

ICS 35.240.01

CCS L70

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 02008—2025

无人系统协同感知、决策与控制  
验证测试

Collaborative awareness, decision-making, and control for unmanned  
systems—Verification testing

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 验证测试总体流程 .....	1
4.1 验证测试总体流程定义 .....	1
4.2 测试对象 .....	2
4.3 总体要求 .....	2
4.4 测试环境要求 .....	2
4.4.1 室内测试环境 .....	2
4.4.2 室外测试环境 .....	2
4.4.3 硬件环境 .....	2
4.4.4 软件环境 .....	3
4.4.5 温湿度/振动、电磁兼容性要求 .....	3
5 测控手段与数据采集处理要求 .....	3
5.1 测控系统总体架构 .....	3
5.2 真值测量方法与精度要求 .....	3
5.3 配套硬件与参数要求 .....	4
5.4 数据采集与处理 .....	4
5.4.1 数据采集内容 .....	4
5.4.2 数据处理要求 .....	4
5.4.3 数据质量评估 .....	4
6 测试流程 .....	4
6.1 总体流程 .....	4
6.2 分项测试流程 .....	5
6.2.1 态势感知分项测试流程 .....	5
6.2.2 智能决策分项测试流程 .....	7
6.2.3 自主规划分项测试流程 .....	10
6.2.4 运动控制分项测试流程 .....	12
6.3 综合评估与报告 .....	15

## 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：南京信息工程大学、中科联航（江苏）信息技术有限公司、洛阳理工学院、安徽大学、中国飞行试验研究院、上海海事大学、东南大学、杭州千测智能科技有限公司、淳安千岛湖农业发展集团有限公司、浙江师范大学、南京莱斯信息技术股份有限公司、西安中飞航空测试技术发展有限责任公司、杭州市滨江区浙工大人工智能创新研究院、北京理工大学、航天中认软件测评科技（北京）有限责任公司、珠海紫燕无人飞行器有限公司。

本文件主要起草人：葛泉波、陆振宇、姜溟予、王业政、刘文雯、南晓娅、王晓萱、乔轶、施成、孙九洲、刘晨、葛进、王国勇、李明照，刘云卿，韩哲，丁思淼、任璐、王晓、徐乐功、王嘉伟、张尚琦、温广辉、周艳、宣琦、朱俊威、周佳玲、吕跃祖、赵国亮、赵琪、王江平、李钊、梅粲文。

# 无人系统协同感知、决策与控制 验证测试

## 1 范围

本文件规定了无人系统协同感知、决策与控制的验证测试流程、测试总体要求、功能测试方法及典型场景测试要求。

本文件适用于无人系统协同感知、决策与控制的研制、开发、测试、使用和维护过程中的验证测试活动，旨在评估系统在通信网络、态势感知、智能决策、自主规划、运动控制等方面的功能性能、可靠性和鲁棒性。

## 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。

GB/T 38924.1-2020	民用轻小型无人机系统环境试验方法 第1部分：总则
GB/T 38909-2020	民用轻小型无人机系统电磁兼容性要求与试验方法
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
T/CICC 02007-2025	无人系统协同感知、决策与控制 效能评估

## 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 验证测试总体流程

### 4.1 验证测试总体流程定义

验证测试是无人系统研发的关键环节，通过数字仿真、半实物仿真测试和实物测试三个阶段的递进式测试，全面评估系统的指挥控制能力、协同效能和环境适应性。具体流程如图1所示。

数字仿真阶段主要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。该阶段能够高效、低成本地完成大规模的系统仿真测试，并支持算法的快速迭代优化。半实物仿真测试阶段将部分真实硬件设备接入仿真环境，实现软硬件联合验证，重点测试控制系统、通信模块等关键硬件的实时交互能力，以及系统在通信延迟、数据丢包等真实环境下的稳定性。这一阶段能够有效发现硬件与软件的兼容性问题，为实物测试奠定基础。实物测试阶段是最终的测试阶段，在真实物理环境中部署无人系统，执行对抗性任务，如协同搜索、动态目标围捕和电子干扰对抗等。该阶段全面检验系统在复杂地形、电磁干扰和动态任务调整等实战环

境中的适应性和可靠性，同时评估指挥控制系统的实战效能，包括任务成功率、响应速度和资源利用率等关键指标。通过三级测试体系的闭环验证，能够确保无人系统从理论设计到实际应用的全流程可靠性，并为系统的持续优化提供数据支撑。

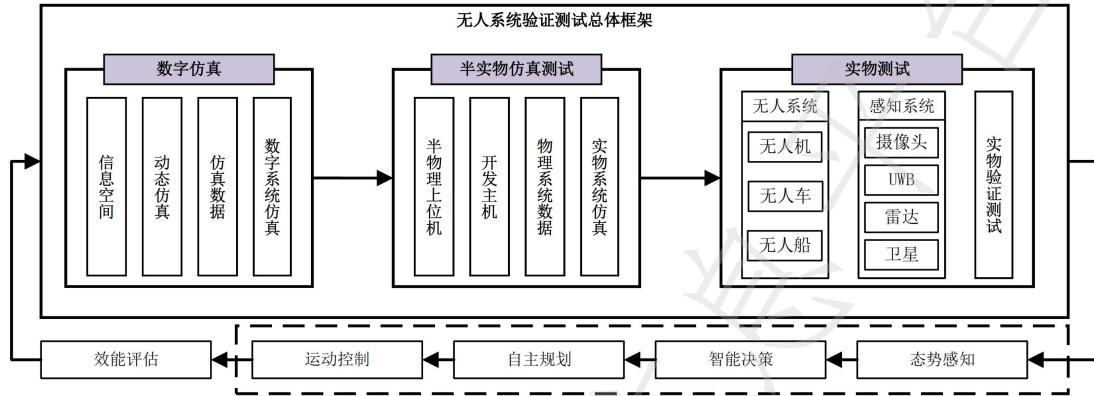


图 1 无人系统验证测试总体框架

## 4.2 测试对象

测试对象为无人系统，主要包括固定翼/旋翼无人机、轮式/履带式无人车以及水面无人艇等不同类型的智能装备。这些无人系统通过自主协同控制算法形成有机整体，具备动态编队保持、分布式任务分配和复杂环境适应等核心能力。

## 4.3 总体要求

支持小规模（2-8台）、中规模（9-20台）及超大规模（20+台）测试。覆盖通信延迟（50ms-2s）、卫星拒止、结点失效等极端条件。

## 4.4 测试环境要求

测试应在多种预设的环境条件下进行，至少覆盖：晴天/白天、雨天/黄昏、雾天/夜间三种典型组合，以全面考核系统环境适应性。

### 4.4.1 室内测试环境

在无干扰的室内环境中，设置异构无人系统测试平台，模拟实际应用场景。室内环境应尽量减少外部干扰，确保测试结果的准确性。

### 4.4.2 室外测试环境

在开阔的室外环境中，设置异构无人系统测试场地，测试置异构无人系统在复杂环境下的稳定性，室外测试环境应包括不同的地形、建筑物、干扰等，模拟应用中的复杂环境。

### 4.4.3 硬件环境

硬件环境应满足以下要求：

a) 多域无人系统：系统应至少包含两类异构子平台，每个子类平台数量不少于1个。平台应具备协同通信与定位能力。各平台搭载完备的传感器套件（如可见光/红外相机、激光雷达、毫米波雷达、微型气象站、光照传感器、声呐等）及机载计算单元。

b) 多域综合测试场：

1) 空域：高度0-500米，面积不小于2 km x 2 km；

- 2) 地面域：包含开阔地、丘陵、林地、道路、模拟城镇区（含建筑模型）；
- 3) 水面/水下域：一片可控水域（如湖泊、测试水池），具备岸线、浅滩、深水区；
- 4) 标准目标集：在各域部署多种类型（车辆、人员、船只、设备等）、不同尺寸、静态及动态的标定目标，部分目标配备高精度定位装置用于提供真值；
- 5) 环境模拟设备：可模拟或自然存在多种天气条件（晴、雨、雾）、不同光照强度（白天、黄昏、夜间补光）和不同能见度场景；
- 6) 多域干扰源：可控的电磁干扰（影响通信、卫星）、光电子扰（影响视觉传感器）、声学干扰（影响声呐）设备；
- 7) 控制与评估中心：配备高性能服务器和多域指挥控制台，用于运行测试想定、监控测试过程、接收回传数据、计算效能指标并生成报告。

#### 4.4.4 软件环境

软件环境应满足以下要求：

- a) 数字仿真平台：能够高保真模拟多域物理环境（如Gazebo, Unreal Engine, MATLAB/Simulink with robotic models），平台动力学和传感器模型；
- b) 测试想定生成与管理软件：能够设计并驱动复杂的跨域动态测试场景；
- c) 数据记录与回放系统：全程同步记录所有数据（仿真或真实）；
- d) 效能评估软件：内置本标准所述的所有效能指标计算模型，自动处理数据生成标准化评估报告。

#### 4.4.5 温湿度/振动、电磁兼容性要求

试验温湿度、振动应符合GB/T 38924.1-2020民用轻小型无人机系统环境试验方法 第1部分：总则，电磁兼容性应满足GB/T 38909-2020民用轻小型无人机系统电磁兼容性要求与试验方法。

### 5 测控手段与数据采集处理要求

#### 5.1 测控系统总体架构

测控系统应具备对无人机、无人车、无人艇等异构平台的实时状态监控、指令下发、轨迹记录、性能评估等功能。系统应支持多平台、多协议、高并发数据接入与处理能力，其中真值测量方法与精度要求如表1。

#### 5.2 真值测量方法与精度要求

表1 各平台真值测量方法与精度要求

环境类型	真值测量方法	精度要求	备注
室内环境	RTK	水平 $\leq 0.05\text{m}$ ，高程 $\leq 0.1\text{m}$	有遮挡时使用激光雷达/视觉辅助
环境数据	UWB	水平 $\leq 0.1\text{m}$ ，高程 $\leq 0.2\text{m}$	有遮挡时使用激光雷达/视觉辅助

### 5.3 配套硬件与参数要求

配套硬件与参数要求如表2:

表2 配套硬件与参数要求

设备类型	功能说明	参数要求
地面控制站	任务规划、监控、指令下发、数据记录	支持 $\geq 50$ 结点并发, 通信延迟 $\leq 100\text{ms}$ , 数据存储容量 $\geq 1\text{TB}$
高精度差分基站	提供 RTK 校正数据	定位精度 $\leq 0.01\text{m}$ , 更新频率 $\geq 10\text{Hz}$ , 支持多频段
UWB 定位系统	室内/遮挡区域精确定位	定位精度 $\leq 0.1\text{m}$ , 刷新率 $\geq 20\text{Hz}$ , 覆盖半径 $\geq 100\text{m}$
声学定位系统	水下平台定位	定位精度 $\leq 1.0\text{m}$ , 刷新率 $\geq 1\text{Hz}$ , 最大基线距离 $\geq 500\text{m}$
数据记录仪	各平台本地数据记录	存储容量 $\geq 32\text{GB}$ , 支持 SD 卡扩展, 采样频率 $\geq 100\text{Hz}$
时间同步设备	统一各平台时间戳	PTP/IEEE 1588 协议支持, 同步误差 $\leq 1\text{ms}$

### 5.4 数据采集与处理

#### 5.4.1 数据采集内容

平台状态数据: 位置、姿态、速度、电池电压、CPU负载、通信质量等。

环境感知数据: 图像、点云、雷达、声呐等传感器原始数据。

任务执行数据: 任务状态、指令响应、异常日志、重规划记录等。

通信链路数据: 丢包率、延迟、带宽、信号强度、误码率等。

#### 5.4.2 数据处理要求

实时处理: 关键指标(如位置误差、通信延迟)应在控制站实时显示并告警。

事后分析: 支持数据回放、轨迹对比、性能统计、可视化分析。

数据融合: 多源数据(如卫星+IMU+视觉)应进行滤波融合, 提升定位可靠性。

格式统一: 所有数据应遵循统一格式(如JSON、CSV或二进制流), 时间戳同步。

#### 5.4.3 数据质量评估

完整性: 数据丢失率 $\leq 1\%$ 。

一致性: 各平台时间同步误差 $\leq 10\text{ms}$ 。

准确性: 定位数据应符合5.2节精度要求。

时效性: 状态数据上传延迟 $\leq 200\text{ms}$ 。

## 6 测试流程

### 6.1 总体流程

测试应遵循“数字仿真→半实物仿真测试→实物测试”的流程。每个阶段都包含以下步骤:

- 测试准备: 部署环境(物理或虚拟)、标定设备、确认通信链路、加载测试想定;
- 预测试检查: 启动系统与真值系统, 进行功能完好性检查;
- 测试执行: 按想定启动测试, 全程记录数据;
- 数据收集: 测试结束后, 收集所有记录的数据;

- e) 效能分析：使用效能评估软件处理数据，计算各项指标；
- f) 报告生成：生成该阶段的效能评估报告；
- g) 阶段评审：评审通过后，方可进入下一阶段测试。

## 6.2 分项测试流程

### 6.2.1 态势感知分项测试流程

#### 6.2.1.1 环境条件规划

环境条件规划涵盖从虚拟到真实的各类测试环境要求，具体包括：

- a) 数字仿真环境：构建高保真虚拟测试场景，模拟多样化地理环境、气象条件及电磁频谱环境。集成传感器物理模型（雷达、光电、红外等），设置不同分辨率、视场角、探测距离及噪声特性。具备动态目标生成与管理能力，可模拟各类合作/非合作目标的行为特征。环境需支持光照、天气、能见度等参数的实时变化模拟。
- b) 半实物仿真测试环境：部署真实传感器处理单元及计算结点，接入仿真引擎生成的传感器原始数据流。构建硬件在环测试平台，集成实时仿真机、信号模拟器及数据采集系统。环境应支持注入通信延迟、数据丢包、传感器故障等异常条件，验证系统在非理想条件下的感知性能。
- c) 室内测试环境：在可控室内空间部署多源感知基准系统（如Motion Capture系统、UWB定位网络）。设置典型障碍布局及标准化测试目标（不同尺寸、材质、反射特性）。配置可控光照系统，模拟昼夜及不同天气下的光照条件。环境应具备电磁屏蔽能力，用于基础感知算法验证。
- d) 室外测试环境：选择典型野外及城市环境，部署永久性测试设施。建立差分卫星/RTK基准站网络，提供厘米级定位真值。设置标准化测试靶标及合作目标。配置气象监测站、光照监测仪等环境真值采集设备。环境应包含开阔地、丘陵、林地、水域、建筑群等多类地形特征。

#### 6.2.1.2 态势觉察效能测试流程

态势觉察效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：在仿真环境中设置多类典型场景（开阔地、城市峡谷、雨雾天气等）。生成不同数量、类型、运动状态的目标，记录真值信息。运行感知算法，采集目标检测、识别及环境感知结果。注入传感器噪声、通信干扰等异常条件，对比算法输出与仿真真值，计算目标检测率、识别率、环境感知准确度。统计分析在不同场景、不同干扰条件下的感知性能。
- b) 半实物仿真测试：将真实传感器处理单元接入仿真环境，通过信号模拟器注入模拟回波和数据，验证算法在真实硬件平台上的实时处理能力。测试系统在通信延迟、数据不完整条件下的感知性能。记录处理耗时、资源利用率等实时性能指标，评估系统在近似真实条件下的感知可靠性。
- c) 实物测试：在实测场地部署真实无人平台及传感器系统，设置标准化测试目标及环境特征，平台按预定航线执行感知任务，真值系统全程记录环境参数及目标状态。采集各平台感知结果并进行时间同步，对比感知数据与真值信息，计算各项效能指标，测试在不同气象条件、不同时段下的感知性能。

d) 验证记录规范见表3:

表 3 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
环境感知准确度	光照强度感知率	生成覆盖的任务需求的次数
	天气感知率	需要的任务需求点总数
	能见度感知率	能见度误差在允许范围内的采样比例
目标检测率	检测到的目标数量	系统正确检测到的目标数量（个）
	实际存在的目标总数	测试场景中实际存在的目标总数（个）
目标识别率	正确识别的目标数量	测试场景中实际存在的目标总数（个）
	实际存在的目标总数	整个任务成功完成的任务数
信息融合配准率	时间配准率	成功进行时间同步对齐的数据条目数与总目标数量的比例
	空间配准率	成功进行空间坐标对齐的数据条目数与总目标数量的比例
	目标配准率	被正确关联到同一目标的特征数量与目标特征图总数量的比例

### 6.2.1.3 态势理解效能测试流程

态势理解效能测试包含以下环节:

- a) 数字仿真验证: 在仿真环境中构建多维度战场场景, 注入模拟的融合态势数据, 包括目标属性(位置、类别、置信度)、环境信息(地形、气象、电磁)及敌方行为模式。设置不同复杂度的威胁推理与意图识别任务, 如多目标协同威胁、伪装欺骗意图等。运行态势理解算法, 记录系统输出的威胁等级评估结果和敌方意图判断结果。通过对比仿真预设的真值数据, 计算威胁评估置信度和意图识别准确率。注入传感器噪声、数据丢失等干扰, 测试算法在非理想输入条件下的鲁棒性。
- b) 半实物仿真测试: 将真实的态势理解算法模块(如威胁评估、意图识别子模块)部署于目标计算硬件。通过数据注入接口, 实时接收来自仿真引擎或信号模拟器的多源融合态势数据流(格式与真实系统一致)。验证算法在真实硬件平台上的实时处理能力、资源消耗(CPU、内存)及与上下游模块的接口兼容性。记录从数据输入到理解结果输出的处理延时, 评估系统响应速度。在不同负载和干扰条件下, 考核算法的稳定性和可靠性。
- c) 实物测试: 在综合测试场或实战化演练环境中, 态势理解系统接收来自真实多传感器网络融合生成的实时态势信息。系统基于真实、连续、可能包含噪声的输入数据, 进行在线威胁评估与意图识别。真值系统通过事后分析、专家判读或高置信度情报来源, 确定威胁与意图的真值。对比系统输出与真值, 计算威胁评估置信度、意图识别准确率等核心指标, 全面评估其在真实、复杂、动态环境下的态势理解效能和实战可用性。

d) 验证记录规范见表4:

表4 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
威胁评估置信度	正确判定次数	系统正确判定敌方威胁等级的次数
	总判定次数	系统对所有敌方目标进行威胁等级判定的总次数
意图识别准确率	正确识别次数	系统正确识别敌方作战意图的次数
	总识别次数	系统对敌方意图进行识别的总次数（重要目标数量相关）
态势理解处理延时	数据输入时刻	融合态势数据进入态势理解模块的时刻
	结果输出时刻	威胁评估或意图识别结果输出的时刻

#### 6.2.1.4 态势预测效能测试流程

态势预测效能测试包含以下环节:

- a) 数字仿真验证: 该阶段无需真实传感器输入, 通过态势仿真引擎注入模拟的目标行为、威胁演化、环境变化等数据流。在仿真环境中构建多种典型预测场景(威胁逼近、多目标协同、态势突变等), 设定不同预测时间窗口与威胁等级。加载威胁评估模型、态势推演引擎及预警决策规则库。运行态势预测算法, 记录威胁识别次数、预警触发次数及有效预警数量。对预测结果进行事后验证, 统计预警准确率与虚警率, 记录从数据输入到预测输出的态势判断时效性指标。
- b) 半实物仿真测试: 通过多源数据注入器模拟融合传感器(目标检测、识别、跟踪)输出, 接入真实态势预测处理单元。建立严格时钟基准确保多源数据时间同步。将实际预测算法部署于目标计算平台, 处理仿真环境提供的融合态势数据。重复仿真验证中的威胁场景, 验证算法在实际硬件约束下的预测性能与响应速度。记录系统在目标平台上的计算负载、内存消耗及预测处理时延分布。
- c) 实物测试: 在综合态势感知环境中, 预测系统接收来自实际部署的多传感器网络实时数据。系统基于真实的目标检测、识别与融合结果进行威胁态势预测与预警判断。态势记录系统持续跟踪实际威胁发展轨迹与预测结果对比。通过事后分析验证预警的真实有效性, 评估预测系统在复杂动态环境下的预警准确率、判断时效性与整体可信度表现。

d) 验证记录规范见表5:

表5 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
预警准确率	预警数量	事后验证确认预警事件确实发生
	预警总数	系统发出的预警总数
态势判断时效性	输入时间	输入数据进入态势预测模块的时刻
	输出时间	系统输出预测结果的时刻

#### 6.2.2 智能决策分项测试流程

##### 6.2.2.1 环境条件规划

环境条件规划涵盖以下方面：

- a) 数字仿真环境：构建多层次决策仿真平台，模拟典型决策场景（如多目标冲突、动态威胁评估、资源竞争等），集成决策推理引擎、知识库模型及态势演化模型，支持智能决策算法的闭环测试与验证。
- b) 半实物仿真环境：将真实决策算法模块嵌入测试回路，接入模拟态势数据及系统状态信息，验证算法在目标硬件平台上的决策性能及与真实组件的接口兼容性。
- c) 综合验证环境：在可控环境中部署指控显示系统、通信网络结点及模拟作战要素，用于验证决策算法的实时响应能力、多源信息融合处理能力及协同决策性能。
- d) 实物测试环境：在典型应用场景中部署真实信息源、通信链路、执行终端及效果评估设备，开展全系统条件下的智能决策算法综合验证。

### 6.2.2.2 任务解析效能测试

任务解析效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真测试：通过仿真引擎注入不同复杂度的模拟任务，包含单目标任务、多目标冲突任务及约束密集型任务。加载HTN分解器、图论分解模块及专家知识规则库，构建层级化任务分解环境。运行任务解析算法，记录分解过程中的尝试次数、成功次数及中间状态。统计任务分解完成度、任务分解效率、方案完备性及任务完成率等关键指标。验证算法对不同任务类型的适应性与分解质量。
- b) 半实物仿真测试：将解析算法集成至目标硬件平台，建立标准化数据接口接收任务流输入。配置性能监控系统，实时跟踪算法处理延迟、内存占用及CPU利用率。通过压力测试验证算法在高并发任务条件下的稳定性，记录系统响应时间分布与资源消耗峰值。评估算法在实际硬件约束下的分解效率与处理能力。
- c) 实物验证：在多源信息融合环境中，输入包含模糊描述、不完整信息的复杂任务。测试解析算法对真实任务场景的理解能力与分解合理性。建立多维度评价体系，从完整性、逻辑性、可执行性角度综合评估分解结果。通过专家评审与自动化评估相结合，验证解析方案的实用性与可靠性。
- d) 验证记录规范见表6：

表6 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
任务分解完成度	已经覆盖的任务需求点数量	生成覆盖的任务需求的次数
	需求点总数	需要的任务需求点总数
任务分解效率	分解完成数量	在单位时间内分解完成的任务数量
	分解时间	分解所用时间
方案完备性	被覆盖的任务点	分解后被覆盖的任务点
任务完成率	成功完成的任务数	整个任务成功完成的任务数

### 6.2.2.3 规划调度效能测试

规划调度效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：通过仿真平台注入标准化的子任务集合、资源配置信息及时空约束参数。在仿真环境中构建多种调度场景，设置任务优先级与依赖关系。加载调度优化算法与冲突检测模块。执行规划调度流程，记录分配尝试次数、成功分配数量及冲突解决次数。统计任务分配效率、资源调度效率指标，计算冲突解决成功率与调度方案质量得分。
- b) 半实物仿真测试：将真实调度算法集成至测试环境，通过标准接口接入模拟的资源状态与任务需求数据。建立实时数据同步机制确保时序一致性。在目标硬件平台上运行调度算法，处理仿真环境提供的调度请求与约束条件。验证算法在实际计算环境下的调度响应速度与资源消耗水平。记录调度决策延迟、内存占用峰值及处理吞吐量性能指标。
- c) 实物测试：在实际应用环境中，调度系统接收来自任务解析模块的子任务清单与实时资源状态报告。系统基于当前态势进行动态任务分配与资源优化配置。评估系统持续监控调度执行过程，记录资源利用情况与任务完成状态。分析调度方案的实际执行效果，从时间效率、资源利用率、任务成功率等维度评估调度性能与系统可靠性。
- d) 验证记录规范见表7：

表7 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
任务分配效率	任务数量	成功分配的任务数量
	时间	任务分配耗费的时间
资源调度效率	资源量	在固定时间内有效利用的资源量
	资源总量	在固定时间内有效利用的资源总量
冲突解决成功率	冲突数量	解决掉的冲突数量
	冲突总量	调度方案中的冲突总数

### 6.2.2.4 任务重规划效能测试

任务重规划效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：通过仿真引擎动态注入突发事件（任务变更、资源故障、环境扰动等）触发重规划流程。在仿真环境中预设多种重规划场景与触发条件，模拟环境变化、目标丢失、设备故障等典型情况。集成重规划决策逻辑与方案评估模块。运行重规划算法，记录触发响应次数、重规划成功次数及方案生成时间。对重规划方案进行质量评估，统计方案质量保持度、响应时间及适应性指数。
- b) 半实物仿真测试：通过事件注入器或故障模拟器向真实决策系统注入各类突发情况，接入实际重规划处理单元。建立实时监控与触发机制模拟真实运行环境中的动态变化。将重规划算法部署至目标硬件平台，处理仿真环境提供的突发事件与状态变化。验证算法在实际约束下的重规划计算能力与系统鲁棒性。记录重规划触发延迟、计算开销、内存使用峰值及新方案生成时间。
- c) 实物测试：在真实运行环境中，重规划系统持续监控任务执行状态、资源变化与环境动态。当实际突发事件或异常情况发生时，重规划模块自主启动并执行方案调整流程。跟踪系统记录重

规划全过程数据，包括触发时机、决策过程与输出结果。评估重规划方案的实际执行效果与任务恢复能力，验证系统在复杂动态环境下的持续适应性与任务保障能力。

d) 验证记录规范见表8：

表8 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
重规划方案质量	新方案得分	新方案得分
	原始方案得分	原始方案或者参考方案的得分
重规划响应时间	生成时刻	在突发状况时生成新方案的时刻
	触发时刻	在突发状况时触发重规划的时刻
任务重规划适应性指数	成功次数	在突发条件下仍成功完成任务的次数
	总次数	总突发事件次数

### 6.2.3 自主规划分项测试流程

#### 6.2.3.1 环境条件规划

环境条件规划涵盖以下方面：

- a) 数字仿真环境：构建高保真数字仿真环境，模拟典型任务场景（如城市峡谷、山地、密集障碍区等），集成物理引擎、传感器模型及环境动力学模型，支持路径与轨迹规划算法的闭环测试与验证。
- b) 半实物仿真测试环境：将真实规划算法模块嵌入仿真回路，接入模拟传感器数据及平台状态信息，验证算法在实时硬件平台上的性能及与真实组件的兼容性。
- c) 室内测试环境：在可控室内环境中部署motion capture系统、UWB定位基站及模拟障碍物，用于初步验证规划算法的实时性、避障能力及多机协同性能。
- d) 室外测试环境：在典型野外或城市外场环境中部署真实障碍、差分卫星/RTK基站、气象监测设备及光学跟踪系统，开展全实物条件下的规划算法综合验证。

#### 6.2.3.2 路径与轨迹规划效能测试

路径与轨迹规划效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：该阶段无需真实传感器，通过仿真引擎注入模拟的激光雷达、视觉、IMU等数据。在仿真环境中设置任务起点、目标点及多种典型障碍场景（静态、动态）。加载平台动力学模型与安全规则。运行路径规划算法，进行安全性测试，测量路径上各点到障碍物的距离是否符合安全要求。同时计算路径长度代价作为效率指标，记录路径平滑度。运行轨迹规划算法，评估其平滑度和舒适度指标。
- b) 半实物仿真测试：通过仿真器或信号发生器模拟传感器输出，接入真实计算单元。使用高精度时钟同步各组件数据。将真实规划算法部署于嵌入式计算单元，接入仿真环境提供的传感器数据流。重复数字仿真中的测试场景，验证算法在真实计算平台上的实时性与可靠性。计算路径安全性、效率指标以及轨迹平滑度、舒适度指标。

- c) 实物测试：在室内或室外测试场中，真实无人平台接收规划系统生成的任务指令。平台依据实时感知数据进行局部重规划与避障。真值系统全程记录平台实际轨迹。对比规划轨迹与实际轨迹，评估跟踪精度与偏差，并计算路径安全性、效率指标以及轨迹平滑度、舒适度指标。
- d) 验证记录规范见表9：

表9 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
路径安全性	路径点安全距离符合率	路径上所有点满足安全距离要求的比例
路径规划效率	路径总长度	从起点到终点所有相邻路径点之间的直线距离总和
路径平滑度	路径折线夹角和	记录所有相邻路径折线间夹角的绝对值之和
轨迹平滑度	轨迹切线角偏差和	记录各轨迹点处轨迹曲线的切线与参考坐标轴的夹角绝对值之和
轨迹舒适度	速度与加速度的绝对值之和	记录各轨迹点对应的速度绝对值与加速度绝对值之和的总和

### 6.2.3.3 轨迹协调与冲突消解效能测试

轨迹协调与冲突消解效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真：在仿真环境中构建多平台协同任务场景，设置各平台的独立轨迹及成功次数。监测规划方案中平台间潜在的时空冲突次数及通过调整避免的次数。注入突发障碍或平台故障等扰动，触发应急重规划机制，记录从冲突检测到生成新安全轨迹的重规划响应时间。监测各平台行为与预期协同策略的一致性，统计一致行为次数与总行为次数。
- b) 半实物仿真测试：将真实的轨迹协调与冲突消解算法部署于嵌入式计算单元。接入仿真环境提供的多平台状态数据流，验证算法在真实硬件上的性能。注入通信延迟、数据丢包等干扰，测试算法鲁棒性。记录算法在实际硬件上的计算耗时、资源占用及协调成功率。
- c) 实物测试：在室内或室外测试场，部署多架真实无人平台。平台接收协同任务指令，基于初始轨迹开始执行。在任务过程中，人为引入动态障碍或改变某平台任务，触发实时协调与冲突消解。真值系统全程监测平台轨迹、间隔距离及冲突事件。评估协调后轨迹的平滑性、安全性及任务完成度。
- d) 验证记录规范见表10：

表10 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
轨迹协调成功率	轨迹协调尝试次数	在限定时间内尝试生成协同轨迹的次数
	轨迹协调成功次数	在限定时间内成功生成满足所有协同约束的群体轨迹的次数
行为一致性	一致行为次数	平台行为与预期协同策略完全一致的次数
	总行为次数	测试过程中所有平台行为决策的总次数
冲突避免率	潜在冲突次数	规划方案中识别出的平台间时空冲突次数
	避免冲突次数	通过轨迹调整成功避免的冲突次数

#### 6.2.3.4 运动监控与重规划效能测试

运动监控与重规划效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真：在仿真环境中构建动态任务场景，设置初始任务规划和平台轨迹。随机注入三类典型扰动：环境变化（如突发障碍物）、系统故障（如单平台传感器失效）、任务变更（如目标点更新）触发重规划机制，记录从异常检测到新方案生成的全过程时间戳。对比新旧方案的质量指标，评估重规划效果。
- b) 半实物仿真测试：将监控与重规划算法部署到真实机载计算单元。通过硬件在环仿真器注入传感器故障、通信中断等信号，测试算法在真实计算平台上的实时性能。记录CPU/内存使用率、响应延迟等资源指标。
- c) 实物测试：在实测场地部署多个无人平台。执行协同巡查任务，中途人工注入突发状况，使用高精度定位系统记录实际轨迹变化。评估重规划后的任务完成度和安全性验证记录规范。
- d) 验证记录规范见表11：

表11 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
重规划方案质量	新方案覆盖率得分	新方案覆盖的任务区域比例
	新方案效率得分	新方案的路径长度与耗时评估
	新方案安全性得分	新方案的最小安全间隔保持度
	参考方案得分	原始方案或理想方案的基准得分
重规划响应时间	异常检测时刻	系统首次检测到异常的时间戳
	方案生成时刻	新方案完全生成的时间戳
	有效响应时间	从检测到生成可执行方案的时间差

#### 6.2.4 运动控制分项测试流程

##### 6.2.4.1 环境条件规划

环境条件规划涵盖以下方面：

- a) 数字仿真环境：构建高保真、多物理场耦合的虚拟测试平台，集成高精度平台动力学模型、传感器噪声与延迟模型、大气扰动模型及复杂电磁环境模型，该环境需能灵活设置标称控制测试所需的基准轨迹与机动动作，能注入抗不确定性测试所需的持续风扰、突发故障及通信干扰，并能构建安全控制测试所需的复杂地理环境与异常工况，用于控制系统算法逻辑的初步验证与控制参数的初步整定。
- b) 半实物仿真测试环境：构建高实时性的硬件在环测试平台，集成实时仿真机、信号调理与接口板卡、数据采集系统以及飞控计算机、导航单元等真实硬件，能够将仿真生成的高保真传感器信号实时注入真实硬件并采集其控制指令回馈至仿真模型形成闭环，重点验证算法在真实硬件上的运行时效性、资源消耗情况及在模拟扰动和故障注入下的动态响应与鲁棒性。
- c) 室内测试环境：受控的室内场地部署光学运动捕捉系统或超宽带定位网络以提供毫米级精度位姿真值，设置典型静态与简易动态障碍物，并配备完备的安全防护措施，主要用于标称控制效

能的初步实物验证、安全控制中位姿估计与异常检测算法的实测校准以及小规模多机系统基本安全功能的测试。

- d) 室外测试环境：在典型的野外或城市外围场地建立差分GNSS/RTK基准站网络以提供厘米级定位真值，布设光学跟踪系统等作为冗余真值源，设置真实地理特征与可控动态障碍物，配备气象监测站实时记录环境参数，并具备安全的空域与地面管控措施，以全面考核系统在真实物理环境下的标称控制精度、抗不确定性能力及安全控制综合效能。

#### 6.2.4.2 标称控制控制效能测试

标称控制控制效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：基于高保真建模与仿真软件，构建包含无人平台高精度动力学模型、传感器（如GNSS、IMU、视觉、相对导航）仿真模型、物理环境（如大气、地形、电磁环境）模型及通信网络模型的数字孪生系统。在仿真环境中设置期望的轨迹、姿态和任务动作时序。运行标称控制算法，驱动虚拟无人平台模型。全程记录平台的实际轨迹、姿态角及每个任务动作的实际执行时间。计算轨迹跟踪误差、姿态稳定性偏差及任务动作时序偏差率。
- b) 半实物仿真测试：构建硬件在环（HIL）测试环境。将真实的控制器（如飞控计算机）接入仿真回路。仿真机向控制器注入模拟的传感器数据（位置、姿态、速度等），并接收控制器发出的实际控制指令驱动虚拟模型。验证真实硬件在闭环控制中的性能，记录各项指标。
- c) 实物测试：在符合要求的室内或室外真实物理场地，部署由真实无人平台（无人机、无人车、无人艇）组成的系统。测试环境应能提供或模拟真实的操作条件。高精度真值测量系统（如RTK、光学跟踪）全程记录平台的实际轨迹、姿态和动作时间。对比实际数据与指令数据，计算标称控制各项效能指标。
- d) 验证记录规范见表12：

表12 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
轨迹跟踪控制效能	轨迹位置偏差序列	记录每个采样时刻的实际位置与期望位置，计算欧氏距离偏差，最终统计整个任务周期的均方根误差
姿态稳定性控制效能	姿态角偏差序列	记录每个采样时刻的实际姿态角（滚转、俯仰、偏航）与期望姿态角，计算各角度偏差绝对值，最终统计整个任务周期的均方根误差
任务动作时序控制效能	任务动作执行时间偏差	记录每个任务动作的实际开始时间戳和计划开始时间戳，计算时间差绝对值，最终统计所有动作的时间偏差率
轨迹跟踪控制效能	轨迹位置偏差序列	记录每个采样时刻的实际位置与期望位置，计算欧氏距离偏差，最终统计整个任务周期的均方根误差

#### 6.2.4.3 抗不确定性增强控制效能测试

抗不确定性增强控制效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：在仿真环境中注入典型的不确定性因素，如持续风扰、突发阵风、执行器效率部分失效、模拟通信延迟或数据丢包等。运行抗不确定性增强控制算法（如鲁棒控制、容错控

制、容侵控制），观察系统在扰动下的状态响应，记录相位裕度、增益裕度、容错控制效能和容侵控制效能。

- b) 半实物仿真验证：构建硬件在环（HIL）测试环境，通过实时仿真机或专用故障注入设备模拟不确定性条件。具体包括：在传感器数据流中注入偏置噪声模拟传感器故障；调整动力学模型参数模拟气动参数不确定性；控制执行器输出效率模拟舵面损伤；引入网络延迟和丢包模拟通信退化。将真实的鲁棒控制器、容错控制算法模块或入侵检测系统接入测试回路，验证其在不确定性条件下的稳定保持能力、故障重构性能及安全边界。记录系统在各类扰动下的关键状态参数、控制裕度变化及任务完成情况。
- c) 实物测试：在受控的真实外场环境中，通过可控方式引入物理扰动。使用便携式风机制造可控风场干扰；通过软件指令临时限制特定执行器的行程或功率模拟局部故障；使用信号干扰器在特定频段制造可控通信干扰。真实无人平台在执行标准任务过程中，应对这些引入的不确定性因素。通过真值系统与机载数据记录，评估平台轨迹保持能力、姿态恢复速度、故障下的任务完成度，以及遭受干扰时的系统稳定性与连续性。
- d) 验证记录规范见表13：

表13 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
鲁棒控制效能	系统频率响应数据	通过扫频测试或阶跃响应测试，记录系统的开环频率特性曲线，提取相位裕度和增益裕度数值
容错控制效能	故障注入与系统状态记录	记录每次故障注入的类型、时间、位置，以及故障后各无人系统的任务完成状态（完成/部分完成/失败），统计维持效能的系统比例
容侵控制效能	网络攻击与数据完整性记录	记录模拟攻击的类型、时间、数据包总数、有效验证通过的数据包数量，计算数据传输完整率

#### 6.2.4.4 安全控制效能测试

安全控制效能测试包含以下环节：

- a) 数字仿真验证：基于高保真建模仿真平台，构建包含复杂静态与动态障碍物模型、传感器（如激光雷达、视觉）感知模型、平台动力学模型及环境模型的数字孪生系统。注入各类异常工况（如传感器跳变、通信中断、能源消耗异常）以及模拟网络结点失效。运行安全控制相关算法，评估其位姿估计精度、异常检测准确率、能源利用效率以及网络重构恢复时间和重构率。
- b) 半实物仿真验证：构建硬件在环（HIL）测试环境。将真实的感知传感器（如激光雷达、相机、处理单元）或它们的原始信号模拟器，以及避障决策计算单元接入仿真回路。通过仿真机生成复杂场景的传感器原始数据（如带有遮挡、反光的视觉图像，存在多路径效应的雷达点云），测试位姿估计算法在真实计算单元上的精度与鲁棒性。注入模拟的传感器数据异常、总线通信错误、电池电压突变等信号，验证异常检测模块的实时性与准确性。模拟网络拓扑动态变化（结点加入/退出），测试真实通信硬件与协议的网络重构能力。记录各模块的处理结果、响应时间及资源消耗。

- c) 实物测试：在符合要求的、设有真实障碍物（静态与可控动态）的实测场地，部署由真实无人平台组成的系统。人为制造典型异常，如遮挡GPS天线模拟信号丢失、断开某传感器连接模拟故障、快速充放电测试能源管理策略，检验系统异常检测与处置机制的可靠性。通过地面站指令使集群中特定节点主动脱网或进入休眠模式，观察剩余节点通信网络的重构过程与恢复时间，并使用网络分析仪记录链路质量、吞吐量、延迟等参数，评估动态网络重构性能。
- d) 验证记录规范见表14：

表14 指标计算项记录要求

测试指标	记录项	记录标准
位姿估计效能	位姿估计值与真值对比数据	记录每个采样时刻的估计位置/姿态与高精度真值系统测量值的偏差，计算整个任务周期的均方根误差
异常检测效能	异常事件与检测结果记录	记录所有预设异常事件的发生时间、类型，以及系统检测到异常的时间、类型和置信度，统计检测准确率和虚警率
能源管理效能	能源消耗与任务效能数据	记录任务期间各无人系统的总能耗、用于核心任务执行的能耗，以及任务完成度的量化评分，计算能源利用率
动态网络重构率	网络拓扑变化记录	记录节点失效前后的网络连接矩阵，统计重构后实际存在的有效连接对数与理论最大连接对数的比例
网络重构恢复时间	故障与恢复时间戳	记录节点被判定失效的精确时间戳和网络拓扑重新达到稳定状态的时间戳，计算时间差

### 6.3 综合评估与报告

整合所有子项在不同测试阶段的效能指标，进行纵向（跨阶段）和横向（跨科目）对比。进行加权综合，形成态势感知整体效能指数，并分析其在不同域、不同环境条件下的表现。撰写最终测试报告，内容需包括：各阶段测试配置与环境描述，各阶段、各分项的指标结果与对比曲线，多域协同效能专项分析，系统强项、弱项与瓶颈问题分析，明确的改进建议与结论。