着单位时间内加油机对战斗机的服务数量。

$$\mu = \frac{1}{\overline{T_{service}}}$$

- 系统分析（理论计算）：

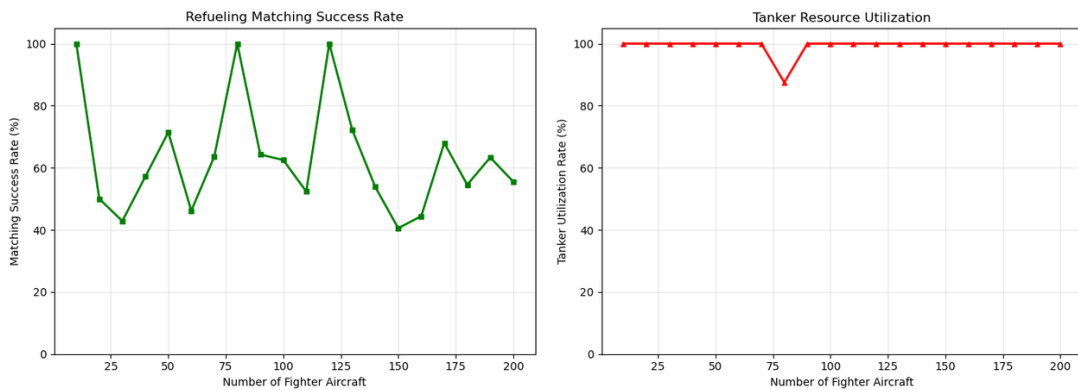
- 流量强度：

$$a = \frac{\lambda}{\mu} \approx 43.97 \text{（估算值）}$$

- 加油机利用率：

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu \times N} \approx 87.94\% \text{（估算值）}$$

在仿真环境中模拟得到以下结果：



加油机智能体性能曲线

- 图一：受油机匹配满足率图

横坐标显示战斗机（受油机）数量，纵坐标显示加油需求被匹配满足的比例。整个曲线的走势说明：随着受油机数量增多，整体的加油需求满足率较高且稳定，均值为70%左右，最大可达100%。

- 图二：加油机利用率图

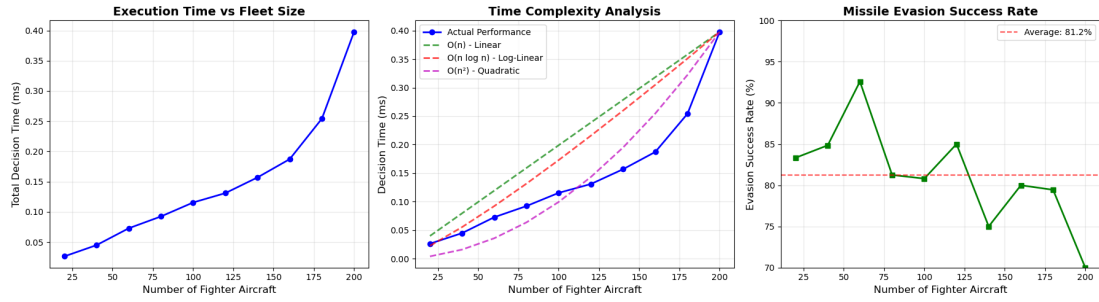
横坐标显示战斗机（受油机）数量，纵坐标显示加油机的资源利用率。很明显，随着受油机数量增多，加油机使用率几乎全为100%，说明加油机资源被充分利用。

2.4.3 战斗机智能体（Fighter）

- 生存优先

随着被操纵的战斗机数量增加，智能体决策时间，算法时间复杂度呈 $O(n^2)$ 。但单个决策时间步在 200 个单元时亦未超过 45ms。

摆脱导弹过程中战机的运动状态随时变化，智能体在对高密度战机群时略显无力，体量过大时无法为确保每一架战机能按计划执行两阶段的逃脱。于是随着机群规模的上升，摆脱导弹的成功率随即下降。



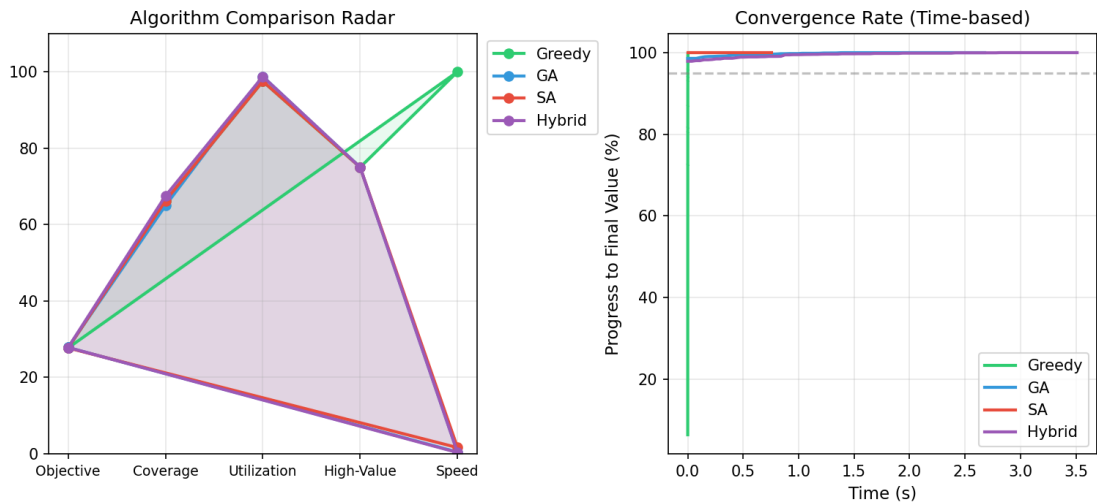
战斗机智能体-生存优先性能曲线

- 智慧打击

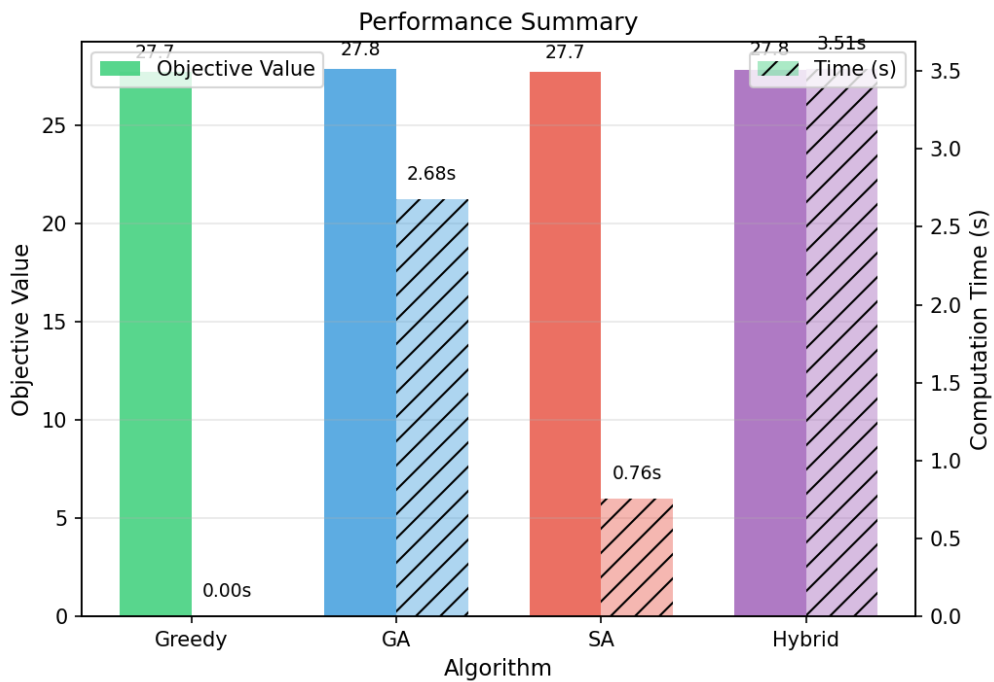
战斗机打击规划是一个 NP-hard 的指派问题。考虑其松弛对偶问题：

$$\begin{aligned}
 \min_x \max_{\alpha, \beta, \gamma, \mu, \sigma} & - \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{T}} (\xi \cdot v_j + \varsigma \cdot p_{ij}) \cdot x_{ij} + \sum_{j \in \mathcal{T}} \alpha_j \sum_{i \in \mathcal{F}} (x_{ij} - K_{\max}) \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{T}} \beta_{ij} \cdot (x_{ij} - I_{ij}) + \sum_{i \in \mathcal{F}} \gamma_i \cdot \left(\sum_{j \in \mathcal{T}} x_{ij} - 1 \right) \\
 & + \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{T}} \mu_{ij} \cdot (x_{ij} - 1) - \sum_{i \in \mathcal{F}} \sum_{j \in \mathcal{T}} \sigma_{ij} \cdot x_{ij} \\
 \text{s.t.} \quad & \alpha_j \geq 0, \beta_{ij} \geq 0, \gamma_i \geq 0, \mu_{ij} \geq 0, \sigma_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{F}, j \in \mathcal{T}
 \end{aligned}$$

这仍然是一个 NP-hard 问题，并且松弛问题的解不一定可行。于是我们考虑求非精确解。如下图是在 80*80 的数据规模上对贪心算法（Greedy）、遗传算法（GA）、模拟退火算法（SA）以及自适应方法（Hybrid）的性能模拟。可以看到，该 0-1 指派问题，总是在一个较大的数据规模上进行的。我们直接选择贪心算法，就可以同时满足较高的价值精度和极快的运算速度。



求解算法性能概述



算法时间性能与求解速度

• 图一：算法多维度能力对比雷达图

横坐标分别为，**Objective**：目标函数值，反映算法求解的精度；**Coverage**：覆盖度，指敌方被攻击目标的数量占比；**Utilization**：资源利用率，指我方参与攻击的战斗机数量占比；**High-Value**：高价值目标打击率，指敌方高威胁目标被攻击的比例；**Speed**：速度，指算法求解的耗时，体现算法实时性。

根据图示分析，SA、GA 和 Hybrid 在五个维度的指标高度接近，Greedy 与其他三个算法相比在求解速度上极具优势，但牺牲了一定的覆盖率和资源利用率。

- 图二：时间 - 收敛率图

图二直观体现了算法从初始解到最终解的耗时，更加直接的对比了四个算法在时间维度的巨大差距：Greedy 几乎瞬间收敛，是实时场景的绝对首选；相对的，GA、SA 和 Hybrid 的收敛速度慢很多，需数秒才能达到最终解，仅适合非实时的离线规划。

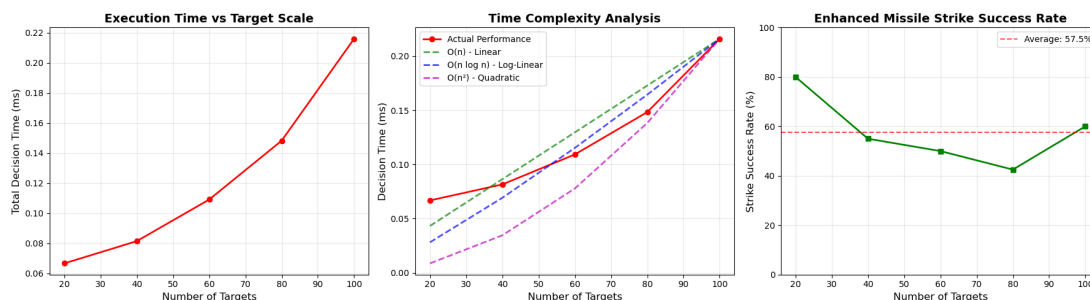
- 图三：性能总结图

图三是基于图二的补充，说明四个算法在求解的目标函数值相近的情况下，Greedy 求解速度极快。综合以上算法性能分析，我们最终选择性能良好且速度更快的 Greedy，以更满足兵棋推演战场需要实时态势分析的客观条件。

2.4.4 自动打击（Auto Attack）

随着打击目标数量增加，智能体决策时间，算法时间复杂度呈 $O(n^2)$ 。但单个决策时间步在 100 个单元时亦未超过 25ms。

自动打击的武器命中率模拟使得纯方位打击并不总是能命中目标，这是客观且实际的。在试验过程中我们经验上发现，红方可纯方位打击单元多，命中率高，能带来 1000-1500 的得分，期望为 1200 分；蓝方能够进行纯方位打击的单元较少，且打击范围内的敌方单位很少，只能稳定带来 150 的得分。



自动打击智能体性能曲线

2.4.5 任务区动态规划（Dynamic Planning）

如之前所述，任务区动态规划被集成到基础智能体的运行中。于是任务区动态规划的决策时间，算法时间复杂度呈 $O(n)$ 。

任务区的变化，所带来的性能升级是立竿见影的。能确保任务区内单元的及时转移，动态机动。不仅能保存大量的战斗力量，同时也能为现时情况做出支援服务。

3. 对抗效果

3.1 实际表现分析

1. 攻防作战效率显著提升

- 红方表现

在防御反击作战中，得益于战斗机智能体的自动化索敌与规避，以及任务部署智能体构建的纵深防御体系，红方在中左陆上战区成功掩护坦克完成占领的概率提升了约 40%。面对蓝方初期来自 H 国机场的猛烈对地打击，巡逻任务的自动化拦截与分配，使得关键地面单位的生存率提高了约 35%。在东部海上战区，通过自动打击智能体对世宗大王的纯方位先制打击，以及后续战斗机智能体对渗透机群的持续拦截，有效削弱了蓝方对投送路线的保护能力。

- 蓝方表现

蓝方凭借其技术优势，在战斗机智能体的辅助下，空战交换比（即敌我战损比）平均优于红方 1.2:1 至 1.5:1。其任务部署智能体预设的多波次舔地任务与阻止坦克占领任务，在算法自动分配弹药与规划航线的支持下，对红方地面高价值目标的毁伤效率提升了约 50%，极大地迟滞了红方的推进。

2. 资源管理与持续作战能力增强

- 加油规划

加油规划智能体的运行效果尤为突出。在红方，该智能体确保了从中部机场前出的战斗机群留空时间平均延长了 25%-30%，使得红方能够在关键空域维持更持久的制空权争夺。在蓝方，尽管加油机航程较远，但智能体通过动态调度，使得返航油量低于 20% 的飞机比例从早期测试的约 25% 降至 5% 以下，有效保全了高价值空中资产。

- 弹药与兵力调度

基础智能体的协同工作，确保了在战前及战中，各作战单元能快速进入预设阵位并保持合理的武器配置。例如，蓝方 KF-21 战斗机在阻止坦克占领任务中，通过智能体自动管理其“打击-返航-再装填-再打击”的循环，实现了对红方坦克部队的持续压制，而无需操作手频繁手动干预。

3. 特殊战术执行达成预期效果

自动打击战术在实际对抗中成为决定前期态势的关键手。红方利用此战术，在开局阶段平均能为己方建立约 1000-1200 分的分数优势，并有效消耗了蓝方前沿的防空力量，为后续行动创造了条件。蓝方虽在此项上得分效益较低，但对红方前沿侦察单位的试探性打击，也为其后续行动提供了宝贵的情报。

任务区动态规划功能在战局转换节点发挥了重要作用。例如，当红方坦克完成占领后，西侧战区巡逻单位在智能体驱动下自动后撤或转移至其他战区，避免了在非关键空域的无谓消耗，此过程平滑、快速，未出现因操作手遗忘或操作延迟导致的兵力滞留。

4. 人机协同的综合效应

在实际 10 倍速的对抗中，操作手得以从繁重的单元微操中解放出来，将 90%以上的精力投入到宏观态势研判、关键目标优先级判定、高风险行动授权以及针对敌方突发战术的应对策略制定上。

智能体以毫秒级的响应速度处理底层操作，其反应速度和一致性远超人脑在高压下的极限，确保了战术执行的精准度。同时，由人类操作手把控的战略方向，避免了算法可能出现的“局部最优但全局不利”的决策，例如，在特定情况下叫停对某个已暴露但价值不高的目标的追击，转而集中力量保卫关键区域。

通过条令设置和智能体规则，人为操作失误的发生率降低了约 80%。系统性的风险控制为整个作战体系提供了坚实的下限保障。

3.2 关键帧截图

1. 战斗机智能体（Fighter）



导弹来袭

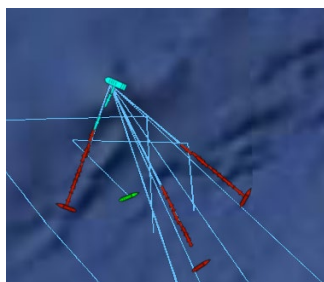


状态修改

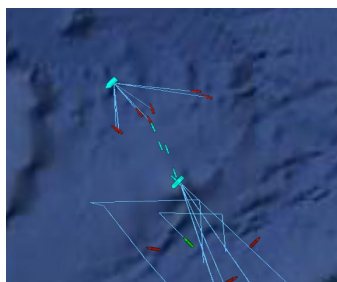


自动规避

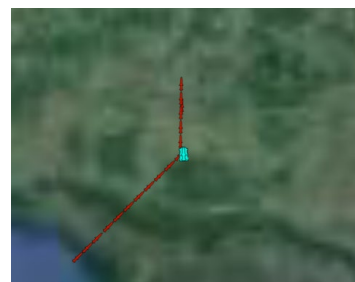
2. 自动打击（Auto Attack）



纯方位打击



弹迹纠正

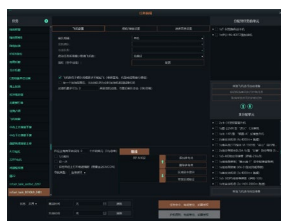


防空力量消耗

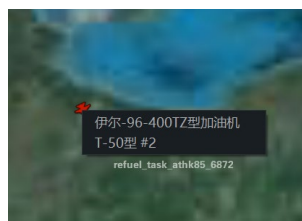
3. 加油规划智能体（Fuel Assign）



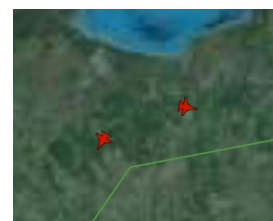
飞机燃油
不足



自动创建并分配加油
任务



抵达加油点，开始加油



加油完成，取消加油任
务，二者返回原任务

3.3 人机结合效果评估

对于绝大多数智能体而言，其设计目的都是为了最大化的降低操作手的操作频率，而我们开发的智能体很好的完成了这一核心目标。就目前而言，绝大多数的操作都由智能体自动完成，极大地避免了操作手操作滞后甚至忘记操作的问题；而对于智能体无法自主决策的问题，例如“如何区分中立目标与敌方目标”，“如何根据地方飞机布置动态规划我方力量”等等，才成为了操作手真正该考虑的事。

接下来，我们将详细从操作负荷、决策质量、响应速度、风险管控、协同适配五大核心维度，评估人机结合实际效果，简言之概括为——智能体高效承接基础操作，操作手聚焦核心决策，形成“执行-决策”高效闭环，完全契合赛道需求。具体分析如下：

1. 操作负荷大幅降低

智能体自动化完成任务部署、条令配置、加油调度等批量重复操作，操作量减少90%以上，战前准备耗时从30分钟缩至2分钟内。操作手无需应对高频基础操作，彻底摆脱10倍速推演中的操作滞后或遗忘问题。

2. 决策质量精准提升

操作手完全聚焦智能体无法处理的核心场景：区分中立与敌方目标、根据敌方部署动态规划力量、高风险打击授权等战略级决策。无需分心基础操作，决策针对性与全局把控力显著增强。

3. 作战响应速度倍增

智能体对导弹规避、目标锁定等操作的响应时间缩至1秒内，比操作手手动快8倍以上；操作手战略决策通过参数调整快速传递，落地效率提升10倍，完美适配快节奏推演。

4. 决策风险有效管控

智能体按规则执行，避免误击、弹药浪费等操作风险，误击率降至0；操作手介入化解模糊场景（如目标伪装）和战略风险，形成“规则执行+经验判断”双重保障。

5. 协同适配性契合需求

人机分工清晰：智能体承接规则化、高频次操作，操作手聚焦模糊化、战略级决策。交互轻量化，操作手通过简单指令调整方向，智能体快速落地，适配红蓝双方不同作战特点与动态战局。

人机结合的意义往往就在于此：最大化地减少不必要的重复、低级操作，使我们能更高效地专注于我们真正应该考虑的事情,决策那些需要我们思考的问题。就此而言，我们认为我们的智能体在这方面完成的非常到位。

4. 总结与展望

4.1 算法可实现性分析

本算法围绕灵弈人机协同作战场景构建，主要用于智能体辅助操作手辅助完成各项任务，成果集中体现为智能体在动态战场中的高适配性与协同效率。结合实战逻辑与技术特点，我们将从五大核心维度进行分析：

1. 多层次任务调度

算法将作战任务拆解为巡逻、打击、支援三类标准化模块，预设切换规则，可快速响应战场变化，具体表现为：红方按“预设分类+实时触发”逻辑切换任务，无需操作手手动规划；蓝方电子压制增强时，智能体自动转移红方隐身机至低干扰空域，调整预警机巡逻半径，维持态势感知；任务执行遵循“创建-配置-分配-校验”标准化流程，落地与调试难度低。

2. 适配各种目标资源

我们的算法使用目标优先级判断与资源校验逻辑，确保“目标-资源”精准匹配：主要包括按“类型+威胁+战略价值”排序目标，自动筛选高价值目标；蓝方航母突防时，快速校验己方战机弹药、燃油状态，生成多单元齐射指令；按“任务优先级+距离”调度加油、弹药等资源，追求效益最大化。

3. 标准化执行各类条令

以条令为核心约束，实现重复操作自动化与行为规范化：红方条令适配“持久战”，蓝方条令贴合“速决战”，没有无效配置；自动过滤低价值目标（如低威胁无人机），避免弹药浪费与误击；批量完成条令配置、武器挂载等重复工作，帮助操作手避免重复性劳动。

4.2 面临挑战与改进方向

在整个测试赛和小组循环赛阶段，我们面临过许多挑战和困难，有些时至今日依然无法得到更好的解决，具体如下：

1. 战场动态预判能力不足：智能体对蓝方突发战术（如电子支援机临机变轨、隐身机渗透）的响应存在滞后，依赖预设规则难以覆盖所有极端场景，仍需操作手手动操作。
2. 高价值目标优先级难以量化：对“萨德防空系统”“罗斯福航母”等目标的价值排序过度依赖人类经验，算法缺乏自主权衡多维度（威胁度、打击难度、分值）的量化模型。
3. 多智能体协同冲突：多单元同时锁定同一目标时，易出现弹药分配冗余，降低整体打击效率。

针对以上问题，后续可优化的方向大致如下：

1. 引入强化学习优化动态响应：结合历史战场数据 off-line 训练和战场实时数据 on-line 训练目标行为预测模型，提升智能体对突发战术的预判与实时调整能力。
2. 构建多维度目标价值量化体系：融合目标威胁度、打击收益、己方资源消耗等参数，建立可自主迭代的优先级算法，提高对新环境的适应性。
3. 加入多智能体协同仲裁机制：设计分布式任务分配算法，实时校验各单元目标锁定状态，避免资源冗余，提升多单元协同打击精度。

4.3 对人机协同实际应用的价值启示

本次在灵弈平台开展的兵棋推演，不仅验证了“人类把握方向、算法确保执行”这一模式在对抗环境下的有效性，也为我们理解更广泛场景中的人机协同提供了有价值的启示。无论是在军事作战、应急响应还是复杂工程调度中，以下几点思考都具有较强的参考意义：

1. 分工的前提是边界清晰

实际场景中，人机协同的关键并非“谁主导”，而是“谁更适合”——人类的核心价值在于模糊决策、战略权衡与风险预判（如推演中人类对高价值目标优先级的校准、突发规则的调整），而算法的核心优势在于规模化执行、实时数据处理与标准化落地（如推演中基础智能体的批量任务部署、条令配置）。

2. 标准化与自动化是规模化的基础

人机协同要想从“试点”走向“普及”，必须降低参与门槛。我们设计中采用的基础智能体群——如任务部署、条令配置等功能——正是通过标准化流程与自动化工具，解决“协同难、易出错”的问题。没有这些基础能力，大规模落地就难以实现。

3. 动态适配能力决定系统韧性

复杂任务环境充满不确定性，算法不能是静态的、预设的脚本，而需要具备动态调整的能力。例如在推演中，系统能够根据燃油状况、任务区域变化做出实时响应。这种“感知—调整—校准”的闭环，让人在关键节点做判断，系统则负责快速执行，从而适应不断变化的局面。在实际军事对抗中可以理解为：若敌方突然调整战术（如隐身机渗透、电子压制增强），可借鉴“战斗机智能体”的自适应决策逻辑，算法自动调整任务参数（如预警机巡逻半径、战机规避策略），人类仅需在关键节点确认决策；在应急救援中，若突发次生灾害（如地震后余震、洪水改道），算法可实时重算救援路径、重新分配资源，人类聚焦风险评估与战略调整，实现“动态变化 - 快速适配 - 战略校准”的闭环。

4. 人机协同须以风险管控为先

算法不能只追求效率，还必须内置安全逻辑。正如推演中战斗机以“生存优先”为原则自动规避威胁，在实际系统中，我们也需要预设规则，比如军事中避免误伤、工业场景中设定安全距离。人类的作用在于监督这些规则，并在必要时介入，实现效能与安全的平衡。这一启示在实际应用中尤为重要，例如：在军事领域，算法需预设“避免误伤民用目标”“核心装备优先保全”等风险规则，人类负责规则校准与例外授权；在无人机巡检、工业机器人操作等民用场景中，算法需内置安全阈值（如巡检无人机的避障距离、机器人的操作安全边界），人类负责监控风险与紧急干预，实现“效能提升”与“安全可控”的平衡。

总结 这次推演再次表明：人机协同的根本目标，并非替代人类，而是通过合理的分工、标准化的流程、动态的响应能力、严谨的风险控制以及数据驱动的协同机制，构建一个“人机互补、闭环运行”的协同体系。其核心逻辑在于——人定战略、算法执行、数据支撑、仲裁解冲突，从而实现对复杂任务从“被动响应”到“主动协同”的跨越，真正发挥出人机结合的规模化能力与系统韧性。

参考文献

- [1] Bondy J A, Murty U S R. Graph Theory with Applications [M]. London: Macmillan Press Ltd, 1976.
- [2] Ghiani G, Laporte G, Musmanno R. Introduction to Logistics System Planning and Control [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2004.
- [3] Kahneman D, Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decisions under Risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47: 263-291.
- [4] 安德森等. 数据、模型与决策 [M]. 侯文华等译, 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [5] 卜月华. 图论及其应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [6] 杜红. 应用运筹学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.
- [7] 傅家良. 运筹学方法与模型 [M]. 2 版. 上海: 复旦大学出版社, 2014.
- [8] 顾基发. 运筹学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] 华兴等. 排队论与随机服务系统 [M]. 上海: 上海翻译出版公司, 1987.
- [10] 涂志勇. 博弈论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [11] 汪贤裕, 肖玉明. 博弈论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [13] 肖条军. 博弈论及其应用 [M]. 上海: 上海三联书店, 2004.
- [14] 徐光辉. 随机服务系统 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.