

罗罗的飞行电气化之路

The Flight Electrification Path of Rolls-Royce

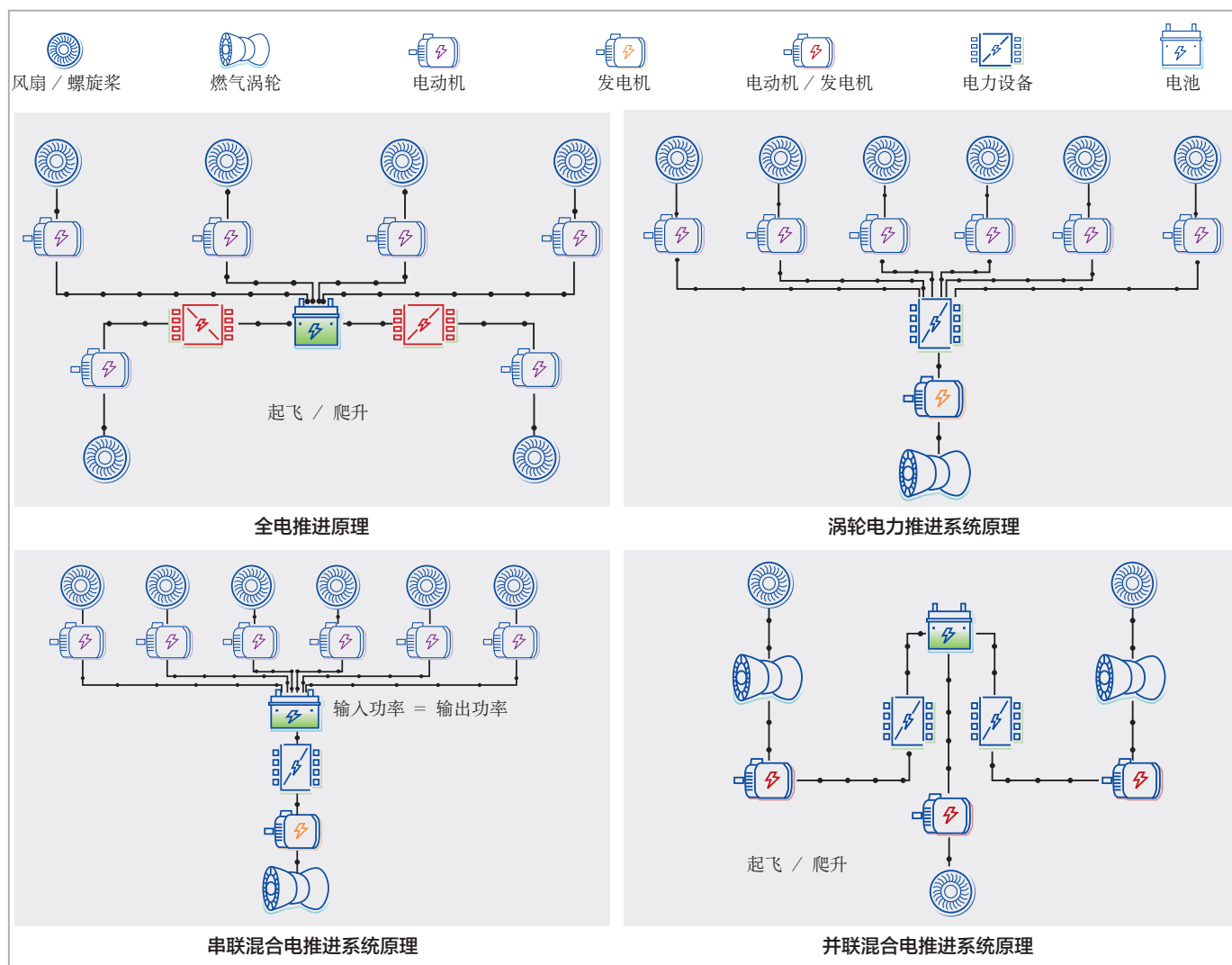
■ 廖忠权/中国航发研究院

自21世纪以来，航空动力的电气化发展趋势越来越明显。由国家发起电推进研究计划，或由航空制造商自发发展电推进技术和产品，都在积极促进航空动力的电气化。罗罗公司近年来在航空电气化方向也呈加速发展之势。

罗罗公司的航空动力发展包含3个方面：一是继续发展燃气涡轮发动机；二是发展飞发一体化技术；三是发展电

推进技术。为了实现公司的电气化战略，罗罗公司成立了电气部门——罗罗电气（RRE），以适应航空领域电气化这一不可避免的趋势。众所

周知，目前限制电推进发展的主要因素是电池的能量密度不足和电动机的功率密度不足，这使得纯电动推进目前只能用于座级和起飞质量



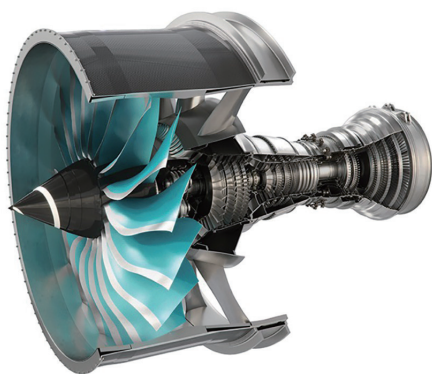
小、航程短的轻型飞机。对座级和起飞质量较大的大中型飞机，如果采用纯电动推进，电池质量将大到惊人的程度，只能采用混合电推进系统。混合电推进系统通过采用燃气涡轮发动机带动发电机发电驱动电动机，进而驱动风扇/桨叶产生推力，可以避免飞机携带过于沉重的电池。

多电发动机

罗罗公司一直在研究多电发动机。对于正在开发的“超扇”（Ultra Fan）发动机，罗罗公司将发展更多的电气适应性，准备在发动机轴上安装嵌入式电起动机发电机，将此先进的燃气涡轮发动机更多地发展成电气机械，输出更多电力。罗罗公司认为，这将是未来双通道宽体客机实现电推进和减排目标的关键举措。

传统的航空发动机是通过附件齿轮箱从发动机中提取功率驱动附件、液压泵和燃油泵等，并为飞机的机载系统提供动力。附件齿轮箱安装在发动机机匣上，机匣上还密布许多附件，例如，燃油和滑油管道。这些结构会加大发动机横截面积，进而增加阻力。罗罗公司认为，如果把电起动机发电机安装在发动机冷端轴上，一个100~500kW的集成电动机就能起动发动机，同时使发动机具备足够的发电能力，为飞机系统供电。这样就可以把附件变速箱放在短舱挂架或机翼上，从而减小发动机横截面积。

罗罗公司正在实施“嵌入式电起动机发电机”（E2SG）计划。在该计划中，公司将嵌入式电起动机发电机安装在一台阿杜尔军用发动机的低压轴和高压轴上进行试验。基



罗罗公司的“超扇”发动机采用可变螺距的风扇和嵌入式电起动机发电机

于E2SG计划的成果，罗罗公司已经着手开发一种嵌入式电起动机发电机初始样机，额定功率为40kW，用于AE3007涡扇发动机。而且，罗罗公司后续还会发展一系列功率高达150kW的嵌入式电起动机发电机，以满足大型飞机的电力需求。

混合电推进系统

罗罗公司正在推动其航空产品的电气化转型，促成这种转变的关键驱动因素主要有两个方面。

一方面，电气化越来越引起航空界的关注，在航空动力电气化领域既有发动机行业内传统的竞争对手GE公司、普惠公司、赛峰集团，又有来自行业外的新晋对手。对此，空客集团首席技术官保罗·艾瑞蒙科曾表示，电气化及数字化的发展令航空业的准入门槛降低，将使很多新进入者参与到航空这个历来由少数几个寡头垄断的行业中来。

另一方面，虽然传统燃气涡轮发动机的性能在未来数十年仍有提升的空间，例如，采用超大涵道比，提高发动机压比等方式，而且在中型、大型飞机领域，在较长时间内，

燃气涡轮发动机仍是难以被取代的，但是传统发动机在未来数十年终究会遇到“天花板”。为了满足对飞机环保性、经济性的需求，以及为了达成国际航空研究合作项目（ICARe）设立的2050年减排目标，无论是飞机设计方还是发动机设计方都必须彻底改变，电气化技术将促成这一目标的实现。

罗罗公司将航空混合电推进系统的未来市场应用分为4块：一是2~4座的轻型和超轻型飞机，主要用作飞行训练和航空运动飞行；二是空中出租车或eVTOL，主要用作城市交通运输；三是20座及以下的支线飞机，这类飞行器也可采用垂直起降；四是20~100座的支线飞机，罗罗正在与空客联合开展的E-Fan X飞机验证项目，就是要开发针对这一市场的混合电推进系统。此外，航程1500km左右的支线飞机和航程2700km的中小型公务机或窄体客机也可以采用混合电推进系统，对航程更远的窄体客机和宽体客机，燃气涡轮发动机和电气化技术可同时持续发展，直至电气化比例越来越高。针对这几类目标市场，罗罗公司正在开发相应的混合电推进系统。

基于M250发动机的混合电推进系统

2019年4月，罗罗公司完成了基于M250发动机的混合电推进系统的地面测试，这是公司迈向混合电推进的重要一步，这次测试也是为公司将于2021年开展的空中飞行试验做准备，罗罗公司地面测试包含3种运行模式。

串联混合电推进：燃气涡轮发动机驱动发电机发电，为机载电池



APUS i-5飞机



ACCEL原型机

系统充电，不直接产生推力。推进和其他机载系统均由电池供电。

并联混合电推进：飞机的推力由燃气涡轮发动机和电驱动风扇/螺旋桨联合提供，飞机其他电力需求由电池满足。

涡轮电力：电池系统为冗余系统。燃气涡轮发动机驱动发电机发电，电力直接驱动电动机，进而驱动涵道风扇/螺旋桨产生推力；电力也可满足飞机其他电力需求。

该电动混合推进系统验证机集成了M250发动机与高能量密度电池系统、发电机、电能转换器以及先进的电能管理和控制系统。电能管理系统用于优化整体推进性能，以便使系统适用于eVTOL等各类平台，同时提高效率，降低噪声和排放。

2019年11月，罗罗公司宣布将开发基于M250混合电推进系统的验证机。演示验证计划将采用APUS i-5飞机作为试验平台，该飞机质量约4t，为常规起降形式。演示验证计划将由罗罗公司主导，为期3年，合作伙伴包括德国航空工程公司（APUS）和勃兰登堡理工大学（BTU）。

罗罗公司声称本项目旨在验证最为复杂、全面的基于燃气涡轮发动机的混合电推进系统的开发和集成。值得一提的是，基于M250发动机的混合电推进系统可以采用分布式布局，可应用于多种起飞质量、载荷较小的飞机平台，例如，常规起降飞行器、通用飞机、直升机以及eVTOL。

基于AE2100发动机的混合电推进系统

空客公司、罗罗公司和西门子公司正在联合开发基于BAe146支线客机改装的E-Fan X混合电推进技术验证机，旨在测试一种功率达2MW的串联式混合电推进系统。罗罗公司利用1台安装在机体内的AE2100发动机驱动1台2.5MW的发电机发电，带动1台西门子公司2MW电动机。该电动机将替代BAe146的4台涡扇发动机中的1台，驱动涵道风扇。罗罗公司参与开发的这种2MW级混合电推进系统适宜配装起飞质量、载荷较大的飞机。

电动飞行器

罗罗公司认识到，通用航空市场可

开发电力系统的速度可能远远快于大规模的商用或军事项目。为此，2019年年初，罗罗公司宣布研发世界上最快的全电动飞机——ACCEL项目，并获得英国政府的资助。ACCEL飞机完全由电池供电，满足推进和其他电力需求。

目前，罗罗公司正在与YASA公司和航空初创公司Electroflight合作开展ACCEL飞机项目。罗罗公司负责航空设计、可靠性验证；YASA公司负责电动机和控制器；Electroflight公司负责传动系统和能量存储系统。ACCEL项目是利用Sharp Nemesis NXT竞速飞机作为飞行平台。此型飞机使用现有活塞式发动机的巡航速度为523km/h，飞机翼展为7.3m，将现有的莱康明活塞式发动机改装为电池驱动，使用6000个锂离子电池为动力，驱动3台轻型YASA750R电动机，可为螺旋桨提供372kW的功率。罗罗公司计划于2020年第一季度末进行ACCEL原型机的飞行测试，飞行速度将达到483km/h，公司还将速度目标瞄向552km/h。

罗罗公司在2018年英国范堡罗航展上推出一型eVTOL，其动力系



罗罗混合电推进eVTOL概念

统采用基于M250发动机的混合动力系统，M250燃气涡轮发动机为6个电动推进器提供动力，并配备有存储能量的电池。罗罗公司负责动力系统的开发，而飞机的设计开发则委托给飞机制造商。该eVTOL飞行器可以402km/h的最大速度不间断飞行约804km，能够利用停机坪和常规机场等现有设施。飞行器的机翼能够旋转90°，从而实现垂直起降。一旦上升至巡航高度，机翼上的推进螺旋桨可以折叠收起，以降低阻力和客舱噪声，之后飞行器依靠两台后侧推进螺旋桨提供推力。该飞行器可用于个人和公共交通、物流和军事领域等。

电气化产业

随着罗罗公司对电气化领域的日益关注，在维持其现有传统燃气涡轮发动机领域的同时，开始关注永磁推进器等电气产品领域。近年来，公司在将商业、海运业务剥离的同时，与电气化相关的部分保留了下来。例如，罗罗公司在挪威特隆赫姆设有一个智能电动机（SmartMotor）的设计集团，在向康斯伯格公司出

售一些业务时，罗罗公司将该集团保留下来，并更名为罗罗电气挪威公司（Rolls-Royce Electrical Norway）。罗罗公司还拥有动力系统公司（Power Systems），该公司已经完成了混合动力列车、微电网和潜艇技术的研究。

2019年4月，罗罗公司收购了西门子电力及混合电力航空推进业务，以助力其实施电气化战略。罗罗电气化总监罗布·沃森表示：“电气化将为航空业带来深远影响，就好比当初燃气涡轮发动机替代活塞式发动机。我们正处于航空‘第三时代’的初期，向着更安静、清洁的空中旅行进步”。罗罗公司的目标就是要在航空“第三时代”中发挥主导作用。

目前罗罗公司的业务已经在电气化方面取得颇多进展。例如，罗罗公司利用MT30航空发动机改燃气轮机开发的混合动力推进系统已经用于海军的军舰；公司开发的MTU混合动力也已经用于铁路系统。罗罗公司计划在其3个主要业务领域（电力系统、民用和国防）中借鉴这些应用经验，开发相应的产品。

结束语

电气化是罗罗公司当前及未来航空动力的重要发展方向，公司已经将电气化作为谋取航空“第三时代”竞争优势的战略选择。公司在继续发展传统燃气涡轮发动机的同时，已经从组织架构、技术和产品等方面全面布局电推进系统。正如罗罗首席技术官保罗·斯特恩所言：“为了在满足航空旅行需求的同时降低二氧化碳排放，航空业要开发更加环保的技术和手段。电气化是罗罗公司实现航空业可持续发展的承诺中的一步。此外，我们致力于提升燃气涡轮的燃油效率，鼓励环保和可持续航空燃油的开发，追求航空电气化。”

罗罗公司的电气化战略也符合英国的技术战略发展方向。鲍里斯在2019年7月成为英国首相后宣布设立3亿英镑的专项资金及配套推动政策，作为其新内阁环保政策的组成部分，其关注重点是eVTOL、城市空中交通（UAM）应用和物流无人机，正好与罗罗公司航空电气化战略的发展方向相契合。

值得一提的是，罗罗公司只是向航空电气化方向狂奔的众多企业和研究机构的一员。波音、空客、赛峰、霍尼韦尔、GE、普惠、柯林斯宇航、锐翔、优步、吉利、贝尔、亿航智能等企业都在研制电动飞机或电推进系统。而在国家层面，瑞典和挪威计划到2040年将所有短程航班全部更换成全电动飞机。总而言之，电动飞机、电推进系统已成为当今航空业发展热点，呈现出时不我待的发展态势。

航空动力

（廖忠权，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机前沿技术探索和产业发展研究）