

无人机/巡航导弹用小型涡扇发动机发展和启示

The Development of Micro Turbofan Engines for Drones / Cruise Missiles

■ 陈健 王士奇 / 中国航空发动机研究院 司灵越 / 中国人民解放军国防科技大学

近年来的一系列局部冲突中，无人机和巡航导弹的使用越来越广泛，并取得了良好的战果，与此同时，对小型发动机的需求也呈现出了显著的增长趋势。

无人机，特别是察打一体无人机，能够长时间在空中盘旋，对目标进行精确侦察和打击，大大提高了作战的效率和精度，已经在实战中展现出强大的作战能力。巡航导弹（也称为“自杀式”无人机）是装备有小型弹头的自主无人机，使用光电相机和人工智能来识别目标，并通过自毁来达到杀伤目的，其作战优势在于具有快速响应能力和精确打击能力，如图1所示。美国纽约巴德学院无人机研究中心的研究报告称，全球已经近百个国家和地区拥有军用无人机，无人机正在成为各国空中作战力量的主战装备，甚至改变了战争的形态和战术。动力系统是无人机的“心脏”，决定无人机的载荷能力、升限、航程、飞行速度和机动性等综合性能。随着无人机重要性的日益凸显，无人机动力的发展也备受瞩目，小型涡扇发动机是其中的重要类型。

小型涡扇发动机在无人机和巡航导弹中的应用

中小型发动机之间无明确的分界，本文将推力不高于20kN的涡扇发动机定义为小型涡扇发动机，主要作为中大型无人侦察机、小型无人作战飞机和中远程巡航导弹的动力。



图1 X-58A无人机投放Altius-600巡航导弹

在无人机中的应用

无人机广泛采用的动力装置类型各异，主要包括活塞式发动机（低空、低速、长航时无人机）、涡喷发动机（中空、高速侦察攻击无人机和靶机）、涡扇发动机（高空长航时无人机和无人战斗机）、涡桨发动机（中空长航时无人机）和涡轴发动机（中低空、低速短距、垂直起降、旋翼无人机），以及在微型无人机中普遍使用的由电池驱动的电动机等。

综合考虑耗油率与推进效率，不同类型的动力各有优势（见图2）。高速区间（马赫数 Ma ）0.6 ~ 1.2），涡扇发动机最优；低速区间（ Ma ）0 ~ 0.4），涡桨发动机和活塞式发动机最优。当速度达到 Ma 0.4 ~ 0.6 区间时，涡桨发动机和活塞式发动机推进效率递减且耗油率急剧上升，若有更高的速度需求，可考虑以涡扇发动机进行替代。

随着技术与作战需求的不断演进，各军事强国陆续推出三代广泛应用的察打一体无人机。以MQ-1“捕食者”为代表的第一代察打一体无人机，大多配装涡桨发动机或活塞式发动机，主要满足重载荷、短距起飞、高机动的要求；以MQ-9“死神”为代表的第二代察打一体无人机，开始配装涡扇发动机，满足其动力强、长航时、大载重、高速的需求；对于以MQ-20“复仇者”为代表的第三代察打一体无人机，在满足中空、高速、高隐身性、长航时且兼顾经济性的前提下，涡扇发动机因耗油率相对较低，质量和推力与无人机匹配度高，成为了首选动力。因此，无人机用涡扇发动机在未来无人机的发展中有着非常重要的地位。

在巡航导弹中的应用

巡航导弹是指以巡航状态在大气层中飞行的有翼导弹。推进系统

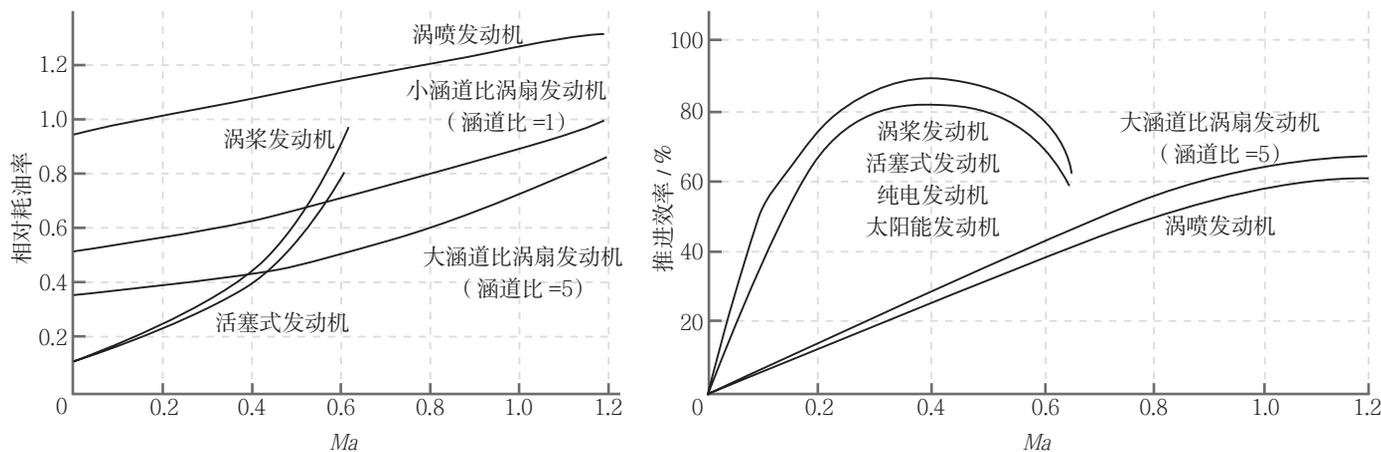


图2 各类发动机耗油率、推进效率对比

是巡航导弹的核心部件，包括助推器和主发动机。助推器通常采用液体火箭发动机或固体火箭发动机，主发动机通常采用涡喷发动机、涡扇发动机、冲压发动机等，有的也采用固体火箭发动机、液体火箭发动机或整体式火箭冲压组合发动机。早在20世纪40年代，涡喷发动机就被用作战略导弹的巡航动力装置，但其绝大多数由飞机发动机改造而成，成本高、尺寸大、维护难，与火箭发动机相竞争缺乏优势，并未得到广泛使用。直到20世纪70年代初，以J402、F107和TR160等为代表的低成本、小尺寸、短寿命航空发动机的成功研制，极大地促进了先进巡航、反舰和空地导弹的快速发展。与固体火箭发动机和涡喷发动机相比，涡扇发动机特别适用于各种高亚声速、中远程巡航导弹。采用不同类型动力的舰载巡航和反舰导弹的射程与质量如图3所示，由此可见以涡扇发动机作为主动力的导弹具有明显优势。

在巡航导弹这种气动和结构都受到极大限制、各国设计风格高度趋同的布局中，载荷和射程性能几

乎完全取决于发动机。未来先进巡航导弹将朝着更快、更远、更精、更隐蔽，以及多功能、智能化的趋势发展，对动力系统的耐久性和隐身的要求更高，需要采用热效率和功率密度更高的小型涡扇发动机。

小型涡扇发动机的发展现状和发展计划

发展现状

国外对小型涡扇发动机的研究起步较早，且在最近40年里取得了较快发展，目前多个系列的产品已投入使用。无人机用小型涡扇发动机典型的有JT15D、PW500、FJ44和AI-25等；美国的F107系列、俄罗斯的TRDD-50系列和乌克兰的MS-

400系列发动机是目前巡航导弹用涡扇发动机的典型代表；此外，英国、法国、土耳其、巴西也针对未来需求发展了数种无人机/巡航导弹用涡扇发动机（见表1）。

从表1可以看出，这些典型的小型涡扇发动机大部分是面向小型喷气式公务机市场的需求而研发的，随着无人机技术的发展和市场需求，很多商用小型涡扇发动机被直接选做无人机动力。典型代表是普惠加拿大公司的PW500发动机，其衍生型号PW545B因为质量和推力与MQ-20“复仇者”无人机匹配度高，又能满足其高空、高速、高隐身、长航时的作战需求，所以成为了MQ-20无人机的首选动力。

而与普惠加拿大公司的PW500相反，威廉姆斯国际公司的F107系列、FJ44系列发动机都是基于军用市场、在WR19小型涡扇发动机的基础上发展而来的。凭借F107、F112、F121、F122、F415等一系列小型弹用涡扇发动机，威廉姆斯国际公司稳固了其在巡航导弹发动机领域的市场，后续随着小型有人飞机市场的需求增长和公司为民用发动机市

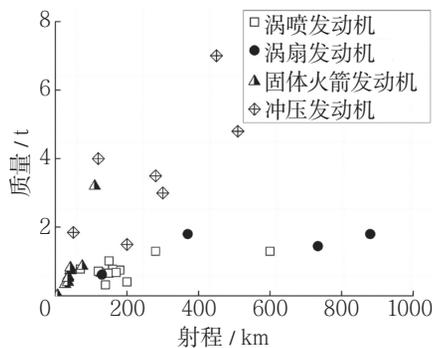


图3 舰载巡航和反舰导弹的射程与质量

表1 典型小型涡扇发动机参数

型号	研发机构	最大长度/m	最大直径/m	自重/kg	最大推力/kN	推重比	耗油率/(kg/(kN·h))	涵道比	单价/万美元	装机对象
JT15D	普惠加拿大公司	1.60	0.71	233~302	14.19	4.24~4.86	<58.4	2.00~3.30	55	公务机、X-47A无人机
PW500	普惠加拿大公司	1.73	0.81	279~374	17.75	4.70~4.88	<48.0	2.60~4.10	78~98	公务机、MQ-20无人机
PW600	普惠加拿大公司	1.47	0.51	113~249	10.68	—	—	—	—	公务机
Larzac	透博梅卡公司/斯奈克玛公司	1.19	0.60	295~302	16.65	4.56~4.77	<77.5	1.04~1.13	—	攻击/教练机
HF118	GE/本田航空发动机公司	1.38	0.69	178	7.42	4.26	78.7	2.90	53~55	公务机
HF120	GE/本田航空发动机公司	1.12	0.54	178	9.02	5.17	<71.4	2.90	53~55	公务机
FJ33	威廉姆斯国际公司	0.98	0.44	136	8.48	3.34~6.36	—	—	40~43	公务机、教练机、XQ-58A验证机
FJ44	威廉姆斯国际公司	1.52	0.55	205~295	16.02	3.94~5.72	71.4	3.28~3.40	60~75	公务机、RQ-3“暗星”无人机、P-175“臭鼬”无人机、Fury无人机
AI-25	扎波罗什伊夫琴科“进步”机器制造设计局	3.36	0.60	312~400	16.87	4.81~4.92	83.0	1.98~2.20	—	教练机
EJ22	威廉姆斯国际公司	1.04	0.37	39	3.56	8.23~9.42	—	4.60	10~20	超轻型喷气式飞机
DGEN-380	Akira公司	1.13	0.47	80	2.55	3.60	—	7.60	—	测试、科研教学用
F107/F112/ F121/F122/ F415	威廉姆斯国际公司	1.23	0.30	19~65	6.22	3.53~4.26	61.0	1.00	10~19	AGM-86 / AGM109 / AGM-129 / AGM-136、“小精灵”无人机
TRDD-50	鄂木斯克发动机设计局股份公司	1.00	0.47	82~130	5.88	4.61~5.49	<72.0	—	—	RKV-15战略巡航导弹、X-59MI战术导弹、支线客机、海基巡航导弹等
MS-400	西奇发动机公司	1.10	0.32	85	4.41	4.70	<87.0	1.00	20	空射巡航导弹、无人机
TF1200	Turbomachine公司	1.2	0.36	90	5.33	—	69.4	1.00	—	远程巡航导弹、无人机

的良好预期，进而先后研发出了FJ44、FJ33小型民用涡扇发动机，成功地走出了一条以军带民、以民促军的军民融合发展之路，在技术和市场两方面都取得了成功。随着对未来先进军用无人机的技术探索，F107、FJ44和FJ33又陆续被选做相关无人机验证机的动力装置。

Price Induction（现为Akira）公司的DGEN380小型涡扇发动机，号称“世界上最小的齿轮传动风扇发动机”。该型发动机本是为超轻型

喷气式飞机而研发，但随着公务机市场的萧条，计划配装的飞机项目取消，虽然技术成熟度很高（已经达到7），但是没有资金支持以进行适航取证，现在仅被用作新技术验证平台和科研教学平台。面临过类似困境的还有威廉姆斯国际公司为超轻型喷气式飞机研发的EJ22发动机项目，但公司并没有因为飞机合同的取消而停止型号研发，并于2003—2004年开发了几种新用途。

2022年7月18日，罗罗公司在范

堡罗航展上展示了奥菲斯（Orpheus）发动机概念验证机。该型发动机是利用数字工具和快速制造等快速敏捷研发方式，在18个月内完成了设计、制造，并成功运转，制造速度是传统发动机的2倍，使用的工程资源仅为通常所需的1/3，能以显著低的成本交付，发动机推力未公开，估计在4.5kN量级，计划为无人机和小型飞机平台提供动力。罗罗公司通过奥菲斯项目，探索了能够迅速开发、快速部署的研发模式，为罗罗公司

开发一系列小型低成本航空发动机铺平了道路，为英国未来作战航空系统（FCAS）提供了重要的支撑。

目前，无人机和巡航导弹用涡扇发动机的发展基本上都倾向于尽量利用现有的发动机，根据具体需求进行改进和系列化发展。这种策略不仅有助于减少飞行器平台的初始成本，还能显著缩短研发时间并降低技术风险，系列化的发展方式也使得发动机技术能够持续演进和优化。另外，欧美国家也在不断探索新的设计、制造、试验技术，以进一步缩短小型涡扇发动机的研制时间，并降低制造成本。随着未来无人系统和无人军用装备的迅速发展，全新的市场需求有望使现有的小型涡扇发动机迎来新一轮的发展契机。

发展计划

从20世纪70年代开始，美国就针对小型发动机的发展趋势、应用前景和技术指标开展了一系列持续性的研究计划。1988年开始实施综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）计划（1988—2005年），其目标是利用最新的科技成果，使推进系统的技术能力在1987年的基础上翻一番，如表2所示。在IHPTET计划取得巨大成功的基础上，2003年开始

表2 IHPTET计划无人机/巡航导弹发动机的技术目标（以1987年技术水平为基准）

	第一阶段 1995年	第二阶段 2000年	第三阶段 2005年
推重比	+35%	+70%	+100%
耗油率	-20%	-30%	-40%
成本	-30%	-45%	-60%
最高温度	+275K	+510K	+780K

实施通用经济可承受先进涡轮发动机（VAATE）计划，其中对小型涡扇发动机的技术目标是在2000年技术水平的基础上，通过多用途核心机、耐久性和智能发动机3个重点领域研究，在2017年左右使发动机经济可承受性提高8.9倍，如表3所示。2016年6月，美国空军研究实验室（AFRL）披露了支持经济可承受任务能力的先进涡轮发动机技术（ATTAM）计划，该计划是VAATE计划的延续，对中小型发动机技术的目标是相关技术应当提升发动机性能，能够在多种飞行状况和马赫数下运转，适应未来的导弹和空中作战平台打击时间敏感目标的任务需求。

以英国为主的西欧国家也有与美国IHPTET计划相类似的计划，即军用发动机先进技术综合验证（ACME）计划和英国与法国合作的军用发动机技术（AMET）计划；俄罗斯虽然经济条件有限，但其技术的发展仍可与美国、英国、法国等相匹敌。

整理美国航空发动机重大工程发展计划和实施情况会发现，小型涡扇航空发动机在美军装备体系中，绝不只是地位低下的辅助型号。相反，小型发动机、中大型战斗机发动机和大涵道比发动机三足鼎立，每一个都是不可或缺的。

表3 VAATE计划小型涡扇发动机的技术目标（以2000年技术水平为基准）

推重比	耗油率	成本	经济可承受性
2.2倍	-33%	-62%	8.9倍
注：经济可承受性为能力与全生命周期成本之比，其中能力为推重比和耗油率的函数；这种技术进步对亚声速无人作战飞机发动机来说，相当于全生命周期内节省13亿美元的费用，作战半径增加150%，或空中巡逻时间增加3倍。			

分析与启示

研判美国空中力量的航空发动机谱系，梳理美国航空工业的发展历史，细究航空发动机的设计试验原则，可以发现小型航空发动机与大型航空发动机之间的关系并不是类似于“简化、低级”与“完整、高级”的递进式层级关系，不是简单地把大型发动机尺寸按比例缩小，而是在设计思路和结构特征上就差异巨大的不同类型产品的设计和制造，小型涡扇发动机的研制面临着特有的一系列设计和制造的挑战。

事实上，即使是在欧美国家，小型发动机的研制也具备极强的独立性。一些型号来自于专业做小型发动机的公司，如威廉姆斯国际公司；一些是来自于大型航空发动机集团的独立部门，如罗罗公司的小型发动机部门是20世纪60年代末专门成立的，普惠公司的小型发动机研发能力实际上是20世纪70年代以后收购原加拿大联合飞机公司后才实现，GE公司能够同时研发大型发动机和小型发动机，但这是从20世纪60年代开始，用数十年时间和以亿美元为单位投资的努力换来的突破。

对于美国之外的后发国家来说，一方面要加强国际合作，引入缺乏资金支持的先进项目及其设计团队，在现有发动机基础上采用先进的技术进一步改型发展；另一方面要探索新概念、新技术，开辟新赛道发展全新的无人机/巡航导弹用小型航空发动机。此外，还应把握低空经济的迅速发展和军用无人系统的需求激增带来的机遇，创造市场需求，使小型航空发动机走上良性的可持续发展之路。

航空动力