

美国协同作战飞机及其动力发展分析

Development of USA Collaborative Combat Aircraft and Powerplants

■ 李龙 / 中国航发涡轮院 沙绍智 / 中国航发研究院

美国从2016年开始研制低成本可消耗无人机，至2022年已经有忠诚僚机交付美国空军进行飞行试验。在这个过程中，美国忠诚僚机（Loyal Wingman）的发展思路也发生了变化，从追求单一装备多性能向多架不同作战性能装备协同化转变，相应地，动力发展思路也发生了转变。

美国空军部长弗兰克·肯德尔在2023年3月7日的空军协会战争研讨会上表示，空军将向国会申请在2024财年预算中提供资金，推进协同作战飞机（CCA）项目和下一代空中优势（NGAD）战斗机项目研究。未来美国空军可能部署1000架CCA，其中400架为200架NGAD战斗机服务，剩下的600架由F-35战斗机指挥作战。此前，肯德尔已将在美国空军未来机队中运用CCA列为首要任务之一，CCA将执行包括情报、监视和侦察（ISR）、打击和电子战在内的多项任务，以相对的低成本执行危险任务。

CCA的快速演进

肯德尔在2021年12月的一次公开讲话中披露将为NGAD战斗机配备协同编组作战无人机，即协同作战飞机，该无人机的成本将为NGAD战斗机的一半，这是CCA项目第一次进入公众视野。

2022年5月，肯德尔进一步透露了CCA项目的细节，提出项目旨在研发可与现役和在研作战飞机协同的新型无人机，仅需飞行员发出有限指令，即可自主执行侦察监视、火力打击、电磁干扰和空射诱饵等

任务。该无人机强调模块化与低成本，可针对不同需求快速换装有效载荷，提升作战任务灵活性，同时采用数字工程方法、复合材料和先进制造技术，成本不超过F-35A的一半（约4000万美元），通过数量规模打造效费比优势。随着“天空博格人”（Skyborg）自主核心系统、空战进化（Air Combat Evolution）智能算法和忠诚僚机等关键支撑技术已具备较高成熟度，CCA项目很可能跳过冗长的演示验证阶段，直接进入工程和制造发展阶段，达到加快研制进度的目的。

2022年9月，肯德尔在2022年度空天网研讨会上再次提到CCA项目，称每架NGAD可指挥1~5架CCA，CCA可自主完成任务，但发射武器仍由战斗机飞行员控制。美国空军计划在2024年把CCA列入秘密预算中，开启项目竞争，除此之外并未透露更多细节。2022年11月，美国《空军杂志》（现《空军及太空军杂志》）报道称，美国空军部负责科学、技术和工程的助理部长克里斯腾·鲍德温此前宣布空军“先锋”项目（Vanguard Program）下的“天空博格人”和“金帐汗国”（Golden Horde）项目将在2023财年转化，并纳入CCA项目。

在美国军方陆续透露项目信息的同时，各大供应商早已摩拳擦掌，准备在2024年开始的CCA项目竞争中拔得头筹。除了早前波音公司的MQ-28A“幽灵蝙蝠”（Ghost Bat）无人机和克雷托斯（Kratos）公司处于生产型试飞状态的XQ-58A有可能竞争CCA项目外，通用原子航空系统公司和洛克希德-马丁（洛马）公司也提出了新的无人机系列产品发展计划。相较于MQ-28A和X-58A将所有功能集于一身的单一装备形式，通用原子系统公司的“弃兵”（Gambit）系列（见图1）和洛马公司的卡雷拉项目（Project Carrera）都倾向于将作战功能分散到不同无人机的研制理念，更加强调降低成本、分布式和系统簇特点。

“弃兵”系列无人机

在2022年5月肯德尔透露CCA项目细节后，通用原子航空系统公司快速反应，同年9月发布了“弃兵”系列无人机的具体方案图。该系列无人机初始设计包含4种基本型号，采用通用的起落架、基本航电设备等硬件，可根据不同的任务定位配置发动机、机翼、任务传感器等，以有效降低单机成本、提高互用性，并可根据技术发展和任务需要快速

组合发展出新机型。

作为长航时态势感知平台，“弃兵”-1采用大展弦比设计，并使用低油耗发动机，以提升在指定空域的续航时间，该无人机可伴随其他无人机，或作为有人机的“耳目”在战术边缘获取战场态势信息，提供预警监视能力，也可使用无源传感器实施协作跟踪，对敌方目标进行定位，减小己方高价值平台暴露风险，提升其战场生存能力。“弃兵”-2是察打一体平台，续航和巡航速度都低于“弃兵”-1，但配备有空空导弹，通过多架组队的模式，可使用红外传感器从不同角度和高度对敌方前沿空域进行探测，监视战斗机活动轨迹，通过人工智能和机器学习等技术制定打击战术，该无人机的优势是可在第一时间进行探测与响应，在不损失飞行员的情况下，给在该空域的有人战斗机一定预警时间和决策空间。作为假想敌空战训练平台，“弃兵”-3外形上与“弃兵”-2相似，仅针对复杂战场环境进行一定优化，作为“红队”与美国空军防空系统、隐身战斗机等先进作战系统进行对抗，通过深度学习等技术模仿对手战术战法，并在每次对抗中不断调整、提高，

从而在保持训练强度的同时，有效节省假想敌机队有人机等高端平台服役寿命，降低训练维护成本。“弃兵”-4是一型隐身穿透侦察平台，采用飞翼布局构型，可在强对抗环境中执行持久ISR任务，替代RC-135侦察机等老旧平台组成更具生存力且成本更低的感知网络。

通用原子航空系统公司“弃兵”系列无人机方案将原属于忠诚僚机的作战功能分散到不同的无人机平台上，作战时强调自主协作，整体上体现了一种低成本、系统化和通用化的发展思路。

卡雷拉项目

基于单一的忠诚僚机装备无法按照预期对有人战机产生实质性的任务影响，而特定角色运行的分布式无人机团队更能提高有人-无人协同作战效能的认知，洛马公司于2022年7月详细介绍了一种全面的多层、分布式有人-无人空战概念的愿景，展示了4种无人驾驶平台，如图2所示。这些无人机将配合F-35和NGAD战斗机，形成不同的有人-无人机分布式协同作战编组，应用于穿透防空强国的综合防空系统。其中，通用多任务平台（CMMT）无

人机与X-61A类似，由其他无人机投放，并以十几架为一组的蜂群形式执行多种任务；战术性可消耗作战飞行器（TE-CAV）类似于具有隐身能力的巡航导弹，可伴随F-35等战斗机作战，扩大战斗机在高威胁区执行对空作战的火力范围；第三种无人机作为空中通信枢纽，加强作战编组各装备之间的联通；最后一种下一代无人航空系统（NGUAS）相当于RQ-170无人机的增强型，执行ISR任务。

2022年9月，洛马公司正式提出了自己的有人-无人协同作战方案卡雷拉项目。设想在大约10年后的战场上，一架C-130运输机放下一个装有小型消耗性无人机的货盘，无人机弹出并立即开始飞向F-35编队。当F-35飞行员飞向敌方地对空导弹基地时，向其控制的无人机发出收集数据等指令，根据一些无人机收集的数据，飞行员会收到可能的威胁警报，并使用来自前方侦察的其他无人机的信息建议更改路线。卡雷拉项目预计投资1亿美元，其中2000万美元用于升级F-35和开发无人机；4200万美元用于编组作战使能技术开发，包括人工智能开发和信息联网等开放式架构技术；3800万美元用于战场空间倍增器，包括低地球轨道卫星和穿透性前向生存平台。项目中的无人机为模块化通用多任务飞行器，可根据任务定制载荷能力，代替有人机完成渗透性任务，其发展思路与通用原子系统公司类似。

后续，洛马公司将开展“竞速者”（Speed Racer）无人机与F-35战斗机联合飞行试验。作为“卡雷拉项目”的低成本实验性设计，“竞速者”无人机采用数字工程和先进



图1 通用原子系统公司“弃兵”系列无人机



图2 洛马公司有人-无人协同作战场景

制造技术，具备模块化结构，简单配置后可完成不同任务。

CCA的后续走向

根据美国空军的计划，CCA项目很可能在2024年正式开始竞争，纵观当前已经披露且符合项目需求的无人机方案，克雷托斯公司的XQ-58A“女武神”、波音公司的MQ-28A“幽灵蝙蝠”、通用原子航空系统公司的“弃兵”系列和洛马公司卡雷拉项目都有可能中标。

XQ-58A“女武神”项目源自美国空军2016年启动的低成本可消耗打击验证机(LCASD)项目，2019年成功试飞，目前处于生产型机型交付空军试飞的阶段。此外，2022年12月，美国国防部公告称美国海军已经签订合同购买两架XQ-58A作为其“穿透型、经济型自主协同杀手”项目的装备之一，合同要求在2023年9月30日前完成交付，涉及生产和交付无人机，以及相应的传感器和武器系统等。相对于其他3种方案，就技术成熟度而言，XQ-58A处于领先地位。

MQ-28A“幽灵蝙蝠”源自波音公司和澳大利亚合作的“空中力量编组系统”(ATS)项目，于2019年3月启动，截至2021年11月已有两个架次的原型机首飞，2022年重点测试了传感器和任务化能力。

此前，洛马公司对有人-无人编组作战进行了模拟，结果表明在高威胁区作战时，单一的忠诚僚机装备并没有对任务过程做出重大贡献，反而在穿透敌防空系统时有可能将整个编队置于危险中；此外，洛马公司认为，能与有人机的性能匹配的无人机成本较高，并不适合“消耗”性作战应用。基于上述原因，洛马公司决定放弃单独的忠诚僚机概念，而将其任务能力分散到性能和成本各有不同的多种无人机中。按照洛马公司的计划，其低端无人机可在未来3~4年内部署，特别是列装美军驻印太地区部队，而更宏观的未来空中作战“分布式方案”将伴随美国空军NGAD服役，在本世纪30年代成熟。

通用原子航空系统公司尚未公布“弃兵”系列无人机发展时间表。

该公司此前参与了美国国防预先研究计划局(DARPA)的X-61A“小精灵”项目的竞争，虽在竞争中败给了Dynetics公司，但公司在无人机方面经验丰富，包括MQ-1B“捕食者”(Predator)、“捕食者”C(Predator C)、MQ-9“死神”(Reaper)和MQ-1C“灰鹰”(Grey Eagle)等在内的多型中、高空长航时察打一体机都曾在战场上立下赫赫战功，实力不容小觑。

在公司实力和产品进度相当的前提下，CCA项目后续花落谁家将以项目任务发布方也即美国空军的具体需求为准。根据美国空军最近透露的项目细节，目前并未完全限定在作战中单架有人战机与无人机的具体配比，可能是一架，也可能是多架，这意味着目前几家公司的方案都有胜算；另外，从交付时间上而言，美国军方可能会采取当年“全球鹰”无人机的采购方案，直接进入工程研制阶段，边使用、边改进，这表明军方希望相关无人机产品能够尽快交付，这可能是项目花落谁家的决定性因素；最后，成本也是军方关注的重点因素，毕竟项目的出发点是以相对低的成本提升作战效能，XQ-58A和MQ-28A的成本目前都在200万~300万美元左右，“弃兵”和卡雷拉项目无人机的成本尚未公布，单台无人机的成本不会太高，如何在不超出总成本的前提下，权衡各型无人机成本分配将是洛马公司和通用原子航空系统公司要重点考虑的问题。

CCA的动力需求

据克雷托斯公司透露，XQ-58A采用威廉姆斯公司的FJ33-5小型双转子涡扇发动机作为动力，该发动机推

表1 与CCA项目系统簇无人机作战功能接近的无人装备动力

序号	无人装备	动力装置	动力类型	推力/功率	耗油率/(kg/(daN·h))	价格/万美元
1	RQ-170	TFE731、TF34	双转子齿轮传动涡扇发动机、 双转子涡扇发动机	15.27 ~ 21.81kN、 39.52 ~ 40.50kN	0.441 ~ 0.527、 0.378 ~ 0.385	100 ~ 173
2	RQ-4	AE3007H	双转子涡扇发动机	36.17kN	0.344 ~ 0.694	175 ~ 190
3	“捕食者”C	PW545	双转子涡扇发动机	13.08 ~ 17.41kN	0.454 ~ 0.494	78 ~ 98
4	XQ-58A	FJ33-5	双转子涡扇发动机	8.32kN	—	40 ~ 43
5	AGM-129A	F112-WR-100	双转子涡扇发动机	3.24kN	—	10 ~ 19
6	X-61A	F107	双转子涡扇发动机	0.65 ~ 6.10kN	0.611	10 ~ 19
7	MQ-9	TPE331-10GD	涡桨发动机	701.0kW	—	35 ~ 44
8	MQ-1B	Rotax914F	四缸四冲程涡轮增压活塞式发动机	84.5kW	—	—

力8.32kN，技术成熟，运行成本低，2011年单台价格在40万~43万美元。据波音公司称，MQ-28A采用的是商用涡扇发动机，根据进气口和喷管的尺寸，推测为小涵道比无加力涡扇发动机。综合XQ-58A和MQ-28A动力来看，如果CCA项目选用单台忠诚僚机方案，其动力需求为小涵道比无加力涡扇发动机。

而洛马公司和通用原子航空系统公司的方案则截然不同。二者考虑将单台忠诚僚机的功能分到多台无人机上，形成“隐身ISR无人机(类似于RQ-170)+战术性可消耗作战飞行器(类似于隐身巡航导弹)/察打一体平台+通用多任务平台(类似于X-61A蜂群无人机)/长航时态势感知平台+通信中枢无人机/假想敌空战训练平台”的无人机簇。鉴于目前洛马公司和通用原子航空系统公司无人机系统簇停留在方案阶段，技术参数尚未完全明晰，只能通过已经服役且功能相近的无人装备动力(见表1)对动力需求进行推测。

从已经服役的无人装备的动

力不难看出，具备隐身/察打一体/长航时侦察等功能的无人机动力基本以中等涵道比中小推力涡扇发动机为主，究其原因，是这些装备要求高空、隐身、长航时和一定的机动性。隐身性限制了发动机涵道比不能过大，长航时要求发动机省油，适当扩大涵道比有益于发动机省油，中等涵道比涡扇发动机是首选；对飞行高度要求不高的长航时中空装备的动力则涉及了涡桨和活塞式发动机，因为涡桨和活塞式发动机的耗油率较低、运行成本也低，但飞行高度不佳，所以适用于中空长航时中空装备；而具备态势感知、空中打击功能的小型可消耗无人装备动力主要是小涵道比小推力涡扇发动机。综合考虑CCA项目的装备功能需求，未来CCA项目的动力需求将以中小涵道比中小推力涡扇发动机为主。

结束语

美国空军近年来大力发展有人-无人装备协同作战模式，从最开始验证有人-无人协同作战核心自主系统的“天空博格人”计划、验证低成

本装备的低成本可消耗打击验证机(LCASD)计划、机外感知站(OBSS)计划，到后来的CCA项目，探索热情持续高涨。而对相关低成本可消耗装备的探索，从最开始单价200~300万美元的单一忠诚僚机装备，到后续成本占NGAD战斗机一半的无人机系统簇，体现了美国空军在满足作战功能和降低装备成本之间的权衡。在这个过程中，为了以较低成本实现作战效能，美国空军提出了模块化的无人装备发展模式。动力作为占据飞机装备约1/3成本的高价值模块，研制时可参考相应飞机装备的发展模式，以一型涡扇发动机作为基准，通过增大或缩小涵道比、增加或减少压气机级数或压比的方式发展出无人机系统簇所需的全部动力。同时，考虑到动力研制时间一般长于飞机研制周期，研制单位如能积极关注飞机装备发展趋势，将有利于动力装置的提前布局，占据相关市场。

航空动力

(李龙，中国航发涡轮院，高级工程师，主要从事航空发动机情报研究及技术论证工作)