



第 1 章 低空技术概述

随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进，空域资源的精细化利用逐渐成为推动经济社会高质量发展的重要引擎。特别是空域开放与低空技术的快速演进，正以前所未有的速度催生出以“低空经济”为代表的新兴产业形态。在此背景下，低空技术作为承载低空飞行活动的核心支撑体系，已在国家战略层面与产业实践层面受到高度重视。

低空技术涵盖了飞行平台、通信与导航、感知与控制、空域管理等多个关键技术领域，广泛应用于城市空中交通、智慧物流、农业植保、应急救援、工业巡检等多个场景。其发展不仅重塑了传统空中交通管制服务体系，更在推动低空空域数字化、网络化、智能化转型方面发挥着关键作用。然而，当前低空技术的发展仍面临空域划分与监管体系不健全、飞行安全保障能力不足、低空通信基础设施薄弱等诸多挑战。因此，系统理解低空的概念与边界、把握技术体系的演进脉络、明确应用前景及潜在问题，对于深入学习本书后续内容、掌握低空技术领域的发展趋势具有重要意义。

本章将从低空的定义与空域划分出发，梳理低空技术的发展历程与当前格局，分析其在多个领域中的典型应用与发展前景，并探讨当前面临的主要挑战与机遇，为后续章节的深入学习奠定理论基础和认知框架。

1.1 低空的定义与空域划分

根据国务院、中央军委联合发布的《关于深化我国低空空域管理改革的意见》等政策文件的规定，低空一般指地表至 1000 米（含）以下的空域，主要面向通用航空与低空飞行活动。空域作为航空活动的基本空间载体，其科学划分与高效管理是保障飞行安全、提升空域利用效率的前提。随着无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）、电动垂直起降飞行器（electric Vertical Take-Off and Landing aircraft, eVTOL）等新型飞行器的大规模应用，传统空域管理体系面临日益严峻的技术和政策挑战，尤其是在地表至 1000 米的低空区域，飞行活动日趋频繁，空域资源的价值显著提升。

1.1.1 空域的基本概念

空域是指地球表面特定区域上空，由国家或地区主管机构依法划定、用于飞行器运行

和管理的三维空间，它与国家的领土和领海一样，属于国家主权范围内的重要组成部分，因此，各国对其空域享有完全的主权，未经许可，任何外国飞行器不得进入。空域作为一种有限的公共资源，是开展各类飞行活动的空间基础，也是实施空中交通管制、保障飞行安全的重要前提。因此，正确理解空域的基本结构与管理机制，是学习低空技术与工程的首要前提。

1. 各类空域对比

正如图 1.1 所示，根据飞行器飞行规则 and 性能要求、空域环境、空中交通管制服务内容等因素，通常将空域划分为 A、B、C、D、E、G、W 共 7 类，其中，A、B、C、D、E 类为管制空域，G、W 类为非管制空域。表 1.1 汇总了各类空域的区别。

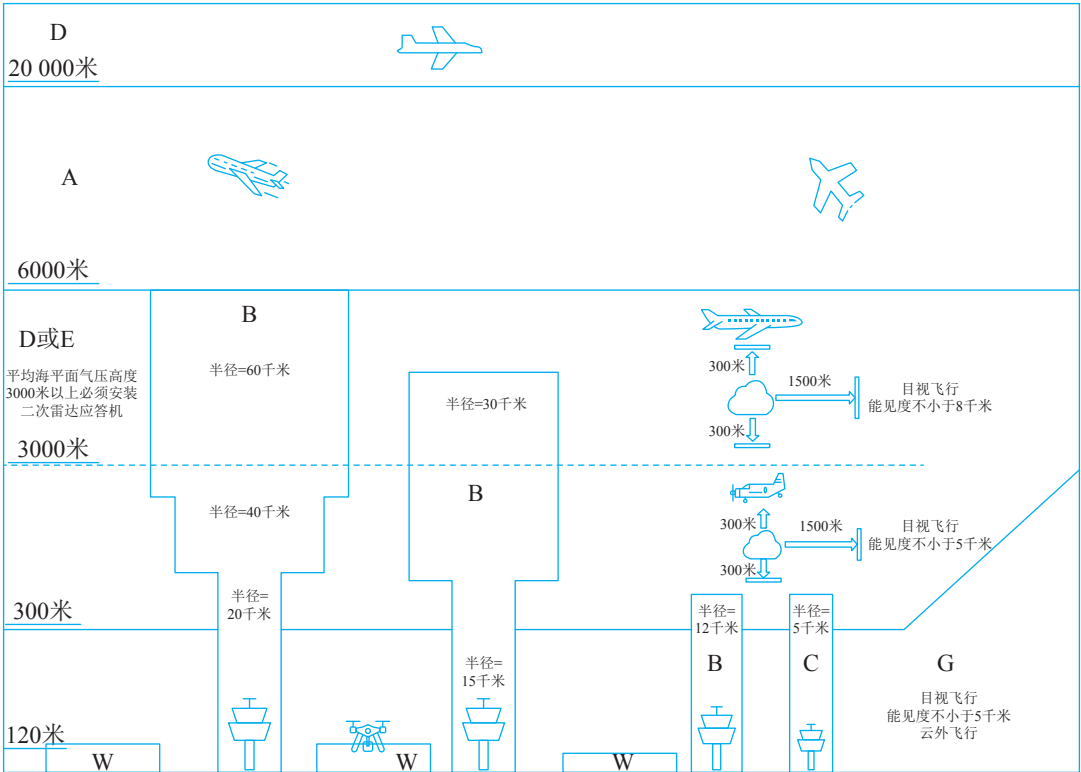


图 1.1 空域的层级结构

表 1.1 各类空域的区别

空域类别	划设地域及范围	服务内容	飞行要求	监管特点
A 类	标准气压高度 6000 米（含）至 20 000 米（含）	为所有飞行活动提供空中交通管制服务，并配备间隔	仅允许仪表飞行；须持续双向无线电通信；须安装二次雷达应答机；须获得许可；飞行器驾驶员须具备仪表飞行能力及相应资质	全程严格管制空域

续表

空域类别	划设地域及范围	服务内容	飞行要求	监管特点
B 类	民用运输机场上空，依据跑道数量设置阶梯空域，最高至 6000 米或 A 类下限	为所有飞行活动提供空中交通管制服务，并配备间隔	允许仪表飞行和目视飞行；持续双向无线电通信；须安装二次雷达应答机；须获得许可；飞行器驾驶员须具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质	大型机场控制空域
C 类	建有塔台的通用机场上空，通常为半径 5 千米、高 600 米（含）的单环结构	为所有飞行活动提供空中交通管制服务，目视间提供信息服务	允许仪表飞行和目视飞行；持续双向无线电通信；须安装可被监视设备；须获得许可；飞行器驾驶员须具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质	通航机场控制空域
D 类	20 000 米以上，或划设为 D 类的其他区域	为所有飞行活动提供空中交通管制服务，仪表飞行间配备间隔，目视飞行提供信息	须安装可被监视设备；必须报备飞行计划；飞行器驾驶员须具备相应资质	高空或指定区域的管制空域
E 类	A、B、C、G 类以外的区域，可根据需要设定	仅对仪表飞行提供空中管制服务	仪表飞行须获得许可与通信，目视飞行报告并守听；须监视设备；飞行器驾驶员须具备相应资质	有限管制空域
G 类	海平面 6000 米以下、真高 300 米以下，非公共运输影响区域	提供信息服务，不提供空中管制服务	允许仪表飞行与目视飞行；仪表飞行须通信，目视飞行须守听；须安装可被监视设备；须报备	非管制空域
W 类	G 类内真高 120 米以下空域	无空中管制服务，仅用于特定飞行	限微 / 轻 / 小型无人驾驶飞行器飞行；须自动广播身份信息；飞行器操控员需执照	无人机专用空域

1) A 类空域

(1) 划设地域及范围：通常为标准气压高度 6000 米（含）至标准气压高度 20 000 米（含）。

(2) 服务内容：为所有飞行活动提供空中交通管制服务，并配备间隔。

(3) 飞行要求：①通常仅允许仪表飞行；②飞行器和空中交通管理部门之间必须保持持续双向无线电通信；③飞行器必须装备二次雷达应答机（或同等性能的可被监视设备）；④飞行计划须经过审批，飞行器进入前须获得空中交通管理部门许可；⑤飞行器驾驶员应具备仪表飞行能力及相应资质。

2) B 类空域

(1) 划设地域及范围：划设在民用运输机场上空。

①民用三跑道（含）以上机场，通常划设为半径 20 千米、40 千米、60 千米的 3 环阶梯结构，其高度范围依次为跑道道面至机场标高 900 米（含）、机场标高 900 米至机场标高 1800 米（含）、机场标高 1800 米至标准气压高度 6000 米；②民用双跑道机场，通常划设为半径 15 千米、30 千米的 2 环阶梯结构，其高度范围依次为跑道道面至机场标高 600 米（含）、机场标高 600 米至机场标高 3600 米（含），顶层最高至 A 类空域下限；③民用单跑道机场，通常划设为半径 12 千米、跑道道面至机场标高 600 米（含）的单环结构。

（2）服务内容：为所有飞行活动提供空中交通管制服务，并配备间隔。

（3）飞行要求：①允许仪表飞行和目视飞行；②飞行器和空中交通管理部门之间必须保持持续双向无线电通信；③飞行器必须装备二次雷达应答机（或同等性能的可被监视设备）；④飞行计划须经过审批，飞行器进入前须获得空中交通管理部门许可；⑤飞行器驾驶员应具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质。

3) C 类空域

（1）划设地域及范围：划设在建有塔台的通用航空机场上空，通常为半径 5 千米、跑道道面至机场标高 600 米（含）的单环结构。

（2）服务内容：为所有飞行活动提供空中交通管制服务。为仪表飞行之间、仪表飞行与目视飞行之间配备间隔；为目视飞行之间提供交通信息，并根据请求提供交通避让建议。

（3）飞行要求：①允许仪表飞行和目视飞行；②海平面高度 3000 米以下，目视飞行指示空速不大于 450 千米 / 小时；③飞行器和空中交通管理部门之间必须保持持续双向无线电通信；④飞行器必须安装二次雷达应答机（或同等性能的可被监视设备）；⑤飞行计划须经过审批，飞行器进入前须获得空中交通管理部门许可；⑥飞行器驾驶员应具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质。

4) D 类或 E 类空域

（1）划设地域及范围：①标准气压高度高于 20 000 米为 D 类空域；②除 A、B、C、G 类空域以外，可根据运行需求和安全要求选择划设为 D 类或 E 类空域。

（2）服务内容。

D 类空域：为所有飞行活动提供空中交通管制服务。为仪表飞行之间配备间隔；为仪表飞行提供关于目视飞行的交通信息，并根据要求提供交通避让建议；为目视飞行提供关于仪表飞行和目视飞行的交通信息，并根据要求提供交通避让建议。

E 类空域：仅为仪表飞行提供空中交通管制服务。为仪表飞行之间配备间隔；为仪表飞行尽可能地提供关于目视飞行的交通信息；为目视飞行尽可能地提供关于仪表飞行和目视飞行的交通信息。

（3）共性飞行要求：①允许仪表飞行和目视飞行；②当飞行器在海平面高度 3000 米以下飞行时，指示空速不大于 450 千米 / 小时；③当飞行器在海平面高度 3000 米以上飞行时，必须安装二次雷达应答机（或同等性能的可被监视设备），当平均海平面高度低于

3000 米时，应安装其他可被监视的设备；④必须报备飞行计划；⑤飞行器驾驶员应具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质。

(4) 特殊飞行要求。

D 类空域：仪表飞行、目视飞行的飞行器在进入前均须获得空中交通管理部门的许可，并保持持续双向无线电通信。

E 类空域：①仪表飞行的飞行器进入前须获得空中交通管理部门的许可，并保持持续双向无线电通信；②目视飞行的飞行器无须空中交通管理部门许可，但进入前必须报告，并在规定的通信频率上保持守听。

5) G 类空域

(1) 划设地域及范围：① B、C 类空域以外的真高 300 米以下空域（不含 W 类空域）；②平均海平面高度低于 6000 米、对民航公共运输飞行不构成影响的空域。

(2) 服务内容：仅提供飞行信息服务，不提供空中交通管制服务。

(3) 飞行要求：①允许仪表飞行和目视飞行；②当飞行器在海平面高度 3000 米以下飞行时，指示空速不大于 450 千米/小时；③仪表飞行的飞行器和空中交通管理部门之间必须保持持续双向无线电通信，目视飞行应在规定通信频率上保持守听；④飞行器必须安装或携带可被监视的设备；⑤必须报备飞行计划；⑥飞行器驾驶员应具备仪表飞行或目视飞行能力及相应资质。

6) W 类空域

(1) 划设地域及范围：G 类空域内真高 120 米以下的部分空域。

(2) 飞行要求：①微型、轻型、小型无人驾驶飞行器飞行；②飞行过程中应当以广播式自动发送识别信息；③小型无人驾驶飞行器操控员须持有相应类别的操控员执照。

2. 空域类型（参考《中华人民共和国空域管理条例（征求意见稿）》）

综合考虑空域限制类型、使用用途等因素，空域主要可分为空中禁区、空中限制区、空中危险区、空中保留区等。

空中禁区：指禁止任何飞行器进入的空域，通常基于国家安全等原因设立。

空中限制区：指在特定时间或条件下对飞行器飞行实施限制的空域。

空中危险区：指因存在军事活动、试验、射击等可能对飞行安全构成威胁的空域。

空中保留区：为低空空域管理改革中特有的一种分类，旨在提升飞行活动的可监控性，飞行器需向相关机构报备飞行计划与状态。

3. 空域管理的基本原则（参考《民用航空使用空域办法》）

现代空域管理强调安全、高效、有序、共享的基本原则，具体包括以下方面。

(1) 保证飞行安全。空域的建设与使用应当有利于防止飞行器与飞行器、飞行器与障碍物之间相撞，并保障飞行器驾驶员在遇险等紧急情况下能有效处置。

(2) 保证国家安全。空域的建设与使用应当符合国土防空和国家安全的要求。

(3) 提高经济效益。空域的建设与使用应当对国家经济建设产生有利的影响和作用，

并有助于航空企业降低运营成本。

(4) 便于提供空中交通管制服务。空域的建设与使用应当便于空中交通管理部门向运行中的飞行器提供空中交通管制服务，满足空中交通管制服务对空域使用的需要。

(5) 加速飞行活动流量。空域的建设与使用应当有利于维护并提升空中交通的有序性和运行效率。

(6) 具备良好的适应性。空域的建设与使用应当适应不同类型的飞行器、不同时间和不同运行方式的要求。

(7) 与国际通用规范接轨。空域的建设与使用应当尽可能符合《国际民用航空公约》及其附件和文件所规定的技术标准与建议措施，以保障国际与国内飞行的实施。

1.1.2 低空的空域划分

低空作为航空活动中最贴近地表的空域区域，近年来随着通用航空、无人机、低空物流、空中出行等新兴业态的兴起而日益受到关注。明确低空的定义及其空域划分标准，是推进低空空域管理、技术体系建设和政策制定的基础。

1. 低空的基本定义

低空通常指地表至一定高度范围内的空域，其高度上限因国家而异。根据国际通行惯例和我国政策文件中的定义，低空的边界主要有以下几种参考标准。

国际通用标准：部分国家将低空划分上限设定为 300 米（约 1000 英尺）或以下，该范围通常适用于通用航空与小型飞行器运行。

我国现行标准：自《关于深化我国低空空域管理改革的意见》实施以来，低空通常指从地面或水面起，至真高 1000 米（约 3300 英尺）以下的空域。这一高度范围主要用于通用航空活动，包括有人驾驶和无人驾驶飞行器的各类飞行任务。

低空并非一个技术静态的高度值，而是一个具有政策属性、动态调整空间的空域区段，其划定不仅需考虑飞行器性能和运行环境，还与民用、军用空域协调密切相关。

2. 我国低空空域的划分体系

我国低空空域的划分体系体现出政策主导与技术驱动并重的特点，旨在提升空域资源利用效率、保障飞行安全并促进低空经济发展。这一体系主要聚焦于 0 ~ 1000 米的低空领域，在国家空域层级结构的基础上，结合低空飞行特点，从垂直、水平和功能三个维度进行精细化管理，构建多层次、灵活可用的空域运行环境。

1) 垂直维度划分

我国在垂直方向上将低空空域划分为以下两个主要层次。

(1) 超低空空域（地表至 120 米）：主要面向小型无人机等低速、低空飞行器，适用于农业植保、航拍、巡检等低空作业活动。

(2) 常规低空空域（120 米至 1000 米）：适用于通用飞行器、轻型飞机、电动垂直起降飞行器等，支持短途运输、空中游览、应急救援等多种飞行任务。

此外，部分地区还探索将 100 米至 1000 米的区域内，按照 15 米的间隔进行分层划分，形成多层次的空域结构，以满足多样化的飞行需求。例如，2024 年 12 月，在成都金堂淮州机场，国内首个阶梯式低空空域正式投入使用。

2) 水平维度划分

在水平方向上，低空空域结合地域特点和空域使用密度，可进一步划分为以下三类。

(1) 开放空域：飞行活动较少，风险较低，适合开展常规通用航空和无人机飞行任务。

(2) 管控空域：飞行活动频繁或涉及重要设施，需要实施严格的飞行管制措施，以确保飞行安全。

(3) 试验空域：专门用于新型飞行器的试飞、科研试验等特殊用途，需根据具体任务进行管理和使用。

这种水平划分方式结合了地域特征和空域使用密度，有利于实现空域资源的合理配置和高效利用。

3) 功能维度划分

结合低空空域管理改革试点，我国在功能上将其划分为以下三类。

(1) 飞行报告空域：飞行活动无须空中交通管理部门审批，但须事先报告飞行计划，适用于风险较低的飞行任务。

(2) 飞行申请空域：飞行活动须提交飞行计划并获得批准后方可进行，适用于风险较高或需要协调的飞行任务。

(3) 飞行管制空域：如机场周边、军用空域等，飞行活动须经过严格申请和监控，确保飞行安全和空域秩序。

这一功能划分体系兼顾了飞行活动的灵活性、安全性和监管需求，为低空运行环境的有序发展提供了制度保障。

2023 年 12 月，中国民航局发布了《国家空域基础分类方法》，首次将低空空域划分为 G 类和 W 类非管制空域。其中，G 类空域为非管制空域，飞行活动无须空中交通管理部门提供服务；W 类空域为条件非管制空域，飞行活动须满足特定条件。这一划分进一步优化了低空空域的管理体系，为通用航空、无人机等低空飞行活动提供了更多运行便利。

我国低空空域的划分体系是在国家空域层级结构的基础上，针对低空领域进行的精细化细分与补充。空域层级结构覆盖全国全高度范围，通过 A、B、C、D、E、G、W 共 7 类空域进行顶层管制与非管制管理；而低空空域划分体系则专注 0 ~ 1000 米范围，结合实际飞行需求从垂直、水平、功能多维度实现灵活、分层和差异化管理，旨在提升低空资源利用效率、保障飞行安全并推动低空经济发展。二者相辅相成，层级结构提供了总体框架与管制依据，低空划分体系则在此基础上实现低空经济场景下的落地实施，两者共同促进我国低空空域管理体系的高效运行，推动低空经济的健康发展。

3. 低空空域划分的国际对比

在全球范围内，各国基于其国情、航空产业基础与安全需求，形成了各具特色的低空空域管理范式，为我国的体系优化提供了重要参照。我国的低空空域管理体系具有鲜明的政策主导与多维度划分的特点，主要从垂直维度（将 1000 米以下空域划分为服务于小型无人机的 120 米以下超低空和 120 米至 1000 米的面向通用航空的常规低空）、水平维度（根据飞行活动密度划分为开放空域、管控空域与试验空域三类）和功能维度（根据管理方式不同分为报告、申请与管制三类空域）进行精细化与分层化管理，旨在在保障安全的前提下，渐进式地释放空域资源，服务于国家低空经济发展战略。相比之下，美国联邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）则建立了以飞行规则为核心的分类体系。

如图 1.2 所示，该体系以机场为中心，根据空中交通流量大小将繁忙空域划分为 B、C、D 等不同管制等级，而广阔的 G 类空域则为无人机等低空活动提供了较大的运行自由度，此类模式极大地推动了通用航空的发展。同时，欧盟则在“欧洲单一天空”的框架下，通过构建 U-Space 服务体系，分阶段引入无人机注册、电子识别、地理围栏和冲突探测等功能，旨在实现无人机交通管理的数字化、自动化，确保其与现有空中交通管理系统的安全融合。此外，日本、韩国等国家也积极跟进相关实践，其空域分类同样参考了国际标准。

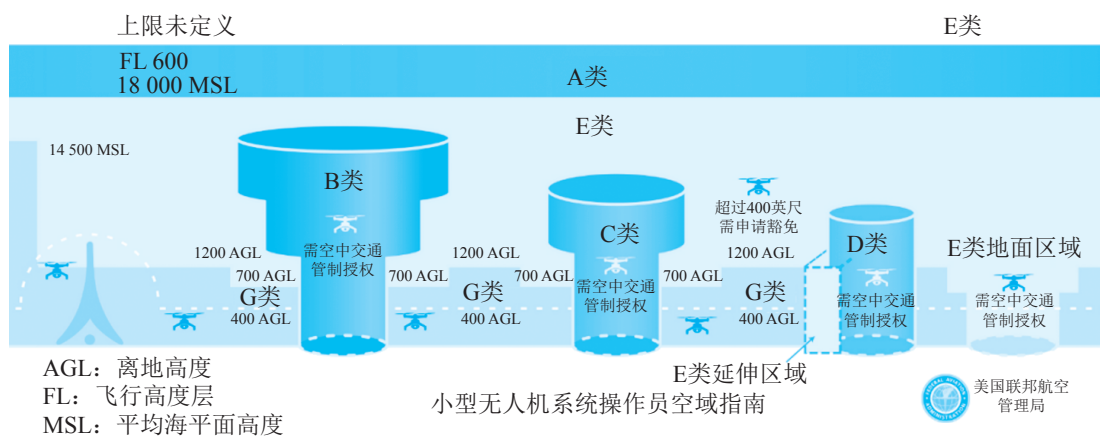


图 1.2 美国空域划分

日本和韩国作为亚洲地区的代表，同样依据国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）标准进行空域划分，并分别借助韩国城市空中交通和无人机 / 无人驾驶航空系统等数字化平台，积极探索服务于城市空中交通的新型管理模式。这些国际经验表明，一套灵活、高效并与国际接轨的空域管理体系是释放低空经济潜力的关键前提。日本空域分类如图 1.3 所示。

为了更清晰地展示上述主要经济体在低空空域管理上的异同，表 1.2 从管理模式、空域划分、无人机管理及技术支持维度进行了系统对比。通过该表可以直观地看出，我国呈现出“政策主导，逐步开放”的特点、美国体现为“规则主导，鼓励发展”，而欧盟则表

现出“统一标准，灵活实施”的核心特征。这种对比分析不仅有助于理解我国低空空域管理的现状和特色，也为未来的改革和发展提供了有价值的国际借鉴（注：关于各国管理政策的详细论述请参阅本书 7.2 节）。

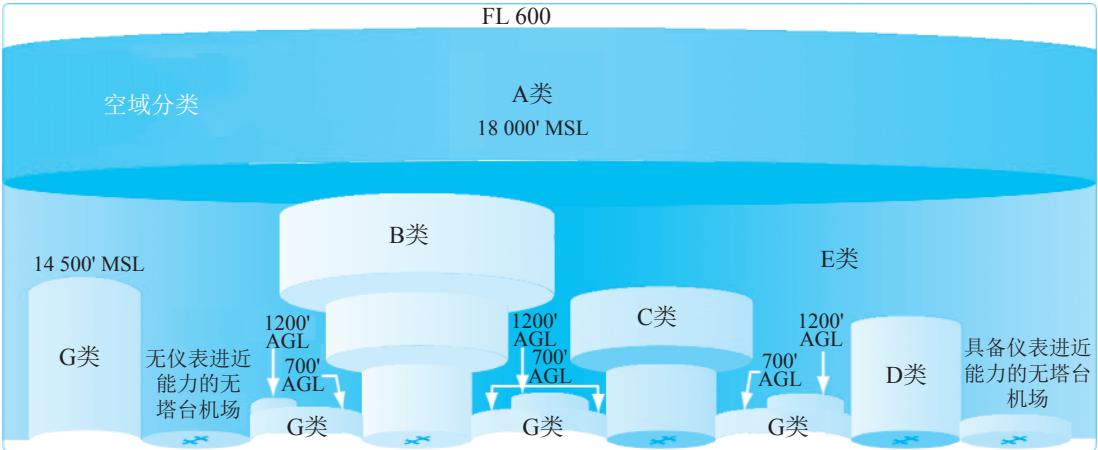


图 1.3 日本空域分类

表 1.2 各国的空域管理模式

维 度	中 国	美 国	欧 盟
管理模式	政策主导，逐步开放	规则主导，鼓励发展	统一标准，灵活实施
空域划分	多维度划分（垂直、水平、功能）	以飞行规则为核心的空域分类体系	统一标准下的灵活管理
无人机管理	处于持续探索与完善阶段	已形成较为成熟、系统的运行与管理体系	正在制定并推行统一化的管理标准
技术支持	着力推进基础设施升级与技术应用落地	技术体系相对成熟，侧重飞行器驾驶员自主责任与设备能力	注重统一技术标准，以提升空域整体的运行效率

通过对这三类低空空域管理体系进行对比分析，不仅有助于理解我国低空空域管理的发展现状和面临的挑战，也为未来的改革和实践提供了有益参考。从国际经验来看，我国在低空空域管理方面应进一步深化改革，借鉴美国、欧盟等地的成功经验，结合我国国情，逐步建立更加灵活、高效、安全的低空空域管理体系，从而促进低空经济实现更高质量的发展。

1.2 低空技术的发展历程与现状

1.2.1 低空飞行器的发展简史

低空飞行器通常是指飞行高度在地面以上数百米至数千米之间，介于传统飞行器与地面设施之间的飞行平台。常见类型包括多旋翼无人机、固定翼微型飞行器、垂直起降飞行

器以及气球式观测平台等。这类飞行器最显著的特点是飞行高度低、灵活性强，广泛应用于地理测绘、环境监测、应急救援、物流运输、通信覆盖等任务中。低空飞行器的演进史远比大众视野中的无人机演进史更为悠久和深刻。它并非始于近十年的科技热潮，而是人类数百年来征服近地天空梦想的延续与实践。这段漫长的历程从最初依赖风与火的简易升空起步，经历了战争时期催生的遥控雏形，再到如今由人工智能（Artificial Intelligence, AI）和数字技术驱动的智能飞行阶段，最终汇聚成今天“低空经济”这一当代宏大概念。这种飞行高度通常在数百米至数千米之间的飞行平台，以其高度灵活性和独特的作业环境，正在地理测绘、环境监测、应急救援、物流运输乃至未来的城市交通中扮演日益重要的角色。

1. 初步探索阶段

人类对低空空域的首次征服可追溯到 1783 年法国的蒙哥马利兄弟。他们利用热空气成功升起了世界上第一个载人热气球，尽管只是一次短暂的飘浮，却庄严宣告了人类已具备脱离地面，进入这片最贴近大地的天空的能力。在此后的百余年里，从奥托·李林塔尔的滑翔翼到飞艇的出现，人类在低空飞行的探索上步履不停，但这些飞行器始终需要飞行器驾驶员的直接操控。

将人从驾驶舱解放出来的“无人飞行”概念，伴随着无线电技术的诞生而出现。而其实践的真正突破，则是由 20 世纪中期的军事需求所催生的。为了满足军事训练和侦察等特殊任务的需要，首批具备实用价值的无人低空飞行器——遥控靶机和初级侦察机应运而生。这些飞行器结构简单，通常由地面人员通过无线电链路在视距范围内进行基础操控，虽然其功能和自主性都极为有限，但它们在工程上首次验证了“无人遥控飞行”的可行性，是低空飞行器从“载人”走向“无人”的重要里程碑。这一阶段的技术探索虽然原始，但为后续发展奠定了不可或缺的工程基础，尤其是在空气动力学、轻质材料、微型动力装置和无线电遥控理论等方面积累了关键经验。

2. 无人机技术的兴起

进入 21 世纪，在多项关键技术融合的推动下，以“无人机”为代表的低空飞行器迎来了首个发展浪潮。这一时期的技术进步首先得益于军事领域的持续投入。出于对远程侦察、战场监视和信息获取等能力的迫切需求，性能更强、续航更长、功能更复杂的军用无人机系统相继被研发出来并投入实战，其成功应用极大地推动了无人机技术的成熟。

技术的溢出效应迅速显现。微电子与集成电路产业的飞速发展，促使无人机核心的传感器（如陀螺仪、加速度计）和计算单元实现了惊人的小型化和低成本化。同时，全球导航卫星系统的广泛普及，为无人机提供了廉价且高精度的定位与授时服务，使其实现大规模自主飞行。此外，高能量密度电池技术的突破，也有效解决了小型电动无人机在续航方面的限制。

在这一系列技术红利的共同作用下，无人机开始从军用领域大规模走向民用市场。曾经成本高昂的专业航拍、农林作业、电力巡检和地理测绘等工作，因无人机的引入而变得

前所未有的高效和经济。一个由爱好者、工程师和商业公司共同构成的庞大生态系统迅速形成，极大地丰富了低空飞行器的应用场景和技术内涵。

3. 智能化与商用化加速

进入 21 世纪 20 年代，AI、第五代移动通信技术（5th-Generation Mobile Communication Technology, 5G）、云计算和大数据等新兴技术的发展，如同新一轮强大的浪潮，将低空飞行器推向智能化和商业化的新高峰。此时，低空飞行器已不再仅是执行预设指令的“飞行工具”，而是逐步进化为具备自主环境感知、实时决策和智能行动能力的“空中机器人”。

AI 算法，特别是深度学习在计算机视觉领域的广泛应用，使飞行器具备了强大的环境感知和目标识别能力。5G 通信技术凭借其高带宽、低时延的特性，为超视距的可靠遥控和高清数据实时回传提供了可靠保障。飞行器由此不再是“信息孤岛”，而是成为万物互联的智能终端。

这些技术进步催生了全新的商业模式和应用形态。在城市中，自动化的无人机配送网络正逐步构建，重塑物流的末端环节；在交通领域，以电动垂直起降飞行器为代表的新型空中交通工具，正积极开辟城市空中交通这一全新赛道，为解决城市拥堵提供革命性的思路。这些新业态的涌现，共同构成了低空经济的核心内涵，吸引了众多科技企业和传统制造商的积极投入。

总体而言，低空飞行器的发展历程呈现出一条清晰的演进轨迹：从工具化到智能化再到生态化。它从最初满足特定需求的飞行工具，逐步演变为能够自主执行复杂任务的智能系统，并最终将催生出一个涵盖研发制造、运营服务和法律监管等环节的全新产业生态。未来，随着相关技术的持续迭代和空域管理政策的逐步完善，低空飞行器必将在智慧城市、国土安全、工业自动化等领域扮演越发关键的角色，深刻地改变人们的社会结构和经济形态。

1.2.2 低空通信与导航技术演进

低空经济的快速发展，离不开高效、安全的通信与导航技术作为支撑。随着无人机、空中出租车等低空飞行器的普及和应用，低空通信与导航系统不仅需要满足传统航空领域的要求，还需要应对低空环境的特殊需求。因此，低空通信与导航技术的突破对于低空经济的推进至关重要。

1. 低空通信技术演进

低空通信技术是保障低空飞行安全与高效运作的关键桥梁，承担着飞行器与机组、地面管制及各类相关主体间信息交互的重任。其演进历程可以划分为以下几个阶段。

1) 初期阶段：无线电遥控与简易通信

低空通信技术的起步可追溯至 20 世纪 60 年代，当时主要用于军事训练、航模运动和科研任务。通信方式以模拟无线电遥控为主，通常使用 VHF/UHF 频段，将遥控信号从地

面发送至飞行器，实现简单的方向控制和升降操作。

尽管这一阶段通信手段相对简陋，传输单向且缺乏实时反馈与抗干扰机制，飞行器的操作精度也有限，但它为后续飞行控制系统的演进和遥测技术的发展奠定了基础。

2) 数字通信阶段：飞控链路WithData链分离

随着微电子与数字通信技术的发展，低空飞行器逐渐配备具备数字编码功能的通信模块，实现了飞控指令与飞行数据的双向传输。此时的无人机通信架构开始向“控制链路+数据链路”双通道演进，提升了飞行稳定性和任务执行的灵活性。

在这一阶段，微型飞行器链路（Micro Air Vehicle Link, MAVLink）等开源协议逐渐流行，部分飞行器开始搭载独立图像传输链路，并利用 Wi-Fi 或 2.4GHz/5.8GHz 频段实现高清视频回传。与此同时，广播式自动相关监视技术正逐步成为中高端无人机的标配，以满足监管机构对飞行器远程识别和空域态势感知的强制性要求。

3) 宽带接入阶段：5G 通信技术引领变革

自 2019 年起，随着 5G 通信商用化进程加快，低空通信进入高速率、低延迟的新时代。5G 网络大带宽、低时延的特性，为飞行器提供了更稳定的视频回传、精准遥控以及远程任务调度能力。

基于 5G 的无人机通信系统能够实现毫秒级命令响应和高清视频流同步上传，广泛应用于安防巡检、应急救援、直播拍摄等领域。在城市复杂空域中，蜂窝通信逐步取代传统点对点遥控，成为主要的通信基础设施。

随着技术标准演进，5G-A（增强型 5G）正持续推进其在无人机通信中的应用。5G-A 提升了移动通信网络对空中节点的支持能力，包括更高的连接密度、更低的空中干扰与更优化的低空切换管理，正逐步成为城市空中交通与低空物流的核心通信技术之一。

4) 智能组网阶段：低空通信与星地融合

随着飞行器数量的激增与空域任务的协同需求，低空通信正向多模态融合与智能组网方向演进。在地面基站覆盖不足的复杂环境中，飞行器之间可通过 Mesh 组网、自组织网络等方式建立临时通信网络，实现任务信息共享、路径避让与编队飞行等协同控制功能。

此外，在偏远山区、边境海岛等通信基础设施不足的场景中，低轨卫星通信系统（如 Starlink、鸿雁星座等）可为无人机提供广覆盖、高可靠性的备份链路，逐步构建起“卫星—地面—空中”三层融合的通信系统。

未来的低空通信体系将形成以 5G/6G 基站为核心，以空中中继（如飞艇、大型无人机）为补充，以卫星网络为拓展的空天地一体化架构，为各类低空飞行器提供全时段、广域、多样化的连接能力。

2. 低空导航技术演进

在低空飞行中，导航技术是低空飞行器的“指南针”。它借助卫星定位、惯性导航等多种手段，为飞行器提供精准定位信息，指引其在复杂低空环境中按预定航线飞行。其演进历程可以划分为以下几个阶段。

1) 初始阶段：目视飞行与简易 INS

20 世纪中期，低空飞行器主要为滑翔机、试验型无人机和模型飞行器等，其导航基本依赖操作者目视判断与手动控制。在复杂环境或长距离任务中，这种导航方式难以提供持续、精确的位置支持，易受地形和能见度条件限制。同时，部分中高端试验型无人机开始尝试搭载简易的惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS），通过陀螺仪和加速度计感知自身运动状态，然而受限于当时传感器性能不足、误差积累快等问题，这类 INS 多作为短时间辅助方案使用，整体导航精度和稳定性仍有明显欠缺。

2) 卫星导航阶段：GPS 引入与导航标准化

20 世纪 90 年代，以美国全球定位系统（Global Positioning System, GPS）为代表的全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）技术开始走向成熟，在军民领域广泛普及，为低空飞行器提供了全天候、全球可用的位置服务。飞行器开始广泛搭载 GNSS 接收模块，以实现自主导航、轨迹规划与航点飞行。与此同时，通过与 INS 结合，GNSS/INS 融合导航成为主流配置。INS 负责短时快速定位响应，GNSS 提供长期稳定校准，有效克服了 INS 的误差漂移问题。在此基础上，实时动态差分技术（Real Time Kinematic, RTK）和差分全球定位系统（Differential Global Positioning System, DGPS）等高精度定位手段逐步应用于农业植保、测绘飞行等任务，精度可达厘米级。

此外，随着中国的北斗、俄罗斯的 GLONASS 以及欧洲的 Galileo 系统相继投入运行，多源 GNSS 融合导航成为可能，增强了低空飞行器在复杂或干扰环境下的定位能力和容错性。

3) 环境感知阶段：视觉导航与激光雷达融合

进入 21 世纪 10 年代，随着计算机视觉与 AI 技术的发展，低空飞行器开始具备“看懂环境”的能力。视觉导航系统通过搭载的摄像头、光流传感器、立体相机等设备获取周围环境图像，并借助图像识别、深度学习等算法，实现对目标识别、地形匹配与自主路径规划。

与此同时，激光雷达（Light Detection And Ranging, LiDAR）成为实现高精度地图构建与避障导航的关键传感器，广泛应用于复杂城市环境、林区、洞穴等 GNSS 信号薄弱或遮挡严重区域。实时定位与地图构建（Simultaneous Localization And Mapping, SLAM）技术的引入，使得飞行器可以在“看不见星”的环境中自主构建地图并进行定位，大幅提升了低空飞行器的自主作业能力。

此阶段的低空导航逐步向“感知—理解—决策”闭环系统演进，为无人机在无 GPS 环境下的飞行任务提供了重要支撑。

4) 智能导航阶段：融合感知与高精度定位

2020 年以来，导航系统朝着多源融合、高精度、智能化方向快速演进。低空飞行器普遍同时搭载 GNSS、INS、视觉传感器、LiDAR、超声波雷达、磁力计等多类导航模块，并通过信息融合算法进行冗余验证和误差修正，构成稳定可靠的定位体系。2020 年，中国

北斗系统实现全球组网后，其短报文通信、星基增强服务和高精度服务等能力，也开始广泛用于低空导航领域。在城市空中交通和智能物流等场景中，借助“北斗+RTK+惯导+视觉SLAM”等多模态融合技术，飞行器不仅能实现厘米级精准定位，还具备复杂场景下的环境适应和路径再规划能力。此外，电子围栏、三维空域地图、空域感知与路径预测等辅助系统也被逐步纳入导航范畴，为低空飞行器提供动态路径规划与冲突预警能力，全面提升其在低空密集环境中的运行安全性。

低空导航技术已从最初的单点定位工具，逐渐发展成为具备环境感知与动态决策能力的智能系统。其演进不仅推动了飞行器的自主化水平，也为低空经济的安全运行提供了坚实保障。未来，随着6G通信、AI感知芯片、边缘协同计算等前沿技术的进一步成熟，低空导航有望迈入智能认知时代，实现真正意义上的“空中自由移动”与“空地协同导航”，从而推动智慧城市、应急响应、绿色交通等多类场景的深度融合与创新发展。

1.2.3 我国低空技术体系发展现状

在国家战略的强力推动与市场需求的持续牵引下，我国低空技术发展已从初步探索阶段迈入体系化构建的新时期。当前，一个涵盖了飞行器制造、基础设施建设、运营服务与数据应用的完整技术体系正在加速形成。该体系并非各种技术的简单叠加，而是一个多领域、跨行业深度融合的复杂生态系统。

1. 政策推动

近年来，低空经济迎来了政策密集出台期，为这一本就充满潜力的新兴产业注入了强劲发展动力。从中央到地方，各级政府正系统性推进低空经济的发展，使其从初期探索走向产业成熟，逐步形成较为完善的产业体系。

2025年3月5日，十四届全国人民代表大会第三次会议发布的《政府工作报告》明确提出，要有序推进商业航天、低空经济等战略性新兴产业的安全健康发展。报告强调，要因地制宜发展新质生产力，加快建设现代化产业体系，并提出要培育壮大新兴产业、未来产业，推动新技术、新产品、新应用场景的大规模示范落地。在确保安全的基础上，加快AI等新一代技术在低空经济多场景中的融合应用。同年发布的《2025年国民经济和社会发展计划执行情况与2026年国民经济和社会发展计划草案的报告》进一步明确，将出台促进低空经济高质量发展的相关政策措施，健全以安全监管为核心的规章制度体系。同时，草案提出适度超前布局低空智能网联基础设施，加快低空装备研发和场景化应用，提升低空飞行监管能力，并推动各地结合实际拓展低空经济应用领域。

与此同时，各地纷纷将发展低空经济提上日程，全国已有近30个省份将其写入地方《政府工作报告》或出台相关政策。湖南省作为全国首个低空空域管理改革的试点拓展省份，在政策法规、技术创新、基础设施建设、应用场景拓展和产业集聚等方面率先实现突破，取得了“12项全国第一”的显著成果，展现出强劲的发展动能。浙江省杭州市也发布了《关于推动经济高质量发展若干政策（2025年版）》，其中明确提出支持通用航空及

低空经济发展，积极争取省级通用机场建设和短途运输航线补助，推动建德航空小镇提速建设，同时支持A类飞行服务站布局。深圳市作为低空产业链集聚度最高的城市，在《深圳经济特区低空经济产业促进条例》中突出应用场景落地，提出到2026年实现全市起降点和运营航路全覆盖的目标，逐步形成以5G-A网络为主、卫星网络和民航专网为辅的“空-天-地-海”融合通信网络体系。合肥市则组建了由市委、市政府主要负责同志担任负责人的低空经济发展工作专班，出台《合肥市低空经济发展行动计划（2023—2025年）》，构建“4120”低空经济工作体系。并印发《合肥市支持低空经济发展若干政策》，围绕开通低空航线等10个方面给予政策支持。合肥市还出台《关于促进低空经济发展的决定》，明确市发展改革委承担低空经济发展的统筹协调工作，加强基础设施建设、建立低空飞行数据安全管理机制、开展应用场景拓展、优化低空空域管理和飞行服务保障等工作。

随着相关政策的持续落实与落地，低空经济的整体生态正加速构建。从基础设施布局到产业链完善，从应用场景拓展到技术体系完善，这一领域正日益成为支撑我国高质量发展和现代化产业体系构建的重要力量。据预测，到2026年我国低空经济总体规模有望突破万亿元大关，成为带动多领域融合创新的新引擎。

2. 我国低空技术体系的构成

在政策的强力驱动下，我国的低空技术体系正加速形成一个完整、复杂的产业生态系统。该体系并非各项技术的简单罗列，而是可系统地划分为三个相互支撑、协同发展的核心层面，它们共同构成了支撑低空经济运行的基石。

首先是飞行器与核心装备制造层。该层面是低空技术体系的物理载体和基础工具。它不仅包括各类低空飞行器（如工业级多旋翼与固定翼无人机、电动垂直起降飞行器、民用直升机等）的整机设计制造，更涵盖了决定飞行性能的各类核心零部件。这些部件涵盖提供动力的能源系统（高能量密度电池、氢燃料电池）、负责飞行的飞行控制系统、用于导航定位的组合导航模块，以及用于执行任务所搭载的各类专业传感器。这一层面的技术水平直接决定了低空活动的作业能力与安全上限。

其次是基础设施与运行保障层。如果将飞行器比作“车”，那么该层面就是保障其安全高效运行的“路网”和“服务站”。它包含两大组成部分：一是物理基础设施，如通用机场、垂直起降场、无人机枢纽、地面充电/换电设施等；二是数字基础设施，主要指覆盖低空的通信、导航、监视网络。这包括为低空飞行提供可靠连接的5G/5G-A蜂窝网络、实现高精度定位的卫星导航增强系统，以及用于空域态势感知的雷达和射频监测系统。一个泛在、可靠的基础设施网络是实现规模化、高密度低空运行的前提。

最后是数据与应用服务层。这是低空技术体系的“智慧大脑”和价值实现终端。该层面负责对海量的低空数据进行处理、分析与应用，从而赋能各类场景。它包括低空飞行管理服务平台（类似空中交通管理系统）、数据处理与分析软件，以及面向特定行业的应用解决方案。借助AI、大数据、云计算等技术，该层面可实现航线的智能规划、空域的动

态调度、飞行数据的挖掘分析以及面向物流、巡检、测绘、应急救援等多个领域的智能化服务，是低空经济价值创造的核心环节。

3. 重点科研成果与应用示范区

随着低空经济逐步上升为国家战略性新兴产业，我国在低空飞行器、导航通信、空域管理、智能感知等核心技术领域持续开展科研攻关，取得了一系列具有代表性的突破性成果。同时，多个省市依托技术基础和产业集群优势，积极布局低空经济应用示范区，形成了“点面结合、梯度推进”的发展格局，为低空经济全面发展奠定了坚实基础。

1) 重点科研成果持续突破

近年来，我国在低空经济相关领域的核心技术和系统集成方面不断取得新进展，部分成果已进入应用验证和推广阶段。

在飞行器研制方面，国内多家企业和科研机构成功开发出多类型低空飞行平台，包括大型垂直起降无人机、电动固定翼无人机、飞行汽车等，具备货运、测绘、巡检、应急救援等多种功能。例如，由中国民用航空飞行学院研发的 Fuelcell Compoundwing-30(FC-30) 型氢燃料电池全工况增程式复合翼无人机，在成都（彭州）国家级民用无人驾驶航空试验基地成功完成首次全流程飞行测试。这一成果标志着中国在该无人机新能源动力领域取得了具有里程碑意义的重大突破。该机型适用于复杂巡检、应急安防等多个专业领域，在复杂巡检场景中，FC-30 型复合翼无人机能够以固定翼模式快速接近目标区域，并在到达后切换至多旋翼模式以精准锁定目标并进行详细侦察，从而显著提升作业标准和作业效率。

在无人机电池与能源技术方面，随着无人机在物流配送、应急救援、测绘、巡检等场景中的应用不断拓展，对电池性能、能源密度与续航能力的要求也日益提升。近年来，围绕“轻量化、高能量密度、快充安全、智能管理”的发展方向，我国无人机电池与能源技术持续取得突破，逐步形成了以锂电池为主的技术体系。例如，大疆研发的全新 2 度电全场景户外电源 Power 2000，该电池兼具大容量和小体积，最大输出功率为 3000 瓦，能够轻松带动绝大部分生活电器。该电源从电量耗尽到充至 80% 仅需 45 分钟，支持太阳能、行车快充；拓展性强，最高能扩到 22 度电，灵活满足家庭备电、短途露营、房车长途、影视创作等多场景需求。此外，该产品采用板级亚纳米涂层，显著提升安全等级，支持 App 远程操控，进一步提升用电的便捷性与智能化水平。

在导航与感知方面，基于北斗系统的高精度融合导航技术已实现厘米级定位，集成 SLAM、视觉识别与激光雷达感知能力的无人机，已可在无 GPS 环境中完成自主飞行，显著提升了城市复杂环境下的适应能力。

在通信系统方面，低空飞行器支持 5G、Wi-Fi、北斗短报文等多源通信手段，实现了远程遥控、高清视频传输与编队协同控制。同时，具备“空-地-星”融合能力的通信网络正在逐步部署，为跨区域、复杂环境下的低空作业提供连续和安全的通信支撑。例如，由清华大学-中国移动联合研究院发布的“语义通信原型系统”，相比传统 H.264 编码，针对人脸场景，语义通信在维护相同用户体验的同时，将码率降低到原来的 10% ~ 20%，

即降低到 3kbps 也能获得清晰流畅体验。该平台核心技术优势在于不再对像素进行流式传输，而是通过语义编码器提取头部姿态和面部表情的运动参数，将其编码为比特流进行传输；接收端的语义解码器则根据头部姿态和面部表情参数驱动参考帧，合成说话人头部图像。

在低空空域管理领域，元动科技通过整合数字孪生、AI 大模型、5G+ 北斗定位、物联网等技术，结合不同地区的低空域通航特性与产业结构，构筑了低空系统数字化应用平台。该平台以基础设施建设与多维度数字化保障为核心目标，集成包括低空空域管理、物联网基础建设、无人机枢纽机场、低空虚拟仿真实训系统、产业领域低空应用中心等功能模块。平台可服务于众多产业，如对于物流产业，低空经济中的无人机和 eVTOL 能够实现快速、高效的货物配送，减少物流成本，提高物流效率；对于文旅产业，低空观光为游客提供了全新的视角和体验，推动旅游业的创新发展，通过空中游览、直升机观光等形式，吸引更多游客参与低空旅游，促进低空旅游的市场拓展。

2) 重点应用示范区建设稳步推进

为推动科技成果转化落地，我国已在多个重点区域设立了低空经济应用示范区，形成了差异化发展格局，促进区域经济融合与技术验证同步推进。

湖南省率先在政策机制、空域开放、试验验证方面探索改革路径，建设多个飞行服务站和无人机产业园区，致力于打造集试飞测试、产品制造、场景应用于一体的低空产业示范高地。长沙临空经济区已吸引多家头部企业入驻，推动物流、医疗、农业等领域的场景化应用。

依托成都天府新区、德阳无人机产业园，四川省大力推进低空物流运输网络建设，探索山区多点配送模式。省内多个地市推动构建“低空+山区医疗”“低空+森林防火”等特色应用，逐步形成西南内陆低空产业集群。

深圳聚焦核心技术攻关与标准制定，推动 eVTOL 研发、“空中出租车”概念验证和空中交通管控系统建设，并已启动城市低空出行网络试点。

杭州依托阿里巴巴、吉利等企业，系统布局建设低空基础设施网、低空航路航线网、低空飞行服务网，推进低空空域管理改革。大力发展“低空+物流”，推动无人机电子商务物流规模化发展，支持在交通不便地区开展无人机配送服务。同时，加强 AI、物联网、大数据等新技术在现代物流领域的应用，鼓励发展物流大模型，创新打造“AI+物流”等应用场景。支持中小微物流企业“上云用数赋智”，推广无人车、无人船和无人仓等技术装备的普及应用。

4. 典型企业与创新生态初步形成

1) 典型企业

低空经济的典型企业主要包括无人机企业、eVTOL 企业和直升机企业等。

(1) 无人机企业。

大疆创新科技有限公司（简称大疆）成立于 2006 年，总部位于中国广东省深圳市。

作为一家领先的无人机及智能影像设备制造商，大疆在全球消费级无人机市场中占据超过70%的份额，是全球领先的科技公司之一。

大疆的核心技术包括自主研发的飞行控制系统、AI智能追踪、自动避障及高精度传感器。其核心产品包括各类消费级和专业级无人机，如Phantom、Matrice、Inspire系列等（见图1.4～图1.6）。这些产品广泛应用于影视制作、农业植保、测绘、安防等多个领域。



图 1.4 精灵 Phantom 4 Pro
无人机



图 1.5 Matrice 4



图 1.6 Inspire 3

自成立以来，大疆通过持续技术创新和市场拓展，迅速成为全球无人机市场的领导者。2017年，大疆在全球消费级无人机市场的份额超过70%。进入2020年后，大疆继续维持其在无人机领域的领先地位，并在物流、环保等领域的智能化进程中扮演重要角色。大疆在飞控系统、云台技术、视觉避障等核心技术方面拥有自主知识产权，其产品广泛应用于航拍、测绘、农业、安防等多个领域。目前，大疆的代表产品包括“精灵”“御”“悟”等系列。

极飞科技，全称为广州极飞科技股份有限公司，成立于2007年，是一家全球领先的智慧农业科技公司。公司主要从事智能农业设备的研发、制造、销售及服务，致力于用机器人、AI和新能源技术赋能农业现代化。面对农村人口老龄化、气候变化和水资源短缺等挑战，极飞科技打造一套全自主、可持续的智慧农业解决方案，帮助农业生产者实现精准高效的水、肥、药管理，以更少的资源投入获得更高的产出效益。极飞科技的核心产品包括具备全自主喷洒、播撒、航测和运输功能的农业无人机，可赋予传统农机自动驾驶能力的农机自驾仪，以及帮助农场实现精准水肥管理的智能灌溉系统等。

纵横股份，全称为成都纵横自动化技术股份有限公司，于2010年在成都创立。历时十年发展，公司完成了从做飞控系统到做整机的转型，专注于工业无人机相关产品的研发、生产、销售及服务，为客户提供智能化、平台化、工具化的工业无人机系统解决方案。

纵横股份于2015年在国内率先发布并量产垂直起降固定翼工业无人机，将“垂直起降固定翼工业无人机”这一新类别纳入了工业无人机的范畴，其产品具备“大载重、长航时、垂直起降、携带简便”等突出优点，安全可靠，广泛应用于测绘与地理信息、巡检、安防监控、应急救援等领域。

目前，纵横股份拥有系列垂直起降固定翼无人机、多旋翼无人机、大型固定翼无人机、无人直升机、无人值守系统等工业无人机产品。公司产品适配光电吊舱、激光雷达、航测相机、大气传感器、航磁传感器等各类无人机任务载荷，并配备高智能、高适应性和

高可靠的一体化飞控与地面指控系统。此外，公司还提供涵盖图像、视频、点云等多元数据处理的应用软件以及无人机管控云平台，全面满足各类行业用户需求。

中航无人机，全称为中航（成都）无人机系统股份有限公司，是中国航空工业集团旗下核心无人机企业。作为“翼龙”系列无人机的唯一总装单位，该公司产品在 2023 年全球军用无人机出口市场中占约 18% 的份额，仅次于美国“捕食者”系列。中航无人机主要产品为大型固定翼长航时无人机，属于中空长航时无人机系统及高空长航时无人机系统类别。这两类系统在整个军用无人机市场中合计约占 48% 的市场份额，在军用侦察监视、火力打击、反潜巡逻等领域具有广泛的应用和广阔的市场发展空间，并将朝着更加智能化和集成化方向持续发展。

（2）eVTOL 企业。

eVTOL，即电动垂直起降飞行器，是一种使用电力作为动力能源并具备垂直起降功能的飞行器。eVTOL 拥有智能技术应用广泛、起降方便、电气化、低噪声、低排放和高巡航效率等多方面优势。这些特性使其在城市内部、城郊及城际交通等领域具有广泛的应用前景。

峰飞航空科技，全称是上海峰飞航空科技有限公司，是一家专注于电动飞行器的高科技企业，总部位于中国上海。公司成立于 2019 年，是中国最早投入 eVTOL 赛道的科技企业之一。峰飞航空科技致力于提供安全可靠的空中物流运营系统和空中立体出行解决方案，其产品主要包括大型 eVTOL 货运飞行器和载人飞行器。该公司拥有自主研发的复合翼构型，结合了垂直起降和高速前向飞行的能力，使其产品既能实现垂直起飞和降落，也能像固定翼飞机一样高速巡航。峰飞航空科技的产品已在全球多个地区进行飞行测试，其中包括深圳至珠海的跨海跨城空中航线，以及在日本冈山的首次公开飞行。峰飞航空科技通过不断地技术创新和市场拓展，已成为全球电动航空领域的领军企业之一，如图 1.7 所示为峰飞航空科技交付的首架盛世龙 eVTOL 空中出租车。

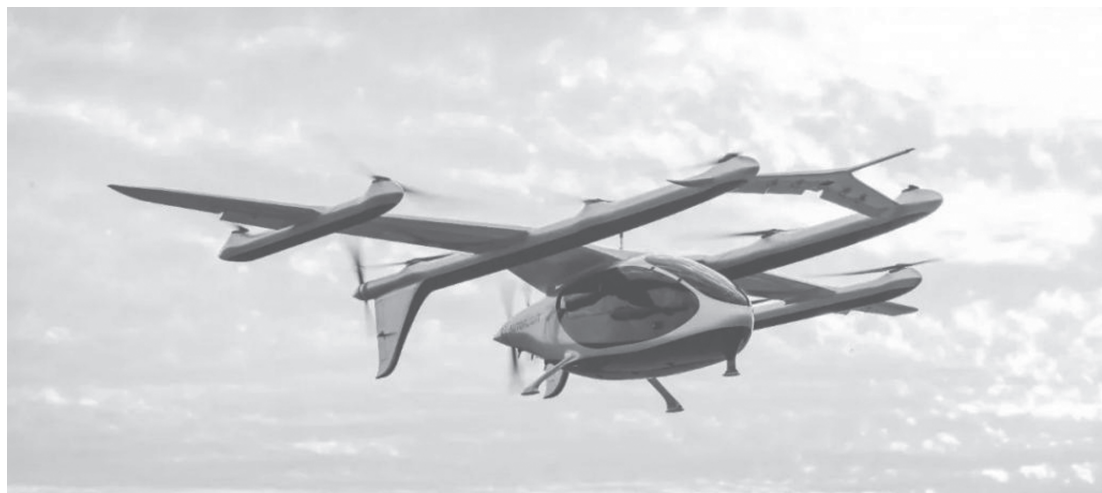


图 1.7 峰飞航空科技盛世龙 eVTOL 空中出租车

亿航智能，全称为广州亿航智能技术有限公司。亿航智能创立于2014年，并于2019年12月12日在美国纳斯达克全球股票市场成功上市，成为全球城市空中交通行业第一股。该公司是全球首家获得无人驾驶载人eVTOL“适航三证”的企业：2023年10月EH216-S获中国民航局颁发型号合格证；2024年3月获生产许可证；同年6月首批交付获适航证。亿航智能的产品矩阵主要涵盖无人驾驶eVTOL，按应用场景可分为城市空中交通、物流运输、智慧城市管理和空中媒体等领域。

御风未来，全称是上海御风未来航空科技有限公司，成立于2015年9月。该公司是业内罕见实现100%国产化载人eVTOL的企业。2021年5月，御风未来成功实现载人eVTOL二分之一缩比验证机首飞，完成了悬停、过渡和巡航状态的控制算法及软硬件验证，以及硬件系统在高原、低温等环境下的试验试飞。公司自主研发的2吨级M1 eVTOL，采用纯电能源、复合翼构型，搭载了4个前拉旋翼和16个垂起旋翼，起飞重量达2.5吨，可实现全自主无人驾驶飞行，单次充电可飞行250千米，巡航速度达200千米/小时。

时的科技，全称是上海时的科技有限公司，成立于2021年5月7日。该公司是国内首家专注倾转旋翼载人eVTOL研发并完成倾转旋翼构型全尺寸验证机首飞的企业。倾转旋翼构型通过旋翼轴的倾转，使飞行器既能像直升机一样垂直起降，又能像固定翼飞机一样高效巡航。时的科技自主研发的E20 eVTOL采用了倾转旋翼构型，设计最大航程达200千米、巡航速度达260千米/小时，最快时速可达320千米。其电机和电气化架构设计简化了动力传输方式，提升了飞行的便捷性和安全性。同时，配备的大直径低转速5叶螺旋桨有效降低了飞行噪声，可以为乘客带来安静舒适的飞行体验。

小鹏汇天，全称是广东汇天航空航天科技有限公司，成立于2020年，是小鹏汽车集团旗下一家专注于智能电动飞行汽车技术的航空科技创新企业，致力于为个人用户创造最为安全的智能电动飞行汽车，并在城市空中交通、个人日常出行及旅游观光等低空领域提供前沿的产品与解决方案。小鹏汇天的核心产品阵容包括旅航者T1、旅航者X1以及旅航者X2等一系列电动垂直起降飞行器，此外还推出了最新的第六代力作——旅航者X3“陆地航母”（见图1.8）。该产品是一款集陆地行驶与空中飞行于一体的创新飞行汽车。值得一提的是，旅航者X2这款电动垂直起降飞行汽车已经成功完成了多次飞行测试；而旅航者X3“陆地航母”则采用了独特的两分体设计理念，由陆行模块与飞行模块两部分组成，支持智能化的自动分离与结合。

（3）直升机企业。

中信海直，全称为中信海洋直升机股份有限公司，是在原中国海洋直升机专业公司基础上改制设立的全国性甲类通用航空企业。公司于2000年7月发行股票并在深圳证券交易所挂牌上市。作为国内领先的通航企业，中信海直的主要业务覆盖了直升机零部件制造、民用直升机整机、航空转包生产、客户化服务以及电动垂直起降飞行器等新能源飞行器的研发。公司作为中国直升机制造业的领军企业，产品包括AC系列民用直升机、运12和运12F系列通用飞机，能够满足政府、企业及个人用户在国防建设、应急救援、医疗救

护、警用航空、农林作业、地质勘探、旅游观光等多个领域的多样化需求。



图 1.8 旅航者 X3 “陆地航母”

中直股份，全称为中航直升机股份有限公司，成立于 1999 年，前身是哈飞航空工业股份有限公司，于 2000 年在上海证券交易所上市，2014 年更名为中航直升机股份有限公司。公司总部位于黑龙江省哈尔滨市，主要运营基地分布于黑龙江省、江西省和河北省等地。中直股份是国内直升机制造业中规模最大、产值最高、产品系列最全的主力企业。公司业务涵盖直升机零部件制造、军民用直升机整机、航空转包生产及客户化服务、eVTOL 等新能源飞行器的研制。主要核心产品包括直 8、直 9、直 11、AC311、A312、A313、Y12、Y12F（见图 1.9）等系列飞机。中直股份致力于推动直升机主业持续发展，实现业绩规模稳步增长。公司还积极推进研发创新，开拓应急救援领域市场，包括森林消防、搜索救援、医疗救护、警用执法等领域。此外，公司已与中国航空研究院、中航科工签署协议，联合研发高速电动垂直起降飞行器（h-eVTOL），加速在低空经济领域的战略布局。

昌河飞机工业，全称为昌河飞机工业（集团）有限责任公司，成立于 1969 年，是一家位于江西省景德镇市的航空工业骨干企业。公司于 1990 年正式成立法人实体，主要从事直升机的科研生产，是中国主要的直升机生产基地之一。昌河飞机工业拥有雄厚的科研与生产技术力量，能够进行直升机的设计、制造和测试。昌河飞机工业生产的主要直升机型号包括直 8 系列（包括直 8、直 10、直 11 等型号）、AC313（见图 1.10）（这是一款大型民用直升机，填补了国产大型民用直升机的空白）及 AC311（轻型民用直升机，是中国第一个通过航空器评审组审查的直升机产品）。同时，昌河飞机工业还与意大利阿古斯塔

公司和美国西科斯基公司等国际航空企业建立了合作关系，共同开展直升机生产。其产品不仅在国内市场上占有重要地位，还成功出口到国际市场，并多次参与国内外重大活动的直升机服务。



图 1.9 Y12F



图 1.10 AC313

2) 创新生态

近年来，随着“低空经济”首次被写入《政府工作报告》，这一万亿级新赛道成为城市竞争的新焦点。2025 年年初，中央空中交通管理委员会选定合肥、杭州、深圳、苏州、成都、重庆 6 城作为 eVTOL 试点，旨在探索城市空中交通商业化路径。同时，中央与地方政策持续加大支持力度，深圳、成都、合肥等城市以差异化路径抢占发展先机，目标聚焦于产业集聚与场景创新。

根据上奇产业通数据，截至 2024 年 10 月 31 日，上述 6 城低空经济相关企业数量总和超过 3000 家，其中深圳数量最多，超过千家；重庆、苏州相关企业数量超过 500 家（详见表 1.3）。从科研机构数量来看，深圳、杭州、成都低空经济有省级及以上研究机构超过 10 家。政府的政策引导和资金支持为低空经济的快速发展提供了重要保障。具体来看，6 个试点城市在低空经济发展中各有侧重：多数城市以城市治理为发展重点，此外杭州和苏州还重点关注其在文旅领域的应用，成都和重庆则聚焦于通用航空领域。同时，试点城市已相继成立低空经济产业基金以支持相关产业发展，并在投资方向上体现出不同的布局重点。

表 1.3 六大试点城市低空经济发展情况

城市	相关企业和研究机构	发展 方向	产业基金规模
深圳	企业 1079 家； 省级及以上研究机构 20 家	到 2026 年，建成 1200 个以上低空起降设施，覆盖载人飞行、物流运输、社区配送、城市治理四大领域	设立规模 20 亿元低空经济产业基金，全部投向低空经济上中下游产业链
重庆	企业 587 家； 省级及以上研究机构 8 家	重点发展空中交通管制服务、智能空机一体化管理系统、无人机地面控制系统、北斗地面定位系统以及地面支持与保障设备	梁平区组建 10 亿元低空经济产业基金
苏州	企业 575 家； 省级及以上研究机构 9 家	到 2026 年，围绕物流配送、载人飞行、旅游消费、应急救援、城市管理等领域打造一批示范应用场景	已签约 16 个低空经济产业基金，总规模超 200 亿元
杭州	企业 330 家； 省级及以上研究机构 12 家	重点打造“低空+物流”“低空+治理”“低空+文体旅”三大品牌，探索“低空+客运”新业态	组建 30 亿元低空经济产业基金，聚焦低空制造、物流、视觉、数据 4 个领域开展投资与招商
成都	企业 325 家； 省级及以上研究机构 19 家	建设西部低空经济中心，激活通用航空、工业无人机等产业优势	已签约低空经济产业基金，目标规模 30 亿元，主要投向低空制造、保障、飞行等关键环节
合肥	企业 156 家； 省级及以上研究机构 3 家	到 2025 年年底，已经在载人飞行、物流运输、公共治理等多个领域取得了关键性的实质突破	安徽省低空经济产业基金在芜湖市成立，规模 10 亿元

1.3 低空技术面临的挑战与机遇

低空技术通常指在较低空域（如地面至 3000 米高度）内进行的各类航空活动和相关产业，包括无人机、通用飞行器以及新型载人 / 无人飞行器等。随着“低空经济”概念的兴起，低空技术正成为经济新的增长点，但其大规模应用也面临诸多挑战，需要从技术、管理、安全等方面加以应对，同时蕴含着巨大的市场机遇和发展动力。本节将从技术挑战、管理与法规挑战、安全与隐私风险，以及市场机遇与区域先行先试等方面进行探讨。

1.3.1 技术挑战

低空技术的发展面临一系列关键技术难题。这些技术挑战直接影响低空飞行活动的安全性和效率，需要科研人员和企业持续攻关。

1. 飞行器安全与可靠性

低空飞行器（包括小型无人机和载人电动垂直起降飞行器等）在长期连续运行中必须确保高度的安全性和可靠性。这涉及飞行器的设计制造质量、冗余系统配置以及对极端环境的适应能力。例如，多旋翼无人机常受限于电池续航与单点故障容忍度，一旦部件失效可能导致坠机事故。载人自主飞行器则需要经过大量测试以验证其安全冗余系统。以亿航智能公司研发的 EH216-S 载人无人机为例，它已在合肥等多地开展日常试飞，以验证其可靠性与安全性。然而，在复杂天气（如强风、雨雾）或高密度运行场景下，保障飞行器稳定可靠仍是重大挑战，必须在材料、控制系统及失效保护等方面持续改进。

2. 空域感知与避障算法

低空空域环境复杂，存在建筑、地形、电线杆、鸟群及其他飞行器等各类静态和动态障碍。无人机须具备空域感知能力和自主避障算法，以实现安全飞行。目前，高端无人机已配备多传感器融合（如视觉、雷达、激光雷达）的避障系统，能够探测一定范围内的障碍物。但现有算法在实时性与精确性上仍有局限，例如，在高速飞行或光线不足条件下，传感器可能难以识别细小电线等障碍，引发碰撞风险。因此，如何提升环境感知精度和算法智能性，使无人机在复杂未知环境中自主规划并避开障碍，是一大技术难题。研究人员正借助 AI 和机器学习优化避障算法，赋予飞行器类似人类的环境理解和决策能力，但要达到可靠商用水平，仍需大量测试和迭代。

3. 通信与导航的连续性与抗干扰性

低空飞行器依赖无线通信链路与导航定位系统维持控制和姿态稳定。在城市峡谷等区域，GPS/北斗等卫星导航信号易受高楼阻挡或多径干扰，导致定位精度下降甚至丢失；无线通信链路也可能因建筑遮挡或频段干扰而中断。此类通信和导航的中断会严重影响飞行安全。例如，若无人机在飞行过程中，一旦 GPS 信号受到干扰或遮挡，可能导致定位精度急剧下降。同样，通信中断将导致操控者无法监控和干预无人机。为此，需要提升通

信与导航的抗干扰能力和冗余设计：一方面可采用惯性导航、地标视觉识别等辅助手段，在 GNSS 信号短暂丢失时维持定位；另一方面可引入 5G 蜂窝网络等新型通信方式作为数据链备份，以增强链路的稳定性和扩大覆盖范围。此外，抗干扰技术（如跳频、加密）也应应用于无人机通信和导航系统，以防范恶意干扰。总体而言，实现全天候、连续可靠的通信导航支撑，是低空技术规模化应用的基础保障。

4. 海量数据处理与智能计算挑战

低空飞行器在执行任务时，搭载的高清摄像头、激光雷达、多光谱仪等传感器会产生海量、多模态的实时数据流。在此数据密集型场景下，如何利用有限的机载计算资源实现高效实时处理，是一项重大挑战。一方面，飞行平台受限于尺寸、功耗和载重，其机载算力往往难以支撑复杂的 AI 模型进行即时分析与决策；另一方面，若将所有原始数据传输至云端处理，不仅会占用巨大通信带宽，网络延迟也无法满足自主避障、目标跟踪等任务对毫秒级的响应要求。因此，如何在端、边、云之间合理分配计算任务，设计轻量化、高效率的智能算法，并构建能够协同处理海量数据的分布式计算架构，是当前低空技术体系必须攻克的核心技术难题之一。

1.3.2 管理与法规挑战

尽管低空技术展现出巨大的发展潜力，但其规模化应用依然面临着管理与法规层面的严峻挑战，这些挑战系统性地制约着产业的健康发展。

正如本章前述内容所述，当前我国低空空域管理体系仍存在诸多亟待解决的问题。一是精细化管理体系尚不完善，传统空中交通管制模式难以适应无人机等“低慢小”飞行器高密度、高动态的运行特点，导致空域资源利用效率不高，且存在监管盲区，近年来频发的无人机扰航事件便是例证。二是法规体系滞后于技术的快速迭代，尤其在无人驾驶飞行器的适航标准、飞行审批流程、事故责任认定等方面，尚缺乏全面且明确的法律规范，这使得新业态的合规性面临不确定性，增加了企业运营的风险。

此外，低空经济具有显著的跨行业属性，其管理必须依托高效的跨部门协同机制，然而当前的管理涉及军方、民航、公安、工信等多个部门，彼此间的协调与信息共享机制尚未健全。这种多头管理若缺乏统一协调，易导致审批流程烦琐、监管责任不清、政策执行效率低下等问题，成为制约产业融合创新的重要瓶颈。

因此，要真正释放低空技术的经济与社会价值，必须在顶层设计上推动空域管理体制的深化改革，加快构建与技术进步相匹配的、统一协调的法规标准体系，并建立起高效的跨部门协同管理平台，从而为低空活动的有序、安全、高效开展提供坚实的制度保障。

1.3.3 安全与隐私风险

随着低空技术的广泛应用，其开放性和新颖性也带来了前所未有的安全与隐私风险。

高校教材应重视相关风险意识的培养，推动相应防护措施的完善。

1. 数据安全与通信泄露问题

低空飞行器通常搭载摄像头、传感器等设备，会收集并传输大量视频影像与定位数据。若缺乏有效安全措施，这些数据可能在传输过程中被截获，或在存储时遭受未授权的访问，造成泄露风险。例如，无人机拍摄的城市交通影像一旦被不法分子获取，可能被用于非法用途。此外，飞行器与地面站之间的遥测及控制通信若被窃听或破解，不仅会导致敏感信息外泄，还可能使攻击者掌握飞行器状态甚至实施干扰。为应对此类风险，需从软硬件两方面加强防护：采用高强度加密算法保护遥控与数据链路，实施通信双方身份认证；对无人机存储介质及云端平台执行严格的访问控制与安全审计。目前，部分行业领先企业已开始探索利用区块链技术为无人机飞行数据建立不可篡改的分布式账本，以提升数据可信度与安全性。同时，还应制定明确的数据管理规范，界定无人机采集数据的归属权、使用范围与销毁机制，从源头上防范数据滥用和泄露。

2. 飞行器劫持与恶意干扰风险

低空飞行器可能成为黑客攻击或恶意干扰的目标。若无人机的控制系统存在漏洞，攻击者可远程入侵并劫持控制权，改变其飞行路径或功能，造成安全事故。此外，不法分子也可能通过干扰 GNSS 信号或无线电通信，使无人机失去定位或通信连接，导致其坠毁或误入禁飞区域。例如，在执行任务时，无人机若遭遇大功率的 GPS 干扰器，其导航系统可能失效。又如，使用“无人机干扰枪”发射电磁脉冲，可迫使无人机紧急降落。此类恶意为不仅危及单架飞行器的安全，也可能对地面人员与财产造成损害。为降低相关风险，需要从技术和管理两个层面着手：技术上应提升无人机抗干扰能力，如采用多源导航融合与抗欺骗算法，确保在局部信号受干扰时仍能安全返航；管理上应建立无人机识别和追踪体系，便于在异常发生时及时追溯责任人，并在重要区域部署反制设备以防范不明飞行物侵入。同时，为防范劫持，还应在飞控软件中引入安全引导机制，一旦检测到异常指令或信号，即自动切换至预设安全模式（如自动返航或降落），避免飞行器被他人完全控制。

3. 隐私侵犯与公众接受度问题

低空无人机的大规模飞行引发了公众对隐私与安全的普遍担忧。当配备高清摄像头的无人机在居民区上空飞行时，易引发被监视的顾虑；即使未进行拍摄，其噪声或潜在的坠落风险也可能使人感到不安。这种隐私侵犯的潜在威胁和心理压力，会降低公众对低空技术的接受度。若处理不当，甚至可能引发社会抵制。因此，必须在技术与制度层面采取措施，保障公众隐私权益。例如，在居民密集区域限制无人机低空徘徊飞行与高分辨率拍摄，或要求飞行前取得许可。目前，很多无人机厂商已在飞控系统中预设“禁飞区”和“限高区”（特别是在机场、城市核心区等敏感区域），以防止设备误入。政府亦需完善法律法规，对侵犯隐私的无人机行为做出处罚规定，并明确公众有权拒绝在未经许可情况下对其私有区域进行拍摄。此外，还应加强公众宣传与沟通，向社会说明低空技术应用在应

急救援、物流配送等领域的公益价值，以及管理部门为保障安全和隐私所付出的努力，从而逐步提升公众接受度。唯有建立起社会对低空技术的安全感和信任感，其大规模商业化应用才能顺利推进。

1.3.4 市场机遇与发展动因

尽管面临诸多挑战，低空技术领域仍蕴含着巨大的市场机遇，正成为各国竞相布局的新兴产业。在中国，政策支持、技术融合与区域需求共同驱动，正推动低空经济蓬勃兴起。

1. 国家战略引导（新基建、低空开放）

国家层面的战略部署为低空技术发展提供了明确方向与有力支撑。近年来，中国已将低空经济纳入国家发展议程，相继出台了一系列顶层设计和支持政策。例如，中国民航局在《“十四五”通用航空发展专项规划》中明确提出要大力发展低空经济和城市空中交通，将无人机、eVTOL等纳入未来航空体系。同时，“新基建”战略持续推进5G网络、卫星互联网等基础设施建设，为低空飞行提供了不可或缺的通信和定位支撑。

在空域管理方面，我国长期以来实行较为严格的管制，但近年来已逐步推动低空空域管理改革试点，在部分地区下放空域管理权限、简化飞行审批流程，有效激发了通用航空和无人机产业活力。据统计，截至2025年年初，全国已有包括北京、广东、安徽、四川、湖南等在内的30个省（区、市）将发展低空经济明确写入《政府工作报告》，显示出各地积极响应国家战略、布局低空产业的热情。

此外，国家还通过资金投入和示范工程给予实质性支持，如推进新型低空航路建设、低空监视系统研发等。这种自上而下的战略引导，为低空技术创造了良好的政策环境和资源保障，显著降低了产业发展的不确定性。

2. 技术融合驱动

新一轮科技革命为低空技术注入了强劲动力，多种前沿技术的交叉融合正不断突破既有瓶颈、催生新模式。

首先，AI在无人机领域的深入应用，使自主飞行、目标识别、群体协同成为现实。智能算法可协助无人机优化航线规划、识别地物目标甚至编队飞行，为拓展复杂场景下的低空应用提供了技术可能。其次，区块链等分布式技术为低空领域的管理和交易模式带来了创新思路。例如，利用区块链对无人机进行唯一身份标识与认证，可实现飞行数据上链存证，提高监管透明度和数据可信度；在物流场景中，区块链还能用于无人机快递的智能合约执行和全流程追溯。最后，5G通信凭借其高带宽、低时延的特性，高度契合无人机实时数据传输和远程控制的需求。依托5G网络，运营商能够实现对无人机的超视距控制与高清视频实时回传，并通过边缘计算支持多机快速协同。

这些融合应用已在部分试点中得到验证：深圳等城市的管理平台开始融合AI图像识别技术强化空域监管；相关企业尝试用区块链记录飞行日志；5G网络支撑下的无人

机快递测试也在降低延迟、提高可靠性方面展现出明显优势。可以预见，随着这些技术的持续成熟，其与低空飞行的融合将催生更多创新应用，进一步加速低空产业的商业化进程。

3. 区域经济发展需求与典型示范带动

各地区基于自身发展需求，将低空技术视为新经济增长点、提升区域竞争力的重要手段。例如，偏远山区、海岛等交通不便地区迫切需要无人机配送来解决“最后一公里”配送难题；大城市则为缓解交通拥堵、提升应急响应效率，积极布局城市交通与无人机巡查等应用。这种源于实际的发展需求，促使地方政府与企业积极拥抱低空技术。

同时，早期形成的典型示范应用产生了显著的带动效应，向市场和社会证明了低空技术的实用价值与商业潜力。以深圳为例，该市聚集了大疆等一批头部无人机企业，已形成全国领先的无人机产业集群。2023年，深圳率先宣布进入“低空经济元年”，出台专项支持政策，并积极开展无人机物流配送、城市治理等示范项目，成为全国低空经济发展的重要标杆。又如，美团公司在深圳获颁首张面向人口密集区的无人机配送试运行许可，成功开展外卖配送航线运营，为低空物流应用树立了范例。

这些典型案例不仅验证了低空技术在物流、城市管理等领域的可行性，也增强了其他地区布局该产业的信心。有研究指出，低空经济的发展有望在三维空间催生更多创新应用，并可有力撬动广阔的民生与消费市场，成为新的经济增长点。由此可见，真实的市场需求与可行的示范经验正形成正向循环，持续推动低空技术从试验探索走向大规模应用，为产业发展注入持久的内生动力。

1.3.5 国内区域的先行先试机会

1. 合肥等城市低空经济试验区布局

在政策引导下，一批具备条件的地区率先承担起低空经济先行先试的使命，积极探索低空技术与产业融合的创新路径。为系统梳理我国典型区域在低空经济领域的探索实践，本节采用“区域出发点、主打场景、推进机制、空地关系、未来走向”多维分析框架，提炼代表性省份的发展特征，形成对地方政策路径和空间实践的系统认知。

1) 安徽：打造长三角中部空中交通引领区

区域出发点：安徽地处长三角与中部地区交会处，合肥作为国家级科技创新重要策源地，具备推动新型空中交通模式试验的科研基础和政策动力。骆岗机场转型后释放出来的大规模城市空域资源，为低空场景探索提供了稀缺载体与理想平台。

主打场景：以城市空中通勤为核心目标，通过EH216-S载人飞行器在合肥城区和中央公园开展常态化试飞，逐步构建“可落地、可运营、可示范”的城内空中交通雏形。同时，黄山、安庆等地依托优质空域与景观资源，布局载人直升机观光、空拍直播、低空文化传播等项目，进一步丰富了应用体系。

推进机制：合肥成立城市空中交通产业推进专班，出台专项发展规划，推动“飞行即评估、试点即政策”的动态迭代机制，实现场景持续优化与技术同步验证。通过地方财政与产业基金协同设立平台公司，整合无人系统制造、起降设施建设与运营管理多方主体，形成“政府引导、企业主导”的发展模式。

空地关系：以骆岗产业园为核心，建设常态化飞行验证基地、垂直起降综合枢纽与社区级平台网络。起降点布局深度融入合肥地铁枢纽、高新区楼宇顶端与城市公园，构建“轨道+飞行”无缝衔接的立体交通网络。通过低空走廊连通串联各级城市功能节点，逐步形成网状化空中交通图谱。

未来走向：安徽将在长三角一体化战略框架下，积极推动“低空互联互通”，建设中部的适航认证基地与飞行服务平台，带动芜湖整机制造、滁州配套零部件、六安试飞验证等环节协同发展，逐步构建功能互补、联动发展的空中产业走廊。

2) 重庆：以行政主导推进飞行自由度提升

区域出发点：作为西南地区唯一的直辖市，重庆地形复杂、山地丘陵广布，传统交通设施建设成本高、周期长。部分区县受交通条件制约，区域协同发展受限，应急响应与物流效率面临挑战。在这一地理与经济背景下，发展低空经济成为缓解城乡发展不均、拓展城市治理空间的重要途径。重庆同时具备雄厚的“制造+物流”产业基础，为低空运输与相关装备制造提供了双重优势。

主打场景：重庆重点布局“城市空中通勤、山区应急响应、低空智慧物流、农林巡检”等多元场景。其中，“县县通、乡乡通”空中通勤模式着力破解高山与复杂地形导致的交通障碍；应急响应体系依托无人机编队与智慧平台，实现地质灾害的快速侦测与救援投送；在智慧物流方面，无人机承接“最后一公里”配送任务，有效连接交通盲区与偏远山区。

推进机制：为推进低空经济高质量发展，重庆发布《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）》，明确空域划设创新、飞行服务机制优化、制造集群支持、运行监管数字化、试飞场与起降点建设，以及空中交通管理系统标准建设等六大类举措。通过“政府统筹、部门协同、企业共建”的机制，重庆正构建政策、规划与应用协同推进的复合治理体系。

空地关系：重庆以“空地融合”为导向，推动起降设施与城市功能空间协同布局。到2027年，全市计划新增1500个起降点，覆盖城市核心区商业楼顶、医院、政务中心，并延伸至偏远区县、林区及山区。飞行走廊规划注重避让高层建筑与生态保护区域，逐步构建多层次、点线面结合的起降网络。依托飞行服务站与数据共享平台，推进空中交通与地面交通一体化调度。

未来走向：重庆致力于从“制度改革、技术标准、产业生态”三个维度建设全国领先的低空经济示范区。未来将进一步统筹空域资源与基础设施建设，推动通用航空制造、适

航服务与数字监管平台联动发展。同时，将低空经济深度融入城市空间重塑与区域一体化进程，探索“低空+交通枢纽+产业园区”融合模式，形成具有山地特色的立体化发展新格局。

3) 四川：高原与城市双结构驱动下的多场景融合发展

区域出发点：四川地处西南腹地，地形复杂多样，兼具盆地、丘陵和高原，部分高海拔地区交通严重受限。尤其在自然灾害频发背景下，低空通航系统成为快速响应与物资投送的重要补充。同时，四川作为制造业大省，已具备无人机及配套零部件的产业链基础，为低空经济发展提供了制造支撑与试飞验证的双重优势。

主打场景：四川坚持“高原短途运输+应急救援+低空物流+森林草原防火”四条主线并行，同时拓展农业植保、生态监测、文旅观光等多种延伸场景。在灾害频发区域，无人机承担灾前预警、灾中侦察与灾后评估的关键职能；在农业大省背景下，山区农林作业飞行器需求持续增长，已催生出适配高海拔气候的专用无人机产品体系。

推进机制：四川省印发《关于促进低空经济发展的指导意见》，明确构建“产业集聚+通航运营+监管平台”三位一体模式。政策层面建立跨市州协调平台，推动空域划设、运营审批与设施建设流程简化优化；财政方面设立专项发展资金，支持技术研发、试飞验证与场景试点；产业组织上，引导地方龙头企业建设研发中心与运营平台，形成市场应用与技术创新双轮驱动格局。

空地关系：四川积极布局通航基础设施网络，规划建设通用机场 20 个以上、垂直起降点超 100 处。高原区域优先布局无人机起降点、边防巡查补给点和森林火情监控平台；城市区域推动医院、校园、公园、社区等节点嵌入无人平台与调度站，激活城市低空资源。所有起降点数据接入统一信息平台，实现“空中—地面—数据”的一体化感知与协同调度。

未来走向：四川将持续发展适应高原特殊气候的通航产品体系，培育具备高原飞行资质的运营企业与专业人才。同时，将“通航服务公共化”作为制度目标，推动低空服务融入应急管理、交通体系与政务治理体系，致力打造全国首个“空天地一体、高原保障完备”的省域级低空经济发展与治理样板。

4) 贵州：高原型制造生态与场景化融合驱动发展

区域出发点：贵州地处云贵高原，山地丘陵面积广泛，地表通行效率低，生态环境复杂且重要，传统基础设施建设面临难度大、成本高的问题。在此背景下贵州已培育形成了以贵飞、航天电器为核心的通航与无人机制造产业链，具备向“空中数字经济”转型的扎实产业基础。

主打场景：贵州聚焦“遥感测绘、数字地图编制、低空文旅、应急投送”四大场景，突出无人机在生态保护、地质勘查、地质灾害监测等领域的长航时、精细化作业优势。依托山区起伏地形，发展低空跳伞、热气球体验等文旅场景逐渐成为市场化探索的新切入点，有效拓展了低空经济的消费辐射范围。

推进机制：政府出台《贵州省低空经济高质量发展三年行动方案（2025—2027年）》，推动“平台+制造+运营”一体化发展模式。设立省级低空技术委员会，统筹空域资源协调与适航试点管理；建设多个试飞试验基地，鼓励本地高校开设飞行器设计、无人系统运维等交叉学科，强化人才支撑。地方金融工具也积极参与场景项目投资，激发市场主体活力。

空地关系：重点推进贵阳、安顺、六盘水等重点城市起降平台建设，提升起降点与基础管网匹配度。在山区、林区部署临时起降点与数据采集站，利用现有高点建筑搭载航测中继平台，集成通信、能源与飞行控制系统。通过应急调度平台，实现飞行器状态、空域分配与地面交通信息实时联动。

未来走向：贵州将持续构建“全场景感知+多平台协同+遥感数据应用闭环”体系，推动飞行器研制、场景试验与数据处理一体化发展。进一步深化“低空+生态”“低空+防灾”“低空+旅游”融合模式，致力成为西南地区低空经济应用服务转型的重要示范标杆。

5) 云南：民族文旅资源引领下的飞行生活试验区

区域出发点：云南是我国重要的生态大省与旅游大省，民族风情多元，地形以山地和边境地区为主，局部交通与物流通达性受限。在跨境电商和数字文旅融合发展的趋势下，云南亟须构建空中物流与观光通道，形成“空中补网”机制，更好链接滇中、滇西与南亚、东南亚市场。

主打场景：“低空+旅游”是云南最具特色的突破口，文山、红河、大理等地已开展编队表演、景区航拍、空中观光等项目。同时，云南积极试点“低空+边境物流”“低空+生态巡查”“低空+应急防灾”等服务型业态，探索民族地区、边境县城的飞行通勤模式。

推进机制：云南省出台《云南省无人机产业发展三年行动计划（2023—2025年）》等一系列支持政策，建立省级飞行服务体系建设协调机制，推动州市与企业共建低空经济招商专班。昆明依托空港优势引导平台型企业落地，文山、玉溪等地设立专项财政资金，支持景区试飞、飞行营地建设与人才培养。

空地关系：以“三张网”为核心构建基础设施体系。通用起降网布局州市间通航补给点，数字空域网建设集中飞行调度平台，服务保障网联通起降场站、气象节点与平台数据服务系统。起降点选择与民族村寨、旅游线路、跨境口岸相结合，形成融合地方文化与山地特色的低空运营地理网络。

未来走向：云南将持续扩大低空航线网络密度，打造“飞云南”文旅IP，建设“空中丝绸之路”试验区，增强低空产业对边疆文化传播、生态保护与高原物流的战略支撑作用，形成以文旅引领、多业态融合的低空经济发展范式。

6) 西藏：高原特殊场景下的空中通勤试验田

区域出发点：西藏地形极端复杂，地面交通建设与运维成本高昂，是我国最典型的

“低空刚需”区域。边境线长、突发事件风险高，对无人机巡查、应急投送和通信中继等功能需求迫切。

主打场景：围绕“低空+应急+补给+文旅”主线，重点开展农牧区无人机巡查、偏远乡镇药品配送、宗教文化景区空中观光与自然保护区气象监测等场景。已初步构建以通用航空站点为支点的区域性空中公共服务网络。

推进机制：西藏自治区政府出台《西藏自治区支持低空经济高质量发展的若干政策（征求意见稿）》，设立低空经济专项资金，由财政部、国家发展和改革委员会、应急管理部等多部门协同推动空中交通设施建设与示范场景建设。支持本地科研机构开展高原飞行环境适应性研究，着力解决“飞得上去、飞得安全”的技术难题。

空地关系：起降点布局以林芝、日喀则、山南等交通节点城市为核心，逐步向周边高寒区、边境乡、景区延伸，形成“点一线一面”联动的空中交通体系。飞行器适配设施须具备耐低温、抗风雪、太阳能供电等特殊性能，成为技术攻关和系统设计的重点。

未来走向：西藏将着力构建“飞行服务站+应急调度中枢+边境补给廊道”三位一体的空中安全体系，推动形成以“飞行公共化”为导向的政策型低空体系示范区，力争在高原空域数据治理、民族地区飞行服务保障方面形成可复制、可推广的经验。

2. 典型融合应用场景探索

安徽等先行地区在推进低空试点过程中，注重将低空技术与本地优势产业、民生服务需求紧密结合，积极打造具有可推广价值的典型应用场景。

智能制造领域：依托合肥、芜湖等地在装备制造与新能源汽车领域的产业基础，无人机被应用于工厂园区内的设备巡检、仓储盘点等任务，助力实现制造流程数字化与智能化。同时，本地企业也加快布局无人机整机研发与供应链配套体系，培育新兴产业增长点。

交通运输领域：围绕物流配送与城市交通难题，试点地区正在探索低空技术赋能运输体系的可行路径。在皖西等偏远山区，无人机被用于投递医疗物资、应急器材的配送任务，有效解决农村物流“最后一公里”难题；在城市区域，则探索无人机与配送站、地面公交系统协同运行的机制（见图 1.11），逐步构建“空地一体”的物流网络，提高时效性并缓解地面交通压力。未来，随着载人无人机技术逐步成熟，城市空中摆渡等新型交通服务也有望落地，形成对现有公共交通体系的有益补充。

电力巡检与公共管理领域：安徽电网广泛覆盖丘陵与农村区域，传统人工巡检成本高、效率低。如图 1.12 所示，搭载高清摄像头和红外传感器的无人机可用于高压输电线路、变电站的自动巡检，及时发现故障隐患，显著提升运维效率和应急响应能力。在公安、消防等公共安全领域，无人机也逐渐融入日常执法与应急救援体系：应用于高空交通监控、火场侦察、应急物资输送等任务，进一步提升公共管理的智能化与服务化水平。



图 1.11 顺丰速运低空物流



图 1.12 无人机电力巡检

上述跨行业融合的应用实践，不仅切实回应了多个领域的现实痛点，也为低空技术开辟了丰富多元的落地场景。当前，低空经济正处在“技术突破”与“市场扩张”并重的关键发展阶段。一方面，飞行器安全与可靠性、通信与导航系统的连续性与抗干扰能力、低空空域的精细化动态管理等核心技术环节仍需持续突破；另一方面，法律法规与行业标准体系尚不健全，亟待完善，从而为技术规模化应用提供制度依据与风险管控框架。

在技术突破与制度创新双轮驱动下，低空经济有望在安全、有序、可控的前提下实现跨越式发展，逐步成为我国战略性新兴产业的重要力量，也为培育新质生产力、构筑全球科技竞争新优势提供关键支撑。

思考题

1. 请结合我国低空经济的发展背景，说明低空空域开放为何被视为新质生产力的关键支撑。
2. 如何理解低空技术在“技术突破+制度创新”双轮驱动下的发展模式？
3. 你认为低空技术的发展将对传统交通运输体系带来哪些冲击？
4. 低空技术体系包括哪些关键组成部分？这些部分在低空经济中发挥怎样的作用？
5. 当前低空技术发展面临的主要技术与政策挑战有哪些？如何解决？