

俄罗斯第五代军用航空发动机的演进

The Development of the Fifth Generation Military Aero Engine of Russia

■ 何谦 王巍巍/中国航发涡轮院

2017年12月5日，俄罗斯第五代军用航空发动机——30号机——配装苏-57进行了首飞（见图1）。自俄罗斯第五代战斗机立项以来，发动机一直是其研制过程中的一块短板。尽管30号机预计将于2020年才能量产，但此次首飞无疑是为苏-57，乃至整个俄罗斯航空工业注入了一剂“强心针”。追溯30号机的“前世今生”，或许可以为我国的航空发动机研制提供一些借鉴和参考。

俄罗斯第五代军用发动机的研制历史可以追溯到20世纪80年代的苏联时期。当时，留里卡设计局开始第五代军用发动机AL-41F的研制工作，目标是配装与美国第五代战斗机抗衡的多用途前线歼击机（MFI，即米格1.42）。由于苏联解体及相关研制目标的调整，米格1.42战斗机停止研制，AL-41F发动机的研制工作也被迫终止。进入21世纪，随着经济实力的逐步恢复，俄罗斯第五代战斗机的研发工作也重新提上了日程，在MFI的基础上，先后提出了轻型前线歼击机（LFS）、中型前线歼击机（SFI）、未来战术飞机（PAK FA）等多个新一代战斗机方案。俄罗斯发动机行业为了应对不同的需求，在停止AL-41F发动机研制后，又先后推出了117S（又称为AL-41F-1S）、117（又称为AL-41F-1）、30号机等型号发动机，以及其他多个竞争方案。

俄罗斯第五代发动机需求的变迁
需求牵引是发动机发展的驱动力，



图1 30号机(左侧发动机)配装苏-57试飞

俄罗斯新一代军用航空发动机的发展也不例外。俄罗斯第五代军用航空发动机的研制工作是第五代战斗机的研制需求紧密关联的。虽然苏联第五代军用战斗机的需求提出得很早，但受苏联解体、经济危机、军事战略调整等诸多因素的影响和制约，俄罗斯第五代战斗机的军事需求和发展战略不断发生变化，其研制工作一波三折，研发方案几经调整，导致第五代军用航空发动机的研制工作也是几经周折，总体方案甚至推力量级和重要的技术指标都进行了大幅调整。

军事抗衡需求

苏联为了抗衡美国的F-22战斗机，于1983年开始研制MFI，该战斗机由米高扬设计局研制。苏联解体后，俄罗斯开始一厢情愿地倒向西方，与西方军事抗衡的必要性似乎一夜之间就消失了。加上随之而来的经济危机，米格1.42研制进度大大拖延，最后被迫终止。米格1.42的技术参数与F-22比较接近，因此对发动机的要求很高。留里卡设计局研制的AL-41F发动机早年虽然被选中用于MFI，但发动机的研制工作随战斗机项目的终止而搁浅。

对标需求

在20世纪90年代初，美国开始研制第四代轻型战斗机JSF。作为传统的军事强国，俄罗斯于1996年宣布了歼击机-2000项目（LFS），需要推力为137~157kN的发动机。留里卡设计局为了满足LFS的技术需求，决定在AL-41F和AL-31F发动机基础上研制推力为137~147kN的新型发动机，该发动机的设计代号为117（见图2）。但是，由于俄罗斯在20世纪90年代遭遇经济危机，根本没有资金支持LFS的研制，对航空发动机的投资也少得可怜，这一时期LFS和117发动机的研制工作基本处于纸上谈兵阶段。

战术需求

随着经济形势和国际环境的变化，俄罗斯空军决定调整未来战斗机研制计划，不再一味跟随美国，而是着眼于国际局势，立足于本国实际。1998年俄罗斯提出了21世纪歼击机项目（SFI），也就是研发介于MFI和LFS之间的中型歼击机。SFI计划使用两台用于LFS的发动机。2000年6月，留里卡设计局研制的117发动机被选为SFI的发动机。

2000年年底，俄罗斯空军修改了SFI项目的技术要求，在此基础上于2001年4月提出了未来战术飞机项目，取代SFI。PAK FA的标准起飞重量约23t，最大达到30~32t，与F-22基本相当。2002年，苏霍伊设计局的T-50中标，被选定为PAK FA战斗机方案。2003年，在T-50战斗机的发动机选型竞标中，留里卡设计局的117发动机顺利中标。T-50将配装两台117发动机。

2004年12月，俄罗斯空军又宣布调整PAK FA的战术技术指标，并



图2 T-50第一阶段使用的117发动机

确定分两个阶段来达到目标。PAK FA第一阶段使用117发动机，飞机最大飞行速度从Ma 2.15调整为Ma 2.0；第二阶段计划采用推力为147~152kN的全新发动机，以保证飞机实现不加力超声速巡航和超机动性。

俄罗斯第五代军用航空发动机的研制历程

AL-41F发动机

在苏联时期确定的第五代战斗机米格1.42的牵引下，留里卡设计局于1981年在比较成熟的AL-31F发动机的基础上，开始研制内部设计代号为20号机的AL-41F发动机。

在为米格1.42进行发动机选型时，联盟航空发动机科研发生产联合体（SOUS）提供了R179-300发动机方案进行竞争。R179-300发动机的推力达196kN，推重比接近12。该发动机以用于雅克-141超声速垂直起降战斗机的R79V-300发动机为基础。但空军认为AL-41F发动机从进度上更有保证，还是选择了AL-41F发动机为动力。

AL-41F发动机共生产了26台，仅在苏联时期投入的经费就达到了

15亿美元。1987—1988年，AL-41F发动机在图-16和米格-25PD飞行试验台上进行了飞行试验。AL-41F发动机最大状态推力约117.6kN，加力推力接近175kN，按照俄罗斯标准计算，其推重比超过11（按照美国标准计算则为10左右）。

AL-41F发动机采用了3级风扇、7级压气机、全环形燃烧室、单级高压涡轮、单级低压涡轮、加力燃烧室和推力矢量喷管，AL-41F还在俄罗斯率先尝试采用全权限数字式电子控制（FADEC）系统，此外还大量采用了在当时较为先进的工艺和新材料。高压涡轮叶片采用了先进的增强冷却结构，涡轮前温度为1828K。有报道称，AL-41F还尝试采用了变循环技术。

尽管采用了一些创新设计思路，但总体而言，AL-41F发动机的研制是不成功的。首先是由于片面追求高指标，导致发动机的部件匹配、整机振动、压气机喘振、加力燃烧室振荡燃烧等诸多问题久拖未决，影响了进一步的研制工作。其次是尺寸过大，虽然其叶轮机级数比AL-31F减少了3级，但其尺寸明

显增加，这也是后来在苏-57上无法直接使用的主要原因。

117发动机

为了满足飞机的需求，尽快推出先进的航空发动机，俄罗斯的相关发动机设计局开始对现有的发动机进行持续改进。

留里卡设计局在1996年推出了117发动机项目，参加LFS项目竞标。战斗机项目由于缺乏资金没有开展实质性研发，但发动机却没有完全停止。2000年，117发动机进入了工程制造阶段。在吸取了AL-41F和AL-31F发动机的研制经验和教训后，117发动机的进展比较顺利，在2001年的莫斯科航空航天展览会上以AL-41F-1的名义首次进行了公开展示。

2003年，117发动机和SOUS研制的R145M-300发动机参加了PAK FA战斗机的动力装置竞标。得益于前期开展的一系列研制工作，有了较好的技术储备，技术更为成熟且风险较小，117发动机成功中标。

2003年，117发动机进入台架试验阶段。2005年，117开始在苏-27M飞行试验台上进行飞行试验。2007年，117发动机安装在苏-35飞机在莫斯科航展上进行了展示。2009年年底，装有两台117发动机的T-50开始试飞。

117发动机的研制是以AL-31F发动机为基础，采用了在AL-41F发动机上得到验证的部分技术，以降低研制风险和研制成本，缩短研制周期。117发动机的结构形式与AL-31F相同：4级风扇、9级高压压气机、环形燃烧室、单级高压涡轮和低压涡轮、加力燃烧室以及全向可偏转的矢量喷管。117发动机风扇直

径从AL-31F发动机的905mm增加到932mm；涡轮前温度比AL-31F的高90K。主燃烧室和加力燃烧室采用了等离子点火技术，高空点火时不需要补氧。117发动机在AL-31F发动机基础上有了脱胎换骨的变化，其80%的零部件为全新研制，推力增加了19.6kN达到142~147kN且重量下降了150kg，耗油率降低8%，发动机寿命大幅增加达到4000h。

117发动机目前有两个不同的型号：第一个是117S，即AL-41F-1S，推力为137~142kN，采用机械电子式控制系统，配装苏-35战斗机，并出口到国外；第二个是117，即AL-41F-1，推力为142~147kN，采用全权限数字式自动控制系统，并与飞控系统综合，用于苏-57战斗机第一阶段动力。

117发动机虽然采用了AL-41F部分技术，但它只能勉强称得上第五代军用发动机，或者“准五代”发动机。作为苏-57第一阶段动力，它不能保证战斗机实现持续的不加力超声速巡航，同时在雷达和红外

隐身方面考虑不够。这也促使俄罗斯军方下定决心，全新研制第五代军用航空发动机。

30号机

为了满足苏-57的全部性能指标要求，俄罗斯联合发动机公司(ODK)开始研制全新的第五代军用发动机，设计代号为30号机(见图3)，设计工作主要由其旗下的留里卡设计局承担，同时其旗下的乌法、土星、彼尔姆、礼炮等公司都参加了研制。

30号机方案设计工作于2011年开始；2013年发动机技术方案冻结；2014年开始了部分部件和核心机台架试验；2015年完成全部设计工作；2016年11月，30号机的验证机成功进行了首次试车；2017年12月5日，30号机配装苏-57成功首飞。首飞时，30号机安装在苏-57的左发位置，右发位置安装的还是117发动机，首飞持续时长约15min。

30号机是俄罗斯真正意义上的第五代发动机，在研制过程中采用了一系列先进技术。首先，高压压气机采用了新的气动设计和结构方



图3 礼炮机械制造厂内的30号机

案，其效率比上一代发动机高压压气机平均提高了4%，零件数减少了50%，增压比达到6.7。虽然技术先进，但制造成本并没有明显增加。高压涡轮叶片采用了先进的镍基高温合金材料和冷却结构，工作温度达到了1950 ~ 2100K；全向推力矢量喷管的调节片采用了锯齿状结构，以改善隐身性能。同时，为了减轻重量和提高寿命，部分冷端和热端部件也使用了复合材料。

30号机的基本结构为3级风扇、5级高压压气机、全环燃烧室、单级高压涡轮和低压涡轮、加力燃烧室、全向矢量喷管，全权限数字式电子控制系统，内置先进的故障诊断系统。根据发布的30号机首飞视频初步判断，其长度小于117发动机。

30号机的基本性能为：中间推力107 kN，加力推力达到176kN，耗油率和全生命周期成本均比第四代发动机大幅降低。按照留里卡设计局原总师契普金的说法，30号机的总体性能比第四代发动机提高了15% ~ 25%。

虽然30号机原型机完成了首飞，但该发动机后期还需要进行大量的试验、调试、改进等工作，其研制工作应该还有比较长的道路要走。根据俄罗斯空军计划，苏-57第二阶段战斗机在2025年左右开始交付部队。

俄罗斯第五代发动机研制的经验教训

如果从苏联时期研制AL-41F发动机开始算起，俄罗斯的第五代发动机研制工作已经持续了近40年时间。但到目前为止，俄罗斯真正的第五代发动机30号机只是刚刚完成了原

表1 AL-31F、AL-41F、117、30号机等发动机基本参数比较

| 发动机参数 | AL-31F | AL-41F | 117S | 117 | 30号机 |
|----------------|--------|----------|--------|-------------|-------------|
| 最大加力推力/kN | 120.13 | ≤ 176.40 | 137.20 | 142.10 | ≤ 176.40 |
| 中间推力/kN | 74.68 | ≤ 117.60 | 86.24 | 93.10 | ≤ 107.80 |
| 耗油率/(kg/(N·h)) | 0.0735 | — | — | — | — |
| 空气流量/(kg/s) | 112.0 | — | — | — | — |
| 涡轮进口温度/K | 1660 | 1828 | ≤ 1755 | ≤ 1755 | 1950~2100 |
| 涵道比 | 0.571 | — | — | — | — |
| 风扇直径/mm | 910 | — | 932 | 932 | — |
| 长度/mm | 4950 | — | 4990 | 4990 | — |
| 干质量/kg | 1530 | — | 1380 | 1380 | — |
| 装机对象 | 苏-27 | 米格 1.42 | 苏-35 | 苏-57 (第一阶段) | 苏-57 (第二阶段) |

型机首飞，其中的很多问题值得深思，也有很多经验值得借鉴。

需求牵引

航空发动机的发展与飞机的发展息息相关。飞机的需求牵引是发动机研发的驱动力，特别是有了明确的需求时，就好比给航空发动机研制注入了加速剂，使其发展更加迅猛。俄罗斯第五代航空发动机的研制一路坎坷，磕磕绊绊，虽然有其政治和经济发展的原因，但飞机需求的不确定性也是导致其未能及时推出有竞争力发动机的重要原因。因此，在航空发动机研制时，要充分重视飞机的需求牵引，要研究和掌握用户需求，预测其潜在的发展变化，并在发动机研制时及时贯彻。

动力先行

“动力先行”是一句老话，但决不能把它当作套话，而是要真正贯穿在航空发动机的自主研制中。动力先行，需要有全球视野，立足于对未来国防战略发展态势的预测分析，在了解了国际政治军事发展态势和飞机需求后，提前启动发动机的研制工作。俄罗斯新一代航空发动机研制方案多次更改与其对发展形式的预判不确定

有一定的关系。政治、经济和军事形势的变化不是一朝一夕就能完成的，是有其潜在变化特征信号的，航空发动机研制发展应当有发展的眼光，着眼于未来。

小核心、大协作

航空发动机是知识密集型产业，是一个国家综合实力的集中体现。研制一台先进的航空发动机需要举全国之力，实现全行业大协作。虽然俄罗斯有着丰富的航空发动机研制经验，但30号机的研制工作还是要发动全行业大协作才能顺利实施。30号机的研制采用了“小核心、大协作”的模式，设计工作主要由留里卡设计局承担，总装工作由乌法发动机制造厂承担，莫斯科礼炮机械制造厂承担压气机、燃烧室和喷管的研制，ODK公司旗下的彼尔姆发动机制造厂、克里莫夫机械制造厂等，以及俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）、全俄航空材料研究院（VIAM）等研究院所都参与其中。

航空动力

（何谦，中国航发涡轮院，高级工程师，主要从事科研管理工作。）