

英国下一代战斗机及推进系统电气化

British Next Generation Fighter and Electrification of Propulsion System

■ 刘静 李明 / 中国航发研究院

2020年1月9日，罗罗公司宣布将为英国下一代战斗机“暴风”（Tempest）项目开发世界一流的电气技术，这意味着与“暴风”配套的发动机将向提供电力与推力的综合方向发展。

自 20世纪60年代研制“鹞”式战斗机以后，英国就一直没再独立研发过战斗机整机，但其仍保留了完整的航空发动机产业，并牢牢抓住这个军民用航空装备领域的“要害”。在此基础上，英国航空工业通过持续研发新的设计、材料、制造等相关技术，逐步提升核心能力，根据需求不断推出新型发动机并进行系列化改进改型，并将技术变为资金，进而再投入新的研发，形成了较好的良性循环。英国的下一代战斗机“暴风”项目就是在这种背景下酝酿和发展的。



英国下一代战斗机“暴风”

“暴风”战斗机项目

项目概况

多年来，英国和法国一直设想联合发展一种“未来作战航空系统”（FCAS/SCAF），并开展了FCAS关键技术的先期成熟和演示验证，但受英国脱欧等影响，该项目并未开展太多实质性工作。2018年4月，法国和德国正式启动FCAS计划，定义了一个以“下一代战斗机”（NF）为核心、多种元素相互连接协同的“系统族”，计划在2040年前投入使用，用于替换两国空军的“台风”和“阵风”战斗机。2018年7月，英国发布《作战航空战略》，要求使英国能在国内和全球获得并保持制空能力，

确保作战优势等；同时公布将启动下一代战斗机“暴风”项目，并展示了全尺寸模型。英国希望借此既维持其航空工业的高端研发能力，包括隐身技术、发动机、传感器、航电设备以及各种先进武器；又确保未来一流军事力量；还能够在未来战斗机市场占据一席之地。为此，英国政府将在2025年前为“暴风”项目投资20亿英镑进行相关研究，工业界也将提供额外资金。项目计划在2025年开始验证机试飞；若进入装备研制，将在2035年前后交付英国皇家空军，在2040年取代退役的“台风”。

项目团队

“暴风”项目由英国国防部和工业界组成的联合团队共同开发。国

防部人员主要来自英国皇家空军、国防科学技术实验室以及国防装备和保障局等。工业界主要有4家公司参与：英国BAE系统公司牵头总体系统与集成，罗罗公司负责推进系统，意大利莱奥纳多公司负责综合传感器和航电系统，欧洲导弹集团（MBDA）负责机载武器系统。

为实现“暴风”的快速研制及部署，英国效仿美国创建了皇家空军快速能力办公室（RCO），推行敏捷高效的创新采办。该机构目前为项目引入了下一代可消耗诱饵、集群无人机及其他能力，未来将进一步扩大技术集成选项、扩展技术演示验证规模。

考虑技术、经济及市场等综合因素，“暴风”项目开始就采用了国

际合作的方式，英国持续邀请国际合作伙伴加入，拟通过技术互补、资金投入、市场拓展等途径提高项目质量、分摊费用降低成本。2019年7月、9月，瑞典、意大利分别正式加入，成为项目国际合作伙伴。

项目进展

装备研发前，势必要开展大量可行性论证、技术风险降低类工作，下一代战斗机作为一个高度复杂的航空综合体，尤为如此。

2018年7月，BAE系统公司获英国国防部一份1年期合同，继续开展“未来作战航空系统”项目，主要研究未来“空战”的概念、需求及其关键技术，用于定义下一代空战能力，要求技术成熟度（TRL）达到3级，该结果可用于“暴风”项目。

截止到2019年10月，英国皇家空军围绕“暴风”项目已经启动80个计划，签署160份合同，涉及可集成至战斗机系统中的各种任务能力。

2020年，英国将加速项目开发，4家主要项目参与公司将于2020年12月前完成战机性能分析，并计划增加参与项目的英国员工人数由目前的1000人扩大到2500人，要求项目在2020年年底完成对英国未来空战能力重要性的项目分析，确定“暴风”的能力水平、合作方式、成本、交付时间表和采用哪些技术等内容。

2021—2025年，“暴风”项目将加速技术成熟与国际合作。

“暴风”战斗机特点

“暴风”是单座双发战斗机，带倾斜

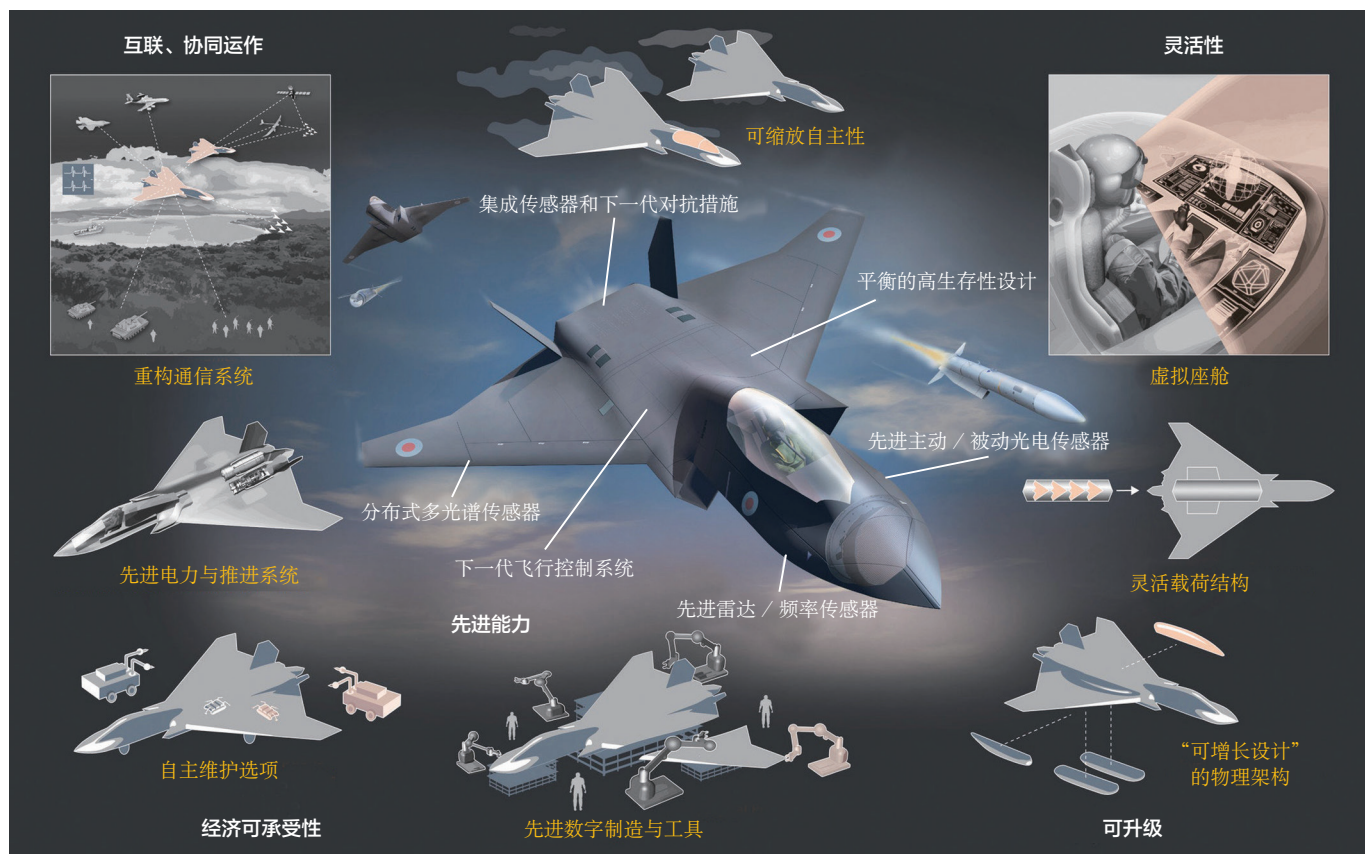
双垂尾、内置弹舱，无平尾；具有菱形机头、翼身融合体的后缘呈W形轮廓等特点，与当前隐身战机有相似之处。作为下一代战斗机，“暴风”还将集成融合一系列当前正在开发或已经应用的先进设计和制造技术，保证其在未来的领先性。

智能化

“暴风”战斗机利用人工智能（AI）和机器学习技术，可达到较高的智能化程度。虽采用有人驾驶，但兼具无人自动驾驶的能力，可作僚机使用，同时还可指挥集群无人机。通过先进的指挥控制系统和动态传感器平台，飞行员将更多地扮演“战场指挥官”的角色。

信息化

“暴风”战斗利用可重构通信、



“暴风”战斗机特点

传感器融合等技术，能够充分融入作战网络，与空天地海高带宽连接组网，实现战场360°全向态势感知，扮演力量倍增器的角色，形成协同攻击和防御的作战能力。“暴风”的组网对象包括战斗机、预警机、无人僚机、集群无人机等空中平台，以及卫星、海上舰艇、地面车辆、机动部队等装备或人员。

先进武器

“暴风”战斗机采用内置模块化载荷，可根据任务需求配置各种武器，如空空导弹、纵深攻击巡航导弹、反舰导弹等，还可携带新型高超声速导弹，甚至集群无人机。该机还计划集成定向能武器，如激光、微波或粒子束等，这也是英国设计的首个携带此类武器的装备，可显著增强新机的攻击能力。由于具备较强的拓展能力，根据任务需求，“暴风”未来可扮演多用途作战平台的角色。

灵活能力

“暴风”采用全虚拟可穿戴式座舱，通过增强现实/虚拟现实（AR/VR）头盔实现沉浸式感知驾驶，可根据飞行员定制并支持快速升级。该机还将使用分布式、多光谱无源和有源光电和射频系统，具有对抗网络攻击能力。战斗机可灵活集成新的软硬件系统，支持即插即用，并专门针对未来性能提升进行了适应性物理架构设计。

飞发一体及推进系统的电气化

实现上述“暴风”战斗机先进的技术特征和能力的关键，在于需要一个强大的动力能源系统作支撑，而现有的发动机均无法满足这一需求。因此，罗罗公司计划设计一型全新的发动机。新发动机的研制一方面注重优化与飞机的一体化设计，同时采用革命性的新技术提高发动机自身的能力。

飞发一体化设计

一是对安装进行优化。推进系统在设计上与飞机平台气动匹配，可优化平台总体性能、航程及载荷能力。

二是优化热管理系统。利用燃气涡轮发动机作为“热沉”来回收飞机平台周围的热能，进而省去了机载通风系统，提高整体系统效率，通过大管路来冷却涡轮和高温尾气以及武器舱等飞机部件。

三是采用智能电力管理系统。增加的发电能力结合智能电力管理系统，将不断满足飞机对电力增长的需要。该系统还可减少能量转换装置数量，将燃气涡轮发动机作为首要动力源的潜力最大化。电力将存储在大容量机载电池中，飞机不需要辅助动力装置即可自主启动，可进一步减轻总体质量。

嵌入式起动机发电机

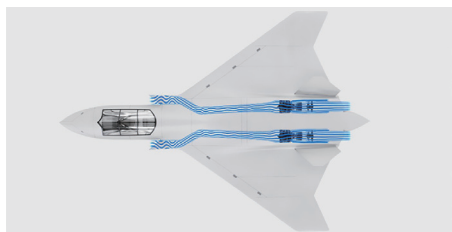
早在2000年，罗罗公司就曾启动多电发动机的研究计划，研究在

发动机轴上安装电动机，用电力系统取代液压、气压系统等。2014年，该公司开始了“嵌入式起动机发电机”（E2SG）的演示验证项目，即将传统燃气涡轮发动机核心机完全嵌入起动机发电机，这也是“暴风”项目配套动力的核心技术。

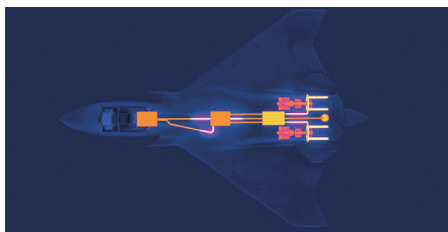
这种嵌入式起动机发电机，将磁体结合在发动机转子上，将线圈置于磁体外侧便形成发电机；而当外界向线圈供电时，则可带动转子变成起动机。磁体同时应用于高低压转子系统，形成两个独立的起动机发电机。利用这种嵌入式起动机发电机，在结构上可拆除常规置于发动机外部的变速齿轮箱、油泵液压泵、起动机和发电机等相关附件，进而简化外部结构，减小发动机横截面面积。附件的去除，“中和”了嵌入式电机系统带来的质量增加。在性能上，可提高发动机效率、响应速度；在空气稀薄的高海拔环境中，可利用该系统调节转子系统的能量提取量，进而提高发动机的喘振裕度。

E2SG主要研究40~150kW系列的起动机发电机，分为三个阶段。

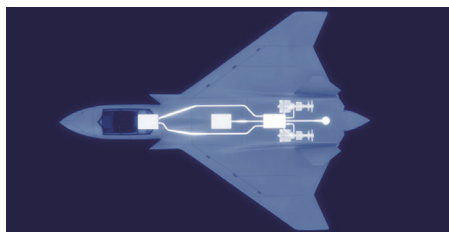
第一阶段，投资综合电力设施——一个综合电测试室，可以让燃气涡轮发动机与直流电路在物理上相连。项目团队开展了在军用的阿杜尔（Adour）发动机的高压压气



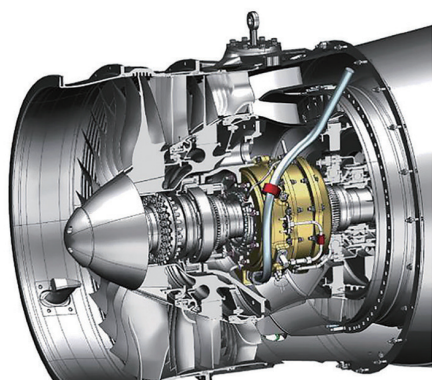
飞发气动匹配



热管理系统



综合电力管理系统



嵌入式起动机发电机



机段安装起动机发电机的一系列试验。得益于在电磁和传热两个领域的创新，虽然封装在高振动、高温、高速运转的严酷环境内，但试验验证嵌入式电机系统能可靠地起动发动机并向飞机供电。基于E2SG项目在阿杜尔发动机上开展的试验工作，罗罗公司已开始开发AE3007发动机的嵌入式起动机发电机，额定功率40kW，用于RQ-4、MQ-4C和MQ-25等无人机。

第二阶段，从2017年开始，主要研究连接低压轴的第二台起动机发电机、电网中的能量存储系统，以及所有系统间电力供应的智能管理能力。项目正在研究在发动机的高低压双轴上安装起动机发电机，根据循环中高低压系统载荷的不同进行调节，进而改善发动机的可操作性、响应性和效率等性能。罗罗公司正在研究的另一项关键技术是电力管理智能控制系统，利用AI技术，实时监测飞机的电力供应，对满足电力需求做出智能决策；同时优化，包括发动机效率在内的各种因素，以减少燃油消耗或降低发动机工作温度，延长部件寿命。

第三阶段，将新型热管理系统集成到整个系统，并集成更多的多

电发动机附件。罗罗公司还打算展示一个先进电力与推进系统的全尺寸验证机，其中燃气涡轮发动机的所有部件都将吸纳新技术，包括达到更高功率的双轴嵌入式发电、先进热管理系统、针对未来战斗机工作循环定制的储能系统、能够优化燃气涡轮发动机和电力与热管理系统之间性能的智能电力管理系统。

隐身设计

两台发动机在布局上都非常靠近飞机中线，采用S形进气道，探测不到叶片等旋转机械，有利于减少飞机的前向雷达截面积（RCS）。采用内埋式排气装置，配合矩形喷管口，并且圆转矩过渡段加强燃气掺混，以降低中心温度。压气机引气降低高温排气温度，抑制红外辐射。

其他先进技术

为控制飞机尺寸，设计者一般会选择缩短发动机进气道。但根据“雷神”无人验证机经验，这样会引起发动机喘振，这就需要抗进气畸变的风扇来处理气体分离等问题。新发动机的进气口采用可调整流叶片和抗畸变的风扇系统，具有较高的畸变容忍度。

在碳纤维复合材料技术领域，罗罗公司已取得较大成功，包括在

2020年1月开设了新工厂开展碳纤维复合材料风扇叶片的制造，后续还将制造复合材料机匣，公司还通过增材制造技术减轻冷却结构的质量。先进的复合材料和增材制造技术应用比例的提升，将有助于发动机简化结构、减轻质量、提高推重比。

在维修方面，考虑未来发动机的可靠性需要，当前的日常目视检查将改为由机器人系统进入发动机内部开展，减少对检查窗口的需求。

在提升发动机效率方面，罗罗公司于2019年获得英国皇家空军快速能力办公室价值1000万英镑、为期两年的合同，以开展先进高马赫数推进系统的设计、发展、分析和试验研究，主要是更好地理解反应发动机公司（Reaction Engine）的强预冷技术，及其在燃气涡轮发动机上的集成应用。未来“暴风”发动机也可借鉴该技术，以提高效率、扩大飞行包线。

结束语

发动机是飞机的核心，这在下一代战斗机上表现得尤为突出。下一代发动机的推力自然是要满足超光速巡航等基本性能要求，但由于未来战斗机将携带大功率雷达、大量高功率传感器与航电设备，甚至电动操纵面、定向能武器等，将导致飞机的热负荷处理需求、电力的需求都达到空前水平，发动机须在保证推力、隐身等基本前提下满足飞机对电、热等方面的需求。综上所述，下一代发动机将是集飞机的推力、电力及热管理为一体的高度耦合系统。

航空动力

（刘静，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机研发综合管理）