

团 体 标 准

T/CAMC 0008-2025

低空智能网联系统 第2部分：车联网  
通用要求

General Technical Requirements for Part two of Low-Altitude Aerial  
Intelligent Network (LAIN)

征求意见稿

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国计算机自动测量与控制技术协会 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 缩略语 .....	2
5 总体技术架构 .....	3
5.1 概述 .....	3
5.2 系统分层架构 .....	4
5.2.1 终端层 .....	4
5.2.2 网络层 .....	5
5.2.3 平台层 .....	7
5.2.4 应用层 .....	8
5.3 技术特征 .....	9
5.3.1 智能化 .....	9
5.3.2 网联化 .....	10
5.3.3 标准化 .....	10
6 核心功能要求 .....	11
6.2 通信系统 .....	11
6.2.1 概述 .....	11
6.2.2 协议兼容性 .....	11
6.2.5 通信时延 .....	12
6.3 导航定位 .....	12
6.3.1 概述 .....	12
6.3.2 定位精度 .....	12
6.4.1 概述 .....	12
6.4.2 感知精度 .....	12
6.4.5 空域监测 .....	13
6.5 算力 .....	13
6.5.1 概述 .....	13
6.5.2 计算能力 .....	13
6.5.3 数据吞吐量 .....	14
6.5.4 存储延迟 .....	14
6.5.5 存储网络带宽 .....	14
6.6 数据交互 .....	14
6.6.1 概述 .....	14
6.6.2 接口标准 .....	14
6.6.3 共享机制 .....	15

7 安全与可靠性要求 .....	15
7.1 概述 .....	15
7.2 网络安全 .....	15
7.2.1 概述 .....	15
7.2.2 防护等级 .....	15
7.2.3 入侵检测 .....	16
7.3 数据安全 .....	16
7.3.1 概述 .....	16
7.3.2 隐私保护 .....	16
7.3.3 数据存证 .....	16
7.4 系统可靠性 .....	16
7.4.1 概述 .....	16
7.4.2 冗余设计 .....	16
8 测试、评估与认证机制 .....	17
8.1 概述 .....	17
8.2 测试与评估标准 .....	17
8.3.1 测试方法 .....	17
8.3.2 测试环境 .....	18
8.4 评估方法 .....	18
8.4.1 概述 .....	18
8.4.2 评估方法 .....	18
8.4.3 合规模板 .....	19
8.5 认证机制 .....	22
8.5.1 概述 .....	22
8.5.2 通信协议认证 .....	22
8.5.3 低空飞行器身份认证 .....	22
8.5.4 低空飞行器飞行计划认证 .....	22
9 实施与运维 .....	22
9.1 部署要求 .....	22
9.1.1 概述 .....	22
9.1.2 起降场部署要求 .....	22
9.1.3 能源补给设施部署要求 .....	22
9.1.4 低空情报与气象设备要求 .....	23
9.2 运维管理 .....	23
9.2.1 概述 .....	23
9.2.2 远程升级 .....	23
9.2.3 设备健康状态监测 .....	23
附录 A （资料性） .....	24

## 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。

本文件由中国计算机自动测量与控制技术协会提出并归口。

本文件起草单位：中信科移动集团有限公司、民航机场成都电子工程设计有限责任公司、上海量讯物联技术有限公司、西安爱生技术集团有限公司、南方电网通用航空服务有限公司（北京数字绿土科技股份有限公司）、北京国科标研科技有限公司。

本文件主要起草人：康绍莉、李小将、王弘毅、陈刚、潘计辉、苏超、范兴凯、吴俊臣、尚尔钧。



# 低空智能网联系统 第 2 部分：车联网通用技术要求

## 1 范围

本文件适用于低空智能网联系统（含无人机、电动垂直起降飞行器、有人/无人机协同等）的设计、制造、部署与运营，涵盖通信、导航、监视、数据交互等核心功能模块。

本文件核心目标为实现低空飞行器泛在互联、智能协同与安全可控，支撑高密度、复杂场景下的低空交通管理。

## 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。

- DB3205/T1146-2024 微轻小型无人机机巢通用管理要求
- GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 36478.4 物联网—信息交换和共享—第 4 部分：数据接口
- DB52/T 1538.1 “一云一网一平台” 第 1 部份：总体架构
- T/TDIA 00013 面向低空空域的集群通信平台建设技术规范
- T/GITIF 020 低空车联网导航定位系统通用要求
- T/CITS 350 通信感知一体化低空车联网技术要求
- T/SHV2X 5 支持低空车联网服务的 5G 网络规划建设技术规范
- 3GPP TS 22.835 Architecture enhancements for V2X services
- 3GPP TS 38.300 NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2
- 3GPP TS 36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2
- IETF RFC 6749 The OAuth 2.0 Authorization Framework

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**低空智能网联系统** low-altitude aerial intelligent network

由飞行器、地面基础设施、数据平台构成的具备感知、通信、决策能力的综合系统。

### 3.2

**动态空域管理** dynamic aerial arrangement

实时调整空域分配的智能管控技术。

### 3.3

#### 多源融合定位 multiple sources integrated positioning

北斗、视觉、惯导等多传感器协同定位技术。

### 3.4

#### 空联网 aircraft-to-Everything

空联网是指低空飞行器（如无人机、直升机等）与其他空中或地面实体（包括其他低空飞行器、地面车辆、基础设施等）之间的通信。

### 3.5

#### 低空直连通信 aircraft-to-Aircraft

无人机之间、飞机之间的协同与信息交换技术。

### 3.6

#### 通感一体化 integrated sensing and communication

将通信网络与感知系统结合到一起，通过共享频谱资源、硬件资源，能够在统一平台上实现数据传输和环境感知。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

5G: 第5代移动通信系统 (thefifthgenerationmobilecommunication)

6G: 第6代移动通信系统 (thesixthgenerationmobilecommunication)

A2A: 低空直连通信 (Aircraft-to-Aircraft)

A2X: 空联网 (Aircraft-to-Everything)

AR: 增强现实 (Augmented reality)

ATAR: 机载空中交通雷达 (Air-to-Air radar)

CNSI: 通信、导航、监视及信息 (Communication, Navigation, Surveillance, and Information)

DAA: 动态空域管理 (Dynamic aerial arrangement)

DDoS: 分布式拒绝服务 (Distributed denial of service)

E-UTRA: 演进通用地面无线接入 (Enhanced universal terrestrial radio access)

F-eVTOL: 电动垂直起降飞行器 (Electric vertical take-off and landing)

FLOPS: 运算次数 (Floating point operations per second)

GBAS: 地基增强系统 (Ground-Based augmentation systems)

GLONASS: 全球卫星导航系统 (Global navigation satellite system)

GNSS: 全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system)

GPS: 全球定位系统 (Global positioning system)

INS: 惯性导航系统 (Inertial navigation system)

IOPS: 整数运算次数 (Integer operations per second)

ISAC: 通感一体化 (Integrated sensing and communication)

LAIN: 低空物联网 (Low-Altitude aerial intelligent network)

LiDAR: 激光雷达 (Light detection and ranging)

MIMO: 多输入多输出 (Multiple-input multiple-output)

NR: 新空口 (New radio)

OAM: 操作维护管理 (Operation administration and maintenance)

OPS: 每秒处理次数 (Operations per second)

OTA: 远程升级 (Over-the-air technology)  
 RedCap: 5G 轻量化 (Reduced capability)  
 RTK: 实时动态定位 (Real-time kinematic)  
 SBAS: 星基增强系统 (Satellite-Based augmentation system)  
 URLLC: 超可靠低延迟的通信 (Ultra-Reliable and Low-Latency communications)  
 UWB: 超宽带 (Ultra-wide band)  
 VN: 视觉导航 (Visual navigation)  
 VR: 虚拟现实 (Virtual reality)

## 5 总体技术架构

### 5.1 概述

低空智能网联系统总体技术架构如图 1 所示。

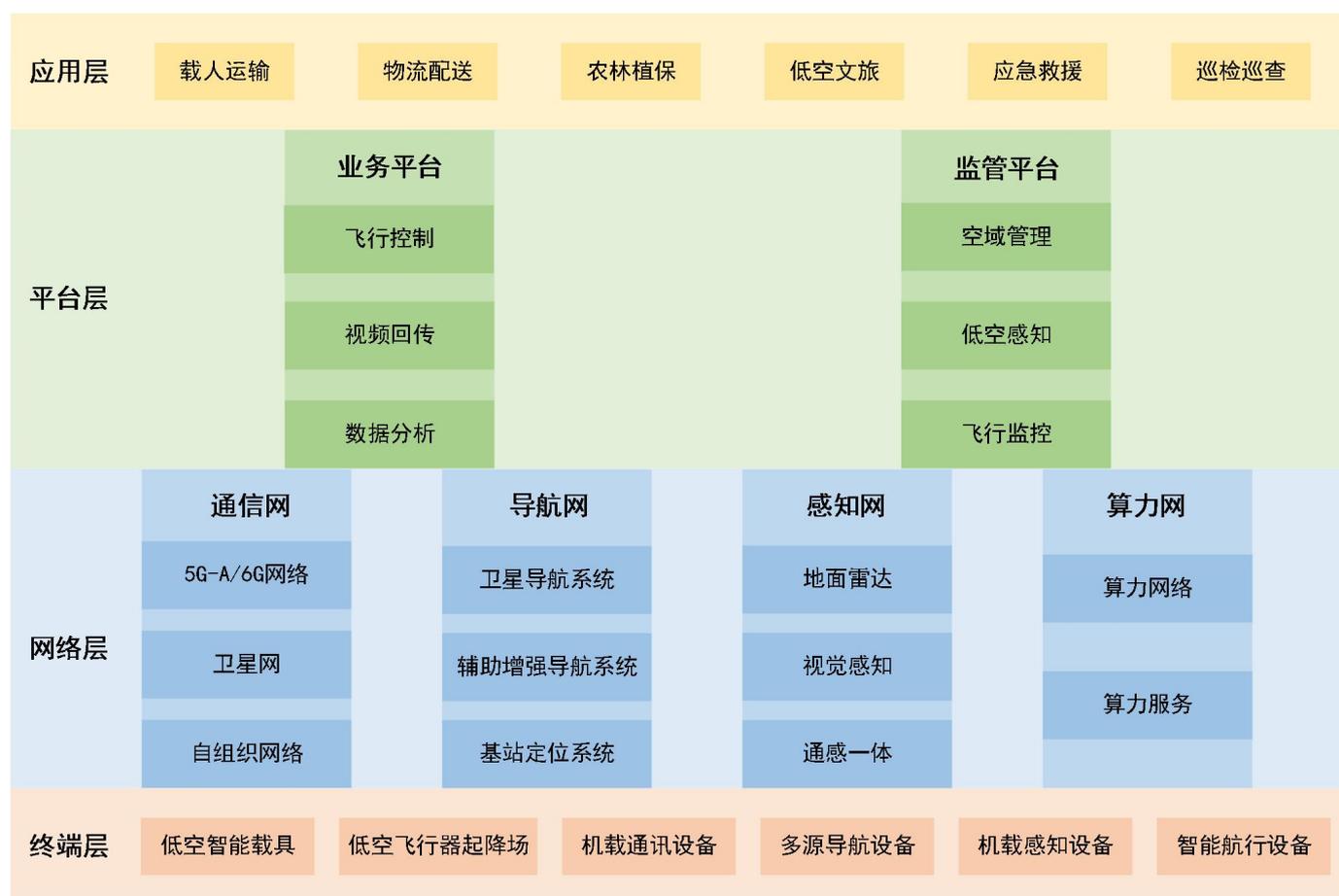


图 1 低空智能网联系统总体技术架构

低空智能网联系统总体技术架构主要由终端层、网络层、平台层、应用层构成。

- 终端层包含低空飞行器、机载通讯设备、多源导航设备、机载感知设备与智能航行设备。
- 网络层包含通信网、导航网、感知网与算力网。

- c) 平台层包含业务平台、监管平台。
- d) 应用层包含载人运输、物流配送、农林植保、低空文旅、应急救援、巡检巡查等典型应用场景。

## 5.2 系统分层架构

### 5.2.1 终端层

#### 5.2.1.1 概述

终端层是依托现有的空、天、地等各类基础设施，向智能载具和各应用系统提供通信、导航、监视、信息保障和物理基础设施等多种能力的综合体系。终端层作为低空智能网联系统的关键支撑，应确保低空飞行活动的安全、高效和有序开展。终端层主要包含低空飞行器、机载通讯设备、多源导航设备、机载感知设备、智能航行设备等。

#### 5.2.1.2 低空飞行器

主要包括电动垂直起降飞行器（eVTOL）、飞行汽车、无人驾驶载人航空器三类，如各种通航飞机，微、轻、小、中、大型无人机等。其中 eVTOL 是采用电力推进并可垂直起降的低空飞行器，飞行汽车是兼具道路行驶与空中飞行能力的低空飞行器，无人机驾驶载人航空器是依托自动化飞行或远程操控的低空载人飞行器。

#### 5.2.1.3 低空飞行器起降场

参考 DB3205/T1146-2024，低空飞行器起降场是一种可以为无人机提供存储环境、起降平台、数据通信、电能补给、载荷装卸、环境监测、视频监控等功能的装置，一般由主控系统、机电系统、通信系统和起降平台等组成。

#### 5.2.1.4 机载通讯设备

机载通讯设备是空地、空空之间数据通信的设备，是实现远程控制和数据传输的核心设备，在低空智能网联体系中的机载通信设备应具备高可靠性、低延迟、抗干扰、多模兼容、高速率、数据安全等基本要求，包括公网通讯终端、卫星通信设备、机间自组网设备、机载数传/图传设备、北斗短报文通信设备、低空专网终端等。

#### 5.2.1.5 多源导航设备

低空机载感知与识别设备是用于实现对地面的感知设备发送低空飞行器信息，并实现对周边空中交通态势和环境进行感知的机载设备，除飞行平台确保自身安全所配备的短距离避障设备外，还应包括广播式自动相关监视设备、远程识别设备、视觉识别设备、机载空中交通雷达（ATAR）等设备。

#### 5.2.1.6 机载感知设备

低空机载感知与识别设备是用于实现对地面的感知设备发送低空飞行器信息，并实现对周边空中交通态势和环境进行感知的机载设备，除飞行平台确保自身安全所配备的短距离避障设备外，还应包括广播式自动相关监视设备、远程识别设备、视觉识别设备、机载空中交通雷达（ATAR）等设备。

#### 5.2.1.7 智能航行设备

智能航行设备是集成在低空飞行器上的系统，包括智能飞行管理系统、无人机感知与避撞系统、机载电子围栏设备等，智能航向设备可实现自动化的飞行控制和管理功能。

## 5.2.2 网络层

### 5.2.2.1 通信网

#### 5.2.2.1.1 概述

通信网应实现从地面至 1000 米以下的立体覆盖，以满足低空飞行器的通信需求。针对广域高密度飞行场景，如低空物流运输、城市治理等，应充分发挥 5G 网络广覆盖、大连接、低时延的优势，以确保大规模低空飞行器的稳定接入。通信网可分为 5G-A/6G 网络、卫星通信网和自组织网络。

#### 5.2.2.1.2 5G-A/6G 网络

5G-A/6G 网络用于覆盖 300 米以下空域，可为低空飞行器提供通信、导航、定位、感知及低空飞行器有效管理等功能。在较低高度空域，可采用空地共网方案，通过优化 5G-A/6G 网络实现低空覆盖。在较高空域，可根据需要新建面向空中覆盖的 5G-A/6G 基站，既可提供良好的覆盖性能和较高的业务速率，又可兼顾通信与感知需求，可满足中高度以下的覆盖。对于通信和感知要求更高的局部区域，可选用通感一体设备，组网方式上针对线性覆盖区域可考虑低干扰、低成本的鱼鳞单扇区技术，或采用异频组网以降低干扰。非规则成片区域采用传统蜂窝组网提供连续覆盖。

#### 5.2.2.1.3 卫星通信网

在 300-1000 米空域，则可使用卫星通信网，其优势是广域覆盖，但容量较低、时延较大。卫星通信网与 5G-A/6G 网络可形成互补关系，从而为 1000 米以下的低空飞行器提供与地面同等的服务能力。

针对 1000 米以上的空域，应采用卫星通信网来覆盖。

#### 5.2.2.1.4 自组织网络

自组织网络可解决郊区、山区等场景下，低空飞行器与指挥台、低空飞行器群组之间的远距离通信、数据与图像传输以及感知等需求。

### 5.2.2.2 导航网

#### 5.2.2.2.1 概述

- a) 低空导航网应为低空飞行器提供三维高精度导航定位服务，提供全环境下精准、稳定的定位与路径指引，以支撑复杂任务的安全执行。
- b) 导航网主要由卫星导航系统、辅助增强导航系统、基站定位系统所构成。

#### 5.2.2.2.2 卫星导航系统

卫星导航系统是低空导航的核心基础。基于 GPS 和北斗系统的 GNSS 通过卫星信号提供全球范围内的精准定位，使无人机能够在广阔空域内保持稳定的航向和位置。这项技术支持无人机的自动飞行、路径规划以及定位和导航任务。

#### 5.2.2.2.3 辅助增强导航系统

辅助增强导航系统是惯性导航系统（INS）（通过加速度计、陀螺仪推算位置）、地基/星基增强系统（GBAS/SBAS）及实时差分定位（RTK）技术等组成，针对卫星信号受限的场景，补充视觉导航（VN）、激光雷达导航（LiDAR）、超宽带（UWB）定位、地磁导航等技术，解决卫星信号遮挡或干扰问题，支撑局部区域的精准导航。可提升卫星导航的完整性与可靠性，将卫星定位精度提升至厘米级，构成导航网的基础骨架，提供全局、高精度的基础定位能力。

#### 5.2.2.2.4 基站定位系统

基站定位系统基于蜂窝网络载波相位定位技术等技术，利用多个基站的相位信息，通过精确测量接收信号的载波相位计算目标位置，实现网络化高精度定位，定位精度最高可达到厘米级，且可在室内、隧道等无卫星信号的空间完成定位。以卫星定位为基础，通过多传感器融合，整合 GNSS、惯性导航、视觉导航、激光雷达、基站定位等数据，补足单一模式的局限，可实现全场景、高稳定的定位能力，实现全域、稳定的高精度定位，支撑无人机等低空飞行器在复杂环境下的安全作业。

#### 5.2.2.3 感知网

##### 5.2.2.3.1 概述

感知网应通过覆盖低空空域的多种感知能力，实现对 300 米以下的空域，获取包括位置、速度、高度、航向等在内的多维度信息。感知范围应面向低空目标，又应延伸至电磁环境的实时感知，以尽可能全面、准确地刻画低空物理空间、电磁空间和数字空间的状态。感知网应能够及时发现低空电磁干扰，为探测、定位和通信质量的优化提供依据，并在低空飞行过程中定位电磁干扰源，从而保障飞行安全。感知网融合地面雷达、视觉感知及通感一体等多域感知能力，覆盖低空空域并形成跨域空间联合覆盖的融合网络。

##### 5.2.2.3.2 地面雷达

雷达感知是低空目标探测的重要基础，能够在广域范围内提供稳定的监测能力，但在部分低空区域存在盲区和覆盖不足。

##### 5.2.2.3.3 视觉感知

视觉探测技术是通过光学传感器（如摄像头、红外热像仪）捕获无人机影像，结合图像处理算法实现目标检测与位置估计。红外视觉感知能够在能见度受限的情况下识别和跟踪低空飞行器，可有效弥补雷达探测的不足。

##### 5.2.2.3.4 通感一体

通感一体技术是融合感知与通信能力的 5G/6G 技术，通过共享频谱和硬件资源，实现高效的信息传输与环境感知，借助先进的信号处理算法分离通信与感知信号，一方面利用 MIMO 和波束成形技术将感知结果反向用于提升通信性能，另一方面利用通信网络的频谱资源和多站广域覆盖提升探测面积和精度，从而形成泛在覆盖的主动感知网络，可弥补雷达在低空探测中的盲区与覆盖不足，适用于需要高精度、大范围覆盖的低空场景。

#### 5.2.2.4 算力网

##### 5.2.2.4.1 概述

算力网应为低空飞行器的飞行任务提供所需获取的算力支撑和实时的决策支持，处理和分析从感知网获取的大量数据。算力网应通过将计算任务下沉到网络边缘，减少数据传输的时延，可以确保低空业务的高效稳定运行，同时，应提高低空飞行器智能化作业水平，支持云边端协同的算力服务。算力网包括低空算力网络与算力服务。

##### 5.2.2.4.2 低空算力网络

低空算力网络包含算力网络资源层、算力网络控制层、算力网络服务层、算力网络编排和管理层。

- a) 算力网络资源层：涵盖计算资源、网络资源及存储资源（如存储设备）等节点资源。
- b) 算力网络控制层：通过泛在感知能力实时监测节点算力占用及动态位置，结合监督学习预测未来算力占用及网络拓扑变化，并将感知与预测结果传递至服务层和编排管理层。
- c) 算力网络服务层：包含各种提供给用户的服务功能，如实现用户、平台与资源节点的交易等功能。
- d) 算力网络编排和管理层：实现算力网络的编排、安全管理、建模、操作维护管理（OAM）等功能。

#### 5.2.2.4.3 算力服务

算力服务应具备管理和处理来自各低空平台的大量数据的能力。各集中计算资源，应承担大规模数据分析、深度学习模型训练和智能算法优化等任务，为低空平台提供高级的分析和决策支持。同时，在低空算力平台工作过程中，低空平台的传感器和其他设备会产生大量的数据，这些数据需要长时间保存并进行分析。算力平台可通过分布式存储和高效的数据管理能力，确保数据的安全性、可靠性和可访问性。

### 5.2.3 平台层

#### 5.2.3.1 概述

平台层为低空智能网联系统提供了运行保障，其包括业务平台、监管平台。

#### 5.2.3.2 业务平台

##### 5.2.3.2.1 概述

业务平台以数据能力促进低空数智业务创新的重要引擎，提供高效智能的飞行服务、空地/空空协同的自主飞行、以及泛在可信的数据与信息服务。并且，业务平台应具备对无人机的飞行控制，对视频的回传和对数据进行分析的功能，以支持物流投送、交通出行、应急管理、农林植保、航空测绘、观光旅游等业务场景。

##### 5.2.3.2.2 飞行控制

业务平台应具备高度的自动化和智能化，能实现对低空飞行器的精确控制。这包括起飞、降落、航线规划等关键飞行阶段的自动化操作。

##### 5.2.3.2.3 视频回传

业务平台应具有高质量的视频传输技术、强大的数据处理和存储能力，以接收并处理低空飞行器传回的视频数据。

##### 5.2.3.2.4 数据分析

业务平台应具备对收集到的飞行数据进行深度分析的能力。这些数据包括飞行轨迹、速度、高度、能耗等，通过分析这些数据，可以优化飞行效率，预测和预防潜在的故障，提升飞行安全性。数据分析涉及数据交换中心、AI 调度引擎等，数据交换中心应支撑低空空域各信息交互主体间的信息同步；AI 调度引擎：应通过 AI 算法实现空域资源和网络资源的动态分配。

#### 5.2.3.3 监管平台

##### 5.2.3.3.1 概述

监管平台为政府及其他管理机构，提供对飞行活动安全性、合规性进行监管的能力，典型用户代表为各地政府(含公安、应急、交通等部门)。监管平台是一个复杂的系统，涉及到空域管理、低空感知、飞行监控等多个方面。

#### 5.2.3.3.2 空域管理

空域管理具体包括对空域的实时监控，规划飞行路线。空域管理宜采用动态扇区划分机制，以实现管制扇区的动态规划。

#### 5.2.3.3.3 低空感知

低空感知支持对多种传感器，如雷达、摄像头和红外传感器的数据进行实时处理和分析。

#### 5.2.3.3.4 飞行监控

飞行监控包括：

- a) 应通过连接高精度定位系统，确保低空飞行器位置的精确监控；
- b) 应利用先进的监视技术，实现对低空飞行器的实时监控；
- c) 应通过建立异常检测算法，自动识别异常飞行行为，提高对黑飞的探测能力。

### 5.2.4 应用层

#### 5.2.4.1 概述

低空互联网应用层是指随着低空飞行相关技术装备的逐步成熟、产业链供应链体系的持续形成、应用场景的不断丰富，依托低空通信、导航、感知、管控等技术的融合创新，面向具体业务需求，将智能飞行器及相关融合结果广泛应用于载人运输、物流配送、农林植保、低空文旅、应急救援、巡检巡查等多元场景。

#### 5.2.4.2 载人运输

- a) 低空载人场景是指利用直升机、eVTOL 等低空飞行器进行的载人飞行活动，这类活动通常涉及城市间的短途运输、旅游观光、紧急医疗救援等；
- b) eVTOL 作为未来城市空中交通的重要工具，其商业化进程正在加速，有望引领未来城市空中交通的发展。

#### 5.2.4.3 物流配送

- a) 低空物流配送是指利用无人机等航空器进行货物运输的物流方式，低空物流配送结合了低空经济与物流领域的新技术，通过数字化、智能化、无人化等服务体验，创造新的航空经济价值；
- b) 低空物流在快递配送、农产品运输、医疗物资输送等领域有初步应用，展现出作为物流行业自动化、智能化发展的重要方向的潜力。

#### 5.2.4.4 农林植保

低空农林植保是指无人机凭借高空灵活飞行能力和多种传感器的集成，可迅速获取大面积农田和自然环境的实时数据，帮助农民和环境管理者进行精准决策和有效管理。

#### 5.2.4.5 低空文旅

低空文旅是指利用低空空空间资源，结合数字技术，为文旅产业提供新业态和新体验的一种模式。低空文旅通过无人机、VR、AR 等技术，为游客提供空中观光、飞行体验、演艺表演、景区配送等服务，从而丰富旅游产品，提升旅游体验。

#### 5.2.4.6 应急救援

低空应急救援是指利用无人机、直升机等低空飞行器进行的应急救援活动，一般用于灾害现场的货物运输和现场状态信息采集。

#### 5.2.4.7 巡检巡查

低空巡检场景是指利用无人机等低空飞行器进行的巡检活动，这些活动通常用于电力线路、油气管道、桥梁、高速公路等基础设施的检查和维修，以及自然资源、城市治理等测绘与巡查任务。

### 5.3 技术特征

#### 5.3.1 智能化

##### 5.3.1.1 概述

智能化应借助 AI 与网联基础设施，使低空飞行器由“单体智能”走向“体系智能”，形成覆盖“感知—认知—决策—控制”的闭环能力。系统应通过数据交换网对通信/导航/监视等资源进行智能调度，实现从人工遥控到自动/自主运行的人机协同与规模化安全运营。智能化体现在低空设备智能化、低空监管智能化、资源调度智能化等方面。

##### 5.3.1.2 低空设备智能化

低空飞行器大量应用智能化的机载设备，并由智能化信息物理设施提供运行支撑。低空飞行器的智能化水平将由现阶段的单体智能，向依据任务、环境、场景的体系智能演进。基于人工智能，低空飞行器将从人工遥控运行逐步演进为自动运行，再进一步发展为自主运行。其核心功能包括：

- a) 被感知：低空设备应具备被周边低空飞行器和地面监视基础设施感知的能力，感知信息应由低空设备主动发送或报送，其内容包括但不限于设备标识、实时位置、状态信息等。
- b) 被管理：低空设备应具备在飞行全过程可被运行方全程、全时管理和操作的能力，能够实时响应来自智能网联体系的管理与操作指令，指令包括但不限于航线的调整、飞行状态调整指令等。
- c) 智能航行能力：低空设备应具备一定的环境感知和自主决策能力，通过对空域态势、周边空中交通态势、地面环境、基础设施状态等进行有效感知，并结合飞行计划、自身实时状态、载荷信息等，进行全自主飞行。
- d) 应逐步实现基于智能化航电系统的有人机与无人机的融合运行，实现大尺度上的无航路飞行或自由飞行。

##### 5.3.1.3 低空监管智能化

- a) 智能化监管体系中低空飞行器应被实时监控、调度、管控，低空飞行器的多维运行数据将实时报送至监管方。同时，监管方也应以少量人在回路内或人在回路外的方式实现对低空运行的高效监管。
- b) 低空交通管理系统需要通过 AI 算法实现空域的动态分配和低空飞行器的智能调度，提高空域利用率和飞行效率。

##### 5.3.1.4 资源调度智能化

应对低空通信网络资源进行调度分配、智能化分配频谱与带宽，确保不同通信方式之间的资源分配均衡，避免通信冲突和拥塞。通过智能化资源调度机制和数据处理技术，可确保系统在高负载和多任务情况下依然能够稳定运行，通过自动化资源调配系统，可确保网络资源的稳定和高效利用。

### 5.3.2 网联化

#### 5.3.2.1 概述

低空网联化是指通过整合地面蜂窝网、卫星系统等多种通信设施资源，确保低空网络全方位立体覆盖。通过将无人机、通信设施资源等进行有机结合，实现机-机、机-地、机-云等全域互联。并应依托地面蜂窝网实现探测感知与通信的协同作业，应构建无缝连接、高度集成、功能丰富的低空网络，为无人机网联化管理提供稳定可靠的网络环境。

#### 5.3.2.2 机-机互联

应允许无人机在小区域内通过直接的无线通信链路共享安全感知信息，机-机互联可依托 A2X 技术，使无人机之间实时交换飞行状态、位置、速度、传感器数据等关键参数，完成任务执行与空中避撞。这一协同方式支持多机协同路径规划、自动化飞行控制和应急管理制度，确保无人机在复杂环境中的安全运行。

#### 5.3.2.3 机-地互联

通过在地面站与低空飞行器之间建立稳定的数据链路，实现无人机与地面系统之间的态势数据互通、飞行情报传递、实时传输飞控数据及图像视频等内容，为多区域低空飞行器的全局飞行提供坚实保障。

#### 5.3.2.4 机-云互联

- a) 机是机-云互联的起始点，负责采集、处理和存储数据，并将数据发送到其他组件进行协同处理，通过将计算任务下沉至网络边缘，减少数据传输时延，从而确保低空业务的高效与稳定运行。
- b) 云应负责承载大规模、复杂的计算任务，如深度学习模型训练、大数据分析和长周期任务。

### 5.3.3 标准化

#### 5.3.3.1 概述

对现存的协议、接口、测试验证等标准体系制定统一的技术标准和操作规范。

#### 5.3.3.2 协议标准化

协议标准化旨在确保各类设备可通过统一的协议实现信息交换与联动控制，从而保障系统整体的无缝协作。由于通信、导航、监测系统可能采用差异化的通信协议，例如导航模块可能使用 NMEA 协议，而飞行控制系统则可能采用 MAVLink 或 TCP/IP 协议，因此系统应具备多协议兼容能力。为实现这一目标，可通过部署网关或协议转换模块，对不同协议进行适配与转换，从而保证不同系统之间的数据交换高效、顺畅且无缝。

#### 5.3.3.3 接口标准化

接口标准化通过采用统一的通信接口与数据接口规范，提升设备的互操作性和行业整体规范水平。需要支持遵循 3GPP TS 23.285 的 PC5 接口、遵循 3GPP TS 38.300 的 5G NR 或遵循 3GPP TS 36.300 的 E-UTRA 接口，以及遵循 GB/T 36478.4-2019 的 IOT 标准数据接口规范来推进标准化建设。未来应进一步考虑 6G(等未来通信的) 相关接口。

### 5.3.3.4 测试验证标准化

测试验证标准化旨在通过统一的体系架构与方法体系，确保数字低空系统在不同阶段、不同环境下均能实现科学、可比较和可验证的测试与验证。通过将物理设施、信息基础设施、数字化空间与应用系统有机结合，并通过模拟仿真、封闭区域和开放区域等方式进行测试，全面覆盖数字低空系统的测试需求，为测试与验证工作提供了系统性指导。

## 6 核心功能要求

### 6.1 概述

低空智能网联系统是由低空飞行器、地面基础设施、数据平台构成的综合系统，需要包括通信系统、导航定位、监视与态势感知、算力、数据交互等方面的核心功能。

### 6.2 通信系统

#### 6.2.1 概述

- a) 低空智能网联系统的通信系统是指利用 5G-A 通感一体、卫星通信、A2X、RedCap 等技术，实现地面至 1000 米以下空域的立体覆盖，应与地面边缘计算、网络切片技术深度融合，构建通算一体的低空通信网络质量保障体系，以满足无人机超视距控制与业务操作的需求。
- b) 通信系统核心功能要求主要包含协议兼容性、安全传输、通信速率要求、通信时延要求等。

#### 6.2.2 协议兼容性

协议兼容性是指低空智能网联系统在通信层面能够支持并融合多种通信协议和标准，满足不同应用场景的需求。

- a) 在通信层面，应兼容 5G-A 的 URLLC 场景（空口时延 $<10\text{ms}$ ），以保障在低空复杂环境中实现毫秒级控制和突发指令的可靠下发。
- b) 应支持 5G-A 的 mMTC 能力（单基站连接数 $\geq 1,000,000$  连接数/ $\text{km}^2$ ），以满足密集连接需求。
- c) 当视距受限或地面网络不可用时，应引入卫星通信冗余链路，即在主链路之外预设可自动接管的备用链路，实现主备链路的协同与无感切换，确保任务过程中的业务连续性与覆盖弹性，以在不同环境条件下仍能保持稳定覆盖和服务能力。

#### 6.2.3 安全传输

安全传输是指在数据从发送端到接收端的传输过程中，确保数据的机密性、完整性和可靠性，防止数据被窃取、篡改或丢失。

- a) 端到端加密采用 SM9 算法，实现从终端到平台全链路的数据机密性与身份可信。
- b) 系统应具备抗干扰能力，误码率应控制在 $\leq 10^{-6}$ ，通过链路质量评估、适配性的编码、重传策略等措施，维持关键控制与数据回传的稳定可靠。

#### 6.2.4 通信传输速率

通信传输速率是指在通信系统中，数据在单位时间内能够传输的最大数量，以 bps 为单位。

- a) 在载人运输、物流配送、应急救援、巡检巡查、低空文旅等场景下，上行速率应 $\geq 5\text{Mbps}$ ，以支持 1K 视频回传。
- b) 在农林植保、载人运输、物流配送、应急救援、巡检巡查、低空文旅等场景需要清晰视频或者激光雷达点云数据的时候下，上行速率应该 $\geq 25\text{Mbps}$  或以上，以满足 4K 高清视频或激光雷达点云回传的需求。
- c) 下行方面，应保证至少 300kbps 的带宽，用于飞行控制命令下发。

### 6.2.5 通信时延

通信时延是指数据从发送端到接收端所需的时间，对于低空飞行器的实时监控和控制至关重要。

- a) 控制业务的端到端时延应控制在 $<100\text{ms}$ ;
- b) 普通业务（如视频、遥测）应控制在 $<500\text{ms}$ ;
- c) 在低空文旅场景下，为了保证控制的可靠性以及及时性，控制链路的端到端时延应 $<20\text{ms}$ 。

## 6.3 导航定位

### 6.3.1 概述

针对导航定位，需要考虑定位精度与多源冗余两方面需求。

### 6.3.2 定位精度

定位精度是指导航系统在确定无人机位置和高度时的准确程度。

- a) 针对大多数应用场景，如农林植保、巡检巡查、应急救援等，定位精度需要建议水平定位精度 $\leq 1$ 米，高度精度 $\leq 0.3$ 米；
- b) 载人运输、低空文旅等对安全性要求极高的场景，或城市等复杂环境中，则需要更高的定位精度，定位精度需要建议水平定位误差 $\leq 0.1$ 米；
- c) 物流运输等对起降点定位精度要求极高的应用中，可以通过融合地面感知与GNSS，确保无人机在起降过程中的精准性与安全性，定位精度需要实现厘米级。

### 6.3.3 多源冗余

多源冗余是指无人机在导航和环境感知过程中，采用多种不同的信号来源和感知手段，实现相互备份和补充，可提升系统的可靠性和安全性。

- a) 无人机的导航系统需要支持北斗、GPS、GLONASS等多种卫星导航信号，具备跨星座的自主切换与融合能力，可够根据不同星座信号的可用性和质量，动态选择最优组合，从而提升定位的稳定性与精度。
- b) 无人机需要集成视觉和激光雷达等多源环境感知手段，实现对周边环境的实时感知与辅助避障能力。当遇到卫星信号可用度下降、信号遮挡等复杂情况时，无人机需要实现环境感知数据与导航信息融合，持续保障航迹的连续性以及飞行的安全性。

## 6.4 监视与态势感知

### 6.4.1 概述

监视与态势感知是通过地面与无人机的多种传感器设备，实现对300米以下的空域，获取包括无人机位置、速度、高度、电池电量、载荷情况、气象等在内的多维度信息。监视与态势感知核心功能要求主要包括感知精度、实时检测、冲突预警、空域监测等。

### 6.4.2 感知精度

感知精度是指基站、雷达等设备通过发射感知信号，对无人机等低空飞行器的位置、速度、高度等参数进行监测时所达到的精确程度。

为有效防范“黑飞”行为，并确保无人机按照规定航线安全、准确地飞行，低空智能网联系统应依托基站与雷达等多种感知手段，对低空飞行器的位置进行高精度、实时的监测与定位。

- a) 对于与系统配合的合作类无人机，水平/垂直定位误差应控制在 $\leq 10$ 米，以确保飞行路径的精准可控；
- b) 对于无法与系统直接通信的非合作类无人机，水平/垂直定位误差应控制在 $\leq 20$ 米；

c) 为精确掌握飞行路径，还需要速度感知误差控制在 $\leq 0.5$ 米/秒。

### 6.4.3 实时监测

实时监测是指无人机应对低空飞行器状态以及环境参数作出监测。

- a) 低空飞行器状态是指无人机在飞行过程中的自身运行参数与健康状况，包括电池电量、载荷情况等。这些信息可反映低空飞行器的即时运行状态，也是飞行安全管理、任务调度和应急处置的重要基础。对低空飞行器状态的实时监测与分析，可提前发现潜在风险、优化飞行路径，并保障任务的高效与安全执行。
- b) 环境参数是指影响无人机飞行安全与性能的外部条件信息，包括气象因素和空域障碍物等。借助微型气象站、气象传感器以及无人机搭载的气象探测设备，可实时获取低空飞行环境中的关键数据，如风速、气压、湿度、温度等，为低空飞行器在复杂气象条件下的安全运行提供保障。同时，通过雷达、视觉传感器等技术对周边障碍物进行检测与识别，可有效预防碰撞风险。

### 6.4.4 冲突预警

冲突预警是指当无人机存在潜在碰撞风险时，能够及时将警报信息上传至低空智能网联系统。低空智能网联系统基于数字孪生技术，对无人机自身航迹、周边目标动态以及空域限制等信息进行分析，可实现对碰撞风险的实时评估。在此基础上，低空智能网联系统能够预测潜在冲突，并根据风险等级进行分级预警，响应时间应满足 $\leq 200\text{ms}$ 。

### 6.4.5 空域监测

空域监测是指对低空飞行器身份的精准识别，以及对非合作类目标的有效监视。低空智能网联系统通过感知手段，实时采集并分析空域内低空飞行器的相关信息，确保能够准确判别低空飞行器身份，并及时发现未登记或未配合的非合作类目标。

- a) 对于合作类无人机的监视，系统要求应满足虚警率 $\leq 5\%$ ，漏检率 $\leq 5\%$ ；
- b) 对于非合作类无人机的监视，系统要求应满足虚警率 $\leq 10\%$ ，漏检率 $\leq 10\%$ 。

## 6.5 算力

### 6.5.1 概述

针对算力，需要考虑计算能力、数据吞吐量、存储延迟、存储网络带宽四个指标。

### 6.5.2 计算能力

#### 6.5.2.1 概述

- a) 计算能力是衡量算力设备的处理速度和效率，通常以每秒浮点运算次数（FLOPS）、整数运算次数（IOPS）或每秒处理次数（OPS）来衡量；
- b) 低空智能网联系统的计算能力能够由端、边、云三个层次进行构建。

#### 6.5.2.2 端算力

端算力是指在低空无人机上进行的计算和数据处理，其关键任务是实时处理、决策和局部控制，确保低空无人机可在动态和不确定的环境中自主运行。主要应用于飞行路径规划、飞行控制、空间旋停控制、自动识别跟踪、图像分析、实时通信、电子对抗、自适应操控等任务。端算力应满足的技术指标：

- a) 有图像传输需求场景下，以一路视频识别为例，1080P、25FPS、检测数建议 $> 5$ ，端算力需求为5.5TFLOPS；
- b) 无图像传输需求场景下，无端算力需求。

### 6.5.2.3 边算力

边算力是指在靠近低空平台的地面或空中站点上进行的数据处理和计算，可弥补端算力的局限性，通过靠近数据源的计算能力，减轻端侧的负担并优化计算性能。主要应用于数据封装、逻辑服务、同步协同、集中调控、数据分析、端到端通信等任务。边算力应满足的技术指标边算力需要 $\geq 100\text{TOPS}$ 。

### 6.5.2.4 云算力

云算力是低空数字化架构中的核心计算层，通常部署在远程数据中心或云平台上，其应具备强大的计算能力和海量的存储空间。主要应用于飞行态势管理、大规模数据分析、无人机集群调控、大模型运算、智能算法优化等任务。

### 6.5.3 数据吞吐量

- a) 数据吞吐量是衡量存储设备单位时间内能够处理的数据量，通常以每秒读写的数据量 (MB/s 或 GB/s) 来计算。
- b) 数据吞吐量应满足的技术指标为数据持续读写速率需要 $\geq 5\text{GB/s}$ 。

### 6.5.4 存储延迟

- a) 存储延迟是从发送请求到获得响应的时间间隔，低延迟的存储设备能够更快地响应读取和写入请求。
- b) 存储延迟应满足的技术指标为存储延迟需要 $\leq 50\mu\text{s}$ 。

### 6.5.5 存储网络带宽

存储网络带宽衡量存储设备传输速度的重要指标，较高的带宽意味着存储设备能够更快地处理和传输数据。存储网络带宽应满足的技术指标为存储网络带宽需要 $\geq 100\text{Gbps}$ 。

## 6.6 数据交互

### 6.6.1 概述

- a) 数据交互负责对系统中的通信、导航、监视等各类数据资源进行统一调度和优化分配，确保低空飞行环境中的资源得到充分利用和系统在高负载和多任务情况下依然能够稳定运行。
- b) 数据交互需要考虑接口标准和共享机制两方面要求。

### 6.6.2 接口标准

#### 6.6.2.1 概述

接口标准作为跨系统交互的技术规范，通过标准化协议实现数据格式统一与通信流程约束。

- a) 无人机行业普遍采用 3GPP5G 接口、5G NR 或 E-UTRA 接口的双模通信架构。
- b) 通信架构明确了物理层、链路层和网络层的参数与规则，包括信号调制方式、编码方式、传输速率等技术细节，确保无线通信的可靠性和兼容性。
- c) 数据接口规范则统一了设备间数据传输的格式和电气特性，便于不同厂商和类型的设备顺利对接。

#### 6.6.2.2 数据模型

推荐采用统一的数据模型（如 STANAG 7085），以规范元数据和业务负载的格式，提升数据处理的一致性和互操作性。

### 6.6.2.3 API 网关

API 网关是一种集成了配置发布、接入认证、用户鉴权、访问控制等功能的 API 管理和治理工具。开放式 API 网关提供 RESTful/GRPC 双协议接口，支持飞行计划申报、实时态势订阅、指令下发等服务的标准化调用，并集成遵循 IETF RFC 6749 的 OAuth 2.0 认证与流量配额控制。

### 6.6.3 共享机制

建立安全开放的数据共享机制，整合多源数据，包括飞行计划、空域情报、气象情报、航路状况、飞行器性能等，并对其进行分级开放和安全共享，为运营商提供运营效率提升分析、飞行性能优化建议，为监管部门提供实时监控和决策支持，促进低空交通的协同管理和可持续发展。

## 7 安全与可靠性要求

### 7.1 概述

在低空经济快速发展的背景下，低空飞行器、空域及基础网络设施应针对日益严峻的安全与可靠性挑战。若遭受非法接入、拒绝服务攻击或数据泄露，不仅会影响低空领域关键业务系统的稳定运行，还会威胁经济社会秩序与公众安全。因此，应从网络安全、数据安全以及系统可靠性等方面构建全方位的安全与可靠性体系，以确保低空业务的稳定、连续与可控运行。

### 7.2 网络安全

#### 7.2.1 概述

低空网络面临非法用户接入、拒绝服务、业务非法访问等多种安全威胁，应结合身份认证、访问控制等关键安全技术，确保通信网、导航网、感知网、算力网等的安全性，并提升低空飞行业务的安全性与连续性。网络安全的核心内容主要涵盖防护等级、入侵检测等方面。

#### 7.2.2 防护等级

##### 7.2.2.1 概述

网络安全的防护等级应支持《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019) 等保 2.0 三级基本及扩展要求。

##### 7.2.2.2 防 DDos 攻击

防 DDos 攻击是指低空智能网联系统应具备抵御 DDos 攻击的能力，抵御 DDos 攻击对通信链路、低空设备等进行的攻击和干扰，防止出现通信中断，低空设备网络栈崩溃等情况，保障系统的网络安全。防 DDos 的指标有吞吐量应控制在  $\geq 10\text{Gbps}$ 。

##### 7.2.2.3 边界防护

等保 2.0 三级的边界防护详见《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019)。

##### 7.2.2.4 访问控制

等保 2.0 三级的访问控制详见《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019)。

##### 7.2.2.5 安全审计

等保 2.0 三级的安全审计详见《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019)。

### 7.2.3 入侵检测

入侵检测指对非法接入、拒绝服务、业务非法访问等行为进行检测。主要方法：

- a) 可采用基于机器学习的行为分析技术，通过算法分析无人机间的数据通信和路由交换，构建正常行为模型并发现异常行为。
- b) 可使用基于图形算法的入侵检测模型，检测信息欺骗攻击和拒绝服务攻击。
- c) 宜结合深度学习、机器学习等人工智能技术，以自动识别无人机型号、制造商信息、飞行意图等关键特征，对潜在风险进行智能评估。
- d) 可通过强化学习建立智能自适应系统，侦察和防御攻击，从而增强系统的抗干扰能力与安全性。
- e) 对异常流量的识别准确率应 $\geq 99\%$ 。

## 7.3 数据安全

### 7.3.1 概述

低空网络数据面临着隐私泄露、信息篡改等方面的安全威胁，需要采用数据传输安全、数据隐私保护等安全关键技术，保障通信网、导航网、感知网、算力网等的安全，实现对低空飞行业务安全性及连续性的进一步保障。数据安全主要包括隐私保护、数据存证等。

### 7.3.2 隐私保护

隐私保护通常满足：

- a) 低空飞行器身份宜进行匿名化处理，在认证与授权阶段引入零知识证明，实现“可验证而不暴露真实标识”的访问控制。
- b) 对于敏感的数据，应遵循最小化采集与按需披露，仅在任务必需范围使用身份要素，降低传输与存储暴露面。
- c) 无人机集群在自组网中周期广播身份位置信息易泄露轨迹，应采用位置模糊、锚点、虚假、k-匿名等模糊策略或加密真实位置传输。
- d) 对采集的图片/视频，宜用数据级加密或内容级处理防止泄露。

### 7.3.3 数据存证

- a) 针对低空飞行器端侧存储的重要数据，如飞行数据、航拍视频、航拍照片等，应采用密码技术进行加密存储，防止数据泄露。
- b) 针对允许修改的重要数据，如电子围栏等，应采用密码技术进行签名验签，控制中心在下发时应对电子围栏数据进行签名，低空飞行器端应在接收后进行验签，以防止重要数据被非法篡改。
- c) 数据存证应满足的技术指标要求在写入压力波动时应满足存证延迟 $\leq 5s$ 的要求。

## 7.4 系统可靠性

### 7.4.1 概述

系统可靠性是指系统在长时间运行过程中，持续保持稳定性和准确性的能力，其保障可通过冗余设计、故障检测等技术手段实现，从而确保系统在各种运行条件下的稳定与可用性。

### 7.4.2 冗余设计

冗余设计包括双机热备、多链路切换等。

- a) 双机热备是指在关键设备，如地面控制中心、低空飞行器载荷等，配置两套功能和性能相同的主备设备，主设备工作时备设备应实时同步其运行状态。当主设备发生故障或性能下降时，备设备应在极短时间内无缝接管，保障系统的持续稳定运行。双机热备应采用专有硬件接口和高可靠性同步协议，确保故障切换过程中业务不中断，提升系统整体的可靠性和容错能力。
- b) 多链路切换是要在 5G 覆盖不足的区域，可布设额外的补充控制链路及数字链路，增加低空飞行器与地面的补充通讯链路。该链路采用公有或专有无线电频段及相应信道协议，与 5G 网络形成冗余配置，确保低空飞行器与地面设施间的通信链路不中断。多链路切换应满足的技术指标为多链路切换时间 $\leq 100\text{ms}$ 。

#### 7.4.3 故障诊断

自我诊断与健康监控系统通过多种传感器实时监控低空飞行器关键部件状态，及时预警故障和异常，确保各项指标范围内正常运行，最大限度提升飞行安全性。对于硬件逻辑故障，可结合智能芯片处理架构与任务特征，设计高效的故障单元检测与定位方法，并配合细粒度备份、动态替换和部分修复技术，实现故障的及时恢复。故障诊断应满足的技术指标为通过 AI 辅助故障预测，要求准确率控制在 $\geq 95\%$ 。

## 8 测试、评估与认证机制

### 8.1 概述

低空智能网联系统的性能和可靠性需要通过严谨的测试和验证，当前应建立数字低空测试、评估与认证架构，明确测试与验证指标体系，验证通信、导航、监视及场景适应性能，为不同场景下的应用提供科学依据，奠定规模化应用的坚实基础。

### 8.2 测试与评估标准

- a) 技术性能方面，低空飞行器与地面站应面向用户、运营方与监管方，提供覆盖载人运输、物流配送、农林植保、低空文旅、应急救援、巡检巡查场景的广泛低空运营与信息服务，判定低空飞行器及其配套的通信、导航、感知、算力与数据交互方案是否符合第 8.3 节所规定测试环境的技术要求。
- b) 安全性能方面，判定低空飞行器是否满足第 8.3 节所规定测试环境的网络安全、数据安全与系统可靠性技术指标。

### 8.3 测试方法与环境

#### 8.3.1 测试方法

##### 8.3.1.1 概述

测试方法与技术主要指测试内容的组织形式、开展测试的途径以及技术手段。测试方法包含基于用例的测试方法、基于场景的测试方法和公共开放空域测试方法。

##### 8.3.1.2 基于用例的测试方法

基于用例的测试方法是通过预先定义的测试用例，测试系统的某项功能是否满足特定条件下需求的方法。测试用例指是为某个特殊目标而编制的一组测试输入、执行条件以及预期结果，以便测试某个程序路径或核实是否满足某个特定需求。该方法的一个特点是对测试过程和测试结果有明确的要求。

##### 8.3.1.3 基于场景的测试方法

基于场景的测试方法是通过预先设定的场景,要求系统完成某项特定目标或任务来对系统进行测试的方法。场景描述了特定时间段内发生的事件过程,目前暂未形成场景的确切定义,但一般将场景理解为多个事件顺序发生构成的序列,并会延续一段时间,或简单理解为事件的剧本,描述一定空间和时间范围内的所有环境、场景参与者的状态、行为过程及目的。该方法的特点在于对测试结果没有明确要求,在不违背给定目标或任务的情况下,系统可以自主选择采取何种方式处理当前状况,具有很高的自由度。

#### 8.3.1.4 公共开放空域测试方法

公共开放空域测试方法与上述两种方法相比存在特殊性,主要体现在该方法是结合特定测试环境的专用测试方法,无法推广到其他测试工具上使用。

### 8.3.2 测试环境

#### 8.3.2.1 概述

测试环境反映了不同测试需求与使用场景的组合。测试环境包含实验室测试验证技术与外场验证技术。

#### 8.3.2.2 实验室测试

模拟仿真评估低空硬件在理想与边界场景下鲁棒性与容错能力,以及对各种异常情况的处理能力,包含对通信性能测试、导航精度验证等验证项目。

#### 8.3.2.3 外场测试

在实际空域及业务场景下进行,并与其他无人设备、基础设施与地面人员交互,评估低空硬件在各种复杂业务场景下的表现,包含高密度场景压力测试、极端环境适应性测试等测试项目。

### 8.4 评估方法

#### 8.4.1 概述

使用不同的高级评估方法对需求进行评估:

- a) 仿真(包括系统级和链路级仿真)。
- b) 分析(通过计算或数学分析)。
- c) 检查(审查建议书的功能和参数)。
- d) 并使用合规模板来检查测试参数是否满足前文指标。

#### 8.4.2 评估方法

表1 概述了评估特征与评估方法的对应关系

评估特征	高级评估方法	本文件中的需求说明(建议)
协议兼容性	检查	§6.2.2
安全传输	仿真	§6.2.3
通信传输速率	仿真和分析	§6.2.4
通信时延	分析和检查	§6.2.5
定位精度	分析	§6.3.2

感知精度	分析	§6.4.2
冲突预警	仿真	§6.4.4
空域监测	检查	§6.4.5
端算力	检查	§6.5.2.2
边算力	检查	§6.5.2.3
云算力	检查	§6.5.2.4
数据吞吐量	检查	§6.5.3
存储时延	分析和检查	§6.5.4
存储网络带宽	分析	§6.5.5
防护等级	检查	§7.2.2
入侵检测	仿真	§7.2.3
数据存证	检查	§7.3.3
冗余设计	检查	§7.4.2
故障诊断	仿真	§7.4.3

#### 8.4.3 合规模板

表 2 提供了评估候选无人机硬件设备是否符合所需的技术参数要求。依据实际测试情况，能够获得测试值，从而依据规定值评判是否满足要求，最后做出相关评论。

表 2 低空无人机硬件评估中所需的技术参数要求

评估特征	场景	规定值	测试值	是否满足要求	评论
通信传输速率	载人运输	上行 5Mbps 下行 300kbps			
	物流配送	上行 5Mbps 下行 300kbps			
	农林植保	上/下行 300kbps			
	低空文旅	上行 25Mbps 下行 300kbps			
	应急救援	上行 5Mbps 下行 300kbps			
	巡检巡查	上行 6Mbps 下行 300kbps			

通信时延	载人运输	控制端到端时延 <20ms; 业务端到端时延 <500ms			
	物流配送	控制端到端时延 <100ms ; 业务端到端时延 <500ms			
	农林植保	控制端到端时延 <100ms ; 业务端到端时延 <500ms			
	低空文旅	控制端到端时延 <100ms; 业务端到端时延 <500ms			
	应急救援	控制端到端时延 <100ms; 业务端到端时延 <500ms			
	巡检巡查	控制端到端时延 <100ms; 业务端到端时延 <500ms			
协议兼容性	URLLC 场景	时延<10ms			
	mMTC 场景	单基站支持≥ 1,000,000 连接数 /km <sup>2</sup>			
安全传输	复杂电磁环境	误码率≤10 <sup>-6</sup>			
定位精度	载人运输	水平定位误差≤ 0.1 米			
	物流运输	厘米级			
	其余场景	水平定位精度≤1			

		米			
		高精度 $\leq 0.3$ 米			
感知精度	合作类无人机	水平定位误差 $\leq 10$ 米 垂直定位误差 $\leq 10$ 米			
	非合作类无人机	水平定位误差 $\leq 20$ 米 垂直定位误差 $\leq 20$ 米			
	已知航线无人机	速度感知误差 $\leq 0.5$ 米/秒			
冲突预警	碰撞场景	响应时间 $\leq 200$ ms			
空域监测	合作类无人机	虚警率 $\leq 5\%$ , 漏检率 $\leq 5\%$			
	非合作类无人机	虚警率 $\leq 5\%$ , 漏检率 $\leq 5\%$			
端算力	图像传输场景	5.5TFLOPS			
边算力	全场景	100TOPS			
云算力	N/A	N/A			
数据吞吐量	全场景	数据持续读写速率 $\geq 5$ GB/s			
存储时延	全场景	存储延迟 $\leq 50$ us			
存储网络带宽	全场景	存储网络带宽 $\geq 100$ Gbps			
防护等级	全场景	等保 2.0 三级			
入侵检测	全场景	异常流量的识别准确率 $\geq 99\%$			
数据存证	全场景	存证延迟 $\leq 5$ s			
多链路切换	全场景	多链路切换时间 $\leq 100$ ms			

故障诊断	全场景	准确率≥95%			
------	-----	---------	--	--	--

注：规定值来源于业界已发布白皮书，包括《数字低空网络架构白皮书》、《低空智联网发展研究报告》、《低空经济场景应用与通信需求白皮书》、《数字低空测试与验证白皮书》。

## 8.5 认证机制

### 8.5.1 概述

为保障低空空域的安全有序运行，低空监管平台中需对通信协议、低空飞行器身份及飞行计划进行认证。

### 8.5.2 通信协议认证

低空飞行器与平台间的通信安全性直接影响飞行控制和监管能力，低空智能网联系统需对控制链路和数据链路的进行验证，确保加密机制、密钥管理和链路认证可靠，保证飞行器通信稳定、可控且不可被非法操控。

### 8.5.3 低空飞行器身份认证

低空智能网联系统必须具备对进入空域及接入系统的飞行器进行身份鉴别与权限管理的能力。对于所有进入管控空域的飞行器，系统应实现身份认证与校验，防止未经许可的“黑飞”行为。对于通过系统接入的飞行器，应实施严格的访问权限认证与授权控制，确保仅合法实体能够接入，杜绝非法终端入网。

### 8.5.4 低空飞行器飞行计划认证

低空智能网联系统必须具备对飞行计划进行审核、认证与全过程管理的能力。对于所有拟进入管控空域的任务，系统应对飞行计划的提交主体、任务类型、航线及运行条件进行审核及认证。同时在全飞行过程中，系统能对飞行计划的进行实时监测与动态更新，确保仅经授权的飞行任务得以实施。

## 9 实施与运维

### 9.1 部署要求

#### 9.1.1 概述

部署要求包含起降场部署要求、能源补给设施部署要求、低空情报与气象设备要求等。

#### 9.1.2 起降场部署要求

起降基础设施，是保障无人机和新型航空器低空飞行活动的重要物理基础设施，是提供飞行作业能力的核心节点。其主要组成部分包括：

- a) 场地结构：提供安全起降空间，满足不同类型航空器的需求。
- b) 附属空域（进离场）结构：规划进出场的空域通道，确保飞行安全。
- c) 起降调度管理服务：协调多架航空器的起降次序，优化场地使用效率。
- d) 通信、导航、监视和情报服务：提供必要的 CNSI 支持，保障低空飞行器的起降和运行。

#### 9.1.3 能源补给设施部署要求

能源补给设施是支撑无人机正常运营的基础设施，也是提升城市空中交通体系运作效率的关键环节。

- a) 能源补给设施接的充电功能作为核心部分，应满足高效、快速、安全和灵活的需求，以支持未来城市空中交通的可持续发展。
- b) 能源补给设施应具备换电功能，以提高运营效率。
- c) 能源补给设施应考虑与交通枢纽的连接性。
- d) 能源补给设施应具备实时监控和网络管理系统。
- e) 能源补给设施应支持不同类型和电压的低空飞行器充电接口。

#### 9.1.4 低空情报与气象设备要求

空航行情报基础设施用于对政府、军民航管部门发布的航图、禁限飞指令、机场状态和其他航行情报进行数字化和信息化处理，为低空飞行器和运营方提供及时、准确的情报信息。气象基础设施应为智能载具和各应用系统提供微气象服务。其主要组成部分包括：

- a) 气象数据接入：接收和整合各类气象数据源的信息。
- b) 自动气象站网络：部署地面和空中的自动气象观测设备，提供本地化的气象数据。
- c) 微气象监测系统：监测低空空域的细微气象变化，支持飞行计划和风险评估。
- d) 闪电定位系统：监测雷电活动，为飞行安全提供预警。

### 9.2 运维管理

#### 9.2.1 概述

运维管理主要包括远程升级、设备健康状态监测。

#### 9.2.2 远程升级

远程升级（OTA）是通过移动通信的空中接口实现对移动终端设备进行远程管理的技术。在低空智能网联系统中，无人机的机载设备应具备远程升级支持解析更高版本格式的能力，实现系统功能的持续优化与安全漏洞的及时修复。

#### 9.2.3 设备健康状态监测

设备健康状态监测设备通过多种传感器实时监控低空飞行器的关键部件状态，及时预警故障和异常情况，确保低空飞行器在各项指标范围内正常运行，最大限度提升飞行安全性。设备健康状态监测设备需要能够准确诊断出低空飞行器故障与故障的比例。

附录 A  
(资料性)

低空智联网通用技术要求的修订记录见表 A. 1。

表 A. 1 修订记录

日期	版本	修订内容
2025. 08. 14	V0. 1	全文初稿
2025. 08. 14	V0. 2	评审后修改版本