

团 体 标 准

T/CAMC 0011-2025

基于数字孪生的低空管理服务平台技术要求

Technical Requirements for Low-Altitude Management Service Platform
Based on Digital Twin

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	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体架构设计	1
4.1 分层架构模型	2
4.1.1 感知层	2
4.1.2 全要素数字模型层	2
4.1.3 智能计算层	2
4.1.4 应用服务层	3
4.2 核心功能模块	3
4.2.1 数据采集与融合	3
4.2.2 数字孪生建模	4
4.2.3 仿真与决策支持	4
4.2.4 服务接口	5
4.3 性能要求	5
4.3.1 实时性	5
4.3.2 可靠性	5
4.3.3 扩展性	5
5 数据管理要求	5
5.1 数据采集	5
5.2.1 数据分类分级	6
5.2.2 时空数据湖架构	6
5.3 数据共享	6
5.3.1 制定数据接口标准	6
5.3.2 建立数据安全共享机制	6
6 安全与隐私保护	7
6.1 物理安全	7
6.2 数据安全	7
6.3 隐私保护	7
7 应用场景与实施指南	7
7.1 典型场景	7
7.2 实施要求	7

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：中航（成都）无人机系统股份有限公司、航天时代低空科技有限公司、北京大学长沙计算与数字经济研究院、珠海中科慧智科技有限公司、蜂巢航宇科技（北京）有限公司、厦门兆翔智能科技有限公司、上海东海职业技术学院、西安爱生技术集团有限公司、北京国科标研科技有限公司。

本文件主要起草人：李荣强、潘超、杜盛熙、朱文卿、唐惠琼、李威、薛晓斌、王改、李轩、尚尔钧、张林虎。

基于数字孪生的低空管理服务平台技术要求

1 范围

本文件规定了基于数字孪生的低空管理服务平台技术要求的总体架构设计、数据管理要求、安全与隐私保护、应用场景与实施指南等。

本文件适用于低空管理服务平台的设计、开发、部署及运维，覆盖空域规划、飞行监管、应急管理、资源调度等全流程，适用于无人机、eVTOL、直升机等多类型低空飞行器的数字化管理场景。

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 33780.1 基于云计算的电子政务公共平台技术规范 第 1 部分：系统架构

GB/T 39612 低空数字航摄与数据处理规范

MH/T 2015 低空飞行服务系统技术要求

MH/T 4055.1 低空飞行服务系统技术规范 第 1 部分：架构与配置

MH/T 4055.2 低空飞行服务系统技术规范 第 2 部分：技术要求

MH/T 4055.3 低空飞行服务系统技术规范 第 3 部分：测试方法

YD/T 4324 低空物联网通信安全技术要求

T/CA 018 区块链服务数字孪生开发平台技术要求

T/CITS 411 低空空域智能管控系统建设指南

T/CIET 828 低空空域数字孪生系统技术规范

T/CQRA 008 低空飞行综合管理服务系统 低空航空器指挥应答规范

T/TDIA 00013 面向低空空域的集群通信平台建设技术规范

T/ZJXTJC 012 数字技术服务标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数字孪生低空管理服务平台 digital twin low-altitude management service platform

基于多源数据融合、动态仿真和虚实交互技术，构建低空物理系统的数字化映射，实现空域资源管理、飞行器监控及服务优化的综合平台。

4 总体架构设计

总体架构采用分层架构模型设计，详细内容如下所示：

4.1 分层架构模型

4.1.1 感知层

感知层是数字孪生低空管理服务平台的物理数据侧输入入口，承担原始环境信息和飞行目标状态的全面采集任务。通过部署多类型传感器与数据终端，构建覆盖全域、全时、全要素的信息获取网络，为上层数据处理与智能服务提供稳定可靠的数据底座。

主要采集技术与设备包括：

- a) 卫星遥感系统：提供高分辨率静态地理信息，支持区域空间基准设定。
- b) LiDAR（激光雷达）监测网络：实现街道、建筑、山体等三维地形建模和障碍物空间测绘，精度可达厘米级。
- c) 专业气象站与环境传感器组：部署于关键空域节点，持续采集风速、风向、大气压、湿度、能见度及天气现象等动态环境参数。
- d) 广播式自动相关监视（ADS-B）系统：对运行中的航空器广播定位信号，获取其经纬度、真高、地速、航向角等关键状态信息。
- e) 低空交通管理（UTM）地面监管终端：支持飞行器身份绑定、飞行计划上报、突发告警报传等功能，实现与区域管控中心的信息互通。

4.1.2 全要素数字模型层

全要素数字模型层是数字孪生低空管理服务平台的底层空间感知中枢与实体对象逻辑引擎，承担低空运行环境中复杂地理空间信息、空域管理要素与动态飞行器状态之间的高保真建模任务。本层基于“全量感知—语义统一—立体融合”的设计理念，采用模块化、能力化架构设计思想，构建平台运行所依赖的一致性、连贯性、可推演的三维数字基座。该层在架构上划分为三大功能模块：地理空间融合主模型库、飞行器数字资产池、多形态可视化驱动引擎，三者间数据流互联互通、维度互补，构成支撑跨时空低空各类运管行为的元建模基础。

- a) 地理空间融合主模型库：以城市数字孪生与核心行业应用（如交通、水利）为参照，在统一时空基准下整合多尺度空间数据，构建以动态 Geo-Grid 为核心的地理空间融合基座。整合内容包括高程地形、数字地貌、典型障碍物轮廓，并接入多源隐私空间数据库用于三维重建与本底更新。结合空域分类规则与管理边界协议，系统建立规则驱动型沙盘库。通过地面辅助定位信息发展动态陷阱区绘制与空域隔离机制模型，实现叠加性规则视图叠加能力。地理主模型具备独立缓存机制与分发模块，可按区域动态加载与卸载，可用于联邦式模型部署与全域设施建设评测。
- b) 飞行器数字资产池：围绕不同类型飞行器与服务需求设计可复用的“飞行器数字资产模板”。通过实时接入 ADS-B、飞行计划注册即时位置信息完成“模型锚定”，即结合时间戳将数字飞行动态与实体轨迹实现精准绑定。平台通过提供标准化 API 支持其他业务模块按需调用对应资产模型实例，实现实时路径预演、路线重规划、能耗预测等需要建模反馈功能。
- c) 多形态可视化驱动引擎：面向全域指挥、飞行监控、城市调度等多业务终端需求，本层配备独立的低延迟、高拟真可视化渲染核心模块。该引擎实现以下能力：实现跨平台运行、支持探针触控式操作；支持并发渐变与 LOD 多级细节混合加载策略，在动态损失与保真之间取得平衡；联动音视频采集通道与模型粒子系统营造声光同步反馈；提供增强现实（AR/VR）虚拟切换接口，以支撑飞行训练与实地调度场景延伸。

4.1.3 智能计算层

智能计算层是数字孪生低空管理服务平台实现高效管控与智能调度的“数据大脑”，主要承担多源异构数据的高阶处理、复杂环境下的综合计算以及服务于各类智能决策推演的算力支撑任务。本层基于高性能协同计算架构，为上层应用提供灵活可扩展、安全可控的智能服务能力。

- a) 实时超大规模数据处理：面对来自感知层海量数据的并发输入，计算层整合全网能力，形成具备极强扩展性与容错性的数据处理中枢，能够支撑每秒数万级消息处理，满足毫秒级空域变更响应要求。通过负载均衡、自动扩容等手段，支持在高密度飞行任务、突发事件、预案演练等多个场景下持续稳定运行。
- b) 态势认知与趋势预测：依托分布式架构的建模工具链与动力评估模块，系统可对飞行组合行为进行动态关联分析，实现空间态势的精准判断与短中长期趋势的合理预判。通过对区域空中运行状态的历史模式学习，刻画典型路径集群特征、高峰时段、瓶颈节点等运行规律，辅助管理人员自动优化资源配置方案。
- c) 路径与调度协同优化：平台支持多目标优化机制，允许在飞行速度、能耗经济、飞行安全、空中通行效率等多个维度之间进行合理权衡，快速生成满足业务需求的可行路径方案。通过内置的规则引擎与反馈机制，可根据不同飞行任务优先级、紧急响应等级、飞行类型与运营商需求，动态计算影响因素权重，确保发布的航线计划符合主管部门空域管理要求。
- d) 综合计算协同服务支撑能力：智能计算层建立标准化计算服务接口体系，集成功能包括但不限于轨迹分析模块、冲突规避检测、路径推荐引擎、任务优先级评估器等。

4.1.4 应用服务层

应用服务层作为数字孪生低空管理服务平台与用户及外部系统的交互纽带，通过多元化技术支撑构建起便捷高效的服务体系，实现平台价值的落地与延伸。其中，可采用标准化 API 接口为不同主体提供统一的数据交互规范，支持快速对接各类业务系统；VR/AR 终端支持则借助沉浸式可视化技术，将复杂的空域孪生数据转化为直观可交互的虚拟场景，助力管理人员实时掌握空域动态、开展模拟训练与应急指挥，提升决策效率与操作体验；WebGL 轻量化访问技术通过优化三维模型渲染与数据传输方式，使用户无需安装专用软件，即可通过浏览器便捷访问平台核心功能，实现低空管理服务的跨终端、低成本普及，进一步扩大平台的应用覆盖面与实用价值。

4.2 核心功能模块

4.2.1 数据采集与融合

该功能模块归属于平台的感知层与智能计算层协同界面。其核心部署于感知层原始数据入口管理区，子功能实现在智能计算层统一接口处理区。数据采集与融合是构建数字孪生低空管理系统高效协同能力的核心环节，负责接收来自感知层的多源异构数据，并通过标准化处理流程实现信息集成与语义打通，为后续建模、调度与决策提供结构化输入。

4.2.1.1 多源异构数据接入

数据采集与融合是实现精准决策和高效调度的核心环节，其核心在于对多源异构数据的有效接入与深度整合。其中，多源异构数据接入覆盖三大关键维度：空间地理与空域状态数据，包括空域划分、禁飞区边界、管制分区、障碍物高度图等静态要素以及飞行路径冲突预警、空域共享占用状态等动态要素；飞行器运行参数数据，涵盖各类航空器的三维实时位置、速度矢量、垂直速率、航向角、飞行计划标识符等信息；环境动态监测数据，包含气象传感器上报的实时参数，包括风速风向、降水强度、能见度变化、云底高度、沙尘/雾霾等级等。

4.2.1.2 数据融合准备流程

为提升数据可用性与建模精度，所有接入数据须依次通过如下处理阶段：

- a) 数据清洗与格式校验：剔除非法记录、缺失字段等漏洞，执行字段映射与单位标准化。
- b) 异常值检测与平滑处理：利用滑动窗口机制识别数据跳变、漂移现象，结合历史趋势自动填充短期空缺值。
- c) 时空对齐与坐标配准：弥合不同类型传感器的时间戳差异，利用统一时间系（如 UTC）及空间参考系（如 WGS84、CGCS2000）完成数据同步。
- d) 冲突消解机制：当出现冗余通道确认不同位置（如 ADS-B 与 UWB 轨迹不一致）时，启用加权平均表决策算法或可信优先策略进行融合赋值。
- e) 缓存与全量版本管理：将清洗整合后的结构化数据暂存于中间内存或时序数据库中，以支持前向查询、模型调试及故障回溯需求。

经过该流程的处理，原始数据已转化为可用于孪生机理建模、态势推演及告警触发的标准化输入源。

4.2.2 数字孪生建模

该功能模块位于平台全要素数字模型层核心平台内，包括空间模型定义、功能实体注册及更新流程。

4.2.2.1 高精度三维建模

在空域管理与飞行器管控的数字化升级中，数字孪生建模技术通过构建与物理世界高度吻合的虚拟镜像，为实时监控、仿真推演与智能决策提供了沉浸式的数字载体。其中，高精度三维建模是数字孪生场景构建的基础，需实现厘米级精度的地形地貌还原，精准刻画山脉、河流等自然地理特征；同时对建筑物、通信塔、桥梁等地面固定障碍物进行三维建模，确保虚拟场景与实际空域环境在空间尺度上的一致性，为飞行器路径规划中的碰撞规避提供精确的空间参考。

4.2.2.2 动态虚拟实体映射

动态虚拟实体映射则是实现数字孪生“动态交互”特性的核心环节，通过实时同步飞行器的物理属性与行为状态，在虚拟空间中构建精准的实体镜像。这不仅包括对飞行器续航能力、最大升限、载荷重量等性能参数的数字化映射，还需将飞行姿态调整、航线变更、应急响应等行为规范转化为虚拟实体的运行逻辑。借助传感器数据实时回传与模型参数动态更新，虚拟实体能够精准复现物理飞行器的运动轨迹与状态变化，使数字孪生系统既能实时反映当前空域运行态势，又能通过虚拟仿真模拟不同飞行方案的可行性，为复杂空域环境下的安全管控与效率优化提供强有力的技术支撑。

4.2.3 仿真与决策支持

本模块主要由平台中的智能计算层驱动，但需依赖全要素模型层建模成果与感知层输入数据支撑。

4.2.3.1 超实时仿真引擎

在空域数字化管理的进阶实践中，仿真与决策支持系统凭借强大的技术内核，成为提升空域运行效率与安全系数的关键引擎。其中，超实时仿真引擎以百万级并发处理能力为核心优势，能够同时模拟海量飞行器在复杂空域环境中的动态交互过程：无论是密集航线中的编队飞行，还是突发气象条件下的多机协同避让，引擎都能通过高效的并行计算技术，将物理世界的毫秒级变化在虚拟场景中实现超实时推演，为管理人员提供“快进式”的态势预判窗口，提前发现潜在的运行瓶颈与安全隐患。

4.2.3.2 冲突预警与路径优化

冲突预警与路径优化功能则依托物理模型与 AI 算法的深度融合，构建起智能化的决策支持体系。物理模型精准计算飞行器的气动特性、能耗变化与运动轨迹，为冲突判定提供科学的动力学依据；而

AI 算法通过深度学习海量历史飞行数据，不断优化冲突识别的灵敏度与路径规划的合理性，能够在飞行器间距逼近安全阈值前发出多级预警，并自动生成避开障碍物、规避气象风险且兼顾能耗最优的动态航线方案。“仿真预判—智能预警—优化决策”的闭环机制，不仅大幅降低了人工调度的压力，更让空域资源配置从“经验驱动”转向“数据驱动”，为高密度、复杂化的空域运行场景提供了全时段、高精度的决策支撑。

4.2.4 服务接口

该功能归属于平台应用服务层功能构件群体，作为外部接入系统的技术出口，指导业务联合。

4.2.4.1 标准化 API

服务接口作为连接用户与核心功能的桥梁，通过标准化设计与可视化呈现，实现了数据交互的高效性与信息感知的直观性。其中，标准化 API 为各类用户提供了统一、规范的数据交互通道，涵盖空域状态查询与飞行计划申报等核心功能：用户可通过接口实时获取空域占用情况、禁飞区动态、气象条件等关键信息，确保对当前空域态势的精准掌握；同时，飞行计划的在线申报、修改与审批流程也通过 API 实现自动化对接，大幅简化了传统人工申报的繁琐环节，提升了空域资源调度的响应速度。

4.2.4.2 可视化组件

可视化组件则将复杂的空域数据转化为直观易懂的视觉呈现，包括 2D/3D 态势展示、热力图分析与航路规划可视化等核心模块。2D/3D 态势展示通过动态图标与立体模型，实时呈现飞行器位置、航线分布与空域边界，让管理人员一目了然掌握全局运行状态；热力图通过颜色梯度直观标识空域流量密度、冲突风险高发区域，为资源调配提供精准的热点参考；航路规划可视化则以交互式地图形式，支持用户在界面上直接绘制、调整飞行路径，并同步显示路径对应的能耗、时长与安全系数，使决策过程更加直观高效。“标准化接口+可视化呈现”的服务模式，不仅降低了系统使用门槛，更让空域管理的全流程实现了从数据到决策的无缝衔接。

4.3 性能要求

4.3.1 实时性

系统需满足实时性要求，数据延迟应 $\leq 200\text{ms}$ ，仿真推演响应时间应 ≤ 5 秒。

4.3.2 可靠性

数字孪生平台必须具备高可用性、高弹性和容灾恢复能力，系统在连续运行过程中应满足以下具体技术要求：

- a) 全线高可用部署，服务降级自动中控快切机制需支持全链路 $\text{RTO} \leq 30$ 秒；
- b) 配置本地+异地双备份中心，异地备份周期至少每日 1 次，全量备份周期 ≥ 30 天；
- c) 在灾难情景下预计恢复时间 ≤ 2 小时，数据同步间隔不超过 15 分钟。

4.3.3 扩展性

系统需满足可扩展性，应支持模块化扩展，如新增传感器类型、监管规则等。

5 数据管理要求

5.1 数据采集

- a) 在空域数字化管理系统的实际应用中，服务接口作为连接用户与核心功能的桥梁，通过标准化设计与可视化呈现，实现了数据交互的高效性与信息感知的直观性。其中，标准化 API 为各类用户提供了统一、规范的数据交互通道，涵盖空域状态查询与飞行计划申报等核心功能：用户可通过接口实时获取空域占用情况、禁飞区动态、气象条件等关键信息，确保对当前空域态势的精准掌握；同时，飞行计划的在线申报、修改与审批流程也通过 API 实现自动化对接，大幅简化了传统人工申报的繁琐环节，提升了空域资源调度的响应速度。
- b) 可视化组件则将复杂的空域数据转化为直观易懂的视觉呈现，包括 2D/3D 态势展示、热力图分析与航路规划可视化等核心模块。2D/3D 态势展示通过动态图标与立体模型，实时呈现飞行器位置、航线分布与空域边界，让管理人员一目了然掌握全局运行状态；热力图通过颜色梯度直观标识空域流量密度、冲突风险高发区域，为资源调配提供精准的热点参考；航路规划可视化则以交互式地图形式，支持用户在界面上直接绘制、调整飞行路径，并同步显示路径对应的能耗、时长与安全系数，使决策过程更加直观高效。这种“标准化接口+可视化呈现”的服务模式，不仅降低了系统使用门槛，更让空域管理的全流程实现了从数据到决策的无缝衔接。

5.2 数据处理

5.2.1 数据分类分级

在空域数字化管理系统的生命周期中，数据处理环节通过科学的分类机制与架构设计，为数据价值挖掘奠定坚实基础。其中，数据分类分级是保障数据安全与合规使用的核心前提，按照数据属性将空域相关信息划分为公共数据、敏感数据与隐私数据：

- a) 公共数据涵盖基础空域划分、常规气象播报等可公开共享的信息，为公众与企业提供基础参考；
- b) 敏感数据包括实时空域流量、重要设施坐标等需严格管控的数据，仅限授权主体访问；
- c) 隐私数据则涉及飞行器操作人员身份信息、企业核心运行数据等，需通过加密脱敏等技术手段确保安全。

5.2.2 时空数据湖架构

时空数据湖架构的搭建则实现了海量空域数据的集约化管理，通过统一的数据存储与治理框架，整合空域状态、飞行器动态、气象变化等多维度时空数据，打破数据孤岛并实现标准化存储。这一架构不仅支持对历史数据的精准回溯，可随时调取任意时间段的空域运行记录、飞行轨迹数据等，为事故追溯与合规审计提供完整依据；更能通过时序分析算法挖掘数据背后的趋势特征，例如识别空域流量高峰时段、热门航线分布规律、气象变化对飞行影响模式等，为空域资源优化配置、未来运行态势预判提供数据支撑，推动空域管理从被动响应向主动规划转变。

5.3 数据共享

5.3.1 制定数据接口标准

数据接口标准需围绕低空管理服务平台的数据交互需求，明确物理接口与逻辑接口的统一规范。物理接口方面，需界定电缆连接、无线传输等主流类型的技术参数与适配场景，确保不同设备硬件层面的兼容互通；逻辑接口方面，要统一数据格式（含字段名称、数据类型、长度等）与传输协议（如 MQTT、HTTP 等），保障数据在平台与低空飞行器、监管终端、气象系统等关联主体间解析一致、传输稳定。同时，需嵌入安全性要求，明确数据加密算法（如 AES）与身份验证机制（如数字证书、动态口令），防止数据传输与交互过程中的泄露、篡改风险，为平台跨系统数据共享与业务协同筑牢技术基础。

5.3.2 建立数据安全共享机制

为保障跨系统、跨主体数据交互的安全性、可控性和可审计性，需建立全生命周期的数据安全共享机制，规范数据内外部共享的权责关系、访问路径与保护措施。主要机制包含：统一接口元治理机制、访问控制分级机制、动态安全绑定技术、应急处置与隐私脱敏机制、共享过程审计留痕。

6 安全与隐私保护

6.1 物理安全

安全与隐私保护需要满足物理安全，物理安全可通过设备防破坏设计抵御恶意损坏，结合抗电磁干扰设计保障设备在复杂电磁环境中稳定运行，筑牢空域数据系统的硬件防护屏障。

6.2 数据安全

数据安全通过采用国密 SM4/SM9 算法实现数据加密传输，同时依托基于角色的权限管理强化访问控制，全方位保障空域数据在流转与使用中的安全性。

6.3 隐私保护

隐私保护通过对飞行器用户身份信息实施匿名化处理，剥离可识别个人身份的敏感标识，在保障数据可用性的同时筑牢个人信息安全防线。

7 应用场景与实施指南

7.1 典型场景

系统可在以下典型场景中应用：

- a) 空域规划：可动态调整网格高度层，优化航路资源分配；
- b) 飞行监管：可实时识别“黑飞”行为，联动反制设备；
- c) 应急管理：可灾害场景三维推演，如龙卷风路径模拟。

7.2 实施要求

系统实施需要满足试点验证和评估机制两项要求，详细内容如下所示：

- a) 试点验证：可优先在无人机物流枢纽、城市空中交通示范区落地；
- b) 评估机制：可建立性能指标体系，如响应速度、准确率、用户满意度等关键指标。