

eVTOL飞行器及其动力发展态势研究

The Development of eVTOLs and the Propulsion Systems

■ 罗彧 廖忠权/中国航发研究院

电动垂直起飞和着陆 (eVTOL) 飞行器是近年随着城市交通发展而产生的新颖飞行器, 通常采用非常规设计, 将空气动力学和电动推进技术更紧密地结合在一起, 既可作为城市公共交通工具, 也可作为私人飞行器。随着优步公司城市空中交通运输项目 Uber Elevate 的提出, 全球不断涌现出各种 eVTOL 概念产品。

当前发展的电动垂直起飞和着陆 (eVTOL) 飞行器多用于城市空中交通运输。其主要原因是由于电推进系统与内燃机推进系统相比, 电网的能源成本只有航空燃料成本的 30%, 而且电推进系统的效率是内燃机的 2 ~ 4 倍。据波音公司的一项研究表明, 4 座的倾转旋翼 eVTOL 飞行器与采用活塞发动机的罗宾逊 R44 直升机相比, 其座千米的运营成本可降低 26%, 而且动力系统的结构更简单、维护成本更低。

目前, 世界上有数十种 eVTOL 飞行器在研。空客、波音以及其他各种创新技术公司推出了各种各样的 eVTOL 飞行器。例如, 空客 CityAirbus、Vahana, 波音的 CAV, 英国涅瓦航空航天公司的 AirQuadOne, 亿航 184 (Ehang 184), 德国 Volocopter 公司的 Volocopter 2X, 德国 Lilium 公司的 Lilium 飞行器等。值得一提的是, 发动机制造商罗罗公司利用其在燃气涡轮、垂直起降技术、系统分析以及航空法规和认证领域的经验积累, 也开发了自己的 eVTOL 概念飞行器, 加入了 eVTOL 发展浪潮中。

相对于传统旋翼机, eVTOL 飞行



空客 CityAirbus



空客 Vahana



波音 CAV



涅瓦航空航天 AirQuadOne



亿航 184



Volocopter 2X



Lilium



罗罗公司 eVTOL

eVTOL 飞行器

器性能有较大不同。传统旋翼机航程较长，更适合城市之间或是较大航程的飞行，而eVTOL飞行器则航程短，突出经济性、安全性、便捷性和低噪声，主要应用目标就是城市内的交通运输。eVTOL飞行器与传统的旋翼机之间更多是互补关系，而非竞争关系，其发展壮大并不会对传统旋翼机的发展造成重大影响。这也是大多数旋翼机制造商对eVTOL飞行器持欢迎而非排斥态度的原因。虽然eVTOL飞行器尚未大规模投入运营，但随着人类对高效出行的永恒追求，eVTOL飞行器市场发展前景光明，据高盛公司预测，到2035年，全球eVTOL飞行器的市场将达到每年700亿美元，每年需要制造5万架全新的eVTOL飞行器。

城市空中交通运输系统 优步 Elevate 空中交通计划

优步公司成立于2010年，是一家提供一键呼叫出租车及共享汽车服务的公司，自成立以来，其业务就迅速扩展，目前已经扩展到全球数百个城市。2016年，公司又提出了一键呼叫出租飞机——“空中出租车”的构想，设想在城市中建立一个空中交通网络，部署数千架eVTOL飞行器作为“空中出租车”，并将其与共享汽车和公共交通连接，为乘客提供最后1km服务，以此缓解城市地面交通拥堵。

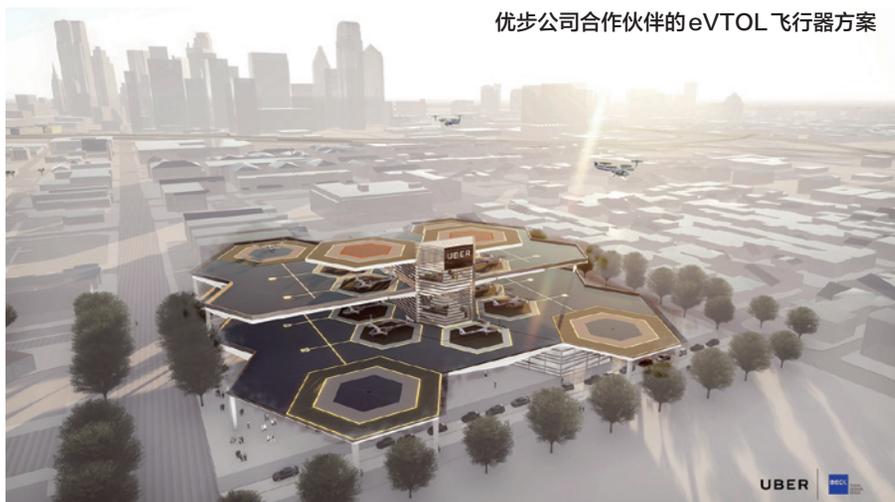
公司于2016年发布了Uber Elevate 按需航空服务白皮书，提出建设未来城市空中交通计划，2018年又对其进行了修订。总体上是瞄准中短程40 ~ 96km (25 ~ 60mile) 市区航空，利用eVTOL飞行器为未来城市提供一键约飞机的空中交通服务。优步

公司计划于2020年开始试飞其eVTOL飞行器，2023年将其投入市场。但优步公司并不打算自己研制eVTOL飞行器，而是由其合作伙伴研制。目前，优步公司已经与5家飞机制造商签署了合作协议，合作研制新型eVTOL飞行器，这5家公司分别是极光飞行科学公司、巴航工业、斯洛文尼亚蝙蝠飞机公司、卡莱姆飞机公司、贝尔公司，并都提出了各自的eVTOL飞行器方案。

在2018年5月举行的第二届Elevate展会上，优步公司展示了其研发的“飞行汽车”概念原型机，又被称为eVTOL概念的“通用参考模型”(eVTOL Common Reference Model, eCRM)，目的是寻求设计eVTOL飞行器的最优技术、工具和试验方法，并将成果与合作伙伴共享，用于各种eVTOL设计方案的研制与验证，希望优步公司的空中交通服务网络能够支持各种规格的eVTOL飞行器。值得一提的是，巴航工业从事颠覆性技术创新组织Embraer X在该展会上也发布了



优步公司合作伙伴的eVTOL飞行器方案



优步公司eCRM概念

首款eVTOL概念飞行器。

优步公司计划于2020年率先在达拉斯、沃斯堡和洛杉矶三座城市进行eVTOL飞行试验，2023年在三座城市开启eVTOL商业服务。从2023年开始，初期在一座城市投入50架eVTOL飞行器；如果运作良好，到2025年，eVTOL飞行器机队规模将扩大到1000架。为了保证安全性，优步公司在机队低密度阶段仍会使用有人驾驶的eVTOL飞行器，但是很快就会转移到自主飞行的无人驾驶飞行器。这不仅是为了降低聘用飞行员带来的高昂成本，还因为一旦eVTOL飞行器的数量太大，所需飞行员的数量将远远超过美国现有飞行员人数。

优步公司的目标是使eVTOL飞行器的安全性达到汽车的两倍以上、直升机的4倍以上，主要通过飞行器设计和适航取证两个方面进行保证。在设计上，eVTOL飞行器动力传动系统的能量源、传输总线、电力、设备、电机和推进器都有冗余设计，采用分布式电推进以及自主飞行系统的冗余设计。此外，eVTOL飞机的机体大多采用轻质的复合材料，可安装降落伞，确保在动力失效时飞机及乘客的安全。直升机的旋翼安装在驾驶舱上方，无法安装弹射降落伞，因为旋翼会把降落伞切碎，而eVTOL飞行器的旋翼都安装在驾驶舱周围，因此不存在此类问题。虽然目前的机载降落伞还受到最小打开高度的限制，但制造商正在努力改善这一情况。在适航认证方面也应采用更加适合eVTOL飞机的规则。

优步公司为了推进其Elevate城市空中交通计划，还在eVTOL起降



空客发布的包含CityAirbus、Vahana和Octacopter在内的城市交通路线图

机场、充电桩、政府空域管理、交通监管等方面进行了筹划安排。

空客Voom系统

城市空中交通解决方案是当前航空运输发展的热点之一，除了优步公司积极筹划其Elevate空中交通计划，空客公司也在积极进行城市空中运输的尝试。空客位于硅谷的创新中心A³公司于2017年4月在巴西圣保罗推出世界首个直升机服务即时预定平台Voom。在体验该服务时，用户只需要用手机输入出发地和目的地，便会有汽车将乘客运送到最近的直升机停机坪，搭乘空客的直升机飞往目的地停机坪后，会继续有汽车将用户送到最终目的地。

与传统直升机运输服务相比，通过Voom系统乘机的价格降低了约80%，与租车服务的价格相当。Voom系统当前有8个机场，有6个在圣保罗市中心，两个在圣保罗机场。在空客公司的支持下，Voom系统也将部署在墨西哥的墨西哥城，因为墨西哥城的交通拥堵情况同样非常严重。空客公司将把Voom直升

机服务获取的经验用于开发真正的城市交通工具——“城市空中客车”（City Airbus）。

波音无人机交通管理系统

继优步和空客提出各自的城市空中交通解决方案之后，飞机巨头波音公司也提出了自己的交通方案。2018年7月，波音公司宣布已经与人工智能公司SparkCognition合作，将利用人工智能和区块链技术，开发一个无人机交通管理系统（UTM），能够跟踪无人驾驶飞行器的飞行，并为载客和载货飞行器分配航线，以确保交通运输安全。据SparkCognition首席执行官Amir Husain介绍，据估计，城市空中交通市场规模将高达3万亿美元。

波音公司还宣布成立了一个称为波音NEXT的部门，它将协助推进UTM和下一代交通方式，它将专注于建立智能城市模型和探索新的市场机遇，以应对未来交通带来的挑战。波音NEXT的产品将包括eVTOL飞行器和近期提出的超声速客机概念，以便在未来的交通运输中提供灵活的货物运输和城市交通运输能力。



波音公司构筑的包括高超声速客机、CAV飞行器在内的未来客货运愿景

eVTOL 飞行器动力发展态势

eVTOL 动力系统

动力系统是所有飞行器的核心所在，eVTOL也不例外。从近中期发展来看，航空发动机行业对eVTOL动力系统看法不一，总体来看是全电推进和混合电推进并行。罗罗公司认为小型eVTOL的全电推进系统较容易实现。普惠加拿大公司也认为全电eVTOL会成为城市生活的一部分。但赛峰集团认为，未来20年能支持eVTOL飞行超过30min、载重超过100kg的全电动架构还无法实现，并认为在相当一段时间内可能还要依赖燃油发动机驱动电动机的混合电推进系统。今年6月，贝尔公司与赛峰集团达成合作，赛峰集团为贝尔的eVTOL飞行器概念“空中出租车”研发混合动力驱动系统解决方案。

但从长远来看，随着电推进系统性能的提升，会有越来越多的eVTOL采用电推进方式。值得一提的是，优步公司的Elevate空中交通计划希望其eVTOL飞行器一开始商业运营就采用全电推进。对电推

进系统而言，电池是关键所在，电池的能量密度、充电时间、循环寿命、安全性等决定着eVTOL的性能，特别是电池的能量密度直接决定了eVTOL的飞行时间。

波音公司的一项研究也表明，电池能量密度达到 $0.4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，就能满足许多在研的小型eVTOL飞行器的动力需求。但目前在研的电池能量密度多在 $0.25\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 量级，尚不能满足许多eVTOL飞行器的动力需求。

优步公司对电池的短期应用目标是，2023年其eVTOL飞行器进入低速生产时，单个电池级的电池能量密度为 $0.35\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，电池组级的电池能量密度为 $0.3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ；充电时，15min内电量可从30%达到90%；使用寿命为500次循环，成本为400美元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。其长期的应用目标则是，2028年电池使用寿命为1000次循环；2032年电池使用寿命达到2000次循环，而到2030年电池成本可降到200美元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。为了达到eVTOL飞行器的电池能量目标，目前电池厂商都在开发各种高能量密度电池。

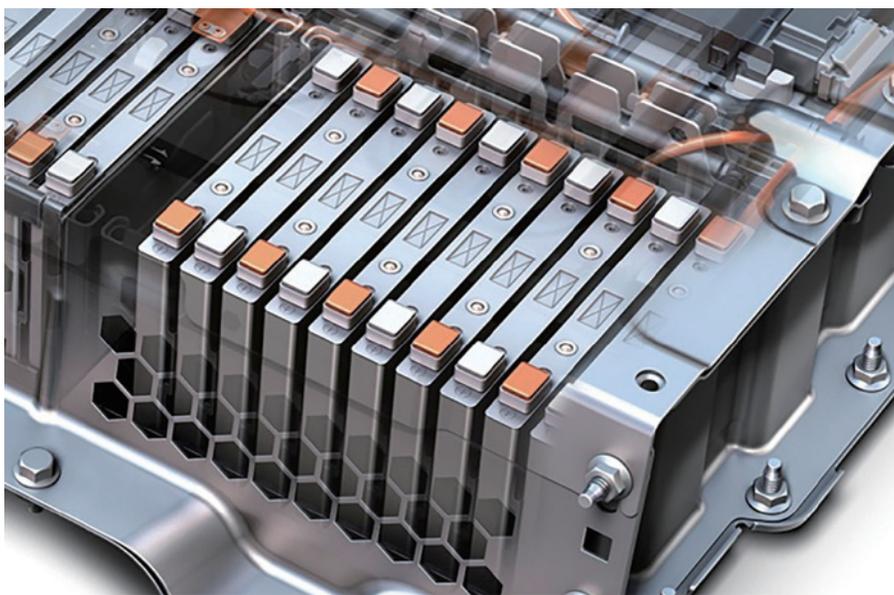
美国Seeo电池公司正在试验能量密度达 $0.35\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的锂聚合物电池，最终目标是研制出能量密度达 $0.4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的电池。美国固体能源公司(Solid Energy)更是研发出能量密度高达0.45以上的锂金属电池。

锂金属电池的兴起

高能量密度锂电池是全电推进系统的重要选择。与传统镍镉电池和铅酸电池相比，锂电池具有能量密度高、工作电压高、自放电率低、循环寿命长、充放电效率高、工作温度范围宽、环境污染小等优点。就锂电池而言，当前的主流是锂离子电池，现阶段最高水平的锂离子电池在技术上实现了能量密度和体积能量密度分别达到 $0.4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 和 $1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{L}$ ，但很难再有更大发展。必须寻求能量密度更大的锂电池，在此背景下，锂金属电池进入人们的视野。

与传统的锂离子电池相比，锂金属电池的能量密度更高，封存容易，在同样电池容量条件下，其体积和质量要比锂离子电池小得多。例如，将锂金属电池与当前通用的智能手机锂离子电池对比，在同样电量下，锂金属电池的体积只有锂离子电池的一半，质量也更轻。

目前，Solid Energy是生产锂金属电池的佼佼者，2017年该公司的锂金属电池能量密度和体积密度已经分别达到 $0.45\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 以上和 $1.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{L}$ 以上，远高于目前世界上在产在研的锂离子电池。该公司在其网站首页上号称生产的是世界上最轻的充电电池，公司计划将电池用于高空无人机。但是该公司的产品也称不上完美，因为目前的产品并不是为快充而设计，一次充满



锂电池组

电需要8h，显然不能满足eVTOL的快充需求。如前所述，优步公司对eVTOL的目标是充电15min内电量可从30%达到90%。此外，目前锂金属电池制造成本也比锂离子电池高很多。

锂电池的其他应用

值得一提的是，高性能锂电池逐渐在干线客机上获得广泛应用。锂电池在民用航空领域最早应用于公务机上，但使用时间很短，应用范围也不广。2011年，以采用锂电池的波音787投入运营为标志，锂电池在航空领域的应用出现了第一个高潮，但随后事故频发使锂电池的应用出现了短暂的停顿。因为波音787锂电池的事故，处于安全性考虑，空客A350曾一度弃用锂电池，而采用传统的镍镉电池，但空客对锂电池的探索应用从未停止，他们借鉴波音787飞机电池事故调查结果，继续推进锂电池在A350客机上的应用。2015年年底，空客交付巴西TAM（即后来的LATAM航空）航空

公司编号为MSN24的A350飞机时，就重新使用了锂电池。锂电池技术在A350客机上的验证和使用，预示着它将在民用航空领域具有广泛的应用前景。

与传统镍镉电池相比，锂电池优势明显，在相同电池容量下，锂电池体积更小、质量更轻、使用维护更方便。以A350为例，采用锂电池后，可以减重约80kg；电池日常维护间隔延长到每两年一次，而镍镉电池的维修间隔是4~6个月。随着锂电池的发展，将推动飞机制造商逐渐将其用于飞机应急照明、驾驶舱语音记录仪、飞行数据记录仪、记录仪独立电源、备用或应急电源、主电源和辅助动力装置电源等机载系统，前景非常广阔。

eVTOL飞行器面临的挑战

如前所述，eVTOL飞行器的发展在技术上很大程度取决于电池技术的发展。但除了技术原因，eVTOL飞行器的发展还取决于城市空中交通

配套体系的发展，包括自主飞行、集群空管、适航、停机坪建设、充电设施、城市规划等综合因素。在此，仅就eVTOL适航管理对推进eVTOL飞行器所需进行的配套准备工作进行探讨。

eVTOL飞行器是全新的飞行器类别，从航空监管的角度，eVTOL飞行器需要一套全新的适航取证规章，适航认证是确保安全的手段。按照美国联邦航空局（FAA）的现有标准，eVTOL飞行器应通过FAR-27部（用于旋翼航空器）、FAR-23部（用于19座固定翼飞机）和FAR-21.17（b）（用于特种飞机）取证，但是大多数飞机制造商更倾向于通过FAR-23部和EASA CS-23部，而不是FAR-21.17（b）部取证。目前，FAA和EASA分别对FAR-23部和EASA CS-23部进行了修订，通过设定适应行业发展的新标准来进行管理，且修订后的EASA CS-23部允许飞机、发动机和螺旋桨作为一个整体取证，因为这类飞机的推进系统和飞机机体是高度集成的。

下一步，优步公司将与政府交通监管机构合作探讨如何使eVTOL飞行器的推进系统和自主飞行系统得到安全认证，并将目前正在研究的、适用于小型无人机低空飞行的“无人机空中交通管理”（UTM）规章扩展到eVTOL飞行器的型号认证、飞行管理、交通规则等规章的制定中。此外，优步公司还希望能将美国航空航天局（NASA）和FAA的UTM系统扩展到更适合eVTOL飞行器起降的建筑物屋顶和机场周围的B类空域（从地面到3000m高度）中，通过UTM自动通知和授权eVTOL飞行器进入批准的空域。

航空动力