

# 航空混合电推进系统发展研究

## Research on the Development of Hybrid Electric Propulsion System

■ 廖忠权/中国航发研究院

混合电推进系统是通过传统的燃气涡轮发动机带动发电机发电，为分布在机翼或机体上的多个电动机/风扇提供电力，并由电动机驱动风扇/螺旋桨提供全部或大部分推力的一种新概念推进系统。其技术优势是可以改善飞机的气动结构、大幅提高等效涵道比，提升气动效率、降低油耗、减少噪声和排放。

**混**合电推进系统一般包括三大子系统：供电系统、推进系统和储能系统。其中，供电系统是指燃气涡轮发动机和发电机；推进系统包括驱动电机和涵道风扇或螺旋桨；储能系统是蓄电池，能在飞机需要较大推进功率时（如起飞爬升阶段）提供额外功率，在飞机巡航阶段吸收多余功率，起到功率调配的作用，使作为源动力的燃气涡轮发动机始终工作在最佳状态。



图1 ESAero公司的ECO-150飞机概念图

### 混合电推进飞机设计特点

目前，采用燃气涡轮发动机推进的飞机为了提升环保性，其发动机直径、涵道比有不断增加的发展趋势，这给飞机设计带来很大的挑战，而采用混合电推进系统能改善这一状况。因为电机有一个重要特性——尺寸无关特性，即一个大功率电机系统分解为总功率相同的多个小功率电机系统后，整个系统的功率密度、效率和重量基本不变，而采用分布式混合电推进，利用多个功率较小的电动机驱动多个直径较小的风扇/螺旋桨取代超大直径风扇/螺旋桨，可有效提高推进系统的等效

涵道比。小尺寸风扇可以更为方便地融入机翼、机身，有效改善混合电推进飞机的整体气动效率，进一步改善其飞行性能和燃油消耗；而且由于混合电推进系统的三大子系统之间不是机械连接，而是电力连接，其设计和布局可以更为灵活，给飞机设计带来更大的自由度。以美国实验系统航宇公司（ESAero）正在开发的150座级双层翼分布式混合电推进飞机ECO-150为例，其源动机采用2台涡轴发动机，安装在机翼中部，而产生推动力的16个涵道风扇则嵌入双层机翼之间，每侧机

翼安装8个涵道风扇和机翼融为一体，如图1所示。

### 混合电推进系统工作模态

混合电推进系统工作模态与常规动力有所不同。以空客牵头正在开发的100座级混合电推进支线客机E-Airbus为例：在地面滑行阶段，E-Airbus采用电力驱动风扇推进；在起飞和爬升阶段，由燃气涡轮发动机驱动发电机提供全部推力；在巡航飞行阶段，燃气涡轮发动机驱动发电机发电，部分电力用于驱动电动风扇，并将多余电力为机载电

池充电；在初始下降阶段，燃气涡轮发动机关闭，飞机进入滑翔模式，之后涡扇发动机以风车状态起动，并产生电能；在降落阶段，燃气涡轮发动机再次起动，驱动风扇提供过量的推力（备用推力）以备飞机所需。

## 混合推进系统发展态势

目前，美国、欧洲、俄罗斯等均已将混合电推进系统视为未来有广泛前景的民用航空动力解决方案，都在组织飞机制造商和发动机制造商开展探索和预研，波音、GE、空客、西门子、罗罗等公司都已经在政府科研计划支持下开展混合电推进系统研究。各国正不断提升混合动力技术水平及其技术成熟度，探索多种新型混合动力飞机方案。

### 美国

美国对混合电推进的研究处于世界领先水平，并一如既往地通过发起研究计划来促进混合电推进技术和产品的发展。美国国家航空航天局（NASA）在很早以前就开始关注混合电推进系统的发展。在N+3代飞机概念研究中，NASA提出了亚声速超绿色研究飞机计划（Sugar），要求飞机耗油率相对波音737-800降低70%。波音公司参与了该计划，研究了两种结构的飞机：Sugar High和Sugar Volt。其中，Sugar Volt飞机则采用了被称为hFan的混合电推进系统——电池/燃气涡轮发动机，该系统由GE公司研制。

2011年5月，NASA与GE公司在航空推进系统研究与技术（RTAPS）项目下，合作提出了针对未来宽体客机的N3-X层流飞机，如图2所示。其最突出的特点是采用了

混合电推进系统——燃气涡轮-电力分布式推进系统（TeDP），由两台安装在翼尖的涡轴发动机驱动超导发电机产生电能，以驱动15台嵌入机身的超导电动机带动风扇产生推力。N3-X新概念飞机的耗油率能比777-200LR飞机降低70%以上。

由于N3-X飞机的技术风险很大并面临适航问题，NASA当前的研究

工作聚焦到可在近期实现的波音737尺寸大小、常规布局的混合电推进技术飞机方案——带有后置边界层推进器的单通道涡轮-电推进飞机（STARC-ABL），如图3所示。其中，涡扇发动机在起飞时提供80%的推力，巡航时提供55%的推力。

2014年3月，NASA德莱顿飞行研究中心建成AirVolt电推进试验台，



图2 N3-X层流飞机概念图



图3 STARC-ABL飞机概念图





图4 Cri-Cri飞机



图5 E-Fan飞机

用于测量从电池、发动机到速度控制器和螺旋桨等各个系统部件的效率。此后，NASA与实验系统航宇公司（ESAero）合作，实施前沿异步推进技术（LEAPTech）验证项目，开展混合电推进一体化系统试验台（Heist）的地面测试。为了进一步验证高效、低噪声、低排放以及高总转换效率的电力飞机推进系统，NASA于2015年启动了缩比尺寸电推进技术应用研究（Sceptor）项目，将P2006T型轻型活塞双发飞机转换为分布式混合电推进飞机。

2017年6月初，在美国丹佛举行的航空航天学会会议（AIAA 2017）上，NASA展示了一种48座的称为“飞马”的混合电推进支线客机概念。该概念飞机由ATR42-500支线客机改装而成，采用分布式混合电推进系统。在其机翼翼尖有2个混合电螺旋桨、机翼内侧下方有2个电动螺旋桨、尾部还有1个螺旋桨。

2017年7月，在亚特兰大举行的美国航空航天学会推进与能源论坛上，NASA展示了在A320和波音737同级别客机尾部嵌入风扇的设计概念，即前述STARC-ABL概念，风

扇由2.6MW的电动机驱动，电动机由机翼下方的2台涡扇发动机驱动的发电机供电。风扇埋入机体后方，吸入边界层气流并对其加速，可以降低尾流阻力，从而减小涡轮发动机尺寸，进一步降低阻力。NASA研究显示，与常规结构相比，STARC-ABL阻力可降低7%~12%。

2017年8月25日，GE公司发布了一份关于混合电推进系统重大研究项目白皮书，宣称公司正在发展的混合电推进项目的发电机和电动机——这是任何混合动力推进系统都必须包括的两大关键技术——目前有了新突破，并与几家潜在飞机制造商商谈如何使用混合电推进新技术。GE公司此前一直在开展1MW级动力装置的基础技术研发工作，并声称这款混合电推进装置应用得非常广泛，可用于军用飞机、民用飞机、公务机和通用飞机等。

### 欧洲

欧洲在混合电推进研究方面与美国并驾齐驱。欧盟在“航迹”2050计划下探索了分布式混合电推进系统。空客集团首先通过开展E-飞机研究项目来研究电力推进的优势，

评估降低二氧化碳排放的潜力；其创新工作室也发展了采用4台电动机驱动4个对转螺旋桨的Cri-Cri飞机并于2010年9月成功试飞，如图4所示，以及采用电动涵道风扇推进的E-Fan飞机并于2013年年底成功试飞，如图5所示，验证了轻质、高效的发电机和电动机技术。

在对电推进系统演示验证的基础上，空客集团于2013年11月公布了与德国西门子公司和英国罗罗公司联合开发基于分布式混合电推进系统的E-Airbus 100座级支线客机概念，如图6所示，这也是“航迹”2050计划的一部分。E-Airbus采用了一种名为E-Thrust的混合电推进系统，该系统由1台安装在机身后部的嵌入式涡扇发动机带动发电机产生电力，驱动安装在机翼上的6台风扇，并为机载电池充电，每个机翼沿展向分布3台风扇，该推进系统的等效涵道比预计将超过20。

2017年11月，空客、罗罗和西门子三家公司在英国皇家航空学会宣布将合作研发一款混合电推进飞机E-Fan X，该机将选用一架BAe146飞机作为飞行测试平台，其

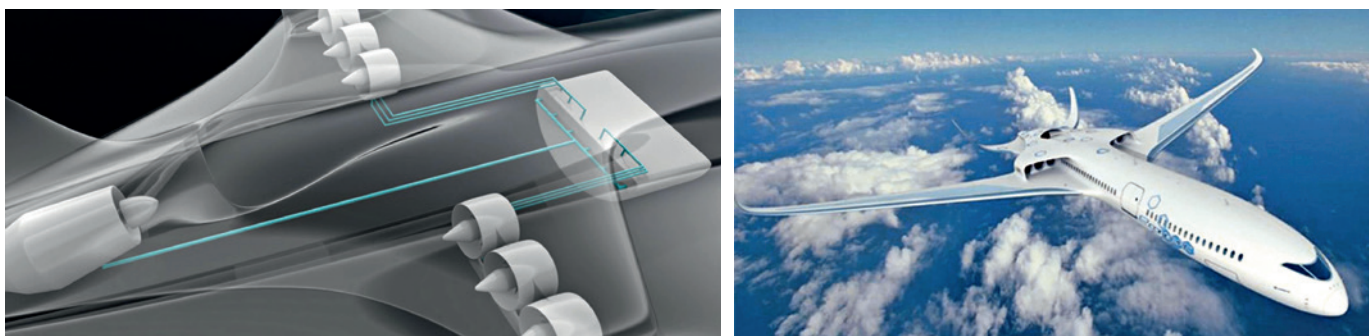


图6 E-Airbus飞机概念

4台涡扇发动机中的1台将被2 MW功率的电动机取代。E-Fan X验证机混合动力电动技术架构如图7所示。一旦系统成熟性得到验证，飞机上的另一台涡扇发动机也将被电动机取代。E-Fan X混合动力电动技术验证机在完成地面测试后，预计于

2020年首飞。

荷兰航空航天研究中心(NLR)和代尔夫特理工大学组成的研究团队正在开展一项名为新型飞机布局和缩比飞行试验(NOVAIR)的研究项目，将设计一款混合电推进的飞机并采用缩比模型进行动态飞行试验。这是欧

洲“清洁天空”2(Clean Sky 2)计划的一部分，项目周期为6年，欧盟投资518万欧元，计划在2021年进行飞行验证。NLR的研究表明，采用涡轮发动机进行发电，然后驱动电动机带动螺旋桨提供动力的方案可以将飞机油耗降低大约10%。

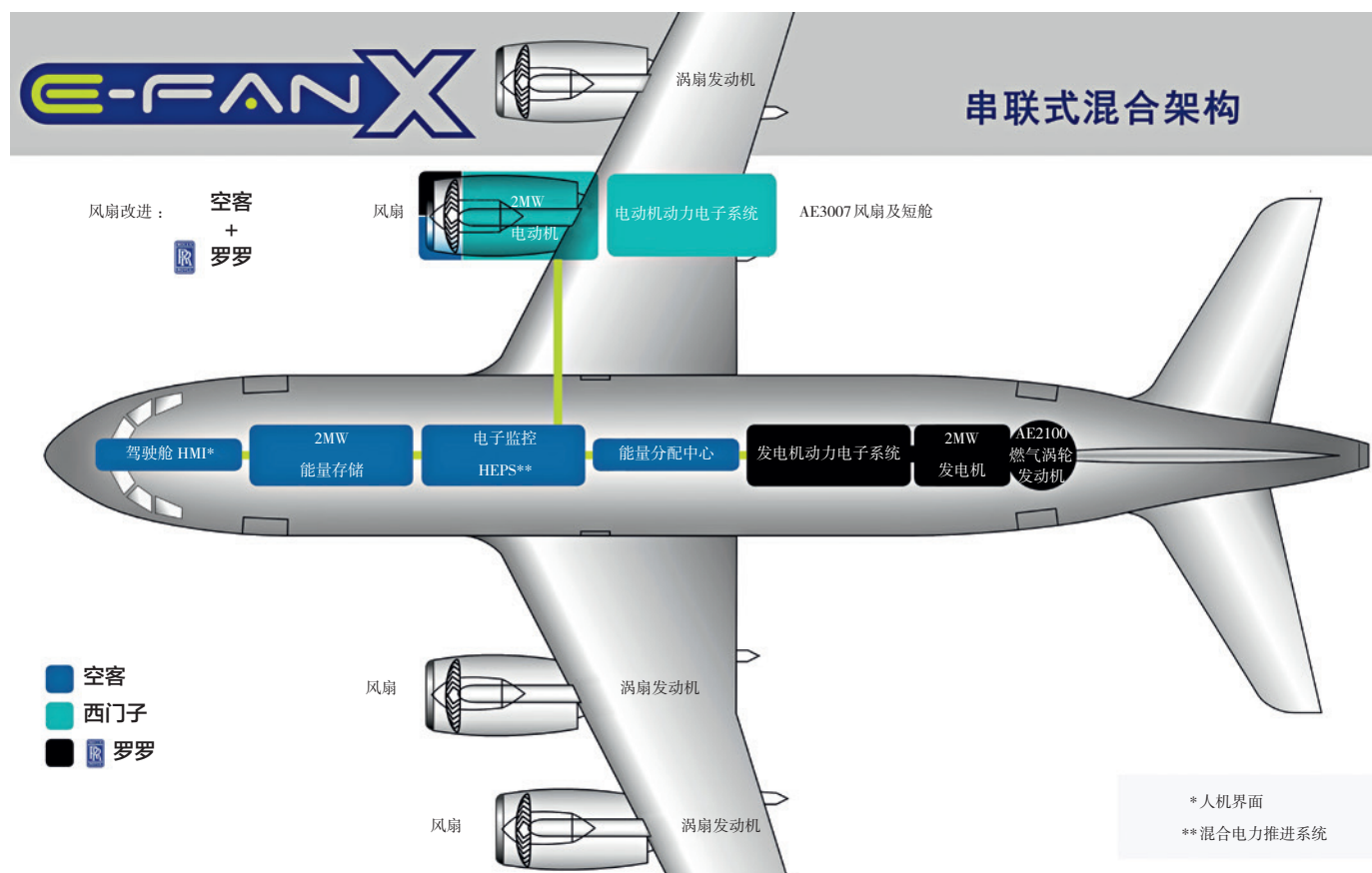


图7 E-Fan X验证机混合动力电动技术架构



2017年12月，位于德国陶夫基尔的第一座全电动推进试验台“铁鸟”地面试验设施正式投入使用，具有从飞行控制器到推进器的动态负载动力系统操控的能力，将主要用于电气、机械和热动力学的验证，将用于验证空客公司的CityAirbus电动飞机的电力推进系统，此“铁鸟”被视为CityAirbus项目研究的一个重要里程碑。经过“铁鸟”试验台的验证后，其推进系统将在2018年中期应用于CityAirbus验证机进行测试。CityAirbus是空客公司专为城市空中交通而设计的一款4座电动垂直起降飞行器，目前正在开发中，首批结构部件已经生产，目前处于组装阶段，预计于今年年底首飞。

### 俄罗斯

美欧珠玉在前，俄罗斯追蹶其后，也开展了对混合电推进系统的探索研究。

2017年7月，俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）在莫斯科航展上宣布了首个混合电推进系统研究计划，并展出了500kW级概念模型。该推进系统结构特点是由燃气涡轮带动发电机发电，然后由电动机驱动六叶螺旋桨旋转。当燃气涡轮或发电机发生故障时由备份电池提供动力。虽然该系统采用的是涡轮-电推进的传统构型，但配电设计却很独特。该系统将采用俄罗斯初创（Start-up）公司提供的SuperOx超导材料，这种材料质量很轻，并可在高能量下工作，还能减少电磁干扰，但还需要进一步的试验验证。CIAM表示，如果能获得俄罗斯联邦政府的资助，则有望在未来3年内完成500kW验证机的飞行试验，随后开展用于19座飞机的2000kW级动力

系统的飞行试验验证，其动力系统是由4台500kW发动机的组合动力或1台2000kW的发动机提供动力。

## 混合电推进将成为燃气涡轮发动机之后的重要动力选项

### 全电推进适合轻型飞机

2016年7月29日，美国《航空周刊》在创办100周年之际，其网站评选出了未来20~40年较有前景的18项航空航天技术，航空电力推进技术入选其中。《航空周刊》评论：“使用锂离子电池的轻型飞机已能实现全电推进，但更大型的飞机可能需要混合电推进系统。”目前，电力驱动的轻型飞机已经研制成功并实现首飞，如欧洲的E-Fan飞机。目前能效最高的锂电池能量密度（即单位质量的电池材料放出电能的大小）约为 $0.25\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，到2035年乐观估计有望达到 $0.5\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，而当前航空煤油的系统级能量密度则高达 $12\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。赛峰集团高级执行副总裁和首席技术官Stephane Cueille对此表示：“即使电池能量密度能够达到 $1\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，1架全电的A320飞机或与波音737飞机同级别飞机也将需要170t电池，而A320飞机的最大起飞重量（质量）也才80t，对于更大的远程飞机来说，全电并不实用。”

目前，国际上飞机制造商谋求发展的用于空中出租车的电动垂直起降飞机采用的便是全电推进。波音、空客、巴航工业等公司都提出了电动垂直起降飞机方案，而优步公司也提出了“空中出租车计划”，利用电动出租飞机彻底改变人们在城市出行模式。根据高盛公司的预期，到2035年，全球电动出租飞

机的市场将达到每年700亿美元，每年需要制造5万架全新的飞机。

### 混合电推进有望用于大中型飞机

混合电推进融合了燃气涡轮发动机和电力推进两种动力，虽然在燃气涡轮之外增加额外的电推进系统会增加重量并增加复杂性，但可以通过电推进系统的技术提升、重量减轻和更好的飞发一体化设计集成为改善。罗罗公司航空技术和未来项目部主管Alan Newby表示，“混合电推进系统的集成是关键，我们已了解到可通过更好的发动机和短舱结构以及气动综合来改进推进系统”，并表示集成的下一步是嵌入式和分布式推进。美国和欧洲的研究人员都认为，100座级及以下的混合电推进客机有望在2030年前实现，但需要混合电推进系统储能能力的大幅提升。估计采用混合电推进的大型中短程飞机耗油率可降低12%。

目前，航空动力技术发展已经不断提升涡扇发动机效率逐渐向提升航空动力循环效率发展，并日益呈现出改变发动机构型、甚至是出现颠覆传统涡扇发动机构型的趋势，混合电推进技术即是其中之一。混合电推进技术作为最有可能在2030年后取代燃气涡轮发动机的候选动力技术，一方面能够实现耗油率的阶段性改善，并获得各方力量的积极推动；另一方面彻底解放了飞机结构设计，出现了翼身融合设计、鸭翼布局的倾转机翼设计、分布式推进系统设计等各种飞发一体化的创新设计。未来，更紧凑、更高功率密度、能够产生1~2MW电能的发电机亦将出现，以满足全电飞机、直升机或大型运输机的动力需求，在实现采用混合电推进系统的军民飞机服役的同时将彻底颠覆未来

的航空动力格局。

## 混合电推进系统的技术挑战 “雷击”无人机中止的启示

2018年4月26日，美国极光飞行科学公司（现波音公司子公司）的“雷击”无人机，如图8所示，因其采用的混合电推进系统的发电机遭遇技术瓶颈而被中止，美国国防预先研究计划局（DARPA）宣布取消后续的研发工作。极光公司于2016年3月赢得了DARPA价值8944万美元的XV-24A“雷击”项目第二和第三阶段合同。该机采用了鸭式布局的倾转机翼设计和分布式混合电推进系统，由1台AE1107C涡轴发动机驱动一个装有3台霍尼韦尔的1MW级发电机的齿轮箱，再由电动机驱动全机24台涵道风扇产生推力。其中的18台安装在机身后方的倾转机翼上，6台安装在机身前方的倾转鸭翼上。霍尼韦尔公司在研发高性能1MW级发电机时遇到了技术瓶颈，使该项目在第二阶段难以制造出全尺寸原型机。因此DARPA

决定取消项目第三阶段研发和相关飞行试验。虽然霍尼韦尔坚持认为DARPA取消“雷击”项目的后续工作是另有原因，但也承认公司在发电机热管理方面遇到了挑战，并承认会因此导致项目进度的拖延。

XV-24项目在发展兆瓦级混合电推进系统中得到的经验将为业界提供很多启示，混合电推进系统的研制工作将不会像想象中的那么简单。虽然可以预测电动飞机的研制不会一帆风顺，但是DARPA决定取消XV-24A项目确实让工业界看清了现实，混合电推进系统还有许多工作要做。

### 混合电推进技术有待成熟

根据美欧已经开展的研究表明，由于目前电池的能量密度太低和电动机的功率密度不足，分布式混合电推进系统的发展受到很大限制。为了满足未来大型商用飞机的要求，混合电推进系统的电池能量密度至少应达到 $0.6\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，比目前能量密度最高的锂电池密度 $0.25\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 高出许多。而电动机功率密度

至少需要达到 $16.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ，但当前的技术仅能够达到 $8.8\sim 11\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。这两方面的因素导致当前混合电推进系统的体积庞大并严重超重，甚至比传统的燃气涡轮发动机还要笨重。因此，混合电推进系统未来发展的重点是能量密度更大的电池和电动机这两个技术难点，这也是各大发动机商孜孜追求的目标。当前研究表明，超导技术有助于提高电动机功率密度和能量效率，NASA、GE、波音、空客、罗罗、高等院校等各种研究机构都在开展与超导电机有关的超导材料、部件和相关超导技术研究，欧洲甚至因此发起了超导电动机（PSAM）验证和分布式电力航空推进（DEAP）系统研究等超导电机项目。

### 小结

混合电推力系统作为一种航空动力新概念，与目前飞机采用的动力系统有较大差异，已超越了传统的动力技术范畴，是飞机总体设计、动力系统和机电系统的系统集成，其研究也是一个复杂的系统工程，不但涉及材料、发动机和电动机的设计和制造工艺研究，还涉及试验规范、试验台的建设，以及适航管理等。以目前美欧已经开展的研究工作来看，都非常注重相关试验设施的建设，甚至将其作为混合电推进系统研究的里程碑来看待。因此，混合电推进系统的研究一定是设计、制造、试验乃至适航等各种相关因素齐头并进的结果。

**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 and 产业发展研究。）



图8 “雷击”无人机