

支线客机的混合电推进之路

Hybrid Electric Propulsion for Regional Airliner

■ 廖忠权 / 中国航发研究院

毫无疑问,全电飞机是未来的发展方向。但是,受制于电机和电池技术,实现飞机及推进系统的全电化尚需时日,因此选择混合电推进这一策略,既是在现阶段的妥协,也是对通往未来道路的铺垫。

随着世界经济和科技的发展,人们的航空出行需求在不断增长。当前及未来较长的时间内,推动航空运输业增长的因素主要有两个:一个是必须应对可持续发展的挑战,通过减少对环境的影响,让人们更容易接受空中交通的增长;另一个是整合目前正在不断涌现的新技术,顺应技术变革,为新的飞行器设计和新的商业模式提供创新性解决方案,满足人们对更大流动性的期望,解决城市中心的拥堵问题,满足缺乏公路和铁路网络地区的交通需求。这两大因素推动了新一代航空飞行器朝着电气化方向发展,除了其他机载系统向全电、多电方向发展,推进系统也在向电气化方向过渡,基于电动和混合动力推进系统的电动垂直起降(eVTOL)飞行器、通用飞机和支线客机已经出现,技术和市场需求也日渐增长。

混合电推进是支线客机的重要选项

与传统燃油飞机相比,电推进和混合电推进飞机具有低噪声和低排放的优点,电推进更是可以做到零排放,其节能、环保的优势对民用飞

机极具吸引力,特别是在全球民航运输越来越强调绿色和环保的今天。

虽然在较长的时间内,传统的燃气涡轮发动机仍然是主要的航空动力装置,特别是对大型飞机而言,但飞机推进系统的电气化几乎是一种必然趋势。有鉴于技术发展的限制,支线客机乃至干线客机都无法在短期内实现全电推进,主要原因是电机的功率密度和电池的能量密度不足。

如果要为大型飞机飞行至少几小时提供所需的几十兆瓦电力,那么必须将当前的电池能量密度至少提高10倍。即便能量密度可以达到目前电动汽车所能提供的5倍,长途飞行(5000km以上)也需要170t电池,而空客A320和波音737这类客机的最大起飞质量也只有80t左右。对于支线客机,以ATR42飞机为例,如果该级别飞机采用全电系统,为了实现与传统涡桨飞机相同的载荷,并实现相同的航程(2000km左右),按目前的技术,电池质量将达到21t,而飞机的空重才18t。因而,即使是一架2030年前后投入市场的19座飞机,也不能采用全电推进,只能是采用混合电推进,并且电力提供的功率比例还比较低。

因此,融合了电推进和燃油动力系统优势的混合电推进系统就成了支线客机,乃至干线飞机的重要动力选项。在起飞、爬升、着陆、滑行阶段,传统航空发动机的效率较低,而混合电推进系统则可以在这些阶段利用电推进系统,让航空发动机始终维持在最佳效率的状态运行。尤其对于中短程飞机而言,由于起飞、爬升、着陆、滑行阶段的时间占总飞行时间的比例较高,使用混合电推进系统能够明显节省燃油、降低噪声。因此,混合电推进技术十分适合航程较短、使用频率较高的支线客机。相关研究表明,采用混合电推进系统的支线客机在经济性上可以与铁路相比拟,而且随着新一代电力技术的发展,未来的混合动力支线客机将比现有的涡桨和喷气支线客机更安静、起飞距离更短,混合电推进支线客机的优势将愈发凸显。

美国Zunum航空是混合电推进支线客机的积极推动者,公司在经过市场研究后发现,由于近年美国支线航空市场不断衰退,致使部分支线机场和通航机场的利用率较低,而这些机场却可为发展混合电推进支线客机提供便利条件,利用这些

机场建立混合电推进支线网络，将可为旅客提供比高速公路、铁路和大型客机更便捷灵活和更廉价的交通服务。

混合电推进系统在支线客机上的应用研究

2017年6月，在美国丹佛举行的美国航空航天学会（AIAA）年会上，美国国家航空航天局（NASA）展示了一种“飞马”混合电推进支线客机概念。该设计概念基于ATR42-500，载客48人、概念航程1100km。研究发现，如果要使全部能源消耗低于常规的涡桨推进，电池能量密度必须大于 $0.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，而目前最好的商用电池能量密度约为 $0.25\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，航空燃油则为 $12\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。另外，即使电池能量密度达到 $0.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，飞机的质量也更大、能源成本也更高（75%电推进的飞机质量是涡桨飞机的2.3倍、能源成本高10%），经济性不太令人满意。随着能量密度的增加，质量和成本的代价逐渐降低，采用 $1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 电池能量密度的电推进飞机只比涡桨飞机重39%，而能源成本低23%。

2017年7月，在亚特兰大举办的AIAA推进与能源论坛上，NASA展示了一种单通道带后置边界层推进的涡轮电动推进飞机（STARC-ABL）设计概念，它是在空客A320、波音737同级别客机尾部嵌入后部风扇。该风扇可采用机械或电驱动，2.6MW的电动机由翼下悬挂的两台涡扇发动机驱动的发电机供电。风扇吸入机体上缓慢运动的边界层气流、为尾流重新供能，从而降低阻力，因此可允许使用尺寸更小的涡轮发动机，与常规构型飞机相比，油耗可

降低7%~12%。根据NASA的计划，STARC-ABL方案将作为喷气支线机或单通道干线机X验证机方案进行后期的各项试验验证。如果进展顺利，NASA计划在2025年开始试飞，用于验证2035年左右服役的单通道客机的关键技术。2018年2月，NASA宣布将在2019年投入2.31亿美

元用于超导电机的研发，目标直指5~10MW商用飞机混合电推进系统。此计划还包括在NASA电推进飞机试验台（NEAT）上测试兆瓦级的动力系统，将其作为STARC-ABL项目2.6MW电力系统的缩比验证。

2017年12月，空客、罗罗和西门子等公司宣布合作研发一款混合



NASA STARC-ABL方案



E-Fan X混合电推进验证机



“猛禽”混合电推进支线客机概念

电推进验证机E-Fan X，该验证机使用一架BAe146支线客机作为飞行测试平台，4台涡扇发动机中的1台将被2MW的电动机取代。该飞机计划2020年开始飞行验证，一旦系统成熟性得到验证后，飞机的另外1台涡扇发动机也将被电动机取代。E-Fan X飞机项目动力采用串联混合电推进结构，将研究热管理、电磁干扰以及高空大功率电系统有关的电弧、局部放电和辐射效应等。根据空客公司的长远规划，E-Fan X项目将为下一代50~100座级的混合电推进支线客机作技术储备。如果项目进展顺利，空客公司计划于2030年将新一代混合电推进支线客机投入运营。

除了参与E-Fan X项目，西门子公司还为美国Bye航宇公司的两座“太阳鸟2”和4座的“太阳鸟4”飞机提供电动机，这两款飞机都是电动飞机，主要用于训练和通用航空市场。

2019年7月19日，在英国皇家国际航空展上，空客公司推出了“猛禽”混合电推进支线客机概念，主

要是针对支线航空运输需求，采用涡桨混合电推进系统，在构型设计上受到鸟类高效的飞行动力学启发，其机翼和尾翼模仿了猛禽的生理结构，特别是其机翼和尾翼均安上了可独立控制的“羽毛”机构，能够提供主动飞行控制能力。

ATR是空客和莱奥纳多的平股合资公司，现有ATR42和ATR72两个系列的涡桨支线飞机，其未来的产品策略是寻求开发90座级的采用传统航空发动机的支线客机并对现有飞机进行改进。而公司对现有支线客机产品改进的方向则是考虑采用混合电推进系统。正如前述，至少在2030年以前，即使是19座级的支线客机采用全电推进也是不现实的，更不用说座级更大的支线客机。

巴西航空工业公司既拥有涡桨支线客机ERJ145系列，也拥有喷气支线系列ERJ170/175、ERJ190/195。其中，ERJ170/175、ERJ190/195客机已经换装了普惠公司的PW1900G齿轮传动涡扇发动机，换发后的飞机称为E2系列，公司正在研究的新支线客机为E3系列。在新项目中，该

公司也在研究更低成本的动力方案，声称正在持续关注混合电推进技术，一旦这项技术成熟，E3系列将是采用混合电推进系统的大型支线客机。不过，公司也需要看其合作伙伴波音公司是否愿意进入支线市场，因为支线航空市场的需求相对比较薄弱。

混合电推进和全电推进更受初创公司青睐

初创公司关注的重点是电推进系统和更低的能源成本，这是新型飞机与传统飞机竞争的关键所在。大多数初创公司关注混合电推进系统，也有一部分关注全电推进。但限于当前电池技术水平，所有的初创公司都关注座级较小的飞机，特别是9~12座级的飞机。

波音和捷蓝航空共同投资的Zunum公司，正在开发一种采用混合电推进的12座支线客机ZA10，由一个500kW的涡轮-发电机和500kW的电池组联合为两个500kW的电驱动涵道风扇提供动力。涡轮-发电机组中，涡轮发动机选用了赛峰集团的阿蒂丹3Z涡轴发动机，由其带动发电机，形成一个500kW的涡轮-发电机组。目前，赛峰集团正在开发阿蒂丹3Z发动机，而Zunum公司正在自主开发电动机和涵道风扇。

同时，Zunum公司还在开发一款12座级的混合动力支线客机ZA12，这将是公司第一款投入使用的飞机，公司计划于2022年完成该型飞机的取证和交付。ZA12支线客机的电池质量不到飞机最大起飞质量的20%，并携带了363kg的燃料供燃气涡轮发动机使用，以增加飞机的航程，飞机携带的航空燃油比皮拉图斯PC-12飞机携带的1225kg



Zunum公司ZA10支线客机

的燃料少了70%。ZA12的电池模块安装在机翼中，将来可更换更先进的电池，甚至在飞机C检时就能完成。而且，Zunum公司还设想允许运营商在两次飞行之间为电池充电或更换电池，节省停留时间。如果ZA12项目进展顺利，公司将继续开发50座级、航程更远的混合电推进支线客机ZA50，该机预计于2030年前问世，运营成本将低于庞巴迪公司的Q400。

法国初创公司VoltAero，正在开发4~9座的Cassio混合电推进飞机，该机将有4座、6座和9座3个版本。美国初创公司Wright电气公司计划与西班牙Axter航空公司合作研制9座的混合电推进验证机，该验证机将于2019年试飞，该公司的远期目标是开发一款180座的全电推进窄体客机。以色列的Eviation公司正在制

造一款9座的全电飞机Alice。

一部分初创公司致力于开发新型飞机，而另外一些初创公司则致力于将现有飞机改装为电动推进。美国Ampaire公司计划与小型运营商一起将他们现有的燃油飞机改装为混合电推进飞机，目标平台包括“大篷车”飞机和“空中国王”飞机。该公司将赛斯纳337“天空大师”飞机作为其混合电推进系统的试验平台。2019年6月，Ampaire公司完成了6座并联混合电推进飞机Ampaire337的首飞，该机是目前已经完成试飞的最大的商用电动飞机。Ampaire公司还计划在年底利用一架Ampaire337预生产型在夏威夷莫库勒勒(Mokulele)航空公司的航线上飞行。此外，还有另外几家初创公司也准备对现有飞机进行电推进改装，针对目标都是“大篷车”“空中

国王”这类9~12座级的飞机。

结束语

值得一提的是，虽然支线客机向电推进方向发展的趋势日益显著，但仍然面临许多未知因素的限制。不论是混合电推进，还是全电推进，即便解决了电池能量密度、电机功率密度这些关键性的问题，但还会面临其他的问题，比如电压问题。电推进飞机需要通过电缆输送电压超过1000V的电流，其电气系统将处于高压状态。这对在地面运行的火车而言不算什么难事，但对于在万米高空飞行的飞机来说，加装任何保护装置（绝缘、散热等）都很困难，因为所有这些都会增加质量。另外，由于高电压的物理特性在对流层与在地面有所不同，空中高压系统管理也是一门全新的学科，研究才刚刚起步。除了技术方面，还有适航管理：电力飞机须采用新的适航管理条例，这需要适航管理部门对适航管理条例进行增补、修订和更新。此外，在社会影响方面，采取新型动力系统的飞机会被社会接受吗？从地缘政治角度看，这些电气技术（尤其是电池）势必会用到稀土材料，这会引发社会争议以及供应链的可持续发展问题。

总之，未来支线航空动力的发展是机遇与挑战并存的，仍需在技术、市场和社会环境等领域进行更多的开拓和发展。但有一点是肯定的，那就是混合电推进应用的曙光已经出现。

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科技情报研究）