

泰伯智库  
TAIBO INTELLIGENCE UNIT



# 低空智联技术与应用 白皮书

(2026)

# 目录

前言.....	4
1、低空智联发展概述.....	5
1.1 内涵与价值.....	5
1.1.1 定义与特征.....	5
1.1.2 核心价值.....	6
1.1.3 发展阶段.....	7
1.1.4 产业链图谱.....	8
2、低空智联技术发展背景.....	11
2.1 政策与产业背景.....	11
2.1.1 国家政策导向.....	11
2.1.2 地方政策实践.....	12
2.1.3 产业需求驱动.....	14
2.2 技术演进.....	15
3、低空智联技术体系与关键技术.....	17
3.1 技术架构体系.....	17
3.2 技术成熟度曲线.....	19
3.3 关键技术.....	19
3.3.1 “一张网”：泛在融合的通感算网络.....	19
3.3.2 “一张图”：高精动态的时空数字地图.....	21
3.3.3 “一平台”：智能协同的飞行服务管理平台.....	25
3.3.4 “一朵云”：聚合海量数据的行业赋能云.....	27
4. 低空智联典型应用场景.....	30
4.1 应用场景概览.....	30
4.2 空域管理.....	32
4.2.1 需求背景.....	32
4.2.2 应用场景.....	32
4.2.3 典型案例.....	33
4.3 公共服务与城市治理.....	35
4.3.1 需求背景.....	35
4.3.2 应用场景.....	35
4.3.3 典型案例.....	36
4.4 低空物流.....	37
4.4.1 需求背景.....	37
4.4.2 应用场景.....	38
4.4.3 典型案例.....	38

4.5	能源巡检与基础设施监测	39
4.5.1	需求背景	39
4.5.2	应用场景	40
4.5.3	典型案例	40
5.	发展挑战与对策建议	42
5.1	技术挑战	42
5.1.1	数据获取与数据安全的挑战	42
5.1.2	核心算法与模型的挑战	42
5.1.3	网络通信与算力挑战	42
5.1.3	产业层面的挑战	43
5.2	发展对策	43
5.2.1	政策层面完善标准与治理体系	43
5.2.2	技术层面强化攻关与创新	45
5.2.3	产业层面加强生态合作与模式创新	46
6.	未来发展趋势	47
6.1	技术融合趋势	47
(1)	AI与数字孪生	47
(2)	星地融合的通感一体化网络	48
(3)	“云-边-端”协同计算	49
(4)	扩展现实(XR)与沉浸式交互	49
6.2	产业生态演进	50
(1)	商业模式创新	50
(2)	跨界融合与产业链合作新范式	50
(3)	监管科技与服务创新	51
6.3	社会影响与伦理	51
	结束语	53

# 前言

从孤立的飞行器到万物互联的空域，从“能飞”的基础保障到“飞得好”的智能协同，低空经济从概念走向现实，而其核心驱动力，正是“低空智联”。这一演进不仅是技术与产业的升级，更预示着城市空间利用与社会运行效率的一次深刻变革。

当前，业界对低空经济的讨论百花齐放，但对其数字基础设施的系统性认知仍显不足。本白皮书旨在超越单纯的技术罗列，创新性地提出“四位一体”（一张网、一张图、一平台、一朵云）的分析框架，以系统化地解构低空经济的数字底座。我们进一步尝试将讨论引向深入：强调低空经济的数字底座，其并非简单的信息连接，而是迈向更高阶的“低空时空智能底座”，其核心要素也正从飞行器本身，演变为可运营、可增值的“低空数据资产”。

然而，低空经济作为一个涉及空域管理、技术创新、产业协同与社会治理的复杂系统工程，其发展路径仍在探索之中。因此，本白皮书提出的框架与观点，是我们立足当下的一次前瞻性思考，难免有其局限性。我们真诚地希望，这份白皮书能够引发业界同仁和社会各界的更多关注与深度探讨，共同推动我国低空经济在坚实、智能的数字基石之上行稳致远。

白皮书的顺利完成，离不开众多行业专家与一线实践者的无私分享与大力支持，在此特致以诚挚的谢意！由于时间和认知所限，书中若有不足之处，恳请批评指正。

泰伯智库

2026年5月

# 1、低空智联发展概述

## 1.1 内涵与价值

### 1.1.1 定义与特征

低空智联（Low-Altitude Intelligent Connectivity）是指在距离地面垂直高度3000米以内的空域，依托空天地一体化网络设施，利用新一代信息技术，实现飞行器、地面设施、空管系统以及各类用户之间的全面、智能、高效的连接与协同。它是低空经济发展的核心技术支撑和基础设施，其核心目标是构建一个安全、有序、高效的低空运行环境。

其核心特征可概括为“三全三智”：

- (1) **全域覆盖**：通信、导航与监视网络需要对复杂多样的低空环境（城市、山区、海洋等）形成无缝、立体的覆盖，确保飞行器在任何环境下“不失联”。
- (2) **全时在线**：飞行器及其运载的设备需要7x24小时不间断的稳定网络连接，以保障实时数据交换和远程控制的可靠性。
- (3) **全程协同**：连接对象不仅包括飞行器本身，还涵盖了空管中心、气象服务、地面交通、任务系统等全链条要素，实现信息的高度共享与业务的流程协同。
- (4) **智能感知**：不仅能“联网”，更能“感知”。通过通感一体、多源数据融合等技术，实时感知飞行环境、识别潜在风险（如“黑飞”无人机、障碍物、恶劣天气），构建全面的低空态势图。

- (5) **智能决策**：基于大数据和人工智能算法，对海量的飞行数据和环境信息进行分析，实现航线动态规划、空域流量管理、飞行冲突自主解脱等智能化决策。
- (6) **智能服务**：为不同类型的低空应用（如物流、巡检、载人交通）提供差异化、定制化的网络服务、空域服务和信息服务，提升整体运行效率与服务质量。

### 1.1.2 核心价值

低空智联是低空经济从“能飞”迈向“飞得好、飞得安全、飞得经济”的必要前提，是低空经济规模化发展的基础数字底座。

其核心价值在于：

- (1) **空域治理的数字化支撑**：低空智联通过构建数字化空域一张图，承载着空域的管理数据流（如飞行计划、空域状态）和监测数据流（如飞行器实时轨迹、异常行为告警），使得精细化、动态化的空域管理成为可能。它是政府敢于并能够大规模开放低空空域的数字化信心来源和技术抓手，确保“放得开、管得住”。
- (2) **产业应用规模化的前提**：低空智联为各类低空应用提供了稳定可靠的控制数据流（如远程驾驶、指令传输）和业务数据流（如高清视频回传、物流信息交互），确保飞行器能够安全、高效地执行载人、载货等复杂任务。它解决了“信号看不见、飞机连不上、数据传不回”的行业痛点，是实现低空物流、城市空中交通（UAM）等应用规模化、商业化的根本保障。

### 1.1.3 发展阶段

低空智联的发展正经历从探索积累与体系构建，到体系融合与应用探索，再到智能演进与协同运营，最终迈向全域融合与自主运行的演进路径。以2010年国家启动低空空域管理改革为起点，重点是突破通信、导航、监视等关键单项技术，实现点状互联。2018年《低空飞行服务保障体系建设总体方案》的出台，标志着体系化建设正式拉开序幕。截至2023年底，我国低空飞行服务三级保障体系基本建成。该体系的建立，为低空活动的规范化、网络化、协同化运行奠定了坚实基础，其构成主要包括三个层面：

**法规标准层面：**建立了以《通用航空飞行服务站系统建设和管理指导意见》等为代表的法规标准体系。

**服务架构层面：**形成了由国家信息系统、区域信息系统和飞行服务站构成的三级服务保障架构，实现了全国范围内的初步联网协同。

**技术平台层面：**建成了以北斗定位为核心技术的通用航空飞行动态信息服务平台，为低空飞行提供可靠的动态监视服务。

以2024年“低空经济”被提升至国家战略高度为开端，行业发展进入快车道。在已建成的三级保障体系之上，发展重点转向构建低空数字底座、实现多源数据深度融合和全域态势感知，确保低空活动在安全可监管的框架下规模化展开。当前，行业正处于这一关键时期。随着三级保障体系的不断完善和数字底座的成熟，行业将由“可管可控”迈向“可协同可优化”。AI驱动的空域调度、5G-A通感融合等技术将从试点走向区域化应用，实现更高效的空域资源分配和多机协同运营。最终目标是构建一个覆盖空、天、地、海及网络空间的全

域智能网络，使其具备自适应环境变化、全生命周期自治和自我进化的能力，低空智联将成为智慧城市与全域交通的核心基础设施。

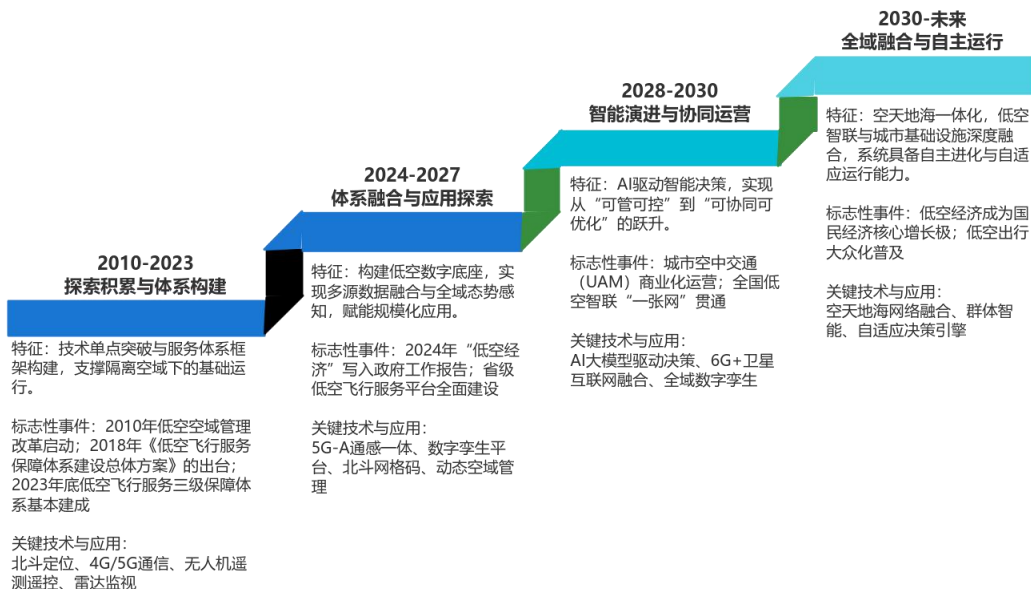


图 1 低空智联的发展演进

### 1.1.4 产业链图谱

低空智联产业链由上游基础设施层、中游飞行保障层、下游应用层构成。

基础设施层是低空数字底座的底层支撑，涵盖空天地一体感知网络以及算力与云/边服务、物理基础设施。物理基础设施包含通航/无人机机场、起降站、能源站等；空天地一体感知网络包括通信、导航、监视等感知终端，实现空域状态实时感知；算力与云/边服务则能满足低空场景低时延、大带宽的计算需求，共同为平台化运营筑牢根基。

中游的飞行保障层是产业链核心，依托数字孪生空域与空中管理服务两大板块，实现低空飞行的智能管控与效能提升。数字孪生空域通过三维空域建模与底图构建、动态数据融合、仿真推演，为飞行提供全方位数字支撑；空中管理服务则通过空管数字化系统、低空物联网与服务平台，实现空域资源的智能化管理与服务输出。

应用层作为低空数字底座价值的最终体现，涵盖to G端、to B端、to C端等多类场景：G端聚焦公共服务与应急领域，B端服务于生产作业与物流场景，C端则延伸至载人交通与消费级应用。

# 低空数字底座产业链全景图谱 (2025)

泰伯智库  
TARO INTELLIGENCE UNIT

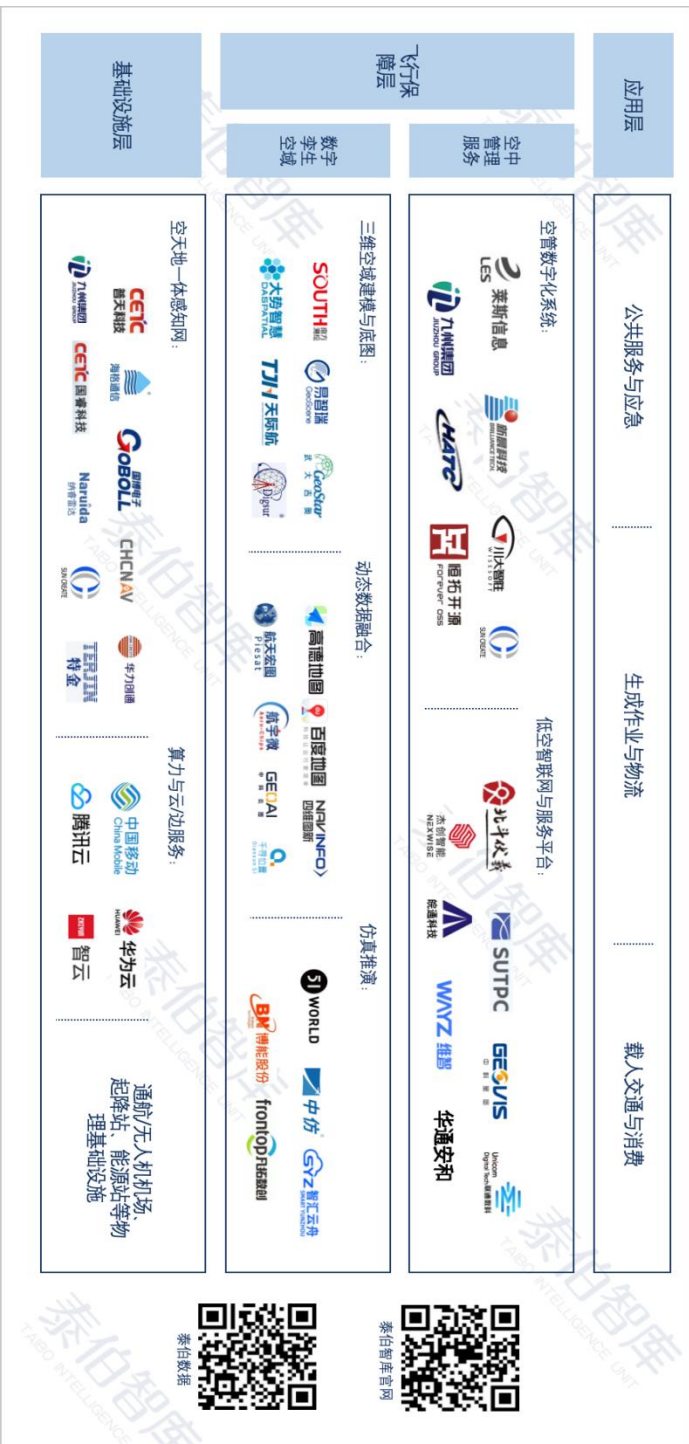


图 2 低空智联产业链全景图谱

## 2、低空智联技术发展背景

### 2.1 政策与产业背景

#### 2.1.1 国家政策导向

国家层面将低空经济定位为战略性新兴产业和新质生产力的代表，政策密集出台，为产业发展提供了顶层设计和法治保障。

**国家战略层面：**继2024年首次写入后，2025年国务院政府工作报告再次强调“推动低空经济安全健康发展”，将其定位为国家战略性新兴产业和经济增长新引擎。国家发改委、工信部、交通运输部、民航局等多部委协同发力，形成了强大的政策合力。例如，工信部等四部门联合发布的《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》为产业发展提供了清晰的路线图。

**空域管理改革深化：**《国家空域基础分类方法》的实施，特别是G/W类非管制空域的划设，为低空飞行活动提供了更多可用的合法空域，从根本上打开了市场空间。空域管理的精细化、动态化、数字化成为必然要求，直接催生了对低空智联系统的刚性需求。

表1 国家层面相关政策文件（部分）

政策名称	发布单位	发布时间	简要描述
《国家综合立体交通网规划纲要》	中共中央、国务院	2021年2月	首次将“低空经济”概念写入国家级规划，标志着其正式上升为国家战略。
《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》	中央军委、国务院	2023年6月	无人机监管的核心法规，为低空经济产业的规范化发展奠定了根本性的法律基础。
《绿色航空制造业发展纲要	工业和信息化部等四部委	2023年10月	规划了开辟电动航空新领域、布局氢能航空等新赛道的发展路径，构

政策名称	发布单位	发布时间	简要描述
(2023-2035年)》			建绿色航空产业体系。
《国家空域基础分类方法》	国家空中交通管理委员会	2023年12月	划定G类和W类低空空域，为eVTOL、轻小型无人机和通用航空提供了合法的低空飞行空间。
《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030年）》	工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局	2024年3月	提出到2030年形成万亿级市场规模，推动以无人化、电动化、智能化为特征的新型通用航空装备在多领域实现商业应用。
《政府工作报告》	国务院	2024年3月	首次将“低空经济”写入政府工作报告，并明确将其打造为“新增长引擎”。
《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》	中国民用航空局	2024年5月	无人机运行安全的核心规章，固化了无人机监管体系建设的试点经验，明确了分级分类管理原则。
《中共中央关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定》	中共中央	2024年7月	提到“发展通用航空和低空经济”
成立低空经济发展司	国家发改委	2024年12月	设立低空经济发展司，第一阶段低空经济司工作重点主要放在低空安全规范、低空基础设施建设、以及低空智能网联系统方面

注：按照发布时间顺序排列

### 2.1.2 地方政策实践

全国已有近30个省份将低空经济写入政府工作报告，多地出台专项行动方案，积极开展试点示范，形成了以深圳、广州、安徽、江苏等为代表的先行区域。

表2 地方相关政策/规划（部分）

政策名称	发布单位	发布时间	简要描述
《广东省推动低空经济高质量发展行动方案（2024—2026年）》	广东省人民政府	2024年	提出构建低空物联网和数字低空底座，加快5G-A、北斗、卫星互联网等技术融合，完善通信、导航、监视等配套设施网络。
《深圳经济特区低空经济产业促进条例》	深圳市人大常委会	2024年	全国首部低空经济领域的专项地方法规，为产业发展提供了法治保障。
《上海市低空经济产业高质量发展行动方案（2024-2027年）》	上海市人民政府	2024年	强调建设全市低空数字空域“一张图”，并探索构建重点区域的低空数字孪生系统。
《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案（2024-2027年）》	北京市经济和信息化局等	2024年	提出将空域规划与城市三维模型融合，支持构建低空安全风险预测与应急处置大模型。
《重庆市推动低空空域管理改革促进低空经济高质量发展行动方案（2024-2027年）》	重庆市人民政府	2024年	创新构建市、区两级“1+N+X”低空飞行服务站管理体系，并建设以北斗应用为核心的低空经济基础设施和数字底座。
《安徽省加快培育发展低空经济实施方案（2024—2027年）》	安徽省发展和改革委员会等	2024年	构建“双核联动、多点支撑”发展格局，支持合肥、芜湖建设低空经济核心城市，其中芜湖市获批成为全国首批低空经济发展试验区之一，聚焦关键系统和零部件的技术攻关。
《关于加快推动低空经济高	江苏省人民政府	2024年	提出建设低空智联信息网，有序推进构建低空空域数字孪

政策名称	发布单位	发布时间	简要描述
质量发展的实施意见》			生系统,逐步形成全省低空数字底座。
《青岛市促进低空经济高质量发展实施方案》	青岛市人民政府	2024年	布局三大功能区,打造海洋特色低空示范场景,并依托5G-A商业化部署,建设低空通信感知网。
《长春市推动低空经济高质量发展行动计划(2024-2026年)》	长春市人民政府	2024年	构建“一核心、三基地”产业格局,打造国内首个低空行业大模型**“紫东长空”**,赋能“空天地一体化”监测与管理。
《海南省低空经济发展三年行动计划(2024-2026年)》	海南省发展和改革委员会等	2024年	规划超300条低空航线,利用岛屿优势拓展跨海运输和海洋管理场景,深化空域管理改革。

注：按照发布时间顺序排列

### 2.1.3 产业需求驱动

产业需求的升级是低空智联发展的根本动力,主要体现在从“单点作业”向“系统协同”的转变:

- (1) **低空智联与空域安全、管控加速融合:**新一轮低空空域管理改革强调“空地一体化、数据-规则协同”,其核心诉求是在确保安全的前提下,最大限度释放空域资源。这使得“数字底座”成为兼顾“放权”与“安全”的新一代关键基础设施。这要求管理手段从过去

依赖人工审批和静态划设，转变为依赖数字底座和物联网平台，实现空域动态授权、航路灵活组合、轨迹实时监管，在此基础上，各地加速落地专用的管控平台或一体化服管平台，实现“监管-运营-服务”的全流程闭环。

(2) 从“单机作业”到“集群运营”：无论是物流配送还是城市巡检，规模化应用必然要求多架飞行器、多个运营主体在同一空域内协同作业。这催生了对自动化调度、智能冲突解脱、多任务并发管理平台的刚性需求，推动物联网平台从简单的“监视器”向高效的“调度中枢”演进。

(3) 从“信息孤岛”到“数据融合”：低空飞行涉及气象、通信、地理、交通等多维度数据。单一数据源无法支撑安全高效的运行。产业界迫切需要一个能够融合“空天地”多源数据、挖掘数据价值的平台，以支持更精准的航线规划、风险预警和商业决策。

## 2.2 技术演进

低空智联的技术演进脉络，是从“连接”走向“认知”，最终实现“自主智能”。通过不断提升系统的“智能密度”，逐步将人从复杂的管控中解放出来，最终为大规模、商业化的低空经济应用扫清技术障碍。当前，低空智联技术正处于从中期向远期跨越的关键过渡阶段，初步构建起低空活动的“基本框架”，但智能协同与全域贯通能力有限；中期通过实景三维落地、多机协同算法应用，实现了场景级数字孪生与初步智能调度，让低空运行从“单点控制”迈向“局部协同”。

表 3 低空智联技术演进路径

类别	近期：网联化基础期	中期：协同化融合期	远期：自主化智能期
感知	单点感知：以地面雷达、ADS-B为主，覆盖关键区域，监视合作目标。	多源融合感知：5G-A通感一体、视觉、声学等传感器组网，形成对合作与非合作目标的广域、连续覆盖。	通感算一体：感知、通信、计算在边缘和终端深度融合，实现环境自适应感知与实时决策。
通信	点对点通信：以4G或专用链路为主，保障基本遥测遥控。	网络化通信：5G-A提供低空连续覆盖，支持高清视频等宽带业务；卫星互联网作为补充。	空天地一体化网络：6G、卫星互联网无缝融合，提供全域、高可靠、低时延的确定性网络服务。
平台	监视平台：以数据显示和告警为主，人工干预决策。	数字孪生平台：构建城市级三维实景模型，支持飞行仿真、风险预演和辅助决策。	智能决策平台：AI大模型驱动，实现空域自主调度、航线动态寻优、应急预案自动生成。
应用	辅助作业：无人机作为工具，由人远程控制执行单一任务。	自动化运营：基于固定航线和预设规则，实现无人机“一键起飞、自动返航”的自动化作业。	自主协同：无人机集群具备群体智能，能够自主协同完成复杂任务，并与城市其他系统智能联动。

### 3、低空智联技术体系与关键技术

#### 3.1 技术架构体系

低空智联的技术架构体系是一个由“**一张网**、**一张图**、**一平台**、**一朵云**”构成的“四位一体”有机整体，共同筑造了低空经济安全、高效运行的数字底座。该架构遵循从物理感知到数据建模，再到智能决策和应用赋能的逻辑层次。底层的“**一张网**”作为泛在融合的感知网络，通过5G-A、卫星通信和边缘计算等技术，构成了系统的“神经网络”和“末梢神经”，负责实时、可靠地连接与感知低空中的一切要素。

在此基础上，“**一张图**”构建了高精度、动态更新的时空数字孪生地图，它是整个系统的“数字沙盘”，不仅描绘了物理世界的静态三维样貌，更实时融入了气象、飞行器轨迹等动态信息，为所有低空活动提供了统一的时空基准和环境背景。上层的“**一平台**”作为智能协同的飞行服务管理中枢，是系统的“智慧大脑”，利用AI决策引擎对“**一张图**”中的数据进行分析，实现空域的精细化管理、飞行活动的智能调度和潜在风险的自主预警。最终，所有数据汇聚于“**一朵云**”，形成低空经济的数据资产中心和价值挖掘引擎，通过大数据分析 & 模型训练，不仅持续优化平台自身的算法能力，以标准化的服务接口，将“网、图、平台”的核心能力开放赋能上层各类行业应用创新，从而构筑一个开放、协同、不断进化的低空经济生态。

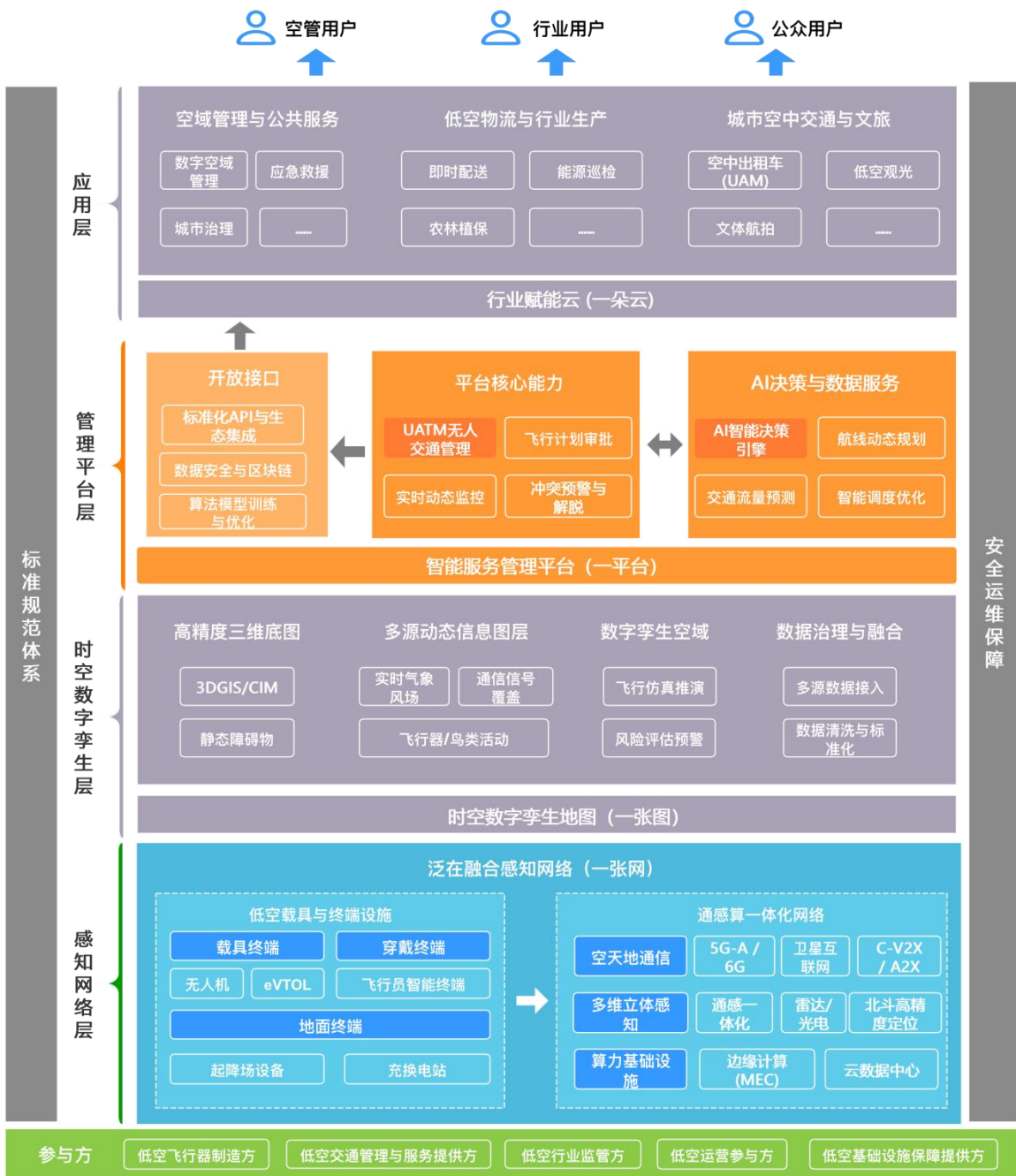


图3 低空智能技术架构体系

### 3.2 技术成熟度曲线

低空智联技术落地受制于空管规则、适航认证、安全标准的配合，因此即便技术成熟，法规不到位也无法进入商用阶段。产业热点集中在“连接+感知+管理融合”方向，AI驱动的空域管理、5G-A通感一体化、城市级空域数字孪生等技术，体现出低空智联的核心价值在于实时可视化+智能调度。各阶段技术之间存在明显的协同演进关系。

短期内，基于北斗和5G的低空精细化管理平台，可能成为行业的“数字底座”；中长期，5G-A通感一体化与多频段融合网络可以推动“感知即服务”商业模式落地，AI空域管理与区块链资源交易有望重构空域调度规则，但需结合法规创新。

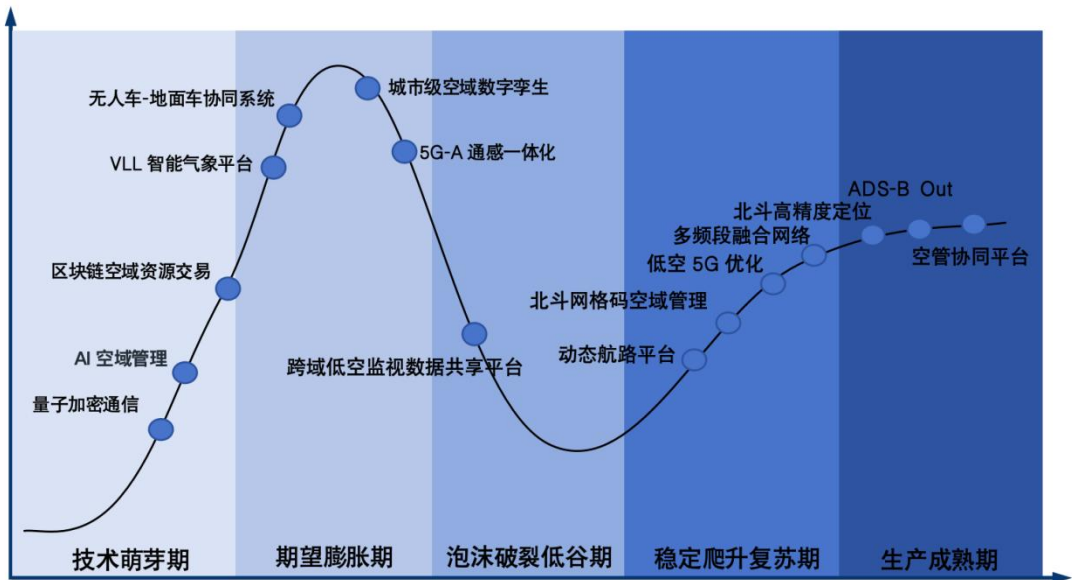


图 4 低空智联技术成熟度曲线

### 3.3 关键技术

#### 3.3.1 “一张网”：泛在融合的通感算网络

这是低空智能连接的物理与信息基础，核心是构建一个星地融合、通感算一体化的立体网络。通过整合地面蜂窝网络（如5G-A）与天基卫星通信网络，确保在城市、偏远地区乃至海洋上空的无缝连接，为低空飞行器提供“看得见、联得上、导得精”的全域服务。

### **代表技术一：星地融合的通感一体化地空立体网络**

该网络架构旨在构建一张无缝覆盖的立体通信与感知网络，其地面部分以5G-A技术为核心，天空部分则由低轨卫星互联网作为关键补充。

在地面，5G-A技术是实现城市等核心区域高密度、高精度智联的关键。针对传统移动网络对高空信号覆盖存在空洞的痛点，5G-Advanced（5G-A）技术内生支持“通感一体化”。通过增加面向天空覆盖的天线和运用波束赋形技术，构建了地空一体的立体网络，在300米高度网络覆盖率可达95%以上。其核心优势在于，基站不仅能提供高速通信，还能利用通信信号实现类似雷达的探测功能，能探测和跟踪百米外的无人机等“黑飞”目标，感知精度达到亚米级，为构建低成本、广覆盖的低空感知网络提供了可能。

在低空飞行监管领域，已在多个场景中成功应用该技术。例如，在福建，5G-A通感一体技术已先后运用于厦门马拉松赛、海峡两岸焰火晚会等大型活动的现场保障，监测定位“黑飞”数量10余架次。在安徽，以5G-A通感一体网络为基础，结合中移凌云平台和5G网联无人机机载智能终端哈勃一号，构建了全空间无人体系云、网、端的解决方案，实现低空飞行的“可视、可管、可控”。在天空，卫星互联网则作为关键补充，弥补了地面5G-A网络在偏远山区、海洋

等区域的覆盖盲区，确保低空飞行器在任何环境下都能保持稳定连接，是实现全域、全天候可靠智联的根本保障。

### **代表技术二：“北斗+5G-A”融合创新低空监管技术**

该技术通过构建跨行业、跨领域的北斗地基增强基准站网，并与5G-A的通感一体化能力深度融合，为低空飞行器提供广域、连续、高精度的导航与监视服务。

#### **技术优势：**

实现广域连续覆盖的高精度导航，需建设跨行业跨领域的北斗地基增强基准站网。并推动各领域的站点共享应用，提升时空服务能力。同时，需结合5G/5G-A（通感一体）、卫星互联网、ADS-B、雷达等技术，构建空天地一体化通信导航监视网络，确保低空通信的连续性和稳定性。

“北斗+5G-A”形成的地基增强修正信号，利用5G相控阵天线可形成至少3000米以下低空的广域覆盖，与北斗系统的天基高精度PPP互补融合确保通航客货机ADS-B系统的安全性、可用性。

通过5G-A通信基站加装北斗终端、温度、湿度及防雷防电涌等气象感知设备，利用北斗地基增强网能精确遥感高空大气水汽含量和雷电位置等功能，可全天候、全天时提供定时、定点、定量的精准降雨、降雪及雪深探测预报与雷电预报预警，实现飞机、航路与区域环境气象的协同感控。（该技术代表机构：武汉大学）

### **3.3.2 “一张图”：高精动态的时空数字地图**

这是低空飞行的“导航图”和“规则图”，是融合了时间维度的四维动态地图，为所有低空活动提供了统一的时空基准和环境背景。

### **代表技术一：基于北斗地基增强的厘米级定位服务**

这是构建高精度“一张图”的基石。该技术依托国家北斗地基增强系统，通过遍布全球的数千座GNSS增强站，为低空飞行器提供厘米级定位、毫米级感知、纳秒级授时的时空智能服务。这种精度使得构建高精度的电子围栏、规划精准的飞行航路、避免飞行器碰撞成为可能，是保障密集城区飞行的核心安全技术。

### **技术优势：**

基于北斗统一时空基准，构建起一张分地、分时、分层可动态变化的立体柔性网格，支撑路空廊道规划，以即时轻量化数据时空网、互联网、超级计算网为核心，实现路空资源的深度融合与高效利用。厘米级的定位精度使得构建高精度的电子围栏成为可能，能有效防止无人机误入敏感区域，解决飞行器碰撞风险，有效解决低空飞行器安全管理难题。由天地协同、异构冗余的增强服务与播发系统组成的时空网，具备从地面和太空同时为空地用户提供时空智能服务，全要素赋能低空经济，助力空地的人（人员）、车（车辆）、机（飞行器）、路（航路）、云（云平台）的全方位协同，以具有完好性的时空信息，保障安全。

### **实现效果：**

在服务效率上，基于北斗高精度定位服务与3D数据地图航路设施的动态调度能力，能够避免飞行冲突，提高空域利用率。在成本上，精准的定位和导航

有助于合理安排飞行路线和作业计划，减少设备闲置和空驶里程，提高设备利用率，降低单位运输成本。在安全性上，一方面通过精准定位助力运输工具避障，保障各运输领域的运行安全；另一方面注重数据安全与可靠性，采用加密等措施保护敏感数据，确保各类业务安全开展。

### **代表技术二：多源异构信息融合与态势感知**

该技术旨在解决“信息孤岛”问题，将各类动态信息叠加到“一张图”上。以深圳“智能融合低空系统（SILAS）”为代表，通过建立统一的数据接口和处理模型，有效融合民航 ADS-B、通航位置、无人机云平台、气象雷达等多源异构信息，并将其叠加在全市统一的三维数字地图上，形成了一张全面、实时的低空飞行“态势图”。该系统可提供一站式飞行服务、智能化监控预警和辅助航线规划，是超大城市实现低空融合飞行管控的关键基础设施。深圳市级监管平台可全量接入三家运营商通感数据，在智能融合低空系统（SILAS）展现无人机经纬度、高度、距离、速度、方向等飞行状态感知信息。

2024年11月下旬，深圳市域智能融合低空系统（SILAS）1.0 版本发布，其也被称为深圳城市“低空大脑”。现已全面接入深圳全市域时空信息平台（CIM），能够快速、无缝地接入城市核心数据，实时获取涵盖建筑物模型、市政设施、行政区划等城市信息，并支持低空飞行活动的精细化管理。

### **代表技术三：北斗网格码与空域网格化管理**

该技术旨在解决低空空域数据多源异构、标准不一、计算效率低下的核心挑战。其核心思想是采用统一的时空网格编码（如北斗网格码或遵循OGC DGGs国际标准的离散格网系统），将物理空域剖分成可唯一标识、可计算、多尺度

的三维网格单元，从而构建一个高性能、可计算的数字化空域底座。技术优势与实现：

**高性能网格化构建：**依托高性能并行计算框架，该技术能够将地形、建筑白模、倾斜摄影、激光点云等多源异构的低空底板数据，在小时级内高效构建成千平方公里级别的米级分辨率统一网格，形成“底板网格一张图”。

**大规模动态数据承载：**基于优化的时空数据模型，该技术支撑的数字孪生系统可平稳接入百万级的飞行器动态数据，并实现千平方公里级低空底板数据的高逼真度、流畅可视化，为构建高逼真度的空域数字孪生提供基础。

**高并发空域安全计算：**通过将所有空域要素和飞行器位置映射到统一的网格体系中，极大提升了安全计算的效率。可实现对十万级飞行器的实时动态计算，包括飞行器间的冲突探测、禁飞区侵入预警、障碍物碰撞探测等，并支持对万级飞行器的动态路径规划。

**丰富的空域计算能力：**为上层应用提供完善的空域计算工具，包括静态航迹规划、空域资源占用查询、指定高度层的障碍物查询、航迹冲突计算等核心分析功能，作为一个强大的二次开发底座，赋能各类低空行业应用。

#### **代表技术四：空域数字孪生平台与实时仿真**

该技术通过三维建模引擎与实时数据的双向驱动，构建一个与物理低空环境精准映射、同步演化的数字孪生体，是实现低空“可视化管控”与“智能化决策”的核心载体。

#### **技术实现：**

**“点云+白膜”混合建模：**依托无人机搭载的激光雷达和高清相机，高频次扫描城市空间，获取建筑物、高压线、植被等要素的厘米级点云数据，实现关键障碍物的精准建模。同时，采用白膜技术快速生成城市基础轮廓，兼顾了模型的精度与轻量化运行效率。

**“时空对比”动态更新：**平台支持按需设定更新周期（如周、月），通过“时空对比算法”自动识别新旧两期三维模型的差异，精准标记出新增违建、变化的农田边界、受损的基础设施等，实现对城市空间的动态监测与治理。

**实时仿真与推演：**在数字孪生环境中，可导入飞行计划、气象数据、通信信号覆盖等多维信息，进行航路冲突仿真、应急预案推演、新航线可行性评估等，为管理决策提供科学依据。

**智能决策与协同控制：**应用AI大模型+领域小模型的混合智能，实现航线自主规划、飞行冲突智能解脱、多机自主协同等高级功能。

**空域网络与安全保障：**利用5G-A的通感一体、高可靠、低时延特性构建核心通信网络，并结合区块链技术，构建可信数据共享与追溯体系，保障飞行数据与指令安全。

### 3.3.3 “一平台”：智能协同的飞行服务管理平台

这是低空经济的“智慧大脑”和“空中交管局”，负责空域的精细化管理、飞行活动的智能调度和潜在风险的自主预警。

#### 代表技术一：数字化空管与智能调度系统

该技术是“一平台”在实际运行中的具体体现，是一个聚焦空管运行业务和安全保障能力提升的综合性解决方案。其核心功能包括：

**全要素三维态势感知：**在统一的三维可视化场景中，融合展示地理信息、城市CIM数据、空域航路、飞行计划、实时飞行活动、安全告警等低空全要素，为指挥人员提供即时全面的信息。

**全流程飞行计划管理：**支持多种飞行模式的在线申请，并基于空域网格引擎进行自动化的冲突评估（含障碍物和计划间冲突），结合SORA（安全风险评估）模型辅助审批决策。

**多源融合监视与智能预警：**集成多个数据源的实时轨迹，确保全面、准确地掌握空域动态。系统能够对偏航、飞行冲突、禁区侵入、危险天气等安全隐患进行自动识别、预测和告警。

**智能化辅助决策：**依托空域智能计算能力，提供航路风险评估、适飞航路自动规划等功能，提升空域精细化分配与动态管理能力，支撑大规模、高密度、高复杂度的低空运行。

## **代表技术二：高可靠自主飞行与智能控制**

这是平台管理与调度的核心执行技术。以亿航智能EH216-S为代表，其全自主的智能决策与控制系统，通过多重冗余的飞控、传感器和动力系统，以及精准的四维航路点跟踪算法，实现了无需飞行员干预的全自主高安全运行。这种高度自主化的飞行能力是未来高密度UATM（无人驾驶航空器交通管理）能够实现的基础。

## **技术方案：**

**多冗余与容错设计：**系统采用了三重冗余的飞控系统、传感器和动力系统。控制算法能够实时比对各系统数据，一旦发生单点故障，能够在毫秒级内自动隔离故障单元并进行重构，确保飞行姿态不受影响。

**四维航路点精准飞行：**飞行前，技术人员通过地面指挥调度系统，为飞行器预设一条包含经度、纬度、高度和时间的四维飞行航线。飞行过程中，智能控制算法会像“轨道列车”一样，精确地跟踪这条预设航线，全程无需人工干预。

**实践验证：**EH216-S已在全球完成数万架次的安全飞行，并于2023年12月在广州、合肥完成了获得全球首张标准适航证后的商业首飞演示，充分验证了其智能决策与控制算法在真实城市场景下的成熟度与可靠性。

### **代表技术三：基于数字孪生的AI算法仿真与验证**

这是平台“智慧大脑”得以训练和优化的关键手段。峰飞航空科技等企业在物理样机制造前，在高精度的数字孪生环境中，对飞行器的气动布局、飞控算法、动力系统等进行数百万小时的仿真测试。这种“数字孪生先行，AI算法驱动”的模式，能够模拟真实世界的复杂环境，包括全球不同地域的真实气象数据、城市电磁环境，提前发现并解决潜在的设计缺陷，极大地缩短了研发周期，并提升了AI决策算法的安全性与可靠性。

### **3.3.4 “一朵云”：聚合海量数据的行业赋能云**

这是低空经济的数据资产中心和价值挖掘引擎，通过对海量数据的汇聚、治理和分析，持续优化系统能力，并催生新的数据服务模式。

### **代表技术一：低空数据云与高性能计算引擎**

该技术是低空数字底座的PaaS层（平台即服务），为开发者和监管者提供一站式的数据与算力支撑。其核心优势在于：

**全要素、“鲜活”的数据供给：**整合空天信息等多圈层数据，提供覆盖宏观、中观到微观场景的全要素时空数据（含地理底板、气象、电磁环境等），并具备高频更新能力（如卫星影像天级、气象分钟/小时级、城市三维模型天级更新），确保数据底座的“鲜活性”。

**高性能空域计算能力：**基于先进的空域网格剖分引擎，打造“空域计算器”，提供大规模并行计算能力，可支持百万级飞行器数据接入、十万级飞行安全实时预警、万级安全航迹的动态规划。

**开放的算力与数据底座：**为生态合作伙伴提供标准化的数据与算力服务，降低行业应用开发门槛，为政府监管、企业服务提供全方位解决方案。

### **代表技术二：基于时空AI的数据挖掘与智能分析**

该技术旨在解决低空领域“数据来源多、标准不一、价值挖掘难”的核心痛点，通过构建统一的数据中台和时空AI模型，实现“空天地”多源数据的高效整合、清洗、关联与分析。

#### **技术方案：**

**构建统一时空基准：**以北斗网格码为空间索引，为每一立方米空域赋予唯一的时空ID。同时，建立统一地名地址数据库，将无人机影像、飞行轨迹、政务台账（如违建点、保护区）等不同坐标系、不同语义的数据，通过地理实体进行关联，自动完成空间对齐，打破“数据孤岛”。

**时空AI清洗与分析：**利用自研的时空AI模型，自动识别和修正因信号干扰、传感器漂移等产生的异常数据。同时，构建面向低空经济的分析模型，如空域使用热力分析、飞行冲突风险预测、城市部件变化检测等，将原始数据转化为有价值的决策信息，赋能上层应用。

## 4. 低空智联典型应用场景

### 4.1 应用场景概览

低空智联的应用得益于我国完备的产业体系、领先的新技术应用（如通感一体化、北斗+5G）以及产业转型和消费升级带来的巨大市场需求。从发展路径来看，应用场景呈现出“**无人机存量市场全面深化，eVTOL增量市场‘先货后人’**”的演进格局。

首先，以无人机为载体的应用已全面成熟，构成了低空经济的坚实基本盘。在农业植保、电力巡检、地理测绘、应急救援等领域，无人机凭借其其对传统劳动力的有效替代和生产效率的大幅提升，已进入规模化、常态化应用阶段。这一存量市场未来的发展趋势将是应用的进一步深化，即从“能用”向“好用”演进，通过更智能的算法、更高效的数据处理，提升作业的精细化与智能化水平。

其次，以eVTOL为代表的新型航空器，其应用将遵循“先货后人”的渐进式发展路径，引爆增量市场。载人客运（UAM）虽是eVTOL发展的最终核心场景，但受技术成熟度、成本、安全及城市复杂环境等因素影响，其大规模商业化尚需时日。因此，在发展初期，eVTOL的应用将首先在货运物流、城市服务、应急救援等场景发力，部分替代传统直升机。随着技术迭代、政策完善和市场接受度的逐步提高，再大规模进入载人客运这一更具颠覆潜力的领域。国家四部委联合印发的《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》也明确了这一路径，提出到2027年，城市空运、物流配送等实现商业应用；到2030年，形成

高效运行的客运、无人机配送和低空生产作业网络。

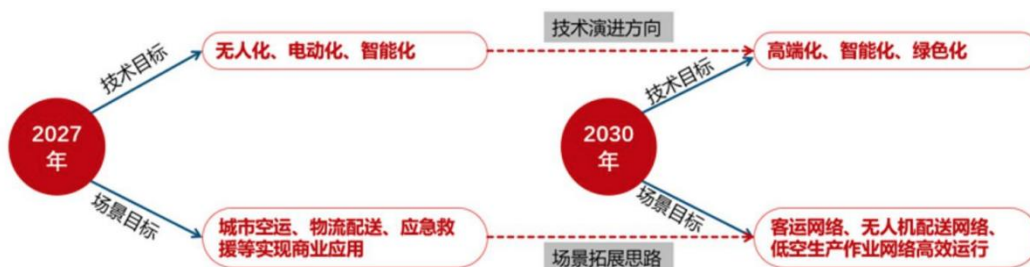


图 5 《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》重点任务

为更清晰地评估各核心场景的发展阶段与前景，我们提出以下成熟度与潜力评估模型：

表 5 低空智联核心应用场景发展阶段与价值评估

应用场景	应用成熟度	需求迫切度	经济效益程度	未来发展潜力（至2030年）	核心驱动因素
能源巡检与基础设施监测	★★★★ ★★	★★★★ ★★	★★★★ ★★	★★★★☆ ☆	降本增效、替代高危作业需求明确
农林植保	★★★★ ★☆	★★★★ ★☆	★★★★ ★☆	★★★★☆ ☆	规模化、精准化作业需求
公共服务与城市治理	★★★★ ★☆	★★★★ ★☆	★★★★ ☆☆	★★★★★ ☆	政府数字化转型、应急能力提升
低空物流	★★★★ ☆☆	★★★★ ☆☆	★★★★ ★★	★★★★★ ★	即时配送需求、人力成本上升
低空旅游与娱乐	★★★☆☆ ☆☆	★★★☆☆ ☆☆	★★★★ ★☆☆	★★★★★ ☆	体验经济、文旅创新需求

城市空中交通(UAM)	★☆☆ ☆☆	★★★★ ☆☆	★★★★ ★★	★★★★★ ★	政策突破、技术成熟、社会接受度
-------------	-----------	------------	------------	------------	-----------------

注：各维度评级为★至★★★★★★，星级越高代表程度越高。

## 4.2 空域管理

### 4.2.1 需求背景

随着低空飞行器数量与种类的激增，低空空域正从过去少量、隔离的通航作业，转向大规模、高密度的融合运行。这一转变带来了严峻的挑战：安全风险上，多类型、不同性能的航空器混合飞行，极易产生时空资源冲突；运行效率上，传统的人工申报与空域管制方式难以应对海量、动态的飞行需求；监管能力上，缺乏对“黑飞”、“乱飞”等违规行为的有效监测与处置手段。因此，构建数字化、智能化的新型低空空域管理体系，实现空域资源的精细化规划、动态化管理与协同化运行，已成为低空经济健康发展的基础前提。

### 4.2.2 应用场景

**数字化空域规划与飞行计划审批：**构建统一的数字空域图，整合静态（禁飞区、障碍物）与动态（气象、其他飞行器）信息，为用户提供可视化的空域查询与航线规划服务。并建立“一站式”线上飞行计划申报与审批平台，简化流程，提升效率。

**实时飞行监控与态势感知：**融合多源监视数据（ADS-B、5G-A通感、雷达等），形成统一的低空飞行态势图，实现对空域内所有飞行器的实时位置跟踪、轨迹监控与异常行为（偏航、超高）告警。

**电子围栏与反无人机（Counter-UAS）：**针对机场、核电站等关键区域，划设高精度的三维电子围栏，对非法侵入的飞行器进行实时告警。并联动反制设备，实现对违规飞行器的有效管控。

**低空信息服务：**面向低空飞行用户，提供精准的气象信息、空域情报通告、航行告警等服务，保障飞行安全。

### 4.2.3 典型案例

#### 典型案例一：湖北省低空飞行服务平台

（案例提供：武汉大学）

#### 案例概述：

6月30日，正式运行的湖北省低空飞行服务平台，以“低空一张网”贯通全省及市州空域管理、审批流程、飞行服务与安全保障全链条，成为中部地区首个省级低空飞行服务平台，把湖北低空资源装进“一张网”，实现全省低空空域资源统一配置，飞行管理和服务保障统一规范。

#### 案例内容：

湖北省低空飞行服务平台由湖北省低空综合服务有限责任公司建设，集成低空空域管理、飞行服务与数据处理三大功能，实现全省低空资源“省级协同、市州使用”，飞行计划“一窗受理、一网通办”，确保低空飞行“看得见、叫得着、能监管、能应急”。

该平台与民航湖北空管分局联合共建共营，空管分局提供业务支持，既为全省提供专业的飞行服务，又压缩了低空业务协调层级，提高了协同运行效率。此外。平台向上对接国家UOM系统，向下整合地市飞行服务站的数据资源，横向

与军民航管制部门以及公安、应急等相关地方部门互通，全面采集低空通信、导航、监视、气象及地理环境等多方面的信息，打造省级低空数据与业务交互枢纽。

### **案例成效：**

围绕“让天空更透明、审批更便捷、飞行更安全”三大目标，湖北省低空飞行服务平台构建全链条低空飞行服务体系。在空域管理上，平台整合军民航空域、飞行及气象等数据，搭建三维可视化系统，动态生成空域可用状态，用户通过PC端、移动端即可实时掌握空域态势，显著提升飞行活动规划效率；在飞行审批上，优化审批流程，实现常规空域飞行“备案即飞”，临时空域申请时间大幅缩短，支持“一次提交、多方协同”，借助智能预审功能自动核验飞行计划合规性，极大提升审批效率；在运行安全保障方面，部署的低空空域态势监视与告警系统，对飞行器异常行为快速预警，缩短响应时间，降低飞行安全事故率，筑牢低空飞行安全防线。

### **典型案例二：深圳市低空空域协同运行管理系统**

（案例提供：中科星图低空云科技有限公司）

#### **案例概述：**

该系统是为解决超大城市低空运行中军、地、民三方协同管理难题而打造的标杆项目。其核心在于构建了一个覆盖从空域规划到飞行结束的全流程闭环管理链条，旨在打破“各自为政”的旧格局，探索出一条“统筹规划、动态管理、安全高效”的新路径。

### **案例内容：**

该系统的技术底座是全息空域网格引擎。通过空域网格的标准化单元划分及转换技术，实现了不同管理部门网格编码体系的全面兼容适配，构建起全息、动态、统一、可计算的协同运行管理底层架构。在业务层面，系统深度融合了军民航主管部门的业务体系与作业流程，精准设计了信息交换方案与数据接口，确保了系统上线后的高效稳定运行。其功能覆盖空域辅助规划、临时空域审批、动态管理、飞行计划报批、空情监视告警、应急处置、效能评估等九大模块，确保低空运行“看得见、管得好、控得住”。

### **案例成效：**

这一模式打破了军地民三方“各自为政”的旧格局，探索出一条“统筹规划、动态管理、安全高效”的新路径。

## **4.3 公共服务与城市治理**

### **4.3.1 需求背景**

现代城市治理面临日益增长的复杂性，传统依赖人力巡查和固定摄像头的管理模式，存在覆盖范围有限、响应速度慢、信息获取维度单一、人力成本高等局限。尤其在应急救援、违建监察、交通疏导等动态性强的场景中，传统手段难以快速、全面地掌握现场态势。低空智能飞行器作为“空中之眼”，能够提供一种高机动性、广视角、三维化的数据采集与感知能力，赋能城市治理向精细化、主动化、智能化转型。

### **4.3.2 应用场景**

**应急响应与公共安全：**在火灾、洪水、地震等灾害现场，无人机可第一时间抵达，进行空中侦察、评估灾情、定位被困人员、投送应急物资，并进行通信中继，为指挥决策提供关键信息。在大型活动安保、突发事件处置中，进行空中巡逻与喊话，提升立体防控能力。

**城市规划与资产管理：**利用无人机进行高精度三维建模，生成城市数字孪生底座。在此基础上，对违章建筑、土地利用变化、基础设施状况进行常态化巡检与动态监测，实现城市部件的数字化管理。

**交通管理：**对城市主干道、高速公路进行常态化空中巡查，快速发现交通事故、道路拥堵，并进行现场喊话疏导。通过采集实时车流数据，为交通信号优化提供决策支持。

**环境保护：**对河道、湖泊、海岸线进行巡检，监测水体污染、非法排污、垃圾倾倒等行为。对工业园区进行大气采样，监测空气质量。

### 4.3.3 典型案例

#### **典型案例：某管理单位低空数字基座建设项目**

（案例提供：上海维智卓新信息科技有限公司）

#### **案例概述：**

该项目是维智科技与该管理单位联合打造的“空天地一体”城市治理项目。项目核心依托“统一地名地址数据库+空域数字孪生平台”，部署固定式无人机库、移动机巢，实现无人机集群调度、多源空间数据融合及违建排查、农田监管等场景。

#### **案例内容：**

项目围绕“基础设施-数据治理-场景赋能”三大模块展开，深度融合维智核心技术：

- (1) 智能化基础设施部署：联合该管理单位完成固定式无人机库与移动机巢的空间关联，基于统一地名地址数据库标注机库位置，实现设备状态实时监控（电量、故障预警）与任务调度。
- (2) 体系化数据治理：依托数据中枢，整合无人机正射影像、倾斜摄影模型、激光点云等8类空间数据，通过维智统一地名地址数据库实现数据关联。将数据库中的农田保护红线、拆违监管区域等业务图层叠加，通过地名地址匹配确保“影像中的某地块”与“政务台账中的某农田”精准对应。
- (3) 精准化场景赋能：在重点区域开展深度应用，通过无人机倾斜摄影完成三维建模、高压电塔激光点云扫描，实现设施毫米级数字化存档；在街镇治理中，通过多期影像比对工具（基于统一地名地址定位），识别农田非法扩展、拆后复建等问题。

#### **案例成效：**

项目落地后，该管理单位的空间数据更新周期得到了极大的提升；同时上下打通，实现了用户按照管辖范围订阅无人机巡查数据，构建纵横联动的治理生态。

## **4.4 低空物流**

### **4.4.1 需求背景**

在日益增长的物流时效性需求与地面交通拥堵的矛盾下，传统配送模式面临瓶颈。一是末端配送效率低，在写字楼、大型社区等场景，因门禁、电梯等待等因素耗时严重；二是高时效性需求难以满足，生鲜、外卖、医疗急救用品等对配送时间要求极为苛刻；三是特殊场景运输受限，山区、海岛等偏远地区，地面交通不便导致物流成本高、周期长。低空物流利用空中直达优势，可有效规避地面限制，成为解决上述痛点的关键路径。

#### 4.4.2 应用场景

**城市即时配送：**在外卖、同城快递等场景，无人机负责楼宇之间、商圈到社区的“空中干线”运输，形成“地面骑手+空中无人机”的人机协同模式，大幅提升配送效率。

**跨区域及特殊场景运输：**为山区、海岛的居民提供日常消费品、药品的定期配送服务，并将当地的农产品运出，打通城乡双向物流通道。

**应急医疗物资供应链：**在医院之间、血站与医院之间构建快速空中通道，转运血液、检验样本、急救药品等，为生命救援争取时间。

#### 4.4.3 典型案例

**典型案例：无人机在深圳核心商圈的常态化运营**

**项目背景：**

为突破即时配送“最后一公里”瓶颈，美团自2017年起探索无人机配送。

**“场内+场外”接力模式：**在核心商圈建立覆盖“3公里、15分钟”的低空物流网络。用户下单后，骑手从商家取餐送至社区附近的起飞点（空投柜/社区配送

站），无人机再将外卖精准空投至社区内的降落点，最后由社区内的骑手或用户自取。

#### **技术方案：**

- (1) **自研无人机与自动化机场：**自主研发适用于城市复杂环境的六旋翼无人机和自动化机场（自动调度、换电、起降）。
- (2) **智能调度系统：**后台“超脑”调度系统，根据实时订单量、天气、航线拥堵等数百个变量，进行毫秒级智能计算，为每个订单匹配最优运力（无人机或骑手）和路径。
- (3) **高精度导航与感知避障：**采用RTK+视觉融合导航方案，确保厘米级降落精度。机身配备多个视觉和毫米波雷达传感器，保障全向感知与动态避障。

#### **社会与经济效益：**

- (1) **效率与体验提升：**将平均配送时长缩短至12分钟左右，高峰期可为用户平均节省近20分钟等待时间。截至2024年底，已在深圳等城市10余个商圈开通超20条航线，累计完成订单量超25万单。
- (2) **成本优化：**在订单密度较高的区域，无人机配送的单均成本已展现出低于传统人力配送的潜力。
- (3) **缓解交通压力：**部分替代地面运力，有助于缓解商圈周边的交通拥堵。

### **4.5 能源巡检与基础设施监测**

#### **4.5.1 需求背景**

电力线路、油气管道、桥梁大坝等关键基础设施，具有分布范围广、线路长、多部署于复杂地理环境的特点。其安全稳定运行至关重要，必须进行定期精细化巡检。传统人工巡检模式面临效率低下、成本高昂、作业人员安全风险高（如高空作业、野外环境）等突出问题，且数据采集质量易受主观因素影响，难以标准化。因此，利用无人机进行自动化、智能化的巡检，是保障关键基础设施安全、实现运维降本增效的必然选择。

#### 4.5.2 应用场景

**电力线路巡检：**无人机搭载可见光、红外、紫外、激光雷达等传感器，对输电杆塔、导线、绝缘子等进行多维度检测，实现精细化建模与故障隐患（如发热、放电）的精准识别。

**油气管道巡检：**无人机沿管线自主飞行，监测管道沿线的第三方违规施工、地质灾害隐患，并通过激光甲烷遥测仪发现管道的微小泄漏。

**桥梁与大型建筑监测：**通过无人机倾斜摄影生成高精度三维模型，用于检测桥体、大坝等结构的表面裂缝、混凝土剥落等病害，并可搭载传感器监测其振动与形变，进行结构健康评估。

#### 4.5.3 典型案例

##### 典型案例：无人机自主巡检体系

##### 项目背景：

南方电网输电线路大量位于山区、森林等复杂地形，传统人工巡检面临“看不全、查不清、到不了”的困境。

##### 运营模式：

- (1) “机巡为主，人巡为辅”：将无人机巡检作为主力的线路运维模式，建立“总部统筹-省地协同-一线执行”的三级运管体系。
- (2) 全流程数字化管理：巡检任务制定、航线规划、数据采集、缺陷分析、工单派发均在线上数字化平台完成。

### **技术方案：**

- (1) 机型多样化与精细化巡检：根据不同场景，使用搭载可见光、红外热成像、激光雷达等不同载荷的无人机。
  - (2) “天巡”自主飞行系统：自主研发的无人机自主巡检系统。巡检人员只需规划任务，无人机即可一键起飞，基于北斗高精度定位，沿电力线进行自主飞行和数据采集，并能围绕杆塔进行360度环绕精细化拍摄。
3. AI智能缺陷识别平台：无人机采集回的海量高清照片，通过后台AI平台进行智能分析。平台基于数千万张历史缺陷样本的深度学习，能够自动识别如螺栓松动、鸟巢、绝缘子破损等数十种典型缺陷，识别准确率超过95%。

### **社会与经济效益：**

- (1) 效率指数级提升：相比人工巡检，无人机自主巡检的效率提升了6到10倍。
- (2) 安全风险大幅降低：替代了大量的人工登塔、走线等高风险作业。
- (3) 供电可靠性增强：更早、更准地发现线路缺陷和隐患，进行预防性维护，有效降低了因线路故障导致的停电事件。

## 5. 发展挑战与对策建议

### 5.1 技术挑战

#### 5.1.1 数据获取与数据安全的挑战

低空飞行器作为“高机动性的空中数据采集器”，在执行任务时会采集大量包含地理信息、环境影像乃至个人行为的高清数据。如何确保这些数据的安全，防止滥用和泄露，成为公众最为关切的问题之一。

**数据泄露风险：**飞行器与地面站、云平台之间的无线通信链路是潜在的攻击目标，可能导致飞行控制指令被篡改或回传的敏感地理、影像数据被窃取。

**隐私侵犯担忧：**搭载高清传感器的飞行器在城市等人口密集区作业时，可能采集到包含个人行为、住宅内部等隐私信息，引发公众对隐私权的普遍关切。

#### 5.1.2 核心算法与模型的挑战

**复杂环境下的感知与避障：**城市低空环境动态、复杂，充斥着高楼、电线、鸟类以及其他飞行器。这对感知算法在多目标识别、意图预测以及复杂场景下的自主避障决策能力方面提出了极高要求。

**极端条件下的自主导航：**在暴雨、大风等恶劣天气，或在城市峡谷、隧道等卫星导航信号受遮挡或干扰的“GPS拒止”环境下，如何确保飞行器依赖多传感器融合实现高精度、高可靠性的自主定位与稳定飞行，是算法层面的一大技术难点。

#### 5.1.3 网络通信与算力挑战

**通信的连续性与可靠性：**低空环境存在信号遮挡、多径效应和复杂的电磁干扰，传统地面移动网络难以保证对高速移动飞行器的连续、稳定、低时延覆盖，尤其是在从地面网络向空中覆盖的切换过程中，易出现通信“盲区”。

**端侧与云端算力协同：**复杂的自主飞行算法需要强大的计算能力。如何在机载算力、功耗、重量限制与算法性能需求之间取得平衡，以及如何构建高效的“云-边-端”协同计算架构，以支持大规模机群的智能调度与数据处理，是当前面临的挑战。

### 5.1.3 产业层面的挑战

**产业链协同不足与标准不统一：**低空经济涉及飞行器制造、核心零部件、飞行运营、空管服务等多个环节。目前，各环节间缺乏统一的技术标准与数据接口规范，导致产业链上下游协同效率不高，数据孤岛现象依然存在。

**地面基础设施建设滞后：**大规模商业化运营需要完善的地面基础设施网络作为支撑，包括eVTOL起降场、无人机起降柜、充电/换电设施、通信与监视网络等。当前基础设施的规划与建设尚处于起步阶段，覆盖密度和标准化程度远未满足市场需求。

## 5.2 发展对策

### 5.2.1 政策层面完善标准与治理体系

#### (1) 加快法规建设，明确“游戏规则”

**完善顶层法律框架：**在《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》的基础上，加快制定针对eVTOL适航认证、商业运营、驾驶员资质等方面的专门法规，为UAM等新兴业态的发展提供清晰、稳定的法律预期。

**推进标准体系建设：**发挥行业协会、产业联盟和龙头企业的作用，加速制定低空智联各环节的技术标准、接口标准和服务标准。例如，中国民用机场协会发布的eVTOL起降场技术规范，为基础设施的规模化建设提供了重要指引。

## (2) 创新空域管理模式

**“数字空域”精细化管理：**借鉴地面交通管理的经验，利用数字孪生等技术，将低空空域划分为不同的高度层、网格和数字化航路，实施分时、分层、分类的精细化管理，提升空域资源利用效率。

**建设“一站式”服务平台：**建立全国或区域统一的低空飞行服务平台，整合空域申请、飞行计划报备、气象信息、情报服务等功能，为用户提供便捷、高效的“一站式”服务，降低合规飞行门槛。

## (3) 借鉴“先行示范区”经验，选择精准发展路径

充分借鉴国内领先“低空经济先行示范区”的实践经验。这些地区基于自身自身产业优势、城市特点与核心诉求探索出各具特色的发展路径，选择最适合的发展模式，为其他城市提供了可操作的建设范本：

**南京“基建先行”模式：**其核心是将低空通信感知网络（“一张网”）作为城市新型基础设施来统一规划和建设。通过与头部运营商合作，大规模部署商用5G-A通感一体基站，打造公共的、低成本的“低空智联网”。这种“自下而上”的“筑巢引凤”模式，旨在通过解决最基础的“连接与感知”问题，为整个产业生态提供最优的“硬环境”。

**杭州“治理优先”模式：**其核心是通过打通政府数据壁垒，打造高效的数字治理与服务体系（“一张图”+“一平台”）。通过建设“低空交通数字孪生

平台”，将空域、气象、飞行数据与行政审批流程深度融合，实现“一网通办”。这种“自上而下”的模式，旨在通过优化营商“软环境”，解决管理复杂、审批低效的痛点，吸引和培育高价值的低空运营服务企业。

**合肥“场景融合”模式：**其核心是聚焦未来立体交通，探索“空地一体化”的创新应用场景。通过建设“全空间无人体系”，打造能够统一调度无人机和无人车的协同平台。这种“场景驱动”的模式，充分利用了本地在航空航天和新能源汽车领域的双重产业优势，通过产业交叉融合创造全新商业价值，抢占未来城市立体交通的应用制高点。

## 5.2.2 技术层面强化攻关与创新

### (1) 构筑“低空时空智能底座”，迈向预测性决策

从构建“数字底座”向更高阶的“时空智能底座”演进。这一定位强调低空经济的本质是对三维物理空间+时间的精细化管理与高效利用。“时空智能”是这一底座的核心，它要求系统不仅能实时感知“是什么、在哪里”，更能基于时空大数据分析，精准预测“何时会发生什么”。因此，技术攻关路径应聚焦于：

**发展预测性决策算法：**利用强化学习等AI技术，在数字孪生环境中进行海量仿真训练，使飞行器能够自主学习和掌握在各种复杂、动态时空场景下的预测性、前瞻性最优处置策略，实现从“被动反应”到“主动预判”的跃升。

**建立统一时空数据标准：**低空时空智能的实现，前提是数据的互联互通。建议由行业主管部门牵头，联合产业联盟与龙头企业，加快制定覆盖数据采

集、处理、融合、共享全流程的“低空时空数据标准”，解决当前的数据孤岛问题，为更高阶的智能应用奠定基础。

## **(2) 数据安全性与隐私保护技术**

**端到端数据加密：**推广应用高强度加密标准（如AES-256），对飞行器、地面控制站和云平台之间的所有数据链路进行加密，保障数据传输的安全性。

**隐私计算与“数据脱敏”：**利用AI算法对采集的影像数据进行实时“脱敏”处理——例如，自动识别并模糊化人脸、车牌等敏感信息，实现“数据可用不可见”，在满足业务需求的同时，最大限度地保护公众隐私。

**推广基于区块链的可信数据存证与共享：**针对数据泄露与篡改风险，应积极探索区块链技术的应用。通过将关键飞行数据、操作日志、权属信息等上链存证，利用其去中心化、不可篡改的特性，构建可信的数据共享与追溯体系，为数据安全、责任界定和未来的“数据资产化”交易奠定信任基础。

## **5.2.3 产业层面加强生态合作与模式创新**

### **(1) 成立产业联盟，促进协同创新**

深化“政产学研用金”一体化合作，通过设立联合实验室、共同申报国家重大科研项目、举办产业链供需对接会等形式，协同攻克关键核心技术，共建行业标准，共享市场机会。

### **(2) 构建新型基础设施，夯实发展底座**

将低空基础设施（如通信网络、导航监视设施、起降场站）纳入城市新基建范畴，进行统一规划和布局。鼓励社会资本参与建设，探索多元化的投资与运营模式。

### (3) 鼓励商业模式探索与创新

**“货运先行，客运跟进”**：在载人商业运营法规和技术成熟前，鼓励企业以风险相对较低的货运场景为突破口，进行商业模式探索和运营经验积累。

**跨界融合，价值共创**：鼓励低空经济企业与汽车、房地产、互联网、文旅、保险等行业深度融合，共同开发“低空+”新业态。例如，探索空中交通与地面交通的接驳模式，发展基于无人机遥感数据的创新保险产品等。

## 6. 未来发展趋势

### 6.1 技术融合趋势

低空智联的技术路径正由单点技术突破转向多技术深度融合，核心是从保障基础的“连接”向实现系统级的“智能”演进。

#### (1) AI与数字孪生：构建基于“时空智能”的“可计算空域”

**融合方式**：数字孪生技术负责构建与物理世界实时同步、高保真的低空数字空间，集成静态地理信息与动态飞行器、气象、通信等多源数据，形成一个可计算的“空域沙盘”。人工智能（AI）则作为“智慧大脑”，在该数字环境中进行大规模、超高速的仿真推演，以实现最优航线规划、交通流量预测、自主冲突解脱等高级功能。

未来的数字孪生空域，其核心将由“时空智能”驱动。数字孪生负责高保真地“复刻”物理世界，形成可计算的“空域沙盘”，而时空智能则作为“智慧大脑”，在该数字环境中进行大规模、超高速的仿真推演，并基于统一的时空基准，对多源、异构、动态的数据进行深度分析、预测与推理，以实现最优航线规划、交通流量预测、自主冲突解脱等高级功能。这种融合将使空域资源调度从“被动响应”转向“主动预测”，实现交通流量的最优分配和潜在风险的提前规避。

**应用体现：**以嘉兴“路空灵境”协同管理平台等为代表的應用，展示了此融合路径。这类平台利用数字孪生技术构建厘米级精度的三维城市模型，并借助北斗高精度定位服务确保“虚实同步”。后台AI算法对数字孪生空间中的路空一体交通流进行实时感知、管控与协同，为未来城市空中交通的精细化治理提供了实践范例。

## **(2) 星地融合的通感一体化网络：构建全域无缝的“神经网络”**

未来的低空智联网络将是一个星地融合的通信感知一体化网络，旨在构建一个覆盖全部疆域、无缝连接的“神经网络”。这一趋势将从根本上解决低空感知的成本与覆盖范围的矛盾。

在地面，以5G-Advanced和未来6G为代表的新一代通信技术将构成高密度、高精度的感知层。其核心是通信感知一体化技术，这意味着通信基站不仅能提供高速率、低时延的连接，还能利用通信信号实现对低空目标的探测、跟踪与成像，功能类似雷达。这将利用遍布城市的通信基础设施，

低成本地构建一张广覆盖的低空感知网络，尤其适用于城市等人口密集区域。

在天空，天基低轨卫星互联网则作为广域覆盖的“补盲”层。卫星网络将把通信与感知能力延伸至地面蜂窝网络无法覆盖的偏远山区、海洋、沙漠等区域，确保低空飞行器在任何环境下都能保持“在线”和“可视”。通过星地协同调度与数据融合，地面高精度感知网络与天空广域覆盖网络将形成一个有机整体，从而构建一张真正意义上全域无缝、低成本、高韧性的低空感知与通信网络，成为传统雷达等监视手段的革命性补充。

### **(3) “云-边-端”协同计算：构建分布式智能体系**

未来的低空智联将形成一个“云-边-端”协同的分布式智能体系。“云端”负责全局性、非实时的复杂计算与调度；“网络边缘”的计算节点负责区域性、低时延的实时计算，如区域交通协调；“飞行器端侧”的机载计算单元则处理最高实时性要求的任务，如感知避障和应急姿态控制。该算力分层布局，可兼顾全局最优与个体安全。

### **(4) 扩展现实（XR）与沉浸式交互：革新训练与运维模式**

扩展现实（XR，包括VR/AR/MR）技术将与低空智联深度融合，实现**训练、适飞与运维的沉浸式结合**。飞行员和机务人员可在高度逼真的虚拟环境中进行应急操作训练和维修演练，大幅降低成本、提升安全性。未来的适飞验证过程，也可部分在经过认证的数字孪生环境中完成。此外，AR技术将赋能远程运维，专家可通过AR眼镜实时指导一线人员进行复杂的设备检修，极大地提升保障效率。

## 6.2 产业生态演进

随着技术融合与应用拓展，低空经济正从线性的“链式”结构，向以数据为核心生产要素的、多元协同的“价值网”生态系统演进。

### (1) 商业模式创新：低空数据资产运营与服务

商业模式的核心将转向“低空数据资产”的价值实现。飞行器在任务中采集的海量、多维度时空数据，其本身就是一种可被估值、可被交易的新型核心资产。

#### 第一步：数据即服务（DaaS）

围绕数据的采集、处理、分析与应用，将催生出专业的低空数据服务商。它们将原始数据加工成标准化的“数据产品”，面向政府治理（如城市变化监测）、商业决策（如商圈人流分析）、金融保险（如灾害评估、创新保险产品）等领域提供订阅式服务。

#### 第二步：构建数据资产价值评估与流通体系

构建“低空数据资产价值评估模型”，该模型综合考量数据的时效性、精准度、覆盖范围、稀缺性以及合规性等多个维度，对不同类型的数据资产进行量化估值。在此基础上，结合区块链等可信技术，有望形成合规的数据交易所或流通平台，实现低空数据资产在不同行业间的安全流转与价值变现，这将开辟一个全新的万亿级市场。

### (2) 跨界融合与产业链合作新范式

**汽车与航空的跨界：**拥有汽车产业背景的企业，正将其在三电系统、供应链管理、规模化精益制造方面的成熟经验引入eVTOL领域，加速产品的迭代与商业化进程。

**能源与交通的融合：**eVTOL主机厂与能源企业的战略合作日趋紧密，合作范围从联合研发高性能动力电池，延伸至共建超充补能网络，形成从产品到能源保障的生态闭环。

**基础设施开发商与航空运营商协同：**专业的垂直起降机场（Vertiport）开发商，正与eVTOL运营商及地方政府合作，共同规划和建设城市UAM基础设施网络，加速商业化落地。

### **(3) 监管科技与服务创新**

随着空域管理日趋复杂和数据资产化时代的到来，数字化监管工具与服务将成为生态的重要组成部分。包括：

- 基于区块链的飞行数据可信存证，以保障数据资产的确权、安全与可追溯性。
- 基于时空智能的飞行计划合规性自动审查与风险动态评估。
- 面向低空数据资产的创新保险产品与金融衍生品等，将共同提升整个生态的运行效率与安全水平。

## **6.3 社会影响与伦理**

低空经济的发展将深刻影响城市空间与社会结构，并带来一系列需前瞻性思考的社会与伦理课题。

**城市空间重构：**UAM的普及将重新定义“通勤半径”和“城市边界”，可能对城市的空间布局、功能分区产生深远影响。垂直起降机场将作为新型交通枢纽，与地铁、高铁等地面交通体系深度融合。

**环境适应性与公众接受度：**飞行器的噪声控制、视觉影响以及公众对运行安全的感知，是决定低空经济能否获得“社会许可”的关键。技术上需要持续优化降噪设计，运营上需要建立透明的安全管理体系，以赢得公众信任。

### **伦理与法律的挑战：**

**自主系统伦理：**当无人驾驶飞行器面临不可避免的碰撞时，其内置算法应如何进行伦理抉择，需法律、技术、伦理等多领域共同探讨并确立规则。

**空域权益界定：**城市建筑上方的空域，其使用权和收益权应如何界定？如何平衡飞行便利性与地面居民的安宁权、隐私权？这些问题需要在法律层面进行前瞻性的界定。

## 结束语

本白皮书的完成，建立在泰伯智库对于低空领域的长期跟踪以及已发布的一系列成果之上，包括《全球及中国低空经济全景深度研究报告（2024）》、“2024中国低空经济企业百强”榜单、《低空数字底座市场研究报告（2025）》等。并结合产业热点及行业需求，组织了“2024低空经济时空信息基础设施论坛”、“低空经济产业发展政企对接会”等系列活动，积极为产业各方搭建交流与合作的平台。

正是基于这些长期的跟踪研究与产业实践，我们通过本白皮书对低空经济当前阶段性认识进行一次系统性梳理。而对于这样一项涉及多领域的系统性工程，仅仅是一个开始。下一步，我们将持续追踪低空领域的技术创新、商业模式与政策演进，不断产出更具前瞻性与实际价值的研究成果，也期待与政府、企业、科研机构等各界伙伴一道，持续深入探讨行业面临的机遇与挑战，开展更多合作与交流，共同推动产业的发展。



泰伯智库官网



泰伯数据