

低空经济发展白皮书 深圳方案

转化低空为经济资源 实现低空空域可计算
创建工作生活新范式 开拓经济增长新空间

粤港澳大湾区数字经济研究院

International Digital Economy Academy (IDEA)

2022年11月22日

版本：1.04

编号：No. 01762

此白皮书电子定制版谨赠与王启程同志指导及惠存。

邮箱: wangqicheng@glarun.com

电话: 13914478690

尊敬的王启程同志:

感谢您对《低空经济发展白皮书-深圳方案》的兴趣, 请收阅此唯一编号的白皮书。查收、阅读白皮书即表明您已阅读、理解并同意尊重如下版权声明。

版权声明: 除特别注明之外, 本白皮书所有内容(包括但不限于文字内容、图片及排版设计等)之著作权均属于粤港澳大湾区数字经济研究院(福田), 并受法律保护。未经事先书面许可, 任何单位及个人均不得复制、发行或通过任何方式传播本白皮书; 经事先书面许可转载、摘编或以其他方式使用本白皮书内容时, 应注明“来源: 粤港澳大湾区数字经济研究院(福田)”。本白皮书部分信息源自合作方或第三方, 如您发现本白皮书使用了您拥有著作权的作品并对此持有异议, 请您发送电子邮件至落款邮箱, 我们会及时与您联系或采取必要措施。

我们希望本白皮书对您的工作、学习和科研有所帮助, 期待收到您的反馈和建议, 对现有版本进行改进。如果您感兴趣与我们合作, 投身到低空经济的大潮中, 也请您联系我们。我们在低空经济的各方面有很多的合作机会, 也有更多的工作岗位虚位以待。

祝好!

粤港澳大湾区数字经济研究院(福田)

低空经济分院

laser@idea.edu.cn

二零二四年六月二十二日



扫码申领白皮书1.0



扫码申领白皮书2.0

前言

沈向洋

粤港澳大湾区数字经济研究院

人类的历史就是一部勇闯无人区的史诗，从航海时代哥伦布发现北美新大陆，到美国先锋者开发西部，到莱特兄弟翱翔天空，再到人类探索太空星际环游，不一而足。相较于高空飞行成熟的空域管理和商业运营，低空飞行刚刚起步，管理几乎还是空白。低空空域是一个被忽视和浪费的自然资源，也是一个新的无人区，有着巨大的发展潜力和想象空间，有着比地面交通更高维度、更丰富多样的产业和应用前景，有着超万亿级的产业规模，亟待人们去探索、去开拓、去挖掘、去发展、去实现。放眼中国乃至全世界，深圳既在相关技术和行业具有独特优势，又有先行先试的政策优势，抢抓低空发展机遇，创造新型低空产业，打造低空经济样板，是历史赋予深圳的使命。《低空经济发展白皮书——深圳方案》汇集了粤港澳大湾区数字经济研究院以及相关政府部门和企业对发展低空经济的理念、愿景、思路和方法，旨在巩固深圳低空制造全球领先地位，建成首个大规模安全融合低空飞行城市，引领相关低空航行科技前沿，催生丰富完备的低空产业生态，将经济发展提升到新高度，将工作生活拓展出新范式。我们希望此次白皮书的发布，为其他地方发展低空经济提供参考，为深圳发展低空经济汇聚更多的智慧和力量。期待大家和我们一起开启人类勇闯无人区的新篇章。

摘要

《低空经济发展白皮书——深圳方案》阐述了粤港澳大湾区数字经济研究院（下简称“IDEA 研究院”）对发展低空经济的理念、愿景、思路和方法。

低空空域是一个远没被开发的自然资源，一片尚未被探索的无人区，蕴藏着甚至超过土地资源的巨大的经济价值。低空经济以低空飞行活动为牵引，将传统的二维的地面活动扩展到了三维的低空空间，带来经济发展新空间，可产生超万亿级的经济增量；同时低空的空中优势，将催生更高维度的创新应用，打造工作生活新范式。

IDEA 研究院提出将低空空域从“自然资源”（Natural Resources）转变为“经济资源”（Economic Resources）的理念，并指出从“可通达”（Accessible）空域转变为“可计算”（Computable）空域，进而成为“可运营”（Operable）空域的实现路径。低空空域不应仅仅是承载低空飞行的物理空间，更应成为实现新型商业和社会价值的生产要素。

发展低空经济恰逢其时，既有科技进步的驱动，也有无人机产业的支撑，更有政府一系列政策的推动。抢抓低空发展机遇，将带来一个包括低空制造、低空飞行、低空保障和综合服务的超万亿级产业集群。同时，技术、政策、机制的突破，分阶段的规划实施，低空空域的有序开放，产业生态的建设打造，产业投资的激励引导，将有助于深圳率先形成较为成熟的低空商业运营模式，为全国乃至全球提供可复制、可推广的低空经济样板。

未来低空管理的核心挑战是如何支撑以“异构、高密度、高频次、高复杂性”为特征的大容量融合低空活动，并在安全可控的前提下，实现低空经济规模化、可持续、高质量的快速发展。同时，有人/无人、载人/载物、即时/预约等各类低空服务的兴起，将创建工作生活的新范式，为人们带来更加丰富多元的体验。建设统一的低空智能融合基础设施，将低空转变成可计算空域，则是发展壮大低空经济的首要前提和必由之路。

围绕低空活动和经济发展的需求，我们提出并正致力于开发智能融合低空系统（SILAS, Smart Integrated Lower Airspace System）。SILAS 的建设将兼顾安全与发展，既要全力守护低空活动安全的底线，又要充分考虑经济与社会效益的实现，还要始终坚持基础设施架构的高安全性、可扩展性和开放能力。基于各层级智能技术的运用和协同，SILAS

将引导低空智能融合基础设施的建设，打造“管服一体化”的系统平台，协助政府空管部门实时精准管控，赋能运营企业创新应用场景。

低空经济的高质量发展需要各方共同推动，开展空域确权与可计算空域的前沿经济与技术领域的理论研究，建设数字化的低空智能融合基础设施，启动多场景的产业化应用试点，推进多种技术深度融合、自主可控和世界领先。美团、顺丰、东部通航三家低空头部运营企业的业务案例，涵盖了外卖配送、物流运输、载人飞行等应用场景，让人开阔眼界和思路，也留下极大的想象空间。

目录

1. 从自然资源到经济资源的转变.....	1
1.1. 低空空域和低空经济	1
1.2. 新视角看待低空空域：从自然资源到经济资源	1
1.3. 低空空域：从“可通达”到“可计算”再到“可运营”	2
1.4. 低空经济发展前景广阔	4
2. 低空经济发展的机遇.....	6
2.1. 积极的政策推动	6
2.2. 有力的产业链支撑	8
2.3. 科技的进步驱动	9
3. 低空活动的属性与挑战.....	11
3.1. 低空活动的特征属性	11
3.2. 低空活动面临的挑战	14
3.2.1. 缺乏科学有效的低空空域管服手段	14
3.2.2. 缺乏统一标准规范的共享基础设施	15
3.2.3. 缺乏促进低空经济发展的法律法规和交通规则	15
3.2.4. 低空活动的数字原生性带来的技术挑战	15
4. 智能融合低空系统（SILAS）.....	16
4.1. SILAS 的设计理念：融合与智能	16
4.2. SILAS 的目标	17
4.2.1. 建立数字化的低空运行环境	18
4.2.2. 实现智能化空域设计和航路规划	19
4.2.3. 提升融合低空运行的数字化水平	20
4.2.4. 推动管理与服务的端到端数字化	21
4.3. SILAS 的落地路径	22
5. 深圳方案-低空智能融合基础设施.....	24
5.1. 低空智能融合基础设施的构成	24
5.1.1. 感知与通信	24
5.1.2. 数字孪生	25
5.1.3. 能力中台	26
5.1.4. 低空服务	26
5.1.5. 低空大规模智能研发平台/开放平台	27
5.2. 低空智能融合基础设施的架构特点	27
5.2.1. 分层架构设计	27
5.2.2. 高安全性：软硬件安全保障最高运营安全	28

5.2.3.	可扩展性：支持运行规模的快速扩展	28
5.2.4.	开放能力：开放开发平台支撑各类创新应用	28
5.3.	低空智能融合基础设施的技术发展	29
5.3.1.	通讯感知一体化解决方案	29
5.3.2.	超大规模飞行器协同飞行规划与计算	29
5.3.3.	飞行器、SILAS 与配套低空基础设施的多方协同演进	30
5.3.4.	非合作飞行器的识别与处置体系	30
5.4.	深圳低空头部运营企业的探索案例	30
5.4.1.	美团：外卖配送、“高密度”、“生活改变”	30
5.4.1.	顺丰：物流运输、“高频次”、“异构”	32
5.4.1.	东部通航：载人航行、“多场景”、“eVTOL 新范式”	32
6.	低空经济发展路线图.....	34
6.1.	低空技术发展路线图	34
6.2.	低空产业的发展路线	35
6.3.	低空空域发展路线图	35
	总结.....	37

图列表

图 2.1 全球 UAM 准备度指数排名（2021）	7
图 2.2 中国推动低空经济的相关政策和规定	8
图 2.3 2016-2021 年深圳市无人机产业产值	9
图 3.1 矢量推进型 eVTOL	11
图 3.2 升力+巡航型 eVTOL	12
图 3.3 多旋翼型 eVTOL	12
图 3.4 顺丰丰翼无人机运输机型	13
图 4.1 智能融合低空系统（SILAS）框架体系	17
图 4.2 空域定性评价框架	19
图 4.3 航线调度示意图	20
图 5.1 低空智能融合基础设施的四张“网”	24
图 5.2 低空智能融合基础设施的构成	25
图 5.3 美团无人机未来 3-5 年深圳发展规划	31
图 5.4 顺丰丰翼科技业务模式	31
图 5.5 东部通航粤港澳大湾区业务发展	32
图 6.1 低空经济发展的四个阶段	34

1. 从自然资源到经济资源的转变

1.1. 低空空域和低空经济

低空空域通常是指距正下方地平面垂直距离在 1000 米以内的空域，根据不同地区特点和实际需要可延伸至 3000 米以内的空域。

低空经济是以低空空域为依托，以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的低空飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态，广泛体现于各类产业形态之中，在促进经济发展、加强社会保障、服务国防事业等方面发挥着日益重要的作用。

1.2. 新视角看待低空空域：从自然资源到经济资源



人类天生没有翅膀，但飞行却是人类内心深处的渴望和向往。

人们勇敢探索，从利用爆竹升空，到模仿鸟类飞翔，种种尝试皆以失败收场。人类没有因此放弃，逐渐学会用科学实验代替传统经验，迎来了工业革命和科技的突飞猛进，伴随几代发明家的共同努力，解决了飞机升力、动力、控制的三大难题，终于在二十世纪让飞行的梦想成为现实。从 1903 年莱特兄弟试飞第一架现代意义上的飞机，到 1970 年波音 747 喷气客机首次商业飞行，人类真正实现了在高空自由穿梭于地球不同地点的壮举，极大地提升了工作生活的效率和体验。

然而，相较于百年来传统航空对高空的开发和利用，人类对于低空的开拓尚处在早期萌芽阶段。在城市空间中，低空飞行还没有为城市人群的工作生活和社会经济发展带来飞跃性的变革；而热气球、飞艇等传统低空载人飞行工具，或退出历史舞台，或远离城市空间，基本处在人们的视野之外。

过去，土地是城市化和经济增长的关键生产要素。土地的确权、规划、流转和开发利用，对推动社会经济繁荣发展起到了极为重要的作用。如今，路面交通愈发拥堵，土地资源渐趋匮乏，人们亟需拓展新的空间。低空代表了这种新的可能，蕴藏着甚至超过土地的巨大价值。低空空域从一开始就应该得到合理的长期规划，科学的持续治理，充分的有效利用，从而加速将低空空域这个自然资源转变为重要的经济资源。

我们认为，低空空域具有类似土地的很多属性。作为自然资源，其天然具有非排他性，其普惠共享的公共性必须得到保障；而作为被利用的经济资源，其市场性也需重点体现，不应仅仅是承载低空飞行的物理空间，更应成为实现新型商业和社会价值的生产要素。低空空域具有广泛的资产化和资本化的潜力，将触发一系列在管理模式、经济模式和产业发展模式上的根本性转变。

1.3. 低空空域：从“可通达”到“可计算”再到“可运营”

为实现低空空域从自然资源到经济资源的转变，首先要推动低空空域从“可通达”（Accessible）到“可计算”（Computable）、再到“可运营”（Operable）的转变。

低空空域跟土地不同，除了和地面的接触面以外，空无一物，没有任何可固定的物理系着点或者依附物，也无法用常规的物理手段丈量 and 划设，天然需要数字化的方式（数字原生）去测量、描述、表达、规划和利用。在城市的空间中，低空空域的属性是多层次的，除了几何尺寸，还有更加复杂的数据信息和计算要素，包括飞行器本体信息，也包括空域及周边环境信息，例如（微观）气象、电磁环境、建筑物、障碍物、禁飞区、自然地形地貌，无线信号、地面信息、空中交通、社会与经济活动等等。

过去，受限于感知技术、通信技术、定位和导航技术、计算能力和智能算法的发展，全低空空域数字化几乎不可能，导致精细化低空管理

一直没有很好的技术手段，制约了低空经济的发展。如今，随着上述以及新的技术比如数字孪生、大型仿真、人工智能等的快速发展，以前偶尔可进入的低空空域，现在完全可以转变成可计算空域。

可计算空域是最终让自然资源得以转化为经济资源的必经步骤，也是将低空空域变成“可运营空域”的必要条件，是低空实体经济与数字经济的必然结合点。在可计算空域的框架下，智能机器可以快速地对庞杂的数据和信息进行处理和分析，为飞行决策提供依据，为飞行安全提供保障，为提高空域利用率提供工具，为空域价值评估提供参考，为创新应用提供支持，为政策法规制定提供证据，让规模化的低空活动成为可能，进而创造巨大的低空经济价值。换言之，构建“可计算空域”将是开展各类低空活动、发展低空经济、制定法律法规的基础，是打造“可运营空域”的前提。

将低空空域从自然资源转化成经济资源，推动低空经济迅速发展还有一个必要条件，即是可以进入低空进行各种活动的有人驾驶或者无人驾驶的、载人或者载物的飞行器的蓬勃发展，其中包括直升机、固定翼飞行器、载人电动垂直起降（eVTOL）、工业无人机、消费无人机、城市治理无人机等等。让人欣慰的是，低空飞行器技术目前已经非常成熟、安全和高效，并且还在不断迭代。物流/外卖无人机已经在特定航线常态化实际运营，多家载人飞行器 eVTOL 即将获得适航证。低空飞行器的进步和发展，配合可计算的低空空域，将加速把低空空域转变为可充分运营的经济资源。

“在低空经济的新视角下，只有让低空成为可计算的资源，才能进而实现低空空域的可量化、可定标、可导引和可利用，根本性地解决传统低空空域使用频次和效率严重不足的问题，同时成为社会发展的重要推动力。”

1.4. 低空经济发展前景广阔

地面交通受限于占地很少的 1.5 维度的平面交通路网（2 维平面网线结构的自由度小于 2 维），造价昂贵，道路固定，容量有限，易于拥塞，效率优化空间小，发展渐显瓶颈；低空交通则可充分利用整个 3 维立体低空空域，利用数字技术灵活划分数字航路，点对点可达，容量高维且可扩展，效率优化空间大，独具高度优势，发展空间巨大。

低空经济从地面延伸到低空，从平面路网交通延伸到立体空间交通：低空飞行器取代了汽车，数字低空航路取代了固定地面道路，低空空域智能管理和管控取代了地面路网交通规则和管理，其发展将依赖于数字技术、智能技术、数字孪生技术、移动技术、5G/通信技术、传感器技术、定位技术、导航技术、雷达技术、现代飞行技术、电池技术、节能减排技术、短时区域气象预测技术等高新技术在低空空域的完美结合。低空经济具有天生的数字经济基因，可以充分享受信息化、网络化、数字化、智能化技术发展带来的红利，将实体经济与数字经济完美地融合在一起。

低空飞行，尤其是无人机飞行，具有点对点、低碳排放、地域限制小、经济成本低、运行效率高等优势，其高度优势还能带来新场景、新应用、新服务和新业态，天地一体化更能带来更多发展新机遇。

低空空域的开发拓展，在大幅减轻地面交通压力的同时，更创造了一个新的万亿级规模量级跃变的产业空间，蕴含着更广阔的应用和前景。近年来，以城市空中交通、无人机配送与物流、城市无人机应用、消费级无人机应用、工业级无人机应用等行业为主体的低空经济蓬勃发展，有望带动比拟甚至超过传统交通行业规模的各种创新应用，创造工作生活新范式，打造一个包括低空制造、低空运营、低空保障和综合服务等等更大规模的新的低空产业生态。

据专家预测，到“十四五”末，我国低空经济对国民经济的综合贡献值将达到 3-5 万亿元。从全球视角看，金融机构摩根士丹利（Morgan Stanley）估计全球城市空中交通（UAM）的可触达市场会在 2040 年之前达到万亿美元水平[1]。低空经济无疑将成为中国乃至全球新的经济增长极。

低空经济目前是相对的无人区，将填补中高空与地面交通的空白，为人们提供丰富多元的工作生活体验。无人机在城市中物流运输的规模化，将使商品的流动和物资的配给更加高效。“空中的士”（Air Taxi）的

普及，则将给人们的出行方式带来巨大的变革，促使未来的飞行成本大幅下降，让自由的城市和城际低空飞行成为常态。

此外，低空经济有庞大的无人机产业作为基础，以及智能汽车产业的发展作为参考，基础可靠、技术可行、风险可控。

2. 低空经济发展的机遇

2.1. 积极的政策推动

目前，数字经济蓬勃发展，数字技术不断进步，飞行技术快速迭代，场景应用日趋成熟，政府多重政策支持。各国各地也都相继发布低空空域管理规则，启动试验项目，开展多元探索。可以说，目前低空经济正在进入快速发展期，未来将走向产业爆发期。美国、欧洲等国家和地区已启动相关研究和规划，中国也很早意识到了空中交通管理和发展低空经济的重要性，积极开展试点，并颁布了一系列支持和鼓励政策。

● 美国

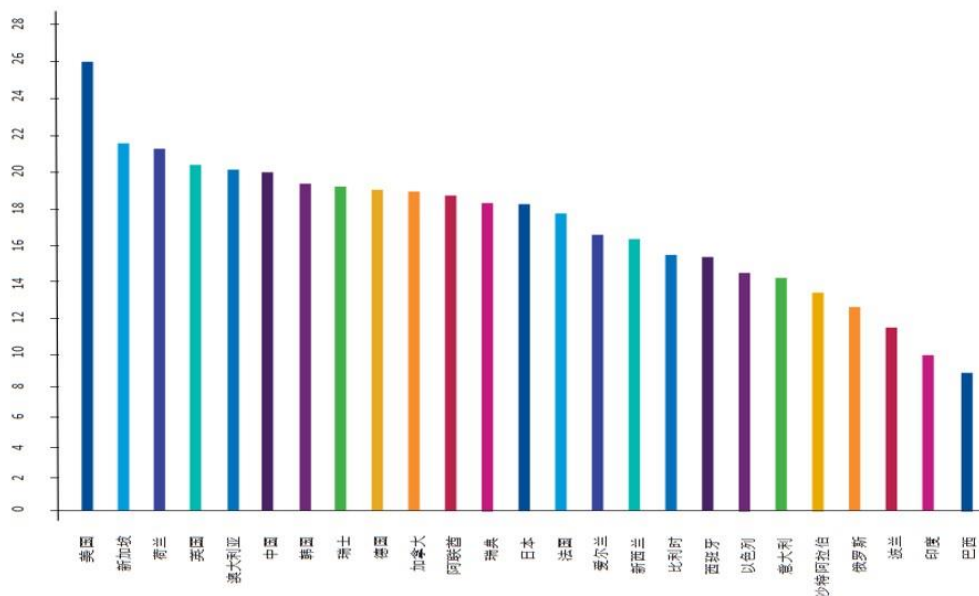
- 美国联邦航空管理局（FAA）于 2013 年开始推动将无人机融入美国国家空域系统（NAS），经历了从空中交通管理（ATM），到无人机系统交通管理（UTM），到城市空中交通（UAM）概念，再到先进空中交通（AAM）方案的发展路线。2022 年 3 月，美国通过《先进空中交通协调及领导力法案》，旨在建立一个跨部门的联合工作组，让联邦政府更加有效便利地参与支持先进空中交通的产业发展[2]。2022 年 9 月，美国国家航空航天局（NASA）提出数字化飞行规则（DFR），对现有的仪表飞行规则（IFR）和目视飞行规则（VFR）进行补充，力求通过互联数字技术和自动化信息交换实现的合作实践和自我隔离，确保飞行路径安全和有效的空域使用[3]。

● 欧盟

- 欧盟航空安全局（EASA）于 2016 年制定了无人驾驶航空器制造、运营商、飞行管理等多项制度。2017 年，欧盟委员会提出 U-Space 计划，以确保在不同等级空域和空域环境中，都能支撑大量的无人机同时、安全、有效地使用空域。EASA 在 2021 年发布的《欧洲城市空中交通社会接受度研究》中表明，UAM 的首批运营将在未来 3-5 年成为现实：虽然人们对 UAM 的安全性、环境/噪音和安防性问题有些担忧，但更对其提供的快速、清洁和连通性充满期待[4]。毕马威（KPMG）发布的 2021 全球 UAM 准备度指数排名显示，欧洲各国普遍具有很高的水准（准

备度指数排名依据维度：消费者接受度、基础设施、政策和立法、技术和创新）[5]。

图 2.1 全球 UAM 准备度指数排名（2021）



来源：毕马威 Aviation 2030 Air Taxi Readiness Index（2021 edition）

● 中国

- 我国早在 2010 年就预见到了发展低空经济的重要性，先后颁布了一系列相关政策文件，并专门赋予深圳市多项支持和鼓励政策（图 2.2）。近年来，中国航空管理部门持续研究并完善低空领域管理制度，中国民航局（CAAC）于 2017 年发布首个无人机实名注册登记管理办法，并陆续出台《民用无人机驾驶员管理规定》等多项文件。2022 年 8 月，民航局颁布第二批民用无人驾驶航空试验区，深圳获得授牌。同月，民航局发布《民用无人驾驶航空发展路线图 V1.0》（征求意见稿），提出在 2025 年、2030 年及 2035 年分别实现短、中、中长距离载人无人驾驶航空器探索应用的时间表。10 月，民航局最新发布《低空飞行服务保障体系技术规范》，对低空飞行服务保障体系建设提出了新的要求。

图 2.2 中国推动低空经济的相关政策和规定



来源：IDEA 研究院整理

2.2. 有力的产业链支撑

低空经济的发展离不开产业的有力支撑。低空产业链包括低空制造、低空运行、低空保障和综合服务四大重点方向。低空制造涉及核心零部件（如芯片、电池、复合材料）和整机研制，低空保障关注飞行器识别、通信、导航、监控等领域，低空飞行聚焦商用、公共服务、消费娱乐等应用层面，综合服务则包含金融、大数据、运营培训等衍生增值服务。

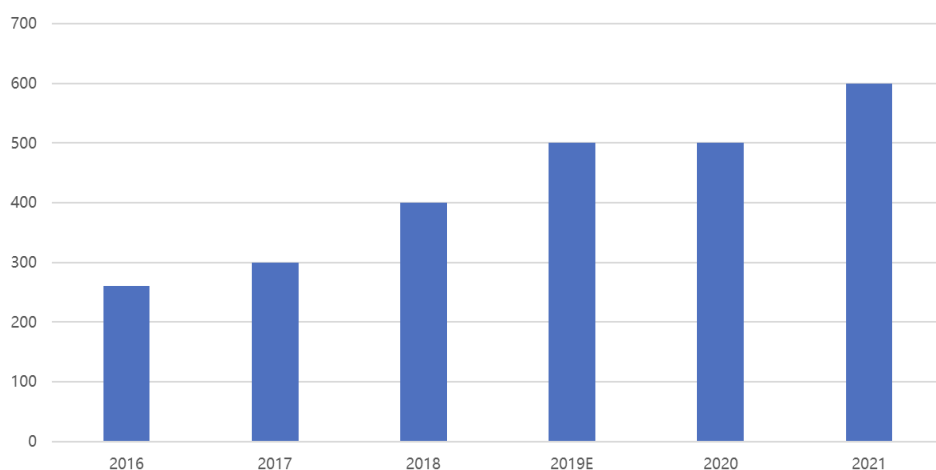
无人机在低空产业中占据重要地位，而深圳的无人机产业链条成熟完备，发展低空经济具有独特优势。从消费级应用看，以大疆为代表的国内生产企业已成为消费级无人机的主要提供商和无人机领域的领航企业。从工业级应用看，深圳处于国内领先地位，依托于强大的供应链体系，工业级民用无人机产值占到全国六成左右，主要有大疆、一电科技、科比特、科卫泰、哈瓦国际等几十家工业级无人机生产商。同时，市场上不断涌现出中小规模的无人机制造企业，它们利用深圳完备的无人机产业链，得以快速地进行设计生产，持续开发出各类应用场景。

公开数据显示，中国 2021 年无人机行业保持较快增长，全国共有 7000 多家无人机企业获得民用无人驾驶航空器经营许可证，交易规模达

到 870 亿元，预计今年国内无人机行业产值将突破千亿元。其中，仅深圳就有 1500 余家，产值近 600 亿元，其消费级无人机占全球 70% 的市场份额，工业级无人机占全球 50% 的市场份额，已形成比较完整的产业生态链。

图 2.3 2016-2021 年深圳市无人机产业产值

(单位：亿元)



来源：深圳市无人机行业协会等公开数据

2.3. 科技的进步驱动

低空经济的发展有赖于科技的进步。近年来，电池、电控、电动机、新材料、飞控等关键技术取得稳固发展，在消费、工业领域得到充分验证。另外，大疆等一批具有代表性的国内生产企业，在全球范围内不断开拓业务，探索并研发出众多的新技术。同时，汽车领域在电池技术和无人驾驶技术上大量的研发投入，也给无人机的发展提供了有力支持。

过去，在摩尔定律作用下，集成电路技术的发展推动了算力的极大提升。深度学习的出现，打破了行业的界限阻隔，由此人工智能算法得

以在不同领域得到深度应用，并在大规模的协同计算中得到充分验证。这使得更大规模的无人机飞行调控成为可能，而仿真模拟技术的兴起，也导致飞行器的制造成本大幅降低。

从基础设施的角度看，5G 网络的商用在带宽、时延、定位等飞行所需的核心领域亦提供了极大的可能性。在汽车无人驾驶领域，5G-V2X 等相关技术标准正在制定中，未来或可为无人机技术标准制定带来更多的启发。

目前，人们正探索将人工智能（AI）等新兴技术运用于空中交通管理，希望为提高空域的安全性和使用效率提供新的方案。然而，各国也意识到，空中交通管理极为复杂，不仅需要科技的突破，也需要政策和产业的突破。

“

“低空空域从自然资源向经济资源转变是理念上的改变，也需要技术、产业和政策的协同突破和变革才能实现。我们亟需一套解决问题的全新框架，将三者协同在一起。而在提出整体框架之前，首先要回到低空活动本身的属性和挑战上。”

”

3. 低空活动的属性与挑战

3.1. 低空活动的特征属性

未来，低空空域的核心挑战是如何支撑以“异构、高密度、高频次、高复杂性”为属性特征的大容量融合飞行，在安全可控的前提下，实现低空经济规模化、可持续、高质量的快速发展。

● 异构

- 异构指飞行器种类、功能与性能的异构，以及低空飞行服务的异构和高复杂度。以 eVTOL 为例，eVTOL 近些年在需求和资本的推动下得到快速发展，在中国和世界范围内都有大量优秀的创业公司和新企业推出了 eVTOL 产品，但其技术路径、市场定位和飞行指标都各有特点。仅在 eVTOL 领域，依据其主要动力推进模式，就可划分为三类，又根据其性能特点在应用具体场景上各有差异。
- ◆ 矢量推力型：在飞行的不同阶段，通过改变推力方向，实现垂直起降和巡航，如 LiliumJet，乘坐 6 名乘客，航程 250 公里，巡航速度最高 280km/h；（图 3.1）

图 3.1 矢量推进型 eVTOL



来源：LiliumJet 官网

- ◆ 升力+巡航型 (Lift+Cruise): 飞行中提供升力和巡航动力的螺旋桨是独立的, 分别实现垂直起降和巡航。如 Wisk Aero Cora, 2名乘客, 巡航速度 160km/h, 航程 40km, 拥有 12个升力螺旋桨, 1个推力螺旋桨; (图 3.2)

图 3.2 升力+巡航型 eVTOL



来源: TransportUp

- ◆ 多旋翼型 (Multi-copters): 无巡航用螺旋桨, 完全通过控制多旋翼的升力大小实现飞行。典型的例如 Ehang-216, 8组 16个螺旋桨, 最大巡航速度 130km/h, 满载最大航程 30公里, 2名乘客, 最大有效载荷 220kg。(图 3.3)

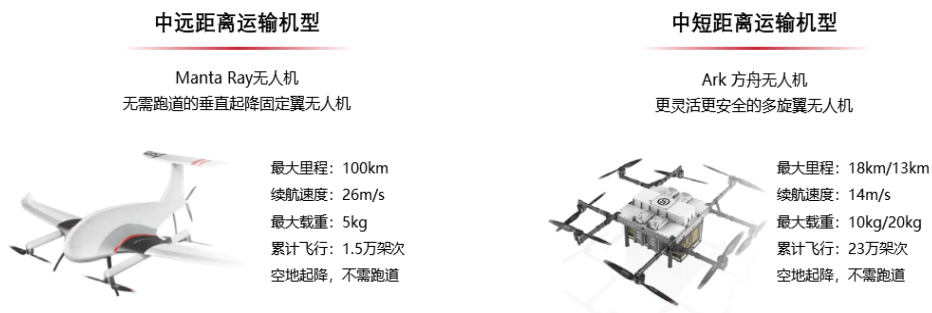
图 3.3 多旋翼型 eVTOL



来源: techyou

- 基于中国无人机产业链的丰富，工业无人机应用和飞行器都有非常多样化的发展。无人机制造企业提供多种产品类型适应不同场景，例如大疆推出的植保无人机具有较大的市场占有率。而头部运营企业也开始独立开发适合自有场景的飞行器，顺丰作为其中的代表，研制并推出了自己的工业无人机。（图 3.4）

图 3.4 顺丰丰翼无人机运输机型



来源：丰翼科技

● 高密度

- 高密度指数个量级跃增的飞行密度。中国民航共有 6000 架左右的飞机供使用，在 960 万平方公里的土地上空飞行，而以深圳接近 2000 平方公里的区域内未来将保有百万级别的飞行器。同时在空飞行的高密度，仍以深圳为例，未来 10 年内同时在空的飞行器将超过 10 万架，在高密度的飞行区域，单位平方公里同时在空飞行器会超过百架，这对飞行器的准确定位、导航、路线规划、应急避障等都带来巨大的挑战。必须通过空域的数字化来实现更加精细化的规划与管理。
- 同时，我们也不能忽略飞行器对于环境和社区的影响，高密度飞行一方面带来对居民服务的丰富性和便利性，同时也应该最大化地避免飞行可能带来的噪音，以及对隐私和宜居性的影响。

● 高频次

- 高频次指数个量级跃增的起降架次。最繁忙的机场（北京首都机场）在疫情前每天平均飞行的起降次数不超过 1700 架左右

（2018 年数据），但在低空领域，在一个城市的上空，每天将有和地面汽车相当量级（以深圳为例，日均汽车出行数量超过 250 万次）的低空飞行器起降架次。如果考虑到多种业务的情况，每天监管部门需要关注的起降次数将进一步呈量级增长。

- 飞行器起降带来大量的审批、沟通和调度需求，这对整体管理的模式提出了全新的挑战。此外，高频次的起降和运行，对于地面基础设施也提出新的要求，不仅是物理设施起降点规划的合理性，还有地面数字设施的能力和覆盖，以及围绕无人机的维护和服务的相关准备。

● 高复杂性

- 高复杂性指极为复杂的飞行、地面和信息环境。据世界高层建筑与都市人居学会（CTBUH）官网最新数据显示，仅深圳 150 米以上的高楼，建成的就有 356 座，还有 155 座在建[8]。高楼不仅增加了低空飞行的撞击风险，还会带来导航信号遮挡、突发气流变化等问题。
- 此外，城市中建筑物动态变化大，大量的动态因素需要及时监测并及时反馈给飞行器。同时，在城市环境中对非合作飞行器开展监测也是很大的挑战，传统的雷达方式作用有限，需要采用新的技术手段，避免在高复杂飞行下非合作飞行器带来的安全风险。

3.2. 低空活动面临的挑战

3.2.1. 缺乏科学有效的低空空域管服手段

- 目前对低空飞行的监管主要以政策为主，缺乏有效、完备的技术管控手段，特别是对近年来迅猛发展的“低慢小”飞行器，“看不见、叫不到、管不住”的问题尤为突出。由于没有统一的精细化的低空空域基础设施和管控平台，以及低空通信、导航、监视等方面的保障能力的不足，政府部门难以实现对低空空域的有效管控，企业也得不到与其业务匹配的飞行安全服务和支持，严重制约了低空空域的开放和规模化低空产业的发展。

3.2.2. 缺乏统一标准规范的共享基础设施

- 随着低空经济的兴起，全国多家运营企业都在尝试建立自己的低空飞行规范制度和低空基础设施平台。然而，各自建设、分散使用导致低空基础设施没有统一的整体规划和标准，信息孤岛之下难以实现低空业务的协同和低空信息的共享。通信设施、导航设施、监控设施、起降设施、能源供给设施等资源因缺乏共享、共用、共管、共控机制，更是造成管理混乱、资源浪费、重复建设等问题，为低空飞行带来极大的安全隐患。

3.2.3. 缺乏促进低空经济发展的法律法规和交通规则

- 目前低空经济有关法律法规和交通规则还不够健全，无法适应低空产业发展的需要，特别是对于“异构、高密度、高频次、高复杂性”的低空飞行，相关法律法规规则的建设还比较滞后。其根本原因在于缺乏一整套统一精细化的智能融合基础设施，无法以技术手段来平衡保障低空飞行安全与提高低空空域利用效率之间的矛盾，更无法为法律、法规和规则的制定和执行提供基于数据的有力支撑，导致低空空域的管控和交通规则、法律法规只能按最保守的方式制定，严重限制了低空经济的快速发展。

3.2.4. 低空活动的数字原生性带来的技术挑战

- 有别于运输航空，低空活动具有强大的数字原生性，在运营环境、飞行器、飞行规则、飞行管理模式上都具有天然的数字化属性。当前航空领域的管理体系和基础设施、信息化工具和管理模式都不能适应低空对数字化能力的更高要求。
- 以飞行规则为例：传统航空主要依赖目视飞行规则（VFR）和仪表飞行规则（IFR）两种飞行规则。目视飞行下，机长对航空器间隔、距离及安全高度负责。仪表飞行下，机长完全或者部分按照航行驾驶仪表飞行，根据飞行状况及时进行调整和介入。低空飞行的环境特殊，需要完全数字化的飞行规则和解决方案。
- 飞行器的快速发展带来的智能化水平和技术路径的多样性，也要求解决方案框架必须从整体数字化水平而非某类飞行器的特点去思考。

4. 智能融合低空系统（SILAS）

“面对低空经济发展的一系列的挑战和特性，IDEA 研究院设计了面向低空经济发展问题的框架系统 SILAS（Smart Integrated Lower Airspace System），从低空经济的新视角定义问题、设计方案。”

SILAS 通过数字化技术和系统，实现空域的可计算，构建低空飞行的全数字化运行环境，逐步向低空大容量运行、全智能化飞行方向演进。同时，通过一整套管理服务平台，SILAS 将实现监管方、产业方、运营方和管理方的多方协同，打破低空发展的诸多瓶颈，完成低空空域向经济资源转化，并最终实现低空经济的跃升发展。（图 4.1）

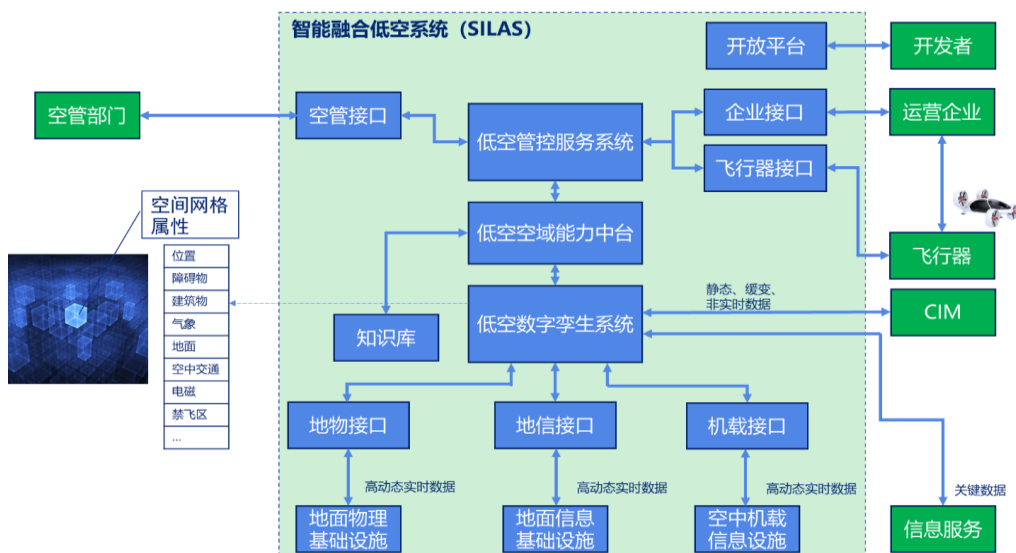
4.1. SILAS 的设计理念：融合与智能

融合：融合指基础设施、技术、管理方/运营方、各种飞行器、各种业务的融合。低空发展需要大量的融合解决方案，面对低空的复杂性，单一基础设施设备无法完全支撑其发展，单一或几个核心技术也不足以支撑低空大容量的安全运行，需要克服通信、飞行器、仿真、计算、监控等多个领域的技术挑战，这是一个高复杂度的系统工程。同时，低空经济发展涉及各利益相关者，包括空域资源的管理方、飞行规范的制定方、城市低空业务的运营方、关键数据的所有方/控制方，都需要统筹协调、充分沟通、紧密配合。

智能：智能指运作模式、流程、目标、路径、飞行等的智能化。在低空经济领域的智能化不仅体现在数字化系统本身，整体运作模式、流程、目标、路径、飞行等都需要逐步实现智能化，才能达到系统性的提升。围绕经济目标系统性高效率的实时计算和跟踪，围绕安全飞行的自

动化能力以及管理与服务水平的持续提升，都需要在一个整体的解决方案框架中考虑。

图 4.1 智能融合低空系统（SILAS）框架体系



4.2. SILAS 的目标

“SILAS 的目标是建立数字化的低空运行环境，实现智能化的空域设计和航路规划，提升融合低空运行的数字化水平，推动管理和服务的端到端数字化，最终达到空域安全和使用效率的最佳契合点。”

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/286052135223010153>