

# 制空作战飞机发动机发展历程及未来趋势

## Development and Future Trend of Air Superiority Fighter Engine

■ 晏武英 / 中国航发研究院

近年来,美国、英国、法国、德国、日本等国家纷纷宣布开始研制下一代战斗机发动机,预计到2040年左右将基本实现新一代战斗机动力换装,届时涡轮发动机在制空作战飞机上的使用将走过百年历程,未来发展趋势值得关注。

**制**空作战飞机又称空中优势战斗机,主要用途是对空作战夺取制空权,主要作战模式包括空中格斗和远程截击,部分还可以承担对地攻击任务。第二次世界大战(二战)之后,制空作战飞机基本以涡轮发动机作为主要动力,结合国内外战斗机和发动机的划代标准,至今已发展的制空作战飞机发动机可分为四代,其中前两代已基本退役,第三代成为各国空军的主力装备,第四代已经开始批量装备部队,是航空装备技术水平的重要标志之一。

### 第一代战斗机动力发展及特点

第一代战斗机是指1945年后研制的高亚声速战斗机,目前都已退出现役。这一时期,空军成为独立军种,航空力量成为大国发展的重点,同时伴随冷战开始,两大军事阵营为大规模常规战争做准备,拦截轰炸机成为空军重点任务。二战后第一批装备部队使用的喷气式战斗机是美国的F-80和苏联的米格-9,1947年出现了第一批后掠机翼的战斗机——美国的F-86和苏联的米格-15,飞行速度接近了声速。第一代战斗机逐步区分为以空战格斗为主的制空型战斗机和以截击敌方



配备J47涡喷发动机的F-86战斗机

轰炸机为主的截击机,同时兼具对地攻击任务;气动布局从初期的平直翼逐步过渡到以后掠翼为主,飞行速度为高亚声速,动力形式全面采用涡喷发动机取代活塞式发动机,主要采用机头进气,少数装备雷达的截击机采用了机身两侧、肋下进气或者布置在机翼中部的独立发动机舱。

德国和英国在二战中分别研制出了实用的涡喷发动机,并以此装备早期的喷气式战斗机投入战场。战后美国、苏联和法国通过购买专

利,以及借助从德国获得的资料 and 人员,也发展出本国第一代涡喷发动机。美国二战后的涡喷发动机研制以GE、西屋、艾利逊和普惠等公司为主,代表型号有J47和J48发动机。苏联则在德国涡喷发动机的基础上仿制了RD-10和RD-20,后来又在RD-45的基础上改进研制了VK-1和VK-1F加力式涡喷发动机,推力有了明显提升。英国二战后开始全面转向轴流式涡喷发动机,代表型号有罗罗公司的埃汶100/200系列和阿姆斯特朗·西德利公司的“蓝

宝石”(Sapphire)发动机,后者被美国莱特公司引进,命名为J65发动机。法国二战后开始在德国BMW 003喷气发动机基础上,改进和推出自己的阿塔发动机系列,成为法国早期的主力军用涡喷发动机。第一代战斗机发动机的主要特征包括以下几个方面。

### 结构形式

第一代战斗机发动机基本为单转子涡喷发动机,压气机形式为离心式和轴流式同时存在,多采用单管燃烧室,单级无冷却涡轮。后期型多数加装了加力燃烧室,显著增大了推力。

### 指标参数

总增压比在5:1左右,轴流式压气机平均级压比基本在1.2:1以下,级数达到12~13级;涡轮前温度为840~870℃。推力大多在30~50kN范围内,不加力耗油率为0.1kg/(N·h)左右,推重比为2~4:1之间,单位推力为500~900N/(kg/s)。

### 关键技术

这一代发动机主要是在早期型号基础上,通过放大流量、提高涡轮前温度、增加压气机级数、加装加力燃烧室等方法增加发动机推力。关键技术包括单级高压比离心压气机、多级轴流式压气机、环管型燃烧室、加力燃烧室等,开始采用可调进口导流叶片、级间放气等方法解决压气机失速、喘振问题,采用新型高温合金提高涡轮前温度。

### 研发模式

二战时期具有独立研发涡喷发动机能力的只有英国和德国,战后美国、苏联、法国服役的第一代战斗机发动机都是在英国和德国的早期型发动机基础上仿制和改进而来。

这一时期涡喷发动机的基本原理已经成熟,一般都是以直接研发产品或改进改型为目标,在研制过程中解决暴露的问题,在投入使用后仍需频繁改进。产品研制前一般都没有确定的装机对象,在用于战斗机的同时很多也用于轰炸机。

## 第二代战斗机动力发展及特点

第二代战斗机是指20世纪50年代中期到60年代末期服役的超声速战斗机,目前已全部停产并逐步退役。这一时期,冷战对抗升级,美国、苏联等国国防科研投入普遍增加,技术取得快速发展。同时,空军战略和战争模式的变化催生装备体系更新完善,美国此间先后研制了9种战斗机,一方面形成快速的型号更新换代以保持优势,另一方面也形成制空作战、防空截击分线发展。随着战斗机性能全面提升和国防采办改革,从20世纪60年代开始防空截击机开始与制空战斗机融合,具有良好多用途特性的装备成为发展重点,甚至实现军种通用。

第二代战斗机普遍向高空高速方向发展,最大速度达马赫数(Ma)2左右、有的甚至达到Ma3,实用升限超过18000m,机载电子设备和武器系统的性能均有较大的提高,装备了空空导弹,重型化倾向明显。第二代战斗机前期分为制空型战斗机和截击机分线发展,后期开始服役多用途战斗机;气动布局采用大后掠翼、三角翼及鸭式布局,采用面积率设计保障超声速性能,速度最高达到Ma3一级,主要采用机体两侧进气,发动机多采用机体内部或两侧肋下安装。

众多第二代战斗机得以问世,有赖于各国研制出一批适合Ma2以上飞机的涡喷发动机,例如,美国的J79、苏联的R-11、英国的埃汶300和法国的阿塔9C/K等,它们的推重比已达5~6:1,并加装了加力燃烧室,可以在短时间内大幅度提高推力。同时,涡扇发动机的出现为战斗机动力提供了新的选择,由于其不加力状态耗油率低和加力状态推力大,很适合于既要做长距离亚声速巡航又要做短时超声速冲



装配R11-300涡喷发动机的米格-21战斗机



刺的战斗机使用。因此，在20世纪60年代，英国、美国在民用涡扇发动机的基础上研制出斯贝MK202和TF30，分别用于英国从美国引进的F-4M/K战斗机、美国的F-111战斗轰炸机和F-14A舰载战斗机。第二代战斗机发动机的主要特征包括以下几个方面。

### 结构形式

第二代战斗机动力以轴流式涡喷发动机为主，结构上出现双转子，通过增加压气机级数、提高级压比和涡轮前温度提高了推力、降低了油耗。后期还应用了涡扇发动机，均为双转子结构。都采用了加力燃烧室。

### 指标参数

加力式涡喷发动机总压比提高到8~13:1,平均级压比为1.2:1左右,最高达到1.44:1,涡轮进口温度800~1100℃,最大推力接近120kN,推重比为3~6,单位推力最高达到1000N/(kg/s)左右,不加力耗油率下降到0.08~0.1kg/(N·h)。后期采用的涡扇发动机总压比进一步提高到16~22:1,涵道比在0.6~1.0:1,涡轮前温度提高到1200℃左右,耗油率下降到0.07kg/(N·h)以下,但平均级压比、最大推力、单位推力及推重比与涡喷发动机相当。

### 关键技术

这一代发动机所处的时期航空技术取得了大发展,在航空发动机领域出现了多项创新成果,战斗机发动机是其主要应用对象。双转子结构的出现大大提升了发动机的工作范围,使得总压比和工作稳定性大幅提高,推力和油耗得到显著改善;可调静子技术的应用解决了压气机失速问题,满足了高空高速飞行状态下的动力需求;气冷涡轮使

得涡轮前温度大幅提升,发动机推力和单位推力提高,使两倍声速飞行成为可能,并突破了Ma3一级高速涡轮发动机的研制,实现了基于涡喷发动机的变循环工作模式。

### 研发模式

第二代战斗机发动机由于需求膨胀快、机型更替频繁,因此在全新研发型号数量增加的同时,改进改型也逐渐增多。美国、法国、苏联都从仿制迅速过渡到自主研发,并大量研制货架产品供飞机选用,称为“武库法”。随着推力的提升和寿命的增加,研发成本和投入逐渐增加,研发周期逐步延长,美国开始探索建立通过预研计划促进核心机技术成熟,再在其基础上研发产品的模式。

这一阶段,英国、美国战斗机发动机通用性较强,初期部分发动机更是为满足战略轰炸机的需求而研发,多种战斗机发动机都同时用于轰炸机甚至衍生用于民用飞机。后期用于战斗机的涡扇发动机则大多由民用发动机衍生,涵道比较大,单位推力增长不明显,存在喘振裕度不够、工作稳定性差等问题,在战斗机上普遍表现出高速性能不佳。苏联的战斗机发动机则与轰炸机发动机的设计分开,保证了对战斗机特定需求的满足,但初期过于追求推重比,导致工作稳定性差,不得不增加压气机级数。法国则在压气机设计方面提升较慢,并长期坚持单转子结构,在性能指标和使用性能上存在差距,只有靠飞机良好的气动设计才能与其他国家保持相当。

## 第三代战斗机动力发展及

## 特点

第三代战斗机是指20世纪70年代到90年代服役的超声速战斗机,目前仍是各国空军的主力。这一时期冷战对抗缓和,各国空军建设以核威慑背景下的常规力量为主。同时,战争的考验推动了空战模式和飞机研发理念的变革,要求突出机动性能、全天候作战性能和远距发现目标能力。美国、苏联等国空军机队规模数量持续缩小,研制的型号数量也有所减少,但体系构成逐渐完善,主要采用重型制空战斗机和轻型多用途战斗机形成的高低搭配形式。英国、法国等欧洲国家则转向装备中型多用途战斗机,能够遂行制空、截击、对地对海攻击和侦察等多种任务。第三代战斗机大多采用中等后掠角梯形机翼或大后掠角鸭式布局、边条翼和翼身融合等高升力气动布局,放宽静稳定性和高推力涡扇发动机,实现低翼载、高推重比和高机动性。空战模式以超视距攻击为主,但近距离格斗能力同样出色。

为了满足第三代战斗机高机动性的要求,其发动机的推重比普遍达到8一级。自1974年美国普惠公司研制成功F100发动机以来,相继又有美国GE公司的F110、欧洲联合研制的RB199、苏联的RD-33和AL-31F、法国的M53和瑞典的RM12涡扇发动机投入使用,用于F-15、F-16、米格-29、苏-27、“狂风”和“幻影2000”以及JAS-39“鹰狮”等战斗机上,并在使用中不断改进可靠性、耐久性和性能。到20世纪90年代,欧洲推出了号称“三代半”战斗机的“台风”和“阵风”战斗机,分别采用了EJ200和M88发动机,结构更加简单,推重比更高。第三代战斗机发动机的



配装M88涡扇发动机的“阵风”战斗机

主要特征包括以下几个方面。

### 结构形式

第三代战斗机发动机均为轴流式加力涡扇发动机，结构上以双转子为主，少数采用单转子或三转子。由于气动设计水平的提高，在总压比增加的同时压气机级数明显减少，高、低压涡轮均为1~2级，采用加力燃烧室和可调收扩喷管。

### 指标参数

第三代战斗机发动机性能参数水平大幅提升，总压比普遍达到20以上，少数超过30，平均级压比达到1.3左右，涡轮进口温度为1300~1500℃之间，最大推力达到120~150kN，单位推力1000~1200N/(kg/s)，推重比普遍达到7:1以上，最高超过9:1，不加力耗油率下降到0.07kg/(N·h)左右。为了满足战斗机的高单位推力要求，涵道比逐渐缩小。同时发动机寿命大幅提升，后期型可达到4000h。

### 关键技术

这一代发动机最核心的要求是

满足战斗机高机动性的需求，重点是提高推重比和工作稳定性，因此采用了众多新技术，包括高效气动设计技术、高温升燃烧室、气冷涡轮、全权限数字式电子控制系统，并开始应用整体叶盘、单晶叶片、钛合金和复合材料等。

### 研发模式

第三代战斗机多为一机一发匹配，或在两型战斗机之间通用，发动机性能、寿命和可靠性逐渐提高，研发成本大幅增加，欧美国家普遍采用关键技术预研模式，在研制流程中设置技术成熟（验证机）阶段。由于使用需求论证相对明确和准确，发动机的功能和指标能够满足第三代战斗机在较长时间内的要求，加上研制流程的合理化也提高了技术的成熟度水平，因此这一代发动机的改进改型相比之前大幅减少。

这一代发动机大多是专门针对第三代战斗机的需求开展设计，突出高推重比、高单位推力和高工作稳定性，因此并不适用于其他类型飞机，通用性较差。而从轰炸机发动机

衍生而来的F110由于压比高、流量大而体现出了推力大、工作稳定性好、油耗低的特点，其核心机还衍生发展出了CFM56民用发动机，但从战斗机领域应用来说，该发动机并不适用于高速高机动的战斗机，美国空军也都是用在偏重对地攻击任务的F-16、F-15E以及出口型的F-15K/SG等多用途战斗机上，而以制空为主的F-15A/C系列基本都使用涵道比较小的F100发动机。欧洲研制的EF2000战斗机突出高速性能，因此EJ200的涵道比只有0.4，甚至可实现 $Ma1.4$ 的超声速巡航，而法国的“阵风”尽管是多用途战斗机，所用的M88发动机涵道比只有0.3，体现出更加注重单位推力等技术指标。

## 第四代战斗机动力发展及特点

第四代战斗机是指21世纪初开始服役的超声速战斗机。由于冷战结束，各国发展先进战斗机的紧迫性大幅降低，研制进度延长、采购数量减少，仅有美国的F-22和F-35投入服役，俄罗斯的苏-57刚刚开始交付。第四代战斗机研制初期以制空为主，后期突出多用途和经济可承受性，目标是大量替代第三代战斗机和攻击机。气动布局大多采用中等后掠角梯形机翼的正常式布局，采用隐身外形设计和矢量推力，在更低翼载、更高推重比和超高机动性的基础上进一步实现隐身、超声速巡航和短距起降能力。

第一种第四代战斗机发动机F119是由美国普惠公司研制的小涵道比双转子涡扇发动机。它吸取了F100发动机的经验，采用一体化产品研制方法研制，达到了性能、可靠性、耐久性、维修性和保障性的综合





配装F135发动机的F-35战斗机

平衡。在它的核心机基础上，普惠公司研制出F135发动机，用于F-35战斗机，常规起降型和舰载型基本相同，短距起飞/垂直降落型在主发动机基础上增加了齿轮传动升力风扇、三轴承转向喷管和控制喷管。

俄罗斯四代机的动力分为两个阶段：第一阶段动力117（AL-41F1）发动机是在AL-31F发动机基础上改进而来的双转子加力涡扇发动机，不能保证苏-57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。为了满足苏-57的全部性能指标要求，俄罗斯研制了全新的“产品30”发动机，其中间推力和加力推力大幅提高，耗油率和全生命周期成本大幅降低，计划于2025年左右开始交付部队。第四代战斗机发动机的主要特征包括以下几个方面。

### 结构形式

第四代战斗机发动机均为轴流式加力涡扇发动机，采用双转子结构，包括3级风扇、5~6级压气机、全环形高温升燃烧室，单级高压涡轮，低压涡轮1~2级，采用一体化加力燃烧室和推力矢量喷管。

### 指标参数

这一代发动机的循环参数更加适应高机动性作战的需求，涡轮前温度进一步提升至1600℃以上，涵道比保持在0.3~0.6:1，总压比保持在30:1以下，平均级压比提高到1.4:1以上，最大推力增加到150~190kN，单位推力超过1200N/(kg/s)，在满足隐身、超声速巡航、推力矢量、健康管理，以及热管理等新要求的情况下推重比保持与三代机动力相当的水平。

### 关键技术

这一代发动机压缩系统全面采用整体叶盘结构，钛合金、复合材料得到大量应用，一体化加力燃烧室、隐身结构和涂层、矢量喷管和双余度全权限数字式电子控制等技术大大提升了发动机性能和信号特征，可靠性、耐久性成倍增长，全生命周期费用降低25%~30%。

### 研发模式

这一代发动机数量更加稀少，美国在研制过程中同步开展了国家级军用航空发动机技术预研计划，因此型号研制的技术基础更加牢固，并及时引入了成熟技术，发动机的

性能、可靠性和经济可承受性大幅提高。F119发动机到目前为止还没有进行大的改进升级。在此基础上，美国利用其核心机发展出了F135发动机，突出了通用性和经济可承受性。俄罗斯则分为两步走，先用成熟的第三代战斗机发动机改进，满足苏-57第一阶段需求，同时研制全新的发动机作为第二阶段动力。

## 下一代战斗机动力发展趋势分析

美国一直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美国空军下一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。美国空军通过“自适应通用发动机技术”（ADVENT）、“自适应发动机技术发展”（AETD）和“自适应发动机转移项目”（AETP）推进下一代发动机技术成熟工作，而海军则通过“变循环先进技术”（VCAT）项目实现相关技术成果满足海军的应用需要。2019年2月，GE航空完成AETP项目XA100验证机详细设计，计划到2021年整台发动机整机试车，之后通过竞标进入工程研制阶段，2030年左右装备部队。

法国和德国在2018年6月宣布联合研制“未来作战航空系统”（FCAS/SCAF），其中的新型多用途战斗机计划2040年正式服役。法国赛峰集团和德国MTU航空发动机公司共同负责研发下一代动力系统，由赛峰负责研制热端部件及发动机集成，MTU负责研制冷端部件及维护、修理和大修（MRO）服务。为了满足FCAS的超声速巡航和长时间低速巡航的要求，发动机将

先进动力与推进系统

- 提升功率密度
- 智能、多电
- 综合电力与热管理
- 全嵌入式流线型安装

风扇技术	电力与热管理技术	下一代发动机技术	排气系统技术
<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 先进复合材料</li> <li>◎ 可控第三流道引气</li> <li>◎ 轻量化气动优化风扇</li> <li>◎ 耐温轻量化复合材料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 智能电力管理</li> <li>◎ 多电技术</li> <li>◎ 智能发动机控制</li> <li>◎ 全集成热管理系统</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 轻量化高温核心机</li> <li>◎ 高效燃烧系统</li> <li>◎ 高温涡轮系统</li> <li>◎ 先进材料与制造技术</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 先进材料</li> <li>◎ 高效加力系统</li> <li>◎ 先进喷管设计与集成</li> </ul>



“暴风”战斗机动力系统技术

具有变循环能力，涡轮前温度将达到2100℃左右。此外，该发动机将能匹配战斗机的隐身性能，并应用混合动力以管理飞机上的能源。该发动机验证机的研发工作将首先在M88发动机的基础上进行，赛峰集团将在2025年完成M88发动机改型，为首架FCAS验证机提供动力，并在2027年制造出发动机验证机。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，2040年开始交付。

英国2018年7月宣布将研制名为“暴风”的新一代战斗机，计划2025年开始验证机试飞，2035年交付。发动机由罗罗公司负责研发，将采用抗畸变风扇、嵌入式电起动机发电机、

先进复合材料和增材制造、全集成热管理系统，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。此外，英国皇家空军于2019年7月宣布授予罗罗公司一份为期两年的先进高马赫数推进系统设计、发展、分析和试验研究合同，评估高超声速与下一代飞机平台的关系，并研究如何将英国反应发动机公司“佩刀”发动机技术应用到当前的超声速涡轮发动机上，使其效率更高、包线更宽。

石川岛播磨重工（IHI）2018年6月向日本防卫装备厅交付了XF9-1发动机原型机，其结构形式与F119类似，但尺寸稍小。由于采用了第五代单晶等新材料，涡轮前温度达到1800℃，并在随后的试车中实现了不加力推力11t、加力推力15t的

预定指标。日本防卫装备厅还开展了小涵道比涡扇发动机变循环技术研究，并计划在XF9-1发动机上进行自适应循环技术验证。

可以看出，下一代战斗机发动机已经开始研制，计划于2030—2040年投入使用。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，但大多数都计划采用变循环或自适应技术。其中美国空军已经明确下一代战斗机采用自适应发动机，法国和德国也提出将应用变循环技术，日本也开始探索自适应发动机技术，只有英国尚未明确。此外，更高的涡轮前温度、更大的功率提取能力和更强的热管理能力将成为下一代战斗机发动机的共同特征。

结束语

制空作战飞机用涡轮发动机经过70多年的发展，从最初的不加力涡喷到正在研制的自适应发动机，无论从性能水平、核心技术以及特种功能等方面都逐步聚焦制空作战的需求，形成了相对独立的技术特征，其用途相对单一，同时却应用了涡轮发动机最先进的技术，需要最长的研制周期和最多的资源投入，是一个国家国防科技实力的集中体现。从当前航空动力技术的发展来看，在制空作战飞机上涡轮发动机的核心地位几十年内尚无法替代，未来将进一步扩大速度、高度范围，提升自适应和智能化水平，并成为前沿技术最先应用的平台，引领军用航空动力技术的发展方向。 **航空动力**

（晏武英，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机战略和情报研究）