

首台 XA100 自适应循环发动机完成测试

First XA100 Adaptive Cycle Engine Completes Test

■ 谭米 / 中国航发研究院

2021年5月13日，GE航空集团宣布首台XA100自适应循环发动机已经完成测试，试验结果与预测的一致，表明XA100具备为美国新一代战斗机提供变循环推进的能力。

自2020年12月22日起，GE航空集团开始在位于俄亥俄州埃文代尔的高空测试台对XA100自适应循环发动机进行测试，一直持续到2021年3月下旬，所有的测试目标都已达到，并实现了美国空军自适应发动机转化（AETP）项目的相关指标。GE航空集团还演示验证了发动机的高推力和高效率两种不同模式，以及在这两种模式之间的无缝转换，此项核心能力将在最大程度上满足战斗机在不同飞行状态下的推力和效率需求。对此，GE航空集团表示首台XA100的测试结果超出了预期^[1]。

配备XA100发动机的战斗机的留空时间可增加50%，航程将增加35%，燃油效率提高25%，推力增加10%。XA100测试的另一个关键目标是利用第三涵道提升热管理能力。测试结果表明，XA100的热吸收能力提高了60%，热管理可以使任务系统的能力增强一倍。除总体性能外，验证机的测试还重点关注电源管理系统的可操作性，以及发动机在不同模式之间自动转换的能力。

目前，GE航空集团正在进行第二台XA100验证机的组装工作，该验证机将在美国空军阿诺德工程发

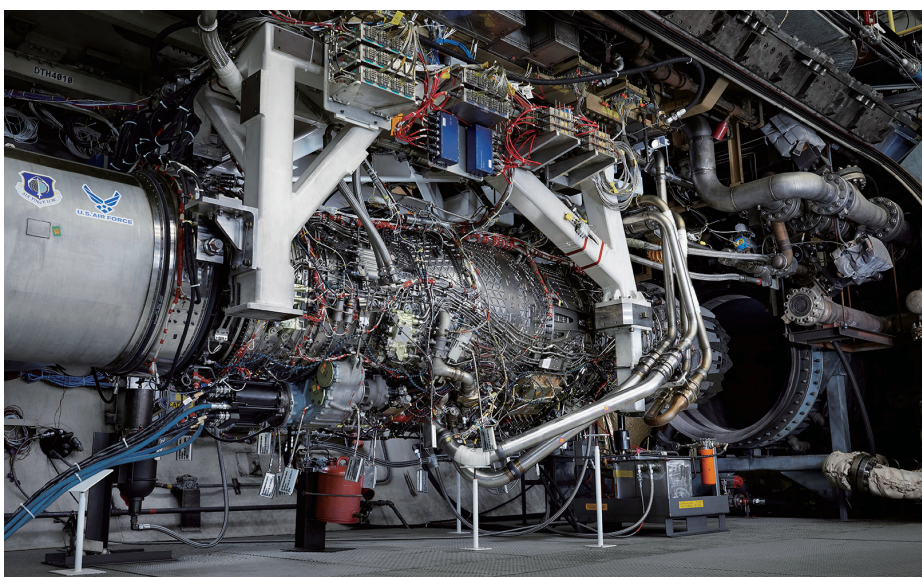


图1 GE航空集团对XA100进行测试

展中心（AEDC）进行测试。相比第一台验证机，第二台验证机的更改之处仅限于控制仪表、软件和控制组件，发动机的硬件则与第一台是相同的。

XA100发动机的技术创新

XA100-GE-100发动机结合了三项关键创新：一是发动机自适应变循环结构，既可以提供高推力模式以实现最大推力，也可以提供高效率模式以实现最佳的燃油经济性和留空时间，并具备在不同模式之间自动转换的能力；二是三涵道结构，

为发动机热管理能力获得质的提升提供了保障；三是广泛采用先进的部件技术，包括陶瓷基复合材料（CMC）、聚合物基复合材料（PMC）和增材制造技术。

变循环关键技术

变循环发动机的相关研究起步于20世纪70年代，经过40余年的积累已逐步形成多样化方案，促进了变循环发动机的技术发展。表1汇总了GE航空集团变循环发动机方案的相关专利^[2]，从中可以看出变循环发动机关键部件包括核心机驱动风扇（CDFS）、风扇叶尖风扇（Flade）、

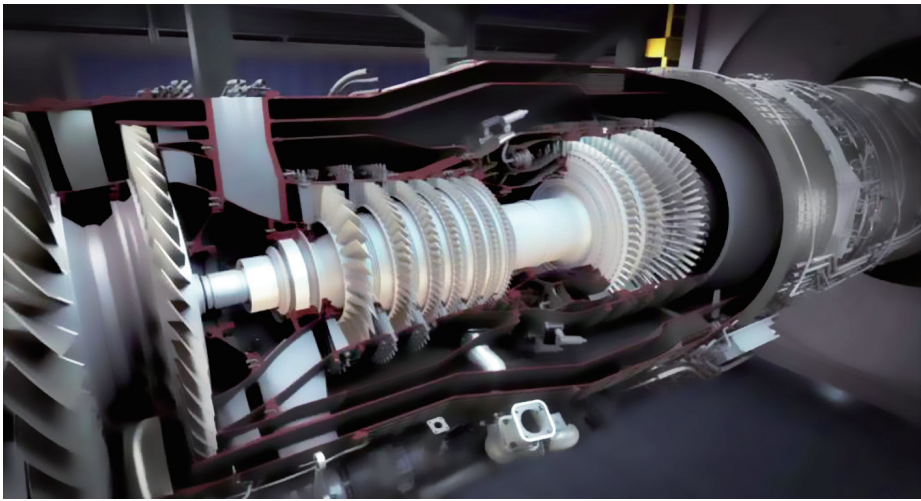


图2 XA100验证机结构示意图

涡轮叶尖风扇、辅助涡轮系统、外涵道燃烧室、中压涡轮导叶等。关键部件方案类型多、分布广，从低压系统（如Flade）到高压系统（如CDFS），从压缩部件（如可变风扇系统）、涡轮（如辅助涡轮系统）到燃烧室（如外涵道燃烧室），遍布发动机整机范围。

三涵道结构

三涵道是实现自适应循环的关键。常规涡扇发动机内外涵道的涵道比是固定的，而变循环发动机的外涵道的流量由阀门控制，涵道比可变。在三涵道结构中，内涵道和第二涵道可以看作是传统的涡扇发动机或双外涵道变循环发动机，第三涵道的气流不进入核心机，不影响发动机的正常工作。通过调整发动机进口流量大小，改变进气道的出口背压，控制进气道内激波的位置，实现可调进气道的功能。

第三涵道通过抽吸拉动边界层，在相当程度上可以解决边界层分离问题。此外，第三涵道气流增压较小，温度较低而流量充足，可以直接用于冷却，或者通过换热器使压

气机气流降温后用于冷却。隐身飞机不容许机体上任意开口以增加散热，现有的用燃油作为冷源的方法限制了最低燃油容量，第三涵道气流是理想的冷源，而且不干扰发动机核心机的工作。

先进部件技术

除了第三涵道，先进的陶瓷基复合材料的应用也是自适应发动机的一大改进。陶瓷基复合材料把陶瓷纤维（也可用碳纤维）和陶瓷基体整合成一体，保留了陶瓷耐高温的特性，同时具有很高的机械强度和抗热裂性。在自适应通用发动机技

术计划中，GE航空集团在低压涡轮和高压涡轮前缘采用了陶瓷基复合材料，使高压涡轮前缘温度达到1648℃。在后续的自适应发动机技术发展项目中，陶瓷基复合材料的应用进一步扩大，在高压涡轮导向叶片、排气部件上都有应用。GE航空集团称，陶瓷基复合材料涡轮叶片甚至可以不需要冷却，为大幅度提高发动机耐高温性能提供了空间。除了陶瓷基复合材料，GE航空集团还对树脂基复合材料进行了应用，于2015年完成全尺寸树脂基复合材料部件评估。树脂基复合材料主要应用于航空发动机的冷端，如风扇叶片、风扇机匣、风扇帽罩、出口导流叶片等，相比金属材料，树脂基复合材料有很明显的减重优势。

美国自适应发动机计划

XA100是美国空军生命周期管理中心的自适应发动机转化（AETP）项目下签约的两台演示验证机之一，另一个是普惠公司研制的XA101。在GE航空集团宣布第一台XA100完成测试后，普惠公司重申了其计划目标，即在未来7个月内进行首台

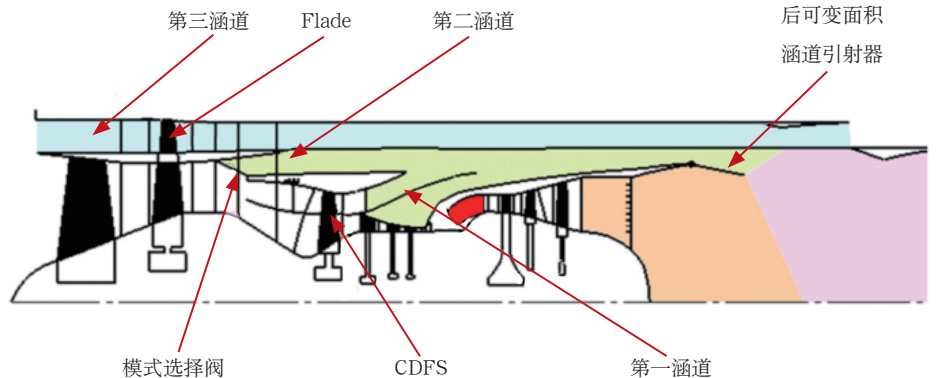


图3 三涵道结构示意图

表1 GE变循环发动机方案相关专利

年份	专利号	专利内容
1975年	US3879941	分段风扇、外涵道燃烧室
1977年	US4043121	Flade、后涵道引射器
1978年	US4068471	CDFS、前涵道引射器
1978年	US4080785	外涵道燃烧室
1995年	US5404713	CDFS、Flade
1997年	US5694768	前、后涵道引射器
1998年	US5806303	CDFS
2005年	US20050047942	CDFS、Flade
2005年	US20050081509	CDFS、Flade
2006年	US7134271	涡轮叶尖风扇
2007年	US20070186535	CDFS
2007年	US7216475	CDFS、涡轮叶尖风扇
2007年	US7246484	CDFS、Flade、三转子设计
2008年	US20080141676	Flade
2009年	US7614210	CDFS
2009年	US7631484	涡轮叶尖风扇
2011年	US20110167784A1	Flade、混合压气机
2012年	US20120131902A1	涡轮叶尖风扇

XA101验证机的测试。自适应循环发动机目前所取得的进展很大程度上得益于美国空军牵头实施的一系列自适应发动机研究计划，这些计划从2007年开始，有效地推动了自适应发动机相关技术的研究、验证和成熟^[3]。

一是自适应通用发动机技术(ADVENT)计划(2007—2015年)，该计划是通用经济可承受先进涡轮发动机(VAATE)计划的子计划，目的是实现自适应发动机核心机和关键部件技术的突破，将下一代发动机相关技术的技术成熟度(TRL)

和制造成熟度(MRL)都提高到6，由GE航空集团和罗罗北美公司承担。

二是自适应发动机技术发展(AETD)项目(2012—2017年)，在ADVENT计划成果的基础上，完成自适应发动机验证机初步设计和核心机、关键部件的验证，目标是与F135发动机相比，燃油效率降低25%，净推力增大5%，加力推力增大10%，航程延长30%，由GE航空集团和普惠公司承担。

三是自适应发动机转化(AETP)项目(2017—2022年)，完成自适应

发动机验证机的详细设计、制造和试验评估，技术指标与AETD项目相同，同样由GE航空集团和普惠公司承担。

四是下一代自适应推进(NGAP)项目(2019—2025年)，开展用于美国空军六代机的自适应发动机原型机初步设计、详细设计、制造和评估，目的是到2025年为自适应发动机飞行验证做好准备。

结束语

GE航空集团经过十多年的技术准备，目前已完成了自适应循环发动机的关键技术研究、集成验证和整机高空模拟试验。考虑到美国空军已经确定将自适应发动机技术作为其六代机的动力，并且NGAP项目也制定了自适应发动机于2025年进行飞行验证的目标，加之因缺席了美国五代机动力而对六代机动力的势在必得，可以推测GE航空集团的自适应循环发动机极有可能在2025年进行飞行验证。

航空动力

(谭米，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机科技情报工作)

参考文献

- [1] GE Aviation. Testing on GE's first XA100 adaptive cycle engine concludes, proves out transformational capabilities[EB/OL]. (2021-05-20) [2021-06-01]. <https://blog.geaviation.com/technology>.
- [2] 王子尧,董芃呈. 变循环发动机关键部件特征分析[J]. 航空动力, 2021(1): 29-32.
- [3] 孙明霞,梁春华. 美国自适应发动机研究的进展与启示[J]. 航空发动机, 2017(1): 99-106.