

2018航空发动机热点事件及趋势分析

Aero Engine Hotspot Events and Trends Analysis in 2018

■ 陈博/空军装备部 晏武英/中国航发研究院

2018年世界航空发动机行业在新一代产品研制和先进航空推进技术研究方面取得了一系列进展，特别是在战斗机动力、大涵道比涡扇发动机、公务机动力，以及混合电推进领域都发生了很多热点事件，对其进行深入分析有助于认清未来的发展趋势。

新一轮战斗机发动机换代全面启动

在战斗机动力领域，已经有近20年没有出现新型号了。逐渐缩减的机队规模以及非传统威胁环境任务增多，使得高性能制空战机的更新换代需求并不强烈，美国正在推进新一代战斗机动力的研发，并将自适应发动机确定为空军第六代战斗机的动力形式，开展了持续的技术成熟与风险降低工作。根据美国国会预算办公室发布的报告，美国空军将从2030年起陆续采购414架穿透型制空战斗机（PCA），以逐步替换目前在役的F-15C/D和F-22。相比F-35A每架9400万美元的采购单价（2018年），PCA的单价预计将达到3亿美元。按照动力占整机价格

的15%计，其发动机采购总成本将近200亿美元，加上研制费有可能达到300亿美元，这将是美国未来30年军用航空发动机最大的一笔合同，对于目前正在承担自适应发动机研发的GE公司和普惠公司来说都将是必争之地。两家公司在2018年分别得到来自美国空军价值4.37亿美元的追加合同，扩展了XA100/101发动机验证机的验证范围，并开展飞行验证准备工作。GE公司已经完成了第一台XA100的核心机测试，开始验证机组装，将于2020年年初开始整机试验。

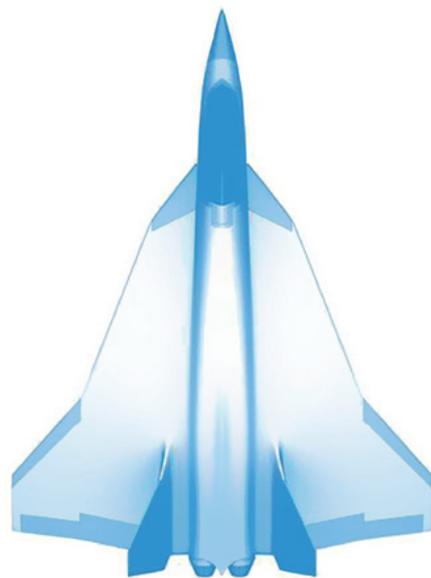
与之相比，俄罗斯目前的重心仍在持续推进五代机的动力装置飞行试验。有报道称俄罗斯已经开始研发第六代战斗机，但目前仅在材

料方面开展了研究，未见其披露有关发动机总体布局 and 关键技术方面的进展。反倒是此前一直未见有实质性行动的欧洲诸国相继推出了新一代战斗机研发项目，日本也开展了下一代战斗机发动机的测试，使得战斗机动力换代的气息扑面而来。

在英国准备脱欧的背景下，法国和德国在2018年6月宣布联合研制新一代战斗机，称作“下一代武器系统”（NGWS），将替代现役的“阵风”与“台风”战机。该战斗机



欧洲下一代战斗机发动机示意图（来源：MTU公司）



欧洲下一代战斗机示意图（来源：MTU公司）

要求具有更好的生存力、航程和任务灵活性，需要更强劲的推进系统。除了更高的结构完整性、可靠性和推重比，还要具备低的研发和生产成本、好的维修性、长且可规划的维修间隔，以及综合雷达信号特征和电力提取，并有可能采用变循环技术或智能发动机技术。德国MTU公司正在开展前期研究工作，一方面表示有能力独立完成该发动机的研制，另一方面也已准备好与法国进行合作。MTU在压气机、涡轮和控制系统方面有着丰富的研发经验，并开展了增材制造、陶瓷基复合材料等先进工艺和材料研发。法国和德国计划在2024—2026年做出正式的研发决策，2031年前完成发动机的设计、组装和鉴定试验，然后开始飞机原型机的飞行试验和军方鉴定，于2040年开始交付。

英国则在2018年7月宣布将研制名为“暴风”（Tempest）的新一代战斗机概念原型机，并揭晓了该机模型，计划于2025年开始验证机试飞。此后如进入装备研制，将在2035年前向英国皇家空军交付，取代将在2040年退役的“台风”。“暴风”战斗机的发动机由罗罗公司负责研发，将采用抗畸变风扇、嵌入式启动发电机、先进复合材料和增材制造、全集成的热管理系统，使发动机具有更高的功率密度、智能和多电特征、综合电力与热管理以及流线型外形。据外媒推测“暴风”战斗机将很可能采用EJ-200发动机的改进型号，即EJ-230发动机或EJ-270发动机。随后，欧洲其他国家开始选边站队，西班牙宣布加入法德下一代战斗机项目，意大利和荷兰则加入英国“暴风”项目，此外英



2018年8月，英国新一代战斗机“暴风”概念模型在范堡罗航展首次亮相

国还在与包括瑞典和日本在内的许多潜在伙伴国进行讨论。

日本近年来一直在推动自行研发下一代战斗机发动机。2018年6月，石川岛播磨重工（IHI）向防卫装备厅交付了XF9-1发动机原型机，由于采用了第五代单晶等新材料，涡轮前温度达到1800℃。随后该发动机在试车中连续实现不加力推力110kN（1tf≈10kN）、加力推力150kN的预定指标，计划于2020年3月前完成包含高空台在内的测试试验。未来研发目标是不加力推力130kN，加力推力200kN，与F135相当。

可以看出，战斗机动力装置已经进入新一轮研制周期，从各国的方案和进展来看，加力式涡扇发动机仍是下一代战斗机动力选择的主要形式。其中，美国空军已经明确下一代战斗机采用自适应发动机，海军则并未表示认同，加上两大军种间一向不愿意共用机型，海军下一步的选择仍存在变数；德国也提

出可能应用变循环技术，但MTU缺乏整机研发经验，法国赛峰集团则是在部件技术水平上略有不足，二者联合能否攻克或者应用变循环技术仍需观察；英国和日本则都选择了常规循环，后者的XF9-1的总体布局与F119类似，通过提高循环参数进一步提高推重比和单位迎面推力。从使用环境来看，变循环发动机（包括自适应发动机）比较适合美国海外作战和俄罗斯幅员辽阔的特点，特别是美国针对“反介入/区域拒止”环境下远程突防和穿透型制空需求；而对于国土面积狭小且重点在于本土防空的欧洲国家来说，作战环境与冷战时期差别并不大，核心需求是高速迎敌和机动空战，加上国家经济形势和研发投入的限制，采用复杂的变循环发动机对欧洲国家来说未必适宜，因此下一代战斗机动力选择何种形式要根据国家安全战略、作战模式以及研发资源综合权衡。



GE9X发动机 (来源: GE公司)

下一代大涵道比发动机雏形初现

民用大涵道比涡扇发动机的竞争也开始转向下一代市场,美国、英国、俄罗斯都在大推力级产品研发和验证方面取得了重大进展。随着商业运输对经济性要求的不断提高,发动机涵道比也在持续增大,由此带来的匹配性问题成为下一代涡扇发动机方案需要解决的重点问题。

GE公司于2018年3月实现了GE9X发动机的首飞,推力为445 kN,风扇直径达到3.4m,涵道比为10.3,总压比为61,耗油率比GE90-115B低10%。对于直接驱动型涡扇发动机,由于受到风扇叶尖切线速度的限制,涵道比越大,低压轴转速越慢,会导致低压涡轮级数增加、质量加大。为了解决这个问题,GE公司采取了相对“简单粗暴”的办法,在GE9X上采用了强度更高的第四代碳纤维复合材料风扇叶片,并将叶片前缘包覆的钛合金薄片改为合金钢,大大提高了叶片强度,允许风扇采用更高的叶尖切线速度,从而提高了

低压涡轮转速,使低压涡轮效率得到提升,只需要6级,比GE_{Enx}的7级还少1级,大大缓解了涵道比增大带来的负面影响。由于风扇叶片强度增大,叶身可以做得更薄,加上先进的气动设计,使风扇叶片数减为16片,在提高流通能力的同时减轻了质量。

罗罗公司则采取了类似普惠PW1000G的齿轮驱动方式。2018年8月,罗罗公司冻结了下一代UltraFan发动机的构型,同时宣布和空客公司合作研发该型发动机。UltraFan发动机采用齿轮驱动方式,涵道比将达到15,总增压比将达到70,燃油消耗和排放将比遛达700发动机降低25%,计划于2025年投入使用。为了保障该型发动机的研发,罗罗公司同步开展了三大关键技术的验证工作。首当其冲的就是大功率齿轮减速器,罗罗公司在德国建立了独立的减速器试验器,用以评估变速箱内部的载荷情况,设计功率可达74600kW。近期试验主要集中在耐久性和可靠性评估上,并对已完成第一轮试验的齿轮箱进行评估,对该部件的性能预测已经得到证实,将为建造完整的UltraFan验证机提供参考。同时,可用于UltraFan发动机的新型核心机正在随Advance 3发动机验证机开展地面试验。该核心机



罗罗先进低压系统 (ALPS) 验证机 (来源: 罗罗公司)

有10级高压压气机和4级中压压气机，分别由2级高压涡轮和1级中压涡轮驱动。验证机是在核心机上加装遛达XWB发动机的风扇系统和遛达1000发动机的低压涡轮构成，已经运行到近90%的核心机功率，并开展了轴承载荷测量，进一步的试验将包括吞水、噪声以及运行中的X射线检查、核心区域和热端部件的热量测量等。此外，罗罗公司还开展了先进低压系统（ALPS）验证机的地面试验，利用遛达1000发动机对钛合金前缘复合材料风扇叶片和复合材料风扇机匣进行了试验，开展了侧风、起动、吞冰、鸟撞、叶尖碰磨以及自然结冰条件下的性能试验。随后还将在室外台架上进行噪声试验，并在未来几年内进行飞行试验。

俄罗斯于2018年1月宣布启动PD-35发动机研制，推力将达到333.2kN，由联合发动机制造集团（UEC）研制，计划2019年完成设计，2021年完成核心机试验，2023年完成验证机试验，2028年投入批量生产。PD-35将采用宽弦复合材料风扇叶片和复合材料风扇机匣，涡轮前最高温度将达到1450℃，热端部件将采用陶瓷基复合材料。PD-35的核心机将借鉴PD-14核心机，在其基础上将高压压气机增加一级，最终形成9级压气机和2级涡轮结构。尽管俄罗斯也曾经研究过齿轮传动方式，但从目前的信息看，PD-35仍将采用直接驱动构型。

随着近些年各级别干线客机逐渐完成更新换代，预定2025年投入使用的波音“新中型飞机”（NMA）动力的选择将成为下一代大涵道比涡扇发动机的风向标。罗罗公司和

普惠公司都转向齿轮传动方式，而GE公司则表示如果有需要也可以提供这一构型，因为在面临再提高两位数的燃油效率改善需求时，进一步提高风扇叶片强度的空间非常有限，齿轮传动或将成为各方共同的选择。在关键技术方面，GE公司、罗罗公司和UEC都广泛采用了树脂基复合材料风扇叶片和机匣、陶瓷基复合材料热端部件以及钛铝合金低压涡轮，并逐步加大增材制造应用的范围；在压气机设计上，GE9X高压压气机平均级压比为1.349（11级压比27），低于GENx的1.368（10级压比23），而罗罗公司新推出的“珍珠”公务机发动机10级压气机压比达到24，平均级压比为1.374，相信Advance 3也能达到同等水平；俄罗斯PD-35则计划用9级压气机达到压比23，平均级压比高达1.417（PD-14的8级压气机压比为16，平均级压比为1.414，达到这一水平还是有可能的）。因此，下一代大涵道比涡扇发动机无论是在性能指标、关键技术还是材料工艺上，这些已经可以看到的参照系可能都会成为初始标准，只有在驱动方式、气动设计、参数选取上更胜一筹，才能在激烈的市场竞争中占得一席之地。

公务机动力高速化趋势显现

2018年10月，新加坡航空公司恢复全球最长航线SQ21/22，从新加坡樟宜机场直飞美国纽瓦克机场，航程超过15000km，飞行时间接近18h。采用远程型A350-900ULR飞机执飞，为了保证舒适性，载客量只有161人，是正常航班的一半。实际上，同样起终点的经停航班只需要多花4~5h，价格却要便宜得多，但对于追求工

作效率的商业人士来说，对更高效航空运输的需求从未停止。因此，速度更高的公务机市场需求依然强劲，且表现出向超声速、甚至高超声速发展的势头。

2018年5月，罗罗公司宣布推出全新的“珍珠”系列公务机发动机，并表示该发动机已被庞巴迪“环球”5500/6500公务机选为唯一动力，已于2018年2月获得了EASA认证，计划于2019年年底投入使用。该系列的第一个型号“珍珠”15在推力、油耗、噪声及排放方面都有较大改善，能够应对普惠公司的PW800和GE公司的Passport的竞争。该发动机采用比竞争机型略小的涵道比（4.8），使得飞行速度能够达到马赫数（Ma）0.9，相比常规的商业航班能够更好地满足公务需求。

然而，高亚声速还是不够快，在“协和”号飞机退役十多年后，新的超声速公务航空市场又重现复苏的迹象。除了洛马、波音等老牌制造商，博姆（Boom）科技、Aerion航空等初创公司也瞄准了超声速客机市场。Boom科技推出了可乘坐55名乘客的Overture客机方案，能以Ma 2.2的速度巡航，航程超过8000km，预计20年代中期投入市场。2019年该公司计划试飞1/3比例的验证机XB-1，对空气动力学、复合材料和推进系统进行测试。原计划该验证机的动力采用3台GE公司J85-21涡喷发动机，但目前Boom公司已经决定用3台GE公司J85-15发动机替换J85-21发动机，对于全尺寸飞机来说，发动机的选择仍是Boom公司面临的重大问题。出于成本的考虑，Boom公司更倾向于利用现有的发动机进行衍生，但缺乏具有合适

低增压比压气机的发动机。比较合适的是涵道比为3~4的中等涵道比涡扇发动机,在这个工作点上飞机起飞的噪声比较低,足够低的涵道比不会引起太多波阻,并且能保证足够的燃油效率。

Aerion公司的AS2超声速公务机同样采用3发布局,载客12人,最大巡航速度为 $Ma1.4$,计划将于2023年首飞,2025年完成适航取证。2017年Aerion公司确定由GE公司为AS2提供动力。2018年10月,GE公司完成发动机的初始设计,将其命名为“亲和力”(Affinity),计划在2020年前完成详细设计审查,并开始原型机生产。Affinity发动机的推力为80kN,涵道比为3,是在CFM56/F101核心机基础上加装2级风扇和2级低压涡轮,并配以低阻、可调的进排气系统和全权限数字式电子控制(FADEC)系统而来,可以视为现代化版本的F101,其较低的压气机压比和中等涵道比刚好能够满足超声速发动机在相对较高的速度工作的需求。

该发动机兼顾了超声速飞行和亚声速飞行的需求,但并未彻底解决AS2的声爆和油耗高的问题。GE公司给出的解决方案是在起飞阶段不使用全推力。Affinity发动机使GE公司利用成熟核心机技术抢占了超声速商业市场的先机,也使GE公司以较低的投入试探超声速动力市场的接受度和合理区间,以便下一步提出更能满足市场需求的发动机方案。

而在高超声速范围也不乏试水者。在美国航空航天学会(AIAA)2018年航空学术大会上,波音公司披露了一种高超声速客运飞机的初

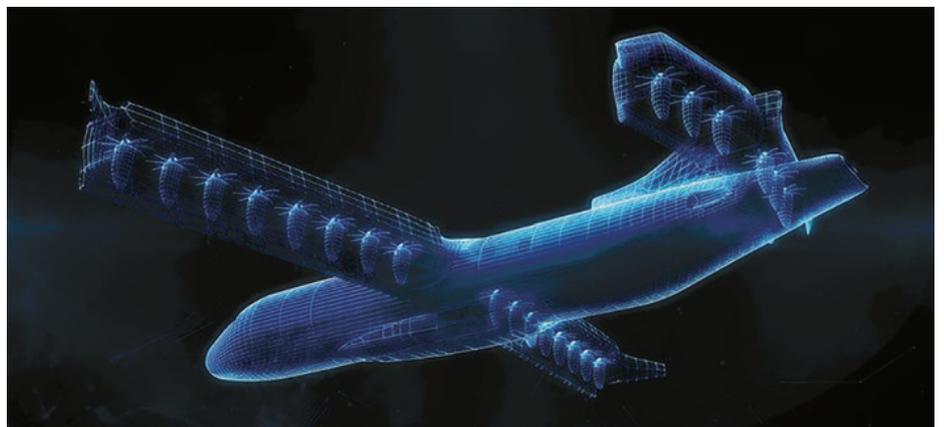
始概念方案,巡航速度为 $Ma5$,巡航高度约29260m,能够2h跨越大西洋或3h跨越太平洋。该方案载客量介于远程公务机和波音737之间,投入运营的时间点大概是在21世纪30年代末。波音公司认为,选择 $Ma5$ 是在效率和成本之间的有效平衡,既能在一天之内完成跨洋往返飞行,又不需要采用复杂的超燃冲压动力,只需要用到涡轮-亚燃冲压发动机就够了。超过 $Ma5$ 以后,速度提升带来的边际收益在减小,而边际成本则在增加,并会在推进或材料上碰到技术台阶。

航空电推进呈现两极分化

当前对航空电推进技术研发和验证的力度不断加强,除传统航空发动机厂商和政府科研机构外,众多初创企业也加入了电推进航空器的研制。目前全球范围内有约100型电推进飞机正处于研制阶段,其中约有60%的项目是由新兴初创公司和独立公司投资,航空航天公司占了30%(其中主要的原始设备制造商占一半左右),其他10%左右来自美国国家航空航天局(NASA)等学术和政府机构。

目前,航空电推进主要包括全电动和涡轮-电混合两种模式。由于电池能量密度的限制,大量纯电推进的飞行器都在朝着通用航空(GA)或城市空中交通(UAM)方向发展。而针对商业航空市场的大型研发项目大多是混合电推进的,并使用传统碳氢燃料来提高功率输出和/或扩展航程。目前大部分的项目都使用螺旋桨,大约有1/3的项目使用涵道风扇。

各大航空企业都已成立了专门的电推进技术研发团队,并在该领域取得一定的研究成果。GE公司通过采用军用涡轮发动机来验证双转子功率提取方式,并对1MW电机/发电机进行了试验,效率达到98%。罗罗公司提出电动变速发动机概念,在短途飞行中可节省20%的燃油。联合技术公司研发出利用电池在飞机起飞和爬升阶段协助推进,而在巡航阶段对涡扇发动机进行再次优化,使整个能耗降低5%。赛峰集团则被贝尔公司和Zunum Aero公司选中,提供分布式混合电推进系统解决方案,并在2018年7月完成分布式推进系统的首次地面试车。霍尼韦尔公司正在研发基于HTS900



罗罗混合电支线客机结构示意图



欧盟 Mahepa 项目计划采用的 HY4 氢燃料电池动力飞机



赛峰分布式混合电推进系统地面试验

的混合电推进系统，但其兆瓦级发电机因为效率未达到预期目标，导致极光飞行科学公司的 XV-24A 研发项目被美国国防预先研究计划局 (DARPA) 取消。空中客车公司与西门子公司、罗罗公司计划在 2020 年对混合电推进支线飞机验证机 E-Fan X 进行试飞。而西门子公司研发的航空电动机已经在飞机上进行了验证，并将为空中客车公司的 4 座 eVTOL 验证机提供动力。欧盟“模块化混合电推进系统”(Mahepa)项目计划

在轻型飞机上对模块化混合电推进技术进行研发和试验，使技术成熟度 (TRL) 达到 6 级，并研究是否可在 19 ~ 70 座商用飞机上应用。巴航工业与优步合作提出空中出租车概念，主要目标是城市空运市场。NASA 则支持流体能源公司研究纳米电燃料 (NEF) 液流电池，可以为飞机提供安全、清洁和安静的电力能源。

继赛峰集团在 2017 年发布航空电推进技术路线图后，由日本宇航局

(JAXA) 和工业界组建的飞机电气化联盟也在 2018 年 12 月发布了电动飞机技术路线图，预计到 21 世纪 20 年代小型电动通用飞机将投入使用，到 30 年代小型电动商用飞机、窄体客机将成为可能，到 40 年代电力推进将成为窄体和小型飞机的核心技术，50 年代后大型飞机的电气化将达到其理想形式。路线图分别提出了以大型飞机和通用飞机为主的两种技术发展方案，确定的关键技术包括实现电力元件的高功率密度和效率、电池的高能量密度，以及电池和电力系统的高安全性和可靠性。

可以看出，目前罗罗、GE、赛峰等传统航空发动机制造商以及波音、空客、西门子、NASA 等航空制造企业和科研机构的重点都在混合电推进系统，并选择现有比较先进的涡轮发动机作为原动力，预计到 2030 年后具备进入商业运行的技术成熟水平，届时将会对传统涡扇发动机市场造成巨大冲击。同时，航空电推进的普及也会对行业构成带来巨大的影响，目前以传统飞机和发动机制造商为核心的格局将被打破，在未来的电推进系统中电力系统供应商和新兴互联网运营商将具备强大的竞争实力。这类企业能够借助电力电子行业的技术优势和类似 SpaceX 的商业互联网模式，以城市空运和通用航空市场为突破口，继而谋求进入大型商用飞机动力市场，可能会对传统发动机制造业造成侵蚀，但同时也有助于整个产业规模的可持续增长，并促进传统航空发动机厂商的发展和转型。

航空动力

(陈博，空军装备部，工程师，主要从事飞机与发动机工程、飞行器控制技术研究)