

eVTOL飞行器与飞行汽车发展思考

Thoughts on the Development of eVTOL and Flying Cars

■ 王翔宇 / 中国航空发动机研究院 张平平 / 中国航发湖南动力机械研究所

电动垂直起降（eVTOL）飞行器正处于快速发展的高峰期，围绕差异化的细分市场任务需求形成了不同的配置架构和技术路径，同时也为未来飞行汽车的跨越式发展提供了可能性，当然在这一过程中还有很多不可回避的挑战。

近年来，关于城市空中交通（UAM）的讨论持续升温，受电气化飞行技术进步和航空业绿色转型的双重因素驱动，聚焦UAM市场需求的eVTOL飞行器进入全面快速发展的新时期，有望深刻改变未来航空运输方式。与此同时，能够兼顾地面驾驶和空中飞行的飞行汽车也从抽象的概念逐步走进现实，如何定位这两条既有重叠又有差异的发展赛道正受到各界的关注。

eVTOL飞行器典型配置

eVTOL飞行器通过分布式电推进系统具备了垂直起降能力，相比常规垂直起降飞行器采用的燃气涡轮发动机和复杂推力矢量分配方案，电池、电动机和电子控制技术的发展大大降低了兼顾垂直升力和水平推力的动力单元的实现难度，而多组动力单元的应用使得飞行可靠性和稳定性进一步增强。目前，eVTOL飞行器的设计载客量通常在10人以下，起飞质量3~4t，中短期内满足50~100km的飞行需求，长期则可以覆盖200km以上的城际航线，这与UAM市场的任务模式相当契合，并形成了所谓“空中出租车”的概念。根据不同的系统配置和飞行机



ZeeAero公司 Z-P2飞行器

制，eVTOL飞行器一般分为升力巡航、推力矢量和多旋翼这几大类。

升力巡航

升力巡航eVTOL飞行器在悬停和巡航时由两套独立的系统提供动力，动力系统全部被安装在固定机翼上，巡航阶段升力螺旋桨会被锁定或进一步回收到短舱中。ZeeAero公司的Z-P2、Kitty Hawk公司的CORA以及Wisk Aero公司的Wisk eVTOL飞行器均属于这一类。事实上还有VX-4等将升力巡航和推力矢量相结合

推力矢量

的eVTOL飞行器，既有固定的垂直动力

系统，也有可旋转的垂直与水平动力系统，在悬停阶段所有推进装置都发挥作用，但这样显然成本更高、结构更复杂。和巡航时使用相同的推进装置，又包括倾转旋翼和倾转机翼等不同的形式。前者如Joby公司的S2飞行器，旋翼可在固定机翼上转动并实现独立控制；后者如Dufour Aerospace公司的Aero3飞行器，机翼连同旋翼作为一个整体转动，悬停效率更高但单点故障更易引发灾难性事故。此外，还有像Lilium Jet飞行器这样的新构型，取代螺旋桨的风扇被置于一系列的导管式涵道内，能够降低



Joby公司 S2飞行器

叶尖损失并提供更高的桨盘载荷。

多旋翼

多旋翼 eVTOL 飞行器与电动直升飞机较为类似，动力系统由多个只提供垂直升力、转速不同的旋翼单元组成，桨盘面积较大、负载较低，悬停阶段效率较高，不需要复杂的机构来实现动力系统的转动，但由于没有固定机翼，飞行速度和航程受到较大限制，同时多旋翼 eVTOL 飞行器机身在巡航时可能会有一定的倾斜角度，降低旅客的舒适性体验。亿航公司的 Ehang184/216、Sky-Drive 公司的 SD-03 和 Volocopter 公司的 VoloCity 都是典型的多旋翼 eVTOL 飞行器。

不同配置特点比较

从发展实践来看，与推力矢量和升力巡航这些固定翼 eVTOL 飞行器相比，多旋翼 eVTOL 飞行器的开发难度较低、资金投入较少，能够较快实现市场投放，适用于 50km 以下的短途飞行。中长途飞行时巡航效率显然更加重要，此时推力矢量 eVTOL 飞行器在飞行速度和航程上的优势得以显现，而升力巡航 eVTOL 飞行器则更多是在悬停效率和巡航效率、结构简单和复杂之间的折中方案。因此，多旋翼 eVTOL 飞行器往往用作探索 UAM 飞行概念的商业和技术可行性，以此为基线进一步开发的批量生产上市产品则更有可能是推力矢量和升力巡航 eVTOL 飞行器。

曾有研究对 120 个已有的 eVTOL 飞行器概念进行了分类^[1]，其中多旋翼 eVTOL 飞行器为 48 个，占比 40%，推力矢量、升力巡航以及组合动力 eVTOL 飞行器的份额则分别为 30%、17.5% 和 9%，但真正进入到飞行测试阶段的机型却还不到多旋翼 eVTOL 飞行器的一半，很多

代表性 eVTOL 飞行器的在参考情景下的任务能力比较^[2]

配置类型		多旋翼	升力巡航	推力矢量
选取型号名称		Ehang184	Kitty Hawk CORA	Lilium jet
桨盘载荷 / (N/m ²)		440	880	7500
总悬停时间 / min		20.5	16.5	12.1
巡航速度 / (km/h)		100	180	252
实用航程 / km		42	107	203
飞行时间 / min		25	36	48
7km 短距离任务	时间 / min	4.9	3.3	2.8
	能耗 / (kW·h)	3	7.1	5.7
30km 中距离任务	时间 / min	18.7	10.9	8.2
	能耗 / (kW·h)	10.9	15.2	8.3
100km 长距离任务	时间 / min	—	34.3	24.9
	能耗 / (kW·h)	—	39.7	16.1

未经商业验证的概念能否落地有待谨慎观察，距离 eVTOL 飞行器各类产品全面成熟、形成指向明确的细分市场结构还有很长的路要走。同时，各个初创公司主导的 eVTOL 飞行器项目数量几乎与波音公司、空客公司和巴航工业等航空巨头持平，这也是过去几十年通航市场从未有过的胜景。无论 UAM 是否会诞生像特斯拉之于电动汽车行业那样的破局者，未来 eVTOL 飞行器的发展也必然会经历从发散到收敛、再到少量几型最具竞争力的产品占据大多数市场份额的过程。

eVTOL 飞行器发展挑战

产品技术

从动力系统来看，当前 eVTOL 飞行器所采用的锂离子动力电池质量能量密度一般不超过 500W·h/kg，仅相当于常规航空燃料的 4% 左右，是制约 eVTOL 飞行器有效载荷、飞行时间、巡航速度和实际航程的最核心因素，应用场景受限的同时连

带产生了一系列的适航取证和运营经济性问题。从控制系统来看，到 2035 年前自动飞行技术的发展很难满足 eVTOL 飞行器无人驾驶的需求，即使不考虑飞行员自身的额外质量，培训成千上万的专业飞行员也是不现实的，各种不同配置类型的 eVTOL 飞行器必然意味着各种适用范围不同的飞行执照。

标准与法规

UAM 带来了全新的市场需求，eVTOL 飞行器并不是直升机的升级版，这种前所未有的电气化产品在现有航空制造体系中处于一个较为特殊的位置，现有标准法规的小修小改是无法与 eVTOL 飞行器的设计、生产和运营相配适的。例如，eVTOL 飞行器产品的认证模式与规则、专门面向 eVTOL 飞行器的停机坪和充电设施的标准、空中交通管理机制的建立能否与 eVTOL 飞行器的研发同期进行、eVTOL 飞行器的环境影响性评价，都需要政府机构与航空业合作制定针对性法规，进一步加

快监管进程从而确保eVTOL飞行器的高效安全飞行。

基础设施建设

目前，大多数直升机机场进行充电设施升级改造后不存在兼容eVTOL飞行器的根本性障碍，但这显然不足以支撑起大密度、全覆盖、短距离、高频次的UAM运营网络。虽然eVTOL飞行器无需跑道，但在城市地区想要找到足够大、足够的空间去建设包括一个个停机坪、充

电设施和候机场所所在内的配套支持体系并不容易，一些未充分利用的停车场和高层建筑楼顶将成为后续开发的重点，这涉及大量与场地征用、土木建筑工程以及高功率负载充电系统改造相关的投资，并相应地产生了很多难以预知的时间成本。

社会接受程度

在UAM发展起步阶段，大多数公众可能会对其使用风险持保留态度，必须让公众深入了解熟悉

eVTOL飞行器所引入的先进技术并确认是安全的，而完善的紧急逃生方案、消防安全计划和针对恶劣天气的应急措施都是消减公众疑虑的重要手段。eVTOL飞行器的旋翼噪声对公众活动的影响是另一个要关注的问题，可能引发eVTOL飞行器基础设施建设项目的“邻避”困境，但目前关于各类eVTOL飞行器的噪声测量评估以及其与商用飞机和直升机噪声对比的工作还处于起步阶段。

eVTOL飞行器发展过程中面对的主要挑战（来源：AviationOutlook）

产品技术	电池技术	目前电池能量密度不足，严重限制了eVTOL飞行器的航程、有效载荷能力和功率输出
	控制技术	考虑到垂直起降和巡航飞行不同模式之间复杂的转换，需要先进的飞行控制系统来保持飞行稳定性并实现自动驾驶
	噪声	需要进一步开发升力风扇、螺旋桨和电动机的降噪技术，最大限度地降低低空飞行噪声污染
	安全性和可靠性	必须执行堪比商用飞机的严格安全要求，要有足够的系统设计冗余和相关应急备用方案
	天气鲁棒性	飞行过程中很可能会暴露在雨雪和狂风等破坏性天气条件下，机身和推进系统必须要适应各种不利的外部条件
	成本	原型机的成本普遍在数百万美元以上，而最终应达到与豪华汽车相当的大众价格水平，这在一定程度上依赖规模经济效应
标准与法规	空中交通管理政策	更新安全认证标准、操作规则以及适用于高密度、低空飞行的空中交通管制程序，能够与现有航空运营体系全方位集成
	基础设施政策	制定专门的土地使用政策，促进eVTOL飞行器机场、充电站和紧急降落区配套基础设施发展
	飞行保险与事故责任	与电动飞行相关的保险框架和责任法规应尽快出台，包括安全要求、事故调查认定、旅客权利和运营商/制造商责任等内容
	飞行员培训	需要平衡可实现性和高安全性之间的矛盾，应该考虑类似于汽车驾照的分级分类管理办法
	数据隐私	随着无人驾驶技术的升级，需要专门的准则防范过度监控、黑客攻击和数据滥用
	环境保护	噪声条例、排放限制和其他环境法规应在不给eVTOL飞行器产业造成过重负担的情况下最大限度降低环境影响
基础设施建设	机场设计	机场应尽可能紧凑以适应城市区域有限的空间，这涉及充电站、维护设施、停机坪以及与地面交通的整合
	机场选址	建筑物屋顶、停车场和闲置的土地为机场选址提供了多种可能，应简化此类基础设施建设的审批流程
	紧急备降	需要为紧急情况准备完备的备用着陆点网络，如高速公路、田野和建筑物屋顶
	运营调度	需要更多的空中交通管理系统来协调和监控所有低空飞行轨迹，空中交通管理员的职责将扩大
	天气预报	高可信度分析当地风力和降水情况以便识别风险并规划航线，这也是飞行控制系统的重要输入信息
社会接受程度	公众信任	对安全性和可靠性的担忧可能会削弱公众的接受度，有必要进行广泛的演示飞行以建立公众的信心
	经济承受水平	运营成本必须降低到每次几十美元的可承受范围，生产规模和技术进步应该会降低成本，但在早期部署时可能需要补贴
	社区参与	加强与社区群众的联系，多方征求意见，尽早解决安全、噪声和隐私方面的问题，展示对当地经济发展的带动作用
	盈利能力	采购成本过高、市场模式未经验证等因素可能使得运营盈利情况存在较大未知，在加大政府补贴的同时应积极引入私有资本
	保险可用性	eVTOL飞行器被保险公司纳入高风险目录，保费极高，随着更多可靠性和安全性的数据出现，应以较低的费率开发主流保险产品
	飞行员数量	可能没有足够的训练有素的飞行员来驾驶eVTOL飞行器，在自动驾驶技术成熟前这将是一个长期的问题



Aerocar 飞行汽车

飞行汽车发展态势

理想的飞行汽车既能像普通汽车一样在公路上行驶，也能利用垂直起降能力实现空中飞行。人们对飞行汽车的兴趣与飞机和汽车一样悠久，大多数早期的原型机只是一辆装有机翼和由发动机驱动螺旋桨的汽车^③。1917年格伦·寇蒂斯就制造出了人类历史上第一架飞行汽车 Autoplane，当时的技术水平只能使其进行了几次“跳跃式”飞行。穆尔顿·泰勒于1949年设计的 Aerocar 则是第一辆可以从地面驾驶到空中飞行再到地面驾驶的飞行汽车，设计最大地面速度为108km/h、空中巡航速度为193km/h，满载时爬升率为167.6m/min，巡航距离为483km，飞行模式与地面模式之间的切换大约要5min。1966年，保罗·莫勒开发了第一款能够垂直起降的飞行汽车 XM-2，到1989年其衍生发展的外观酷似飞碟的 M200X 巡航速度达到500km/h，航程在1200km以上，不过飞行高度只有15m左右。

2000年之后，相继涌现了 Macro 公司的 SkyRider 系列（双座跑车与旋翼动力系统结合）、Terrafugia 公司

的 Transition（号称“第一款实用飞行汽车”，配备全车降落伞并可停放在标准单车车库）和 Stefan Klein 公司的 AeroMobil 系列（机翼可折叠，地面和空中分别对应不同的操作系统）等多型样机。在 eVTOL 飞行器搅动 UAM 市场之时，飞行汽车同样进入了发展新阶段。2012年，位于荷兰的 PAL-V 公司试飞了3轮双叶可折叠螺旋桨的飞行汽车，在一台160kW 内燃机的驱动下地面和空中的速度均达到了180km/h，最大起飞质量为910kg，飞行高度超过了1200m。类似的还有美国 NFT 公司的 ASKA 飞行汽车，具有4轮4座，6组螺旋桨，支撑臂中的4组用来提供升力，另有2组固定在尾翼上产生向

前的推力。Terrafugia 公司正在开发的 TF-X 概念飞行汽车则将倾转旋翼架构与可折叠机构结合，地面驾驶和起降时由1台220kW 的燃气涡轮发动机和2台440kW 的电动螺旋桨组成的混合电推进系统驱动，巡航飞行时切换为单一的燃气涡轮动力，最大巡航速度超过320km/h，航程为800km。

单纯从视觉上看，飞行汽车和 eVTOL 飞行器的最大差异在于是否有车轮，而飞行汽车技术发展的关键在于如何能够既轻巧又紧凑地将地面和空中两套动力系统集成到一起。

一方面，飞行汽车的空气动力学表现应该对标 eVTOL 飞行器，但形态上又要贴合汽车，为了在宽度和高度上与现有停车位和公路的有限空间兼容，其机翼或旋翼必须被设计成可折叠结构的，不但升力面积受限，也难以应用分布式推进系统，飞行效率和安全裕度都会受到影响，这也意味着绝大多数飞行汽车概念都集中在多旋翼方案而非倾转旋翼或升力巡航。

另一方面，两套动力系统的结合必然导致更复杂的机械机构、更大的飞行质量，飞行汽车在垂直起降时的功率需求比 eVTOL 飞行器高几百千瓦乃至几兆瓦，eVTOL 飞行



飞行状态

地面状态

PAL-V 飞行汽车

器电池系统能量密度不足的问题被进一步放大，极大地削弱了飞行汽车的任务执行能力。飞行汽车的动力能源可能无法在较短时间内过渡到全电推进，混合电推进是其发展过程中必然要经历的一个阶段，而随着兼容地面驾驶和空中飞行的一体化机电控技术逐渐成熟，实现螺旋桨和车轮的整合（如将螺旋桨集成在同心的车轮轮毂内）有望成为下一步工作的重点。

除此以外，还有一些eVTOL飞行器发展过程中的挑战同样出现在飞行汽车上，甚至更为严重。例如，飞行汽车可能更接近“私家车”的模式，缺乏运营商统一的组织和管理，意味对自动驾驶/飞行技术有着更高的要求；飞行汽车的认证需要跨部门跨机构协作，空中交通管理应遵守专门的准则，不可能随心所欲进行模式转换。从某种意义上说，飞行汽车是eVTOL飞行器发展的一种高级形式，通过短期内更容易实现的eVTOL飞行器去推动电动飞行技术和UAM商业化市场的不断成熟，逐渐消解标准与法规障碍、增强公众接受程度，为任务场景更加丰富、使用环境更加灵活、与现有基础设施更为契合但技术难度更高的飞行汽车的应用做好铺垫。

几点思考

作为低空经济发展的重要载体，eVTOL飞行器和飞行汽车的市场空间快速增长，其产品特性、商业化应用前景以及二者之间的区别与联系正受到各界深切关注，具体体现在以下几个方面。

第一，推力矢量、升力巡航和多旋翼等不同的eVTOL飞行器配置

构型对应着不同的开发难度和任务能力，以多旋翼为基础向推力矢量和升力巡航过渡可能是较为稳健的技术选择。在根据UAM任务场景侧重发展的同时，百花齐放的产品概念和众多的市场参与者必然存在一个整合的过程。

第二，除了eVTOL飞行器的产品力有待提升外，还有很多阻碍其发展应用的全产业链因素耦合在了一起，这些配套问题只依靠航空制造商自身是无法解决的。在打造可复制的UAM商业模式过程中，集市场开拓、研发生产、运营保障为一体的专业化公司将更容易得到政府的支持和市场的青睐。

第三，飞行汽车的优势在于“地空两用”，但这种多任务处理能力往往是低效的，其发展面对的技术与使用难题比eVTOL飞行器更大，至少目前来看贸然将这种不成熟的产品与UAM不成熟的市场相结合只会雪上加霜，未来eVTOL飞行器的研发和运营经验将是飞行汽车进一步发展的重要参照。

第四，无论是eVTOL飞行器还是飞行汽车，航空制造商和汽车制造商之间开始呈现出了前所未有的密切合作，很多用在电动汽车上的共性技术和相关产业基础已经被迁移到了eVTOL飞行器，而eVTOL飞行器的发展也使得电动汽车“飞起来”成为可能，产业间的跨界融合正在成为绿色交通转型的新可能。

第五，公众的接受程度是eVTOL飞行器和电动汽车发展中的最大不确定因素，很多时候技术进步和产品研发的速度要远快于移风易俗的速度，人们出行习惯的改变、对新产品新技术的认可都是一个漫长的过程。除了

要有持续性的政策和资金支持外，相关市场参与者也应对其中的不可知风险有充分的认识。

结束语

与20世纪初飞机的发展历程类似，当前eVTOL飞行器的设计理念正在不断更新迭代，基于不同配置架构、瞄向不同任务场景的细分市场开始形成。而随着eVTOL飞行器商业化应用进程的加速，长期以来停留在探索验证阶段的飞行汽车概念似乎迎来了新的历史性机遇，作为eVTOL飞行器的“升级版”，未来飞行汽车的发展壮大可能高度依赖eVTOL飞行器所引领的电气化飞行技术进步以及UAM运营经验积累。当然，即便是相对更为简单的eVTOL飞行器也还面临着很多的发展瓶颈问题，对于研发应用变革性产品、建立全新商业模式过程中可能的风险与困难应有足够的准备。

航空动力

（王翔宇，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）

参考文献

- [1] UGWUEZE O, STATHEROS T, MIKE A. et al. Trends in eVTOL aircraft development: the concepts, enablers and challenges[C]. AIAA Scitech 2023 Forum, 2023.
- [2] BACCHINI A, CESTINO E. Electric VTOL configurations comparison[J]. Aerospace, 2019(6): 26.
- [3] RAJASHEKARA K, WANG Q, MATSUSE K. Flying cars: challenges and propulsion strategies[J]. IEEE Electrification Magazine, 2015(4): 46-57.