

电动飞行与推进系统变革

Electric Flight and the Technological Change of Propulsion System

■ 王翔宇/中国航发研究院

电动概念正从汽车产业向航空产业席卷而来，相应的航空发动机制造商也在一定程度上展现了不同的应对策略。什么时候正式进军电动领域？是直接全电动推进，还是先混合电推进再全电动推进？电池技术的进步能否跟上混合电推进系统的发展速度？

“电动概念”焦虑笼罩的航空发动机产业

当下，航空界似乎越发弥漫着一种“电动概念”焦虑，急切地想要突破电动技术并使之商业化，生怕落在竞争对手后面丧失对市场的话语权。这一方面是由于人们对电气化飞行高效经济、环保低噪的认知日益深刻，另一方面则源自特斯拉公司引领汽车行业开启革命性变化所带来的现实冲击。

考虑到未来电动飞机在飞发一

体化设计上具有前所未有的灵活性，航空产业将不可避免地出现像汽车那样“整机化”的研发模式，在孕育类似特斯拉这种行业新玩家的同时，传统飞机制造商的主导优势仍将长期存在。波音公司和空客公司已经不约而同地把混合电推进系统作为2030年前后客机的动力选项，不仅投入了大量资金推动相关研究计划，而且还积极收购有发展潜力的初创公司进行深度布局，力争在未来电动飞行的低成本运营、舒适

度体验、舆论媒介导向乃至政策法规制定上抢占先机。

然而，面对未来电气化飞行的出现、推广乃至普及，传统的航空发动机制造商所面临的考验和挑战与飞机制造商是截然不同的。虽然整机化的发展趋势降低了发动机制造商独立研发飞机产品的门槛，但从根本上说电推进系统改变的是飞机的动力装置，其对燃气涡轮发动机潜在的“降维竞争”存在着剧烈变革未来航空发动机产业结构的可能性。从1960年第



电动飞机发展大事记（2015—2019年）

一型涡扇发动机投入商业运营开始，GE公司、普惠公司和罗罗公司既是当代民用航空燃气涡轮发动机技术进步最大的开拓者，也理所应当成为了其市场发展最大的受益者。近10年来，在LEAP和PW1000G鏖战窄体飞机动力市场、销量屡破纪录，遑达XWB、遑达7000、GEnx和GE9X竞相逐鹿宽体飞机动力市场的大背景下，很难想象属于燃气涡轮发动机的时代即将结束，自然也并不是所有深耕航空动力这一领域的企业都认为当下是进入电气化飞行市场的合适时机。

发动机制造商介入电动飞机研制

2019年1月，罗罗公司公布了旨在打造世界最快速全电动飞机的“加速飞行电气化”(ACCEL)计划。借助英国政府资助，罗罗公司引入了电动机和控制器制造商YASA以及航空初创企业Electroflight公司共同推进计划的实施，通过验证高能量电气系统在试验飞行器上的应用，为未来全电气化飞行做技术储备。按照罗罗公司的构想，该单座全电动飞机的研发周期为24个月，预计于

年内完成环境验证测试，到2020年可进行试飞，欲以480km/h的飞行速度打破由西门子电动飞机在2017年创造的338km/h的速度纪录。而为了实现这一宏伟愿景，在电池、电动机、传动系统和数据监测等方面的重大革新是不可或缺的。

虽然具体的参数尚未透露，罗罗公司宣称ACCEL飞机将采用由超过6000个单元体组成的当今世界上最高能量密度的飞行电池组，存储的电能可以承担从伦敦到巴黎的320km左右的飞行距离。飞机的螺旋桨由YASA公司制造的3台750R轻型电动机驱动，推进功率不低于375kW，与传统飞机相比其桨叶转速有所降低，但运转会更加平稳、更加安静。飞机全电传动系统的工作电压预计为750V，在零污染排放的同时实现高达90%的效率。此外，罗罗公司还将利用先进传感器收集ACCEL飞机的飞行数据，每秒钟监测2万个数据点，对电池电压、温度和用以驱动螺旋桨产生推力的传动系统的整体健康状况进行动态掌控。

无论是高能量密度电池、先进储能管理系统，还是电动飞机的总体设

计、部件设计，ACCEL计划所开展的技术验证对于罗罗公司后续电动垂直起飞和着陆(eVTOL)飞行器的研发有着重大意义。作为近年来随着城市交通发展而产生的新概念飞行器，有着“空中出租车”之称的eVTOL飞行器受到了业界的格外关注，相关预测甚至认为到2035年其市场需求将达到50万架，总市场空间超过700亿美元。在2018年的范堡罗航展上，罗罗公司就展示了其混合动力eVTOL飞行器概念，这也是该公司有史以来第一次涉足飞机整机设计研发领域。通过与汽车制造商阿斯度马丁公司以及克兰菲尔德大学的合作，利用经典的M250燃气涡轮发动机驱动发电机产生300~400kW电能为电池系统充电，从而带动电动机为可供4~5人乘坐、飞行速度为400km/h的通航飞行器——Volante Vision概念机提供动力。罗罗公司期望在2025年左右实现混合动力eVTOL飞行器的商业运营，据称其每年的市场价值将不少于12亿美元。

除了ACCEL计划和eVTOL飞行器所瞄准的通航市场外，罗罗公司对于大中型商用电动飞机市场也表



ACCEL 演示样机 (来源：罗罗公司)



E-FanX 验证机 (来源：空客公司)

现出了浓厚的兴趣。2017年年底，罗罗公司开始与空客公司、西门子公司共同开发E-FanX演示验证机，用于评估支线客机的混合电推进可行性，重点为2MW电动机的研发提供技术支持。事实上，空客公司与西门子公司早在2016年4月就已经着手组建了一支约200人的联合团队，共同研发功率等级从100 kW ~ 10 MW的各型航空发动机，为短途飞机、直升机和无人机提供动力。空客公司甚至表示，可运送超过100名乘客到1000km以外目的地的混合动力飞机将在2030年前成为现实。如果说全电飞行器在以城市空中交通为代表的通用航空领域更容易抢占先机的话，那么针对有效载荷、速度和航程都较大的商用运输飞行需求，从空客A350、波音787等多电飞机逐步向未来混合电动飞机演进成为了业界公认的趋势。

当然，传统的航空发动机制造商对于电动飞行市场的观望并不是一成不变的。就在罗罗公司全面铺开电动飞机研发的同时，其他发动机制

造商也纷纷启动了有针对性的电动飞行研究计划。事实上，如果罗罗公司真的通过ACCEL计划在电推进系统上取得跨时代的进步，其他传统航空发动机制造商必然会快步跟进，这似乎也是奔驰、宝马这些老牌汽车巨头应对电动汽车市场兴起时采用过的策略。一方面，现存技术终究有发展到极致的时候，未来发展的潮流只能由像特斯拉那样敢于“吃螃蟹”的公司去引领和推动；另一方面，只要顺势而为，传统优势企业也会有足够的时间去调整与适应。毫无疑问，电动飞机不会一出现，就在一夜之间占领整个航空市场。

2019年3月，联合技术公司(UTC)，普惠公司的母公司，启动了804计划，预期在3年内完成一架混合电动支线客机X-Plane的研制和试飞，将当前多电技术从千瓦量级提升到兆瓦量级，同时全面验证混合电推进系统进行商业使用的经济可行性。该验证机将庞巴迪“冲”8-100飞机一侧的发动机改装为总功率为2MW的混合电推进系统，在飞机起飞和爬升

期间增加其动力，并对飞行不同阶段发动机的工作模式进行优化。通过合适的混合动力策略，UTC预期X-Plane可在航程为370~460km的飞行中节省约30%的燃油消耗。

在与NASA合作开展混合电推进系统研发的同时，GE公司立足于其自身固有电动机产品积淀，发力混合电推进基础技术研究。2017年8月，GE公司发布了混合电推进系统重大项目研究白皮书，展示了其在发电和电动机两方面的主要技术突破。通过改装F110发动机核心机抽取压缩空气，GE公司提取到了1MW的电力，其中低压涡轮占比达到了75%，这也是工业界第一次尝试从双转子发动机的低压部件提取功率。不仅如此，利用提取的电力驱动螺旋桨的1MW电机效率达到了创纪录的98%，这意味着该电动机仅产生了20kW的热损失，而同等的燃气涡轮发动机的热损失一般在100kW以上。

赛峰公司则与贝尔公司合作开发了适用于城市空中运输的共享eVTOL飞行器Nexus，该飞行器被纳



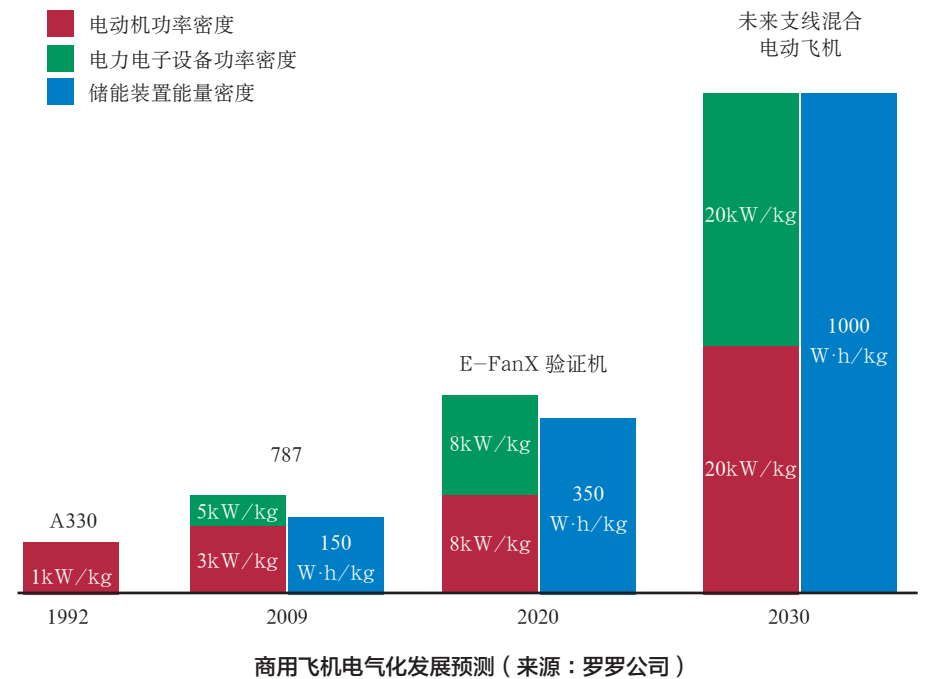
赛峰公司研制的混合电推进系统（来源：航空周刊）



霍尼韦尔公司研制的混合电推进系统（来源：航空周刊）

入了美国优步公司的Uber Elevate城市交通体系，也是该体系内唯一的混合电动飞行产品。通过对阿赫耶涡轴发动机的改造，赛峰公司打造的这款混合电推进系统主要由基于涡轮发电机的电能系统、电力管理系统和用于产生推力的电动系统组成，预计将于2021年上半年试飞，届时其输出功率将达到600kW，直接使用成本（DOC）较当前同等功率量级涡轴发动机下降一半以上。此外，赛峰公司也在为Zumum Aero公司设计的航程1100km、不超过12座的ZA10飞机开发混合电推进系统，以改进后的阿蒂丹3Z发动机为500kW发电系统的基础，与飞机电池系统共同驱动两台电动涵道风扇产生动力，计划于2019年年底前完成地面测试。

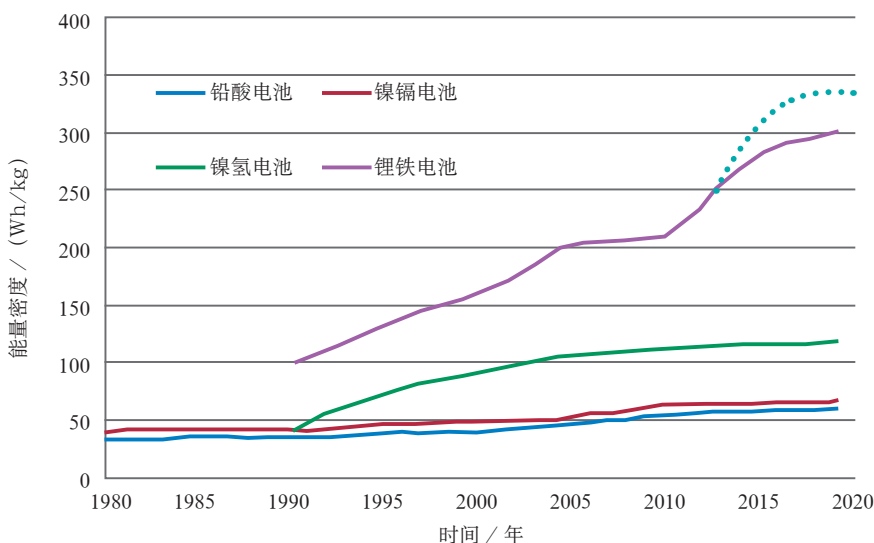
与赛峰公司类似，霍尼韦尔公司同样将目光瞄准了未来城市空中交通市场，认为发动机和发电机一体化设计将在混合电推进领域最先得到应用，其正在研发的原型系统结合了HTS900涡轴发动机和两台



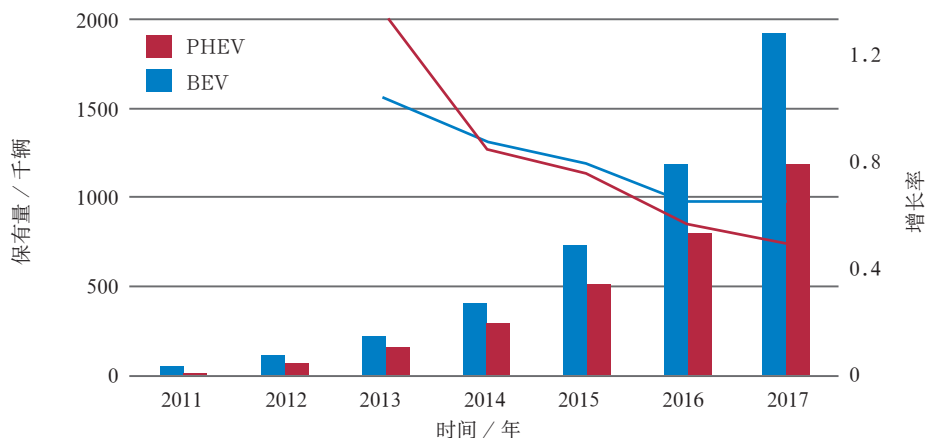
200kW的高功率密度发电机，预计在2025年前后即可投入商业应用。在兆瓦级发电机产品的研发上，霍尼韦尔公司表示其设计已完成了90%，后续将重点关注影响系统功率密度的热管理问题，系统的最终目标是转换效率达到98%。

混合电动飞机的市场未来

1973年，第一架载人全电动飞机在奥地利进行了长约10min的验证飞行。40多年过去了，电动机推进功率从当时的15kW足足提升了20倍，但从镍镉电池到如今最先进的锂铁电池，其能量密度仅仅提升了不到5倍。以最新型的特斯拉Model S电动汽车为例，其170W·h/kg的电池能量密度仍仅相当于航空煤油的1.5%。更为悲观的是，锂离子动力电池的发展似乎接近了“天花板”，目前其能量密度只有7%~8%的年化增长率。2018年，我国863计划节能与新能源汽车项目总体组专家肖成伟曾公开表示，高镍材料、碳硅负极的锂电池单体能量密度最高应在300W·h/kg左右，国家动力电池技术路线图规划的2020年达到350W·h/kg能量密度的目标很可能无法实现。美国《连线》科技期刊认为，即使不考虑电动机和电力电子设备（如逆变器）的功率密度要求，实现2h左右短途商业



电池能量密度发展趋势 (实验室状态, 虚线为锂铁电池的预期增长)



全球全电动汽车 (BEV) 与插电混动汽车 (PHEV) 市场保有量与增长率
(来源: 国际能源署报告)

飞行至少需要 $1000\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的动力电池, 是当前多电飞机产业化应用水平的6倍多, 而如此巨大的差距是任何单纯的电动机效率提升都无法弥补的。显然, 在电池技术发展仍不明朗的情况下, 用“发电装置+电动机”的混电模式代替“储能装置+电动机”的全电模式将是实现电气化商业飞行最可行的一个方案。

混合电动飞机是否如宣传的那样, 能够完美地集成燃气涡轮发动机和电推进系统二者的优势, 在未来相当长的一段时间内成为航空市场的主宰力量, 似乎并不是一个单纯的技术问题, 混合电动飞机的市场前景与其说依赖其自身的技术成熟与否, 倒不如说是取决于未来电池技术进步的速度。还是以汽车行业为例, 虽然2010年插电混动汽车投入市场后短期内取得了理想的市场份额, 但截至2017年无论是保有量还是增长率与全电动汽车相比仍有不小的差距, 而也正是在这段时间锂离子动力电池技术彻底成熟并实现了产业化应用, 其能量密度的年化增长率超过了15%。一旦10年之内钠离子阴极电池 ($650\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)、

镁离子电池 ($750\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)、锂空气电池 (超过 $2000\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$) 这些跨时代的电池技术取得突破, 市场风口将彻底转向, 首先面临退出历史舞台危机的不是拥有巨大存量和近百年技术积淀的燃气涡轮发动机, 而很可能是处于不上不下尴尬境地的混合电推进系统。

一个有意思的事实是, 虽然罗罗公司基于M250发动机的混动eVTOL飞机仍将是传统混动汽车构架(即HEV, 电池完全由发动机供电, 不具备外接电源充电的能力, 在我国被归为“节能汽车”而非“新能源汽车”), 却采用了串联能量通路而非当前汽车行业中更为普遍使用的并联通路。发电机直接供电也好, 电池先充电再放电也罢, eVTOL飞机的推进单元只能由电动机驱动, 并不存在电推进与燃气推进之间所谓的模态转换。显然, 这种串联通路带有鲜明的过渡色彩, 在设计架构上尽可能地体现了电力驱动这一理念, 更接近未来的全电动飞机。而如果打算长期耕耘混合电推进市场, 更能够发挥燃气涡轮发动机性能优势的并联通路似乎才是更为合

理稳妥的选择。

普惠公司负责技术与环境事务的副总裁阿兰·爱泼斯坦在2016年表示, 在出现技术“奇迹”之前, 具有商业价值的电动飞行几乎是不可能出现的。而所谓技术“奇迹”的核心就是高能量密度电池技术的重大突破。以波音737飞机为例, 支持其正常飞行所需的能量最少需要10MW, 这一数字达到了罗罗公司ACCEL计划中“创纪录”375kW功率的26倍之多。GE公司虽然在2017年就宣布其新型兆瓦级电机的设计效率从90%提升到98%, 但这一鼓舞人心的消息之后却始终没有更进一步的电动飞行方案推出。完善的全电推进系统不仅仅意味着要有高效的电动机, 电池技术才是限制未来全电飞行的瓶颈, 而这一问题似乎并不该单纯地依靠传统航空发动机制造商去解决。

结束语

从内在说, 燃气涡轮发动机产业仍在蓬勃发展, 市场价值屡创新高, 在相当一段时期仍将支配着航空动力市场, 也是传统航空发动机制造商不可动摇的立身之本; 从外在说, 电池技术已经成为制约未来电动飞机发展的最大障碍, 混合电推进系统几乎是实现当下商业电气化飞行唯一的动力选择, 但混合电动飞机的市场前景更多地取决于2030年前动力电池技术能否取得前所未有的突破。在航空动力市场电气化变革暗流涌动的大势下, 传统航空发动机制造商的战略抉择将迎来空前的挑战与考验。

航空动力

(王翔宇, 中国航发研究院, 工程师, 主要从事航空发动机发展战略研究)