

ICS 35.240.01

CCS L70

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 02007—2025

无人系统协同感知、决策与控制
效能评估

Collaborative awareness, decision-making, and control for
unmanned systems—Effectiveness evaluation

2025-09-29发布

2025-09-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 效能评估	1
4.1 总体流程	1
4.2 态势感知效能评估	2
4.2.1 态势觉察效能评估	2
4.2.2 态势理解效能评估	4
4.2.3 态势预测效能评估	5
4.3 智能决策效能评估	6
4.3.1 任务解析效能评估	6
4.3.2 规划调度效能评估	7
4.3.3 重规划效能评估	8
4.4 自主规划效能评估	9
4.4.1 路径与轨迹规划效能评估	9
4.4.2 轨迹协调与冲突消解效能评估	10
4.4.3 运行监控与重规划效能评估	12
4.5 运动控制效能评估	12
4.5.1 标称控制效能评估	13
4.5.2 抗不确定性增强控制效能评估	14
4.5.3 安全控制效能评估	15
4.6 基于熵权的组合赋权方法	17
4.6.1 专家指标重要性排序	17
4.6.2 计算熵权值	17
4.6.3 计算相邻指标的重要程度	17
4.6.4 计算三级指标对二级能力的权重	17
4.6.5 二级能力对一级指标及最终权重	17
4.6.6 权重向量输出与评估	18
4.7 无人系统效能等级映射与定性评定	18
4.7.1 等级映射流程	18
4.7.2 等级判定	18
4.7.3 结果输出	19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国指挥与控制学会提出。

本文件由中国指挥与控制学会归口。

本文件起草单位：杭州市滨江区浙工大人工智能创新研究院、中国科学院计算技术研究所、浙江工业大学、湛江科技学院、衢州东南飞视科技有限公司、杭州数字智汇科技发展有限责任公司、杭州翔云智空科技有限公司、东南大学、北京理工大学、南京信息工程大学、珠海紫燕无人飞行器有限公司。

本文件主要起草人：宣琦、朱俊威、俞山青、陈壮志、潘磊、张剑、赵尚上、王琪、李婷婷、徐勇军、吴逸群、钱塘文、司光振、来静、金青松、刘慧、吴凯乐、杨雷超、顾华江、温广辉、周艳、吕跃祖、周佳玲、葛泉波、杨强、王江平、李钊、梅繁文。

无人系统协同感知、决策与控制 效能评估

1 范围

本文件规定了无人系统在态势感知、智能决策、自主规划、运动控制等核心环节的效能评估技术要求，明确了指标体系、评估方法以及权重赋值与等级判定流程。

本文件适用于无人系统的研制、开发、测试、应用与验证过程，可为系统设计、算法优化和性能评价提供统一的依据和规范。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

T/CICC 02001-2025	无人系统协同感知、决策与控制	术语
T/CICC 02002-2025	无人系统协同感知、决策与控制	总体架构
T/CICC 02003-2025	无人系统协同感知、决策与控制	态势感知
T/CICC 02004-2025	无人系统协同感知、决策与控制	智能决策
T/CICC 02005-2025	无人系统协同感知、决策与控制	自主规划
T/CICC 02006-2025	无人系统协同感知、决策与控制	运动控制

3 术语和定义

T/CICC 02001-2025界定的术语和定义适用于本文。

4 效能评估

4.1 总体流程

无人系统效能评估是对系统在任务执行过程中综合表现进行度量与验证的关键环节。总体流程涵盖四个核心模块：态势感知、智能决策、自主规划和运动控制。

在态势感知阶段，通过多源信息采集与融合，实现环境特征、目标属性及威胁态势的精准获取，为后续决策提供基础输入；随后在决策环节中，系统根据感知结果与任务目标，完成任务解析、资源调度和方案优化，确保决策具备科学性和可执行性；在规划环节中，重点对路径生成、轨迹协调与突发情况下的重规划进行评估，以验证系统在复杂动态环境下的适应能力；最后在运动控制环节，评估无人系统在编队保持、避障与毁伤重构中的稳定性和鲁棒性。

该流程不仅强调各环节的量化指标体系，还引入熵权法与专家赋权法的组合方式实现分层加权，确保底层指标可量化、上层指标可解释，从而实现系统效能的全面刻画与等级判定。整体目标是推动无人系统从单点功能验证走向全链路综合效能提升，支持后续的任务优化与应用推广。效能评估总体框架见图1。

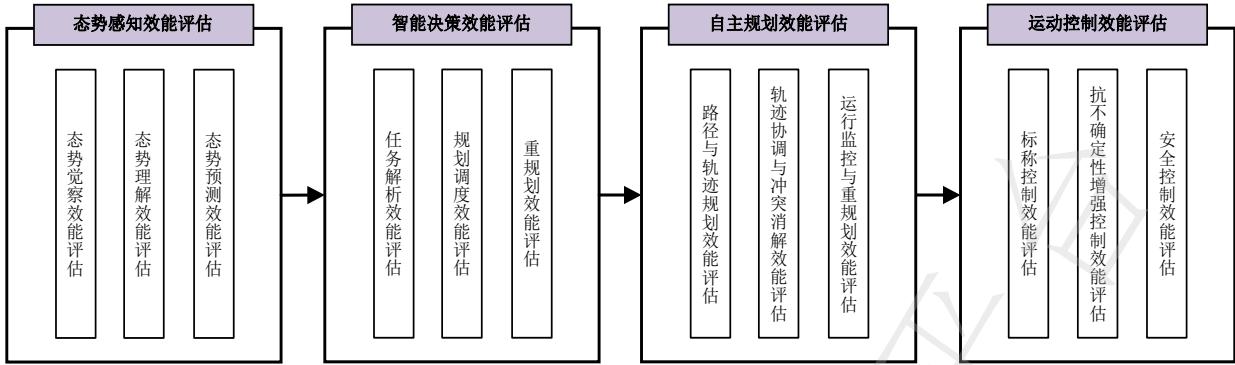


图 1 无人系统效能评估总体框架

4.2 态势感知效能评估

4.2.1 态势觉察效能评估

4.2.1.1 环境感知准确度

环境感知效能评估是对无人系统通过多源传感器实时采集并处理环境信息，以获取光照、天气、能见度等关键参量的能力进行系统性度量的过程。该评估聚焦于对环境的感知能力，其输出是后续态势理解、决策与规划环节的基础输入，直接影响无人系统在复杂动态环境下的生存与任务成功率。主要流程如下：

- a) 多源传感器协同探测与实时数据采集：各无人平台通过光照传感器实时采集环境照度值 L_i （单位： lux ），并同步记录地理坐标与时间戳；通过机载温湿压传感器及微型气象站获取温度、湿度、气压；基于图像对比度算法实时输出能见度估计值 V_i ；
- b) 以时间戳为键，将三源数据对齐至统一坐标系；剔除无效帧后形成有效样本集 N ；
- c) 计算光照强度感知率： $R_{lux} = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{L_i}{L_{ref,i}} \times 100\%$ ，表示无人系统对光照强度的平均准确程度，

其中 N 为无人系统个数， L_i 为第 i 个无人系统测得的环境光照强度（单位： lux ）， $L_{ref,i}$ 为与第 i 个无人系统同一时空位置的标准真值光照强度（ lux ）；

- d) 计算天气感知率： $A_{weather} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta(c_i, c_{ref,i})}{N} \times 100\%$ ，表示无人系统对天气识别的正确比例。其中

C_i 表示第 i 个无人系统输出的天气类别（晴、雨、雾、雪等）， $C_{ref,i}$ 表示第 i 个无人系统对应时刻的真实天气类别（由标准气象站或人工标定给出）， $\delta(c_i, c_{ref,i})$ 表示指示函数当预测类别与真值一致时取 1，否则取 0；

- e) 计算能见度感知率： $R_{vis} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}(|V_i - V_{ref,i}| \leq 50) \times 100\%$ ，表示能见度误差在允许范围内的采样比例，其中 V_i 表示第 i 个无人系统计算得到的能见度估计值（单位：米）， $V_{ref,i}$ 表示第 i 个无人系统对应位置的标准真值能见度， $\mathbb{I}(|V_i - V_{ref,i}| \leq 50)$ 表示指示函数误差在阈值内取 1，否则取

0;

- f) 综合环境感知效能评估：对 R_{lux} 、 $A_{weather}$ 、 R_{vis} 进行 min-max 归一化到 $[0, 1]$ ，利用熵权法或专家打分确定的权重 W_{RL} 、 W_A 、 W_{Rv} ，计算无人系统环境感知能力值，

$$E_{env} = W_{RL} \text{Norm}(R_{lux}) + W_A \text{Norm}(A_{weather}) + W_{Rv} \cdot \text{Norm}(R_{vis})$$

4.2.1.2 目标检测率

目标检测率是评估无人系统在复杂环境中检测目标能力的基础指标，该指标反映了系统对任务区域内实际存在目标的检测能力，是进行后续目标识别和信息融合的基础。目标检测率按 (1.1) 计算：

$$P_d = \frac{N_d}{N_t} \quad (1.1)$$

式中：

N_d —检测到的目标数量，单位为（个）；

N_t —实际存在的目标总数，单位为（个）。

目标检测率是作为后续目标识别率的前提，没有检测到的目标无法进入识别流程；影响信息融合的输入规模。

目标检测率的高低直接依赖于传感器的灵敏度、信噪比、探测算法阈值等底层参数。高目标检测率表明系统具有良好的感知覆盖性；低目标检测率可能导致情报链条断裂，影响态势评估和决策的准确性。

4.2.1.3 目标识别率

目标识别率是衡量无人系统在复杂环境中识别目标准确性的关键指标，反映了系统在识别目标类别、属性和状态方面的能力。该指标对于保障决策准确性和作战有效性至关重要。目标识别率按 (1.2) 计算：

$$P_{id} = \frac{N_{id}}{N_t} \quad (1.2)$$

式中：

N_{id} —正确识别的目标数量，单位为（个）；

N_t —实际存在的目标总数，单位为（个）。

由目标检测率 (1.2) 推出目标识别准确率按 (1.3) 计算：

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1.3)$$

式中：

TP —正确识别为目标的数量，单位为（个）；

TN —正确识别为非目标的数量，单位为（个）；

FP —错误地把非目标识别为目标（误报），单位为（个）；

FN —错误地把目标识别为非目标（漏报），单位为（个）。

4.2.1.4 信息融合配准率

信息融合配准率是衡量无人系统在多源异构数据（雷达、光电、红外、声纳等）处理过程中，实现时间一致性、空间一致性和目标一致性的能力，该指标体系主要用来确保数据的可信性和态势图准确性。主要包含时间融合配准率、空间配准率和目标配准率。

时间配准率按（1.4）计算：

$$P_{time} = \frac{N_{time}}{N_{total}} \quad (1.4)$$

式中：

N_{space} —成功进行空间坐标对齐的数据条目数，单位为（个）；

N_{total} —总目标数量，单位为（个）。

空间配准率按（1.5）计算：

$$P_{space} = \frac{N_{space}}{N_{target}} \quad (1.5)$$

式中：

N_{target} —总目标数量，单位为（个）。

目标配准率按（1.6）计算：

$$P_{target} = \frac{N_{assoc}}{N_{feature}} \quad (1.6)$$

式中：

N_{assoc} —被正确关联到同一目标的特征数量，单位为（个）；

$N_{feature}$ —目标特征图总数量，单位为（个）。

信息融合配准率包括时间配准率、空间配准率和目标配准率三个子指标，分别衡量不同传感器数据的时序同步质量、坐标系和姿态转换的一致性以及多源数据能否正确对应到同一目标。

4.2.2 态势理解效能评估

态势理解效能评估衡量无人系统在检测、识别和信息融合完成后，对战场环境约束、敌方能力与己方机动自由度进行综合分析并形成结构化理解的能力，用于验证无人系统能否准确识别态势、提前预警威胁并为决策提供高可信输入。

4.2.2.1 威胁评估置信度

威胁评估置信度衡量系统在解析敌方装备性能、相对态势和作战环境后，能否正确给出敌方威胁等级的概率值。它直接关系到指挥与控制环节的安全性和合理性，是无人系统态势理解的核心指标。威胁评估度按（1.7）计算：

$$C_{threat} = \frac{N_{correct}}{N_{all}} \quad (1.7)$$

式中：

C_{threat} —威胁评估置信度（0-1 之间的概率），单位为（个）；

$N_{correct}$ —系统正确判定地方威胁等级的次数（如“强威胁判为威胁”），单位为（次）；

N_{all} —所有被判定的威胁次数，单位为（次）。

目标识别率 + 信息融合配准率，提供目标类别、位置和时空一致性数据。同层联系：与意图识别准确率结合，构成“理解”环节的双支撑。上层支撑：威胁评估结果是任务解析和规划调度的直接输入。

作为定量核心指标，用于衡量系统的战场生存性与安全性；在行业标准中，通常设置一个最低阈值（如 ≥ 0.8 ）作为系统能否投入实战的门槛。

4.2.2.2 意图识别准确率

意图识别准确率衡量系统能否根据敌方行为模式、编队形态和动态轨迹，正确推理出敌方的任务意图（例如攻击、防御、撤退、佯攻）。它体现无人系统从“态势描述”迈向“态势理解”的智能化水平。识别率按（1.8）计算：

$$P_{intent} = \frac{N_{intent}}{N_{total}} \quad (1.8)$$

式中：

P_{intent} —意图识别准确率，单位为（次）；

N_{intent} —正确识别敌方意图的次数，单位为（次）；

N_{total} —敌方真实意图的总次数，单位为（次）。

威胁评估结果、目标行为参数（速度、航向、队形）、信息融合数据，同层联系：与威胁评估置信度一起构成态势理解的“认知层”能力。

上层支撑：意图识别结果直接输入到任务重规划和冲突消解环节，是群体智能决策的先决条件。

意图识别是体现“智能”水平的关键分水岭，在标准制定中往往作为高等级能力指标；在实测环节，通过仿真对抗和对比验证，意图识别准确率用于划分系统等级（简单智能→协作→智能）。

4.2.3 态势预测效能评估

态势预测效能评估主要衡量无人系统在完成目标检测、识别、融合和理解的基础上，是否能够对未来态势演化趋势做出及时、准确、可信的推演。

其中，预警准确率和态势判断时效性是两个核心指标：前者反映预测是否正确，后者反映预测是否及时。

4.2.3.1 预警准确率

预警准确率衡量系统在预测潜在威胁时，发出的预警信息中有多少是真实有效的。它是无人系统能否在动态战场中避免“虚警”或“误警”的关键指标。预警准确率按（1.9）计算：

$$P_{warn} = \frac{N_{true}}{N_{warn}} \quad (1.9)$$

式中：

P_{warn} —预警准确率当为 1 的时候说明预警全部正确，可信度高，当为 0 的时候说明虚警，单位为（个）；

N_{true} —真实有效的预警数量（事后验证确认预警事件确实发生），单位为（个）；

N_{warn} —系统发出的预警总数，单位为（个）。

预警准确率通常作为系统能否投入复杂对抗场景的“硬性指标”，标准中会给出最低阈值（如 ≥ 0.8 ）；是无人系统由“辅助信息系统”转向“作战核心系统”的关键评价点。

4.2.3.2 态势判断时效性

态势判断时效性衡量系统从接收输入数据到输出预测结果所需的时间，体现系统的实时性和快速反应能力。在高动态环境中，即使预测正确，若延迟过长，也会导致行动错失最佳时机。态势判断时效性按（1.10）计算：

$$T_{latency} = T_{out} - T_{in} \quad (1.10)$$

式中：

T_{in} —输入数据进入态势预测模块的时刻，单位为（秒）；

T_{out} —系统输出预测结果的时刻，单位为（秒）。

态势判断时效性是行业标准中“系统实时性”的核心考核点；常规定义不同任务等级下的最大允许时延（如 $\leq 200\text{ms}$ ），确保在对抗环境下有足够提前量。

4.3 智能决策效能评估

4.3.1 任务解析效能评估

任务解析效能评估是指将上级下达的复杂任务分解成若干个逻辑合理、可执行的子任务的过程。它解决的是“任务怎么拆”的问题。如果分解不完整，就可能遗漏关键步骤；如果分解过于复杂，子任务之间耦合过高，则会影响后续的调度和执行效率。主要流程如下：

- a) 接收总体任务及约束条件；
- b) 利用分解方法（如层次任务网络 HTN、图论分解、专家知识规则等）对任务进行层级化拆分；
- c) 明确各个不同子任务之间的先后依赖关系；
- d) 输出各个不同子任务集和分解方案。

主要作用是为规划调度提供清晰的任务清单；保证无人系统执行任务的覆盖性和合理性；提前发现任务中的潜在冲突点或薄弱环节。

4.3.1.1 任务分解完成度

任务分解完成度按（1.11）计算：

$$C_T = \frac{N_{done}}{N_{total}} \quad (1.11)$$

式中：

N_{done} —表示已经覆盖的任务需求点数量，单位为（个）；

N_{total} —表示任务需求点数总数，单位为（个）。

4.3.1.2 任务分解效率

任务分解效率按（1.12）计算：

$$Eff_{dec} = \frac{N_{dec}}{T_{dec}} \quad (1.12)$$

式中：

N_{dec} —表示单位时间内分解完成的任务数量，单位为（个）；

T_{dec} —表示分解所用时间，单位为（秒）。

4.3.1.3 方案完备性

方案完备性按（1.13）计算：

$$Comp = \frac{N_{covered}}{N_{req}} \quad (1.13)$$

式中：

$N_{covered}$ —分解后被覆盖的任务点，单位为（个）；

N_{req} —总任务需求点；衡量分解后的方案能否覆盖全部需求点，单位为（个）；

4.3.1.4 任务完成率

任务完成率按（1.14）计算：

$$P_{task} = \frac{N_{finish}}{N_{total}} \quad (1.14)$$

式中：

N_{finish} —表示成功完成的任务数量，单位为（个）；

N_{total} —表示总任务数量，单位为（个）。

4.3.2 规划调度效能评估

规划调度效能评估是指在任务解析完成后，对无人系统资源进行合理分配，安排子任务执行顺序和时空关系的过程。它解决的是“任务怎么分”的问题。接收任务目标、约束条件、可用资源列表及当前态势信息，记录规划任务开始时间。实施流程如下：

- a) 输入子任务清单和无人系统资源情况；
- b) 执行任务分配（哪个无人系统做什么任务）；
- c) 安排时序与路径，解决可能的冲突（时间冲突、资源冲突）；
- d) 生成可执行的调度方案。

主要作用保证任务分配合理性和覆盖性；提高资源利用率，减少冲突与冗余；确保无人系统能在时限内高效执行任务。

4.3.2.1 任务分配效率

任务分配效率按（1.15）计算：

$$Eff_{alloc} = \frac{N_{alloc}}{T_{alloc}} \quad (1.15)$$

式中：

N_{alloc} —表示成功分配的任务数量，单位为（个）；

T_{alloc} —表示分配耗费的时间，单位为（秒）。

4.3.2.2 资源调度效率

资源调度效率按（1.16）计算：

$$Eff_{res} = \frac{R_{used}}{R_{total}} \quad (1.16)$$

式中：

R_{used} —表示有效利用的资源量；

R_{total} —资源总量。

4.3.2.3 冲突解决成功率

冲突解决成功率按（1.17）计算：

$$R_{conf} = \frac{N_{conf_solved}}{N_{conf_total}} \quad (1.17)$$

式中：

N_{conf_solved} —表示解决掉的冲突数量，单位为（个）；

N_{conf_total} —总冲突数量，单位为（个）。

4.3.3 重规划效能评估

重规划效能评估是指在执行过程中，因环境变化、任务插入、无人系统故障等突发情况而对任务、方案进行快速调整的过程。它解决的是“任务变了怎么办、方案变了怎么办”的问题。主要流程如下：

- a) 实时监测任务/方案执行状态与环境变化；
- b) 当触发条件出现时（例如目标丢失、无人系统故障、任务插入），启动重规划模块；
- c) 生成新的规划调度策略/决策方案；
- d) 输出新的规划调度策略/决策方案，并进行质量、时间及适应性。

主要作用是保证无人系统在动态环境下仍能完成核心任务；提高系统的适应性和鲁棒性；避免因突发情况导致任务失败。

4.3.3.1 重规划质量

重规划质量按（1.18）计算：

$$Q_p = \frac{Score_{new}}{Score_{ref}} \quad (1.18)$$

式中：

$Score_{new}$ —表示新方案的得分（可基于覆盖率、效率等加权），单位为（个）；

$Score_{ref}$ —表示原始方案或者参考方案的得分。

通过计算新规划方案得分与原始方案得分的比值，直观反映重规划后方案在覆盖率、效率等综合指标上相对于原方案的优劣程度，为规划方案的优化效果提供量化判断依据。

4.3.3.2 重规划响应时间

重规划响应时间按 (1.19) 计算:

$$T_{rp} = T_{end} - T_{start} \quad (1.19)$$

式中:

T_{rp} —表示重规划耗时, 单位为 (秒);

T_{start} —触发重规划的时刻, 单位为 (秒);

T_{end} —生成新方案的时刻, 单位为 (秒)。

通过生成新方案的时刻与触发重规划时刻的差值, 直观反映系统从需重规划到完成新方案生成的耗时, 是评估重规划时效性的关键量化依据。

4.3.3.3 重规划适应性指数

重规划适应性指数按 (1.20) 计算:

$$I_{adp} = \frac{N_{success}}{N_{events}} \quad (1.20)$$

式中:

$N_{success}$ —表示在突发条件下仍成功完成任务的次数, 单位为 (个);

N_{events} —总突发事件的次数, 单位为 (个)。

通过计算突发条件下成功完成任务的次数与总突发事件次数的比值, 直观反映系统借助重规划在突发状况中仍能完成任务的概率, 是衡量重规划可靠性与场景适应性的关键量化依据。

4.4 自主规划效能评估

4.4.1 路径与轨迹规划效能评估

路径与轨迹规划效能评估是无人系统自主规划环节的基础环节, 旨在为无人系统生成无碰撞、可执行、效率高的路径和轨迹。其主要流程如下:

- a) 接收环境建模与任务约束信息, 构建任务执行空间;
- b) 基于路径规划算法生成全局可行路径;
- c) 在路径规划的基础上开展路径测试;

这一指标直接影响无人系统能否在动态环境中高效、安全地完成任任务。

主要性能指标包含如下几个:

4.4.1.1 路径安全性

路径安全性用于衡量生成路径在空间上是否满足安全约束。对于路径上的每个离散点 P_i , 计算其与周围障碍物边界点 O 的直线距离; 其计算公式按 (1.21) 计算:

$$d_i = \|P_i - O\| \quad (1.21)$$

式中:

P_i —路径上的离散点;

O —障碍物边界的点；

要确保 $d_i \geq d_{safe}$ ，其中 d_{safe} 为无人平台的安全距离要求。

4.4.1.2 路径规划效率

路径规划效率反映路径的长度代价，路径越短，说明效率越高。路径长度代价计算公式按 (1.22) 计算：

$$L_{path} = \sum_{i=1}^{N-1} \|P_i - P_{i+1}\| \quad (1.22)$$

式中：

P_i 、 P_{i+1} —表示路径上相邻的两个点；

N —路径点的总数；

4.4.1.3 路径平滑度

路径平滑度是用于衡量路径的连续性与流畅性，反映转折是否平稳。路径平滑代价按 (1.23) 计算：

$$C_{smooth} = \sum_{i=1}^{N-2} |\theta_{i+1} - \theta_i| \quad (1.23)$$

式中：

θ_i —路径点处的切线方向，表示路径折线段的夹角。

4.4.1.4 轨迹平滑度

轨迹平滑度用于衡量轨迹的连续性与可控性。通过计算轨迹点的切线方向与参考坐标轴的夹角，可以评估轨迹转弯变化是否平稳。计算公式按 (1.24) 计算：

$$S_{smooth} = \sum_{i=1}^M |\theta_i - \theta_{ref}| \quad (1.24)$$

式中：

θ_i —轨迹点 T_i 处的切线方向；

θ_{ref} —参考坐标轴方向；

M —轨迹点总数。

4.4.1.5 轨迹舒适度

轨迹舒适度是用于评价无人系统执行轨迹时的动态特性，反映速度与加速度变化对平台平稳性的影响。舒适度计算公式按 (1.25) 计算：

$$S_{comfort} = \sum_{i=1}^M (|v_i| + |a_i|) \quad (1.25)$$

式中：

v_i —轨迹点 T_i 处的速度；

a_i —轨迹点 T_i 处的加速度， M 为轨迹点的总数。

4.4.2 轨迹协调与冲突消解效能评估

轨迹协调与冲突消解效能评估是对无人系统在执行过程中，协调自身轨迹、避免潜在冲突以及在冲突发生时快速消解的能力与效率进行系统性度量的过程。该评估重点关注系统在动态环境中的安全性

和协调性，是确保行动连续性与稳定性的关键环节。主要流程如下：

- a) 实时接收路径规划模块输出的候选轨迹与执行状态；
- b) 执行轨迹一致性检查，分析可能的时空冲突风险；
- c) 调用冲突检测与消解算法，生成新的安全轨迹方案；
- d) 输出协调后的轨迹，并同步更新执行模块的控制指令。

这是确保无人系统行动安全性与协同性的核心指标。

4.4.2.1 轨迹协调成功率

轨迹协调成功率按（1.26）计算：

$$P_{coord} = \frac{N_{succ}^{coord}}{N_{all}^{coord}} \quad (1.26)$$

式中：

N_{succ}^{coord} — 轨迹协调成功次数，单位为（次）；

N_{all}^{coord} — 轨迹协调尝试总次数，单位为（次）。

衡量系统在多无人系统环境下能否生成满足协同约束的轨迹方案。成功率越高，说明算法鲁棒性越强。

4.4.2.2 行为一致性

行为一致性按（1.27）计算：

$$C_{cons} = \frac{N_{cons}}{N_{total}} \quad (1.27)$$

式中：

N_{cons} — 各无人系统中表现出一致行为的采样次数（如方向、速度、队形满足协同约束），单位为（次）；

N_{total} — 总采样次数，单位为（次）。

衡量无人系统在执行过程中动作是否统一。高一致性说明系统具备良好的协同控制能力；一致性差则可能导致队形混乱；

路径与轨迹规划的合理性决定轨迹协调的基础。如果路径规划错误或代价过高，轨迹协调难以顺利进行。

同层配合：行为一致性与冲突避免率相辅相成，既要“齐心”，也要“安全”。

支撑上层：轨迹协调与冲突消解的结果直接影响运行监控与重规划模块。若冲突频繁或避免率过低，则必然增加重规划压力。

4.4.2.2 冲突避免

冲突避免按（1.28）计算：

$$R_{avoid} = \frac{N_{avoid}}{N_{conflict}} \quad (1.28)$$

式中：

N_{avoid} —成功避免潜在冲突的次数，单位为（次）；

$N_{conflict}$ —检测到潜在冲突的次数；衡量冲突检测与消解算法的有效性，单位为（次）。

避免率越高，说明系统具备更强的抗碰撞能力和安全性。

4.4.3 运行监控与重规划效能评估

运行监控与重规划效能评估主要衡量无人系统在任务执行过程中，面对环境变化、目标丢失、设备故障或外部干扰等突发情况时，能否实时监控任务执行状态并快速生成新的规划方案。具体流程如下：

- a) 持续监测任务执行状态与外部环境参数，识别异常事件或性能劣化；
- b) 在检测到突发情况后，触发重规划模块并收集当前状态信息；
- c) 生成新的任务规划与调度方案，并进行可行性与质量评估；
- d) 输出更新方案并切换执行，确保任务连续性与稳定性。

这是确保无人系统具备动态适应性和鲁棒性的关键环节。

4.4.3.1 重规划方案质量

重规划方案质量按（1.29）计算：

$$Q_{replan} = \frac{Score_{new}}{Score_{ref}} \quad (1.29)$$

式中：

$Score_{new}$ —新方案得分，基于覆盖率、效率、航程代价等多维度加权计算；

$Score_{ref}$ —原始或参考方案得分；

反映新方案相对于原方案的可行性和优劣。若 $Q_{replan} \geq 1$ ，说明新方案与原方案质量相当或更优；若

$Q_{replan} \leq 1$ ，说明新方案质量有所下降；

4.4.3.2 重规划响应时间

重规划响应时间按（1.30）计算：

$$T_{resp} = T_{out} - T_{trigger} \quad (1.30)$$

式中：

T_{resp} —重规划响应时间，单位为（秒）；

T_{out} —重规划出发时间（如检测到任务突变或冲突发生），单位为（秒）；

$T_{trigger}$ —新规划方案生成完成的时刻，单位为（秒）。

衡量系统应对突发情况的速度。时间越短，说明系统的实时性和快速反应能力越强。

路径与轨迹规划模块提供初始方案，轨迹协调模块提供执行任务中冲突检测结果。方案质量和响应时间需要兼顾，不能只快不优，也不能只优不快。高效重规划保证整个系统在突发情况下仍能保持行动连续性，避免任务中断。

4.5 运动控制效能评估

4.5.1 标称控制效能评估

标称控制效能评估用于衡量无人系统在复杂任务执行过程中，能否通过轨迹跟踪、目标攻击与环境态势感知、避障与多源融合感知等关键环节，实现任务执行的高效性、稳定性与安全性。评估重点在于系统在不同场景下的路径精度、任务完成度以及环境适应性，从而验证无人系统在动态和高对抗环境中保持作战效能的能力。

4.5.1.1 轨迹跟踪控制效能评估

轨迹跟踪控制效能评估用于度量无人系统在执行预定轨迹时的偏差水平，反映其在复杂环境中维持航迹精度的能力。常用指标为均方根轨迹误差。指标衡量公式按（1.31）计算：

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \|x(t) - x_d(t)\|^2 dt} \quad (1.31)$$

式中：

$x(t)$ —实际轨迹位置；

$x_d(t)$ —期望轨迹位置；

T —评估时域长度。

当 E_{rms} 越小，说明无人系统轨迹控制精度越高。

4.5.1.2 姿态稳定控制效能评估

姿态稳定控制效能评估用于度量无人系统在任务执行及外部扰动下保持稳定飞行姿态的能力，反映系统抵抗不确定性与干扰的水平。常用指标包括姿态角偏差、稳定裕度以及恢复时间。姿态稳定性效能可通过姿态角偏差的均方根（RMS）来量化。具体公式按（1.32）计算：

$$J_\theta = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\theta(t) - \theta_d(t))^2 dt} \quad (1.32)$$

式中：

J_θ —姿态角误差均方根，反应姿态稳定性水平；

$\theta(t)$ —实际姿态角；

$\theta_d(t)$ —期望姿态角；

T —任务执行时常。

当 J_θ 越小，说明系统姿态控制精度越高，抗干扰与稳定性水平。

4.5.1.3 任务动作时序控制效能评估

任务动作时序控制效能评估用于度量无人系统在执行复杂任务时，动作时序是否满足既定计划与逻辑约束，确保系统动作执行的精确性与协调性。评估时序效能的常用指标为动作时序偏差率。评估指标按（1.33）计算：

$$\eta_{seq} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M |t_i^{act} - t_i^{plan}|}{\sum_{i=1}^M t_i^{plan}} \quad (1.33)$$

式中：

η_{seq} —动作时序控制效能评估；

t_i^{act} —第 i 个任务动作的实际执行时间；

t_i^{plan} —第 i 个任务动作的计划时间；

M —总动作数量。

当 η_{seq} 接近 1，说明无人系统的动作时序与预定计划高度一致，保证了任务动作的准确执行与协调控制。

4.5.2 抗不确定性增强控制效能评估

抗不确定性增强控制效能评估用于度量无人系统在遭受外部扰动、突发故障及网络攻击等多种不确定性因素作用下，依托鲁棒控制、容错控制与容侵控制机制，维持系统稳定性与任务连续性的能力。评估内容涵盖鲁棒控制、容错控制、容侵控制指标三个方面，全面反映系统在复杂环境下的鲁棒性与可靠性。

4.5.2.1 鲁棒控制效能评估

鲁棒性控制效能评估用于度量无人系统在任务执行过程中保持稳定的安全余量，反映其抵抗不确定性和干扰的能力。常用的两个指标是相位裕度和增益裕度。评价指标（1.34）、（1.35）计算：

$$PM = 180^\circ + \angle L(j\omega_{gc}), \quad |L(j\omega_{gc})| = 1 \quad (1.34)$$

$$GM = \frac{1}{|L(j\omega)|}, \quad \angle L(j\omega_{pc}) = -180^\circ \quad (1.35)$$

式中：

$L(s) = C(s)G(s)$ —表示无人系统模态回路的开环传递函数；

ω_{gc} —是增益交叉频率；

ω_{pc} —相位交叉频率。

在无人系统场景中，通常取所有分歧模态的最小 PM 与 GM 作为系统整体的稳定裕度。

4.5.2.2 容错控制效能评估

容错控制效能评估用于度量无人系统在部分节点失效或通信链路中断情况下，能否通过补偿与调度机制维持整体任务效能与网络连通性。容错能力指数按（1.36）计算：

$$F = \frac{\sum_{i \in \psi} f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (1.36)$$

式中：

f_i —第 i 个无人系统的任务效能；

ψ —在失效或中断条件下仍能维持效能的系统集合；

N —无人系统总数。

F 取[0-1], 当 F 越接近 1, 说明系统容错控制能力越强。

4.5.2.3 容侵控制效能评估

容侵控制效能评估用于衡量无人系统在遭受网络攻击、数据篡改等恶意入侵条件下, 保障任务连续性与信息完整性的能力。容侵能力指数按 (1.37) 计算:

$$I = \frac{\sum_{j=1}^M d_j^{valid}}{\sum_{j=1}^M d_j} \quad (1.37)$$

式中:

d_j^{valid} —有效数据量;

d_j —总数据量;

M —数据传输总次数。

I 取[0-1]当 I 越接近 1 说明系统在入侵条件下保持数据完整性与安全性的能力越强。

4.5.3 安全控制效能评估

安全控制效能评估用于衡量无人系统在执行任务过程中, 能否通过状态感知、异常检测与多源数据融合等机制, 保障运行安全性与任务连续性。其核心在于系统对运行状态的实时监测、对潜在风险的诊断以及对异常情况的快速响应能力。评估内容包括位姿估计控制效能评估、异常检测控制效能评估、多源数据融合控制效能评估三个方面。

4.5.3.1 位姿估计效能评估

位姿估计控制效能评估用于衡量无人系统在复杂环境中对位置、速度和姿态等关键状态量的实时估计精度。位姿估计误差按 (1.38) 计算:

$$E_{pose} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \|p(t) - p_d(t)\|^2 dt} \quad (1.38)$$

式中:

$p(t)$ —实际位姿状态向量;

$p_d(t)$ —期望参考位姿;

T —评估时间区间。

E_{pose} 单位为 m, E_{pose} 当越小, 说明位姿估计越准, 控制系统越稳定。

4.5.3.2 异常检测效能评估

异常检测控制效能评估用于度量无人系统在任务执行中识别异常工况 (如运动偏差、传感器故障、通信丢失或外部攻击) 的能力, 反映其在不确定环境下的诊断与响应速度。异常检测准确率按 (1.39) 计算:

$$D = \frac{N_{det}}{N_{tot}} \quad (1.39)$$

式中:

N_{det} —成功检测到的异常事件数;

N_{det} —实际发生的异常事件总数。

当 D 越接近 1，说明异常检测越准，系统安全性越强。

4.5.3.3 能源管理效能评估

能源管理效能评估用于度量无人系统在执行任务和遭遇故障恢复过程中，通过能源感知、路径规划与任务分配实现能源利用最优化的能力。其目标是在保障核心任务正常执行的前提下，最大化系统的能源利用效率与续航能力，从而提升系统的可靠性与任务持续性。能源利用率评估标准按 (1.40) 计算：

$$\eta_E = \frac{\sum_{i=1}^N E_i^{\text{task}}}{\sum_{i=1}^N E_i^{\text{total}}} \quad (1.40)$$

式中：

$$\eta_E = \frac{\sum_{i=1}^N E_i^{\text{task}}}{\sum_{i=1}^N E_i^{\text{total}}}$$

η_E —能源利用率；

E_i^{task} —第 i 个无人系统用于任务执行的效能评估；

N —系统中无人系统的总能耗。

当 η_E 越接近 1，说明能源主要用于核心任务执行，管理越合理；当 η_E 较低，说明存在能耗浪费或能源分配不均匀的问题。

4.5.3.4 动态网络重构率

动态网络重构率衡量无人系统在遭受打击后完成拓扑修复的概率。优先网络重构率按 (1.41) 计算：

$$E = \frac{\sum_{i,j \in \{1, \dots, N\}, N_0} a_{ij}}{\sum_{i,j \in \{1, \dots, N\}} a_{ij}} \quad (1.41)$$

式中：

N —无人系统的数量；单位为（个）；

N_0 —遭受攻击的无人系统集合；

a_{ij} —邻接矩阵的第 i 行第 j 列元素。

4.5.3.5 网络重构恢复事件

网络重构恢复时间定义为系统从遭受打击到网络拓扑重新收敛所需时长。网络重构恢复事件按 (1.42) 计算：

$$T_{\text{recover}} = t_{\text{stable}} - t_{\text{fail}} \quad (1.42)$$

式中：

t_{stable} —网络拓扑收敛至连通且满足任务约束的时刻；

t_{fail} —无人系统遭受打击的时刻。

4.6 基于熵权的组合赋权方法

通过专家主观排序与客观数据熵值融合的组合赋权流程，为无人系统效能评估指标体系中的各级指标分配最终权重。方法分五步完成，符号定义与计算细节如下：

4.6.1 专家指标重要性排序

在指标体系二级能力中共设 L 个能力 ($i=1, 2, \dots, L$)，第 i 个二级能力下再设 M_i 个三级指标。专家需针对 k 个待评估任务样本，给出所有 $\sum_{i=1}^L M_i$ 个三级指标的相对重要性排序。

4.6.2 计算熵权值

4.6.2.1 特征比重

设第 k 个待评估对象在第 i 个二级能力第 j 项能力指标下的数据为 v_{ijk} ，则特征比重为 h_{ijk} 为

$$h_{ijk} = \frac{v_{ijk}}{\sum_{k=1}^K v_{ijk}} \quad (1.43)$$

4.6.2.2 熵值

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln K} \sum_{k=1}^K h_{ijk} \ln h_{ijk} \quad (1.44)$$

4.6.2.3 熵权值

$$u_{ij} = \frac{1 - e_{ij}}{\sum_{i=1}^L M_i - \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{M_i} e_{ij}} \quad (1.45)$$

4.6.3 计算相邻指标的重要程度

设 $r_{i,j-1}$ 为第 i 个二级能力第 $j-1$ 项指标与第 j 项指标的重要程度：

$$r_{i,j-1} = \begin{cases} \frac{u_{i,j-1}}{u_{ij}}, & u_{i,j-1} \geq u_{ij} \\ 1, & u_{i,j-1} < u_{ij} \end{cases} \quad (1.46)$$

4.6.4 计算三级指标对二级能力的权重

4.6.4.1 末端权重

$$f_{i,M_i} = \left(1 + \sum_{t=2}^{M_i} \prod_{j=t}^{M_i} r_{i,j-1} \right)^{-1} \quad (1.47)$$

4.6.4.2 其余权重递推

$$f_{i,j-1} = r_{i,j-1} f_{ij} \quad (1.48)$$

4.6.5 二级能力对一级指标及最终权重

4.6.5.1 二级能力的熵权

$$u_i = \sum_{j=1}^{M_i} u_{ij} \quad (1.49)$$

4.6.5.2 计算相邻二级能力重要程度

$$r_{i-1} = \begin{cases} \frac{u_{i-1}}{u_i}, & u \pm u_{i-1} \geq u_i \\ 1, & u \pm u_{i-1} < u_i \end{cases} \quad (1.50)$$

4.6.5.3 二级能力权重

$$W_L = \left(1 + \sum_{l=2}^L \prod_{i=l}^L r_{i-1} \right)^{-1} \quad (1.51)$$

$$W_{i-1} = r_{i-1} W_i \quad (1.52)$$

第*i*个二级能力第*j*项指标的权重 W_{ij}

$$W_{ij} = f_{ij} \cdot W_i \quad (1.53)$$

4.6.6 权重向量输出与评估

将所得权重向量应用于群智感知、决策、规划、控制四大指标及其下各级指标，完成最终效能评分计算并输出。

4.7 无人系统效能等级映射与定性评定

根据所述无人系统效能评估计算结果，映射至对应的定性等级，所述定向等级包括简单智能、群体协作和群体智能。简单智能对应多机-单任务水平，仅能完成基础环境感知、识别简单动作、完成基础任务分解，控制端仅要求简单环境路径规划、编队保持和内部避碰即可完成简单任务；群体协作开始展现多机协同特征，具备静态目标识别、判断任务区域与意图的能力，可进行小规模战术规划和中等复杂度的任务分解，并具备了一定的任务分配和资源调度能力，同时在控制端进行动态环境路径规划和基本冲突解决能力，引入外部静态避障与毁伤重构以应对复杂场景；群体智能则达到高阶涌现层级，支持动态目标识别，能在高对抗、高动态、资源受限条件下实时判断复杂任务意图，执行多目标、长周期战略规划，并在控制端实现资源分配、动态复杂环境下路径规划与冲突解决，同时对外部动态障碍的敏捷规避及快速毁伤重构，胜任复杂突发任务。

4.7.1 等级映射流程

所有三级指标均先按归一化，再通过熵权-专家组合赋权法动态调整权重，最终计算综合得分 $E_{total} \in [0, 1]$ 。

4.7.2 等级判定

无人系统效能等级判定见表 1

表1 无人系统效能等级判定

等级命名	等级量值	无人系统态势感知	无人系统智能决策	无人系统自主规划	无人系统运动控制
简单智能	0.0-0.35	环境感知能力 判断简单环境下动作	基础任务分解	简单环境路径规划	编队保持 内部避碰 完成简单任务
群体协作	0.35-0.75	环境感知能力 静态目标识别 判断简单环境下动作和任务意图	中等复杂度的任务分解 小规模任务规划 具备一定的任务分配和资源调度能力 任务重规划有限	动态环境路径规划 具备基本冲突解决能力	编队保持 内部避碰 外部静态避障 毁伤重构 完成复杂任务

群体智能	0.75-1.0	环境感知能力 动态目标识别 实时判断复杂环境下动作和任务意图	高复杂度的任务分解 任务完成度高 具备高效的任务分配和资源调度能力 任务重规划能力强 长远任务规划	资源分配高效 动态复杂环境路径规划 复杂冲突解决能力	编队保持 内部避碰 外部动态避障 毁伤重构 完成复杂突发任务
------	----------	--------------------------------------	---	----------------------------------	--

4.7.3 结果输出

输出等级标签、对应能力描述及基于等级的优化建议。