

低成本可消耗飞行器及其动力发展分析

Development of Low-Cost Expendable UAVs and Powerplants

■ 李龙 郑天慧 / 中国航发涡轮院

低成本可消耗飞行器是指性能上满足体系作战需求，且满足有限寿命/架次要求的飞行器，是军事理论与作战模式演变的产物，是构建质量与数量并优的空中优势能力的重要基础。

为适应“大国竞争”的需要，美国国防预先研究计划局（DARPA）于2017年提出了“马赛克战”（Mosaic Warfare）概念，强调将作战功能分散至各作战领域的多种小型、低成本有人或无人平台上，具备单一或多功能的模块化作战单元，形成分层作战样式。美国空军研究实验室（AFRL）于2020年6月发布的“天空博格人”（Skyborg）概念，如图1所示，展示了有人机后方控制指挥、可重复使用的“忠诚僚机”居中、可消耗的无人机集群突前，以执行最危险任务的作战体系。在军费紧张、大型高价值作战武器严重不足的前提下，这些低成本可消耗装备研究成果为提升作战效能、早日实现多域分布式自主作战提供了保障。为此，在AFRL和DARPA的组织下，美国开展了多项低成本可消耗飞行器、动力技术研究。与此同时，欧洲、澳大利亚、俄罗斯和日本等国家和地区也开展了多项忠诚僚机研究，取得了一定的研究成果。

可消耗低成本飞行器发展现状

在分布式作战理念下，平台、编队和任务类型的组合催生了无人机集



图1 Skyborg概念设计

群作战、弹药集群、有人-无人协同等作战形式，针对这些作战形式而提出的平台方案均以低成本可消耗作为最重要的特征。

无人机集群

在美国国防部（DoD）的统一领导下，DARPA、战略能力办公室（SCO）和空军、海军等都开展了大量的研究和论证工作，启动了“灰山鹑”项目、“小精灵”项目、低成本无人机集群技术（LOCUST）项目和近战隐蔽一次性自主无人机（CICADA）项目等多个集群无人机项目（见表1）。

弹药集群

除了无人机平台可作为集群

饱和集中式出动以外，空射型诱饵弹等弹药也可以集群出动，通过模拟己方战机的雷达回波信号和飞行特性，欺骗敌防空系统发射高成本防空导弹攻击的方式吸引敌方注意力，提高己方飞机的战场生存能力。DARPA和AFRL曾分别提出了小型空射诱饵弹（MALD）项目和“灰狼”（Gray Wolf）巡航导弹项目。

2017年12月，AFRL向洛克希德-马丁（洛马）公司和诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司授予合同，要求研制可“饱和攻击”敌防空系统的廉价集群式自主巡航导弹，代号“灰狼”。为降低成本，导弹采用模块化设计和开放式架构，具备可变

表1 美国集群无人机项目概况

项目名称	验证时间	无人机大小	无人机动力	成本	部署方式	使用次数	规模
国防部 “灰山鹑”项目	2011年启动，2016年实现3架 F/A-18F 抛洒 103架无人机	“灰山鹑”小型无人 机 0.5kg	锂聚合物 电池	低成本（不超 3万美元）	母机抛洒	一次性	数量密集型
DARPA “小精灵”项目	2015年启动，2016年论证设计， 2018年试飞验证，目前正在进行 第四阶段验证，主要针对空中发 射和回收试验	“小精灵”小型 无人 机（X-61A） 320kg	F107涡扇 发动机	低成本（70万 美元）	母机抛洒、 回收	可回收	数量密集型
海军实验室 LOCUST项目	2015年完成9架编队飞行， 2016年完成30架集群飞行	“郊狼”小型无人 机 6.4kg	电动机	低成本（1.5万 美元）	多平台投放	未来 可回收	数量密集型
海军实验室 CICADA项目	2006年开始，2017年实现P-3 释放 32架无人机	“飞行电路板”和 “蝉”微型无人机 0.065kg	电路板	低成本（1000 美元，未来有望 降至250美元）	多平台投放	一次性	数量密集型

有效载荷和防区外发射能力，设计巡航距离超过250n mile，并可进行多种任务配置。按照计划，“灰狼”将以网络化行为协作的模式达到集群打击的目的。2019年年中，AFRL宣布取消“灰狼”低成本集群巡航导弹项目，同时启动了让弹药具备协同打击能力的“金帐汗国”(Golden Horde)项目。

“忠诚僚机”

作为分布式作战——“无人机+有人机”协同作战的重要平台之一，目前，美国、英国、澳大利亚、俄罗斯和日本等均在发展“忠诚僚机”相关项目或技术。

美国克雷托斯(Kratos)公司在美空军低成本可消耗无人机技术(LCASD)项目下研发的X-58A目前已完成了6次试飞(如图2所示)，该机具备大航程、高隐身、低成本、可消耗、作战模式灵活、保障要求低等优点，可与F-22、F-35战斗机等构成隐身空中编队协同作战。

波音公司同澳大利亚、英国等开展合作，在“澳大利亚工业能

力计划”下开发空中力量编队系统(ATS)发展“忠诚僚机”，可与F-35、EA-18G电子战飞机、E-7预警机等协同作战，遂行情报监视侦察和电子战等任务，该机由人工智能赋能，外形隐身，生产成本约200万美元，与XQ-58A批生产成本相当。2021年3月1日，波音公司“忠诚僚机”首飞成功，后续将进行更

复杂的飞行试验。

2019年7月底，英国国防部通过皇家空军“快速能力办公室”在名为“蚊子”的轻量级经济可承受新型战斗机项目下开发新型无人机，将在2022年首飞后会开展一系列验证试验。

俄罗斯米格飞机公司正为米格-35战斗机设计一种高速无人僚机，该



图2 X-58A无人机

机可由米格-35控制，也能使用人工智能技术与有人机配合作战。

日本在2016年发布的技术路线图中指出，要发展一种高性能自主飞机概念，作为有人驾驶战斗机的助手，计划于2030年实现部署。

印度斯坦航空公司在2019年度印度航展上推出了隐身无人僚机。该机机长6m，续航时间80min，航程800km，拥有多种作战功能。

可消耗高超声速多任务飞行器

除了集群无人机、“忠诚僚机”、诱饵弹等以亚声速飞行的低成本可消耗平台，美国还积极开发高超声速可消耗飞行平台。2020年8月，AFRL在网上发布了“可消耗高超声速多任务吸气式验证机计划”（Mayhem）信息征询书，提出将开展设计、制造和与大型巡航导弹集成的竞赛，涉及两个重点领域：推力开发和地面测试；超燃冲压发动机的设计和集成。

AFRL称，Mayhem系统验证机将比现有的高超声速飞行器搭载更多的载荷并飞行更远的距离；采用模块化的载荷舱，可搭载或者发射至少3种以上不同的载荷，执行多种任务。AFRL希望飞行器有一个标准的载荷界面，便于集成多种载荷。

2020年11月30日，美国国防部公布与澳大利亚合作进行“南十字星综合飞行研究试验”（SCIFiRE），将新技术引入DARPA“吸气式高超声速武器概念”（HAWC）。HAWC项目目标是完善包括能够有效进行高超声速飞行的先进飞行器配置，实现持续高超声速巡航的碳氢超燃冲压发动机推进，专为高温巡航设计的热管理方法，价格低廉的系统设计及制造方法在内的一系列技术。

可消耗无人飞行器动力

可消耗无人飞行器大概可分为集群无人机、“忠诚僚机”、可消耗高超声速导弹和无人机等，不同飞行器对应的动力需求不同。对于“郊狼”“灰山鹑”这类代替空射诱饵，执行诱导欺骗、前出侦察等任务的微小型集群无人机而言，其本身质量只有几千克，一般采用纯电驱动。对于“小精灵”无人机这种执行高端、反介入/区域拒止（A2/AD）环境高强度战略任务的集群无人机而言，其作战半径达900km、可重复多次使用等特点都导致必须采用高性能、低成本涡喷/涡扇发动机。“忠诚僚机”相对集群无人机而言，体积更大，需要伴随在有人机左右，性能要求相对集群无人机更高，也需要采用涡喷/涡扇发动机。可消耗亚声速导弹一般要求发动机结构简单，耐储存、成本低、迎风面积小，结构简单的涡喷发动机作为其动力。可消耗高超声速导弹或无人机一般采用超燃冲压发动机或涡轮基组合循环发动机（TBCC）。目前，世界上的可消耗无人作战平台有一部分选用的是现货动力，这些动力中并不是所有的都能严格满足低成本要求，要针对具体需求研究新型发动机。

现有动力型号

X-61A是一种小型、网络化、集群作战型无人机，属于半一次性侦察与电子战无人机。其最优性能目标为设计载重54.5kg、最大速度不小于 Ma 0.8、设计寿命为使用20次、出厂单价（不包括载荷）低于70万美元。X-61A目前采用F107涡扇发动机作为动力，额定推力为2.67~6.22kN，质量为59~65kg，储存寿命为10年，工作寿命为50h左右，具

有质量轻、结构紧凑、耗油率低的特点。该发动机2014年的价格为19万美元，占主机成本目标的27%。

MALD各型号分别采用TJ50、TJ120和TJ150发动机作为动力。TJ50是美国汉胜公司（现隶属于雷神技术公司）1996年开始研制的单转子涡喷发动机，主要用于微小型军用固定翼无人机。美国汉胜公司在TJ50的基础上，后续发展了TJ120和TJ150发动机。TJ50是为应对DARPA小型发动机预研计划研发的微型涡喷发动机，目的是进一步发展尺寸小、价格便宜的燃气涡轮发动机，基本能满足MALD这类可消耗弹药的要求。

作为伴随在有人机附近的“忠诚僚机”，大型可消耗无人机XQ-58A目前选装1台现货涡扇发动机FJ33-5，但其价格占总成本目标的40%，且FJ33-5涡扇发动机大修时间间隔达到3500h，远远超出了XQ-58A飞机200~300h的飞行要求，无法达到其寿命和成本目标。

研制新进展

为适应作战模式不断演变下的飞行器动力需求，2018—2026财年，AFRL计划通过经济可承受任务（ATTAM）项目的先进涡轮技术，在涡喷发动机研究领域投资7.25亿美元，研发一系列用于下一代高、中、低功率涡轴发动机和战斗机发动机的技术。为了满足未来发动机支撑更多电力系统、定向能武器、功率更大的传感器等需求，同时提高推进效率和飞行器自身的能量水平，纳入了综合能量与热管理技术要求。包括波音、克雷托斯、GE航空、霍尼韦尔、洛马、诺格、普惠、罗罗和威廉姆斯国际等在内的9家公司

收到了关于小型涡轮发动机研发的ATTAM第一阶段合同。

克雷托斯公司在2019年2月收购了佛罗里达涡轮技术(FTT)公司、成立新的克雷托斯涡轮技术(KTT)分部后,加速推进小型发动机项目研发,发展用于下一代战术武器和战术无人机的小型发动机,适装于比“捕食者”无人机还小的飞行器。KTT分部正在考虑将新发动机的最大推力定为4.5kN,用3D打印技术制造独特的轴承,可减少涡轮增压器对燃油量的需求,同时有助于简化发动机结构,使之更易维护且降低故障发生率。此外,KTT分部也在3D打印更轻的换热器,可在排气过程中回收热量,并将其再用于提升进气温度,使燃料更易燃烧。目前,克雷托斯公司的新型发动机尚未研发完毕。

2019年11月8日,AFRL宣布其在13个月内完成了一台小型涡喷发动机的设计、制造和测试,并于11月6日在其总部莱特-帕特森空军基地进行了首次测试。这台小型涡喷发动机又被称为“快速反应开源发动机”,既要做到快速开发,同时通过“开源”的方式,将其制造交给美国的制造商。虽然美国空军拥有这种小型发动机的设计和知识产权,但一旦完成发动机测试和鉴定,空军就放弃后续缓慢的研制和完善过程,将其交给低成本制造商,由制造商以更加经济的方式为美国空军平台进行小批量生产。这种开发成本与采购成本分开的新发动机研制方法可降低3/4成本。该发动机尺寸很适合小型无人机或巡航导弹,但AFRL尚未披露该型喷气发动机的推力额定值。AFRL表示,正在分析第一次发动机测试的数据,并计划建

造第二个更小、更轻的发动机版本。

2020年3月,AFRL宣布已与诺格公司、TDI公司合作测试了推力为890N的低成本涡喷发动机TDI-J85。作为美国低成本巡航导弹项目“灰狼”的产物,为提高产量,TDI-J85的设计着重于经济可承受性和可制造性。飞行测试中,TDI-J85发动机在高空进行了多次空中起动,达到了推力性能要求,燃油效率超过预期。AFRL接下来将利用最新的飞行测试数据将TDI-J85发动机集成到“灰狼”测试飞行器中。

2019年10月,普惠公司披露其短吻鳄工厂正在设计一型推力为3.1kN、可用于下一代巡航导弹或战术无人机的发动机,其成本必须达到空军设定的10万美元以下的目标,服役寿命约为20次任务。短吻鳄工厂只有15名工程师,在借鉴TJ150发动机的部分核心机技术基础上,采用数字工程和增材制造来迭代该发动机设计。在不到一年的时间里,新的核心机完成了设计、制造和试验。新的核心机还可用于包括亚声速和超声速飞行器在内的多种用途,燃油效率至少提高了10%,成本比当前至少低30%。

2020年8月,罗罗公司的自由工厂也宣布在不到一年的时间内,完成了从小型低成本燃气涡轮发动机原型机设计到核心机台架试验的过程,该核心机可缩放设计,制造和材料技术能满足美国国防部对有限寿命或可消耗发动机的大量要求。罗罗公司表示,对于该验证机而言,可缩放和负担得起是两大关键因素,在设计制造过程中,主要通过创新方法设计每一个部件,用增材制造技术减少零部件的数量,

令成本最小化。将小型发动机演示验证作为基准分析工具和模型,可缩短未来小型发动机解决方案设计时间。

另外,在超燃冲压发动机和涡轮基组合循环发动机方面,包括航空喷气-洛克达因、洛马和诺格在内的30余家企业都对Mayhem计划作出了回应。其中,诺格公司和航空喷气-洛克达因公司在AFRL的中等尺寸关键部件(MSCC)计划下研发的大推力超燃冲压发动机分别于2019年8月和2020年12月完成了为期9个月和12个月的地面试验,都获得了超过57.8kN的推力。而美国国家航空航天局(NASA)和DARPA都在进行涡轮基组合循环发动机的研究,DARPA表示在与洛马及航空喷气-洛克达因等公司合作下,已经对进气口、涡轮和喷管等部件进行了测试,将在不久的将来测试双模冲压喷气发动机。目前,美国空军尚未明确Mayhem的动力方案。

结束语

在军费有限的大前提下,为了应对大国竞争,美国及其他国家的军队作战模式向分布式作战、多域联合作战转变,需要大量可消耗、低成本飞行平台及自主协同作战软件,以美欧为代表的国家和地区已开展了多项针对性研究,取得了一定的进展。在此基础上,其低成本动力的需求也不容小觑,简化设计,并采用快速研发模式(低成本设计、增材制造和数字工程),都是实现低成本动力的捷径,可供参考。

航空动力

(李龙,中国航发涡轮院,工程师,从事航空发动机设计和试验情报研究)