

俄罗斯第五代战斗机项目发展解析

Analysis to the Development of Russian Fifth-Generation Fighter Aircraft PAK FA

■ 钟滔 / 中国航发涡轮院

作为一型先进的单座双发隐身多用途重型战斗机，苏-57具备隐身、短距起降、超机动性、超声速巡航等能力，能够完成远/近距离空中作战和对地打击任务。自2010年首飞至今，苏-57战斗机仍未能顺利列装部队，原因何在，让我们一探究竟。

按照俄罗斯战斗机划代标准，目前俄罗斯苏-57是比肩美国F-22和F-35的第五代战斗机。

从T-50到苏-57

20世纪70年代末至80年代初，美、俄两国各自都研制了第四代战斗机：重型F-15和苏-27，轻型F-16和米格-29。80年代初，美国提出了先进战术战斗机（ATF）计划，并于1991年开始研制和测试第五代战斗机F-22原型机。为与美国抗衡，苏联空军在80年代末也提出了研制新一代战斗机的要求，以便在未来替代苏-27和米格-29。为此，当时米高扬设计局的米格1.44战斗机方案和苏霍伊设计局的苏-47战斗机方案展开了竞争。然而，苏联解体以及随之而来的经济危机导致俄罗斯在联邦成立之初面临严重的财政困难，原本在竞争中获胜的米格1.44方案被无限期搁浅。

2001年，逐渐走出困境的俄罗斯开始重振航空工业，俄罗斯空军提出了对第五代战斗机——未来前线航空系统（PAK FA）的具体性能要求。但此时的米格1.44在雷达隐身、机动性和多目标攻击等能力上已经无

法满足新一代战斗机的要求。而苏霍伊设计局在苏联解体后通过批量生产苏-27/30战斗机在国际市场取得了巨大成功，获得了大量经费用于支撑科研，与此同时，落选后的苏-47作为飞行试验平台帮助其积累了大量研制经验。2002年，苏霍伊T-50战斗机方案凭借高可实现性和最大化满足战术技术要求，最终赢得了俄罗斯空军第五代战斗机的竞争。

2004年，苏霍伊设计局完成了草案模型，并获得了军方认可。2005年，俄罗斯首次公布了第五代战斗机名称——T-50（工厂代号）。随后，T-50项目开展了大量试验，并于2010年1月完成了首飞。2017年，俄罗斯联邦空天军宣布，T-50正式获得批量生产名称“苏-57”：“苏”代表苏霍伊设计局，数字“5”代表第五代战斗机，数字“7”在俄罗斯文化中代表幸运。2020年苏-57将按计划正式列装部队。

从T-50到苏-57，俄罗斯第五代战斗机项目从苏联时代走来，历经坎坷，任重道远，成为国际航空舞台上不可忽视的力量。

不对称发展

美国F-22定义的第五代战斗机主要

特点是隐身、超声速巡航、超机动性、战况感知能力和信息融合能力等。作为抗衡F-22战斗机的产物，俄罗斯在苏-57战斗机研制过程中并没有一味地跟随、效仿美国标准，而是坚持突出优势、扬长避短的设计思路。

就性能而言，隐身被视为第五代战斗机应当具备的革命性的关键性能。F-22战斗机依靠在结构布局、材料、涂层上的技术突破，可实现在敌机机载雷达站、防空系统雷达监测下的低可探测性。相对而言，苏-57在隐身性上并不占优势：大翼展增加了暴露风险；探出的尾锥和喷管增大了雷达和红外暴露的可能；直流式进气道也使得压气机前端叶片成为极好的雷达波反射源。尽管后续进行了一些改进，但对比F-22战斗机正面雷达截面积（RCS）0.01m²，苏-57战斗机0.4m²的对应参数还是将其在隐身性上的劣势暴露无遗。所幸苏-57从一开始就未打算过要复制成为俄版F-22——既然隐身性上无法超越对手，那就从机动性、航程和武器上发展传统优势以制衡对方。例如，苏-57在超机动性上可轻松实现平螺旋、钟形机动、“眼镜蛇”等高难度机动动作，相对于更适合远距离作战的F-22，苏-57

无论是在近距离格斗还是远距离追击表现都更为优良。美俄第五代战斗机主要参数见表1。

在综合性能比拼中，有专家模拟了苏-57和F-22的对抗过程：F-22凭借优秀的隐身性能在空中先发制敌，首先发现目标并发射导弹进行攻击，不过借助强大的机动性和速度，苏-57有能力成功躲避并发射导弹给予回击，接下来胜负则完全取决于战斗机飞行员的作战训练经验和操控技能。但在相同条件下，即使是对抗F-35战斗机，苏-57在速度、机动性和武器挂载上的优势也会带给它更大的胜算。

敌无我有、敌有我强、敌强我制，可以说苏-57通过发展不对称优势另辟蹊径，探索出了一条发展第五代战斗机的俄式道路。

困局重重

尽管苏-57肩负着俄罗斯第五代战斗机的重要使命，作战性能比肩F-22战斗机，但发展前景却不容乐观，发动机研制不明朗、性能差异、事故频发、市场遇冷、第六代战斗机研制来袭等因素让苏-57的发展面临重重困局。

发动机研制不明朗

20世纪90年代，政治、经济上

的双重打击使得原本在航空领域能与美国分庭抗礼的俄罗斯停滞不前。21世纪初决定重振航空工业的俄罗斯压力很大，抬头是美国一飞冲天的第五代战斗机F-22，低头是本国航空技术、材料、工艺的落后现状，眼前是急需发动机的T-50。有鉴于此，俄罗斯立足本国航空工业的发展国情，着手解决当下五代机动力需求与现有发动机研制水平之间的矛盾，选择了一条曲线救国、分步实现的发展道路，即分两个阶段为俄罗斯第五代战斗机配装动力：第一阶段采用“5-代”AL-41F-1发动机填补动力需求；第二阶段采用“5代”发动机“产品30”匹配战斗机发挥真正实力。这种分步走的策略虽属无奈之举，但也解了燃眉之急。

第一阶段动力装置AL-41F-1发动机（代号“产品117”）是由俄罗斯土星科研设计局为PAK FA项目研制的加力式涡扇发动机，用于配装T-50原型机和首批批产战斗机。该发动机于2004年开始研制，2018年2月通过国家台架试验，2019年投入批量生产。AL-41F-1发动机实际是AL-31F发动机（配装苏-27战斗机）的深度改型，同时继承了大量AL-41F发动机（配装米格1.44战斗机）的先进研制经验，具有以下优点：推力增加，最大加力推力达147kN；寿命提高到4000h；主燃烧室和加力燃烧室采用等离子无氧点火系统，可在空中无补氧条件下起动；全新的全权限数字式电子控制（FADEC）系统，集成了目标控制系统，能保证对产品及其主要元件的控制、监控和自动诊断；多余度发动机控制系统，可在各种破坏因素影响下仍保持工作能力。

表1 美俄第五代战斗机主要参数

| 战斗机 | PAK FA | F-22 |
|------------------------|---------|-------------|
| 首飞时间/年 | 2010 | 1997 |
| 机组人数/人 | 1 | 1 |
| 机长/m | 19.4 | 18.9 |
| 机高/m | 4.8 | 5.09 |
| 翼展/m | 14 | 13.56 |
| 机翼面积/m ² | 82.0 | 78.04 |
| 空载质量/kg | 18500 | 19700 |
| 最大起飞质量/kg | 35480 | 38000 |
| 实际升限/m | 20000 | 20000 |
| 作战载荷/kg | 10000 | 10370 |
| 正面雷达截面积/m ² | 0.4 | 0.01 |
| 最大速度/(km/h) | 2610 | 2410 ~ 2570 |
| 最大巡航速度/(km/h) | 2135 | 1890 |
| 最大爬升率/(m/s) | 330 | 200 |
| 最大航程/km | 5500 | 2960 ~ 3330 |
| 续航时间/h | 5.8 | |
| 武器挂点/个 | 内挂10 | 内挂8 |
| | 外挂6 | 外挂4 |
| 最大过载(g) | 10 ~ 11 | 9 |

注：数据源自网络。



苏-57第一阶段动力AL-41F-1具备推力矢量控制能力

尽管通过一系列改进，AL-41F-1发动机的推力、寿命、可靠性都有所提高，初步满足了T-50作为第五代战斗机的性能需求，但相比美国F-22选用的F119-PW-100发动机所引领的第五代战斗机动力指标仍有显著差距。因此，被认为真正与苏-57相匹配的第五代发动机“产品30”一直在紧锣密鼓的研制中。

第二阶段动力装置“产品30”是一款全新研制的发动机，计划用于俄罗斯第五代战斗机苏-57的批产型号。该发动机由俄罗斯联合发动机制造集团（ODK）承制，旗下所有企业参与研发，土星科研设计局负责70%的主要工作。“产品30”发动机采用全新结构，大量使用新技术、新工艺和新材料。选用“产品30”的苏-57战斗机将具有更强大的飞行和作战能力，在不开加力条件下可以达到马赫数（ Ma ）1.5（超过1800km/h），实现超声速巡航，同时战斗机也将具备更好的机动性、隐

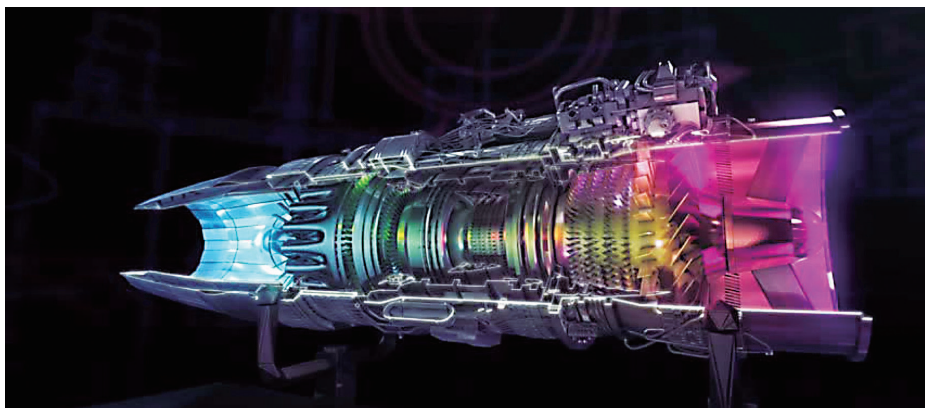
身性、经济性。不过“产品30”的研发和测试工作并不顺利，虽然预计将于2023—2025年配装苏-57战斗机，但至今仍然处于试验阶段，主要性能参数高度保密，只能从俄罗斯媒体报道中窥得一斑：最大推力为107.8kN，最大加力推力超过176.4kN，相比第一阶段发动机推力提高近20%；推力质量比达10：1以上；耗油率与AL-31F发动机相当，但推力指标增加；等离子点火系统，

可避免在起动过程中由于向燃烧室喷射过量燃料而导致喷管“喷火”，提高战斗机的红外和雷达隐身能力；FADEC系统和推力矢量控制的锯齿状喷管。

在分步走策略下，一方面，俄罗斯利用第五代发动机先进技术改进现有第四代发动机获得第一阶段动力，降低了研制风险、缩短了研发周期、迅速填补了飞机动力的迫切需求、推进了俄罗斯第五代战斗机项目的发展，还为俄罗斯第五代发动机的研制争取了时间；另一方面，第二阶段发动机迟迟未能研制成功，缺少真正第五代战斗机动力的苏-57在高机动性、高速性、高隐身性等方面大打折扣，无法真正立足于世界第五代先进战斗机行列。

事故频发

2011年8月，在莫斯科国际航展期间，编号052的T-50-02战斗机在跑道加速时右侧发动机喷管喷火，随后减速伞弹出，无人员伤亡。经过调查，事故原因判断为涡轮后压力传感器的压力管产生了微小裂纹，裂纹导致喷管调节装置无法保持涡轮压差，在接通四路加力总管时发动机过热，进而发生喘振。



AL-41F-1发动机的FADEC系统经改进后运用于苏-57战斗机第二阶段动力

表2 美俄第五代战斗机动力装置主要参数

| 动力装置 | F119-PW-100 | AL-41F-1 (产品117) | 产品30 |
|----------------|-------------|------------------|---------|
| 发动机结构 | 3+6+1+1 | 3+6+1+1 | 3+5+1+1 |
| 最大推力/kN | 115.6 | 86.24 | 107.8 |
| 最大加力推力/kN | 155.6 | 147 | 176.4 |
| 最大推力矢量偏转角度/(°) | ±20 | ±20 | — |
| 全向推力矢量位移/(°) | 无 | ±16 | — |

注：数据源自网络。

2014年6月，在俄罗斯莫斯科郊外茹科夫斯基城，编号055的飞机在降落后右侧进气道冒烟，随后局部着火。虽然无人员伤亡，但该次事故是自PAK FA项目开展以来造成试验飞机损伤最严重的一次，飞机在维修后继续开展试验。

2019年12月，一架苏-57战斗机出厂试飞时在俄罗斯阿穆尔河畔共青城北120km处坠毁，飞行员成功弹射并由一架米-8直升机及时救援，事故现场无人员伤亡。目前判断事故原因有两种可能：一是飞行过程中AL-41F-1发动机发生故障；二是操作失误。但具体原因尚未公布。

在俄罗斯官方资料公布的PAK FA项目3次事故中，从局部故障到整机坠毁，事故后果一次比一次严重，且在2019年12月坠毁的是首架批量生产的苏-57战斗机，该机本应在当年年底正式交付军方，坠机时执行的正是交付前的出厂试验任务。受该事故影响，首批苏-57战斗机向俄罗斯国防部的交付计划推迟，俄罗斯第五代战斗机的质量和安全性也受到各方质疑，苏-57战斗机海外市场僵局更加难以打破。

海外市场遇冷

苏-57战斗机作为全球第五代战斗机市场为数不多的成员之一，

在研制之初其海外市场一直被看好。印度、中国、土耳其、印尼等国家都被视作苏-57战斗机的潜在客户。

早在2010年，俄罗斯与印度就达成了俄-印第五代战斗机联合研制(FGFA)项目，即在T-50基础上研发适用于印度空军需求的第五代战斗机。但由于投入成本过高、项目进展缓慢且与需求偏差大等原因，印度于2018年宣布退出FGFA项目，并表示将重新审查该项目，或考虑在苏-57顺利装备俄罗斯空军后再行购买。

2019年，俄罗斯苏-57E(字母E代表出口型)战斗机亮相莫斯科国际航展，令人瞩目。尽管许多国家对苏-57E战斗机都流露出浓厚兴趣，且在航展前相关负责人就向媒体宣布苏-57E已取得出口合格证及相关出口许可文件，但截至2020年第一季度，苏-57尚未获得海外订单。

苏-57战斗机海外市场遇冷可以说是意料之外，却又在情理之中。就内因而言，首先，苏-57在西方认可的第五代战斗机核心能力之一的隐身性上优势并不突出；其次，第二阶段动力“产品30”迟迟未能研制成功、选用AL-41F-1发动机的苏-57性能被认为与第四代战斗机苏-35相差无

异；第三，坠机事件导致批量生产型号遭受质疑且交付计划推迟。以上种种一次次削弱了苏-57战斗机在海外市场的影响力和竞争力，试问一款尚未列装本国部队的战斗机怎么可能被国际市场认可？就外因而言，除西方施压外，为夺取空中优势，美国、俄罗斯、日本、法国等国已经开始了下一代战斗机的研制竞争，所涉及的人工智能、战斗机变形、发动机自适应、定向能武器等新技术、新概念使得第五代战斗机的光芒逐渐暗淡，且2020年年初国际石油价格暴跌、新冠肺炎疫情影响让全球经济遭受重创，海外军备市场必然也会受到影响。

结束语

俄罗斯第五代战斗机从PAK FA项目代号T-50到批量生产型号苏-57，历经政治、经济、技术上的重重考验，呼之欲出，但又经历重重困局。第二阶段动力是否能够研制成功？战斗机性能是否过硬？海外市场能否打破僵局？批产是否还有意义？种种质疑始终围绕着俄罗斯第五代战斗机苏-57，只能留给时间去检验和揭晓答案。

无论怎样，随着第六代战斗机研制热潮来袭，第五代战斗机的光环终将慢慢褪去。或许在未来，将预计的大批量调整为小批量生产，主要用于在海外回笼研制苏-57花费的资金、为下一代战斗机的研发提供经费支持，并在不断改进和完善系统与技术的同时，为六代机的研发储备技术，这可能也不失为办法之一。

航空动力

(钟滔，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机情报研究和科技俄语翻译工作)