

# 低空交通导向开发 (VOD): 国际比较与中国路径\*

VOD (Low-Altitude Traffic-Led Development): International Comparisons and the Chinese Approach

金利霞 李 珊 曾嘉荣 张德雅 伍欣欣

JIN Lixia, LI Shan, ZENG Jiarong, ZHANG Deyu, WU Xinxin

**关键词** 低空经济; 城市空中交通; VOD模式; 国际比较; 中国路径

**Keywords:** low-altitude economy; urban air mobility (UAM); vertical-oriented development model(VOD); international comparison; China's path

**提 要** 低空交通技术正驱动城市交通体系从二维向三维立体转变。低空交通导向开发 (VOD) 模式作为交通导向开发 (TOD) 理念在低空维度的延伸, 以垂直起降设施为核心整合城市功能, 为高密度城市破解交通拥堵、优化空间结构提供新路径。构建“空间—制度—产业”三维框架, 系统解析日本大阪“空轨一体”、法国巴黎“廊道耦合”、阿联酋迪拜“平台赋能”及英国考文垂“可迁移试点”等国际差异化路径, 识别中国本土化探索中面临的空域规划协同、跨部门治理、商业模式韧性及社会接受度等方面的挑战, 提出“空间重构—制度创新—产业协同”的系统路径, 强调以空域治理现代化、空间组织网络化与产业生态多元化推动VOD从概念验证走向系统融合。拓展了交通导向开发的理论内涵, 并为中国低空经济高质量发展及与城市空间重构提供理论支撑与实践参考。

**Abstract:** Low-altitude transportation technologies are driving the evolution of urban transportation systems from two-dimensional to three-dimensional structures. As an extension of Transit-Oriented Development (TOD) principles into the vertical dimension, Vertical-Oriented Development (VOD) integrates urban functions around vertical takeoff and landing facilities, offering new pathways for high-density cities to alleviate traffic congestion and optimize spatial structures. By constructing a three-dimensional analytical framework that encompasses space, institutions, and industries, this study systematically examines a range of international cases, including Osaka's "air-ground integration", Paris's "corridor coupling", Dubai's "platform empowerment", and Coventry's "transferable pilot". It identifies key challenges in China's local practice, including constraints in airspace planning coordination, cross-departmental governance barriers, weak business model resilience, and limited social acceptance. The framework proposes a systematic approach of centered on spatial restructuring, institutional innovation, and industrial synergy. To promote VOD, the approach emphasizes moving from conceptual validation to systemic integration through modernized airspace governance, networked spatial organization, and diversified industrial ecosystems. This research expands the theoretical scope of TOD and provides both theoretical foundations and practical references for China's high-quality development of low-altitude economy and urban spatial restructuring.

中图分类号 TU984 文献标志码 A  
DOI 10.16361/j.upf.202601010  
文章编号 1000-3363(2026)01-0073-08

## 作者简介

金利霞, 广东省科学院广州地理所区域发展与城乡规划研究员, jlx906@163.com

李 珊, 广州大学建筑与城市规划学院产业升级与区域发展副教授

曾嘉荣, 广州大学建筑与城市规划学院硕士研究生, 通信作者, 920393748@qq.com

张德雅, 香港树仁大学社会科学院本科生

伍欣欣, 广东省科学院广州地理研究所研究助理

\* 国家自然科学基金项目: 区域出口产品升级的时空格局及机制研究——以粤港澳大湾区为例 (项目编号: 42301182); 广东省自然科学基金项目: 空间治理框架下全域土地综合整治效益及影响机制研究——基于广东省41试点县镇的实证 (项目编号: 2024A1515010723); 广东省基础与应用基础研究基金项目: 珠三角产业演化路径对经济发展的影响机制及其空间差异性 (项目编号: 2022A1515110331)

全球快速城市化进程加剧了大城市在交通拥堵与空间资源紧缺等方面的问题<sup>[1]</sup>。以轨道为核心的TOD模式，因其依赖线性基础设施的平面开发逻辑，在高密度建成区与复杂地形区域面临土地稀缺、成本高昂与社会分异等发展制约<sup>[2]</sup>。同时，二维交通网络运载能力日趋饱和，难以满足多样化、高频次与高时效的出行需求。近年来，以eVTOL等为代表的低空交通技术快速发展，有望突破传统交通对地表空间的依赖，驱动城市交通系统向三维立体化演进。低空经济因此也被视为重构城市空间结构、提升综合运行效率、培育新增长极的战略力量。部分国际超大城市已率先开展低空交通试点，初步形成了以“空地一体化、数据驱动与多主体协同”为特征的垂直起降导向开发模式（vertical-oriented development, VOD）。

实践强调以垂直起降场为核心节点，系统性地整合低空与地面交通网络、城市功能布局与区域产业生态。美国规划协会在《先进空中交通出行规划2024》中首次明确提出VOD概念，其本质在于通过构建以垂直起降端口为枢纽的立体开发体系，重塑城市空间结构与区域格局<sup>[3]</sup>。相较于TOD，VOD在节点布局、网络结构、制度复杂性与产业耦合等方面展现出显著差异与优势。然而，现有研究与政策讨论多聚焦飞行器技术、设施标准、空域管理或商业模式<sup>[4-9]</sup>等单一维度，缺乏从城市复杂系统视角对VOD

如何嵌入并重塑城市空间、制度与产业进行整体性解析。

为弥补上述不足，本文整合空间规划、制度经济学与产业生态理论，构建“空间—制度—产业”三维协同分析框架，选取大阪、巴黎、迪拜与考文垂开展国际比较，提炼其差异化路径的协同机制，并结合中国城市实践问题诊断，提出面向本土语境、兼具前瞻性与可操作性的VOD发展路径建议，以深化交通导向开发理论体系，为我国低空经济性推进提供参考。

## 1 文献综述与分析框架构建

### 1.1 VOD模式的内涵演进与核心特征

VOD源于TOD理念，但因交通工具（eVTOL）和空间载体（低空空域）的根本性差异，在功能组织、空间形态与开发运营上呈现独特性，其核心内涵是以垂直起降设施（vertiport）为关键触媒，通过构建“空—地—轨”高效衔接的多式联运体系与功能复合的立体空间单元，促进低空经济与城市运行体系的有机融合<sup>[5]</sup>。VOD模式的核心特征如下：

- (1) 立体空间整合与分布式网络布局：突破TOD平面放射结构，依托屋顶、交通枢纽、绿地与滨水空间等存量与潜力空间，布局分布式、网络化的垂直起降节点，强调通过立体换乘枢纽实现空地与城市功能的三维整合<sup>[6]</sup>。
- (2) 复杂制度环境与跨部门协同治

理：低空运行涉及空域配置、安全监管、噪声环保、数据隐私等多重复杂议题，横跨民航、国土、交通、住房城乡建设、工业和信息化、应急、生态、数据等多个政策领域，其落地高度依赖于建立跨部门、多层次的高效协同治理框架<sup>[7-8]</sup>。

(3) 强场景驱动与多元化产业融合：发展紧密围绕都市通勤<sup>[9]</sup>、高端物流<sup>[10]</sup>、应急医疗<sup>[11]</sup>、文旅观光<sup>[12]</sup>与城市管理<sup>[13]</sup>等具体场景开展商业化验证，并带动维护维修运营（MRO）、能源补给<sup>[14]</sup>、数据服务<sup>[15]</sup>等支撑产业的协同发展，共同构成可持续的低空经济产业生态系统。

### 1.2 VOD模式的发展阶段理论

VOD模式伴随技术、制度与市场的成熟逐步深化，其发展历经理念萌芽、概念融合、实践探索3个阶段，并最终走向网络化融合，基础设施形态呈现出从“附加”到“独立”再到“网络”的变化，体现了与城市系统的多维度协同深化。见图1。

第一阶段：理念萌芽期（20世纪末至21世纪初）。该阶段尚未形成清晰的开发与运营模式，但“枢纽导向开发”和“城市低空交通工具”两大核心思想开始萌芽。一方面，以TOD为核心的集约开发理念逐步成熟，为枢纽导向的空间组织提供了逻辑原型<sup>[16]</sup>；另一方面，面向城市通勤的个人飞行构想被提出，并在直升机观光、应急救援等有限场景中得到初步验证<sup>[17]</sup>。这为此后VOD概念

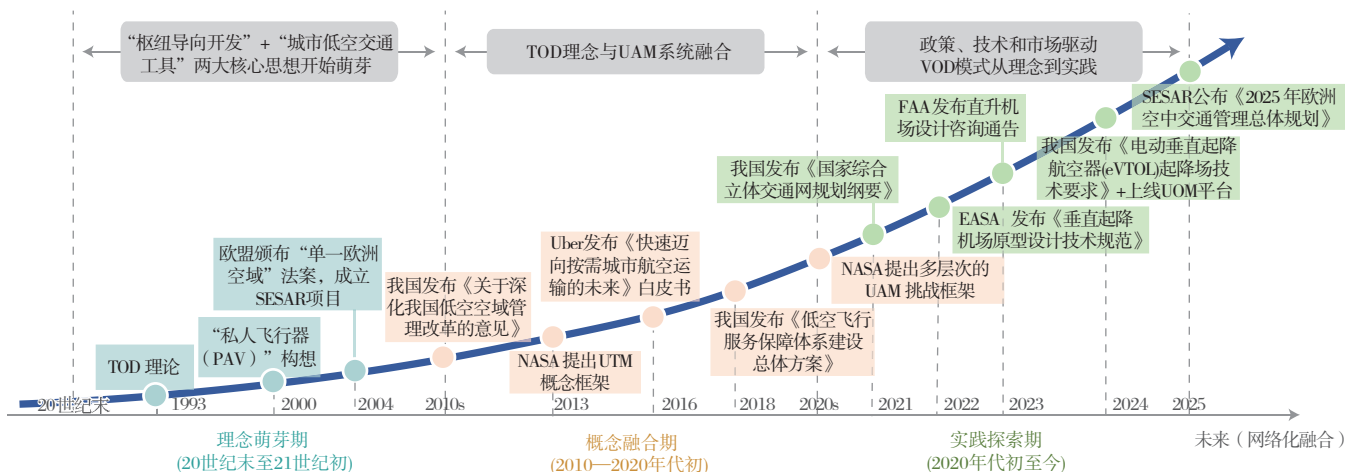


图1 VOD模式发展阶段

Fig.1 Development stages of VOD models

的形成奠定了基础。

第二阶段：概念融合期（2010—2020年代初）。电池、材料与自动驾驶等技术进步叠加新能源汽车供应链溢出效应，推动电动垂直起降飞行器(eVTOL)从概念走向工程原型。2016年载人原型的出现标志着工程化验证启动<sup>[18]</sup>，同年Uber提出城市空中交通(UAM)运行框架与Vertiport网络构想，NASA等也开始研究低空交通管理(UTM)系统，关注点由单机飞行拓展至系统化运行<sup>[19-20]</sup>。我国同期推进低空空域管理，实施分类管理并拓展低空空域高度<sup>[21-22]</sup>。技术与政策合力下，TOD理念与UAM系统融合，推动VOD从隐性线索发展为显性概念<sup>[21]</sup>。

第三阶段：实践探索期（2020年代初至今）。近年来，全球先锋城市开展多样化实践。如：深圳、大阪以轨道枢纽嵌入式改造实现低成本快速验证<sup>[23-24]</sup>；迪拜通过建设专用枢纽塑造区域节点与城市名片<sup>[25-27]</sup>；考文垂则采用可迁移、模块化Vertiport进行迭代验证与普及<sup>[28]</sup>。各国在空域管理与运行效率上持续创新。美国以相对宽松空域管理与UTM创新加速发展，欧盟则依托“欧洲单一天空空管研究计划”提升效率与安全<sup>[29]</sup>。我国也将“低空经济”纳入国家规划<sup>[30]</sup>，并出台空域分类、上线国家级无人驾驶航空器综合管理平台(UOM)等<sup>[31-32]</sup>。此阶段商业模式、空域规则与社会接受度仍在探索中。

展望未来，VOD将迈向网络化融合的新阶段。低空交通网络将作为新型基础设施，深度融入城市能源、数据与功能系统，呈现空间网络化、治理智能化、节点功能复合化及产业生态多元化等趋势<sup>[33]</sup>，最终实现与城市整体发展的系统性耦合与价值循环。

### 1.3 “空间—制度—产业”三维框架构建

为系统解析VOD模式的实施逻辑与运行机制，弥补既有研究的碎片化不足，本文整合空间规划、制度经济学与产业生态理论，构建“空间—制度—产业”三维分析框架(图2)，强调三者的互动耦合，为解构其复杂机制提供统一视角。

#### 1.3.1 空间维度：VOD的物质载体与形态基础

空间维度是VOD理念实现的物质基础，决定了低空网络的结构效能，核心要素包括：节点类型与选址呈现从“集中型枢纽”(依托机场、高铁站等)到“分布式节点”(利用屋顶、停车场等)谱系，前者追求规模效应与联运效率，后者强调网络渗透性与灵活性，选址需综合权衡空域条件、地面接驳、经济成本、可达性与社区影响等因素<sup>[34]</sup>。网络结构与空间交互构建出以低空航路连接各级节点的三维立体网络，通过与地面及地下交通系统链接共同构成城市“立体交通骨架”，其核心在于通过“垂直换乘枢纽”实现空—地交通流的无缝转换与高效集成，以优化资源配置并提升空域使用效率<sup>[35]</sup>。土地功能复合与立体开发则强调在垂直方向上实现极致的功能

复合，使Vertiport成为整合商业、办公、居住及公共服务的“空中城市门户”，极大提升土地利用效率与价值。

#### 1.3.2 制度维度：VOD落地实施的关键保障与规则引擎

制度维度提供VOD运行的规则环境，关键在于前瞻、协同且富有弹性的制度安排：空域管理规则与标准体系涵盖空域分类、动态分配、噪声管控、安全标准与适航认证等，旨在确保空域安全高效共享<sup>[36-37]</sup>。美国联邦航空管理局(FAA)、欧洲航空安全局(EASA)等机构的技术标准为全球VOD基础设施规范化提供了重要参照<sup>[33]</sup>。而低空空域规划(航线结构、空域分层与节点布局)是提升空域承载与运行效率的重要环节<sup>[38]</sup>。跨部门协同治理机制针对VOD涉及多部门交叉问题，建立高层次统筹协调机构与常态化部门协同机制是实现从“审批

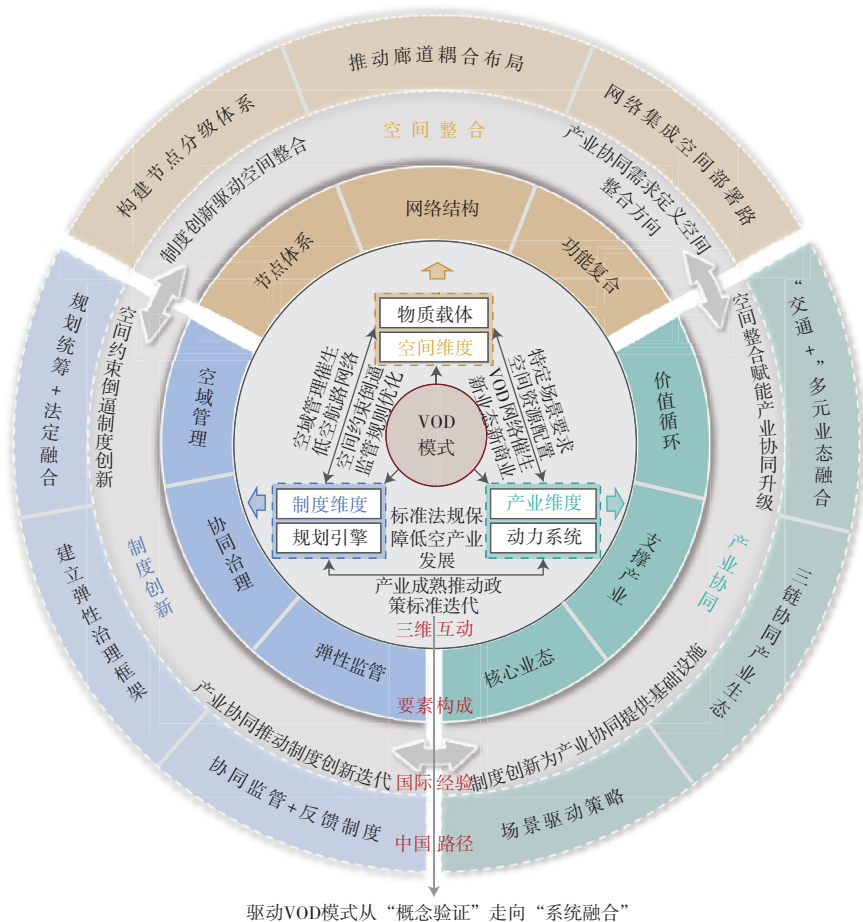


图2 “空间—制度—产业”三维框架图

Fig.2 Three-dimensional framework of "space-institution-industry"

导向”向“治理导向”转型的关键<sup>[39-40]</sup>。政策试点与弹性监管工具则在技术发展与应用初期至关重要，为VOD在特定区域提供“先行先试”空间，允许在风险可控下突破部分现行法规，以鼓励创新、积累数据并催生成熟框架<sup>[41-42]</sup>。

### 1.3.3 产业维度：VOD的可持续运营力

产业维度关注VOD的经济可行性与生态韧性，决定其能否从示范工程走向内生增长的市场生态。核心业态与市场培育通过高端通勤、紧急物流、文旅观光、医疗急救等场景实现初级价值，其商业化进程直接验证模式可行性<sup>[10,12]</sup>。支撑产业与生态构建则依赖于包括MRO、分布式能源补给网络、飞行数据服务平台、人才培训及保险金融等在内的强大支撑体系，以保障系统安全、稳定、高效运行。商业模式与价值循环最终决定其可持续性，国际经验表明必须拓展“非航收入”，通过Vertiport附带的商业零售、广告会展、物业开发等业务实现可持续性盈利能力，形成“交通引流、商业变现”的良性价值循环<sup>[43]</sup>。

### 1.3.4 系统性框架：三维互动与协同演进

空间、制度、产业等三个维度构成相互依存、协同演进的有机系统。在“空间—制度”互动中，先进空域管理理念催生精细化低空航路网络，而城市密集区的空间约束也倒逼出更精细化的监管规则；“制度—产业”互动表现为，明晰的适航认证与运营法规是eVTOL发展的先决条件，而产业的成熟与规模化又推动标准和政策持续优化；“产业—空间”互动则体现在，特定应用场景（如快速物流）要求节点具备相应的布局与功能，而覆盖广泛、便捷高效的VOD网络本身又能催生新业态与新商业模式。

综上所述，VOD是一个由空间整合、制度创新、产业协同通过复杂非线性相互作用构成的生态系统。该框架为后续系统解构国际经验、诊断中国问题及提出推进策略提供了有力的分析工具。

## 2 VOD模式国际经验与多维解析

基于“空间—制度—产业”框架，本文开展类型化对照，选取日本大阪、

法国巴黎、阿联酋迪拜及英国考文垂四个代表性案例，深入剖析其差异化实践路径。

### 2.1 日本大阪：从“站城一体”到“空轨一体”的集约开发路径

大阪依托成熟的轨道交通网络与“站城一体”开发经验，探索出以既有综合枢纽为基底、渐进式嵌入低空设施的VOD路径。

**空间维度：**以“高密度轨道枢纽嵌入”为核心，将Vertiport设施嵌入既有交通枢纽、城市再开发项目等存量空间，形成“空中—轨道—地面”立体换乘体系。如大阪港（OSAKAKO）试点将起降区与机库、候机及客运设施、能源配套及停车接驳等集成于地铁站点周边，与地铁、公交与步行系统的无缝衔接，优化空间效能与客流组织效率<sup>[44]</sup>。见图3。

**制度维度：**依托国家与都市圈完善的国土综合开发与交通一体化规划体系，将低空设施制度化融入既有TOD治理框架，引入空域协调与噪声管控细则，形成稳定的制度接口<sup>[45]</sup>。

**产业维度：**以“通勤+商业”双轮驱动，利用轨道枢纽庞大的通勤客流，提供高端通勤服务，拓展零售、展示等非航业务，非航收入占比目标达30%，提升项目财务韧性<sup>[43]</sup>。

大阪的实践表明，在轨道交通发达的高密度城市，VOD模式成功的关键在于依托成熟基底，以“嵌入式、模块化”方式实现低空功能有序叠加，并通过“交通+商业”融合提升经济可行性。

### 2.2 法国巴黎：“空—地—水”多式联运与历史城区的低冲击耦合

巴黎在历史城区保护与交通系统饱和的双重约束下，选择了“廊道耦合、轻量介入”的特色路径。

**空间维度：**优先选择塞纳河沿线、既有交通枢纽（机场、火车站、码头）布局Vertiport，形成“空—轨—水—地”立体衔接的交通走廊。这种“滨水廊道+枢纽共址”的低冲击、高融合廊道式开发模式，既规避了对历史肌理的直接冲击，又能应对“高峰换乘低效、节点拥挤、边缘可达性不足”等结构性矛盾<sup>[46]</sup>。已完成20多次试飞，累计近200 km<sup>[47]</sup>。

**制度维度：**面对严格的历史景观与天际线控制，巴黎大区交通出行规划（PDUIF）将VOD定位为“不新增地表侵占、可与既有体系深度对接”的运力增强工具。通过分层空域管理与弹性试点机制（如在Pontoise试验机场验证），规划形成5个节点，逐步建立适应高密度城区的监管细则<sup>[47]</sup>。

**产业维度：**聚焦“文旅+机场接驳”等高品质场景，依托塞纳河沿线丰富的旅游资源与机场接驳的刚性需求，优先开通“巴黎—凡尔赛宫”“机场—塞纳河码头”等精品航线（图4），形成品牌效应与客源保障支撑初期商业化运营<sup>[47]</sup>。

巴黎经验显示，在历史城市或高保护价值地区，VOD应采取“廊道化、轻量化、场景化”路径，以既有交通骨架为支撑、高价值场景为牵引，实现低冲击下的功能嵌入，在保护城市风貌、街区肌理的同时提升三维交通效能。

### 2.3 阿联酋迪拜：枢纽驱动与自贸区政策赋能的平台化开发

迪拜凭借其枢纽经济与自贸区制度优势<sup>[25]</sup>，将VOD升级为“交通—产业”联动的平台化载体。

**空间维度：**以“枢纽平台化”为导向，将Vertiport优先布局在机场、CBD、滨海旅游区与港区等核心功能区，与城市轨道交通、公路网络的深度耦合，形成“枢纽—廊道—组团”的港空联动格局<sup>[26]</sup>，年设计容量约4.2万架次。

**制度维度：**依托自贸区内空域、安全、海关等部门的“快审快放”机制，并由道路与交通管理局（RTA）统筹多式交通运营，显著降低审批、监管与跨境运行的制度摩擦。



图3 大阪港（Osakako）垂直起降机场  
Fig.3 Osaka vertical takeoff and landing airport  
资料来源：见参考文献[23]

产业维度: 致力于构建“临空口岸—自由区—供应链”联动的枢纽型复合产业平台, 深度融合运输、MRO、会展、商业等多元业态, 集聚高端制造、贸易物流企业与专业人才, 重点承载跨境快件、高值货物分拨等高端业态<sup>[27]</sup>。通过“非航收入”与“产业联动”构建多元韧性价值链, 放大产业发展乘数效应<sup>[43]</sup>。

迪拜实践表明, VOD在门户枢纽城市中具备从“交通节点”向“产业平台”升级的潜力, 借助特殊政策赋能、一体化运营机构统筹, 形成高效协同的跨部门治理环境以及深度融合的业态功能。

## 2.4 英国考文垂: 可迁移式VOD与制度弹性下的低成本验证

面对技术与市场的不确定性, 考文垂以去工业化城市更新为契机, 探索出以“轻量介入、快速验证、可迁移复制”为特征的VOD路径。

空间维度: 采用存量空间嵌入和可迁移部署模式, 将Air-One示范点布设于市中心停车场, 与铁路站、核心商圈形成步行可达的紧密衔接, 并采用装配式方案, 实现“小占地、快部署、可迁移、低干扰”, 现场施工仅11周。见图5。

制度维度: 充分利用《通用许可发展令》(GPDO)中的临时许可制度, 在无需复杂土地变性 with 永久建设的条件下, 为真实环境中的运营验证提供了低风险的制度环境<sup>[48]</sup>。

产业维度: 以“试运行+制造业配

套”为切入点, 在提供试运行服务的同时, 积极引入餐饮、零售、广告等非航业务<sup>[43]</sup>, 并通过高强度演示运营与公众参与(完成100余次飞行实验, 吸引超1.5万名访客)、与本地制造企业合作、探索MRO和电池循环等配套产业, 形成“运营+服务+制造”联动的初期产业生态。

考文垂路径表明, 在发展初期阶段, VOD可通过“轻量化工程、弹性化制度、模块化业态”的组合策略, 以低沉没成本完成原型验证与数据积累, 为中小城市与更新地区提供了低成本、低风险、高效率的枢纽原型。

## 2.5 国际经验总结

在三维分析框架下, 四个案例呈现出清晰的差异化路径与共性特征(表1)。其共同趋势体现为从“交通节点”向“功能平台”演进、从“单点试点”向“网络构建”过渡、从“政府主导”向“市场生态”转型。成功经验表明, VOD的落地不仅依赖于技术成熟度, 更关键在于空间层面的精准选址与网络构建、制度层面的弹性包容与跨部门协同、产业层面的场景聚焦与生态培育这三方面的系统耦合与动态适配。

## 3 基于三维协同的中国VOD发展路径优化与启示

### 3.1 发展现状与核心瓶颈

#### 3.1.1 发展现状与本土模式探索

近年来, 在国家战略与地方实践的推动下, 中国低空经济已由概念验证走

向规划与落地阶段。深圳、广州、成都等先行城市的探索呈现出“空间嫁接、场景先行、网络布局”的本土化特征。

深圳侧重构建“枢纽耦合+网络覆盖”的VOD体系, 规划布局“56个枢纽+1500个末端起降点”, 并依托深圳北站已建成首个“空—轨—地”一体化枢纽, 设立低空领导小组, 实施120 m以下空域弹性管控, 产业上公共服务与商业运营并重, 集聚企业超1700家, 实现无人机载货飞行77.6万架次、航线250条、直升机载人2.8万架次<sup>[24, 49]</sup>。

广州在南沙明珠湾探索“最小单元示范—走廊化延伸—网络化辐射”的渐进路径, 在灵山岛尖3.5 km<sup>2</sup>示范区规划垂直枢纽、分布式节点与低空航路, 前瞻部署南沙至港澳跨境通勤航线, 并聚焦跨境通勤、物流、旅游等应用场景, 设立产业基金吸引eVTOL制造企业落地, 形成“跨境服务+高端制造+金融赋能”的产业生态。

成都则结合复杂地形, 探索“地形适应、物流先行、应急联动”的差异化路径, 建设“干线—支线—末端”低空物流网络, 出台政策推动山地配送常态化与“物流—应急”协同<sup>[50]</sup>。

这些实践表明中国城市正围绕“空间整合—制度适配—产业协同”展开了VOD的初步试探, 为后续系统诊断与路径优化提供了经验样本(见表2)。

#### 3.1.2 面临的核心瓶颈与挑战

然而, 与国际先进案例相比, 中国VOD发展仍面临若干瓶颈和挑战, 制约其从“点状试点”向“网络化运营”的



图4 巴黎空运—水运换乘节点  
Fig.4 Paris air-to-water transfer node  
资料来源: 见参考文献[47]



图5 考文垂“Air-One”  
Fig.5 Coventry “Air-One”  
资料来源: 见参考文献[28]

跨越。

(1) 空间维度：规划体系脱节与网络协同不足。低空航路、净空范围、节点容量等关键要素尚未系统纳入法定国土空间规划体系，导致VOD选址缺乏法定依据与前瞻性预留，节点体系规划与城市功能区布局缺乏空间协同，“规划打架”与“落地困难”并存<sup>[5]</sup>。此外，各地试点仍停留在单个枢纽或特定走廊，跨行政区、跨交通方式的网络协同不足，如深圳规划测试空域与广州白云机场航线存在垂直重叠，实际可用空域不足规划的37%，严重制约了规模化测试与运营<sup>[51]</sup>。

(2) 制度维度：跨部门治理链条断裂与监管弹性缺失。低空交通跨界性强，涉及十余个部门，条块分割导致权责不清、协同乏力、审批流程冗长，飞行任务申报常需提前48 h甚至更久，显著推高了制度性成本<sup>[39,52]</sup>。而统一技术标准缺失、设备互联互通率偏低（不足60%）及电磁兼容性、数据接口等关键领域的现行国家标准滞后，使规模化应用受阻。同时，监管体系缺乏“临时许可/监管沙盒”等弹性试错工具，难以支撑新技术、

新规则的快速验证与迭代<sup>[53]</sup>。

(3) 产业维度：商业模式单一与产业生态协同不足。当前运营多依赖政府补贴与示范，市场呈“哑铃型”结构，高端需求与公共服务占主导，面向大众的消费市场尚未启动。高运营成本导致潜在消费意愿和市场规模培育周期拉长。数据显示，我国通航作业中公务与私人飞行占比仅约18%、可全年稳定运行的通航线路不足10条<sup>[51]</sup>。核心运输服务与MRO、能源补给、数据服务、保险金融等支撑体系尚未形成规模协同。而eVTOL关键性能尚处验证期、核心零部件依赖全球供应链、噪声/安全/隐私担忧与人才短缺等，共同构成影响社会接受度与市场扩张的重要约束<sup>[33,54]</sup>。

### 3.2 三维协同的中国VOD发展路径

基于“空间—制度—产业”协同框架及国际经验，中国推进VOD模式需构建系统化路径，实现从“试点示范”向“系统融合”过渡。

#### 3.2.1 空间整合：构建“节点分级—廊道耦合—网络集成”空间组织模式

空间层面应遵循从“点状嵌入”向

“网络集成”的演化路径。一是建立“都市级—城区级—社区级”三级体系，分别对应“空—轨—地”联运式交通枢纽、功能复合型商业中心与网络化公共服务节点，形成功能传导与互补。二是推动“低空廊道—城市功能区”的耦合，优先在交通走廊、滨水地区等区域布局低空航路，形成“廊道引领、节点支撑”的空间结构，提升效率与韧性。三是形成“网络化、模块化、可迭代”的空间部署。初期推广可迁移、模块化设施降低风险，成熟后逐步推进节点功能复合与系统集成，实现由“轻量介入”向“深度耦合”演进。

#### 3.2.2 制度创新：构建“规划统筹—弹性治理—协同监管”三位一体制度体系

制度层面需实现由“条块分割”向“系统协同”的治理转型。一是推动低空要素与国土空间规划的法定融合，将航路、节点布局与净空保护等系统纳入“多规合一”体系，制定VOD设施分级分类与布局导则，明确不同层级Vertiport配置标准，并作为刚性内容嵌入总体规划与详细规划，实现“空—地—轨”的法定协同<sup>[36]</sup>。二是建立跨部门协同治

表1 国际城市VOD模式对比

Tab.1 Comparison of VOD models in international cities

代表模式	空间整合	制度创新	产业协同	适用场景
大阪：空轨一体集中型枢纽嵌入	依托既有轨道枢纽高密嵌入；节点容量可达10万人次/年	延续TOD统筹与更新制度，将空域协调、噪声管控嵌入既有规则	通勤+商业非航收入，非航收入占比目标达30%	高密度都市、轨道交通成熟区
巴黎：廊道耦合式联动	沿塞纳河等开放廊道布点，形成“空—地—水”走廊化组织；已规划5个节点	遗产保护约束下的分层空域+弹性试点；以系统集成验证推进细则	文旅+机场接驳，已完成20多次试飞，累计近200 km，接待约1000名访客	历史城市、滨水地区、高负荷交通走廊
迪拜：枢纽平台化产业赋能	Vertiport优先落位机场/CBD/港区等核心功能区；年规模约4.2万架次/17万人次	自贸区政策“快审快放”、一体化运营许可下RTA统筹多式交通	通勤+物流供应链，为高端物流、跨境贸易等业态提供枢纽平台	国际枢纽城市、自贸区、产业集聚区
考文垂：可迁移嵌入弹性试点	存量用地+装配式可迁移；从设计到建成约15个月，现场施工仅11周，实现快速部署	依托GPDO等临时许可，快速审批、低沉没成本验证	“MRO+会展+商业”融合；访客超1.5万人，飞行实验超100次	中小城市、更新地区、技术验证期

表2 国内城市VOD模式对比

Tab.2 Comparison of VOD models in Chinese cities

地区	空间布局	制度创新	产业生态	特色路径
深圳	56个枢纽+1500个末端起降点，优先推动7个低空综合枢纽、3个低空货运枢纽和3个低空客运枢纽	设立低空经济发展工作领导小组；在120 m以下空域实施弹性管控	公共服务与商业运营并重，无人机载货飞行77.6万架次、开通无人机航线250条、直升机载人飞行2.8万架；集聚相关企业超1700家，产值突破900亿元	枢纽耦合、网络覆盖、制造引领
广州	“最小单元VOD—走廊化延伸—网络化辐射”布局，示范区规划2个垂直枢纽、8个分布式节点和12千米低空航路	聚焦跨境低空出行的规则衔接+全空间无人体系示范区探索+100亿元低空经济产业基金	聚焦跨境通勤、跨境物流、低空旅游三大应用场景，建设eVTOL总装基地	湾区协同、跨境互联、金融赋能
成都	“干线运输—支线物流—末端配送”低空物流网络	出台《成都市低空经济产业促进办法》	山地配送常态化，预计单条航线年飞行量达到260架次，促进物流和应急联动	地形适应、物流先行、应急联动

理机制与弹性监管框架, 设立国家层面的统筹协调机制, 推动规划审批、空域管理、数据共享等方面的制度协同, 并引入“监管沙盒”“临时许可”等弹性工具, 为制度创新提供实验空间<sup>[41,48]</sup>。三是形成“制度—空间—技术”动态治理闭环, 通过制度引导布局与技术路径, 并在试点反馈中迭代规则, 推动VOD模式从政策驱动向制度内生转变。

### 3.2.3 产业协同: 培育“场景驱动—生态共生—价值循环”产业生态体系

产业层面需构建具有内生增长能力的低空经济生态。一是实施“场景驱动”策略, 优先选择通勤快线、应急救援、文旅观光、高端物流等高价值场景作为突破口流<sup>[10-12]</sup>, 以真实需求牵引基础设施与运营体系建设, 并在应用中验证技术可行性、经济性与社会接受度。二是构建“交通+”价值循环机制, 推动VOD节点向“交通+商业”“交通+数据”“交通+能源”等复合功能演化, 与商业综合体、文旅与会展等共址开发, 拓展非航收入, 形成“交通引流—商业增值—服务赋能”的良性循环<sup>[43]</sup>。三是培育“产业链—创新链—服务链”协同生态, 围绕节点布局MRO、能源补给、数据服务、保险金融等支撑产业, 通过“公共+商业”双轮驱动, 兼顾公共服务供给与市场化创新<sup>[34]</sup>。

## 4 结论与展望

VOD模式代表着城市交通系统从二维向三维演进, 是TOD理念在低空经济时代的进阶与拓展。本文通过构建“空间—制度—产业”三维分析框架, 剖析了国际城市的差异化路径: 大阪依托成熟TOD实现“空轨一体”的平滑过渡, 巴黎以“廊道耦合”实现历史城区的低冲击介入, 迪拜的“平台化开发”体现了枢纽经济与自贸区政策乘数效应, 考文垂的“可迁移试点”则验证了高不确定性下的制度弹性。这些经验共同揭示, VOD的成功并非取决于单一技术或空间策略, 而在于空间整合、制度创新与产业协同的系统性耦合。

对标国际, 中国VOD虽在场景供给、基建能力与市场规模上具备后发优势, 但在空域规划协同、跨部门治理闭

环、商业模式韧性及社会接受度等方面仍面临深层挑战。未来推进必须坚持“制度先行、场景突破、生态共赢”, 在空间上推动低空要素与国土空间规划的法定融合, 在制度上建立跨部门协同治理与弹性试点机制, 在产业上培育“交通+”复合业态的多元收益模式与韧性生态。

展望未来, VOD研究需在理论上加强“技术—市场—制度”协同演化的动态机制探讨, 并开展对城市空间结构、社会公平与环境影响的长期效应评估; 在方法上可引入数字孪生、多主体建模等工具搭建“政策实验场”, 支撑路径模拟与优化; 在实践中需持续跟踪本土试点, 鼓励各地因地制宜探索差异化模式, 逐步构建兼具国际前瞻性与中国特色的VOD理论体系与实施路径。

### 参考文献

- [1] ALDERSON A S, BECKFIELD J. Power and position in the world city system[J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811-851.
- [2] 刘翔, 陈小鸿, 潘海啸. 从“站城一体”到“走廊融合”: 流动空间视角下的TOD发展理论框架与模式优化[J]. *城市规划学刊*, 2024(4): 34-40.
- [3] American Planning Association. Planning for advanced air mobility[R/OL]. [2025-12-18]. <https://www.planning.org/publications/report/9286262/>.
- [4] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济发展的全球态势、我国现状及促进策略[J]. *经济纵横*, 2024(8): 53-62.
- [5] GOYAL R, REICHE C, FERNANDO C, et al. Urban air mobility (UAM) market study[R]. McLean, VA: The MITRE Corporation, 2018.
- [6] LINEBERGER R, HUSSAIN A, RUTGERS V. Change is in the air: the elevated future of mobility: what's next on the horizon[J]. *Deloitte Insights*, 2019(2): 1-24.
- [7] LIU S, LIU M, LIU S, et al. Research on the security risk governance roadmap in low-altitude economic field based on the economic externality theory[J]. *Engineering Proceedings*, 2025, 80(1): 14.
- [8] SUN X, WANG S, ZHANG X, et al. LAERACE: taking the policy fast-track towards low-altitude economy[J]. *Journal*

of the Air Transport Research Society, 2025, 4: 100058.

- [9] HUANG H, SU J, WANG F Y. The potential of low-altitude airspace: the future of urban air transportation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(8): 5250-5254.
- [10] PEREZ D, ZOU B, FARAZI N P. Package delivery by electric vertical takeoff and landing aircraft? an attractiveness assessment [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2025, 124: 102731.
- [11] ROBERTS N B, AGER E, LEITH T, et al. Current summary of the evidence in drone-based emergency medical services care[J]. *Resuscitation Plus*, 2023, 13: 100347.
- [12] SUO Y, LI C, TANG L, et al. Exploring AAM acceptance in tourism: environmental consciousness's influence on hedonic motivation and intention to use[J]. *Sustainability*, 2024, 16(8): 3324.
- [13] XU H, WANG L, HAN W, et al. A survey on UAV applications in smart city management: challenges, advances, and opportunities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8982-9010.
- [14] 陆继山. “天路”新基建 低空交通提质升级新引擎[J]. *新经济导刊*, 2025(8): 34-41.
- [15] 赵忠山, 赵曦, 邵伟, 等. 人工智能与大数据赋能低空经济智能化变革[J]. *中国工程咨询*, 2025(7): 113-118.
- [16] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream[M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- [17] MOORE M. 21st century personal air vehicle research[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA international air and space symposium and exposition: the next 100 years. Dayton, OH: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [18] 亿航智能 EHang: 亿航CES全球首发自动驾驶载人飞行器“亿航184”[EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.ehang.com/cn/news/55.html>.
- [19] FADHIL D N. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility[D]. Munich: Technical University of Munich, 2018: 31.
- [20] Uber. Uber elevate white paper (Oct 2016)

- [R/OL]. (2016-10) [2025-11-05]. <https://evtol.news/news/uber-elevate-white-paper-oct-2016>.
- [21] 国务院 中央军委印发《关于深化我国低空空域管理改革的意见》[EB/OL]. [2025-10-29]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/201011/t20101117\\_1050983.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/201011/t20101117_1050983.html).
- [22] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见: 国办发〔2016〕38号[Z]. 2016-05-13.
- [23] Skydrive Inc. Osaka Metro unveils "OSAKAKO Vertiport", a new takeoff and landing facility for eVTOL at Expo 2025[EB/OL]. (2024-11-22) [2025-12-18]. <https://en.skydrive2020.com/archives/14888>.
- [24] 深圳市交通运输局(深圳市港务管理局). 2024年深圳低空经济大事[EB/OL]. (2025-01-17) [2025-12-18]. [https://jtys.sz.gov.cn/zwgk/jtzc/gzdt/content/post\\_11965749.html](https://jtys.sz.gov.cn/zwgk/jtzc/gzdt/content/post_11965749.html).
- [25] 张凡, 李丽. 迪拜枢纽经济转型发展的路径与政策启示[J]. 全球城市研究(中英文), 2023, 4(4): 133-146, 192-193.
- [26] CHAUDHRY G A. Evolution of the transportation system in Dubai[J]. Network Industries Quarterly, 2012, 14(1): 7-11.
- [27] Skyports Infrastructure. World's first commercial vertiport "DXV" reaches "topping-out" construction milestone[EB/OL]. (2023-10-31) [2025-12-18]. <https://skyports.net/worlds-first-commercial-vertiport-dxv-reaches-topping-out-construction-milestone/>.
- [28] Urban-Air Port Ltd. Air one event[EB/OL]. (2022) [2025-12-18]. <https://www.urbanairport.com/airone>.
- [29] 王晶, 汤庆苗, 郭炜龙, 等. 美国、欧盟和日本城市空中交通发展历程与经验[J]. 国际城市规划, 2025, 40(1): 1-9.
- [30] 中共中央, 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[R/OL]. (2021-02) [2025-12-26]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content\\_5588654.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm).
- [31] 中国民用航空局. 关于民用无人驾驶航空器监管服务有关事宜的公告[EB/OL]. (2024-01-03) [2025-10-29]. [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZ-TG/202401/t20240103\\_222078.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZ-TG/202401/t20240103_222078.html).
- [32] 国家空中交通管制委员会办公室. 关于发布《国家空域基础分类方法》的通知[EB/OL]. (2023-12-21) [2025-10-29]. [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZ-TG/202312/t20231221\\_222397.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZ-TG/202312/t20231221_222397.html).
- [33] 党庆庆, 李焕, 王光秋, 等. 面向城市空中交通的垂直起降机场发展综述[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 52(3): 1-16.
- [34] STRAUBINGER A, ROTHFELD R, SHAMIYEH M, et al. An overview of current research and developments in urban air mobility: setting the scene for UAM introduction[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 87: 101852.
- [35] 黄建中, 何嘉雯, 张伟聪, 等. 城市低空规划: 地空协同的要素、实现路径和规划响应[J]. 城市规划学刊, 2025(5): 14-22.
- [36] HUANG C, FANG S, WU H, et al. Low-altitude intelligent transportation: system architecture, infrastructure, and key technologies[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 42: 100694.
- [37] BAURANOV A, RAKAS J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.
- [38] 刘泉, 陈瑶瑶, 洪晓苇, 等. 面向无人机的城市低空空域规划的国际经验[J]. 城市规划学刊, 2024(5): 64-70.
- [39] 王纪武, 王奕宁, 章俊岫. 低空经济下低空空域利用的规划应对策略[J]. 规划师, 2025, 41(4): 31-38.
- [40] BHARADWAJ S, CARR S, NEOGI N, et al. Decentralized control synthesis for air traffic management in urban air mobility[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8(2): 598-608.
- [41] 丁芝华. 自动驾驶监管沙盒的应用探索与法律建构[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2025, 24(1): 122-133.
- [42] KOUMOUTSIDI A, PAGONI I, POLYDOROPOULOU A. A new mobility era: stakeholders' insights regarding urban air mobility[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3128.
- [43] GRAHAM A. How important are commercial revenues to today's airports? [J]. Journal of Air Transport Management, 2009, 15(3): 106-111.
- [44] Skydrive INC. SkyDrive\_TOP[EB/OL]. [2025-12-18]. <https://en.skydrive2020.com/>.
- [45] 沈振江, 马妍, 郭晓. 日本国土空间规划的研究方法及近年来的发展趋势[J]. 城市与区域规划研究, 2019, 11(2): 92-106.
- [46] 卓健. 从技术型交通规划到政策型交通规划: 法国巴黎大区交通出行规划(PDUIF)的启示[J]. 城市交通, 2019, 17(4): 17-26, 34.
- [47] MARMET J. First integrated vertiport inaugurated in Paris, epicentre of sustainable advanced air mobility (AAM) in Europe [EB/OL]. (2023-05-16) [2025-12-18]. <https://presse.groupeadp.fr/first-vertiport-pontoise/>.
- [48] PARTICIPATION E. The town and country planning (General Permitted Development) (England) order 2015[EB/OL]. [2025-12-16]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/596/contents>.
- [49] 深圳市规划和自然资源局, 深圳市发展和改革委员会, 深圳市交通运输局. 深圳市低空航空器起降设施布局规划(2026—2035年)[R/OL]. (2025-09-28) [2025-12-18]. [https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/ghjh/csgz/zxgh/content/post\\_12470231.html](https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/ghjh/csgz/zxgh/content/post_12470231.html).
- [50] 成都市人民政府. 40分钟路只需8分钟山区“空中快递员”来啦[EB/OL]. (2024-12-18) [2025-12-18]. [https://www.chengdu.gov.cn/cdsrmzf/c169603/2024-12/18/content\\_a43711db7fdd417f968d12fdb3e1838d.shtml](https://www.chengdu.gov.cn/cdsrmzf/c169603/2024-12/18/content_a43711db7fdd417f968d12fdb3e1838d.shtml).
- [51] 陕西党建网. [EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.sx-dj.gov.cn/ywsd/rdgc/1922135595345530881.html>.
- [52] GIUFFRIDA N, LE PIRA M, INTURRI G, et al. On-demand flexible transit in fast-growing cities: the case of Dubai[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4455.
- [53] PARTICIPATION E. The town and country planning (General Permitted Development) (England) order 2015[EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/596>.
- [54] 陈艺君, 余莎莎, 张学军. 城市低空场景下无人机运行对地风险量化评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(3): 806-815.