

团 体 标 准

T/CAMC 0012—2025

低空试验测试场所数字化建设导则

Guidelines for Digital Construction of Low-Altitude Test and Experiment Sites

征求意见稿

202X-XX-12 发布

202X-XX-2 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 总体架构.....	2
4.1 建设原则.....	2
4.1.1 系统性.....	2
4.1.2 分层协同.....	2
4.1.3 动态扩展.....	2
4.1.4 安全可信.....	2
4.1.5 兼容性.....	2
4.2 核心能力要求.....	2
4.2.1 空天地一体化感知.....	2
4.2.2 数字孪生系统.....	2
4.2.3 智能调度管理.....	3
5 核心系统建设要求.....	3
5.1 数字化基础设施.....	3
5.1.1 通信导航系统.....	3
5.1.2 物联网感知系统.....	3
5.2 数据管理平台.....	4
5.2.1 数据采集标准.....	4
5.2.2 实时处理能力.....	4
5.2.3 数据安全.....	4
5.3 智能化应用系统.....	4
5.3.1 数字孪生平台.....	4
5.3.2 智能调度系统.....	4
5.3.3 安全监管模块.....	4
6 数据与测试管理标准.....	4
6.1 数据治理体系.....	4
6.1.1 数据采集.....	4
6.1.2 数据共享.....	5
6.1.3 数据分析.....	5
6.2 测试流程标准化.....	5
6.2.1 预测试阶段.....	5
6.2.2 实时测试阶段.....	5
6.2.3 后评估阶段.....	5
7 典型场景数字化要求.....	5

7.1 物流配送测试场.....	5
7.2 城市巡检测试场.....	5
7.3 应急救援测试场.....	5
8 建设与验收规范.....	6
8.1 建设流程.....	6
8.2 验收指标.....	6
8.2.1 功能性.....	6
8.2.2 可靠性.....	6
8.2.3 兼容性.....	6
9 安全与运维管理.....	6
9.1 安全防护体系.....	6
9.1.1 物理安全.....	6
9.1.2 网络安全.....	7
9.1.3 飞行安全.....	7
9.2 运维管理要求.....	7
9.3 日常运维.....	7
9.4 数据更新.....	7
9.5 应急响应.....	7
10 实施与评估.....	7
10.1 建设流程.....	7
10.2 成熟度评估.....	8
11 宣贯与监督.....	8
11.1 标准宣贯.....	8
11.2 动态管理.....	8
11.3 合规审查.....	8

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。本文件由中国计算机自动测量与控制技术协会归口。

本文件起草单位：中国飞行试验研究院、航天时代低空科技有限公司、中国计量科学研究院、北京国科标研科技 有限公司

本文件主要起草人：祁圣君、潘超、付铁刚、李红延、姜延欢、樊哲、张学涛、尚尔钧、张林虎。

低空试验测试场所数字化建设导则

1 范围

本文件规定了低空试验测试场所数字化建设的总体架构、基础设施数字化要求、核心系统建设要求、数据与测试管理标准、典型场景数字化要求、建设与验收规范、安全与运维管理、实施与评估、宣贯与监督等内容。

本文件适用于低空试验测试场所的数字化基础设施建设、改造与运营管理，覆盖物理设施数字化、测试流程信息化、数据管理智能化等环节，适用于固定翼无人机、eVTOL、多旋翼等飞行器的测试场景。

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 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 38675 信息技术 大数据计算系统通用要求

GB/T 39612 低空数字航摄与数据处理规范

GB/T 43439 信息技术服务 数字化转型 成熟度模型与评估

3 术语和定义

GB/T 22239、GB/T 38675、GB/T 39612界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数字孪生试验场 Digital twin testbed

数字孪生试验场是指通过数字化技术构建的与物理低空试验测试场完全映射的虚拟试验场，能够实时反映物理试验场的状态，实现虚实交互、协同仿真。

3.2

动态环境模拟 Dynamic environment simulation

动态环境模拟是借助计算机技术、仿真算法及多源数据融合手段，构建出与真实低空环境高度相似且能实时动态变化的虚拟场景。

4 总体架构

4.1 建设原则

4.1.1 系统性

系统需遵循系统性原则，需统筹规划并深度融合物理空间中的硬件设施布局、数据传输网络的架构搭建与安全保障，以及基于数据驱动的智能应用开发与落地运营，形成环环相扣、协同高效的全链条管理体系。

4.1.2 分层协同

系统需遵循分层协同，需聚焦搭建物理设施层硬件支撑、数据中台层资源整合、智能应用层场景落地的三级架构，通过层级间数据互通与功能衔接实现高效协同，筑牢全链条运转的结构化支撑体系。

4.1.3 动态扩展

动态扩展原则支持模块化部署适配多类型测试场景，同步预留标准化接口，可为 6G、量子通信等未来技术迭代提供灵活兼容空间，保障体系持续演进能力。

4.1.4 安全可靠

系统需遵循安全可靠原则，需严格遵循等保 2.0 三级标准构建防护体系，通过技术手段实现数据从采集、传输、存储到使用、销毁的全生命周期加密保护，保障系统运行与数据流转的可信可靠。

4.1.5 兼容性

系统需遵循兼容性原则，聚焦满足多样化测试需求，支持固定翼、旋翼、eVTOL 等不同类型飞行器的性能验证，可适配物流配送、城市巡检、应急救援等多场景下的功能测试，为各类飞行器在多元场景中的应用提供全面支撑。

4.2 核心能力要求

4.2.1 空天地一体化感知

空天地一体化感知体系通过深度集成 5G-A 通感一体基站、高精度气象雷达、激光雷达等多元感知设备，基于北斗时空基准构建起全方位的空域监测网络。感知体系设备协同运作，能精准捕捉空域内的环境参数与目标动态，可实现空域环境厘米级定位精度与亚秒级数据更新速度。

4.2.2 数字孪生系统

数字孪生系统以构建高精度三维建模平台为核心，通过精准复刻物理空域环境与飞行器实体特征，打造虚实映射的数字化空间。平台可支持飞行器动力学特性的精细化仿真，能真实模拟飞行姿态与运动轨迹，还能实时监测空域状态并实现碰撞风险的提前预警，为飞行安全与运营优化提供有力保障。

4.2.3 智能调度管理

智能调度管理以 AI 算法为核心驱动，通过对测试任务需求、资源状态及空域条件的实时分析与深度学习，实现测试任务的动态分配。依据任务优先级、资源负载情况等因素智能调整分配策略，同时优化各类设备、场地等资源的配置与利用，提升整体测试效率与资源使用效能。

5 核心系统建设要求

5.1 总则

试验场基础设施数字化主要包括物理设施层、通信网络层、数据服务、智能应用层和安全防护数字化，数字化基础架构、建设内容和技术指标如表1所示。

表 1 基础设施数字化要求

设施类别	基础架构	数字化建设内容	技术指标
物理设施层	数字化改造传统试验场地，部署智能传感器、高精度定位基站、能源供应系统。	起降跑道、机库、能源站等设施的 BIM 建模与物联网传感器部署。	建议设施状态监测数据采集频率宜满足 $\geq 10\text{Hz}$ ，定位精度应满足 $\leq 0.1\text{m}$ 。

通信网络层	构建空天地一体化通信网络（5G-A+卫星+光纤），保障低时延（<50ms）、高可靠（丢包率<0.1%）数据传输。	5G-A 通感一体网络覆盖，支持空口状态实时感知与网络切片管理。	建议端到端时延宜控制在 $\leq 20\text{ms}$ ，上行带宽宜控制在 $\geq 1\text{Gbps}$ 。
数据服务	建立统一数据中台，实现多源数据（飞行参数、环境监测、设备状态）的采集、清洗、存储与共享。	边缘计算节点（算力 $\geq 20\text{TOPS}$ ）与中心云协同架构。	建议支持 1000+终端并发接入，数据处理延迟宜控制在 $\leq 50\text{ms}$ 。
智能应用层	提供仿真模拟、飞行控制、安全监管等数字化服务，支持 AI 算法（如深度学习异常检测）。	仿真、飞控，安全监管。	支持 AI 算法（如深度学习异常检测）。
安全防护	低空空域威胁发现及安全管控	电磁干扰防护系统、无人机反制设备及网络安全态势感知平台。	建议非法入侵检测响应时间宜控制在 ≤ 3 秒，核心数据加密强度宜控制在 $\geq \text{AES-256}$ 。

5.2 数字化基础设施

5.2.1 通信导航系统

a) 部署 5G-A通感一体基站，同时可兼容4G/5G、低轨、低空通信专网，基站的选址应综合考虑试验场地的地形地貌、测试范围等因素，可实现通信、导航、监视（CNS）等一体化服务。具备监视同时监视中大型飞机的ADS-B方式、微轻小飞机的Remote ID方式。基站的覆盖范围需满足试验场地全覆盖，信号强度稳定可靠。

b) 配置北斗/GPS 双模定位设备，该设备应具备高精度定位能力，定位精度应满足 $\leq 1\text{m}$ （水平），确保对飞行器的精准定位，授时同步精度应满足 $\leq 10\text{ns}$ 。

5.2.2 物联网感知系统

a) 安装气象传感器，包括风速、温湿度、气压等类型的传感器，传感器的布设应均匀分布在试验场地的关键位置，确保能够全面、准确地采集气象数据，数据采样频率 $\geq 10\text{Hz}$ 。

b) 在起降平台集成激光雷达和毫米波雷达，激光雷达可用于精准识别障碍物的位置和形状，毫米波雷达具备较强的穿透能力，可在复杂环境下实现障碍物动态识别与避障，保障飞行器起降安全。

5.3 数据管理平台

5.3.1 数据采集标准

需统一数据格式为 JSON-LD，还需定义飞行器状态、环境参数、测试日志等各类数据的结构，包括数据字段的名称、类型、含义和取值范围等，确保数据的规范性和一致性。

5.3.2 实时处理能力

数据管理平台应具备强大的实时处理能力，可支持每秒百万级数据点的处理速度，能够及时处理试验过程中产生的大量实时数据，数据处理延迟应控制在 $\leq 200\text{ms}$ ，确保数据的及时性和有效性。

5.3.3 数据安全

采用国密算法对数据进行加密处理，包括数据传输过程和存储过程的加密，保障数据的机密性和完整性；建立分级访问权限控制机制，根据用户的角色和职责分配不同的数据访问权限，防止数据的非法访问和泄露；可定期将数据备份至异地灾备中心，制定完善的备份策略和恢复流程。

5.4 智能化应用系统

5.4.1 数字孪生平台

构建高精度三维场景区模，建模过程应采用先进的测绘技术和建模软件，可支持虚拟调试与仿真验证功能，可在虚拟环境中对飞行器的性能、测试流程等进行调试和验证。

5.4.2 智能调度系统

基于 AI 技术构建飞行任务规划模型，模型需综合考虑空域资源、飞行器性能、任务需求等多种因素，制定最优的飞行任务规划方案。可动态优化航线和控制起降时序，根据实时的空域状况和任务变化，及时调整航线和起降时间，冲突检测准确率应控制在 $\geq 99\%$ 。

5.4.3 安全监管模块

安全监控模块应包括电子围栏、故障告警与提示、状态预警等功能。当飞行器接近或超出电子围栏范围、出现故障时，系统能够及时发出预警。采用非法无人机反制技术，对非法入侵的无人机进行识别和干扰，阻止其进入试验场地，异常事件响应时间应 ≤ 5 秒。

6 数据与测试管理标准

6.1 数据治理体系

6.1.1 数据采集

统一数据接口标准，规范数据采集的方式和格式，确保不同设备和系统之间的数据能够顺畅交互；可覆盖飞行状态、环境参数、设备日志等数据源，明确各类数据源的采集频率、采集精度等要求；采用先进的数据采集设备和技术，保障数据采集的稳定性和可靠性。

6.1.2 数据共享

建立区块链存证机制，利用区块链的不可篡改、可追溯等特性，实现测试数据的安全存证和共享；通过区块链技术记录数据的产生、流转和使用过程，确保数据的真实性和完整性；建立跨机构的数据共享机制，实现不同机构之间的数据安全流转和协同利用。

6.1.3 数据分析

部署机器学习平台，平台应具备强大的算法训练和数据分析能力；支持测试结果自动生成功能，通过对采集的测试数据进行分析 and 处理，自动生成测试报告和结果分析；采用先进的异常检测算法，对测试过程中的异常数据和异常现象进行识别和预警。

6.2 测试流程标准化

6.2.1 预测试阶段

利用数字仿真对测试方案进行模拟和验证，生成飞行路径冲突热力图，直观展示可能出现的路径冲突区域和风险等级；根据热力图优化测试方案，调整飞行路径和任务安排，减少实际测试中的冲突和风险。

6.2.2 实时测试阶段

采用多源数据融合处理技术，对来自不同传感器、设备的实时数据进行整合和分析，全面掌握测试状态和变化。根据数据分析结果，可支持动态调整测试参数，如飞行速度、高度等。

6.2.3 后评估阶段

基于数字孪生技术构建故障回溯与性能评估模型，对测试过程中出现的故障进行精准定位和回溯分析，找出故障原因和解决方案；可通过性能评估模型对飞行器的性能指标进行全面评估。

7 典型场景数字化要求

7.1 物流配送测试场

- a) 集成高密度航线规划算法，能够根据货物数量、配送地点、飞行器性能等因素，优化航线规划，提高航线的利用率和配送效率，建议支持每小时 200+架次的测试需求。
- b) 模拟在货物装卸区配备自动化分拣系统，实现货物的快速分拣和装载；安装 RFID 追踪模块，对货物的运输过程进行全程追踪和监控。

7.2 城市巡检测试场

- a) 构建高精度三维城市模型，包含城市的建筑、道路、植被等细节信息，精准模拟城市的地理环境。模拟复杂电磁环境与障碍物分布，为巡检飞行器的虚实结合测试提供条件。
- b) 部署 AI 视觉识别算法，对巡检目标进行自动标注和缺陷分级，提高巡检的准确性和效率，减少人工干预。

7.3 应急救援测试场

- a) 建立应急通信专网数字模拟模块，模拟在应急救援测试过程中通信的畅通和稳定，以及灾后空域的通信快速重构与多机协同搜救场景。
- b) 模拟无人机基站，能够实现长时间的空中驻留，保障 72 小时不间断通信，为应急救援测试提供持续的通信支持，确保救援指令的及时传达和救援行动的顺利开展。

8 建设与验收规范

8.1 建设流程

建设流程包括需求分析、方案设计、设备采购、系统集成、联调测试、试运行、验收交付等阶段。

- a) 需求分析阶段，全面收集和分析试验场的功能需求、性能要求、应用场景等信息，形成详细的需求规格说明书；
- b) 方案设计阶段，根据需求分析结果，制定科学合理的数字化建设方案，包括技术架构、设备选型、实施计划等；
- c) 设备采购阶段，按照方案要求采购符合标准的设备和材料，确保设备的质量和性能；
- d) 系统集成阶段可将各类设备和系统进行整合和连接，实现系统的整体功能；
- e) 联调测试阶段，对系统进行全面的调试和测试，解决系统存在的问题和缺陷；
- f) 试运行阶段，在实际环境中对系统进行一段时间的运行测试，验证系统的稳定性和可靠性；
- g) 验收交付阶段，组织相关专家和用户对系统进行验收，验收合格后正式交付使用；
- h) 关键节点需通过第三方检测机构认证，如通信性能测试、数据中台压力测试等，确保系统的质量和性能符合标准要求。

8.2 验收指标

8.2.1 功能性

系统应覆盖 90%以上的低空试验场景，包括极端气象模拟、高密度飞行测试等典型场景；能够支持无人机、eVTOL等低空飞行器的数字化试验测试、典型场景下的数字化试验测试等内容，具备对典型场景的模拟，确保系统能够满足不同场景下的测试需求，功能完备、性能稳定。

8.2.2 可靠性

系统可用率应控制在 $\geq 99.9\%$ ，即系统在一年的运行时间中，故障停机时间不应超 8.76 小时；故障自愈时间应控制在 ≤ 30 分钟，当系统发生故障时，能够在 30 分钟内自动恢复或通过人工干预恢复正常运行。

8.2.3 兼容性

系统应支持与民航局UOM（无人驾驶航空器一体化综合监管服务平台）、地方低空监管平台的数据互通。通过数据接口的标准化和兼容性测试，确保系统能够顺畅地与外部平台进行数据交换和共享，实现信息的互联互通。

9 安全与运维管理

9.1 安全防护体系

9.1.1 网络安全

采用零信任架构，对网络访问进行严格的身份验证和授权，无论用户来自内部还是外部，都需要经过验证才能访问网络资源。实施动态访问控制，根据用户的角色、行为和环境等因素动态调整访问权限。对敏感数据进行脱敏处理，隐藏数据中的敏感信息，保护数据隐私。

9.1.2 飞行安全

引入冲突消解算法，实时监测飞行器之间的飞行状态和位置信息，对可能发生的冲突进行预测和消解，确保飞行安全。制定紧急降落预案自动生成机制，当飞行器遇到突发故障或紧急情况时，能够快速生成最优的紧急降落预案，保障人员和设备的安全。

设置电子围栏，对试验场空域内飞行器进行有效限制，防止试验过程中飞出空域。

9.2 运维管理要求

a) 建立设施健康度评估模型，通过对设备的运行状态数据、维护记录等信息进行分析，评估设备的健康状况和剩余使用寿命，关键设备故障预测准确率应满足 $\geq 90\%$ 。

b) 实施预防性维护策略，根据设备的运行规律和维护要求，制定定期维护计划，对设备进行预防性检查、保养和维修，设备平均无故障运行时间应满足 ≥ 5000 小时。

9.3 日常运维

建立设备健康管理系统（PHM），对试验场的关键设备如雷达、基站等进行实时监测和管理。通过采集设备运行数据，分析设备的性能变化和故障趋势，及时更换老化或存在潜在故障的关键部件，保障设备的正常运行。

9.4 数据更新

动态更新数字孪生模型，根据物理场地的变化和测试需求的调整，及时对模型进行修正和更新，

确保数字孪生模型与物理场地同，误差应满足 $\leq 0.1\text{m}$ ，还应定期对模型数据进行校验和优化。

9.5 应急响应

制定完善的网络安全事件、设备故障应急预案，明确应急响应的组织架构、职责分工、处置流程和保障措施；定期开展红蓝对抗演练，模拟各类安全事件和故障场景，检验应急预案的有效性和应急处置能力。

10 实施与评估

10.1 建设流程

建设流程包括需求分析、方案设计、数字孪生建模、系统集成、试运行验证、验收交付。

- a) 需求分析阶段，深入了解试验场的建设目标、功能需求和技术要求，为后续工作提供依据。
- b) 方案设计阶段，根据需求分析结果，制定详细的建设方案和技术路线。
- c) 数字孪生建模阶段，构建试验场的数字孪生模型，为系统集成和测试提供虚拟环境。
- d) 系统集成阶段，将硬件设备、软件系统等进行整合，实现系统的整体功能。
- e) 试运行验证阶段，对系统进行全面的测试和验证，收集用户反馈，优化系统性能。
- f) 验收交付阶段，组织验收工作，确保系统符合建设要求后正式交付使用。

10.2 成熟度评估

基于《低空经济标准体系建设指》，从基础设施、数据能力、应用水平三个维度开展分级评估。基础设施维度评估试验场的硬件设备、网络架构等的完善程度和技术水平；数据能力维度评估数据采集、处理、共享和安全管理水平；应用水平维度评估智能应用系统的功能实现和应用效果，具体评价可参考GB/T 43439中评估方法和成熟度等级判定。根据评估结果确定试验场数字化建设的成熟度等级，为后续的优化和升级提供指导。

11 宣贯与监督

11.1 标准宣贯

组织行业培训活动，针对试验场建设单位、运营管理单位、技术人员等不同对象，开展针对性的培训；推广数字化建设最佳实践，通过案例分享、经验交流等方式，促进各单位之间的学习和借鉴，提高行业整体的数字化建设水平。

11.2 动态管理

每3年对标准进行复审修订，根据低空经济技术的发展和行业需求的变化，及时更新标准内容，及时纳入新技术，如AI大模型、区块链存证等。

11.3 合规审查

联合市场监管部门对试验场数字化建设进行定期的合规性检查，重点检查标准的执行情况、系统的性能指标、安全防护措施等。对不符合标准要求的单位责令限期整改，确保试验场数字化建设符合规范要求。