

核心机技术发展研究

Study on the Development of Core Engine Technology

■ 韩玉琪 董芃呈 王翔宇 / 中国航发研究院

20世纪60年代以来，美国空军通过核心机计划开展技术验证和提高技术成熟度，建立了丰富的经过验证的核心机关键技术储备，此后投入使用的先进航空发动机均为这一技术途径的产物。

由高压压气机、燃烧室和高压涡轮组成的发动机核心机(如图1线框内所示)，包括了推进系统中温度最高、压力最大、转速最高的组件，其成本和周期在发动机研制中占比重大，是发动机研制主要难点和关键技术最集中的部分。据统计，发动机研制过程中发生的80%以上的技术问题都与核心机密切相关。

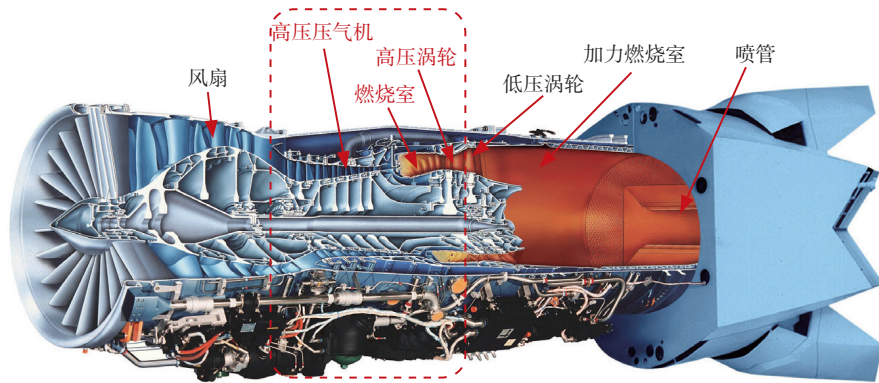


图1 美国F119发动机的核心机

核心机研究的起源

20世纪50年代后期，受“要导弹不要飞机”发展思路的影响，美国航空发动机技术的研究和发展缩减到了最小规模，技术水平和发展速度也落后于苏联。同时，飞机对发动机的需求也更具有针对性，特别是加力涡扇发动机的出现，使发动机各部件之间的匹配问题变得更加突出。在研究经费大幅减少的情况下，为降低发动机型号研制中的技术风险，确保发动机研制成功，美国在航空发动机技术的发展中增加了一个预先发展阶段，即在将研究成果用于型号研制以前，尽可能在接近发动机真实工作状态下进行试验和验证。

1959年，美国空军航空推进实验室（后并入美国空军研究实验室）

正式向国防部提出了优先发展包括高压压气机、燃烧室和高压涡轮3大关键部件的燃气发生器（核心机）的想法，对应用研究中发展的3大部件技术进行验证，并开始实施轻型燃气发生器（LWGG）计划。1963年，LWGG计划取得初步成功，美国国防部开始拨专款予以支持，并将其更名为先进涡轮发动机燃气发生器(ATEGG)计划。该计划利用应用研究中获得的先进部件组成核心机，并在真实环境状态下考核这些部件和核心机的性能。

为与ATEGG计划相配合，美国空军在1967年开始实施飞机推进分系统综合（APSI）计划，目的是发展低压系统部件技术，如进气道、风扇、低压涡轮、加力燃烧室、喷

管和调节系统等。利用APSI计划发展核心机以外的部件和系统技术，是美国航空发动机技术发展中不可或缺的一个环节，这一途径也一直沿用至今。20世纪70年代，为集成验证ATEGG计划和APSI计划的研究成果，美国开始实施联合技术验证机（JTDE）计划，将上述两项计划的研究成果综合起来，组成一台可工作的发动机，并验证所需的先进技术。

验证核心机的发展历程

ATEGG计划由空军推进实验室管理，年度经费平均为3000万~4000万美元。ATEGG计划是一个持续发展的计划，在1988年以后作为综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）

表1 美国主要的验证核心机发展情况

代次	GE航空集团		普惠公司	
	验证核心机	验证发动机	验证核心机	验证发动机
第1代	X370	GE1	STF200的核心机	STF200
第2代	GE14的核心机	GE14	JTF22的核心机	JTF22
第3代	GE23的核心机	GE23	PW685	PW690
第4代	GE29的核心机	GE29	PW699的核心机	PW699
第5代	XTC-45	GE37 (XTE-45)	XTC-65	XTE-65
第6代	XTC-76	XTE-76	XTC-66	XTE-66
第7代	XTC-77	XTE-77	XTC-67	XTE-67
第8代	VAATE 第1阶段			
第9代	VAATE 第2阶段			
第10代	VAATE 第3阶段			

计划的子计划继续实施。在随后的VAATE计划中,通用核心机(MACE)成为重点研究的3大技术领域之一,分别是通用核心机、智能发动机、耐久性。截至目前,美国已形成了10代验证核心机(见表1),每一代技术验证核心机都在前代基础上改进发展,具有连续性和继承性。

通过长期的摸索,在核心机验证技术的基础上,美国得出了航空发动机技术“基础研究—部件—核心机—技术验证机—工程验证机—原型机”的发展途径和规律。通过核心机和技术验证机,使发动机部件和系统技术在用于型号研制之前就在真实的发动机环境中得到验证,充分暴露问题。通过不断改进,核心机和验证机不仅是先进技术的验证平台,也是型号发展的基础,同时还发挥了筛选技术的重要作用。

从美国核心机发展的历程可以看出,采用成熟核心机衍生发展发动机产品的主要优点包括:一是原核心机的可靠性、耐久性和维修性得到继承和提高;二是大量成熟技

术得到继承,创新的相对较少,技术台阶低,研制难度小,可节省研制经费、缩短研制周期、降低研制风险;三是创新的先进技术提前在发动机产品中得到验证和成熟度提升,降低了下一代全新研制产品的风险和费用;四是对军民用户的不同任务需求做出快速反应,迅速形成产品,例如,GE航空集团的民用发动机CF34-10的研制周期仅为24个月。

核心机衍生发展发动机产品 核心机衍生发展发动机产品的 理论基础

从理论上来说,没有统一的发动机类型或固定的工作过程参数组合能以最佳方式适用于不同用途的飞机。针对不同的用途设计涡扇发动机时,在设计点上可以独立地选取发动机的工作过程参数,来综合平衡单位推力和耗油率的需求,具体的考虑主要有以下几条:一是在涡轮叶片材料水平、冷却技术和期望寿命的综合考量下,选取尽可能高的涡轮前总温,以提高单位推力

和循环热效率;二是总增压比的选取主要考虑单位推力和耗油率的比例分配,在最佳增压比附近对应较大的单位推力,选取比最佳增压比更大一些的增压比则可降低耗油率;三是混合排气涡扇发动机有内、外涵道气流总压在混合室进口近似相等的条件限制,要获得大的单位推力,就必须要有较高的风扇压比,同时,在给定的压气机压比和涡轮前总温情况下,风扇的高压比则导致低涵道比;四是分别排气涡扇发动机有内、外涵喷管出口速度近似相等的条件限制,为了追求经济性,涡轮前总温、高压气机增压比使发动机具有较高的循环热效率,高涵道比使推进效率较大,同时高涵道比使得风扇压比的最佳值减小。

全新研制涡扇发动机时,在完成高压压气机、燃烧室、高压涡轮部件预研后,集成为核心机开展迭代试验,一般需要2~3年,以评定性能稳定性和构件的结构完整性,解决部件之间的匹配问题,验证内容包括:高压压气机喘振裕度、效率、出口流场及与燃烧室的相容性;燃烧室的温度场、热点温度对高压涡轮的影响;高压涡轮效率、冷却效果、涡轮前温度等;3大部件的材料特性、新工艺、部件使用寿命也可以根据需要在核心机上考核。此外,考虑到后续衍生系列发展的需求,核心机应有一定的高压压气机性能储备、燃气温度储备、转速储备,以及可供传输大功率和大扭矩的低压轴穿过的几何储备。

基于成熟的核心机,可采用匹配不同低压部件的方式来衍生发展发动机产品,具体包括:对于混合排气涡扇发动机,可采用混合室的

进口内、外涵道气流总压近似相等为风扇压比、涵道比是否合适的判定准则，并同时确保推力满足衍生需求；对于分排涡扇发动机，可采用内、外涵喷管出口速度近似相等为风扇压比、涵道比是否合适的判定准则，并同时确保推力满足衍生需求。

核心机衍生发展发动机产品的主要方式

ATEGG计划最初的目的是在研究经费不足的情况下，重点开发验证核心机。随着该计划的发展，美国20世纪70年代后投入使用的先进航空发动机都是这一技术途径的产物，例如，F119基于XTC-65核心机，F100基于JTF-22的核心机。在产品研发中，可采用在核心机平台上验证过的新技术来改进已有型号，满足新的需求；也可选择合适的验证核心机平台研制型号核心机，进而衍生发展系列发动机，满足广泛的动力需求。核心机衍生发展发动机产品的主要方式有以下几种。

一是核心机不动，改低压部件。例如，F101发动机与F110-GE-100发动机。F110-GE-100发动机的风

扇是F404发动机风扇的比例放大；核心机与F101发动机的基本相同，为了适应直径减小的风扇流路，少量改动了高压压气机静子的作动系统、放气系统、燃油管路和燃烧室机匣的后部构件；低压涡轮以F101发动机的低压涡轮为基础重新设计；加力燃烧室是F101发动机燃烧室的缩小型，喷管基于F101和F404发动机的喷管改型。

二是改变流道件或者改变高压轴转速。例如，F110-GE-100发动机与F110-GE-129发动机。F110-GE-129发动机继承了F110-GE-100发动机81%的零部件；使用新材料，提高了涡轮进口温度和转子速度，增大了涡轮压力；采用改进性能的全权限数字式电子控制（FADEC）系统，代替了模拟式电子控制器和机械-液压式控制器。

三是核心机加减级。增加级数的如F100-PW-220发动机与F100-PW-229发动机，将9级高压压气机的前4级改成5级，增大了流量。减少级数的如GE90-76B发动机与GE90-90B发动机，GE90-90B发动机按照三维气动力技术设计高压压

气机叶片，并取消了第10级，总级数减少为9级。

四是核心机按比例缩放。例如，英国罗罗公司的遛达800发动机与遛达900发动机。遛达900发动机高压压气机是遛达800按90%比例的缩小型；遛达900高压涡轮几何尺寸基本与遛达800相同，高压涡轮的转速比遛达800高。

核心机衍生发展发动机产品的典型代表

GE航空集团将经过充分考验和鉴定的F101发动机作为通用核心机，改型研制了多型发动机（如图2所示），F110发动机配装F-15和F-16飞机使用，发展了F118发动机配装B-2远程轰炸机，改进改型发展了CFM56发动机。其中，CFM56发动机是民用航空发动机界的传奇，迄今为止累计交付超过30000台，累计飞行超过10亿h，自1979年取得适航证以来，共衍生发展出CFM56-2、CFM56-3、CFM56-5、CFM56-7等4个系列、20多个改型，推力范围为82.3 ~ 151.2kN。

结束语

美国军工领域有句口头禅：“今天的研究是明天的技术，明天的技术就是后天的产品。”这句话在核心机的发展及作用上得到了充分的体现。核心机的最初目的是为了验证技术，提高技术成熟度，但随着该计划的发展，美国20世纪70年代后投入使用的先进航空发动机都是这一技术途径的产物，可以说衍生发展发动机产品是其水到渠成的结果。

航空动力

（韩玉琪，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机综合技术论证）

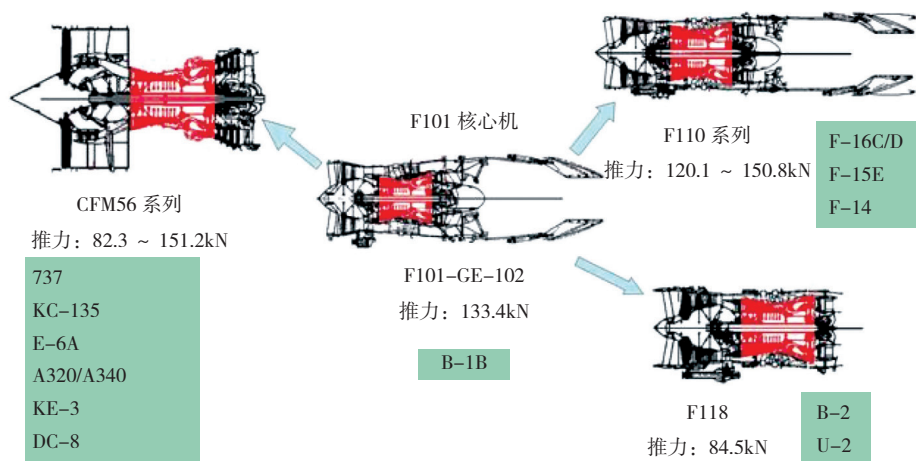


图2 F101核心机的衍生系列化发展