

# 涡轴发动机技术发展

## The Technology Development of Turboshafts

■ 蔡建兵 吴施志/中国航发动研所

从20世纪50年代起，涡轴发动机逐步取代活塞发动机成为直升机的主要动力装置，其技术进步直接推动了直升机平台的升级换代。现如今，涡轴发动机尽管受到了来自其他动力形式（活塞发动机、全电推进系统等）的挑战，但结合新循环、新结构和新材料等技术的应用，涡轴发动机的技术提升和应用发展仍有很大空间。

从20世纪50年代法国成功研制出世界上第一台涡轴发动机阿都斯特（Artouste）开始，涡轴发动机先后经历了以T58-GE-10和阿都斯特II型等发动机为典型代表的第一代、以T64-GE-6和诺姆（Gnome）等发动机为典型代表的第二代以及以RTM322、T700等发动机为典型代表的第三代。

目前，涡轴发动机已经发展到以T800、MTR390等发动机为代表的第四代，于20世纪80年代中/末期开始研制、90年代投入使用，大量采用钛合金、单晶合金、粉末高温合金和复合材料、热障涂层等新材料和新工艺，单位功率普遍达到270~300 kW/(kg/s)，可靠性、维修性和寿命得到进一步提高，采用全权限数字式电子控制（FADEC）系统，同时还采用了状态监控系统（包括振动监控、健康管理等）。

MTR390发动机分别于1996年和1997年获得军用型号许可和欧洲民航适航认证，装配于欧洲“虎”式武装直升机。该发动机采用单元体设计，由双级离心压气机、带气动雾化喷嘴的环形回流燃烧室、单级高负荷冷却燃气涡轮及前输出式双

级动力涡轮等组成，具有最大50%的功率增长潜力，于2010年完成了功率提升14%的MTR390-E发动机的研制。

T800-LHT-800发动机于1993年定型，主要装配阿古斯特韦斯特兰AW159“野猫”和土耳其T129武装直升机，其民用型CTS800-4N发动机于2004年完成适航取证。发动机采用单元体设计，由整体式粒子分离器、附件齿轮箱、燃气发生器和动力涡轮等4个单元体组成，动力涡轮可在外场更换，发动机具备状态监控、故障诊断/隔离和健康管理功

能，采用视情维护。

### 涡轴发动机主要研究计划 军用涡轴发动机主要研究计划

为进一步促进涡轴发动机的技术发展，各国都不断加大投入，努力将各种新技术应用于涡轴发动机研制。例如，美国在“通用经济可承受先进涡轮发动机”（VAATE）计划中针对小、中、大三个功率层次的涡轴发动机，分别开展了“小型重油发动机”（SHFE）计划、“先进经济可承受涡轮发动机”（AATE）计划/“改进涡轮发动机”（ITEP）

表1 美国涡轴发动机计划目标

主要技术指标	基准	提升量	目标值
SHFE计划（基准LTP101-700-1A）			
功率/kW	522	-	522
功重比/(kW/kg)	3.43	+50%	5.15
耗油率/(kg/(kW·h))	0.335	-20%	0.268
AATE计划和ITEP计划（基准T700-GE-701D）			
功率/kW	1487	-	2237
功重比/(kW/kg)	7.29	+65%	11.19
耗油率/(kg/(kW·h))	0.281	-25%	0.211
FATE计划（基准T55-L-714）			
功率/kW	3629	-	5220
功重比/(kW/kg)	9.7	+80%	17.46
耗油率/(kg/(kW·h))	0.306	-35%	0.199

表2 HPW3000和GE3000发动机技术研究进展

主要技术指标	时间	进展情况
HPW3000 (2017年 更名为T900)	2012年	完成了燃气发生器(高、低压系统)试验
	2013年	首台发动机30h持久试验
	2013年	第2台发动机性能和吞沙试验
	2014年	第2台发动机调试
	2016年	获得初步设计评审(PDR)阶段合同
	2016年	完成2台技术验证机的性能演示、持久性调试和吞沙试验
	预计2019年	获取发动机研制合同,进入工程与制造发展(EMD)阶段
GE3000 (2017年 更名为T901)	2011年	首台验证机试验
	2013年	整机试验
	2014年	第2台GE3000发动机的性能评估、持久性和吞砂等试验
	2016年	GE公司获得PDR阶段的合同
	2017年	全尺寸原型机匹配性试验
	2018年	完成初步设计评审(PDR)
	预计2019年	工程与制造发展(EMD)阶段

计划、“未来经济可承受涡轮发动机”(FATE)计划,主要目标是降低耗油率、提高功重比、降低生产和维护成本。不同功率量级发动机的发展目标有所不同,其技术提升情况如表1所示。

SHFE计划的目标是发展功率522kW的验证机,验证可用于多种军民用直升机的小型燃气涡轮发动机技术。2008年,霍尼韦尔公司完成全尺寸发动机试验,达到指标要求。

AATE计划和ITEP计划是由GE公司和先进涡轮发动机公司(ATEC,霍尼韦尔和普惠的合资公司)竞争研制新型2237kW功率级涡轴发动机,以替换UH-60“黑鹰”和AH-64阿帕奇直升机配装的T700发动机,这两项计划验证的新型涡轴发动机将为美国未来中型直升机用动力研制奠定坚实的技术基础。其中,GE3000发动机采用了成熟的单转子燃气发生器结构及高温陶瓷基复合材料(CMC)、增材制造和三维

气动设计等先进技术;HPW3000则采用了双转子燃气发生器结构,在目前的尺寸下具有25%的功率增长潜力。

GE公司研制的GE3000和先进涡轮发动机公司研制的HPW3000的技术研究进展如表2所示。

FATE计划发展功率3675~7350kW级先进涡轴发动机,作为CH-47支奴干直升机发展型或下一代重型直升机的动力。该计划于2009年开始,2012年年初进入先期技术验证阶段,现已完成全尺寸地面样机验证,技术成熟度(TRL)达到6级。

除上述技术研究计划外,2013年3月,美国还启动了替代概念发动

机(ACE)计划,目标是开展未来各型垂直起降旋翼机所需的发动机技术预先研究,以满足其超高的性能指标。ACE计划的功率范围覆盖28~7457kW,功重比提高90%、耗油率降低40%、生产和维护成本降低50%。该计划包括多项潜在的研究途径,例如,变速动力涡轮技术和自适应涡轴发动机技术等。ACE已在2014年启动应用研究工作,2017年进入先期技术验证,预计2021年完成全尺寸地面样机验证,TRL达到6级,为型号研制做好技术储备。

民用涡轴发动机主要研究计划

作为欧洲“清洁天空”计划的“可持续和绿色发动机”项目的组成部分,自2009年开始,法国赛峰直升机发动机公司开始“绿色涡轴发动机”技术研究和验证,通过TECH 600、TECH 800、TECH 3000等3个验证机的技术研究,开展先进压气机、新材料应用、热端技术等关键技术验证,以阿赫耶(Ariel)2发动机为基准,实现耗油率降低35%、CO<sub>2</sub>排放量降低35%、NO<sub>x</sub>排放量减少80%、噪声降低10dB以上的目标。TECH600、TECH800、TECH3000技术验证机研制均已在2012年前展开。“绿色涡轴发动机”计划的发展目标及其进展情况如表3和表4所示。

“绿色涡轴发动机”计划瞄准了未来先进直升机对动力系统的综合需求和下一代涡轴发动机的技术发

表3 赛峰直升机发动机公司的“绿色涡轴发动机”计划目标

基准	技术验证机	耗油率	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	噪声	成果应用
阿赫耶2 发动机	TECH 600	-15%	-15%	不变	-5dB	阿赫尤2R
	TECH 800	-(20~25)%	-(20~25)%	-60%	-10dB	阿拉诺
	TECH 3000	-35%	-35%	-80%	> -10dB	阿内托

**表4 赛峰直升机发动机公司的“绿色涡轴发动机”计划进展情况**

验证机（发动机）	时间	进展情况
TECH600 (阿赫尤2R)	2014年4月	首次台架试验
	2014年11月	成功装机完成首飞
	2015年8月	首台阿赫尤2R发动机(370kW级)交付贝尔直升机公司
	2016年11月	配装贝尔505 Jet Ranger X直升机完成加拿大民航适航取证
TECH800 (阿拉诺)	2017年6月	配装贝尔505 Jet Ranger X直升机完成美国民航适航取证
	2013年4月	TECH800验证机的首次运行
	2014年2月	阿拉诺发动机开始首次地面试验
	2015年8月	配装H160直升机0号机完成地面台架试验
	2016年1月	阿拉诺1A发动机配装H160直升机完成首飞
	预计2018年	完成适航取证
TECH3000 (阿内托)	2015年1月	启动TECH3000验证机部件和单元体试验
	2017年3月	阿内托1K发动机完成装机首飞
	预计2019年	阿内托1X配装“高速低成本旋翼机”(RACER)验证机首飞
	预计2019年	工程与制造发展(EMD)阶段

展趋势，综合应用了最新的发动机设计、材料和工艺领域的先进技术，满足了未来适航法规对民用涡轴发动机污染排放、噪声的严格要求。

### 涡轴发动机技术发展趋势

随着直升机技术的进步，直升机平台对动力装置的发展提出了更高要求：军用直升机追求更高速度，扩大任务载荷/提高航程，改善维修性，提高使用地域内的环境适应性和机动能力等；民用直升机则更关注安全性、经济性、操纵品质和环境适应性，并日益重视环保性。

目前，航空发动机公司正通过一系列专项发展计划，应用气动、结构、传热、燃烧、控制、材料及工艺等方面的最新研究成果，进一步提高发动机热力循环参数、部件效率，降低耗油率、提高发动机寿命及可靠性、降低全生命周期使用成本。

近年来，旋翼机平台逐步融入了各类固定翼飞机的设计理念，各种高速旋翼机构层出不穷，对动

力系统的能量效率、能量形式、驱动方式等提出了新的要求。预计未来旋翼机动力技术将朝着以下四个方向发展。

一是采用新结构型式，进一步提升部件技术水平，研制出性能更优异的涡轴发动机。例如，内燃波转子发动机采用以等容燃烧为基础的发动机循环（Humphrey循环），可获得更高的循环热效率，具有很好的应用前景。美国国家航空航天局（NASA）完成了以501-KB5S发动机为基准发动机的内燃波转子取代核心机的技术验证，结果表明，压比降低，压气机减少2~3级，但输出轴功率提高了17.7%、耗油率降低了10.5%。

二是探索组合动力技术，大幅提升旋翼机飞行速度，例如，倾转旋翼机用可转换涡轴/涡桨发动机、变转速动力涡轴发动机等。美国陆军与NASA合作的“先进变转速动力涡轮”（AVSPOT）计划，可将动力涡轮转速维持在55%~105%范围之

间，使旋翼机在起飞和爬升时旋翼转速较高，巡航时转速较低，实现旋翼—发动机转速的最优匹配，提升旋翼机推进效率，大幅提高飞行速度，同时可避免变速传动机构的复杂性。

三是以传统涡轴发动机为基础发展分布式混合电推进系统，拓展高速旋翼飞行器的飞行包线，提升悬停效率、巡航效率和系统可靠性。目前，各大飞机和发动机制造商均大力投入航空电推进系统的研发，例如，法国赛峰集团开发的用于贝尔公司电动垂直起飞和着陆（eVTOL）飞行器的混合动力电推进系统，预计于2019年进行地面测试。

四是探索不依赖机械传动的推进形式，例如，开展桨尖喷气等推进方式研究。桨尖喷气旋翼通过翼尖高速喷气产生反作用力驱动旋翼，取消了齿轮传动系统和反扭转系统，有效地降低了系统复杂性。通过对桨尖喷气的冷喷、暖喷和热喷三种循环形式的长期研究表明，采用暖喷循环形式，即利用高温燃气和低温压缩冷气的混合气体进行驱动，相对于其他形式具有较高的热效率。由于桨尖喷气旋翼的综合效率仍低于机械传动的旋翼系统，该技术工程实用还有很长的路要走。

综上所述，作为一种传统的燃气涡轮发动机，涡轴发动机尽管受到了来自其他动力形式（活塞发动机、全电推进系统等）的挑战，但结合新循环、新结构和新材料等技术的应用，涡轴发动机的技术提升和应用发展仍有很大空间。

（蔡建兵，中国航发动力研究所副总工程师，研究员，主要从事航空发动机总体设计研究）