

# 自适应多用途发动机与 变循环发动机

## Adaptive Versatile Engine and Variable Cycle Engine

西安航空动力股份有限公司 李 杰



李 杰  
高级工程师,西安航空动力股份有限公司动力国际分公司,从事外贸技术与管理工作。

2007年美国空军研究实验室开始“自适应多用途发动机技术”(ADVENT)项目,为此美国空军研究实验室的工程师们制定了一个为期5年的时间表,希望在2012年进行技术验证。以自适应通用发动机技术为基础的发动机可能到2014年开始研制,从而达到2017年时比2000年的基准发动机水平在经济可承受性方面提高10倍的目标。虽然受金融危机的影响美国空军放弃了许多

变循环/自适应发动机技术是新一代发动机可能会用到的技术,对现役和未来新研制的飞机都会带来性能上的大幅度提高。这项技术的发展更多的是要在总体、控制领域先开展工作,确定可行的变循环方案。

在研的项目,但至目前为止还没有美国空军放弃该项目的报道,但金融危机必然对其研制进度产生了一定的影响。

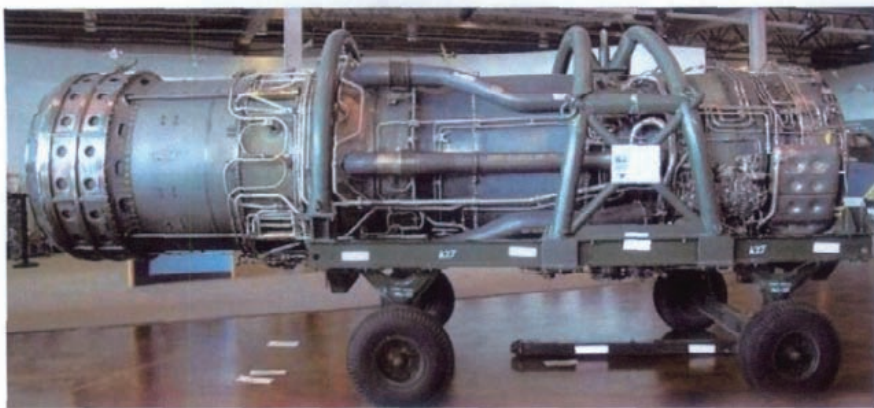
自适应多用途发动机技术项目源于美国空军正在实施的“通用经济可承受先进涡轮发动机计划”(VAATE),而VAATE计划是“综合高性能涡轮发动机技术”(IHPTET)的延续。该计划的重点放在整个推进系统和经济可承受性方面,锁定的目标是使发动机的性价比在12年内提高10倍。

自适应多用途发动机项目是VAATE计划中的典型项目,目标是发展在飞行包线内可以改变风扇、核心机流量和压比,从而优化发动机性能,这些自适应技术在发动机上的一种应用就是变循环发动机。

### 变循环发动机的发展

说起变循环发动机很容易让人想起洛克希德公司研制的赫赫有名的SR-71“黑鸟”系列高空高速战略侦察机,它是广大军迷朋友耳熟能详的传奇飞机设计师凯利·约翰逊的杰作,这种20世纪60年代初首飞的飞机直到今天仍然保持着一系列速度和平飞高度的纪录。而成就SR-71飞机的是其具有一颗强劲的心脏:普·惠公司研制的J58涡轮-冲压组合式变循环发动机,它是到目前为止唯一的一种投入生产的变循环发动机。SR-71“黑鸟”和其J58变循环发动机的成功绝对是一个工程上的奇迹。

可能是SR-71“黑鸟”和其J58涡轮-冲压组合式变循环发动机太



J58涡轮-冲压组合式变循环发动机

过超前,今天当人们谈论变循环发动机的研究时都说变循环发动机的研究起始于20世纪70年代初,殊不知,J58涡轮-冲压组合式变循环发动机的研制是从1956年开始的。

受到超声速客机和大飞行包线多任务战斗机需求的驱动,对于变循环发动机的研究早在20世纪60年代就开始了。1971年,NASA开始实施超声速巡航研究(SCR)计划,其目标是解决妨碍超声速巡航飞行概念被普遍接受和得到实际应用所存在的技术问题。SCR计划的头3年,推进系统承包商从上百个方案中优选出能够满足亚声速和超声速飞行相互矛盾要求的两种变循环发动机,即通用电气公司的双涵道发动机(DBE)和普·惠公司的变流路控制发动机(VSCE)。

1985年后,美国的VCE研究工作纳入NASA的“高速推进研究计划”(HSPR),DBE和VSCE两种方案继续得到发展。进入90年代后,美国、欧洲和日本又掀起研究超声速(M3)和高超声速客机推进系统的热潮,英国罗·罗公司提出可选择放气变循环发动机,法国SNECMA公司提出了中间风扇的MCV99变循环发动机方案。

1989年,日本开始着手为期10年的“超声速和高超声速推进系统研究计划”(HYPR),并于1999年完成,总投资约3亿美元。计划的目

标是为SST和HST的推进系统打下技术基础,通过研究和试验 $M_a=5$ 的组合发动机(CCE),验证了其可行性。CCE由变循环发动机(代号为HYPR-T)和以甲烷为燃料的冲压发动机组成,其中HYPR-T的方案与通用电气公司的DBE类似。1996年12月到1997年2月,HYPR-T发动机的模拟高空试验在通用电气公司的模拟高空试验台上进行,模拟的速度为 $M_a=3$ ,高度20700m。通过试验,成功地验证了发动机的适用性。

变循环发动机研究的另一个动力来自战斗机的需求。自20世纪60年代以来,战斗机一方面朝着多用途方向发展,另一方面飞机的飞行包线则不断扩大。变循环发动机正

好能满足这种多飞行状态的性能要求,特别是在20世纪70年代后,人们更加重视飞机机体/推进系统一体化设计,变循环发动机还能降低溢流和后体阻力,其优势更为明显。于是,对军用目的变循环发动机的研究逐步开展起来。

通用电气公司在这方面一直领先,从YJ101/VCE验证机(第一代变循环发动机)到GE21、GE33(XTE45,即后来的F120)和可控压比发动机(COPE)。F120是世界上第一种经飞行验证的变循环发动机。

艾利逊公司(目前的罗·罗美国公司)在20世纪70年代曾为美国海军的垂直和短距起落战斗机提出过包括变几何涡轮发动机在内的多种变循环发动机方案,在美国高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划的第一阶段中,它又成功地试验了XTC16/1A和1B变循环发动机核心机。进入第二阶段后,艾利逊公司便与通用电气公司联合研究变循环发动机。可控压比发动机(COPE)正由通用电气公司和艾利逊公司联合研究之中,后发展为自适应循环发动机(Adaptive Cycle Engine, ACE)。计划的成果将用于XTE76验证机、XTE77验证机和联合攻击战斗机



试验中的F136发动机

(JSF)的备选发动机。国外对变循环发动机的研究工作从20世纪60年代开始一直没有停止,并获得了许多研究成果。

## 变循环发动机原理及关键技术

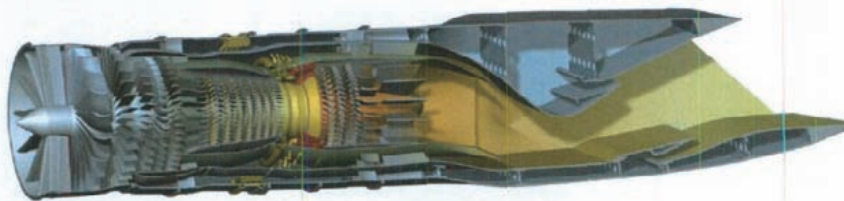
变循环发动机(Variable Cycle Engine, VCE)是一种通过改变发动机一些部件的几何形状、尺寸或位置来改变其热力循环的发动机。

改变发动机循环参数,如增压比、涡轮前温度、空气流量和涵道比,可使发动机在各种飞行和工作状态下都具有良好的性能。在涡喷/涡扇发动机方面,变循环发动机研究的重点是改变涵道比,如发动机在爬升、加速和超声速飞行时涵道比减小,接近涡喷发动机的性能,以增大推力;在起飞和亚声速飞行时,加大涵道比,以涡扇发动机状态工作,以降低耗油率和噪声。

变循环技术的潜力是巨大的,它不仅使发动机在整个飞行包线范围内有更好的操纵性,而且可以大大改善单位燃油消耗率。一些发动机公司和飞机公司的研究表明,变循环发动机可以使亚声速攻击机的航程和续航时间分别增加30%和70%,使超声速攻击机的航程和续航时间分别增加40%和80%。

变循环发动机是一种综合性能优秀的推进系统,它把涡喷发动机的超音速性能和涡扇发动机的亚音速性能综合到了一台发动机上,通过多部件的几何调节在较大范围内改变涵道比,实现了两种不同的热力循环和工作模式。

为适应多输入和多输出的情况,NASA主持并由GE公司发展了先进的多变量控制技术,它包括:改进控制器降阶的技术;简化的增益调度技术,它比常规方案要求的调度工作量少;一种积分器饱和防护技术,它用于检测反馈控制器输出和控制对



双外涵变循环发动机剖视图

象输入之间的差异,以调节或修正控制器的状态。

美国通用电气公司的F120变循环发动机是双外涵道发动机,通过实现涵道比的变化和对核心机流量的控制,完成发动机在涡轮风扇与涡轮喷气工作模式间的转换,从而使飞机在高速飞行/超声速巡航和高空亚声速/空战机动飞行时都能得到满足要求的性能。虽然作为变循环发动机的F120在第四代战斗机发动机的竞争中败给常规的F119,但仍作为替换发动机继续研制。变循环发动机仍是美国IHPTET计划的一项重要技术目标,在不断的发展,而且已经成功地得到了验证。一旦时机成熟,它将装备先进的军民两用飞机,发挥其应有的作用。

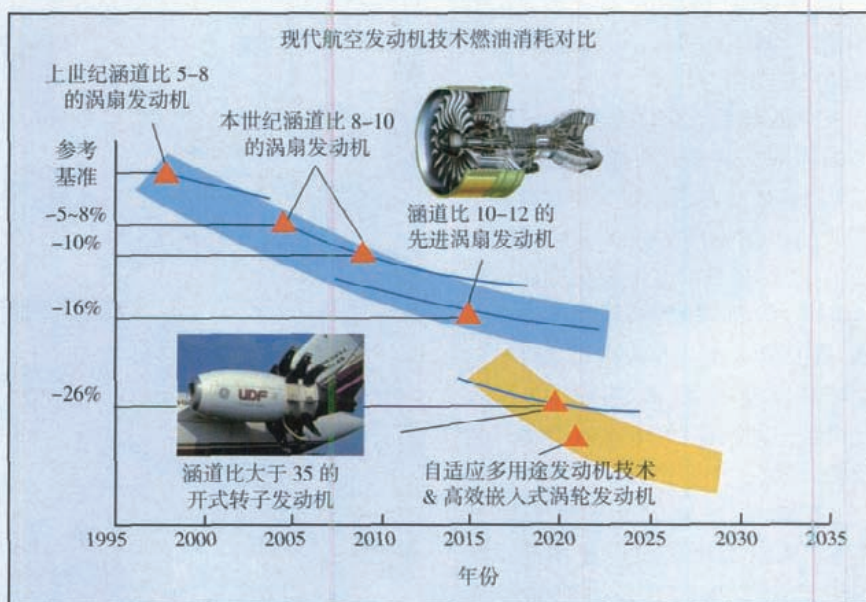
变循环发动机的关键技术包括:变循环发动机性能仿真、核心驱动风

扇级设计、可调涡轮导向器、面积可调涵道导向器、多变量控制系统、可调面积高压涡轮导向器、单级高负荷跨声速高压涡轮和双级无导叶对转低压涡轮等。

高负荷跨声速高压涡轮气动设计与双级无导叶对转低压涡轮的优化需要完美的多学科组合,包括气动、传热和结构动力学。从高压涡轮来的跨声速气流的强迫响应需要与低压涡轮的气动性能、冷却和结构响应综合考虑。从变循环发动机涡轮系统计划得到的数据将用来修正设计程序,使低压涡轮设计的重量轻、效率高、抗高周疲劳能力强。

## 变循环发动机的进一步发展

变循环的技术概念近年来内没有太大的变化,而自适应多用途发动



现代航空发动机技术燃油消耗对比图

机技术从本质上来讲就是由于传感器技术和全权限数字电子控制技术的成熟,使对发动机的控制比过去更简单和方便,工作点的控制更连续,容易实现对飞行阶段全过程的适应性控制与调节。采用变循环的发动机后,可以把由发动机技术水平和结构决定的潜能充分发挥出来,在各种需要的工作条件下提供比过去更强大的动力和更少的燃料消耗。变循环/自适应发动机技术是新一代发动机可能会用到的技术,对现役和未来新研制的飞机都会带来性能上的大幅度提高。

按照美国从事这项工作人员的说法,自适应多用途发动机技术项目的出现也是为了保持美国在发动机技术领域的优势地位。如果验证机取得成功,其意义如同由涡轮喷气发动机到涡轮风扇发动机的进步,会全面提升飞机的性能上一个台阶,是又一次重大的进步,具有里程碑意义。

### 启迪与思考

变循环/自适应技术可以有效解决同亚声速飞行和超声速飞行要求的固有矛盾,且有利于减小推进系统的安装损失,提高推进系统的性

能。高推重比、多用途、经济适用是航空发动机发展的必然趋势。

由于变循环/自适应发动机存在经济性好、工作范围宽等优势,因此无论是对高推重比发动机本身而言还是对多用途、飞行范围极大扩展等使用性能而言,变循环都是最佳的选择。应用变循环发动机是获得整个飞行包线范围内最优性能的必须途径,具有巨大的使用前景,也必将推动航空发动机技术向前发展。

变循环/自适应技术带来的进步类似于从涡喷发动机到涡扇发动机的巨大进步。变循环发动机的实现需要解决许多关键技术,如变循环发动机性能仿真、核心驱动风扇级设计、可调涡轮导向器、面积可调涵道引射器和多变量控制系统等。

从欧美变循环发动机的发展历程可以看到其技术研发的延续性和投入的连续性。不论研究的变循环发动机被应用与否,为了保持整个推进系统的先进性和经济可承受性,始终保持着对变循环发动机和自适应多用途发动机技术项目的投入。为此获得了众多研究成果和新技术储备。这样的新技术研发模式是很值得我们借鉴的。

随着航空器用途和任务模式的变化,以无人机或无人战斗机为例,单一型号的生产数量已很难达到足以支持为其研制一种新的基准发动机。而自适应通用发动机技术项目发动机的部件和技术可以满足不同飞机的需求,它既能满足单一任务飞机,又能适应不同任务的飞机。这种可以在多种飞机上分享的发动机技术,使应用一种核心发动机或基准发动机而衍生出系列发动机满足不同任务的飞机的需求,不但扩大了发动机的适用范围,也起到了降低整个研发成本的作用。

变循环/自适应技术与部件技术的关联不大,是另外一种性质的技术,也是与涡轮喷气向涡轮风扇工作模式演化相同。即使利用现在已经掌握的固定循环的发动机技术,也可以开展变循环和自适应发动机技术的研究和试验工作,并完全可以在预期的将来做出可用的产品。

掌握了变循环/自适应发动机技术,可以充分利用已掌握的发动机部件技术来提高发动机面对不同任务要求的能力,实现总体性能上的先进。这样同样部件技术水平的常规发动机与能够变循环工作的发动机相比,能力就不在一个水平线上了,可以将现有技术的潜力和效能最大化,明显提高了产品的性能量级。由于非设计点的减少,在对应的各个工作点上都可能比常规发动机提供更好的动力和更低的耗油率。

变循环/自适应发动机技术是新一代发动机可能会用到的技术,对现役和未来新研制的飞机都会带来性能上的大幅度提高。这项技术的发展更多的是要在总体、控制领域先开展工作,确定可行的变循环方案。

我国航空发动机要在更宽飞行范围内达到更高性能,必须创新思路和革新技术,而变循环/自适应发动机技术则是理想选择。

(责编 侧卫)



博物馆中的F120发动机