



Part 01

理论篇

战机是直接用于作战或作战保障的飞机。战机是航空兵的主要作战装备，主要包括战斗机、战斗轰炸机、轰炸机、攻击机、电子战飞机、反潜机等。也有人把侦察机、预警机等列入作战飞机的范畴。



喷气式战斗机的分代标准是什么

战斗机是一种主要用于与其他飞机作战的军用飞机，具有体积小、飞行速度快、机动性强等特点，在现代战争中有着举足轻重的作用。20 世纪 40 年代后期，采用喷气式发动机的战斗机获得了较大发展，不断涌现出更新、更强的战斗机。国外大致将喷气式战斗机的发展分成了 5 代，具体分代标准如下所述。

第一代战斗机

第一代战斗机是指首批采用喷气式发动机的战斗机，其出现时间约为 1944—1953 年。第一代战斗机普遍采用后掠机翼，装有带加力燃烧室的涡轮喷气发动机。飞机的电子设备还非常简陋，主要是通信电台、高度表和无线电罗盘以及简单的敌我识别装置。武器装置以大口径航炮为主，后期型可以挂装第一代空对空导弹。飞机的火控系统为简单的光学—机电式瞄准具，后期安装了第一代雷达。第一代战斗机的飞行速度比螺旋桨飞机快，航程则受到发动机效率的影响而较短，发动机的寿命受到材料与设计的影响，也不如当时最好的活塞式发动机。第一代战斗机的典型代表有 F-80（美国）、F-86（美国）、米格-15（苏联）、米格-17（苏联）、“吸血鬼”（英国）、Me 262（德国）等。



美国 F-86 “佩刀” 战斗机

第二代战斗机

第二代战斗机主要是指 20 世纪 50 ~ 60 年代研制的战斗机。由于采用了许多新技术，第二代战斗机的作战能力有了大幅提高，开始使用导弹进行视距外攻击，雷达也作为标准配置用于确定敌方目标。新的飞机设计技术也层出不穷，如后掠翼、三角翼、变后掠翼以及按面积律设计的机身等，采用后掠翼的生产型战斗机飞行速度终于突破了音障。这一时期的一个重要特点是出现了战斗轰炸机和截击机。截击机的发展主要依赖于导弹能完全替代机炮、空战将在视距外进行的特点，因而截击机具有较大的载弹量和强大的雷达，牺牲了速度、爬升率等敏捷性。第二代战斗机的典型代表有 F-104（美国）、F-105（美国）、米格-21（苏联）、米格-23（苏联）、“幻影 III”（法国）等。



法国“幻影 III”战斗机

第三代战斗机

第三代战斗机主要是指 20 世纪 60 ~ 70 年代研制的战斗机。这个时期航空技术发展日趋成熟，战斗机作战能力的发展主要是通过引入性能更好的导弹、雷达和其他航电系统来获得。基于大量导弹的实战使用经验，设计人员重新肯定了近距离格斗在空战中的地位，机炮再次成为标配，而机动性也再次成为优先考虑的设计因素。航空技术发展在显著提高战斗机能力的同时，其研制和使用成本也显著增加。军方早先曾有各种专门用途的战斗机，如夜间战斗机、重型战斗机和攻击战斗机，面对



战斗机的成本暴涨，军方开始将战斗机的任务合并。第三代战斗机的典型代表有 F-4（美国）、F-111（美国）、米格-25（苏联）、苏-15（苏联）、“鹞”式（英国）等。



美国 F-111 “土豚” 战斗轰炸机

第四代战斗机

第四代战斗机主要是指 20 世纪 70 ~ 90 年代研制的战斗机。国际上常用的第四代战斗机标准为“4S”，即 Stealth（隐身）、Super cruise（超音速巡航）、Super maneuverable（超机动性）、Sensor（先进传感器）。除了多用途和精密航电的发展方向大致不变以外，第四代战斗机放弃对高速、高翼负荷的设计追求，转而扩展飞机在不同高度与速度下的运动性，运用新材料与技术开发的大推力涡扇发动机开始广泛运用于第四代战斗机，取代了过去的涡喷发动机。第四代战斗机的典型代表有 F-14（美国）、F-15（美国）、F-16（美国）、F/A-18（美国）、米格-29（苏联）、米格-31（苏联）、苏-27（苏联）、“狂风”（英国）、“幻影 2000”（法国）等。



小知识：

随着航空技术的快速发展，还可划分出一类第四代半战机。第四代半战斗机主要是现役的最新战斗机，其特点是气动技术没有任何新进展，而是随着 20 世纪 80 年代和 90 年代集成芯片和半导体技术的迅猛发展，航电和其他飞行电子系统进行了多项改进，并采用了有限的隐身构型。第四代半战斗机的典型代表有 F/A-18E/F（美国）、F-15E（美国）、米格-35（俄罗斯）、“台风”（欧洲）、JAS 39（瑞典）等。



苏联米格 -29 “支点” 战斗机

第五代战斗机

第五代战斗机是目前研制的最先进的一代战斗机，最大的特点就是低可探测性技术的全面运用，并具备高机动性、先进航电系统、高度集成计算机网络以及优异的战场态势感知能力。



俄罗斯苏 -57 战斗机



第六代战斗机的主要特征是什么

关于第六代战斗机的定位，航空界尚无统一的标准，公认的几大特性包括可变循环发动机、无人操作系统、海陆空电网一体化以及激光武器等。然而，这些技术尚在论证和研发阶段，目前没有任何国家将其应用在实战中。在这种背景下，十分注重先进军事技术研发的美国对第六代战斗机的研制自然备受关注。



美国空军现役第五代战斗机——F-22“猛禽”战斗机

早在 2015 年，为了研发一整套第六代战斗机系统，以便在 2030 年左右逐步取代第五代战斗机，确保美国空军在制空权方面的战术优势，美国空军和航空工业部门就已启动第六代战斗机的研制工作，其计划名称为“下一代空中优势”（Next Generation Air Dominance, NGAD）战斗机。通过梳理美国空军、美国国防部高级研究计划局等单位公开发布的信息，可以发现美国第六代战斗机有以下三种发展趋势。

第一，美国第六代战斗机的隐形性能将得到极大提高。大部分第六代战斗机研制方案均使用了高隐形的气动布局，其中最明显的就是飞机的飞翼式布局，沿用了 B-2 轰炸机的气动布局。飞翼布局的升阻比大、隐形性能好，B-2 轰炸机的研制成功就是充分的证明。同时，美国空军在材料隐形和等离子隐形等方面也做了大量实验，甚至有可能在未来实现第六代战斗机声光电磁等多领域隐形。基于这些条件，美国第六代战斗机极有可能全方位、全频谱隐形。如此高的隐形性能要求其实正契合了美国空军提出的“穿透性制空”的概念。



美国空军启动的第六代战斗机项目——NGAD 想象图

第二，美国第六代战斗机的发展还将体现在强大的新一代发动机上。为了研制性能优异的新一代发动机，美国不仅应用了研究已久的变循环发动机技术，还启动了适用于第六代战斗机的 **ADAPT** 计划。变循环自适应发动机通过改变某些发动机部件的参数，从而改善热力循环，可以达到飞机低油耗、大推力和隐形性能的目的。**ADAPT** 计划则引入了第三涵道结构，与仅具有核心机和涵道两种气流形式的传统涡扇发动机相比，带有三涵道的变循环发动机则有第三个外流道，能够满足发动机对冷却空气的需求，从而使战斗机能在巡航模式和作战模式之间切换，保证飞机本身定向能武器和其他武器系统等高功率系统的正常工作。



美国海军启动的第六代战斗机项目——F/A-XX 想象图



第三，美国第六代战斗机的发展表现出了智能化、信息化和无人化的趋势。相比于传统战斗机，美国第六代战斗机将会表现出更快的数据处理和分析能力，层次更深的信息集成能力，更高的智能化程度，就像一台可以飞行的超级计算机。在此基础上，无人僚机也得到了发展。利用人工智能技术，无人机本身的数据处理能力将会大幅增强。在美国空军的设想中，利用数据链子网技术将一架第六代战斗机与4~8架无人机/攻击机联结，就可形成一个战斗机组，第六代战斗机将与无人战斗机协同作战，无人战斗机负责中远距拦截，第六代战斗机则负责收网歼灭。

美国要求第六代战斗机必须具有“全球警戒、全球到达、全球力量”三大核心能力，以及在“空、天与网络电磁空间”三大“域”中具有作战能力和压倒性优势，并且明确“航空航天优势”将是美国空军21世纪首要核心竞争力，要求未来的战斗机必须在2030~2060年间的“空海一体战”环境中能与具有空中电子攻击能力、先进综合防空系统、无源探测设备、综合电子防御设备、定向能武器和网络电磁攻击能力的敌军进行空中对抗和作战。



欧洲国家启动的第六代战斗机项目——FCAS 想象图



高空高速战斗机为何不再受宠

20世纪50~70年代末，高空高速战斗机曾是战斗机的发展主流，当时要求战斗机的速度越快越好，并出现了以XF-103战斗机(美国)、米格-25“狐蝠”战斗机(苏联)、米格-31“捕狐犬”战斗机(苏联)等为代表的高空高速战斗机。但是自20

世纪 80 年代以来，航空专家和空军飞行员发现，战斗机并不是速度越快越好。中低空机动灵活性较高的第三代战斗机问世后，高空高速战斗机便迅速被取代。形成这种发展格局的原因大致有下述几种。



美国 XF-103 高空高速战斗机想象图

第一，高空高速战斗机的功能比较单一。当时，高空轰炸机是投射核武器的主要平台，高空侦察机则是战略侦察的重要手段，高空高速战斗机的主要任务就是有效拦截高空轰炸机和高空侦察机。在执行空中阻滞和近距空中支援方面，高空高速战斗机优势并不明显，还需要发展其他类型的战斗机兼顾执行相应的任务，装备的综合效益并不高。



米格-25“狐蝠”战斗机起飞

第二，高空高速战斗机的实战表现不佳。虽然航空强国大力发展高空高速战斗机，但此类战斗机的实战表现令人失望。美国先进的 F-105“雷公”战斗机和 F-4“鬼怪 II”战斗机的空战交换比不占上风；相反，苏联米格-17“壁画”战斗机表现抢眼。这固然有当时空战训练的问题，但已在很大程度上暴露出用打轰炸机的飞机去进行空中格斗，是高空高速战斗机力所不及的。



米格-31“捕狐犬”战斗机仰视图

第三，现代空战仍然以中空亚跨音速机动空战为主。英阿马岛战争、海湾战争和科索沃战争的空战表明，制空作战的主要打击目标还是战斗机，行动方法是空中寻歼、战斗空中巡逻和护航，空战高度多数在 6000 米以下，速度多在 0.8 ~ 1.3 马赫，在此范围内，高空高速战斗机难有作为。



美国 F-105“雷公”战斗机

在借鉴越南战争空战经验基础上发展起来的高机动性战斗机（如 F-16 “战隼” 战斗机、F-15 “鹰” 式战斗机、苏 -27 “侧卫” 战斗机），配备了先进的火控雷达、空对空和空对地突击武器，兼具制空和空对地作战能力，迅速取代了高空高速战斗机，成为战斗机发展的主流，高空高速战斗机很快便退出了历史舞台。

现役垂直起降战斗机很少的原因是什么

垂直起降战斗机一直是作战飞机领域的尖端产品。由于垂直起降战斗机对起降场地要求低、部署机动灵活，并且可以实现海、空军通用，所以曾是主要航空技术拥有国竞相发展的热门机种，但由于研制难度和研制成本过大，多个国家先后退出研制行列。迄今为止，包括美国、俄罗斯、德国、英国、法国在内的航空技术先进国家均在垂直起降战斗机领域有过研究，其中美国、俄罗斯、英国的垂直起降战斗机进入过量产阶段，德国、法国的垂直起降战斗机曾经进行过原型机飞行测试。



博物馆中的 Ba 349 垂直起降截击机

虽然垂直起降战斗机直到冷战期间才开始大放异彩，但早在二战末期就已经进入了相对实用化的发展阶段。1944 年盟军开始对德国进行大规模空袭之后，由于空军基地、战斗机和战斗机生产线损失殆尽，德国空军逐渐丧失了制空权。为此，德国开始研发火箭动力的 Ba 349 垂直起降截击机，准备将其部署于丛林隐蔽地带的临时基地中用以拦截盟军的轰炸机。该机起飞时必须将机身垂直于地面，以便火箭发动机能提供足够的推力，确保实现垂直起飞。因此，Ba 349 称不上是严格意义上的垂直起降战斗机，加上产量极少，对战局发展几乎没有产生影响。

二战后，Ba 349 的设计技术被美国人所继承。20 世纪 50 年代，按照美国海军的要求，洛克希德公司和康维尔公司分别研制了 XFY-1 和 XFV-1 两种垂直起降技术验证机。虽然两者布局不同，但都采用了涡桨动力加较大尺寸的螺旋桨，起飞时其机身与 Ba 349 一样需要垂直于地面。与 Ba 349 相比，XFY-1 和 XFV-1 的最大进步是除了采用更加可靠的涡桨发动机以外，就是实现了真正意义上的垂直起降。由于这种布局的飞机在起降时飞行员几乎看不到地面，操作难度和风险极大，因此美军最终并未选择这种布局实现垂直起降。

冷战时期，美国、西欧国家和苏联都曾经钟情于垂直起降战斗机的研发。20 世纪 50 年代，联邦德国航空企业提出了多种垂直起降战斗机方案，虽然这些方案各不相同，但一般都采用“可偏转发动机 + 专用升力发动机”的布局模式，其中 VJ-101 是技术上最为可行的方案，该机在试飞中表现优异。同一时期，美国也制定了类似于 VJ-101 的 XF-109 研发方案。然而由于这种动力系统所需发动机数量过多，不仅在操作上较为复杂、结构上安全冗余度较低，而且挤占了过多的机身空间造成燃油容量和载弹量低下。有鉴于此，联邦德国最终放弃了垂直起降战斗机的研发。



英国空军装备的“鹞”式垂直起降战斗机

相比之下，英国的“鹞”式和苏联的雅克 -38 战斗机要成功得多。两者都采用了偏转喷口设计技术（前者完全依赖偏转喷口，后者则保留了升力发动机），其结构复杂性相较以往的垂直起降战斗机被大大降低，而安全性却得到提升，这使“鹞”式至今仍然是包括美国在内的多个国家所采用的主力机型之一，雅克 -38 则是苏联海军装备苏 -33 “海侧卫”战斗机之前性能最好的舰载机。



博物馆中的雅克 -38 垂直起降战斗机

相对于美国、苏联、英国和德国的垂直起降战斗机方案，法国的垂直起降战斗机要保守得多。法国于 20 世纪 60 年代在“幻影 III”战斗机的基础上研制出垂直起降的“巴尔扎克”和“幻影 III V”技术验证机，这两种技术验证机并未更改“幻影 III”的气动布局，仅仅在机身内加装了 8 台劳斯莱斯 RB162-1 升力发动机，并将主发动机更换为 TF104 涡扇发动机。试验中，这两种技术验证机均表现良好，但由于两机先后在试飞中坠毁，法国最终取消了垂直起降战斗机的研发计划。与法国类似，苏联也曾苏 -11 截击机和米格 -23 战斗机上加装升力发动机以验证垂直起降技术，虽然这种方式风险小、成本低，但因各项性能较差，所以也都没有批量生产。

20 世纪 80 年代，研制垂直起降战斗机的国家进一步减少。这一时期除英国和苏联继续对“鹞”式和雅克 -38 进行改进之外，在垂直起降战斗机研究方面取得成果的国家只有美国，但其研制的 AV-8B“海鹞 II”垂直起降攻击机是与英国共同研发，并且是在“鹞”式的基础上改进而来的。1987 年，苏联研制的雅克 -141 超音速垂直起降战斗机试飞成功，但由于后续试飞工作不顺利及苏联解体的影响，雅克 -141 最终未能批量生产，其后续改进型雅克 -43 和雅克 -201 也被迫止步于方案设计阶段。20 世纪 90 年代后，英国和俄罗斯也退出了垂直起降战斗机研制国家的行列。至此，只剩下美国仍在继续研究和生产垂直起降战斗机，即 F-35“闪电 II”战斗机的垂直/短距起降版本（F-35B）。



AV-8B“海鹞Ⅱ”垂直起降攻击机在高空飞行



测试中的 F-35B“闪电Ⅱ”垂直起降战斗机

从技术角度而言，垂直起降战斗机可以认为是当今战术作战飞机方面技术含量最高的一种。除了常规起降作战飞机的必备技术以外，由于垂直起降涉及升力系统与平飞动力系统之间的操控转换、垂直起降时机体需承受高温燃气、发动机推力必须同时满足升力和平飞等特殊需求，其对于材料水准、发动机设计和操控系统都有极高的设计和制造要求，这也是半个多世纪以来研制垂直起降战斗机的国家越来越少的的原因。

军用飞机不使用核动力的原因是什么

核能是人类目前所能利用的能源中最具破坏力的能源，同时也是一种强大的动力源。在现代军队中，核动力航空母舰和核潜艇已经不是新鲜事物，美国、英国、法国和俄罗斯等国都拥有核动力舰艇。核能在可控的情况下进行缓慢释放，一台核反应堆可以持续数年甚至数十年提供巨大的能量。以美国“福特”级航空母舰为例，其满载排水量超过 10 万吨，却凭借 2 台 A1B 核反应堆取得了 30 节的最高航速，反应堆堆芯的使用寿命长达 50 年。

有鉴于此，许多人都会产生一个疑问：弹道导弹核潜艇和战略轰炸机都是重要的战略核力量，为什么前者可以采用核动力推进，后者却不可以？如果将核动力装置运用在战略轰炸机上，便可以让它在空中持续飞行上千小时，它的降落可能只是需要补充食物或弹药。如此一来，战略轰炸机将不再受航程的制约，岂不是拥有更强大的核威慑能力？事实上，核动力飞机其实算不上什么稀奇的技术，早在 20 世纪 50 年代，美国和苏联两国为保持战略威慑均尝试过以核燃料为动力的飞机，并期待该机携带核武器在空中长期飞行。



NB-36H 核动力飞机外形图

从 1946 年起，美国就启动了核动力飞机研制计划，直到 1950 年左右推出了核动力样机 NB-36H。该机是用 B-36H 轰炸机加载一个小型核反应堆后改造而成的，有两种驱动方式。第一种是混合动力方式，在陆地采用汽油动力起飞，而到空中巡航的时候才使用核动力。反应堆启动后，加热堆芯周围的液态金属，然后让高速气流与高温液态金属接触，将气流变成高温高压气体，经过导流，这些气体通向各个引擎的增压涡轮，最后喷出产生后推力。之所以不在起降时使用核动力，主要是为了减少核污染。因为高速气流通过堆芯的液体金属再排出，核污染比较严重。

第二种方式是空气不直接进入堆芯，而是使用热交换器加热空气。热交换器里面有水或者液态金属，它们循环流动，不断把热量从堆芯带出来，并加热从外面通过的空气，如此往复。从本质上来说，NB-36H 的两种驱动方式都是可行的，而之所以实验第二种方式，目的还是为了降低核辐射和污染。



NB-36H 核动力飞机在低空飞行

测试数据显示，NB-36H 可以在 740 千米/时的巡航速度下，飞行了 48300 千米，而现代喷气式客机的航程最远仅为 10000 多千米。在 NB-36H 的试验飞行过程中，美国获得了大量关于核辐射影响的数据。如何保护驾驶员不被长时间辐射？如何在飞机坠毁后避免核泄漏？这是 NB-36H 面临的两大难题。核动力航空母舰和核潜艇之所以比较容易实现，是因为它们天生就在海里，可以用取之不尽的海水来冷却堆芯，另外就是航空母舰和潜艇体积庞大，安装核反应堆后，还可以安装重达几十吨的保护罩，但是飞机就做不到这一点。

在美国研发核动力飞机的同时，苏联也没有闲着。1955年，苏联设立核动力飞机项目，并选用图-95M轰炸机作为核动力载机，1956年图-95LAL横空出世。在完成了大量地面测试后，该机于1961年5～8月完成了34次试验飞行，但核燃料仓只开启了5次。

由于核动力飞机的防辐射技术困难较大，再加上洲际弹道导弹与高效涡轮发动机技术的发展，降低了对核动力远程轰炸机的需求，美国和苏联相继中止了对核动力飞机研制。

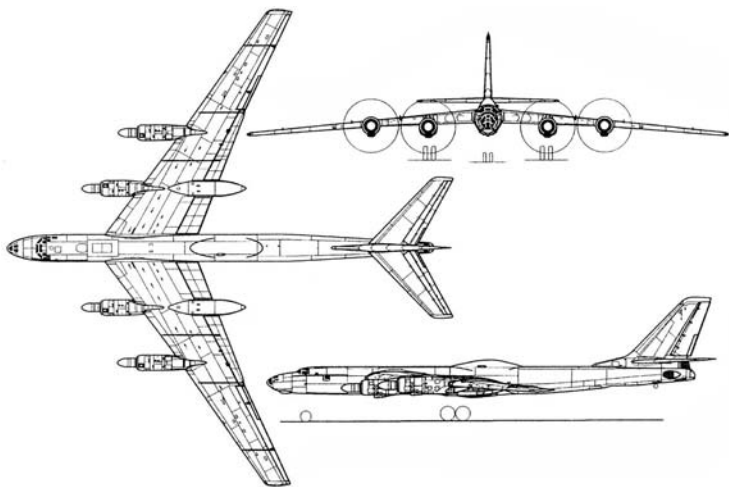


图-95LAL核动力飞机三视图



小知识：

NB-36H安装核反应堆试飞，测试核反应堆对驾驶员的辐射水平时，一般旁边还应跟随另一架飞机，上面满载士兵，就是为了万一NB-36H坠毁，能第一时间冲下去，封锁现场，避免周围民众受到核辐射。



战斗机发动机比轰炸机发动机更难制造的原因是什么

航空发动机素有“现代工业皇冠上的明珠”之称，是基础科学、技术的集大成者，难度和垄断一直是它的代名词。而在航空发动机中，战斗机发动机往往比轰炸机动机的制造难度更大。究其原因，主要是因为轰炸机和战斗机的作战任务不同所导致的。

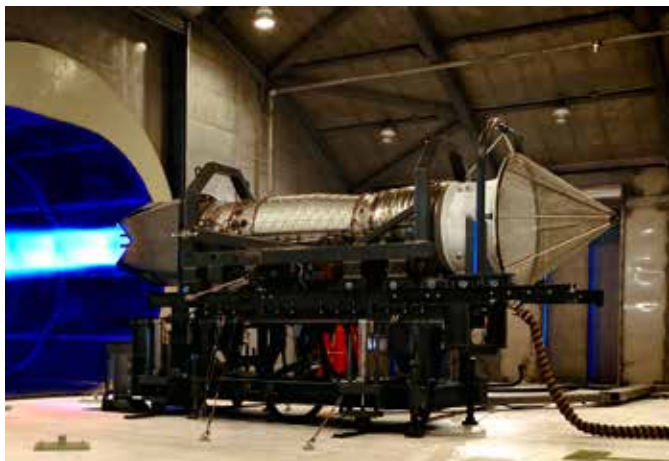


从某种意义上来说，轰炸机只是一种运输机，专门用来运输武器，对机动性要求较低，对航程要求较高；而战斗机是空战的直接参与者，对飞机的速度、机动性都有着极高的要求，战斗机的机动性甚至可以决定一场空战的胜负。

早期的喷气式战斗机使用的是涡喷发动机，这种发动机的特点是推力大，但非常耗油，所以那时候的喷气式飞机普遍航程较短。到后来才开发出更为省油而推力也能达到要求的涡扇发动机。



普惠 F-135 涡扇发动机



测试中的普惠 F-119 涡扇发动机

为了保证机动性和超音速飞行，战斗机一般使用小涵道比的涡扇发动机。涡扇发动机外涵道较小，比较接近涡喷发动机，可以提供更大的推力，保证战斗机的机动性。而且战斗机使用的小涵道比涡扇发动机还会在发动机后部加装加力燃烧室，以使核心机的燃烧温度达到一个很高的数值，对发动机叶片的材料以及制造工艺都有超高的要求，因此制造难度极大。

战斗机发动机可以说是最难制造的发动机，世界上拥有战斗机发动机制造能力的国家屈指可数。目前，世界上最先进的战斗机发动机是美国普惠公司研制的装备在 F-35 “闪电 II” 战斗机上的 F-135 涡扇发动机，该发动机是基于 F-22 “猛禽” 战斗机的 F-119 涡扇发动机的核心机和主要结构研制的新型发动机，推力超过 18 吨，推重比超过 10。为了进一步提升 F-135 发动机的性能，普惠公司又推出了 F-135 发动机的增推版，推力达到惊人的 23 吨，成为目前人类制造出的第一款单台推力超过 20 吨的战斗机发动机。



高速飞行的 F-35 “闪电 II” 战斗机

与战斗机相比，轰炸机不需要进行空中格斗，而是强调起飞重量和航程，所以现代轰炸机使用的多是大涵道比涡扇发动机。大涵道比涡扇发动机的特点是使用寿命长，经济省油，可以在搭载同等重量燃油的条件下使轰炸机获得更远的航程，从而达到战略轰炸的目的。由于轰炸机发动机取消了加力燃烧室，大大简化了发动机



结构，降低了对高温材料的性能要求，从而降低了研制难度和风险。此外，大涵道比发动机由于外涵道空气流量大，能够较快地冷却内机匣，延长发动机寿命，进一步降低对材料的性能要求，发动机制造工艺难度进一步降低。

现在也有少数轰炸机使用的是涡桨发动机，如俄罗斯图-95“熊”轰炸机。涡桨发动机也拥有类似于大涵道比涡扇发动机的特点，只不过涡桨发动机噪声极大，所以多用于不考虑任何用户体验的军用飞机。



俄罗斯图-95“熊”轰炸机仰视图

无论是大涵道比涡扇发动机还是涡桨发动机，其制造难度远不如小涵道比战斗机发动机。所以，轰炸机发动机的制造难度要低于战斗机发动机。当然，难易程度只是相对而言，即便是轰炸机发动机，也不是一般国家所能制造的。

变循环发动机与传统涡扇发动机相比有何优势

变循环发动机（Variable Cycle Engine，VCE）是指在一台发动机上，通过改变发动机一些部件的几何形状、体积或者位置，实现不同热力循环的燃气涡轮发动机。

从20世纪60年代开始，国外各大航空发动机公司均在不断地进行变循环发动

机概念、方案及相关技术的研究和验证，而对变循环发动机研究时间最为持久、程度最为深入，而取得较大成果的是以通用电气公司为代表的美国航空界。从 YJ101 开始，通用电气公司研制出一系列变循环验证机。其中，YF-120 变循环发动机参加了 F-22 “猛禽” 战斗机发动机选型，最终败给了普惠公司的 F-119 涡扇发动机。此后，通用电气公司和罗尔斯·罗伊斯公司联合研制出 YF-136 变循环发动机，并参加了 F-35 “闪电 II” 战斗机的发动机选型，再次败给了普惠公司的 F-135 涡扇发动机。虽然两次落败，但是通用电气公司仍然没有放弃变循环发动机的研究工作。一旦时机成熟，它将装备美军下一代战斗机。那么，变循环发动机与现役战斗机惯用的涡扇发动机相比究竟有何优势？

航空发动机技术提升的核心在于如何提高燃油使用效率。喷气式飞机的原理是将空气吸入发动机后和燃油混合加热，而后高温高压气体向后喷出，按照牛顿第三定律，飞机就可以获得一种反推力。但这种高温高压气体本身就拥有很大的能量，也就是说，这些能量被白白浪费掉了，但有时候为了机动性则不得不这样做。以往的飞机，往往是涡喷发动机就只能是涡喷模式工作，是涡扇发动机就只能是涡扇模式工作。在飞机航行的整个过程中，有很多路程并不需要使用这种高油耗率的工作方式。而在靠近战场时，为了接敌，往往需要高速机动。为了机动空战，则需要超音速飞行模式。变循环发动机就是把这三种模式结合起来，合理规划，获得了最佳的使用效果。



展览中的通用电气 YF-120 变循环发动机

一般来说，喷气式发动机结构从前往后依次是进气道、压气机、燃烧室、涡轮和喷口，运转过程分别是吸入空气、空气压缩增压、混合燃烧、推动涡轮旋转和尾部喷

气做功。变循环发动机采用涡轮风扇的基准模型，将气流分入3个涵道。其中，相对靠外的2个涵道中设有挡板，它们可以改变涵道直径，通过组合搭配构成不同的工作模式。例如经济巡航时，2个调节板向下调节，挡住两个涵道的气流，发动机此时为涡桨发动机模式；当需要超音速机动时，调节板1向下、调节板2向上，组成涡扇发动机；当需要超音速巡航时，调节板1、2均向上，使其成为一台涡喷发动机。

根据通用电气公司官网宣传资料，使用这一技术后，在同等燃油的条件下飞机的滞空时间可以提高50%，航程增加33%，减少25%的燃油消耗率，达到60%的燃油热吸收率。但是，变循环发动机技术看起来简单，但其实在工程上实现起来十分困难。发动机工作在高温高压和极高转速的情况下，最好不要有任何结构变换，否则会导致发动机部件的损伤，导致发动机出现安全问题。挡板的偏移也会带来气流的瞬时畸变，导致发动机工作不稳定甚至停车。

因此，从其工作模式上来看，变循环发动机对材料的耐高温性、强度和轻量化都有较高的要求，同时要求加工精度也较高，以更好地保证气流流动的平稳性，减少制造误差对核心机的扰动。



展览中的通用电气 YF-136 变循环发动机

单发战斗机与双发战斗机有何区别

按发动机数量不同，现代战斗机可以分为单发战斗机和双发战斗机两种。各国军方和民间一直都有两种战斗机孰优孰劣的争论，但并没有一个明确的结论。事实上，