

TG8 测试与验证

《数字低空测试与验证白皮书（第一阶段）》

2025.4

内容摘要

本白皮书聚焦数字低空测试与验证的核心需求，梳理了技术发展现状与挑战。数字低空通过通信、感知、导航等技术融合，推动物流、巡检、文旅等场景智能化应用，但面临高密度、高频次、异构化等挑战，亟需完善测试与验证体系。白皮书提出“四横三纵”架构，“四横”覆盖物理设施、信息基础设施、数字化空间和应用系统四大层级，“三纵”通过模拟仿真、封闭区域和开放区域测试，全面评估系统性能与可靠性。该架构将测试与验证贯穿数字低空系统全生命周期，明确了通信、感知、计算、安全等关键指标，为技术规模化应用和标准化建设提供科学依据，助力低空经济高质量发展。

目录

一、 数字低空测试与验证背景	1
1.1 数字低空背景	1
1.2 数字低空测试与验证发展现状	1
1.2.1 国外数字低空测试与验证技术发展现状	2
1.2.2 国内数字低空测试与验证技术发展现状	4
1.3 数字低空测试与验证现存的问题	5
1.4 数字低空测试与验证标准研制现状	6
1.4.1 国外数字低空测试与验证标准研制现状	6
1.4.2 国内数字低空测试与验证标准研制现状	8
二、 数字低空测试与验证	10
2.1 数字低空测试与验证的范畴，对象及目标	10
2.1.1 低空物理设施层	10
2.1.2 低空信息基础设施层	10
2.1.3 低空数字化空间层	11
2.1.4 低空应用系统层	12
2.2 数字低空测试与验证体系架构	13
2.3 数字低空测试方法与验证技术	15
2.3.1 测试验证方法	15
2.3.2 测试验证技术	16
三、 数字低空典型测试验证场景	18
3.1 低空物流	18
3.2 低空文旅	19
3.3 低空载人	21

3.4 低空巡检	22
3.5 低空消防	24
四、数字低空测试与验证指标	27
4.1 低空物理设施测试与验证指标	27
4.1.1 无人飞行器	27
4.1.2 其他物理设备设施	29
4.2 低空信息设施测试与验证指标	30
4.3 低空数字空间测试与验证指标	33
4.4 低空应用系统测试与验证指标	34
五、总结	36
致 谢	40

一、数字低空测试与验证背景

1.1 数字低空背景

低空经济作为一种新的经济形式，以低空空域（一般指距地面 1000 米以内的空间）为依托，以有人驾驶、无人驾驶航空器等低空飞行活动为牵引，以通用航空产业为主，涉及低空飞行、科研教育、航空旅游等众多行业的经济概念，是一种辐射带动效应强、产业链条长的综合经济形态。推动低空经济高质量发展，要筑牢三个“底座”，即政策“底座”、数字技术“底座”和服务“底座”。其中，数字技术“底座”是低空经济顺畅发展的核心因素。

“数字低空”，即基于通信技术、感知技术、雷达技术、信息技术、数据技术、行业智慧等，实现低空飞行航空器成为智能体，低空空域网络成为智能网，最终赋能低空飞行的数字化、智能化、自动化，夯实低空飞行成为“经济态”。数字低空在物流、巡检、消防等多个领域具有广泛的应用前景：低空无人机配送可以显著提高物流效率；通过低空飞行器进行城市巡检、环境监测等，可提高城市管理水平；在自然灾害或突发事件中，低空飞行器可以快速到达现场，提供实时信息和救援支持。

然而，尽管数字低空展现出广阔的应用潜力，但其也面临诸多挑战。数字低空系统作为一个复杂的系统，涉及到通信、导航、监视等方面，并且低空活动具有高密度、高频次、异构、高复杂性的特点。通信系统因高复杂环境频繁遭遇信号干扰、存在覆盖盲区；导航系统因障碍物遮挡和多路径效应难以提供精确定位；监视系统则因飞行设备异构化缺乏有效监管机制。此外，高密度、高频次的飞行航线规划、应急避障等都带来巨大的挑战。这些挑战不仅影响了数字低空系统的性能和可靠性，还凸显了标准化建设和测试与验证指标体系缺失的问题。由于缺乏统一的标准和评估方法，不同系统之间的兼容性和协同能力受到限制，难以实现规模化应用。

因此，数字低空系统的性能和可靠性需要通过严谨的测试和验证，当前亟需建立数字低空测试与验证架构，推动标准化建设，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。

1.2 数字低空测试与验证发展现状

1.2.1 国外数字低空测试与验证技术发展现状

(1) 国家政策方面

国家政策是推动数字低空产业发展的重要助推器，各国政府高度重视这一领域，纷纷出台相关政策、战略规划及法律法规，为其发展提供了坚实保障。

2016 年，美国联邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）颁布小型无人机系统法规（Part 107），其适用于重量小于 55 磅的无人机，内容包括操作要求、无人机注册、飞行员认证等，为无人机的商业化应用提供了明确的法律依据^[1]。2023 年，美国国家航空航天局推出先进空中交通（Advanced Air Mobility, AAM）计划，旨在打造一个低空空域的交通运输生态系统，涵盖空中交通管理系统改造、关键技术开发、安全数据解决方案等研究^[2]。

2017 年，欧洲单一天空空中交通管理研究计划（Single European Sky ATM Research, SESAR）启动 U-space 蓝图，其是确保大量无人机安全、高效地进入空域，所设计的一套新的服务和特定程序，是一个促进无人机安全和可靠集成的“生态系统”^[3]。

2015 年，日本民用航空法首次引入无人机相关法规，内容涵盖空域规则和飞行方式^[4]。2022 年，日本国土交通省发布第三版“使用无人机运送包裹指南”，推动无人机物流的商业化应用。同年，日本经济产业省和新能源·产业技术综合开发机构（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）发布的《实现下一代交通方式的社会应用》中提出力争在 2025 年大阪·关西世界博览会上实现飞行汽车的商业运营^[5]。

2020 年 6 月，韩国国土交通部发布城市空中交通发展规划（Korean Urban Air Traffic Roadmap, K-UAM Roadmap）并于 2021 年 9 月发布 K-UAM 的运行概念 1.0 版本，其中提出在 2025 年前实现城市空中交通商业化并在首尔开始试运行城市空中交通^[6]。

(2) 技术创新层面

目前，数字低空技术在全球范围内取得了显著进展。各国政府、企业和研究机构正积极推动低空经济的发展，期望通过无人机系统、通信、感知等研究实现数字化、智能化、自动化的低空飞行。

2015 年，美国密西西比州立大学领导建立“无人机系统安全卓越研究联盟（Alliance for System Safety of UAS through Research Excellence, ASSURE）”，由 30 所研究机构和 100 多个行业和政府伙伴组成，研究涵盖无人机指挥、控制和通信等技术^[7]。2019 年，美国东北大学与汉斯康空军基地合作，专注于无人机系统（Unmanned Aircraft System, UAS）研究，包括反无人机技术和无人机操

作的网络安全^[8]。麻省理工学院（MIT）与美国空军研究实验室、波音公司等机构合作，正研究用于空域安全和无人机导航的人工智能系统，旨在为低空飞行创建更可靠的系统^[9]。

2021 年，欧盟 SESAR 启动 CORUS FIVE 研究项目，由 EUROCONTROL 创新中心领导，研究通过 U-space 服务和方案支撑城市空中交通飞行操作，允许电动垂直起降飞行器（Electric Vertical Take-Off and Landing, eVTOL）、UAS 和其他空域用户（无人驾驶和有人驾驶）在受控的空域中安全、可靠、可持续和高效地运行^[10]。

日本软银（High Altitude Platform Station, SoftBank）先进技术研究所积极研究高空通信平台（High Altitude Platform Station, HAPS），目标在平流层的广域范围内提供高速和高质量的通信。2024 年 8 月，软银宣布其“Sunglider”太阳能 HAPS 飞机在 AeroVironment 和美国国防部组织的现场试验中成功进行平流层飞行^[11]。

2022 年 11 月，德国联邦教育和研究部资助，启动 KOMSENS-6G 项目，旨在将传感器技术集成到 6G 通信系统中，并于 2024 年 11 月完成首批架构提案^[12]。

(3) 产业落地层面

在政府方面，美国及欧盟等通过了一系列低空测试计划，积极推动数字低空技术测试与验证基础设施建设。2012 年，美国 FAA 启动 UAS 测试场地计划并建成 7 个测试场地，其旨在将无人机系统整合到国家空域系统，可对公共和民用无人机系统的安全性进行验证^[13]。2017 年，美国 FAA 进一步推出了 BEYOND 计划，在 UAS 测试场地计划基础上，对无人机超视距飞行、通信、监视和气象等技术进行测试验证。同年，美国 FAA 宣布“无人机融合试点计划”，并完成超 21000 次飞行测试，旨在测试并验证无人机在商用和公共应用中的低空飞行安全性^[14]。2022 年，欧洲发布《无人机战略 2.0》，提出建立欧盟民用—国防无人机测试中心网络^[15]。2023 年 3 月，欧洲 UAS 测试中心联盟成立，联盟由来自 17 个欧洲国家的 35 个组织和测试地点组成，旨在满足测试中心之间交流经验和推动合作的需求，支持欧洲 UAS 生态系统的发展^[16]。

在企业方面，美欧多家公司已进行多项低空测试，推动空中交通技术的商业化。2023 年 2 月，Blade Air Mobility 与 Beta Technologies 合作，在纽约成功完成了 eVTOL 的运行验证，并计划将其用于肯尼迪国际机场与曼哈顿之间的空中交通服务^[17]。2023 年 11 月，美国电动垂直起降飞行器制造公司 Joby Aviation 和 Volocopter 分别在纽约进行了验证飞行，标志着低空城市空中交通技术迈出了关键一步^[18]。

1.2.2 国内数字低空测试与验证技术发展现状

(1) 国家政策方面

国家政策是推动数字低空产业发展的重要支撑，我国政府高度重视数字低空战略地位，并出台了一系列政策措施，为其发展提供了有力保障。2021 年，《国家综合立体交通网规划纲要》首次将“低空经济”概念纳入国家规划^[19]。2022 年，《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》进一步提出深化低空经济领域的改革^[20]。2023 年，中央经济工作会议将低空经济确立为国家战略性新兴产业，《绿色航空制造业发展纲要（2023-2035 年）》明确了实现 eVTOL 定点运行的目标^[21]。2024 年 3 月全国两会上，低空经济首次作为国民经济的新增长引擎被写入中央政府工作报告；同月，工业和信息化部等联合发布了《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》，推动通用低空经济的创新发展^[22]。此外，地方也高度重视多地出台支持政策，在 50 个具有低空经济发展基础和潜力的城市 2024 年政府工作报告，其中 24 个城市将低空经济写入政府工作报告^[23]。

在法制层面，为了规范低空飞行活动，保障飞行安全，国家相继出台了《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》、《国家空域基础分类方法》、《中华人民共和国空域管理条例（征求意见稿）》、《民用无人驾驶航空器生产管理若干规定》、《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》等法律法规，为低空经济的规范化管理提供了依据，同时也对测试与验证工作提出了更高的要求。

(2) 技术创新层面

数字低空测试与验证领域的技术创新正推动低空经济从概念走向应用实践。该领域的核心技术创新集中在通信、导航、监视及场景应用四大方面，推动了低空飞行器及其相关系统的智能化、数字化发展，满足了从物流到公共服务等不同应用场景的需求。

2024 年 6 月，中国移动提出“通感管导”四位一体的低空智联网，首创低空鱼鳞新组网、大上旁瓣新波束等低空通信等技术，攻克连续覆盖难、组网干扰大、感知要求精、实时监管难、导航精度高、保障需求高等难题^[24]。2024 年 8 月，粤港澳大湾区数字经济研究院低空经济分院提出建设“智能融合低空系统”，将低空环境信息、飞行器信息和业务信息等完全数字化，提供数字化、智能化、精细化的低空空域管理和服务工具^[25]。2024 年 9 月，中国联通发布了智慧低空应用平台和低空安全监管平台两大低空核心产品，正式发布“1+2+N”能力，即 1 系列行空终端、2 个云平台（中国联通极目无人机监管平台、中国联通行云 5G 网联无人机应用平台）和 N 个低空应用场景，具备对覆盖区域内多目标、全天候、高精度探测的能力，实现了对目标无人机的状态捕捉、身份识别、跟踪与记录，使通感数据在监管流程实现业务贯穿^[26]。

在产学研合作方面，2017年，“香港科技大学-大疆创新联合创新实验室”成立，支持世界无人机技术的进一步发展。2022年4月，南京海事局联合南京航空航天大学、南京联通等单位成立南京海事“5G+无人机”应用融合创新中心，创新打造了垂直起降固定翼全辖区巡航、无人自动机库区域性巡航、便携式多旋翼无人机现场巡航“三位一体”的海事巡航新模式。2023年，卧龙电气驱动集团股份有限公司与中国民航科学技术研究院签订战略合作协议，联合创建“新能源航空器电力适航验证实验室”，共同开展新能源航空器电力适航技术相关方向研究。2023年，北航、北理工与民航数据公司联合启动“空地一体新航行系统技术全国重点实验室”建设，促进低空前沿技术突破。

(3) 产业落地层面

随着数字低空技术的进步，数字低空得到了初步应用并将进入规模化推广的关键阶段，产业推广、网络部署及测试与验证设施建设在各地持续开展。

在产业推广方面，中国开展了多个大型研讨交流会议，如2024数字低空大会、2024中国低空经济发展大会、2024第八届世界无人机大会等，交流探讨了低空经济的发展趋势和前沿技术。

在应用试点与设施建设方面，一些先行区已开始“通感一体化网络”部署试验工作。2023年12月，全球首个“5G-A通感一体低空协同组网”于厦门市成功试点，通过5G-A技术，基于4.9GHz频段实现低空通信网络的高效覆盖和实时控制，提升了无人机的飞行指令接收和画面传输能力，还增强了巡检任务的可靠性和安全性。中国已经建立了多个低空经济测试试验基地，包括龙岗低空智能融合测试基地、安徽“低空安全验证试验基地、粤港澳大湾区（肇庆）低空无人机测试服务基地和低空物流试验基地，这些基地涵盖了多样化的测试环境，配备了先进的通信、导航、监视和气象设备，能够进行高精度的飞行数据采集和分析，具备从飞行性能、环境适应性、安全性到数据传输和处理等多个方面进行全面评估的设施条件，为数字低空测试与验证奠定了坚实的基础。截至2023年底，我国已有超126万架无人机。民航局已批准建立民用无人驾驶航空试验区17个、试验基地3个，覆盖城市、海岛、支线物流、综合应用拓展等场景。

1.3 数字低空测试与验证现存的问题

随着数字低空经济技术不断发展，数字低空测试与验证在测试与验证架构、测试工具、标准化建设、场景适应性等方面面临挑战。

(1) 测试与验证架构的缺失

数字低空系统涵盖通信、导航、监视等多方面，其性能和可靠性需要严谨的测试与验证。然而，当前尚未建立起完善的数字低空测试与验证架构，缺乏系统性、科学性的标准规范和指标体系，导致测试工作缺乏系统性和全面性，难以对数字低空系统的通信、导航、监视等性能进行有效的测试与验证。

(2) 测试与验证工具不足

测试工具是数字低空测试与验证的基础，然而当前对低空场景下的通信、感知、监视能力测试工具存在显著不足。首先，数字低空测试与验证定义不明确，测试内容不完善。其次，现有工具通常面向地面环境设计，对低空环境的测量方式和测量精度仍有待论证。

(3) 标准化建设滞后

现存的飞行管理、数据交互、民航基础设施等标准体系针对低空航行的适配性不足。并且，数字低空测试与验证方面尚未建立明确的标准体系，导致测试结果难以比较和验证，增加了测试与验证难度，影响测试与验证公信力。

(4) 场景适应性不足

数字低空系统需要覆盖多种应用场景，如城市、乡村、山区、海洋等，这些场景具有不同的地形、气候、交通状况等特点，对系统的性能要求也不同。

传统上针对通信与感知等功能的测试与验证，往往侧重于理想环境下的性能评估，难以全面反映数字低空系统在不同应用场景中的实际适应性与鲁棒性。例如，城市环境中的多径效应与信号干扰、乡村与山区中的信号覆盖与穿透能力均对系统的通信性能构成了独特考验。

因此，为确保数字低空系统能够在上述多样化场景中高效、稳定地运行，应充分考虑不同场景的地形特征、气候条件、交通模式等因素建立更为全面、细致的测试与验证体系，设计针对性的测试场景与评估指标，以科学、客观地衡量系统在各种极端与常规条件下的综合性能。

1.4 数字低空测试与验证标准研制现状

数字低空发展依赖于完善的标准体系，各国相关机构和组织积极开展数字低空领域标准研制，以确保这一新兴经济领域的安全、健康发展。

1.4.1 国外数字低空测试与验证标准研制现状

(1) 国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO)

2023 年，国际标准 ISO 5286:2023《民用轻小型固定翼无人机飞行性能试验方法》由国际标准化组织正式发布，规定了民用轻小型固定翼无人机飞行性能测试方法，可有效解决民用轻小型固定翼无人机飞行性能试验项目不统一、指标验证方法一致性差等问题^[27]。同年，ISO 5332:2023《民用轻小型无人机系统低气压环境下试验方法》发布，规定了民用轻小型无人机室内低气压环境试验的测试方法，可有效解决低气压环境下民用轻小型无人机系统检测环境不可控、试验方法不统一等问题^[28]。

(2) 欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI)

欧洲电信标准化协会的通信感知一体化 (Integrated Sensing and Communication, ISAC) 行业规范组 (Industry Standard Group, ISG) 于 2023 年 9 月正式启动，旨在协调 ETSI 成员在 ISAC 上的 6G 预标准研究工作，为该技术的 6G 标准化铺平道路。该 ISG 的目标是将 ISAC 的系统性成果引入国际标准组织，特别是未来的 3GPP 6G 版本和 ITU-R IMT-2030 的成果，涉及 ISAC 需求和评估方法。该小组还旨在为 ISAC 用例和感知类型开发先进的信道模型，并通过广泛的测量活动进行验证，解决现有基于通信的信道模型中的缺口。

(3) 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP)

2024 年 6 月，3GPP 发布 TS 22.125 V19.2.0《3GPP 中的无人机系统支持》技术规范，定义了通过 3GPP 系统操作无人机的要求，包括无人机系统远程识别和跟踪的业务和安全要求^[29]。同月，3GPP SA1 工作组发布 TR 22.837 V19.4.0《传感与通信一体化研究》技术报告，探讨了如何在 5G 网络中集成感知功能，并探讨了无人机飞行轨迹跟踪、入侵检测、碰撞避免等多种用例，对定位精度、距离分辨率、速度分辨率等指标进行了讨论^[30]。2024 年 9 月，发布 TS 23.256 V19.0.0《无人机系统连接、识别和跟踪的支持》技术规范，进一步规范了支持无人机系统连接、识别和跟踪的架构^[31]。

(4) 电气与电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)

2021 年，IEEE 发布 IEEE 1939.1-2021《无人机低空空域结构框架标准》标准，定义了用于无人驾驶飞行器交通管理的低空空域结构，从网格技术、遥感数据、通信与联网、路线规划、运行和管理五个方面阐述了基于无人机低空公共航线的低空体系^[32]。2024 年，IEEE 1937.8-2024《无人驾驶飞行器蜂窝通信终端功能和接口规范建议》标准发布，描述了无人机中蜂窝通信终端的功能规范和接口规范，内容涵盖硬件、信号、数据接口、环境特性、性能、可靠性、安全性和配置管理^[33]。

1.4.2 国内数字低空测试与验证标准研制现状

我国数字低空经济的快速发展对测试与验证标准体系提出了更高要求。为推动低空飞行活动的安全性和有效性，相关部门和机构已积极开展标准研制工作，取得了一定进展，但仍面临测试与验证架构尚未形成共识、测试环境复杂多样等挑战。以下是主要部门和机构的标准研制进展：

(1) 中国国家标准化管理委员会

2020年7月21日，国家标准 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》由中国国家标准化管理委员会发布，规定了民用轻小型无人机（起飞重量在0.25kg~150kg之间）系统（含飞行器和地面站）实验室环境试验的通用要求，适用于民用轻小型无人机系统的实验室环境试验^[34]。同日，国家标准 GB/T 38931-2020《民用轻小型无人机系统安全性通用要求》发布，规定了民用轻小型无人机系统全生命周期内安全性工作的一般要求、详细要求和安全性验证，适用于最大起飞重量在0.25 kg-150 kg之间的民用无人机系统(以下简称“无人机系统”)的研制、生产、试验和使用的安全性工作。

2021年，国家标准化管理委员会、工业和信息化部、自然资源部、农业农村部、国家能源局、中国民用航空局共同组织制定并发布了《无人驾驶航空器系统标准体系建设指南（2021年版）》，该指南中提出了部分低空领域的测试标准规划。

2023年5月，强制性国家标准 GB 42590-2023《民用无人驾驶航空器系统安全要求》发布，是我国民用无人机领域首项强制性国家标准，适用于微型、轻型和小型民用无人机，其规定了电子围栏、远程识别等17个方面的强制性技术要求，并提出相应的试验方法。

2024年，《无人驾驶航空器系统标准体系建设指南（2024年版）》开始编写，在数字低空、信息通信领域，中国信息通信研究院研提部分未来三年的相关测试标准规划^[35]。

(2) 中国民用机场协会

2019年8月，中国民用机场协会发布了团体标准 T/CCAATB-0001-2019《民用机场无人驾驶航空器系统监测系统通用技术要求》，规定了民用机场使用无人驾驶航空器系统监测系统的通用技术要求，涵盖了组成、功能要求、性能要求、安装部署等方面的规范^[36]。

2024年5月，团体标准 T/CCAATB 0062-2024《电动垂直起降航空器（eVTOL）起降场技术要求》发布，为我国首部针对电动垂直起降航空器起降场的技术规范，弥补了该领域标准缺失的空白。这一标准为eVTOL起降场的设计、建设和运营提供了技术依据，促进了该类基础设施的

规范化、标准化和规模化发展，推动了低空飞行生态系统的完善，为未来城市空中交通的有序发展奠定了基础^[37]。

(3) 中国民用航空局 (Civil Aviation Administration of China, CAAC)

2018 年，中国民航局发布《低空联网无人机安全飞行测试报告》，该报告提出了无人机安全飞行构想，并通过实施联网无人机监管项目的技术测试，深入研究了蜂窝网络在无人机监管中的有效性，为后续的标准制定提供了理论和实证基础^[38]。

(4) 中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA)

中国通信标准化协会开展了低空经济信息通信领域的标准制订工作，中国信息通信研究院在 CCSA 牵头开展了低空智联网、面向 5G-A 的通感一体网相关测试规范的研究和标准制订，目前已立项了《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的终端设备测试方法（第一阶段）》、《面向消费级无人机的北斗定位技术要求和测试方法》等行业、团体标准，为低空智联网、5G-A 通感网络的测试验证打下基础^[39]。

二、数字低空测试与验证

2.1 数字低空测试与验证的范畴，对象及目标

数字低空是以低空网络和算力设施为基础，以各类有人驾驶和无人驾驶的低空航空器飞行活动为载体，形成的物流配送、巡检巡查、安保执法、应急救援等经济活动和社会活动的新型数字经济形态。数字低空是由底层基础设施、中间数据管理、上层应用共同组成的综合性系统，由物理设施层、信息基础设施层、数字化空间层和低空应用层四层组成，四层相互关联，共同构成了数字低空系统的整体框架。因此，为了更加全面、系统推动数字低空的发展，本测试与验证白皮书所涉及的范畴包含构成数字低空系统的理设施层、信息基础设施层、数字化空间层和低空应用层中所涉及的所有要素。接下来对系统中四层级作用进行详细阐述。



图 2.1 四层的整体框架示意图

2.1.1 低空物理设施层

低空物理设施层是指保障各类低空飞行活动的物理实体，包括无人机、智能网联载具、低空航空器及其配套的机载系统、航电系统等设施。低空智能载具是低空航行活动的主体、低空智能网联体系的智能空中终端，包括各种通航飞机，微、轻、小、中、大型无人机，以及 eVTOL、飞行汽车等多种新型航空器。以及与低空载具、飞行器设备相配的机载通信设备、多源头导航设备、机载感知与识别设备、智能航行设备等相关的物理设备设施。

2.1.2 低空信息基础设施层

信息物理基础设施是依托现有的空、天、地、信等各类基础设施，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。它是数字低空体系的

最为关键的支撑，确保低空飞行活动的安全、高效和有序开展。本白皮书中囊括的信息物理基础设施主要包含：

- (1) 低空通信基础设施，通过利用多种技术手段，依托地基和星基的现有资源，构建满足全天候，全域无缝覆盖的空地通信体系；
- (2) 低空导航基础设施，低空导航基础设施是低空飞行活动的基础，不仅提供基本的导航信息，还需提供高精度的卫星导航和实时的导航状态监测；
- (3) 低空监视基础设施，低空监视基础设施用于对低空智能载具进行实时的识别、监测和跟踪，确保飞行器的安全飞行和可靠探测；
- (4) 其他基础设施包含未来支撑大规模、高密度、异构自由飞行算力和存储基础设施，低空反制设备，用于对非法入侵的无人机进行探测、识别、干扰和处置，消除对地面和空中人员、财产的威胁；
- (5) 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。目前，起降基础设施可按服务载具类型（如无人机起降场、eVTOL 起降场）或规模（单机巢、简易起降点、中大型起降场）进行分类；
- (6) 低空情报与气象设备，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，为飞行器和运营方提供及时、准确的情报信息，气象基础设施为智能载具和各应用系统提供微气象服务。

2.1.3 低空数字化空间层

数据与服务支撑层用以将机载终端与基础设施层生成的数据供给至应用系统层，实现了低空飞行器制造方、低空基础设施保障服务方与低空运营方、交通管理和服务方、行业监管方之间的扁平化交联。数据与服务支撑层由数据接入网、数据交换网、信息服务网构成，允许运营商根据需求独立地扩展或升级各部分能力。基于全系统信息管理的概念，确保了系统各个组件之间的信息共享与互操作性，通过标准化接口和服务框架，实现系统的灵活性和可扩展性。本白皮书中数字化空间主要包括：

- (1) 数据接入网，数据接入网负责将通信、导航、监视等终端设备接入到通信网络。通过标准化的数据格式和信息交换模型，确保不同设备间数据的无缝对接与统一管理；
- (2) 数据交换网，数据交换网负责对系统中的通信、导航、监视等各类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。数据交换网通过智能化资源调度机制和数据处理技术，确保系统在高负载和多任务情况下依然能够稳定运行；

(3) 信息服务网，信息服务网通过标准化接口和基于服务的架构，提供订阅分发数据处理机制、资源调度与保障、智能分析与决策支持，实现系统间的高效协作。

2.1.4 低空应用系统层

应用系统层由低空运营管理系统、低空交通管理和及服务系统及低空监管系统等多个云系统组成，承接服务网的通信、导航、监视及信息数据服务，提供运营管理、交通管理与服务、安全监管功能，支撑低空行业应用场景。本白皮书主要包含的应用系统有：

(1) 低空运营管理系统，低空运营管理系统用以向低空运营方提供先进智能的运营驾驶和完备的运营管理。包含飞行计划、飞行跟踪、运行控制、信息发布等；

(2) 低空交通管理和及服务系统，该系统面向低空管理机构和交通服务机构，提供高效全面的空中交通管理与服务。低空交通管理与及服务系统通过空域管理、容流管理、气象服务等技术提供高效全面的交通管理和及服务，包括空域管理、安全风险评估、容流管理、低空交通管理、情报服务、气象服务、数据服务等；

(3) 低空监管系统，系统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。低空监管系统的典型用户代表为各地政府（含交通、公安、应急等部门），低空交通监管利用低空基础设施提供方和网络和数据支撑层提供的 CNSI 基础数据和其他数据，实现对低空运行的安全可靠的监管，包含身份认证、应急处置、违法处置等。

在四层次内容构成的数字低空系统中，测试与验证的对象主要围绕低空物理基础设施成熟程度、低空信息基础设施服务质量、低空数字化空间发展水平以及低空应用系统能力四个板块展开。

(1) 针对低空物理基础设施成熟程度的测试与验证

低空物理基础设施成熟度是指低空飞行器本体设施及其配套的运行维护设施、数采存储设施、飞行控制设施的数字化和智能化水平。低空物理设施为高效开展一切低空活动提供物理实体和配套软硬件保障，其成熟程度决定了数字低空应用的活动范围和活动能力。

(2) 针对低空信息基础设施服务质量的测试与验证

低空信息基础设施服务质量是指数字低空“五张网”所能够为数字低空其他部件提供的服务能力和服务质量，包括覆盖范围、通信速率、时延、可靠性、感知定位精度等参数。低空信息基础设施是连接数字低空一切物理实体、控制系统和应用活动的桥梁，同时也是这一切低空环境和状态的观察者和收集者，其服务质量水平直接影响了数字低空的发展节奏和动力，决定了数字低空的可操作性和承载能力。

(3) 针对低空数字化空间发展水平的测试与验证

低空数字化发展水平体现在两个方面，第一方面体现在对空域的智能化规划设计的水平，实现对空域的分层、分区隔离、网格、航道等划分和资源分配；另一方面体现在为低空飞行器提供路径规划、监测服务、安全告警等功能的水平，支撑起数字低空系统安全高效运行。低空数字化空间是数字低空的大脑和控制系统，负责低空空域的整体规划和管理，管理一切低空应用活动的运行、监控和调度，其发展水平直接决定了数字低空系统的安全性和运营能力。

(4) 针对数字低空应用系统能力测试与验证

应用系统层由低空运营管理系统、低空交通管理和服务系统及低空监管系统等多个云系统组成，承接服务网的通信、导航、监视及信息数据服务，提供运营管理、交通管理与服务、安全监管功能，支撑低空行业应用场景的能力与潜力。

针对以上四个板块的测试与验证，其主要目标在于，提升四层要素相互依存、相互促进程度，进而推动了数字低空系统在各个领域的广泛应用，共同繁荣数字低空产业生态。

具体来说数字低空物理基础设施成熟程度、信息基础设施服务质量是低空数字化发展的基础和底座，决定了数字化空间构建的广度、深度和精细度等，也决定了低空应用创新能力和范围；低空数字化空间发展节奏直接影响着物理设施、信息基础设施、低空应用的设计和配置，同时其发展水平也依赖物理设施、信息技术设施、低空应用平台反馈数据的丰富度和时效性；低空应用是数字低空的价值转化出口，其创新活力直接影响着物理设施、信息基础设施、数字化空间的建设节奏和迭代动力。数字低空发展是一个不断循环的过程，基础设施建设与低空数字化水平交相迭代，各要素的性能和可靠性都对整个系统的有效运行和应用提供了关键支持，相互关系的协同作用推动了数字低空系统在各个领域的广泛应用，共同繁荣数字低空产业生态。

2.2 数字低空测试与验证体系架构

针对由低空物理设施层，低空信息基础设施层，数字化空间层，低空应用层该四层内容构成的综合性系统，提出“四横三纵”的数字低空测试与验证架构。四横指系统中的物理设施、低空信息基础、数字化空间及低空场景应用，三纵指数字低空模拟仿真测试验证，数字低空封闭区域测试验证以及数字低空开放区域测试验证。根据我们在此白皮书中定义的数字低空组成架构以及测试体系，我们在下图中给出数字低空测试与验证的“四横三纵”架构以及相应的演进路径构想。



图 2.2 体系架构图以及相应的演进方向设想

模拟仿真测试是通过使用计算机模型和仿真软件，在虚拟环境中模拟数字低空的各类要素。这种测试方法可以进行自动全天候的测试，并模拟各种复杂的环境和场景情况。通过模拟仿真测试，研发人员可以评估硬件设备、基础设施、算法等在不同场景下的性能表现。此外，模拟仿真测试还可以用于评估低空硬件设备在边界场景下的系统鲁棒性和容错能力，以及对各种异常情况的响应能力。

封闭场地测试是判定数字低空系统技术稳定性及其对空域环境、业务场景适应性的基本方法，也是数字低空系统开展开放区域测试的前提条件。封闭区域测试可以通过模拟特定的空域条件和业务场景，对数字低空系统各类要素进行关键功能与性能评估。此外，封闭区域测试还可以用于测试低空无人设备与其他设备和基础设施的通信和协作能力，例如无人机之间的碰撞避免和管控信号的识别等。

开放区域测试是在实际空域环境及业务场景上进行，低空无人设备在真实环境中进行运行，并与其他无人设备、基础设施和地面人员进行交互，这种测试可以检验低空无人系统硬件设备、基础设施、软件算法、场景应用的安全性和可靠性。在开放区域测试中，研发人员可以收集大量的数据，评估硬件设备在各种复杂业务场景情况下的表现，例如低空物流、低空安防和低空交通等。开放空域测试不仅可以验证硬件设备、基础设施、方法理论在真实环境下的性能，还可以为模拟仿真与封闭场地测试提供参照和丰富的数据来源。

通过综合利用模拟仿真测试、封闭区域测试和开放区域测试这三纵，可以全面评估数字低空系统中硬件设备、基础设施、技术算法、应用场景的四板块多维度要素，依托该“四横三纵”架构，发现潜在问题并进行改进，推动数字低空系统的完善及全场景的发展。

2.3 数字低空测试方法与验证技术

2.3.1 测试验证方法

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。就数字低空系统的功能特点而言，在低空无人系统硬件装置以及低空信息基础设施进入运行状态后，其一切行为均是系统自主决策的结果，因此测试方法必须提供硬件设备设施的自由度，保证其性能得到体现；但从测试的可重复性、可控性等需求出发，又希望测试对象是在特定条件下测试的。按照上述两方面的需求，按照测试方法对测试输入和测试过程要求的不同，可以将测试方法分为基于用例的测试方法、基于场景的测试方法和公共道路测试方法。

(1) 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。测试用例指的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。

基于用例的测试主要适用于功能相对单一，并且有明确应用条件和预期结果的各类功能测试与验。由于测试输入、测试条件和结果明确且可控，因此该方法的测试可重复性强，测试效率高。对于测试输入和测试条件的确定，目前主要依赖反常数据、事故数据、理论分析以及模拟实验数据的分析，但是前期的数据采集和分析成本相对较高，且获得的数据存在局限性。该方法应用于功能相对复杂和综合的数字低空系统存在一定不足，首先体现在该方法只能对某项功能进行测试，而无法测试多项功能的综合表现；其次由于对测试结果有着明确的要求，系统自主决策能力难以体现。

(2) 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。

在场景测试的应用方面，欧盟近几年开展的研究项目集中解决场景测试方法和技术，在最近开展的 PEGASUS 项目中，为解决场景测试的测试输入问题，研究者对项目进行了定义和分级，包括功能场景、逻辑场景和具体场景，从而形成场景测试的初始条件，作为系统的起始工况。

场景测试的优势在于该方法只规定了测试的初始条件，不预先设定测试过程以及测试结果，可以提供系统自主决策的自由度，能够对系统多种功能的综合性能进行测试，因此更适应高级别的测试需求。但为了能够满足多种环境感知传感器的测试需求，同时提供系统决策所需的自由度，测试场景的设计势必更加复杂，环境要素更加丰富，因此测试场景的构建是该方法的一大挑战。同用例测试类似，场景测试方法同样需要分析多种来源数据以确定测试场景的内容以及测试初始条件，场景采集和分析的成本较高，目前主要通过反常数据、事故数据的研究，同时也可以从大量的模拟实验数据中寻找典型场景，理论分析也是一种很重要的场景获得手段。

(3) 公共开放空域测试

公共空域测试即指在现实空域和真实场景环境下开展的测试。该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。公共空域可以提供完全真实的、非人工模拟的空域场景，所有场景参与者、气候条件、航道条件都真实存在，不受人为控制。由于所有事件均是随机发生的，因此测试中无法预先设定测试初始条件，设备在公共空域或业务场景的运行过程均是测试过程，从而对数字低空系统硬件设施、软件算法等提出了更高的要求。

公共空域测试能够提供真实的场景环境，满足信息传输系统、环境感知系统、决策规划系统的测试需求，理论上是进行测试的最佳方式。该方法的主要不足在于测试周期长，效率低，测试成本巨大，同时必须考虑安全风险问题以及法律法规的限制。因此，单纯依靠公共空域测试数字低空系统并不具备可操作性。

2.3.2 测试验证技术

测试技术可以满足不同测试阶段、不同测试环境需求，一些测试技术的采用可以大大提高测试的可重复性、降低风险，同时便于数据的采集。根据测试环境的真实程度或者实际在环硬件的数量不同，可以分为：虚拟仿真测试、硬件在环测试、封闭空域测试，不同的测试方法可以结合不同的测试技术使用^[40]。

(1) 虚拟仿真测试

虚拟仿真测试是纯数字仿真测试工具，由模拟场景、无人载具动力学模型、传感器模型、信息传输系统模型、规划决策算法等组成，可以对数字低空的各个环节要素以及系统整体进行仿真测试。虚拟仿真测试一般应用在功能开发早期阶段，在没有实物硬件的情况下，对系统的策略算法进行验证。

虚拟仿真测试可以摆脱对真实测试环境和硬件的需求，测试效率极高，测试成本和测试风险非常低。虚拟仿真测试的主要问题在于，其测试结果严重依赖于无人机系统模型，传感器模型和信息系统模型的准确性，不准确或错误的仿真模型将导致错误的结果；另一方面，如何实现现实场景在仿真环境中快速还原也是挑战之一。

(2) 硬件在环测试

硬件在环测试中，数字低空系统的部分部件或系统是真实的，而环境是虚拟的。低空无人设备的环境感知系统、决策规划系统和控制执行系统均可实现硬件在环测试。理论上大部分硬件均可开展硬件在环测试，但部分硬件的在环测试技术手段相对复杂且成本很高；还有部分部件开展在环测试的意义不大，如决策规划系统硬件在环测试，即虽然系统最终以硬件呈现，但功能主要由软件体现，因此较少有研究机构开展相关工作，总体来说，硬件在环测试的应用范围仍比较有限。

(3) 封闭空域测试

封闭场地测试从环境到硬件设备、基础设施均为实物，封闭场地测试依托于专用的封闭测试场地建设，强调环境和场景的还原和模拟能力，采用柔性化设计，保证低空无人设备、装置设施能够在有限的场地条件下，尽可能多的经历不同环境、场景的测试。

封闭场地测试的弊端主要在于测试效率低，存在一定的测试风险。为提高测试效率，硬件设备、基础设施、软件算法等一般需要先经过虚拟测试、硬件在环测试等，筛选最为典型和测试价值的场景开展封闭场地测试，降低场地测试的周期。

三、数字低空典型测试验证场景

3.1 低空物流



低空物流是指利用无人机等航空器进行货物运输的物流方式，它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。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。

国内顺丰、京东、美团等企业均已布局低空物流应用，在上海、深圳、广州等城市开展了外卖、快递、农产品、医疗物资等低空物流应用试点示范和测试验证。国外亚马逊公司探索利用无人机进行商品配送，以实现快速、高效的商品配送，提高客户满意度。谷歌公司开展 Project Wing 项目旨在利用无人机为偏远地区提供快速、便捷的商品配送服务，解决偏远地区物流配送难题。

顺丰旗下丰翼科技公司目前已在全国开通 400 条低空物流航线，累计 80 万架次，其中在深圳市开通了 193 条航线，覆盖深圳-东莞、深圳-珠海等跨市航线，日均飞行近千架次。场景包括快递配送、应急物资投放、医疗（血液、试剂、样本）运输、生鲜冷链、跨海跨山等，主力机型包括旋翼机方舟 40（10kg/18km）、旋翼机丰舟 90（20kg/65km 或 10kg/130km）、旋翼机方舟 150（50kg/20km）、倾转旋翼蓝鲸（300kg/300km）等。

美团公司已在全国开通 31 条低空物流航线，主要场景为公园、景区、商圈的外卖配送，累计完成用户订单超 30 万，主力机型的载重及运力为 2.5kg/10km。

京东无人机末端配送已在全国多个省市实现常态化运营，有效解决了农村、道路不便地区最后一公里配送难题。主力机型包含全球首款自转旋翼物流无人机 JDX-500、8 轴 8 桨飞行平台 JDX-50、国内首款载重数百公斤级舱内空投自转旋翼支线物流无人机“京蜓”、吨级大型货运无人机“京鸿”等。

除了无人机基本的功能性能和飞行性能测试，低空物流场景的测试验证项目还包括导航定位测试、货物装卸运输测试、航线精度测试、通信系统测试等：

- 飞行性能测试：验证物流无人机在不同环境条件下的飞行性能，包括最大载重量、飞行速度、续航时间、飞行高度等。
- 通信系统测试：测试物流无人机远程网联通信系统是否稳定，包括与地面控制站的数据链路、与 4G/5G 公网的数据链路以及多数据链路之间的稳定切换能力等。
- 安全性测试：确保物流无人机在运行过程中的安全性，包括对突发情况的处置能力、应急降落程序、以及对恶劣天气条件的适应性。
- 导航与定位精度测试：验证物流无人机的导航系统是否能够提供准确的定位信息，确保精确投递。
- 货物装卸与运输测试：测试物流无人机在实际物流配送中的货物装卸流程，以及在运输过程中货物的安全性和完整性。
- 地面接驳测试：测试物流无人机与地面运输系统或配送平台的接驳能力，确保货物能够顺利从物流无人机转移到地面运输工具。
- 环境适应性测试：测试物流无人机在不同环境下的运行能力，如城市、山区、海岛等特殊场景。
- 法规与标准符合性测试：确保无人机的物流运行符合相关法规和标准，包括飞行高度、速度、噪音水平等。
- 应急响应测试：测试物流无人机在紧急情况下的响应支撑能力，如医疗物资配送、搜索救援等。

3.2 低空文旅

数字低空文旅是指利用低空空间资源，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。它通过无人机、虚拟现实（Virtual Reality, VR）、增强现实（Augmented Reality, 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。



空中观光游览方面，游客可以通过乘坐直升机、固定翼飞机、动力三角翼、热气球等低空飞行器，从空中俯瞰景区风景，获得独特的视觉体验。目前，已有深圳、西安、武汉、海口等 100 多个城市探索推出空中游览项目。如海南纳入海南省航空运动协会低空涉旅项目统计的 12 家企业，2023 年接待游客约 2.8 万人次，年度总产值约 9000 万元。

低空飞行表演方面，无人机灯光秀作为自带话题和流量的新型引流推广方式，总能意外成为“爆点”。无人机可以搭载特定设备，在空中进行特色化的文化展示和创意表演，如灯光秀、烟雾秀等，为游客带来视觉盛宴。

景区配送服务方面，景区借助无人机实现高效配送，为游客提供景区外的餐饮和消费品供给，不仅改善了游客体验，减少景区客诉，还同步提升了景区的二次消费率和复游率，把“流量”变成“留量”。如肇庆市正在抢占低空经济这一新兴赛道，计划打造“低空肇庆文旅”品牌，推出特色低空旅游线路，利用无人机进行景区间运输和外卖服务。

景区管理升级方面，借助无人机实现景区人流监测与疏导、安全监控、事故救援等。

除了无人机基本的功能性能和飞行性能测试，低空文旅场景的测试验证项目还包括通信与导航系统测试、旅游体验测试、基础设施联调测试等：

- 通信与导航系统测试：测试飞行器的通信系统是否稳定，包括与地面控制站的数据链路、导航系统、避障系统等，确保飞行过程中的通信和导航准确无误。
- 安全性测试：确保无人机在运行过程中的安全性，包括对突发情况的处置能力、应急降落程序、以及对恶劣天气条件的适应性。
- 旅游体验测试：评估低空旅游项目给游客带来的体验，包括空中观光的视角、亲近自然的感受、个性化体验等，以提升旅游体验的质量。
- 基础设施联调测试：测试低空旅游所需的基础设施，如通用机场、起降点、导航定位、通信、气象、充电等功能服务，确保基础设施能够支持低空旅游的运行。

3.3 低空载人



低空载人场景是指利用直升机、电动垂直起降飞行器（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。亿航、小鹏汇天、吉利沃飞长空、峰飞、时的科技、沃兰特等企业均布局载人飞行 eVTOL 行业。

亿航智能是国内全球拿到适航三证的载人 eVTOL 企业，EH216-S 无人驾驶载人航空器已在广州九龙湖、合肥骆岗中央公园、深圳大梅沙进行商业载人飞行演示，标志着其开展常态化空中商业飞行的开始。沃飞长空在成都市开展了全国首例城市直升机试飞从机场到中心城区的短途运输低空载人验证，标志着成都成为国内首个可采用直升机等低空飞行器连接机场与市区通勤线路的城市。上海沃兰特航空技术有限责任公司的 eVTOL 飞行器 VE25 开展了航空医疗救援验证。西北工业大学与麦迪科技发布了首个全自主智能化 AED 无人机救援的低空救援整体解决方案，并成功

进行首飞。航空工业特飞所 AS700 载人飞艇完成了首次低空旅游应用场景演示飞行，途经多个旅游景点和名胜风景，提供了“天空视角”的旅游体验。

低空载人场景的实现依赖于数字低空和低空智联网络提供的技术支持。通过融合运用网络化、数字化和智能化技术，构建的具有通信、监控、服务功能的智能化数字网络。这个网络能够为低空飞行器提供安全高效载人飞行所必需的数字化空域信息以及通信、导航、监视和数据管理等服务，包括使用 5G 公网、低轨卫星、宽带通信网等通信技术，以及广播式自动相关监视（Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, ADS-B）和雷达等监视手段，确保飞行器的通信、导航、监视和数据管理等需求得到满足，从而保障飞行安全，提高飞行效率。例如，成都市低空交通管理服务平台作为“智慧大脑”，为低空载人飞行提供了运行保障，包括飞行动态监视、航线规划和飞行情报服务等。这些服务是实现低空载人场景的基础，也是推动低空经济发展的关键因素。

低空载人场景开展测试验证的主要内容包括：

- 飞行动态监视验证：验证低空载人任务和监管系统的功能性，实现对载人飞行过程的动态监视，包括飞行数据、航线、实时空中信息和天气信息等。
- 空域和航路能力验证：测试空域管理、航线规划的能力，确保低空飞行器能够在城市空域中安全、高效地运行。
- 通信网络性能仿真与测试：验证飞行器通信、导航和控制系统的可靠性和效率，包括核心网络仿真测试、信道仿真测试、网络损伤测试、流量测试和 TSN 测试。
- 低空协同运行管理验证：测试低空飞行器在复杂空域中的协同运行能力，包括与有人驾驶航空器的融合运行。
- 运营前适航符合性测试评估：开展全面的符合性测试评估，检查服务能力，包括运行单位资质、服务站类别及服务范围、人员配备及条件、设施设备配备及条件、管理制度、服务方式及流程、情报气象计划等信息处理流程、与区域信息处理系统的协议及数据接口、数据交换标准、与军民航管制单位协议签订情况等。
- 电磁兼容性测试：确保飞行器的电子控制系统和通信技术在强电磁干扰环境下的可靠性和稳定性。
- 高速信号测试：进行高速信号测试，确保飞行器内部数据传输的高速和稳定性。
- 载人试验飞行：进行载人试验飞行，验证飞行器在实际载人条件下的性能和安全性，包括高温、低温等极限环境的考验，最大时速飞行与刹停、各种应急故障的可靠处置验证等。

3.4 低空巡检



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。低空巡检通过搭载高清摄像头和其他传感器，能够快速识别隐患问题和损伤风险，提高巡检的效率和安全性。

在电力巡检方面，如南方电网公司优化构建了全域“无人化”智能巡检体系，探索了特种作业、基建验收、空中吊运等场景的融合应用。他们首次开展了实用型氢动力无人机长距离通道巡检，验证了氢动力无人机的飞行性能、巡检成本、数据质量等，为后续的应用提供了数据支撑。

油气管道巡检方面，如西南油气田采用大疆经纬 M300 RTK 无人机，通过热插拔换电实现连续飞行，单机日巡 200 公里。通过大疆智图软件进行二维正射影像与三维模型重建，获取厘米级高精度数字模型，助力油田资产数字化、运维可视化。

桥梁与公路巡检方面，如福建高速部署了无人机智能巡检系统，该系统能够实现道路病害检测、抛洒物识别、大跨度桥梁病害检查以及应急事件等自动收集、自主分析、精准预警，实现远程干预违法行为和智能识别，无人机的使用提高了巡检视野覆盖面，有效延伸巡检范围，全面提高巡检效率和质量。

城市治理巡检方面，如广州市白云区城市管理和综合执法局构建了“无人机+AI”的监管模式，包括无人机自动巡航监管违法建设、搭载红外摄像头抓拍建筑垃圾偷倒行为、AI 识别地面环卫垃

圾及占道经营情况等。这一模式大幅提高了城市管理的效率和质量，一天可以监测约 15 平方千米的区域，巡查效率是传统人工巡查模式的两倍以上。

低空巡检场景的测试验证内容主要包括以下几个方面：

- 通信链路测试：测试无人机与地面控制站之间的通信链路稳定性，包括图像传输、控制信号传输等。
- 成像与传感器测试：验证无人机搭载的成像设备和传感器的性能，如高清摄像头、红外摄像头、多光谱传感器等，确保能够清晰、准确地捕捉到巡检目标的特征。
- 数据处理与分析：测试无人机采集的数据是否能够被地面站或云平台有效处理和分析，包括图像识别、缺陷检测、数据分析等。
- 智能识别精度与效率测试：验证无人机搭载的智能识别系统是否能够达到预定的精度和效率要求，如召回率、准确率、mAP 值和识别效率等指标。
- 安全性能测试：验证无人机的安全性能，包括避障能力、应急响应、抗干扰能力等。
- 环境适应性测试：测试无人机在不同气候和环境条件下的适应性，如雨雪天气、高温或低温环境等。
- 续航与能量效率测试：验证无人机的电池续航能力和能量效率，确保在规定的巡检任务中能够持续运行。
- 系统集成测试：测试无人机与现有巡检系统的集成能力，如与现有的监控系统、数据管理系统的兼容性。

3.5 低空消防



低空消防是指利用无人机、直升机等低空飞行器进行的消防救援活动，它在城市消防救援、森林防火灭火等领域有广泛应用。低空消防的主要优势包括快速响应、实时监控和热成像技术等。

城市消防救援方面，一是火场侦察和火情研判，通过无人机实时回传的视频和图片帮助指挥部快速掌握火势和蔓延方向，精准判断险情，确定救援举措；二是喷淋灭火，无人机携带药剂进行灭火，或通过热成像画面引导高喷车精准灭火，提高了救援效率和安全性；三是高层建筑消防，通过使用无人机飞行平台与地面测控装备、任务载荷的搭配，执行高层建筑消防复杂特殊的作业任务，全面提升高层建筑消防体系的无人化与智能化，降低人员伤亡风险。

森林防火灭火方面，一是火情侦查及火源定位，通过无人机进行森林货场空中巡护，发现火源点并实时视频回传至指挥部，为火情评估和火灾扑救提供数据支撑；二是灭火扑救，无人机通过配备灭火专用的水基灭火弹投放器和干粉灭火球投放器，进行灭火作业；三是防火宣传，通过挂载喊话器进行防火宣传和火情播报；四是物资投放，通过无人机向受困地区和群众投放应急物资。

低空巡检场景的测试验证内容主要包括以下几个方面：

- 飞行性能测试：验证无人机在不同环境条件下的飞行性能，包括最大飞行高度、速度、续航时间以及载重能力等，测试无人机的飞行性能、作业效率和任务能力。
- 通信链路测试：测试无人机与地面控制站之间的通信链路稳定性，包括图像传输、控制信号传输等，全面检验无人机在断路、断网、断电等极端条件下的通信能力。
- 成像与传感器测试：验证无人机搭载的成像设备和传感器的性能，如高清摄像头、红外摄像头、多光谱传感器等，确保能够清晰、准确地捕捉到火场的特征。
- 智能识别精度与效率测试：验证无人机搭载的智能识别系统是否能够达到预定的精度和效率要求。
- 灭火弹吊舱设计测试：测试吊舱的模块化设计、稳定固定、触发机制以及导航定位的准确性。
- 灭火弹类型与参数测试：测试不同类型的灭火弹，包括干粉、水基、超细干粉等，以及它们的重量、尺寸、灭火介质、效能和安全距离。
- 实际场景灭火测试：在模拟的高层建筑火灾、森林火灾、化工园区火灾等场景中测试无人机的灭火性能。
- 安全性能测试：验证无人机的安全性能，包括避障能力、应急响应、抗干扰能力等。

- 环境适应性测试：测试无人机在不同气候和环境条件下的适应性，如雨雪天气、高温或低温环境等。
- 续航与能量效率测试：验证无人机的电池续航能力和能量效率，确保在规定的消防任务中能够持续运行。
- 系统集成测试：测试无人机与现有消防系统的集成能力，如与现有的监控系统、数据管理系统的兼容性。

四、数字低空测试与验证指标

由前述章节内容，我们已经针对数字低空体系及场景应用组成进行了阐述和总结，针对数字低空的组成部分，涵盖了低空物理基础设施、低空信息基础设施、低空数字空间以及低空场景应用，接下来，针对每一层具体的测试与验证指标，我们将在本白皮书做较为详细的说明。

4.1 低空物理设施测试与验证指标

4.1.1 无人飞行器

(1) 适航性

型号合格证 (Type Certificate, TC)：中型、大型无人驾驶航空器在上市销售前需要获得此证。该证书由民航主管部门颁发，证明航空器设计符合适航标准和环境保护要求。

生产合格证 (Product Certificate, PC)：确保无人驾驶航空器生产过程持续符合经批准的型号设计，并处于安全可用状态。该证书是对生产组织的质量保证体系的认可。

单机适航证 (Airworthiness Certificate, AC)：每台飞行器需单独认证，证明该特定航空器符合经批准的型号设计，并处于安全运行状态。适航证是航空器投入运行的必要法律文件。

(2) 动力系统性能

电池性能：包括电池容量、充放电效率、循环寿命等。例如，某款电动垂直起降飞行器的电池容量可能达到 50kWh，充放电效率超过 90%，循环寿命可达 1000 次以上。

电机效率：评估电机在不同工况下的效率表现。例如，某款低空飞行器的电机效率可能高达 85% 以上，能够在不同飞行阶段提供稳定的推力。

能量管理系统：确保能量分配合理，延长续航时间。例如，通过先进的 BMS（电池管理系统），可以实现对电池状态的实时监控和智能管理，从而延长续航里程至数百公里。

(3) 飞行性能

飞行高度：通常在 1000 米以下。但具体数值可能因飞行器类型和用途而异。

速度：根据不同类型飞行器的需求设定。例如，无人机的速度可能在每小时几十到几百公里不等；而电动垂直起降飞行器的速度可能更高，以适应城市间快速穿梭的需求。

作业半径：评估飞行器的有效作业范围。例如，某款无人机的作业半径可能达到数十公里，而 eVTOL 的作业半径可能更广，以满足城市间的交通需求。

定位导航精度：确保飞行器能够准确到达目标位置。现代低空飞行器通常配备高精度的定位系统和导航设备，如 GPS、北斗等，定位精度可达到厘米级或亚米级。

(4) 环境适应性

高低温：测试飞行器在极端温度条件下的性能。例如，某些飞行器可能需要在 -40°C 至 $+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内正常工作。

湿热：评估飞行器在潮湿环境下的稳定性。例如，通过模拟高温高湿的环境条件，测试飞行器的防水防潮能力。

冲击、振动：模拟飞行器在实际使用中可能遇到的各种物理应力。例如，通过振动台和冲击试验装置，测试飞行器的结构强度和耐久性。

淋雨、抗风：测试飞行器在恶劣天气条件下的飞行能力。例如，某些飞行器可能需要经受住每小时数十毫米的降雨量和特定等级的风速考验。

(5) 电磁兼容性

电磁兼容试验：确保飞行器不会对其他电子设备产生干扰，同时也能抵抗外部电磁干扰。例如，通过电磁兼容性测试设备，测试飞行器的电磁辐射水平和抗干扰能力。

(6) 安全性

结构强度：评估飞行器结构的承载能力和抗破坏能力。例如，通过静力试验和疲劳试验，测试飞行器的关键部件在受力情况下的表现。

应急处理机制：测试飞行器在遇到紧急情况时的应对措施，如降落伞释放等。例如，某些飞行器配备了自动降落伞系统，在紧急情况下能够迅速展开并安全着陆。

(7) 可靠性

故障率：统计飞行器在一定时间内出现故障的概率。例如，某款低空飞行器的平均无故障时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 可能达到数千小时以上。

平均无故障时间 (MTBF)：衡量飞行器在正常使用条件下的平均工作时间。例如，通过长期运行测试和数据分析，得出飞行器的 MTBF 值。

4.1.2 其他物理设备设施

(1) 起降平台

尺寸：根据飞行器的大小和类型确定，例如小型无人机起降平台可能仅需几平方米，而大型eVTOL起降平台可能需要几百平方米。

承重能力：确保平台能够承受飞行器及其载荷的重量。

表面平整度：影响飞行器起降的稳定性和安全性，通常要求误差不超过几毫米。

(2) 能源站

充电效率：例如，某款电动垂直起降飞行器的电池在30分钟内可充至80%电量。

输出功率：根据飞行器的充电需求确定，如某能源站能提供高达50kW的充电功率。

兼容性：支持不同类型和电压的飞行器充电接口。

(3) 末端配送设施

配送效率：单位时间内完成配送任务的数量或距离。

准确性：配送成功率，即成功送达目标地点的比例。

环境适应性：能在各种天气和地形条件下稳定运行。

(4) 备降点

可达性：从飞行器当前位置到备降点的距离和所需时间。

设施完备性：包括通信、导航、监控等设备的配置情况。

应急响应能力：备降点的救援和支持服务能力。

(5) 维修站

维修周期：完成一次常规维护所需的时间。

故障检测率：能够准确诊断出飞行器故障的比例。

(6) 机载通信设备

通信距离：在特定环境下（如城市、山区）的有效通信范围。

数据传输速率：每秒传输的数据量，影响实时性和响应速度。

抗干扰能力：在复杂电磁环境中保持通信稳定性的能力。

(7) 多源头导航设备

定位精度：通常要求达到厘米级或亚米级。

信号覆盖范围：在不同高度和距离下的导航信号强度和稳定性。

多系统兼容性：支持 GPS、北斗等多种导航系统的融合使用。

(8) 机载感知与识别设备

感知距离：能够检测到障碍物或其他飞行器的最大距离。

识别准确率：正确识别周围物体或飞行器身份的概率。

反应时间：从感知到障碍物到做出避让决策的时间间隔。

(9) 智能航行设备

自主飞行能力：飞行器在无人工干预的情况下完成任务的能力。

避障策略多样性：针对不同场景和障碍物类型采取的避障措施数量和有效性。

紧急处理机制：在遇到突发情况时，如电池耗尽、控制系统失效，设备的应对措施和效果。

4.2 低空信息设施测试与验证指标

(1) 通信性能指标

通信速率：衡量数据传输的快慢，通常以 Mbps（兆比特每秒）或 Gbps（吉比特每秒）为单位。例如，5G-A 基站可实现高带宽通信，支持高速数据传输。（下行峰值速率 $\geq 10\text{Gbps}$ （毫米波频段），上行速率 $\geq 1\text{Gbps}$ ）^{[41][42]}。

时延：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。5G-A 技术支持端到端 $\leq 4\text{ms}$ 的超低时延（URLLC 场景），确保数据传输的及时性^[43]。

连接规模：指网络能够同时支持的连接数量，对于大量低空飞行器的接入和管理具有重要意义（单基站支持 $\geq 1,000,000$ 连接数/ km^2 ）^[44]。

信号覆盖范围：指网络信号能够覆盖的区域大小，对于实现全域无缝覆盖至关重要。例如，利用大约 2% 的城市基站数量，就能实现垂直覆盖 ≤ 300 米、水平覆盖半径 $\geq 5\text{km}$ ^[45]。

抗干扰能力：评估系统在复杂电磁环境中保持通信稳定性的能力。由于低空环境复杂多变，存在多种干扰源，因此抗干扰能力是重要指标之一（信噪比 $\geq 6\text{dB}$ 时误码率 $\leq 1 \times 10^{-6}$ ）^[46]。

兼容性：指系统与其他通信系统（如卫星导航系统、地面移动通信系统等）的兼容能力。低空通信基础设施需要与多种通信系统协同工作，以实现更广泛的应用场景（支持 GPS/北斗双模定位误差 $\leq 1.5\text{m}$ ）^[47]。

通感效率：刻画单位感知精度下的可达通信容量（通信速率 $\geq 1\text{Gbps}$ 且感知精度 $\leq 0.1^\circ$ ）^[48]。

通感效用：最优通信和感知性能的可实现程度（感知资源占用率 $\leq 10\%$ 时通信速率下降 $\leq 5\%$ ）^[49]。

(2) 感知性能指标

感知精度：衡量系统对低空飞行目标的检测和识别能力，通常包括距离、速度、角度等参数的精度。例如，5G-A 技术已实现对小至手掌大小无人机的感知，物理空间偏差达到水平定位误差 $\leq 10\text{m}$ （95%置信度），速度误差 $\leq 0.5\text{m/s}$ ^{[50][51]}。

感知范围：包括感知高度与感知距离。感知高度表征在低空通感网络中，无人机在空中运行高度与覆盖区域平均海拔的差值（0-1000 米）；感知距离表征能满足感知需求的最远覆盖距离（RCS $\geq 1\text{ m}^2$ 目标探测距离 $\geq 10\text{km}$ ）^[52]。

感知位置精度：表征感知位置结果与目标真实位置的差距，可分为水平与垂直精度（垂直精度 $\leq 3\text{m}$ ）^[53]。

感知分辨率：表征网络对多目标的最小分辨能力，可分为径向距离分辨率（ $\leq 1\text{m}$ ）、速度分辨率（ $\leq 0.1\text{m/s}$ ）、角度分辨率（ $\leq 1^\circ$ ）^[54]。

感知速度范围：表征网络对目标运动速度的探测能力，代表系统可感知运动速度的上下限范围（0-200km/h）^[55]。

刷新率：表征通感网络呈现感知结果的时间间隔，是对系统感知结果稳定输出能力的重要评估标准（ $\geq 10\text{Hz}$ ）^[56]。

虚警率：定义为在一定时间内场景出现虚假感知结果的概率，虚警率越低，系统在无目标场景下错误上报感知结果的概率越低（ $\leq 1 \times 10^{-6}/\text{小时}$ ）^[57]。

检测率（漏检率）：定义为在一定时间内实际需求目标被成功检测（未能成功）的概率，检测率越高，系统在有目标场景下对目标感知成功率越高（检测率 $\geq 99.9\%$ ，漏检率 $\leq 0.1\%$ ）^[58]。

RCS（雷达散射截面）：表征产生相同反射能量强度的球体截面积，可以反映感知目标在电磁波照射下所产生的回波强度（Ku 波段下可探测最小 RCS=0.001 m²）^[59]。

置信度：表征通感网络所有测试样本中能够达成目标精度需求的样本比例，可准确评估通感网络结果的可信程度（ $\geq 95\%$ ）^[60]。

（3）计算与存储性能指标

计算能力：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（Floating Point Operations Per Second, FLOPS）或整数运算次数（Integer Operations Per Second, IOPS）来衡量（边缘节点算力 ≥ 100 TOPS）^[61]。

数据吞吐量：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（持续读写速率 ≥ 5 GB/s）^[62]。

响应时间：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（存储延迟 $\leq 50\mu s$ ）^[63]。

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 ≥ 100 Gbps）^[64]。

（4）安全与可靠性指标

可靠性：评估系统在长时间运行过程中保持稳定性和准确性的能力。对于低空飞行器的安全运营至关重要（系统可用性 $\geq 99.999\%$ ）^[65]。

安全性：指系统在数据传输和处理过程中保障信息安全的能力。包括数据加密、访问控制等安全措施的实施情况（支持 AES-256/SM4 加密协议）^[66]。

部署和维护成本：评估系统部署和维护的经济性。低空通信基础设施的建设需要考虑成本效益比，以确保其可持续发展，例如采用通感一体化基站可降低硬件成本 $\geq 30\%$ ^[67]。

运行稳定性：评估设备在长时间运行和高负载条件下的稳定性和可靠性，通过长时间运行一系列的性能测试用例来检测设备的散热、电源、稳定性等方面的表现，通过测试验证极端温度（-40°C~+55°C）下性能波动 $\leq 5\%$ ^[68]。

故障率：统计设备在一定时间内出现故障的概率，对于低空飞行器的安全运营至关重要（ $MTBF \geq 100,000 \text{ h}$ ）^[69]。

4.3 低空数字空间测试与验证指标

(1) 数据接入网

数据接入网的主要测试验证指标包括传输性能、误码率以及同步特性。以下是对这些指标的详细解释：

- 传输性能

吞吐量：衡量网络在单位时间内成功传输的数据量，通常以 Mbps 或 Gbps 为单位。

延迟：指数据从发送端到接收端所需的时间间隔，对于实时应用来说尤为重要。

抖动：描述数据包到达时间的不一致程度，影响语音和视频等实时服务的通话质量。

- 误码率

误码秒比（Errored Second Ratio, ESR）：在一定时间内发生误码的秒数与总秒数的比例。

严重误码秒比（Severely Errored Second Ratio, SESR）：在一定时间内发生严重误码的秒数与总秒数的比例。

背景误码块比（Background Block Error Ratio, BBER）：在一定时间内发生误码的块数与总块数的比例。

- 同步特性

漂移特性：描述数字信号传输过程中频率的变化情况，影响通信的稳定性。

抖动特性：描述数字信号传输过程中相位的变化情况，同样影响通信的稳定性。

(2) 数据交换网

数据交换网的主要测试与验证指标包括吞吐量、背板带宽以及包转发率。以下是对这些指标的详细解释：

- 吞吐量：吞吐量是衡量交换机数据处理能力的一个关键指标，表示在无丢包的情况下，交换机单位时间内（通常是每秒）能够转发的数据量。高吞吐量意味着交换机能够快速处理大量数据，减少网络延迟和数据包丢失。
- 背板带宽：背板带宽是交换机内部所有端口同时传输数据时的最大带宽总和。它决定了交换机处理并发数据流的能力，是衡量交换机整体性能的重要参数。背板带宽足够大，可以确保即使在网络负载高峰期，数据也能无阻塞地在交换机内部传输。
- 包转发率：包转发率指交换机每秒能够处理的数据包数量，通常用“包/秒”（Packets Per Second, pps）来表示。这是评估交换机处理数据包能力的重要指标。高包转发率意味着交换机能够快速识别并转发数据包，提高网络的整体响应速度。

4.4 低空应用系统测试与验证指标

(1) 飞行计划管理

飞行计划审批效率：衡量从提交飞行计划到获得批准所需的时间，以及审批流程的简化程度。

飞行计划准确性：确保飞行计划中的信息（如起飞和降落地点、航线、高度等）准确无误。

飞行计划变更响应时间：评估系统对飞行计划变更请求的处理速度和效率。

(2) 飞行跟踪与监视

实时监控能力：系统能够实时跟踪低空飞行器的位置，并提供实时的飞行状态信息。

数据同步性：确保飞行数据在不同系统和平台之间的同步更新，避免信息滞后。

异常检测与报警：系统能够及时发现并报告飞行中的异常情况，如偏离预定航线或遇到紧急情况。

(3) 运行控制与信息发布

运行控制效率：评估系统在处理飞行任务分配、调度和冲突解决方面的能力。

信息发布及时性：确保重要信息（如天气变化、空域限制等）能够及时传达给相关方。

用户界面友好性：操作界面应直观易用，方便运营人员快速获取所需信息并进行操作。

(4) 系统稳定性与可靠性

运行稳定性：评估系统在长时间运行过程中的稳定性和可靠性，以及出现故障的频率。

设备兼容性：系统需要能够与现有设备和软件无缝集成，支持多种数据格式和通信协议。

系统扩展性：评估系统是否易于升级和扩展，以适应未来技术的发展和应用需求的变化。

(5) 用户体验

响应时间：用户与平台互动后，从发送请求到接收到响应的的时间，直接影响用户体验。

可用性：服务在一定时间内能够正常运行的比例，高可用性的服务能保证用户随时使用。

五、 总结

随着低空经济的蓬勃发展，数字低空技术作为其核心支撑，正逐步从概念走向实践。然而，高密度、高频次、异构化的低空运行环境，对数字低空系统的安全性、可靠性和适应性提出了前所未有的挑战。在这一背景下，建立一套科学、系统、可落地的测试与验证体系，成为推动数字低空技术规模化应用的关键。

本白皮书从数字低空测试与验证的实际需求出发，深入分析了当前国内外在这一领域的发展现状与核心问题。针对测试与验证架构缺失、工具不足、标准化滞后等痛点，我们提出了“四横三纵”的体系架构，将物理设施、信息基础设施、数字化空间和应用系统有机结合，并通过模拟仿真、封闭区域和开放区域测试，全面覆盖数字低空系统的测试需求。这一架构不仅为测试与验证工作提供了系统性指导，也为低空经济的标准化建设奠定了理论基础。

在方法与技术层面，白皮书详细阐述了基于用例、场景和公共开放空域的测试方法，以及虚拟仿真、硬件在环和封闭空域测试技术。这些方法和技术不仅能够满足不同测试阶段的需求，还能有效降低测试成本与风险，为数字低空系统的快速迭代和优化提供了有力支持。

此外，白皮书还聚焦低空物流、文旅、载人、巡检和消防等典型应用场景，深入分析了各场景的测试验证内容与关键指标，为实际应用提供了科学依据。通过对通信、感知、计算、安全等核心指标的明确，白皮书为数字低空系统的性能评估和优化指明了方向。

展望未来，数字低空测试与验证体系的完善，将成为低空经济高质量发展的重要推动力。然而，这一领域仍面临诸多挑战，如技术创新的持续突破、标准体系的进一步完善，以及场景适应性的不断提升。只有通过多方协作，才能构建起更加开放、共享、高效的测试与验证生态，为低空经济的规模化应用保驾护航。

总的来说，本白皮书旨在为数字低空测试与验证提供一套科学、系统的解决方案，助力低空经济从“试验田”走向“大市场”。我们相信，随着技术的不断进步和体系的逐步完善，数字低空技术必将为低空经济注入新的活力，开启更加广阔的发展空间。

参考文件

- [1] Small unmanned aircraft systems (UAS) regulations (part 107) | federal aviation administration[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [2] Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations 2.0[EB/OL]. https://www.faa.gov/air-taxis/uam_blueprint.
- [3] The SESAR Project[EB/OL]. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky/sesar-project_en.
- [4] Flight Rules for Unmanned Aircraft[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.mlit.go.jp/en/koku/uas.html>.
- [5] Advanced Air Mobility in JAPAN 2021[Z/OL]. [2024-12-17]. https://www.mlit.go.jp/koku/content/JPN_AAM_in_Japan.pdf.
- [6] K-UAM ConOps 1.0[EB/OL]. [2024-12-17]. <http://aam-gurs.com/>.
- [7] Assure - THE FAA's center of excellence for UAS research[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://assure.msstate.edu/>.
- [8] Northeastern opens state-of-the-art radio-silent drone facility[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://coe.northeastern.edu/news/northeastern-opens-state-of-the-art-radio-silent-drone-facility/>.
- [9] MIT and U.S. air force sign agreement to launch AI accelerator[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.ll.mit.edu/news/mit-and-us-air-force-sign-agreement-launch-ai-accelerator>.
- [10] CORUS five: Concept of operations for European UTM systems[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://corus-project.eu/about/>.
- [11] SoftBank corp.'s large-scale "sunglider" solar HAPS aircraft succeeds in stratospheric flight during field trial conducted by AeroVironment and US department of defense[EB/OL]. (2024-09-25)[2024-12-17]. <https://www.softbank.jp/en/corp/technology/research/news/050/>.
- [12] Komsens 6g[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.komsens-6g.com/>.
- [13] UAS test site program[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/test_sites.
- [14] BEYOND | federal aviation administration[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/beyond.
- [15] Scott B, Andritsos K. A Drone Strategy 2.0 for a Smart and Sustainable Unmanned Aircraft Eco-System in Europe[J]. Air and Space Law, 2023, 48: 273-296.
- [16] "European UAS Test Centres Alliance" overview - Survey Results[Z/OL]. [2024-12-17]. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-06/eurocontrol-european-uas-test-centres-alliance-survey-results.pdf>.
- [17] Blade Air Mobility and BETA Technologies complete historic Electric Vertical Aircraft flight in New York[EB/OL]. <https://ir.blade.com/news-events/press-releases/detail/61/blade-air-mobility-and-beta-technologies-complete-historic>.
- [18] Joby flies quiet electric air taxi in new york city[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.jobyaviation.com/news/joby-flies-quiet-electric-air-taxi-new-york-city/>.
- [19] 中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
- [20] 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm.
- [21] 工业和信息化部等四部门关于印发绿色航空制造业发展纲要（2023-2035 年）的通知[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6908243.htm.
- [22] 四部门关于印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》的通知[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.
- [23] 低空经济将破万亿，城市竞速迎“风”而上[EB/OL]. (2024-12-17)[2024-12-17]. <https://www.36kr.com/p/2732873028053248>.

- [24] 中国移动发布低空智联网“1115”技术创新成果 [EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.10086.cn/aboutus/news/groupnews/index_detail_50153.html.
- [25] 低空经济研究中心-IDEA 研究院[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.idea.edu.cn/research/laser.html>.
- [26] 中国联通郝立谦：构筑天地融合智能网联 加速培育低空经济新质生产力[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1809958373402975414&wfr=spider&for=pc>.
- [27] Flight performance of civil small and light fixed-wing unmanned aircraft systems (UAS) — Test methods: ISO 5286:2023[S]. Geneva: ISO copyright office, 2023.
- [28] Civil small and light unmanned aircraft systems (UAS) under low-pressure conditions — Test methods: ISO 5286:2023[S]. Geneva: ISO copyright office, 2023.
- [29] 3GPP. Uncrewed Aerial System (UAS) support in 3GPP: TS 22.125[S]. 2024.
- [30] 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication[S]. 2024.
- [31] 3GPP. Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking; Stage 2[S]. 2024.
- [32] IEEE 1939.1-2021: IEEE Standard for a Framework for Structuring Low-Altitude Airspace for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Operations[S]. New York: IEEE, 2021.
- [33] IEEE 1937.8-2024: IEEE Recommended Practice for Functional and Interface Specifications for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Cellular Communication Terminals[S]. New York: IEEE, 2024.
- [34] 民用轻小型无人机系统环境试验方法第 1 部分：总则: GB/T 38924.1-2020[S]. 2020.
- [35] 民用轻小型无人机系统安全性通用要求: GB/T 38931-2020[S]. 2020.
- [36] 民用无人驾驶航空器系统安全要求: GB 42590-2023[S]. 2023.
- [37] 民用机场无人驾驶航空器系统监测系统通用技术要求: T/CCAATB-0001-2019[S]. 2019.
- [38] 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求: T/CCAATB 0062—2024[S]. 2024.
- [39] 中国民用航空局飞行标准司. 低空联网无人机安全飞行测试报告: IB-FS-2018-011[R]. 2018.
- [40] 无人机系统测试与验证技术规范: T/CCAATB-0065-2024[S]. 2024.
- [41] IMT-2030(6G)推进组. 5G-A 技术白皮书[EB/OL]. 北京: 中国信息通信研究院, 2023.
- [42] 3GPP. TS 38.913: Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies[EB/OL]. 2023.
- [43] 3GPP. TR 38.913: NR; Release 18 Summary[EB/OL]. 2023.
- [44] 中国通信标准化协会. YD/T 4165-2023 智能计算中心性能评测规范[EB/OL]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [45] 中国信息通信研究院. 低空智联网技术发展白皮书[EB/OL]. 北京, 2024.
- [46] 国家市场监督管理总局. GB/T 9410-2022 无人机系统通信抗干扰性能测试方法[EB/OL]. 北京, 2022.
- [47] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0 版)[EB/OL]. 北京, 2022.
- [48] IEEE. 802.11bf: Standard for Wireless LAN Sensing (Draft 5.0)[EB/OL]. 2024.
- [49] 中国汽车工程学会. T/CARSAE 101-2023 低空飞行目标探测与识别系统测试规范[EB/OL]. 北京, 2023.
- [50] ISO. Flight performance of civil small and light fixed-wing unmanned aircraft systems (UAS) — Test methods: ISO 5286:2023[S]. Geneva: ISO copyright office, 2023.
- [51] ISO. Civil small and light unmanned aircraft systems (UAS) under low-pressure conditions — Test methods: ISO 5286:2023[S]. Geneva: ISO copyright office, 2023.
- [52] K-UAM. K-UAM ConOps 1.0[EB/OL]. [2024-12-17]. <http://aam-gurs.com/>.
- [53] Federal Aviation Administration. Small unmanned aircraft systems (UAS) regulations (part 107)[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [54] 中共中央国务院. 中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. [2024-12-17]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.htm.
- [55] 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication[S]. 2024.

- [56] 3GPP. Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking; Stage 2[S]. 2024.
- [57] 国家市场监督管理总局. 无人机系统电磁兼容性测试方法: GB/T 9410-2022[S]. 2022.
- [58] 国家市场监督管理总局. 民用无人机动态感知系统测试规范: GB/T 43678-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [59] 国家市场监督管理总局. 民用无人驾驶航空器系统安全要求: GB 42590-2023[S]. 2023.
- [60] International Telecommunication Union. Technical Characteristics for Low Altitude UAS Radar Systems: ITU-R M.2412-0[S]. Geneva: ITU, 2023.
- [61] 3GPP. Uncrewed Aerial System (UAS) support in 3GPP: TS 22.125[S]. 2024.
- [62] 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication[S]. 2024.
- [63] 3GPP. Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking; Stage 2[S]. 2024.
- [64] IEEE. IEEE 1939.1-2021: IEEE Standard for a Framework for Structuring Low-Altitude Airspace for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Operations[S]. New York: IEEE, 2021.
- [65] 国家市场监督管理总局. 民用轻小型无人机系统环境试验方法第 1 部分: 总则: GB/T 38924.1-2020[S]. 2020.
- [66] 国家市场监督管理总局. 民用轻小型无人机系统安全性通用要求: GB/T 38931-2020[S]. 2020.
- [67] 国家市场监督管理总局. 民用无人驾驶航空器系统安全要求: GB 42590-2023[S]. 2023.
- [68] 国家市场监督管理总局. 民用机场无人驾驶航空器系统监测系统通用技术要求: T/CCAATB-0001-2019[S]. 2019.
- [69] 电动垂直起降航空器(eVTOL)起降场技术要求: T/CCAATB 0062—2024[S]. 2024.

致 谢

核心贡献单位：

紫金山实验室：黄永明
紫金山实验室：侯华舟
北京航空航天大学深圳新兴产业技术研究院：刘荣科
中国信通院：张 睿
中华人民共和国工业和信息化部电子第五研究所：黄 璇
北京航空航天大学深圳新兴产业技术研究院：黄俊杰
紫金山实验室：钟子果
紫金山实验室：尤建洁
北京理工大学：何东轩
智慧尘埃通信科技有限公司：吴建军
智慧尘埃通信科技有限公司：顾 亮
东南大学：岳志强
等