

ICS 35.240.01

CCS L70

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 02005-2025

无人系统协同感知、决策与控制

自主规划

Collaborative awareness, decision-making, and control for unmanned  
systems—Autonomous planning

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 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 自主规划 .....	1
4.1 总体流程 .....	1
4.2 总体目标 .....	1
4.3 核心特性 .....	2
4.3.1 安全性 .....	2
4.3.2 协同性 .....	2
4.3.3 实时性 .....	2
4.3.4 可扩展性 .....	2
5 规划建模 .....	2
5.1 概述 .....	2
5.2 环境建模 .....	2
5.2.1 地图构建 .....	2
5.2.2 障碍建模 .....	2
5.2.3 区域划分 .....	3
5.2.4 时空约束集成 .....	3
5.2.5 实时更新 .....	3
5.3 状态建模 .....	3
5.3.1 动力学建模 .....	3
5.3.2 初始状态设定 .....	3
5.3.3 边界条件建模 .....	3
5.3.4 状态不确定性描述 .....	3
5.3.5 多维度价值评估 .....	3
5.3.6 状态评估与更新 .....	3
5.4 通信约束建模 .....	3
5.4.1 链路状态建模 .....	3
5.4.2 通信范围建模 .....	3
5.4.3 安全包络定义 .....	4
5.4.4 通信策略植入 .....	4
5.4.5 通信层级建模 .....	4
5.5 目标建模 .....	4
5.5.1 目标解析与分类 .....	4
5.5.2 目标表达构建 .....	4
5.5.3 多目标协同关系建模 .....	4
5.5.4 动态更新机制 .....	4

5.5.5	目标达成评估指标建模	4
5.6	平台能力约束建模	4
5.6.1	运动能力约束建模	4
5.6.2	感知能力约束建模	4
5.6.3	能源约束模型建模	4
5.6.4	载荷能力约束建模	5
5.6.5	计算资源约束建模	5
6	路径规划	5
6.1	路径优化建模	5
6.1.1	路径代价	5
6.1.2	路径安全约束	5
6.2	路径生成	5
6.2.1	路径搜索	5
6.2.2	路径交叉检测	5
6.2.3	输出格式与接口格式	6
7	轨迹规划	6
7.1	轨迹优化建模	6
7.1.1	轨迹代价	6
7.1.2	轨迹安全约束	6
7.2	轨迹生成	6
7.2.1	数值优化求解	6
7.2.2	候选轨迹筛选	6
7.2.3	输出格式与接口格式	6
8	轨迹协调与冲突消解	6
8.1	优先级协调机制	6
8.1.1	概述	7
8.1.2	协同需求量化	7
8.1.3	优先级动态计算	7
8.1.4	仲裁决策封装	7
8.1.5	决策分发与确认	7
8.1.6	全局协同计划更新	7
8.1.7	执行状态闭环监控	7
8.2	时空冲突规避	7
8.2.1	概述	7
8.2.2	冲突风险建模	7
8.2.3	规避决策	7
8.2.4	时空参数调整执行	7
8.2.5	轨迹可行性验证	7
8.2.6	时空资源协同锁定	8
8.2.7	资源释放与状态同步	8
8.3	编队与让行策略	8
8.3.1	概述	8
8.3.2	协同模式决策	8

8.3.3	编队构型生成	8
8.3.4	障碍响应与形态弹性控制	8
8.3.5	交互行为生成与协商	8
8.3.6	安全状态实时监控	8
8.3.7	协同状态恢复	8
9	运行监控与重规划	8
9.1	实时监测	8
9.1.1	概述	8
9.1.2	轨迹执行偏差	8
9.1.3	环境变化	8
9.1.4	通信状态	8
9.1.5	平台健康	9
9.1.6	资源评估	9
9.1.7	多源信息融合	9
9.2	触发判定	9
9.2.1	概述	9
9.2.2	判定指标与阈值设定	9
9.2.3	事件分类	9
9.2.4	影响分析	9
9.2.5	决策逻辑	9
9.2.6	事件列表生成与发布	9
9.3	路径重规划	9
9.3.1	方案生成与优选	9
9.3.2	结果校验	10
9.3.3	切换与协调	10
9.4	轨迹重规划	10
9.4.1	方案生成与优选	10
9.4.2	结果校验	10
9.4.3	切换与协调	10
9.5	失效处理	10
9.5.1	概述	10
9.5.2	安全模式切换	11
9.5.3	应急执行与监控	11
9.5.4	规划恢复与状态更新	11
9.5.5	故障告警与日志	11
9.5.6	人工接管	11

## 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：北京理工大学、东南大学、北京交通大学、南京邮电大学、北京万创鑫诚技术有限公司、合肥工业大学、西北工业大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学、南京擎苍智能科技有限公司、南京信息工程大学、杭州市滨江区浙工大人工智能创新研究院、珠海紫燕无人飞行器有限公司、河南科技大学、南京华格信息技术有限公司。

本文件主要起草人：周佳玲、吕跃祖、段培虎、唐元祎、刘鹏飞、许涛、李团、温广辉、赵丹、周艳、付俊杰、刘剑、闻国光、姜博川、许嘉扬、朱力、胡伟、丁磊、杨杨、肖顺元、范莎、许林兴、陆鑫、张强、都海波、余兰林、赵宇、刘永芳、彭秀辉、王融、彭朝霞、王琦少、葛泉波、朱洵、宣琦、朱俊威、王江平、李钊、梅粲文、宋晓娜、宋帅、刘建平、许迟。

# 无人系统协同感知、决策与控制 自主规划

## 1 范围

本文件规定了无人系统协同感知、决策与控制中自主规划模块的总体框架和规划流程。

本文件适用于无人系统协同感知、决策与控制中自主规划模块的设计、开发和应用，以及无人系统在动态环境中的自主协同安全运动规划。

## 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

## 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 自主规划

### 4.1 总体流程

自主规划是实现无人系统空间组织与行为协同的核心支撑模块，承担将高层任务指令转化为可执行轨迹的关键职责，是感知、决策与控制之间的桥梁。其流程是包括规划建模、路径规划、轨迹规划、轨迹协调与冲突消解、运行监控与重规划的闭环流程体系。其核心流程与协同架构见图1。

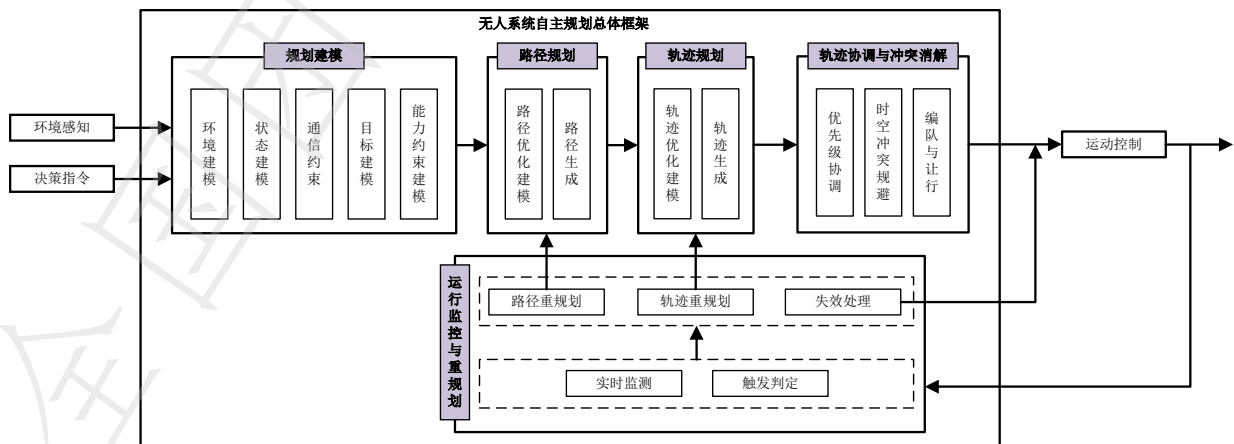


图1 无人系统自主规划总体框架

### 4.2 总体目标

自主规划的总体目标是将智能决策模块下达的高层意图转化为可执行的运动方案,确保各无人平台在多源信息感知、多任务并行执行以及动态环境变化下,能够安全、协同、高效地完成路径与轨迹的生成。自主规划不仅支撑任务实施的空间控制,还直接影响系统行为的时间协同、通信组织及安全闭环保障。

### 4.3 核心特性

#### 4.3.1 安全性

保证机间、机物、机人之间全过程无碰撞,确保任一时间点轨迹均满足避障、安全距离及可控性约束。

#### 4.3.2 协同性

保持多平台在几何编队、通信拓扑和任务执行的多维度一致性,支持无人系统在运动过程中实现结构编队、任务同步与交互逻辑协调。

#### 4.3.3 实时性

能够在动态环境、突发事件或任务变更条件下,快速完成路径更新与轨迹切换,满足系统对规划结果的时效性与稳定性双重要求。

#### 4.3.4 可扩展性

支持结点数量、异构类型及运行区域的弹性扩展。

## 5 规划建模

### 5.1 概述

规划建模是无人系统在自主运动前,对环境、平台状态、通信约束和任务目标进行形式化表达与结构化建模的过程。通过构建具备空间拓扑与动态约束关系的统一建模体系,为后续的路径规划与轨迹生成提供数据支持与逻辑基础。

### 5.2 环境建模

环境建模是利用无人平台感知系统(如激光雷达、视觉系统、多源传感器网络)获取的原始信息,构建结构化环境表达的过程,明确规划可行区域与不可进入的障碍空间。环境建模的主要要素如表1所示:

表 1 环境建模要素类别

类别	细则
地图构建	栅格地图、拓扑图、语义地图、地理信息融合
障碍物模型	静态障碍(地形、建筑物)、动态障碍(移动平台)、不确定性边界处理
区域划分	行动区域、禁入区、高风险区、通信盲区标注
约束表示	几何约束、物理边界、优先通行区域标记

#### 5.2.1 地图构建

融合多源感知信息,采用栅格地图、拓扑图或语义地图等形式生成环境表达模型,保留关键地形特征与语义信息。

#### 5.2.2 障碍建模

识别静态障碍（如建筑、地形）与动态障碍（如其他无人平台、人、车辆等），并基于其形状、位置与可预测运动模式，构建障碍体积模型与预测路径。

### 5.2.3 区域划分

依据任务需求与环境态势，划定规划区域，标注禁入区、优先通行区与通行权受限区，并设置缓冲带和软硬约束参数，支撑路径规划阶段的可行性判定。

### 5.2.4 时空约束集成

在地图模型中嵌入时间敏感性因素（如定时封闭区域、周期性高风险区域），构建可用于动态规划的四维环境模型。

### 5.2.5 实时更新

结合状态感知模块，通过动态地图更新机制，实现对突发环境变化（如障碍物新增、通行区域临时封锁等）的感知与快速更新，保障规划模型的时效性与准确性。

## 5.3 状态建模

状态建模是对各无人平台的运动特性、初始状态与规划边界条件进行标准化表达的过程。主要内容包括：

### 5.3.1 动力学建模

依据平台类型（地面/空中/水面等）与具体构型，构建描述平台运动规律的动力学模型（如差分驱动模型、六自由度模型），包含状态变量、控制输入、状态转移方程等。

### 5.3.2 初始状态设定

明确无人平台规划起始时刻的位置、速度、姿态等状态参数，设置各无人平台的初始状态，确保与实际初始工况一致。

### 5.3.3 边界条件建模

根据任务目标与区域约束，设定终点状态集合及中间约束条件（如集结位置、姿态约束），并指定可接受误差范围。

### 5.3.4 状态不确定性描述

引入状态估计误差模型，刻画由传感器误差、延迟与扰动引发的状态偏差，为鲁棒规划提供依据。

### 5.3.5 多维度价值评估

综合评估目标价值（如核心节点优先级高于普通节点）、时敏性（如运动目标的逃离时间窗口）及体系关联性（目标在对方网络中的拓扑影响力），建立动态价值权重模型。

### 5.3.6 状态评估与更新

在规划执行过程中，实时评估状态偏离情况，更新建模数据，支撑重规划与异常处理机制。

## 5.4 通信约束建模

通信约束建模是指在自主规划过程中，将通信链路状态对协同行为的影响进行建模，构建保障系统安全的通信容错机制。主要流程如下：

### 5.4.1 链路状态建模

结合通信拓扑、带宽参数与历史链路稳定性，构建平台间的通信连接模型。

### 5.4.2 通信范围建模

设定每个平台的有效通信半径与通信质量模型，基于信道衰减、遮挡建模或地理障碍建模，评估通信中断概率与影响范围。

#### 5.4.3 安全包络定义

依据各平台的最大运动能力与反应时间，定义链路中断情况下的最小安全包络半径，确保个体在通信失效状态下仍能保持安全距离并执行本地规划。

#### 5.4.4 通信策略植入

在规划过程中植入通信保持约束，如中继点选取、通信刷新频率控制等，提升任务期间的整体链路稳定性，并构建断链检测机制与自动重连策略，标注低通信可靠区域，提供路径生成中的规避依据。

#### 5.4.5 通信层级建模

根据任务级别和平台功能，构建分层通信控制模型（如指挥层-执行层分离）以增强系统韧性。

### 5.5 目标建模

目标建模是将抽象任务要求转化为可供规划算法处理的几何与逻辑表达形式的过程。主要流程如下：

#### 5.5.1 目标解析与分类

依据任务类型，将目标划分为集结点（如无人系统汇合位置）、观测点（如重点监视区域）、路径点（如巡逻路线结点）等，并提取其空间与功能属性。

#### 5.5.2 目标表达构建

将目标位置及关联约束（如到达时间、到达顺序、覆盖角度等）标准化建模为状态目标或路径约束，供规划引擎调用。

#### 5.5.3 多目标协同关系建模

对于存在关联性的多目标任务（如同步集结、联合观测），构建目标依赖图谱，明确时序关系与资源耦合关系。

#### 5.5.4 动态更新机制

支持任务目标在执行过程中根据环境变化和任务进展进行动态更新与优先级重排，保障模型对任务演化的适应性。

#### 5.5.5 目标达成评估指标建模

建立目标完成质量的评价标准（如覆盖率、滞后时间、任务成功率），用于反馈优化。

### 5.6 平台能力约束建模

平台能力约束建模是对系统中各无人平台任务执行能力的形式化表达，确保生成的方案符合平台自身的可行性约束与执行能力。涵盖其运动、感知、载荷、计算与能耗等维度。主要流程如下：

#### 5.6.1 运动能力约束建模

包括最大/最小速度、加速度、爬升率、转向半径、可操纵性等级等，决定平台在特定地形与任务条件下的可行轨迹集。

#### 5.6.2 感知能力约束建模

明确平台感知设备如激光雷达、视觉传感器的探测范围、精度、刷新率等参数，建模感知盲区与误差边界，为规划提供感知能力边界约束。

#### 5.6.3 能源约束模型建模

定义各平台单位距离/时间的能耗模型，考虑负载状态、地形影响与机型特性，为能量约束下的路径优化与续航管理提供依据。

#### 5.6.4 载荷能力约束建模

包括任务设备（如摄像头、雷达、挂载武器等）的功能描述、作业模式及运行约束，用于匹配特定任务目标。

#### 5.6.5 计算资源约束建模

刻画平台的处理器性能、内存资源、边缘推理能力，支撑分布式任务分配与局部规划功能部署。

### 6 路径规划

#### 6.1 路径优化建模

路径优化建模是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。该建模过程需兼顾多场景适应性与算法可执行性，主要包括以下环节。

##### 6.1.1 路径代价

路径代价是用于表示路径质量的数学表达，实现对路径关键性能的量化刻画。主要包含以路径总长度为核心的距离代价和以路径曲率变化率等参数构建的平滑性代价。

##### 6.1.2 路径安全约束

路径安全约束是路径优化过程中需满足的条件，确保优化后的路径在物理层面符合无人平台实际运动情况。

#### 6.2 路径生成

路径生成流程是用于规定无人系统在复杂环境中，从环境感知到最终生成可执行安全路径的完整技术链条。该流程由路径搜索、路径交叉检测环节构成，确保不同算法、不同平台、不同场景下的一致性和互操作性。

##### 6.2.1 路径搜索

路径搜索是无人系统在给定离散地图、起始位姿、目标位姿及约束条件下，利用图搜索或采样优化算法在可行空间内计算满足多目标优化的可行路径集合。主要流程如下：

- a) 环境建模与输入标准化：统一时空基准，将感知地图、威胁源信息融合为动态代价场，所有输入需经标准化编码，确保跨平台一致性；
- b) 多目标优化模型构建：建立统一的优化模型，通过可调权重实现不同任务场景下的灵活侧重，其中模型综合考虑距离代价、风险代价、能耗代价、协同代价和规则代价等多个目标；
- c) 输出格式：最终路径以路径点序列形式输出，每个路径点附带位置坐标、方向角、推荐速度、风险等级等信息。

##### 6.2.2 路径交叉检测

路径交叉检测是基于路径搜索阶段输出的路径点集合，结合实时感知流与平台状态，在毫秒级周期内完成交叉判定、冲突分级、风险量化与处置建议后，输出无人系统个体间无交叉的路径序列。主要流程如下：

- a) 输入对齐：将不同维度的路径点统一到同一维度表示，并给路径添加平台ID，确定不同路径点在无人系统中的归属；
- b) 路径点筛选：为同一个体的相邻路径点之间建立线段方程，通过参数方程精确求解交点位置，记录交点在两条线段上的参数值，为后续深度量化提供坐标依据；
- c) 交叉判定：汇总交点坐标、深度、角度及平台ID，形成待处理队列，用于消解阶段快速查询；
- d) 路径交叉消解：对于存在交叉的路径线段，增加偏离分支，基于平台优先级进行避让，将消解后的路径重新输入判定引擎，确保无新增或残留交叉，实现零冲突闭环。

### 6.2.3 输出格式与接口格式

路径规划模块最终输出为标准化路径包，包含头部信息和路径集合。头部信息记录位置坐标、生成器版本、地图版本。

## 7 轨迹规划

### 7.1 轨迹优化建模

轨迹优化建模是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。主要包括以下流程：

#### 7.1.1 轨迹代价

轨迹代价是衡量轨迹动态执行成本的量化指标，需结合时间维度与无人平台的动力学特性，从平滑性、舒适性、效率等动态维度评估轨迹的综合执行代价，为轨迹规划算法的多目标优化提供量化依据。

#### 7.1.2 轨迹安全约束

轨迹安全约束是确保轨迹动态执行过程中无风险的硬性限制条件，需结合时间维度的动态风险与载体动力学极限，从空间和时序维度，划定轨迹的不可逾越边界。

### 7.2 轨迹生成

轨迹生成流程是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。主要包含以下流程：

#### 7.2.1 数值优化求解

采用数值优化算法拟合路径点序列，使轨迹的速度、加速度曲线连续平滑，同时计算轨迹的代价值，输出多组候选轨迹。

#### 7.2.2 候选轨迹筛选

对优化求解得到的候选轨迹，逐一进行安全约束二次校验，剔除不符合安全要求的轨迹。对通过安全校验的轨迹，计算其综合代价函数值，选择代价最小的轨迹作为最优轨迹，若存在多组代价接近的轨迹，可结合任务场景偏好进一步筛选。

#### 7.2.3 输出格式与接口格式

轨迹规划模块最终输出为标准化轨迹包，包含头部信息和轨迹集合。头部信息记录时间戳、生成器版本、地图版本。轨迹集合中每条轨迹包含平台类型、优先级、状态序列、风险等级、可行性标记、无冲突标记。

## 8 轨迹协调与冲突消解

### 8.1 优先级协调机制

### 8.1.1 概述

优先级协调机制是根据无人系统的任务属性、系统能力及环境约束，动态分配无人系统执行顺序的冲突仲裁规则，用于解决路径资源竞争、通行权交叉等协同冲突问题，确保高优先级任务连续执行与系统整体效率最优。主要流程如下：

### 8.1.2 协同需求量化

各无人系统以统一时空基准周期性地向协同平台或邻域广播轨迹请求、时空占用窗及资源需求声明，同步提交任务属性标签、实时状态参数及环境风险系数。协同平台通过时空重叠分析识别潜在冲突区域。

### 8.1.3 优先级动态计算

将任务紧急度、无人系统能力裕度与环境惩罚因子映射为可比较的标量优先级，生成全局有序的优先级序列。计算过程需满足指标的可比较性与一致性，实现全局一致且可动态更新的排序度量。

### 8.1.4 仲裁决策封装

依据优先级序列执行资源锁定与通行权分配，赋予高优先级平台路径独占权或优先通行权。仲裁结果、版本号及有效期等封装为标准化可传输的协同控制协议数据单元，确保指令可追溯且防篡改。

### 8.1.5 决策分发与确认

通过无人系统通信网络分发仲裁指令至相关无人平台，采用确认-重传机制保障指令可达性。未确认指令触发重传流程，达到最大重试次数时启动通信故障处理。

### 8.1.6 全局协同计划更新

根据仲裁结果修订无人系统协同时间线并锁定冲突区域资源，更新结果同步至所有关联系统的本地规划器及系统全局状态数据库，维持规划连续性。

### 8.1.7 执行状态闭环监控

实时监测仲裁指令的执行合规性，记录轨迹偏移、响应延迟等异常事件。当偏差超过预设阈值时，触发重规划流程以实现闭环修正与审计追溯。

## 8.2 时空冲突规避

### 8.2.1 概述

时空冲突规避是在不破坏优先级的前提下，通过时空资源动态调配，消除轨迹交叉区域碰撞风险的协同方法，其核心是为冲突方分配差异化通行时空资源，保障无人系统在复杂环境下的无碰撞通行能力。主要流程如下：

### 8.2.2 冲突风险建模

基于无人系统上报轨迹，构建时空维度占用状态图，标注路径交叉点、交汇时间窗及冲突区域特征。融合环境障碍物动态变化数据，生成风险概率分布。

### 8.2.3 规避决策

根据风险分布、环境约束及无人系统优先级，选择时间窗偏移或空间路径调整方案。规避决策需遵循最小干预原则，优先保留无人系统之间的协同性。

### 8.2.4 时空参数调整执行

根据规避策略，在无人系统机动能力边界内执行时间窗偏移或路径调整。

### 8.2.5 轨迹可行性验证

验证调整后轨迹运动学可行性及环境的合规性。若验证失败，回退决策环节重新生成方案。

### 8.2.6 时空资源协同锁定

将冲突区域的通行权占用计划写入无人系统全局时空资源表，同步至关联无人系统的本地规划器。锁定期间实时监控时空资源占用状态，防止二次冲突。

### 8.2.7 资源释放与状态同步

无人系统通过冲突区域后自动解除时空资源占用标记，向系统协同平台或邻域发送释放确认报文。全局时空资源表更新结果并广播至各无人平台。

## 8.3 编队与让行策略

### 8.3.1 概述

编队与让行策略是维持无人系统结构稳定性与执行标准化交互避让的行为规范，支持编队形态按需弹性调整及无人系统间安全让行，保证无人系统行为的协同鲁棒性。主要流程如下：

### 8.3.2 协同模式决策

根据任务阶段特征、环境复杂度及无人系统的状态，选择预设编队模式。

### 8.3.3 编队构型生成

按预设拓扑关系，分配各无人系统相对位置与姿态基准。构型参数需满足无人系统机动能力边界。

### 8.3.4 障碍响应与形态弹性控制

当探测到障碍物威胁或突发干扰时，触发编队疏散或构型变换，新构型需保障系统内各平台安全约束。

### 8.3.5 交互行为生成与协商

针对汇入、交叉等交互场景，调用标准化让行策略库，结合优先级仲裁结果生成行为参数，并通过无人系统通信网络完成参数协商确认。

### 8.3.6 安全状态实时监控

持续检测无人系统间相对运动状态，确保实际运动状态持续满足预定义安全包络边界，越界时激活紧急避险机制。

### 8.3.7 协同状态恢复

在威胁消除或交互完成后，逐步恢复特定编队构型。恢复过程需保持运动连续性且避免衍生冲突。

## 9 运行监控与重规划

### 9.1 实时监测

#### 9.1.1 概述

实时监测是指在无人系统执行任务全过程中，对轨迹、环境、通信、平台健康及资源态势等关键要素进行高频采集、时序同步、融合评估与告警分发的闭环监控活动。主要流程如下：

#### 9.1.2 轨迹执行偏差

各结点以不低于指定的频率实时测量自身位置、速度、姿态，并与参考轨迹进行比对。

#### 9.1.3 环境变化

系统持续感知动态障碍物、气象条件、禁行区边界和电磁干扰强度。

#### 9.1.4 通信状态

监测各结点间的无线链路是否畅通，包括链路带宽、往返时延、数据丢包率及网络拓扑变化。

#### 9.1.5 平台健康

各结点实时监测能源余量、关键部件温度、传感器状态、自诊断信息等健康参数。

#### 9.1.6 资源评估

持续汇总并计算任务完成率、剩余能源、可用算力、链路占用率等指标。

#### 9.1.7 多源信息融合

将轨迹偏差、环境突变、链路质量和资源消耗进行联合估计，得到融合态势估计包。

### 9.2 触发判定

#### 9.2.1 概述

触发判定是指在实时监测输出的海量数据基础上，依据预设阈值体系快速识别风险、分类事件、评估影响并形成重规划决策的闭环判别过程。该环节连接“监测”与“重规划”两大功能：一端接收融合态势估计包，借助多维阈值库和关联规则判断是否触发；另一端输出通过影响分析和优先级排序后的事件列表，为局部或全局重规划提供精确、可追溯的触发依据。主要流程如下：

#### 9.2.2 判定指标与阈值设定

根据平台类别、任务等级与环境风险构建分级阈值库，并明确局部阈值与全局阈值作为统一判定依据。

#### 9.2.3 事件分类

- a) 安全事件：预测碰撞时间小于安全停止时间阈值；
- b) 偏离事件：轨迹误差大于轨迹误差阈值且持续一定时间；
- c) 资源事件：剩余能源小于执行该任务所需的最低能量阈值或关键部件单点失效；
- d) 通信事件：链路往返时延或数据丢包率大于阈值；
- e) 任务事件：上级智能决策或人机接口发布任务变更；
- f) 方案失效事件：实时态势与原方案预设条件差异超过允许偏差。

#### 9.2.4 影响分析

事件确认后，系统应评估受影响轨迹、结点集合，并估算新增资源需求（通信、能源、算力），将分析结果作为后续重规划范围与级别判定的依据。

#### 9.2.5 决策逻辑

若事件仅触达局部阈值，立即启动局部重规划；若触达全局阈值或存在多结点耦合风险，启动全局重规划；在通信隔离场景下，各结点通过分布式共识算法，在N轮内达成一致决策。

#### 9.2.6 事件列表生成与发布

监控系统应将所有触发事件封装为统一数据帧，每条事件包含：<事件ID, 事件类型, 优先级, 触发源, 时间戳, 关联结点>，推送至重规划模块并写入运行日志，保证信息流一致与可追溯。

### 9.3 路径重规划

路径重规划是在触发事件确认后，面向受影响结点或全体无人平台，快速生成、评估、下发并切换新的路径的闭环流程。主要流程如下：

#### 9.3.1 方案生成与优选

基于路径备选方案集与预设的效能评估指标体系，围绕安全性、能效、通信连通性及资源占用等多目标指标，对每个方案进行量化评分，并在限定时限内选取最优解，可保留两套备选方案并在后续监测周期内再次比较，以提高稳健性。

### 9.3.2 结果校验

路径重规划输出结果必须满足：

- a) 安全保证：新路径的所有路径点及相邻路径段，均不与障碍物、危险区域发生重叠，且路径点到危险区域的最小距离不小于安全半径；
- b) 实时约束：局部重规划完成时间小于场景对应的局部重规划时间阈值，全局重规划完成时间小于场景对应的全局重规划时间阈值；
- c) 协同一致：重规划后队形、通信、任务一致性误差小于原设计10%；
- d) 资源约束：新方案不得使单节点通信负载、能源或算力超过上限。

### 9.3.3 切换与协调

新旧路径切换采用空间过渡段，切换指令包含方案版本号、生效时间戳及过渡段参数。

## 9.4 轨迹重规划

轨迹重规划是在触发事件确认且路径重规划成功后，面向受影响结点或全体无人平台，快速生成、评估、下发并切换新的运动轨迹的闭环流程，确保无人系统在动态环境中持续保持安全与高效运行。主要流程如下：

### 9.4.1 方案生成与优选

基于轨迹备选方案集与预设的效能评估指标体系，围绕安全性、能效、通信连通性、资源占用及动力学适配性等多个指标，对每个方案进行量化评分，并在限定时限内选取最优解，可保留两套备选方案并在后续监测周期内再次比较，以提高稳健性。

### 9.4.2 结果校验

轨迹重规划输出结果必须满足：

- a) 安全保证：新轨迹各时刻的轨迹点，与静态障碍物的距离不小于安全半径，与动态障碍物的时空距离不小于安全距离阈值；
- b) 实时约束：局部重规划完成时间小于局部重规划时间阈值，全局重规划完成时间小于全局重规划时间阈值；
- c) 协同一致：重规划后队形、通信、任务一致性误差小于原设计10%；
- d) 资源约束：新方案不得使单节点通信负载、能源或算力超过上限。

### 9.4.3 切换与协调

新旧轨迹切换采用过渡段或速度剖面，避免瞬时加速度突变。切换指令包含方案版本号与生效时间戳，并允许同步误差。未受影响结点在切换窗口内应保持队形或进入等待模式，以防控制震荡。

## 9.5 失效处理

### 9.5.1 概述

失效处理是用于处理重规划超时无解或系统连续检测到不可恢复故障通信中断、环境突变等异常情况的规则体系，能够快速响应并采取有效措施，以保障无人系统任务的连续性、安全性和可靠性。主要流程如下：

### 9.5.2 安全模式切换

当重规划在规定时间内仍无法生成可行解或重规划结果未通过结果校验时,受影响结点应根据异常事件的类型、严重程度和影响范围进行分类,结合优先级仲裁结果自动进入停止、返航或自毁等安全模式。

### 9.5.3 应急执行与监控

各无人系统接收到应急指令后,立即执行相应的应急措施,并实时反馈执行状态。持续监控应急执行过程,评估应急措施的有效性,及时调整应急策略以应对可能出现的新情况。

### 9.5.4 规划恢复与状态更新

在异常情况得到妥善处理,逐步恢复无人系统的原规划流程,同步更新系统时空资源表与协同计划,确保各无人平台能够平稳过渡到正常运行状态。

### 9.5.5 故障告警与日志

每次安全模式切换均须由指挥结点以广播方式发送高优先级告警帧,并同步记录故障原因、时间戳、结点 ID 及当前状态至运行日志,确保日志数据在任务结束后至少30天内可追溯。

### 9.5.6 人工接管

系统须保留人工接管通道,支持远程操控和现场接管两种形式;一旦人工接管生效,应自动暂停自动重规划流程,提供实时态势可视化和控制权交接确认,以应对通信中断、算法异常或其他极端紧急场景。