

# 电动飞行商业运营展望

## Commercial Operation Outlook of Electric Power Flight

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

电气化已成为航空产业实现绿色转型的关键途径之一。随着电动飞机产品研发的不断推进，为电动飞行的市场化运营提供合适的配套支持已成为航空产业后续发展的又一个重点。

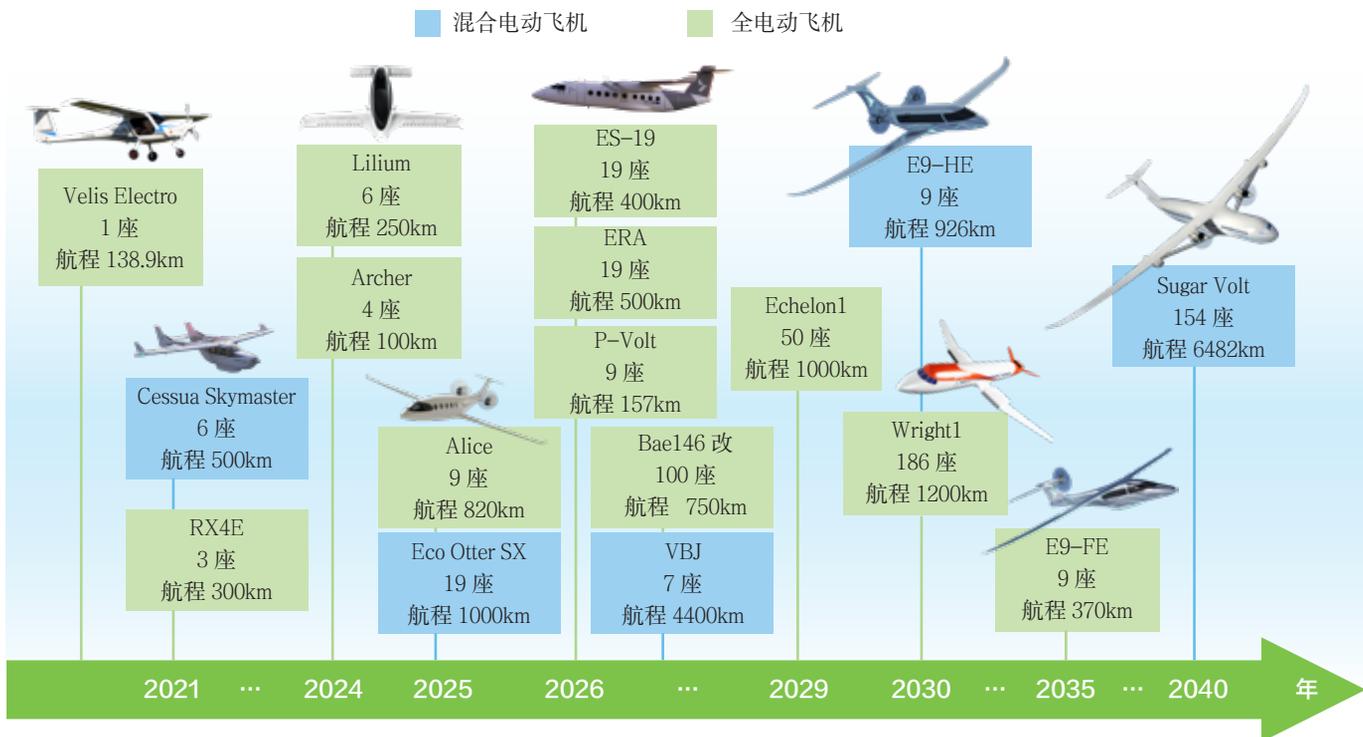
**在**绿色航空发展愿景的推动下，电动航空正处于强劲发展的新阶段。得益于过去10年电池和材料等领域的巨大技术进步，电气化进程已经从地面交通向空中飞行快速延伸。统计数据显示，当前大约有100个电动飞机项目正在研发中，商业化电动飞行有望在未来5~10年成为现实。不过，为了使电动航空真正成为传统航空的可行替代方案，仅依靠满足适航

规章要求的电动飞机产品是远远不够的，充电设施改造和电力能源供应等相关产业配套支持同样至关重要，航空电气化转型所伴随的市场运营模式调整开始受到业界的广泛关注。

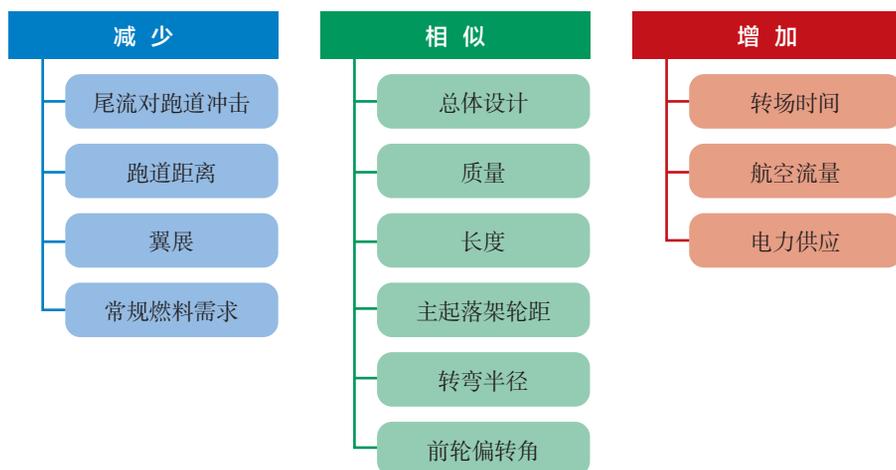
### 电池与充电

作为民航运营不可或缺的基础设施，机场必须确保能够以安全和有效的方式处理电动飞机，这自然就涉及

到针对电动飞机的适应性改造。事实上，在最初开展机场基础设施设计的时候，十多种相关的飞机特性指标都被纳入统筹考量，而为了识别电动飞机的潜在影响，应检查这些特性较常规飞机是否发生变化，指标参数的上升则意味着机场基础设施很可能出现服务能力不足的情况。例如，在相同的推力下，较长的翼展能产生较低的诱导阻力和较大的升力，有助于飞行效率的提



典型电动飞机研发计划与投放市场预期



电动飞机较常规飞机的特性差异

升，但这无疑会对飞机在机场的使用与存放空间提出更高的要求。

电动飞行属于全新的业务领域，为降低不可预期的研发和运营风险，在设计那些2030年前可能投放市场的产品时较为慎重，如翼身融合布局、桁架式可折叠机翼等超前的设计方案并未被采用以减轻对机场基础设施的影响，与同尺寸常规飞机相比，电动飞机的大部分特性得以维持，甚至由于电推进系统自身的性能优势某种程度上降低了对机场运营环境的要求。然而，电动飞行的航班流量、转场时间和电力供应却是无法回避的问题，仅相当于航空燃料能量密度2%的电池无法支撑大负载电动飞行，目前只有小型电动飞机具备技术可行性，严

格限制的飞行距离导致频繁地在中转机场起降补电，原本可以用一架常规飞机执飞的运力被分配给多架电动飞机、多次中继才能完成，同时机场现有的电源系统不是专门为电动飞机设计的，如果小型飞机的中转充电时间过长，其商业前景可能面临很大困难。

以色列埃维亚申（Eviation）公司研发的爱丽丝（Alice）和瑞典Heart公司的ES-19电动飞机为例，前者可运载9名旅客和2名机组成员，航程约为800km，于2022年9月完成试飞，预计2027年前实现交付；后者可容纳19名旅客完成400km的飞行，计划2026年开始运营，已获得数百架订单。考虑到电量安全裕度和电量较高时充电速度减慢的情

况，电动飞机充电状态（SOC）往往会被设定为30%~90%，根据通常情况下小型飞机转场时间不超过30min的一般性假设，充电设施的输出功率要达到1MW才能满足要求，但通常机场配备的地面输电设备（GPU）容量不过90kW，即便是当前特斯拉公司的第三代汽车超级快充功率也只有250kW。如果保守地认为5年后400kW的充电设备得到普及应用，则0.5h内充入的电量可满足爱丽丝飞行200km的需求，这一续航里程恰好与10年前问世的很多电动汽车持平。而对于运载能力更强的ES-19电动飞机，同样是200km的航程需要将充电功率进一步提升到900kW以上。

先进的电池系统和充电基础设施是未来航空电气化转型的关键，

爱丽丝和ES-19电动飞机主要参数

特征指标	爱丽丝	ES-19
旅客数量 / 人	9	19
巡航速度 / (km/h)	407	300
总飞行时间 / h	2.75	1.5
续航里程 / km	815	400
电动机功率 / kW	1280	1600
电池储能 / (kW·h)	820	900
预计售价 / (万欧元/架)	350	700



爱丽丝电动飞机概念



ES-19电动飞机概念

但即使是当前不尽如人意的电池系统和只针对小型飞机的短途飞行，现有充电基础设施也可能无法发挥其最大效能，峰值功率要求越高，充电基础设施系统就会越复杂，兆瓦级及更大功率快速充电装置的研发显得十分紧迫，电缆、配电板和变压器等也需要进行调整。很多初创公司和汽车配套供应商已投身这一领域，其中关注度最高当属美国能源公司CharIN面向重型车辆研发的兆瓦级充电系统（MCS），在2022年年中展示的原型设备峰值功率达到了惊人的3.75MW，相关制式标准预计会在2024年后正式发布。此外，未来潜在的解决方案还包括多个独立电池组并行充电、全流程无线充电以及液态纳米燃料电池（通过换液快速补电）等。当然，充电电缆冷却、可移动充电接口和电磁屏蔽等问题也需要同步考虑。

特别值得一提的是，用充满电的电池替换耗尽能量的电池，即所谓的电池交换模式已在电动汽车领域得到了一定的应用，理论上能克服充电时间和环境温度（锂离子电池一般为5~45℃）的限制，这样看起来对航空运营商非常有吸引力，但在机场建设电池交换站需要的场地空间比常规充电设备大得多，航空电池的尺寸和质量也不可汽车电池相提并论，安全检查和更换电池仍然需要相当长的时间，而且为了使飞机电池容易拆卸需要对机体和电池系统进行标准化特定设计，这带来了更大的适航认证挑战。业界普遍认为，至少在未来几年常规插入式充电仍是电动飞机运营最为可行的选择。

## 机场能源供应

电动飞机在机场通过充电装置补充能量，那么机场的电能又从何而来？像之前那样从电网中提取电能时可能会出现一些新的情况，多架电动飞机同时快速充电的峰值功率将极大增加电网的负荷，大量计划外的用电会引起供电质量波动、电压不稳定和能量损失增加。对此，只能激励运营商将本应在波峰时段使用的能源分配到波谷时段，白天尽可能按照依次飞行、轮序充电、适度使用和随用随充的方式部署，晚上可通宵进行完全充电，既为第二天的飞行任务做准备，也有助于保持电池的使用寿命。但在不显著增加机队规模的前提下，这无疑会增加航班规划调度的复杂性并降低旅客的飞行舒适度体验。

作为对电网供电的积极补充，未来机场也可利用周边闲置的土地进行分布式发电，甚至还可在电动飞机不需要充电的时候为附近的社区与商圈提供服务。立足可持续发展的根本出发点，机场发电的方式可能是太阳能、风能或者水能。由于受到当地气候特性和天气变化影响较大，不是每个地方都适合建设，

也很难做到连续供能，因此有必要安装配套的储能系统，像“电力银行”那样调节机场电网的峰值功率。根据荷兰机场咨询公司（NACO）的相关报告，假设1m<sup>2</sup>的太阳能电池板产生的峰值功率为200W，实际应用时的转化率取75%，则400kW充电载荷对应的太阳能充电板面积为3000 m<sup>2</sup>，若面向ES-19电动飞机900kW的快充需求，配套的太阳能充电板几乎能覆盖一个标准足球场。

显然无论是沿用现有电网供电还是机场自建发电设施，这都只是应对中短期小型电动飞机市场运营的权宜之计。从后疫情时代航空产业的发展来看，2030年前建设电动飞机专用的机场和发电站的可能性似乎很小，但随着兆瓦级充电设施的成熟普及和电动飞机机队规模的增长，机场电网也必须进行相当程度的更新和升级，更好地将传统电能和可再生能源结合起来，具备足够的鲁棒性以应对峰值负载。这需要政府部门在城市建设中提前规划、统筹协调并提供足够的资金支持。未来相当长的一段时间内，机场可能会同时为传统航空燃料/可持续航空燃料、电动乃至氢动力飞



电动飞机能源供应链

机提供运营支持，涉及的多种能源组合管理问题也应当引起足够的重视。

## 经济性分析

目前还很难预测电动飞行市场早期的商业模式，不过较为肯定的一点是机场将比航空公司和第三方电力机构更早建设并运营充电基础设施。瑞典运输管理局的调查结果认为，充电站的投资成本约为500欧元/kW，即建设一个400kW的机场充电系统将花费200万欧元，如果输出功率达到900kW，那么相关费用还将翻番。2021年年底，NACO公司对荷属加勒比小岛机场电气化改造方案进行了评估，在电缆布置和电网连接、充电站土方工程、整流器/配电板/接口等充电系统，以及储能系统安装费用的基础上再增加30%的风险系数以反应岛屿施工的复杂性，最终形成的400kW充电站建设成本为100万欧元。NACO公司表示，由于缺乏具体的设计文档的支持，估算结果可能会有50%的偏差，同时这一价格也不是绝对普适的，很大程度上取决于当地基础设施建设水平和对已有电网的改建需求。

从实际运营的角度出发，假设两个相距200km的通航机场之间每年的电动飞行航班为2000架次，机队由3架9座爱丽丝电动飞机组成，每次起飞前由410kW的充电设备充电30min，若到2035年前电价保持0.23欧元/(kW·h)不变，则全年的直接电费约为9.43万欧元，由于充电设备还要缴纳每月8.23欧元/(kV·A)的固定费用，机场年度电力账单合计为13.5万欧元。如果单次航班上座率为81%，电动飞行每

人每单位距离的能源成本为0.0154欧元。作为对比，同等座级的单发涡桨飞机PC-12在巡航状态下的燃料消耗约为6.3L/km，考虑到起飞降落阶段的额外燃料消耗将该值翻一番，当航空燃料的价格为1欧元/L时，PC-12执行同样的航线对应的单位能源成本则为0.0217欧元。事实上，电动飞行还有一个不可忽视的间接成本就是电池更换。动力电池在全生命周期内大概能够完成1000次完全充电和放电循环，由于像爱丽丝这样的电动飞机每次飞行距离不超过最大航程的25%，假定电池支持的完整电力循环能够增加1倍。当动力电池成本为150欧元/(kW·h)时，爱丽丝配装的820kWh电池估价12.3万欧元，对应单次飞行的折旧成本为61.5欧元，折合到每人每单位距离约0.011欧元，相当于直接使用成本的三分之二，基本与小型涡桨发动机的日常维护费用持平。

目前，业内关于电动飞行的经济性讨论还在继续，不同研究机构基于不同的测算方法和假设，对于不同电动飞机型号在不同使用场景下的经济性结论存在一定的差异，特别是后疫情时代愈演愈烈的俄乌冲突极大地影响了全球能源供应形势，起伏不定的燃油和电力价格加大了相关分析的难度。较为主流的观点是，到2030年左右电动飞机的综合运营成本较常规飞机能够降低50%~70%，这固然是航空产业令人激赏的进步，但也必须要承认还是与人们对电动飞行的期待存在一定的差距，要知道使用电动汽车的花费可能仅相当于燃油汽车的八分之一乃至十分之一。同时，高昂的新机采购价格（如ES-19售价为

同等座级的涡桨飞机比奇1900D的1倍）、有价无市的二手产品交易和先期巨大的机场基础设施改造投资进一步放大了运营电动飞机的经济风险，在市场运营初期如果没有政府的政策和资金支持，很难想象只凭借航空业自身的力量如何去克服这些困难。

## 结束语

随着航空业积极地探索航空电气化的新未来，新一代航空电推进产品呼之欲出，电动飞行产业链开始逐步从设计生产到运营服务延伸拓展。一方面，现有电源系统可能无法完全满足电动飞行的用能需求，除了优化航班时刻表、分散充电峰值载荷外，在机场安全法规要求的框架下启动专门的机场充电设备建设、电力扩容改造势在必行，并可尝试在机场附近配置相应的储能系统；另一方面，在市场起步阶段有必要加大对各个环节的补贴力度，综合衡量电动飞行的投资成本、运营成本、收入潜力和社会影响等，尽快形成清晰的商业案例来明确其替代价值，在繁荣相关市场活动的同时达到吸引各界资本进入电动飞行领域的目的。

**航空动力**

（王翔宇，中国航发研究院，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] NACO. Electric flight in the Kingdom of the Netherlands [R/OL]. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/02/18/bijlage-1-masterplan-electric-flight-naco-nlr-short-report>.