

# 阿内托：赛峰的新一代涡轴发动机

## Aneto, Next Generation Turboshaft Engine of Safran

■ 王士奇 / 中国航发研究院

经过数十年的持续研发和验证，以阿内托发动机为代表的下一代涡轴发动机，将以其更高的功重比、更低的耗油率、更优异的环境友好性、更高的可靠性，以及更出色的经济可承受性，取代现役的2000kW级别的发动机。

在2017年10月3日举办的伦敦国际直升机大会上，赛峰直升机发动机公司首次公开了面向8~15t级超中型和大型直升机市场研制的全新系列涡轴发动机——阿内托（Aneto），其输出功率覆盖1864 ~ 2237 kW。据称，阿内托发动机与同等量级的发动机（如马基拉和RTM322）相比，功率提高25%，耗油率降低15%，是赛峰直升机发动机公司开发的功率最大的涡轴发动机。

早在2009年，赛峰集团就依托欧洲“清洁天空”（Clean Sky）计划，瞄准下一代绿色涡轴发动机开始新技术预研工作。针对“清洁天空”计划中的涡轴发动机技术目标，赛峰集团通过Tech 3000技术验证机，对每项新技术单独进行台架试验，对全尺寸验证机进行地面试验，同时对发动机系统级的集成方法进行验证，使每项技术的成熟度（TRL）达到6级。技术验证机的具体目标包括：为下一代绿色发动机储备技术；开发下一代涡轴发动机的核心技术，包括降低耗油率、污染排放和噪声水平（CO<sub>2</sub>的排放量降低15%，NO<sub>x</sub>

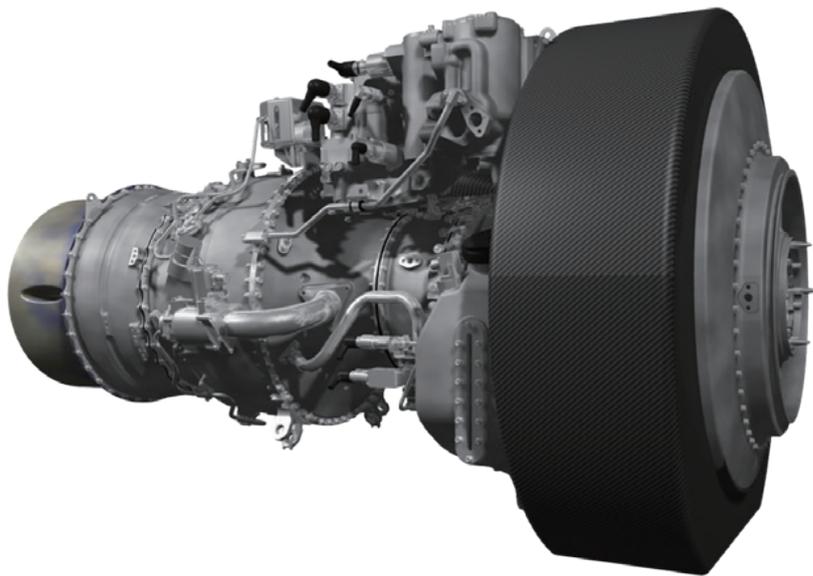


图1 阿内托涡轴发动机

的排放量降低60%，外部可感噪声降低10dB），降低整体尺寸和质量，以及降低运营维修成本等。赛峰集团牵头，与34个合作伙伴以及欧洲的10所大学和研究中心合作开发验证项目。验证机计划主要针对压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和动力轴等5大部件开展台架试验，另外，在全尺寸验证机上布置了400多个测点，大约运行40h（200循环）。

上述提前开展的发动机新技术预先研究为阿内托发动机的发展奠定坚实的技术基础。阿内托发动机目前已累计运行4000h，其中包括105h的飞行时间，且飞行试验过程中的性能满足要求。阿内托系列的首款发动机阿内托1K型（功率为1864kW）将为莱昂纳多公司的AW189K双发直升机提供动力。

## 阿内托发动机的技术特点

阿内托发动机沿袭了RTM322发动机的基本结构布局，采用3级轴流+1级离心的组合压气机、回流式环形燃烧室、2级燃气发生器涡轮和2级动力涡轮结构，单轴前动力输出布局，如图2所示。模块化结构大大降低了阿内托发动机的研发成本和研制周期，保证了发动机极高的可靠性。压气机系统均采用钛合金材料，以获得较高的抗腐蚀和抗外来物损伤（FOD）性能，并且采用宽弦叶片和进口导叶结构，能够在3s内从慢车状态加速到最大功率状态；回流燃烧室采用简单紧凑的结构设计，能够在实现快速起动的同时减轻发动机的质量；燃气发生器涡轮采用全新的铸造单晶叶片材料，使发动机获得更长的寿命和更大的功率增长裕度；动力涡轮采用保守的温度和应力水平设计，从而保证其具有长寿命；性能先进的双通道全权限数字式电子控制（FADEC）系统，能

够显著降低飞行员的工作强度，使驾驶更加简单；新设计的附件齿轮箱结构能够显著减少外部管路结构数量；进气采用了设计简单可靠的进口粒子分离器，保护发动机不受沙尘侵害；外部的机匣全部采用了氧化铝或不锈钢等抗腐蚀材料，以适应海洋环境。

经过Tech 3000项目的充分验证，大量增材制造技术在阿内托发动机的多种核心部件的制造过程得以采用，包括在燃烧室使用的高温材料喷嘴、压气机系统的全新进口导叶系统和扩压导叶系统等。另外，阿内托发动机与赛峰集团新开发的混合动力系统完全兼容，该系统允许在巡航状态下，双发中的一台发动机处于停车或慢车状态，当要求提高功率时，在电机的作用下发动机可在10s内快速起动，并自动提升至最大功率。

正是由于采用了紧凑型设计、新材料和先进制造技术，以及多年

的技术积累和验证，阿内托发动机才具有出色的功率重量比、可靠的性能，特别是在海上运输、搜救、消防或军事运输等环境恶劣的应用场景中具有更大的功率，在高温和高空条件下具有更好的性能。

## 同级别的发动机对比

目前，2000 kW级别的涡轴发动机主要有6型，分别来自法国、美国和俄罗斯，这三个国家各自在2000年前后研发了其现役的发动机，分别是RTM322、CT7/T700系列和VK-2500发动机，同时又都在研制性能更加先进的下一代发动机，分别为阿内托、T901和VK-2500M发动机（其性能参数见表1）。

### RTM322发动机

RTM322发动机是由罗罗公司和透博梅卡公司（现赛峰直升机发动机公司）联合开发的大型涡轴发动机，于1984年12月15日首次试车成功。2013年，透博梅卡公司接管了整个项目，负责产品的生产和运营支持。RTM322主要是针对AH-64阿帕奇直升机和UH-60“黑鹰”直升机的选发项目，与GE公司的T700发动机和普惠加拿大公司的PW100发动机进行竞争。RTM322系列发动机功率范围为1566 ~ 1951kW，于1992年获得了首个订单，装备44架英国皇家海军陆战队的AW101直升机，并于1998年开始服役。目前有超过1100台RTM322发动机正在服役，装备60%的AW101直升机和80%的NH90直升机，积累了超过100万飞行小时。

### T700/CT7发动机

GE公司的T700/CT7系列是一个涡轴/涡桨发动机家族，功率范围为1100 ~ 2200kW。该系列发动机从

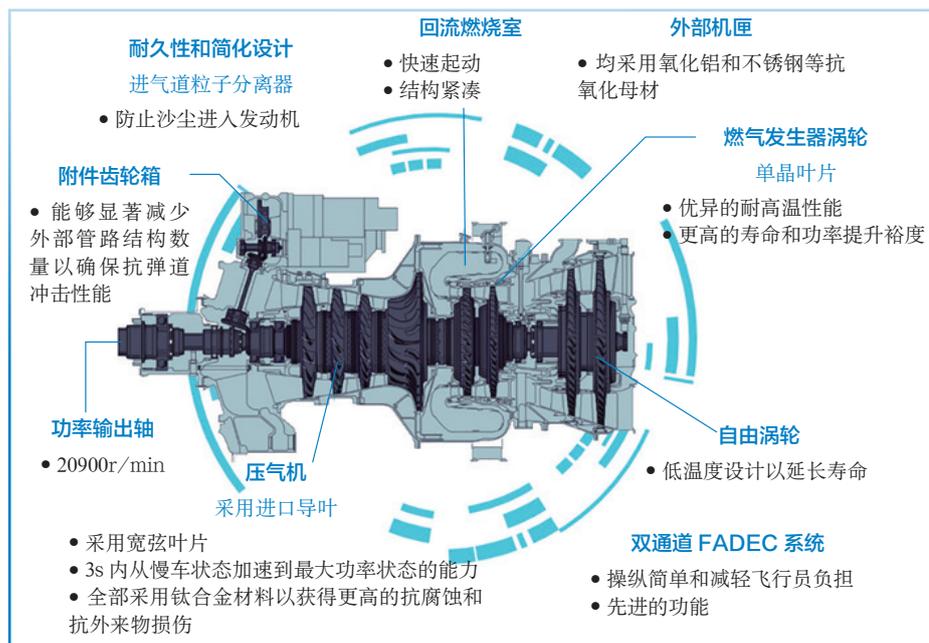


图2 阿内托发动机结构示意图

表1 阿内托同级别涡轴发动机主要参数

国家	型号	首飞时间	起飞功率 /kW	最大连续功率 /kW	起飞耗油率 / (kg / (kW · h))	干质量 /kg	总增压比	涡轮前温度 /°C	空气流量 (kg/s)
法国	RTM322-01/9A	1995年	1897	1805	0.268	232.15	15.2	1327	5.75
	阿内托-1K	2019年(预计)	1864	—	0.228	—	—	—	—
美国	CT7-8A/T700-T6E	2000年	1879	1523	0.275	245.9	18.6	1290	5.9
	T901	2024年(预计)	2237	—	0.206	204	—	—	—
俄罗斯	VK-2500	2000年	1790	1305	0.282	300	10	1020	9.3
	VK-2500M	2023年(预计)	1939	—	0.262	240	—	—	—

1967年开始研制，1973年首次进行台架试验，1974年首飞，1978年投产。第一款型号为T700-GE-700，采用5级轴流+1级离心压气机、环形燃烧室、2级燃气发生器涡轮和2级自由涡轮结构，最大功率1210kW，首先被用于“黑鹰”直升机和阿帕奇直升机。CT7是T700的民用版发动机编号。T700/CT7系列发动机到目前为止，已经发展出了多达35个军民两用涡轴、涡桨发动机型号，在可靠性和维修性方面有很大的突破。自1978年服役以来，经历了战争、恶劣环境以及高要求的客运服务的考验，总累积超过4000万飞行小时。

### T901发动机

2019年2月1日，GE公司宣布其T901发动机的设计方案击败了竞争对手先进涡轮发动机公司（霍尼韦尔公司和普惠公司的合资公司）T900双轴发动机设计方案，赢得了美国陆军改进涡轮发动机计划（ITEP）的支持，获得了5.174亿美元的工程制造和发展阶段（EMD）合同。

美国陆军先进涡轮计划的目的是研制和取证一型先进的涡轴发动机，替代现役配装“黑鹰”和阿帕奇直升机的T700-701D 涡轴发动

机，在未来30年或更久的时间内保持这些直升机的作战能力。其最终发展目标为：研发一型尺寸与T700发动机相同、质量为204kg、功率为2237kW的发动机，与现役基准发动机相比，功率提高50%、耗油率降低25%、功重比提高65%、寿命延长20%以及生产和维修成本降低20%~35%。

### VK-2500M发动机

VK-2500 发动机（图3所示）是俄罗斯克里莫夫设计局在TV3-117VMA 发动机基础上合作发展的一种自由涡轮式单转子涡轴发动机。VK-2500发动机于2000年进行了首飞，2007年开始批生产，其巡航功率为1305 kW，极限功率为1864 kW。从2011年起，克里莫夫设计局就开始研制VK-2500M发

动机，这是一款全新的涡轴发动机，而非VK-2500批生产型的改进型。VK-2500M发动机的起飞功率为1939kW，极限功率为2200kW，比VK-2500功率更高。同时，其质量减少了20%，零件数量减少了16%，耗油率也减少了7%，大修间隔增加，模块化结构支持外场维修。据估计，VK-2500M型将在2023年随高速军用直升机同时取证，未来VK-2500M发动机还将用于改进的米-28N和卡-52直升机。

由于俄罗斯在90年代的经济的发展停滞，其发动机的研制不管是在时间进度上还是性能指标上都显著落后于法国和美国的同类产品，其最新研制的VK-2500M发动机的性能参数（耗油率和干质量）只能追平美国和法国的现役发动机水平。



图3 VK-2500发动机



图4 莱昂纳多AW189K直升机

法国阿内托发动机计划于2019年年底适航取证，其研发进度略快于美国的T901发动机（计划于2024年完成工程研制），但T901的输出功率已经显著高于阿内托发动机的输出功率，其目标耗油率也具有显著优势。

### 阿内托发动机装机对象 AW189K直升机

2017年10月，意大利莱昂纳多公司宣布正在开发新版的AW189K

直升机，选用赛峰直升机发动机公司生产的两台1864kW的阿内托1K涡轴发动机提供动力。截至2018年10月，AW189K原型机已经进行了90个架次，累计105h的飞行测试，正在稳步推进并计划在2019年末获得认证。相比GE公司的CT7发动机，每台阿内托1K发动机的功率高出372kW，使得AW189K直升机能够在高热环境下获得更好的性能，可以更好地发挥其作为多功能超中型



图5 RACER验证机

直升机平台的作用，不仅适用于远程海上运输和救援，还可以进行贵宾运输、消防和各种准军事作业。

### RACER验证机

高速且经济高效旋翼机（Rapid And Cost-Effective Rotorcraft, RACER）验证机，是空客直升机公司在X-3高速复合直升机验证机的技术基础上，联合众多合作伙伴，在欧洲“清洁天空2”（Clean Sky 2）的计划下，发展出的面向未来的新一代高速型复合直升机演示验证机，其设计的巡航速度达到400km/h，比传统直升机快50%。空客直升机公司在2017年6月的巴黎航展上首次公开了RACER验证机，2018年2月，2206kW的阿内托1X发动机被选为其动力装置。相比最初选择的RTM322发动机，阿内托1X在相同功率下的紧凑程度提高了25%。RACER验证机原型机计划于2019年第四季度进行总装，2020年首飞。

### 结束语

下一代的高速旋翼飞行器，如欧洲的RACER、美国的S-97、V-280验证机、俄罗斯的军用高速直升机项目等，对大功率、高功重比涡轴发动机的发展提出了更高的要求。除了继续在传统的8~15t级民用多用途直升机及军用武装直升机、运输直升机等市场发挥主力作用外，2000kW级别的高性能涡轴发动机还将在高速旋翼飞行器的研发中发挥重要作用，这也是法国、美国、俄罗斯等航空发动机强国竞相对其加紧研制的重要原因。

航空动力

（王士奇，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机总体性能工作）