

ICS 35.240.01

CCS L70

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 02002—2025

无人系统协同感知、决策与控制
总体架构

Collaborative awareness, decision-making, and control for unmanned
systems—Overall architecture

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	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	1
4.1 自主性要求	1
4.2 智能性要求	1
4.3 协同性要求	2
4.4 可靠性要求	2
4.5 安全性要求	2
5 无人系统协同感知、决策与控制总体架构	3
5.1 构成要素	3
5.2 总体架构和功能要求	3
5.3 态势感知	4
5.3.1 核心模块	4
5.3.2 态势觉察	4
5.3.3 态势理解	4
5.3.4 态势预测	5
5.4 智能决策	5
5.4.1 核心模块	5
5.4.2 任务解析	5
5.4.3 规划调度	5
5.4.4 重规划	6
5.5 自主规划	6
5.5.1 核心模块	6
5.5.2 规划建模	6
5.5.3 路径规划	6
5.5.4 轨迹规划	6
5.5.5 轨迹协调与冲突消解	7
5.5.6 运行监控与重规划	7
5.6 运动控制	7
5.6.1 核心模块	7
5.6.2 标称控制	7
5.6.3 抗不确定性增强控制	7
5.6.4 安全控制	8
5.7 效能评估	8
5.7.1 核心模块	8
5.7.2 态势感知效能评估	8

5.7.3 智能决策效能评估	8
5.7.4 自主规划效能评估	9
5.7.5 运动控制效能评估	9
5.8 验证测试	9
5.8.1 核心模块	9
5.8.2 数字仿真	9
5.8.3 半实物仿真测试	10
5.8.4 实物测试	10

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》的规定编写。

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：东南大学、合肥工业大学、南京航空航天大学、西北工业大学、北京理工大学、合肥徽自机器人技术有限公司、北京万创鑫诚技术有限公司、杭州市滨江区浙工大人工智能创新研究院、南京信息工程大学、南京航电飞讯科技有限公司、珠海紫燕无人飞行器有限公司。

本文件主要起草人：温广辉、赵丹、王利楠、付俊杰、房肖、雷旭强、刘剑、都海波，余兰林，朱文武，朱敏，孙训红、彭秀辉、王融、杨浩、熊智、文利燕、赵宇、刘永芳、张栋、吕跃祖、周佳玲、董亚峰、付桃、陆鑫、张强、宣琦、朱俊威、葛泉波、南晓娅、方连娣、朱道宏、王江平、李钊、梅粲文。

无人系统协同感知、决策与控制 总体架构

1 范围

本文件规定了无人系统协同感知、决策与控制的总体要求、总体架构、组成要素和功能要求。

本文件适用于无人系统的研发、评估、测试、部署和运行等环节，旨在规范无人系统协同感知、决策与控制的架构设计。

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

3 术语和定义

T/CICC 02001-2025界定的术语和定义适用于本文件。

4 总体要求

4.1 自主性要求

无人系统为实现在复杂环境下的自主稳定运行，需具备完整的自主能力体系，重点体现在任务自主执行、抗毁生存保障及系统自维护能力。具体要求如下：

- a) 全流程自主执行能力：支持任务目标智能分解、资源动态调度、实时风险评估及应急预案自动生成；
- b) 断网独立生存能力：节点在脱离系统网络时，可基于本地知识库与感知数据自主执行预设任务；
- c) 系统自维护能力：通过实时健康监测模块自动诊断硬件故障与软件异常，触发冗余切换机制。

4.2 智能性要求

无人系统为实现高效、自主、协同的感知、决策与控制，需具备高度的智能性，重点体现在软硬件平台、通信协议、环境感知、自主决策与持续进化能力上。具体要求如下：

- a) 模块化系统架构：支持模块化扩展；
- b) 高性能硬件平台：采用低功耗高性能芯片，支持边缘节点与中心节点的分布式协同处理；
- c) 先进通信协议：具备抗干扰能力和频谱效率优化机制，支持稳定高效的信息交互；
- d) 复杂环境智能认知能力：具备对地理环境、气象条件、电磁态势等环境条件的自主感知与分析能力，能够实时/近实时地检测、识别、跟踪任务目标、威胁源等动态要素，并持续监测地形障碍等静态要素，支持融合处理雷达、红外等多源异构传感器的数据，提升环境认知的准确性与鲁棒性；

- e) 智能决策能力：基于感知数据构建并实时更新对任务环境的理解模型，融合人工智能、边缘计算、数值模拟等先进技术，支持动态环境下的智能决策与资源优化，集成多种智能算法，实现动态任务规划与威胁规避等任务；
- f) 智能运动控制能力：支持人工智能驱动的智能运动控制执行与反馈；
- g) 持续进化能力：内置知识库管理系统，可通过历史任务数据自动优化多层次任务规则策略。

4.3 协同性要求

无人系统为实现效能非线性跃升，系统需具备协同合作能力，重点体现在协同组网、群体态势感知、分布式决策、自适应协同控制等方面。具体要求如下：

- a) 协同通信组网：构建抗毁、自组织通信网络，支持个体无人装备动态接入与智能中继，确保无人系统低延时、高可靠、大带宽的信息交互；
- b) 协同感知与群体认知：依托无人系统搭载的多样化传感器，实现对地理、电磁、气象等多源异构环境信息的自主、分布式采集，构建全域态势感知基础；确保多源感知信息在无人系统中近实时同步与高效共享，形成群体态势认知；
- c) 协同任务分配与资源调配：支持无人系统间协同制定或动态调整行动计划，确保行动在时空上的协调一致与冲突避免；具备高效、实时的分布式任务分配能力，能够根据目标、约束、效益等因素，将全局任务最优或次优地分解、指派给某无人系统或无人群组；支持动态协同重分配以响应突发情况；动态共享计算、通信、能源等资源，并进行全局优化配置，以实现最大化整体资源利用效率；
- d) 协同运动控制：确保复杂环境下机动安全性与整体效率；
- e) 弹性协同与抗毁重组：当部分无人系统失效时，整体系统能够自动检测，并快速、自主地调整任务分配、编队结构、通信路由和信息流，最小化对整体任务效能的影响；在部分或间歇性通信中断条件下，支持基于本地信息、预设规则或分布式协商的降级协同模式，保持基本协同能力，并在通信恢复后快速同步。

4.4 可靠性要求

无人系统具备在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力，重点保障环境适应性、架构容错性、运行鲁棒性、故障自愈性与系统降级能力。具体要求如下：

- a) 环境适应能力：无人系统可在特定环境（温度、湿度、风速、降雨、电磁环境）条件下稳定工作；
- b) 架构容错能力：无人系统采用高可靠性架构与冗余设计，计算、传感等关键部件具备较低故障率；
- c) 运行鲁棒能力：无人系统对传感器噪声、定位误差、外部干扰等不确定性具有强鲁棒性，保障运行稳定性与任务完成度；
- d) 动态自愈与重组能力：在部分无人系统失效、通信中断或环境扰动下，整体系统能自主进行故障检测、任务效能评估，并动态重构任务分配、资源调度与执行方案，维持核心功能；
- e) 动态智能降级：在遭遇通信中断、传感器失效等局部故障时，无人系统可自动切换至预定义的降级模式，保障基本任务的持续性。

4.5 安全性要求

无人系统为应对环境中的复合威胁，需建立覆盖物理层-通信层-系统层的纵深防御体系，各层防护措施应相互协同，形成整体防御能力。具体要求如下：

- a) 物理安全防护：设计物理安全防护机制，对无人实体、地面控制站等设备有效实施定位追踪与非法接入检测；
- b) 通信安全防护：通信链路采用高强度加密技术与密钥管理机制，确保数据传输机密性与完整性；
- c) 系统安全防护：部署入侵检测与防御系统，实时监测与快速响应网络攻击行为；开展危险源辨识与安全设计，降低关键节点故障导致灾难性后果的风险。

5 无人系统协同感知、决策与控制总体架构

5.1 构成要素

无人系统协同感知、决策与控制系统由以下核心要素组成：

- a) 无人装备：携带任务载荷、搭载自主控制系统、具备机动能力的物理载体（如无人机、无人车、无人艇等），是任务的最终执行单元；
- b) 任务载荷：集成于无人平台的感知传感器（如雷达、光电、声呐）和执行机构（如机械臂、投放装置），实现环境信息获取与任务动作执行；
- c) 指挥控制中心：系统的指挥中枢，负责全局任务管理、决策制定与协同控制；
- d) 人机交互终端：为操作人员提供监控系统状态（平台位置、装备健康、任务进展、环境态势）、下达指令、进行人工干预与接收预警信息的交互界面；
- e) 通信网络：由卫星通信设备、中继平台及自组网技术构建的通信链路，保障系统内外部信息交互的实时性、可靠性与抗毁性；
- f) 外部接口：与外部环境信息系统及其他无人系统进行信息交互和协同决策的接口；
- g) 算法与软件模块：嵌入实时操作系统与协同控制算法的软件系统，支撑协同感知、决策及控制；
- h) 支撑保障设备：提供能源补给、维护保养、运输部署等功能的配套装备，确保系统持续运行能力。

5.2 总体架构和功能要求

无人系统协同感知、决策与控制依托抗毁组网与天基信息支援，构建“态势感知-智能决策-自主规划-运动控制-效能评估-验证测试”闭环为核心的多层级协同架构，见图1。各层级的功能如下：

- a) 态势感知层：通过无人平台搭载的雷达、光电、声呐等异构传感器实时采集环境与目标数据，依托边缘/云端计算进行多源信息融合与处理，生成动态更新的全局态势图；
- b) 智能决策层：基于实时态势，运用分布式强化学习、博弈论等群体智能算法完成任务分解、规划调度及重规划，通过“集中全局优化+分布自主决策”混合架构输出协同策略；
- c) 自主规划层：基于多源信息，依托分布式智能架构、感知系统等，构建含规划建模、路径生成、冲突协调等核心模块的闭环运动规划链路，以实时生成安全协同的路径/轨迹规划方案；
- d) 运动控制层：将指令转化为平台级控制信号，经高抗毁自组网通信分发至无人装备，通过实时操作无人系统实现精准协同动作执行；

- e) 效能评估层：以四大核心模块为主线：态势感知、智能决策、自主规划和运动控制，对系统在任务执行过程中综合表现进行度量，驱动策略重规划与系统动态重构，形成决策闭环；
- f) 验证测试层：通过数字仿真、半实物仿真测试和实物测试，全面验证和评估无人系统能否稳定、高效、自主地完成预期任务，最终为研发和部署提供支撑。

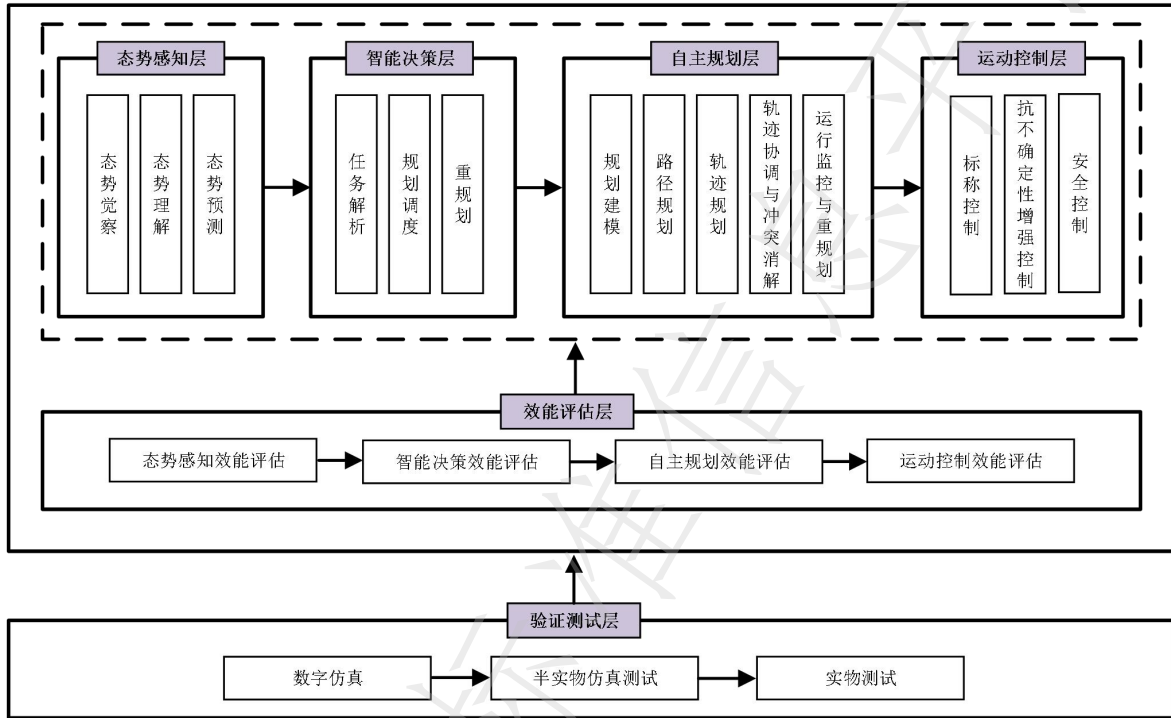


图1 无人系统协同感知、决策与控制体系架构图

5.3 态势感知

5.3.1 核心模块

态势感知的核心模块包括态势觉察、态势理解和态势预测。

5.3.2 态势觉察

态势觉察是指通过各类传感器和信息收集设备，实时获取环境中与无人系统任务相关的原始数据，并对这些数据进行初步处理和整合的过程，这是协同态势感知中的基础环节。核心模块包括：

- a) 多源数据获取：负责采集环境中的各类原始数据；
- b) 数据传输：负责将原始数据传输至处理中心或各无人系统；
- c) 数据预处理：负责对原始数据进行清洗、过滤、校准和归一化处理，去除干扰信息，提高数据质量和可用性；
- d) 目标检测与识别：负责确定数据中目标的类别、属性等；
- e) 目标跟踪：负责对检测到的目标进行持续监测；
- f) 信息融合：负责将来自不同传感器的数据进行融合处理。

5.3.3 态势理解

态势理解是在态势觉察的基础上，对已经获取和整合的环境信息进行深入分析、综合判断和意义阐释的过程，其为指挥决策提供深度依据。核心模块包括：

- a) 态势特征提取：从融合数据中提取关键特征；
- b) 态势关联：对态势要素数据进行分组，确定态势要素之间的关联关系；
- c) 威胁评估：识别潜在威胁并分析来源、类型、发展趋势及可能影响；
- d) 意图识别：推断目标未来行动意图；
- e) 态势共享：将处理后的态势信息高效分发给各相关单元；
- f) 态势一致性评估：确保无人系统感知的态势与实际态势的一致性，以及系统内部各无人系统对态势认知的一致性；
- g) 态势图构建：形成当前态势的综合图形表达。

5.3.4 态势预测

态势预测是基于态势觉察和态势理解的结果，运用科学的方法和模型，综合利用历史数据、实时信息和领域知识，对未来一段时间内态势的发展趋势进行预估的过程。核心模块包括：

- a) 意图预测：基于当前态势信息，运用合适的算法，推测敌方或对抗系统未来的行动意图；
- b) 要素预测：通过对当前环境各类要素的收集、分析和建模，预测未来可能出现的环境要素的状态和变化趋势；
- c) 风险预测：对指控筹划中的潜在风险进行预估。

5.4 智能决策

5.4.1 核心模块

智能决策的核心模块包括任务解析、规划调度与重规划。

5.4.2 任务解析

任务解析是指无人系统在接收上级指令或任务需求后，将抽象的战略目标转化为可执行方案的系统性思维过程。核心模块包括：

- a) 任务理解：负责解析战略意图、目标分层体系、约束条件和优先级评估；
- b) 目标排序：指依据环境态势、目标价值及系统能力等指标，对目标对象进行智能筛选和优先排序，以实现行动效益最大化；
- c) 任务分解：负责将高层复杂任务拆解为原子化、可独立执行的子任务，确保子任务间的逻辑完备性与互斥性；
- d) 装备编组：根据任务需求、环境约束及装备的能力，将个体动态组合为功能互补的子群，以优化任务执行效能的过程；
- e) 方案生成：基于环境态势和总体目标，结合解析得到的子任务集，生成多个备选行动方案；
- f) 方案优化：在生成多个备选行动方案后，通过智能算法与动态评估，进一步提升方案的可行性、有效性与适应性的过程。

5.4.3 规划调度

规划调度是在任务解析的基础上，根据环境态势、任务需求和系统资源状态，实现各无人系统高效协同的过程。核心模块包括：

- a) 任务分配：将任务合理分发/分配给系统中的个体，实现任务能力需求与个体能力的最优匹配；
- b) 资源调度：基于实时态势感知数据，合理分配和调度有限的资源，以最大化任务执行效率；

- c) 冲突消解：通过多源态势感知数据融合、分布式智能决策与动态协同策略，解决无人系统因任务逻辑矛盾或资源竞争占用导致的冲突问题。

5.4.4 重规划

重规划是在无人系统执行任务过程中，基于实时态势和任务执行情况，对原有决策进行评估、调整和优化的闭环过程。核心模块包括：

- a) 任务重规划：负责在局部环境变化或单元状态异常时，对原有任务分配、资源调度和执行逻辑进行动态修正；
- b) 方案重规划：负责在态势发生重大变化或战略目标调整时，对整体任务计划进行系统性优化，确保系统能够适应新的环境和任务需求。

5.5 自主规划

5.5.1 核心模块

自主规划的核心模块包括：规划建模、路径规划、轨迹规划、轨迹协调与冲突消解、运行监控与重规划。

5.5.2 规划建模

规划建模是自主规划的基础环节，负责将环境信息、平台状态、通信约束、任务目标与平台能力等，转化为形式化、结构化表达，构建面向系统协同的统一规划约束体系。核心子模块包括：

- a) 环境建模：利用感知系统构建结构地图、障碍物模型与空间约束区域，为导航有效区域划定和动态避障提供依据；
- b) 状态建模：描述平台动力学特性、初始目标状态及轨迹可达性，支撑后续轨迹生成的可控性分析；
- c) 通信约束建模：构建平台间通信拓扑、失链安全半径与容错机制，保障协同连贯性；
- d) 目标建模：将抽象任务目标转化为可量化的位置、时间与优先级约束，支持多平台目标分配与协同路径优化；
- e) 平台能力约束建模：刻画各平台的运动能力、感知能力、能源模型、载荷属性与计算资源，为路径生成、任务分配与资源调度提供关键约束与匹配依据。

5.5.3 路径规划

在障碍物信息、任务目标与空间约束条件下，为各平台生成无碰撞的几何路径的过程。核心模块包括：

- a) 路径优化建模：通过构建数学模型对路径的代价分布与约束条件进行量化评估的过程，旨在提升路径的经济性、平滑性与载体适配性，为后续路径生成提供优化标准；
- b) 路径生成：根据已建立的优化模型和约束条件，通过特定算法计算出具体几何路径的过程。

5.5.4 轨迹规划

在已生成几何路径的基础上，为其赋予时间维度，生成满足系统动力学约束与任务时序要求的可执行轨迹的过程。核心模块包括：

- a) 轨迹优化建模：在既定路径点基础上，通过构建目标函数与轨迹安全约束形成待求解优化问题的过程，旨在为各无人平台生成最优轨迹提供数学模型；
- b) 轨迹生成：在满足安全约束的前提下，通过最优化轨迹代价指标函数获得轨迹点集合的过程。

5.5.5 轨迹协调与冲突消解

轨迹协调与冲突消解是解决平台之间在时空维度上的潜在冲突、执行资源竞争等问题的关键机制，确保系统整体规划方案的可执行性与安全性。核心模块包括：

- a) 优先级协调机制：依据任务紧急度、平台等级与策略规则，建立执行优先级排序体系，解决交叉路径、竞争资源等问题；
- b) 时空冲突规避：采用空间错位、时间错开等手段引导平台避让，保障动态执行过程的无碰撞性；
- c) 编队与让行策略：设计变队、让行、汇入汇出等微观协调策略，支撑动态队形调整与场景内灵活协同通行。

5.5.6 运行监控与重规划

运行监控与重规划是自主规划系统在任务执行阶段的自适应闭环机制，通过实时感知系统状态，评估规划偏差，必要时触发部分或整体路径或轨迹重规划，保障系统稳健运行与任务连续性。核心模块包括：

- a) 实时监测：持续监控轨迹执行状态、平台健康状况与外部环境变化，捕捉潜在异常与风险事件；
- b) 触发判定：依据轨迹偏差、通信失效、目标变更等条件，定义局部路径/轨迹重规划或全局重构的触发机制与判断逻辑；
- c) 路径重规划：当原路径因障碍物变化、任务调整等触发事件失效时，重新生成无碰撞几何路径；
- d) 轨迹重规划：原轨迹因动态障碍、动力学约束突破等失效时，基于新路径，重新生成含时间与动力学信息的可执行运动序列；
- e) 失效处理：当无人系统路径或轨迹重规划失效或在执行规划过程中出现突发故障、通信中断、环境突变等异常情况，快速响应并采取有效措施，以保障任务的连续性、安全性和可靠性。

5.6 运动控制

5.6.1 核心模块

运动控制的核心模块包括：标称控制、抗不确定性增强控制、安全控制。

5.6.2 标称控制

标称控制是在无明显外部扰动和系统故障的情况下，依托稳定的控制算法实现高精度和高可靠性的运动与任务执行。核心模块包括：

- a) 轨迹跟踪控制：无人系统减小其实际运动轨迹与期望轨迹之间的误差的控制过程，是标称控制的基础能力，用于衡量无人系统对规划路径的执行效果；
- b) 姿态稳定控制：无人系统实现姿态保持或快速恢复到期望值的控制过程，是保障轨迹跟踪精度的关键环节；
- c) 任务动作时序控制：无人系统严格依据规划时间轴触发、执行并协调任务动作的控制过程。

5.6.3 抗不确定性增强控制

在外部扰动、突发故障、网络攻击等不确定环境下，无人系统保持稳定、鲁棒、安全协同运行。核心模块包括：

- a) 鲁棒控制：通过在控制设计中预设稳定性和性能裕度，使得无人系统在存在模型参数变化或外部扰动时，仍能保持稳定并维持基本性能；

- b) 容错控制：当系统发生部件（如传感器、执行器）故障或部分无人系统失效时，通过重构控制律或调度备份资源，确保任务可降级持续执行；
- c) 容侵控制：在存在网络攻击的时，无人系统维持关键控制指令的有效传递和执行，防止因攻击导致的失控、碰撞、任务失败或被恶意利用，最大限度保障系统自身安全和控制目标达成。

5.6.4 安全控制

安全控制指通过对控制策略、参数配置和任务分配进行持续改进，使系统在面对长期运行和突发事件（如运动偏差、通信延迟、传感器故障、目标丢失或外部干扰攻击）时仍能保持高效与鲁棒性运行。核心模块包括：

- a) 运行状态监控：通过状态估计、异常检测和多源数据融合等技术，对无人系统各单元在任务执行过程中的动态状态进行实时感知、分析与诊断，为系统在复杂环境下的稳定控制提供持续的信息支持；
- b) 故障恢复：基于运行状态与历史数据，在出现异常或故障时快速定位问题、采取补救措施，以维持或恢复系统的性能与任务执行能力。

5.7 效能评估

5.7.1 核心模块

效能评估的核心模块包括：态势感知效能评估、智能决策效能评估、自主规划效能评估和运动控制效能评估。

5.7.2 态势感知效能评估

态势感知效能评估是对无人系统在环境中获取、处理、整合及呈现信息能力的系统性评价，围绕多维度信息处理环节构建评估体系。核心模块包括：

- a) 态势觉察效能评估：对无人系统在复杂环境中获取并理解任务态势能力的综合评价，用于衡量其态势认知的准确性、完整性和及时性，指标包括：环境感知准确度、目标检测率、目标识别率和信息融合配准率；
- b) 态势理解效能评估：衡量无人系统在态势觉察完成后，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，指标包括：威胁评估置信度、意图识别准确率；
- c) 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态势觉察和态势理解的基础上，是否能够对未来态势演化趋势做出及时、准确、可信的推演，指标包括：预警准确率、态势判断时效性。

5.7.3 智能决策效能评估

智能决策效能评估是对无人系统在任务规划、目标处置及方案优化过程中自主决策能力的系统性评价，围绕决策流程的关键环节构建评估体系。核心模块包括：

- a) 任务解析效能评估：将上级下达的复杂任务合理拆分为可执行子任务能力的综合评价，用于衡量任务拆解的完整性、效率及可执行性，指标包括：任务分解完成度、任务分解效率、方案完备性、任务完成率；

- b) 规划调度效能评估：依据任务需求和可用资源，合理分配子任务、安排执行顺序与时空关系能力的综合评价，用于衡量任务分配的合理性、资源利用率及在复杂条件下的调度鲁棒性，确保无人系统协同高效执行任务，指标包括：任务分配效率、方案完备性、任务完成率；
- c) 重规划效能评估：在执行过程中因环境变化、任务插入或平台故障等突发情况，快速调整任务、方案能力的综合评价，用于衡量系统在动态环境下的反应速度、适应性和鲁棒性，确保核心任务能在干扰与变化中顺利完成，指标包括：重规划质量、重规划响应时间、重规划适应性指数。

5.7.4 自主规划效能评估

自主规划效能评估是对无人系统路径/轨迹规划能力的系统性评价，围绕规划流程的主要环节构建评估体系。核心模块包括：

- a) 路径与轨迹规划效能评估：在任务和环境约束条件下，生成无碰撞、可执行路径与轨迹能力的综合评价，指标包括：路径安全性、路径规划效率、路径平滑度、轨迹平滑度、轨迹舒适度；
- b) 轨迹协调与冲突消解效能评估：度量无人系统在执行过程中，协调自身轨迹、避免潜在冲突以及快速消解实际冲突的能力与效率，指标包括：轨迹协调成功率、行为一致性、冲突避免率；
- c) 运行监控与重规划效能评估：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，指标包括：路径/轨迹重规划方案质量、路径/轨迹重规划响应时间。

5.7.5 运动控制效能评估

运动控制效能评估是对无人系统将决策与规划方案转化为实际行动的能力及效果的系统性评价，围绕机动执行、威胁应对及主动干预等关键行动环节构建评估体系。核心模块包括：

- a) 标称控制效能评估：度量无人系统在标称工况下任务执行过程中，通过轨迹跟踪控制、姿态稳定控制、任务动作时序控制等关键环节，实现任务高效、稳定执行的能力，指标包括：轨迹误差均方根、姿态角偏差均方根、动作时序偏差率；
- b) 抗不确定性增强控制效能评估：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下，依托鲁棒控制、容错控制与容侵控制，维持系统稳定性与任务持续执行的能力，指标包括：相位裕度、增益裕度、容错能力指数、容侵能力指数；
- c) 安全控制效能评估：度量无人系统在执行任务过程中，通过实时监测系统状态、快速识别异常、并及时采取恢复措施，来预防和控制可能出现的故障、干扰或攻击，从而确保系统能够安全、可靠地运行的能力，指标包括：位姿估计误差、异常检测准确率、能源利用率、动态网络重构率、网络重构恢复时间。

5.8 验证测试

5.8.1 核心模块

验证测试的核心模块包括：数字仿真、半实物仿真测试和实物测试。

5.8.2 数字仿真

数字仿真依托高保真仿真平台，构建无人系统的虚拟模型，模拟复杂任务场景和极端条件，验证控制算法、通信协议和任务规划策略的可行性和鲁棒性。核心模块包括：

- a) 态势感知测试：在高保真仿真环境中模拟多源场景与干扰，运行感知、态势理解和预测算法，综合评估其在目标探测、威胁判定和预警中的准确性、鲁棒性与时效性；
- b) 智能决策测试：在多层级仿真平台中全链路测试任务分解、资源调度与重规划算法，评估其在复杂与动态条件下的效率、适应性与稳定性；
- c) 自主规划测试：在高保真仿真环境中测试路径规划、协同冲突规避与路径/轨迹重规划算法，评估其在多扰动条件下的效率、稳定性与协同一致性；
- d) 运动控制测试：在高保真数字孪生仿真中验证多平台协同、毁伤重构及避障算法，评估其在复杂扰动下的稳定性、安全性、网络恢复和任务延续能力。

5.8.3 半实物仿真测试

半实物仿真测试是将部分真实硬件设备接入仿真环境，实现软硬件联合验证，全面检验软硬件兼容性、通信稳定性与实时交互性能，为实装阶段奠定基础。核心模块包括：

- a) 态势感知测试：在半实物硬件在环平台中接入真实处理单元与仿真数据流，验证态势感知、理解与预测算法在硬件约束与非理想条件下的实时性能、稳定性与可靠性；
- b) 智能决策测试：在半实物平台中接入真实算法和硬件，注入模拟任务与突发事件，量化评估决策、解析、调度和重规划算法在硬件约束下的性能、稳定性与鲁棒性；
- c) 自主规划测试：在半实物硬件在环平台中部署规划、协调与重规划算法，接入模拟数据并注入干扰，量化评估其在真实硬件约束下的实时性、资源占用与鲁棒性；
- d) 运动控制测试：在多类型在环平台中接入真实控制、通信与感知硬件，闭环验证其在真实接口与动态扰动下的实时性、适配性、资源占用与协同性能。

5.8.4 实物测试

实物测试是在真实物理环境中部署无人系统，全面检验系统在复杂地形、电磁干扰和动态任务调整等实际条件下的适应性和可靠性。核心模块包括：

- a) 态势感知测试：在室内、室外及对抗环境中，通过多源真值系统与标准化场景，全面评估感知、态势理解与预测算法在真实复杂条件下的准确性、时效性与可靠性；
- b) 智能决策测试：在综合与对抗环境中，针对模糊动态任务全链路验证解析、调度与重规划算法，量化评估其在真实条件下的准确性、执行效率、资源利用率与任务恢复能力；
- c) 自主规划测试：在室内外测试场通过高精度真值系统与人工扰动注入，全面验证单平台与多平台规划算法在实时性、避障、协同与重规划任务中的精度、安全性与完成度；
- d) 运动控制测试：在室内、室外及外场环境中，通过高精度真值系统验证多平台在编队保持、网络重构与真实环境避障中的精度、鲁棒性、安全性及协同性能。