

# 美国海军舰载无人空中加油系统项目及动力

## U.S. Navy Carrier-Based Unmanned Tanker MQ-25 and It's Engine Selection

■ 李明/中国航发研究院

美国海军MQ-25舰载无人空中加油系统项目终将花落谁家？是选用罗罗公司AE3007N涡扇发动机的波音公司，还是采用GE公司F404涡扇发动机的洛克希德-马丁公司，亦或是采用普惠加拿大公司PW815涡扇发动机的通用原子公司？

美国海军MQ-25“黄貂鱼”舰载无人加油机项目的竞争已进入重要时刻。4月5日，波音公司公布了参与竞标的样机，并选用一台罗罗公司的AE3007N涡扇发动机作为动力，推力为40kN。借此动力装置，该样机已完成跑道上的机动，用以模拟航母甲板上的滑行。4月9日，洛克希德-马丁（洛马）公司公布了竞标方案，其动力装置选用GE公司的非加力型F404涡扇发动机，推力约为44kN。今年2月，通用原子公司公布了竞标方案，动力采用普惠加拿大公司的PW815涡扇发动机，推力为71kN，并于4月5日在MQ-25无人机的进排气模型上测试成功。自此，最终参选美国海军“舰载无人空中加油系统”（CBARS）项目MQ-25原型机的三个方案及其动力装置已全部揭开面纱。

### 美国海军舰载固定翼无人机项目发展历程

近20年来，美国海军舰载固定翼无人机的预先发展进行了多次调整，先后经历了海军无人作战飞机项目



波音的MQ-25方案为F/A-18E加油想象图

（UCAV-N）、联合无人作战系统项目（J-UCAS）、无人作战飞机系统验证项目（UCAS-D）、舰载无人空中监视与打击项目（UCLASS）和舰载无人空中加油系统项目（CBARS）等五个发展阶段。

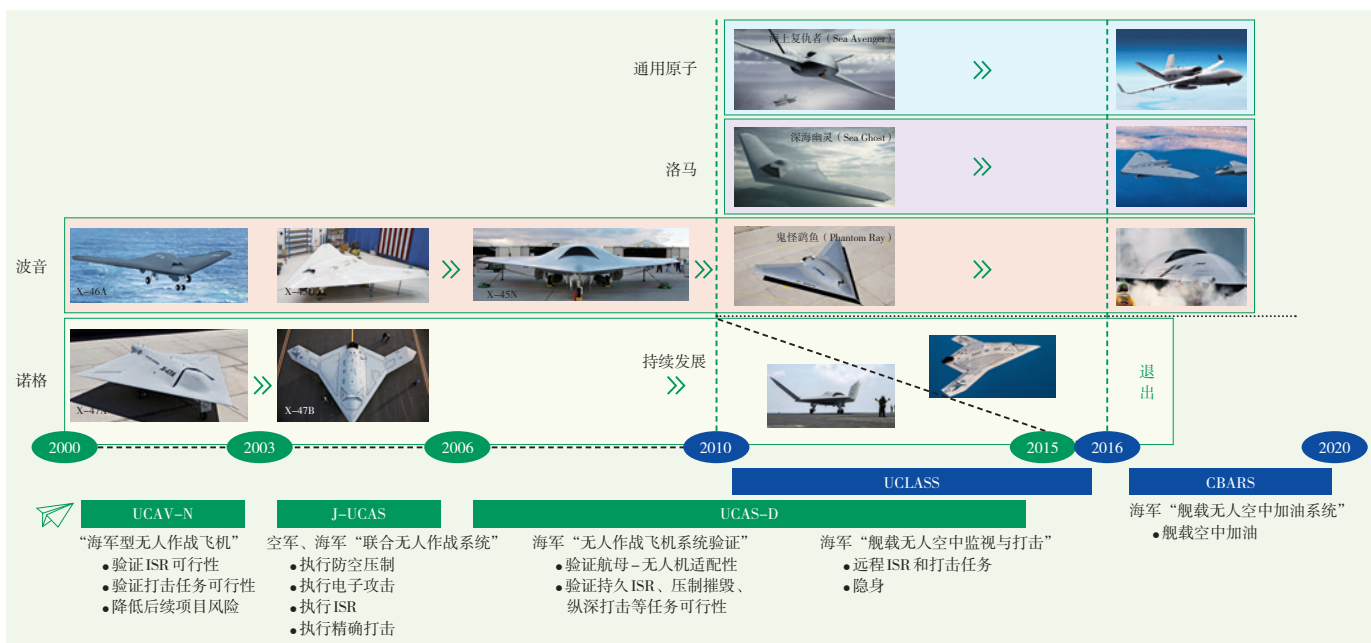
### 海军无人作战飞机项目（UCAV-N）

2000年6月，美国海军和美国国防预先研究计划局（DARPA）率先启动舰载固定翼无人机的研制，即海军无人作战飞机项目，旨在验证执行监视、打击和压制敌方防空任务能力，以及在航母上起降的技术

可行性，2003年4月项目结束。期间参与竞争的方案有波音公司的X-46和诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司的X-47A，其中X-47A实现首飞。项目成功验证了低速飞行品质、飞行性能、模拟拦阻着舰等关键技术，验证了海军无人作战飞机的可行性，降低了后续无人机发展项目的风险。

### 联合无人作战系统项目（J-UCAS）

2003年10月，在DARPA领导下，美国空军和海军将各自的无人作战飞机发展计划整合为联合无人作战系统，组织研发能同时满足海军和空军



美国海军舰载固定翼无人机发展历程

的无人作战飞机：不仅要成为纵深打击平台，而且还要成为大型长航时平台，能携带各种重型武器；可同时执行对敌防空压制、电子攻击、情报监视侦察（ISR）以及精确打击等多种任务。在该项目下，波音公司和诺格公司分别研制了各自的验证机X-45C和X-47B。其中，X-45C类似于波音公司为空军研发的X-45A，但体积更大、航程更远；X-47B则在X-47A的基础上放大，并延长了机翼，改变了进气道和尾喷管形状。

2006年2月，美国国防部决定空军、海军无人作战飞机分型发展，联合无人作战系统项目被取消。在此期间，无人作战飞机性能指标有较大提升，对无人作战飞机的使用模式、作战效率、空中加油等技术也进行了一定的研究和评估。

### 无人作战飞机系统验证项目 (UCAS-D)

无人作战飞机系统验证的主要目的是验证航母是否能安全、有效地使

用无人作战飞行器，以及验证无人作战飞行器是否能满足美国海军在远航、久航和生存能力方面的潜在需求。主要包括舰载起降过程、甲板处理及支持、空中加油、编队飞行等。

2007年2月，美国海军发布项目招标书，诺格公司、波音公司凭借各自在J-UCAS项目中的技术储备，分别推出竞争方案。波音公司的方案是X-45N，由X-45C放大改进而来，但未摆脱其最初为高隐身攻击任务而设计的影子；诺格公司则是X-47B，由于该无人机一开始就是为海军需求设计，在续航时间和作战半径上均胜X-45N一筹，故赢得竞标，在后续试验中完成了自主空中受油、航母起降、编队飞行等任务。

### 舰载无人空中监视与打击项目 (UCLASS)

在UCAS-D项目开展的同时，美国海军于2010年3月向工业部门发布了信息需求和正式的信息征询书 (RFI)，表示海军将在10年内研制

舰载无人空中监视和打击 (UCLASS) 系统，该系统由无人机、任务系统和远程控制系统组成。其中，无人机除执行持久的ISR和精确打击能力外，还具备为其他飞机加油的能力，以保证航母打击群和舰艇编队能够持续获取所有维度战场空间的态势和信息，对其中最重要和最具威胁的目标实施打击。

2011年6月，通用原子公司、洛马公司、诺格公司、波音公司分别获得美国海军资助，开展先期研究，包括作战概念论证、可选方案分析以及相关技术成熟度和可行性分析等，以使海军在项目进入技术研发阶段前能更好地了解各种设计的性能以及风险。

洛马公司采取了与RQ-170“哨兵”隐身无人侦察机类似的设计——“深海幽灵”(Sea Ghost)，并充分利用RQ-170、F-35的成熟技术及经验；通用原子公司采用的是“海上复仇者”(Sea Avenger)，由“捕食者-C”

无人机衍生而来；诺格公司的方案是X-47B的衍生型；波音在前期X-45C的基础上，提出“鬼怪鳐鱼”(Phantom Ray)，并完成了试飞。

然而，在项目推进过程中，美国海军、国会及部分专家对UCLASS无人机的主要用途存在分歧，就ISR、打击、空中加油等任务能力一直存有争论，项目最终特征不能确定，未能发布招标书，没有取得实质性进展。在2017财年的国防预算提案中，UCLASS项目被调整更名为“舰载空中加油系统”(CBARS)。

### 舰载空中加油系统项目(CBARS)

舰载空中加油系统项目包括航空部分、航母部分、控制系统及连接部分，计划到2022财年累计投入约25亿美元。航空部分即为无人机，旨在对其他航母舰载机提供自主空中加油服务，拥有部分ISR能力，同时有足够的尺寸、电力和冷却能力以携带海军侦察雷达，但不强调隐身性能和作战能力。计划2018年8—10月授出工程与制造发展(EMD)阶段合同，2023财年开始采购，总量最多72架，并于2025年左右形成初始作战能力(IOC)。

### MQ-25舰载空中无人加油系统竞标方案

2016年，美国海军正式将CBARS无人机命名为MQ-25“黄貂鱼”，并向诺格公司、洛马公司、波音公司和通用原子公司四家竞标公司授出总价值2.5亿美元技术成熟和风险降低阶段的合同，这四家公司同样是此前UCLASS项目参与单位。

2017年10月，美国海军向此四家公司发布MQ-25的最终需求建议书(RFP)，要求在3个月内提交竞标方案，随后用6个月完成方案遴选，而后一过程通常需要18个月。RFP要求无人机能携带不少于6800kg燃油在距母舰920km外对4~6架舰载机实施空中加油作业。该需求将使接受加油的舰载机有能力进行纵深打击，或扩展航母编队的防空警戒、截击和反潜区域。与F/A-18E/F搭档，有望将其任务半径从目前的725km延伸至1300km以上。对F-35C而言，作战半径能从1111km提高到1689km，成为作战半径最大的舰载机。

2018年4月，被普遍认为最有实力的竞争者诺格公司退出竞标，据分析，应该是其X-47B的设计与纯加油机的要求不太符合，项目提供的经费

无法满足研发和生产投入，存在“大材小用”“无利可图”的问题。其余公司先后公布了各自的竞标方案。

通用原子公司采用了基于“海上复仇者”无人机的传统“翼-身-尾”设计，包括传统机身、机翼、V形尾翼、背负式进气道，隐身性能一般，但航程和载荷能力突出，同时预留了能力增长空间。

波音公司的方案采用大倾角V形尾翼、与机身平齐的背负式进气道、扁平化机身，一定程度上保留了其UCLASS方案“鬼怪鳐鱼”的特点，具有一定隐身能力。与另外两家不同，波音公司已经制造了样机，并开展了航母甲板的模拟测试、全尺寸发动机测试等大量首飞前的准备工作。

洛马公司延续了在UCLASS中的“深海幽灵”方案，采用无尾飞翼布局设计，选用椭圆形进气口和直列式发动机布局，该设计可容纳大量燃油，具备较好的隐身性能，以及扩展ISR能力和打击能力的空间。洛马公司在其竞标宣传片中特别展示了ISR和打击能力。

三家的方案，基本都继承了前期项目的成果，针对加油功能需求进行了适应性设计，甚至直接将成



通用原子公司概念方案



波音公司实物样机





洛克希德-马丁公司概念方案甲板起降想象图

熟部件拿来就用。例如，洛马公司的方案就直接利用了70多个美军投资项目的技术成果，以及洛马公司其他内部投资研发项目的成果，起降架直接来自F-35C。这样可以尽量降低风险，能够快速形成装备。

## MQ-25舰载空中无人加油系统动力需求及竞标方案分析

### 动力需求分析

根据需求建议书，MQ-25无人机的关键性能参数只有两个：舰机适配性和空中加油能力，并未强调隐身、侦察和打击能力，与此同时，美国海军希望能加快部署进度，2020财年交付首架原型机，2025年形成任务能力。根据这些要求，无人机动力首先要推力大、油耗低，不强调隐身性能使得采用大涵道比涡扇发动机成为可能；为了控制项目的进度和成本，所选用的动力一定是基本成熟的货架产品，可供选

证机直接使用，这样，自然就倾向于民用公务机或支线客机用发动机，可以解决安全性、维修性等一系列问题；而对于舰载适配性，可以后期根据需求进行适应性改进，如舰载“三防”、抗大过载设计等。

### 波音公司采用的AE3007N发动机

AE3007由罗罗北美公司（前艾利逊公司）研制，1995年取得美国联邦航空局（FAA）适航证，主要用于支线飞机和大中型公务机，已被“全球鹰”高空长航时无人机及其衍生型号选用，已交付逾3400台，



AE3007发动机

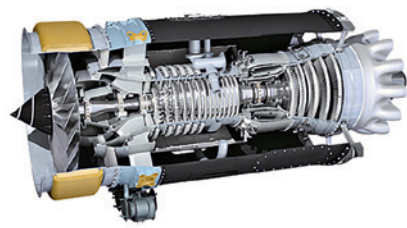
累计飞行超过7000万小时。

波音公司选用该型发动机应该是基于以下考虑：推力适中，30~40kN的推力范围，可满足飞机推力要求；低耗油率，由大涵道比保证；高可靠性，原为客机设计，已大量投入使用，安全可靠基本不存在问题，后续的维修保障也很有优势。

### 通用原子公司采用的PW815发动机

该发动机是普惠加拿大公司最新研制的PW800系列中的一型，主要针对远程、高速公务机设计，是加拿大普惠公司迄今为止开发的推力最大的涡扇发动机。PW815在2012年首次运转，2017年取得FAA适航证，被湾流公司的G600公务机选用。

作为新一代涡扇发动机，采用了单级整体叶盘风扇、先进燃烧室、全权限数字式电子控制（FADEC）系统等新技术，以及钛合金、复合材料等轻质先进材料。所以在燃油效率、污染排放和噪声方面性能优异，代表了普惠最先进的环保设计技术。



PW815发动机

### 洛马公司采用的F404发动机

F404是GE公司20世纪60年代研制的小涵道比加力式涡扇发动机，根据海军经验要求设计，具有突出的可靠性和维修性，已在数十个国家的空海军得到应用，包括F/A-18、T-50教练机、F-117、“鹰狮”和“光

辉”等飞机，装配数量超过3750台，还曾被波音公司选作X-45B/C无人作战飞机动力。

基本上，该发动机主要作为战斗机/攻击机动力使用，而洛马公司选其非加力型作为无人加油机动力，放弃了UCLASS方案采用的TFE731/TF34中大涵道比发动机，或许是基于与F/A-18舰载机动力通用性考虑，同时满足无人机扩展打击能力的需要。

## 动力方案对比分析

三型发动机性能参数对比如表1所示。在推力上，AE3007与F404基本一致，但都只能达到PW815的60%。与大涵道比的PW815、AE3007相比，F404非加力型耗油率要高出26%~60%，推重比则基本相当。

相比而言，通用原子公司可以凭借PW815发动机的大推力、低耗油率，使其方案在航程或运载能力上占据绝对优势；AE3007的采用使得波音公司的方案能够满足海军的基本需求，并具有一定隐身性能。而洛马公司的动力选择更倾向于隐身和机动性，高耗油率将影响其航程和载荷，同时由于使用F404发动机的F/A-18C/D即将结束航母部署，该机上舰后的维修通用性将会失去意义。

从三家的方案和动力选择可发现：通用原子公司完全是针对当前的加油要求设计，但大推力发动机

也可使其具有一定ISR能力；波音公司则基本按照建议书的要求设计，具有可拓展ISR的能力，但空间有限；洛马公司则主要针对未来作战能力，顺便满足当前加油功能。至于最后的中标结果，还是取决于美国海军对未来舰载无人机的真实规划。

## 舰载无人机动力发展分析

### 能力需求和资源投入决定了无人机技术转化的结果

针对全球军事力量的迅速崛起，美国的应对措施是：针对实时需求，迅速将技术转化为武器装备，形成战斗力。考虑亚太再平衡战略以及相关国家的反介入/区域拒止能力增强，美国海军一直致力于推动无人作战飞机上舰。但经过前几个验证项目，无人机执行作战任务的能力尚不成熟，同时，鉴于经费预算的掣肘，最终对舰载无人机的追求落脚到了加油机，实乃权宜之计。这样，一方面将近20年技术积累迅速转化成实际战斗力，应对需求；另一方面借此积累实际运行经验，便于在后续拓展应用范围。当然，美国海军不会就此止步，MQ-25只是一个阶段性小结，后续的持续发展归根结底是由任务需求决定的。

### 小批量快速采办项目需要成熟货架产品的支撑

MQ-25从发出工程与制造发展合

同，到2021财年计划首飞，最快只有3年时间，且采购数量最多只有72架，时间和体量上都不可能研发全新的发动机，这就决定了动力只能选择比较成熟的货架产品，进行适应性改进行生。从几家的选择来看，都采用了保有量比较大的现有发动机、或者民用市场容量较大的机型。波音公司和洛马公司的动力选择显而易见；而通用原子公司采用一型新发动机的原因，主要也是基于方案原型“海上复仇者”的发动机（PW545B）性能不足的考虑，需要一型高性能发动机满足能力需求，而且PW815发动机也是采用大量成熟技术，已被市场认可，基本不存在技术风险。这也为小批量快速采办项目指出了一条可行的途径，但需要背后庞大的民用市场支撑，是军民融合、寓军于民的典范。

### 舰载无人机动力根据任务要求选用不同类型发动机

从UCLASS到MQ-25，动力系统无一例外地均选择了涡扇发动机，可以看出涡扇发动机因其推力范围广、耗油率低、可隐身化处理、可高空高速使用等综合性能较好，技术相对成熟、谱系较为完善的特点将成为中大型无人机动力的首选。但选用什么类型的发动机还要由无人机自身的任务需求决定，以执行ISR和攻击任务为主的UCLASS项目大都选用中小涵道比涡扇发动机；而以加油为首要目标的MQ-25则更多选择大涵道比涡扇发动机，因此，对于特定类型发动机的需求也不会一成不变，需要及时根据使用环境和能力体系变化做出应对和调整。

**航空动力**

（李明，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究。）

表1 性能参数

型号	推力/kN	涵道比	推重比	巡航耗油率/(kg/(N·h))
PW815	71	5.5	5	≈ 0.054
AE3007	40	≈ 4.9	5	0.068
F404	44(无加力)	0.34	≈ 5	0.086