

美国忠诚僚机及其动力发展分析

The Development of Loyal Wingman and Powerplant

■ 赖耀胜 李龙 / 中国航发涡轮院

美国忠诚僚机（Loyal Wingman）的研制方向随着装备发展的需求变化，正从传统意义上的低成本转为相对意义上的低成本，其功能定位也从单纯的侦察、电子战和对地打击的无人机转向了对空、对地打击能力较强的无人战斗机，总体上体现了美国空军有人/无人装备协同的体系化作战思想。

忠 诚僚机（Loyal Wingman）指具有自主性的无人作战飞机，可执行对空对地攻击、诱饵、电子战、情报/监视/侦察等多种任务，能以较低成本实现更强的空中作战能力，是无人机向主战方向发展的代表机型。在具体装备运用上，作为僚机的无人机具有以下优势：可以携带机载武器，充当有人机的弹药库；可以携带传感器，为有人机的协同打击提供目标指示和导引；可以携带电子战载荷，为有人机提供电子支援。随着军事作战需求的发展和演变，其作战样式也不拘一格，可由一架长机随行多架不同功能僚机协同作战。



无人忠诚僚机和有人战斗机协同作战示意

2021年年底，克雷托斯公司表示将开始向美国空军交付第一批“女武神”验证机，但截至目前未有后续的相关消息。“女武神”无人机初始设定成本为200万~300万美元，尽管后来成本上升到300万~400万

XQ-58A “女武神” 低成本可消耗无人机

2015年，美国空军研究实验室（AFRL）启动了低成本可消耗打击验证机（LCASD）项目，美国克雷托斯（Kratos）公司的XQ-58A“女武神”中标，并在随后的两年半时间内完成了第一架验证机的首飞。2020年年底，XQ-58A完成了与F-22和F-35战斗机的编队飞行，担任了这两型战斗机的通信中继机；



XQ-58A “女武神” 无人机

美元，但相对于美国几型有人战斗机上亿美元的单价，价格可谓是相当低廉，是传统意义上的“低成本忠诚僚机”，但也意味着其功能相对于有人战斗机会比较有限，“女武神”的功能主要包括诱饵、侦察、通信中继、对地攻击和电子战干扰，基本不具备对空作战能力，这也是美国早期忠诚僚机的主要发展方向。

“机外感知站”低成本无人机

2021年2月，作为低成本可消耗打击验证机项目的延续，美国空军研究实验室发布了一个新的低成本可消耗飞机项目，目标是开展“机外感知站”（OBSS）可消耗飞机飞行试验，继续验证其低成本设计和制造方法。OBSS无人机作为低成本可持续使用、深入高威胁区域获取目标信息、伴随五代机作战的忠诚僚机，将采用开放式架构，能够快速低成本投产。该型飞机寿命只有几年，只需要进行有限的外场维护，不需要返厂维修。由此可见，OBSS忠诚僚机仍然是传统意义上的低成本忠诚僚机。2021年10月，空军研究实



波音MQ-28A无人机

验室分别将1780万美元和1770万美元的成本加固定费用的项目竞争合同授予美国通用原子公司和克雷托斯公司，胜出的公司进行后续开发工作。为了响应OBSS项目，克雷托斯公司和通用原子公司分别在2022年1月和2022年3月公布了“魔王”（Demogorgon）和“弃兵”（Gambit）无人机系统。“魔王”无人机预计单价为800万美元，大约是生产型“女武神”的两倍；而“弃兵”是一个

采用数字工程设计的自主协作平台（ACP），可以加快上市时间，降低采购成本，并提供扩展和增强的态势感知能力。

“下一代空中优势”和B-21的忠诚僚机

2021年12月，美国国防部表示将在2023财年预算中编入两种无人作战飞机的研制计划，一种作为B-21隐身轰炸机的无人僚机，另一种则是“下一代空中优势”（NGAD）战斗机的忠诚僚机，成本最多为各自“长机”的一半。2022年3月，美国空军公布了B-21的忠诚僚机部分非保密性能参数，如亚声速巡航、航程不低于2780km、有效载荷不低于1800kg，以及可在敌方雷达、射频无源探测装置和红外传感器密集的环境中作战等。这表明该无人机将是一款大型远程无人机，能够实时支援有人机的作战。美国国防部同时表示，基于来自工业界的回应，目前仍有放弃为B-21提供半价无人



“弃兵”无人机

僚机的可能性；而对于NGAD，有人驾驶和无人驾驶飞机混合带来的成本效益更具确定性，不出意外，NGAD应该会配备无人僚机。

2022年5月，美国国防部表示，NGAD计划中的忠诚僚机——合作式作战飞机（CCA）可能会跳过技术成熟与风险降低（TMRR）阶段，直接进入工程研制（EMD）阶段。CCA将以“天空博格人”（Skyborg）项目的自主技术演示验证活动、国防预先研究计划局（DARPA）的“空战进化”（ACE）智能算法项目和波音公司MQ-28A无人机项目等为基础，从而加快研制进度。CCA预计可携带传感器、通信系统、武器、对抗系统和其他任务系统，有能力执行“全套战术行为”，以此推测，NGAD的忠诚僚机将是一架无人战斗机。

忠诚僚机由绝对低成本转为相对低成本

对于B-21来说，目前该机的单价目标为6.4亿美元（2021财年币值5.5亿美元），这意味着其无人僚机的单价约为3.2亿美元，相当于4架F-35A战斗机。对于NGAD来说，虽然美国空军尚未宣布项目中有人驾驶战斗机的价格，但根据美国国会预算办公室（CBO）2018年12月对“下一代空中优势战斗机”（PCA）的成本估算，NGAD的无人僚机单价约为1.5亿美元。上述两款僚机的成本已经远远脱离了传统的“低成本”范畴。

美国空军忠诚僚机经过多年发展，从最初有人改无人方案，到后续的快速新研低成本方案，直至最新的借助已有项目研究基础快

速研发方案，体现了美国空军快速采办和快速研发的思想，其平台功能也从电子战、对地攻击和侦察向全套战术能力升级。在对忠诚僚机的功能要求越来越高的同时，对成本的要求也渐渐发生了变化。起初美国空军研究实验室将低成本可消耗无人机平台定义为单价200万~2000万美元，如“女武神”最初的成本目标是200万~300万美元，但是B-21和NGAD的忠诚僚机单价都是上亿美元，明显已经不符合最开始的低成本定义。换一个角度看，B-21和NGAD的忠诚僚机相对于其各自长机而言，成本只有其一半，且战损后不会带来飞行员的损失，仍然具备可消耗特征，这可以称得上是相对意义上的“低成本”。

无独有偶，俄罗斯在发展忠诚僚机时也有两条路线：传统低成本的轻型“雷霆”无人机和具备较强空战能力的“猎人”无人战斗机。前者可执行情报收集、监视侦察和

电子干扰以及空对地作战任务，潜在应用场景为米格-29、米格-35战斗机的忠诚僚机；后者可载弹2~2.8t，潜在目标为苏-57战斗机的忠诚僚机。

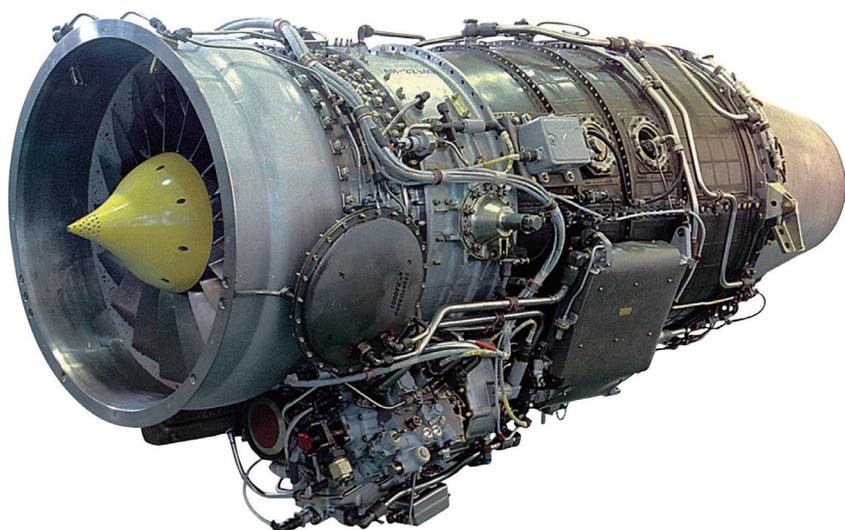
低成本忠诚僚机需要低成本动力

美国空军的忠诚僚机发展遵循了从绝对低成本到相对低成本的发展规律，作为飞行器核心之一的发动机，也具备相应的“低成本”特点。

各国在进行新型低成本无人机系统动力研发时，从管理和设计、制造方面都采取了一些措施。例如，美国空军研究实验室和普惠公司及罗罗公司在进行低成本无人机动力研制时，成立了创新研发机构，采取新型研发思维，在保留知识产权的前提下，将发动机设计和制造分离，并精简研发流程，达到缩短研发时间，降低研发成本的目的；克雷托斯公司在开展低成本可消耗发



俄罗斯“雷霆”轻型无人机



装配俄罗斯“雷霆”无人机的AI-222-25发动机

发动机设计时，曾采用目标寿命设计，在一年多时间内完成了一型低成本可消耗发动机核心机的设计和试验，此外还采用了增材制造手段将发动机的多个零件简化为一个整体，降低了加工难度；另外，捷克PBS公司在开展低成本无人机系统发动机设计时去除了滑油系统，通过燃油系统来冷却和润滑零部件，简化设计的同时降低了生产和使用维护成本。

除了新研低成本无人机动力外，各国还利用成熟有人机发动机的核心机，重新设计低压系统，实现低成本无人机动力。为了适应无人机在工作包线和过载方面的需求，MTU公司尝试在EJ200低压轴上安装一体化低压发电系统，在高压转子上安装一体化起动机/发电机，同时从高压和低压转子提取功率，并增加一体化热管理系统，满足显著增大的电功率需求和热管理要求；此外，还改进了滑油排放装置，采用长寿命滑油，满足长期储存要求。

随着仿真、建模、人工智能技

术的进步，多家航空发动机制造商探索数字孪生技术在航空发动机全生命周期的应用，缩短研制周期的同时，达到降低发动机成本的目的。如俄罗斯联合发动机公司（UEC）和中央航空发动机研究院（CIAM）就在共同开发AI-222-25涡扇发动机过程中采用了数字孪生技术，该发动机被选为俄罗斯低成本僚机“雷霆”的动力。UEC和CIAM认为，AI-222-25系列发动机的数字孪生技术可以发展发动机的寿命、可靠性和维修性等关键特性，并降低制造和维护成本。

综上所述，对于“绝对低成本”的忠诚僚机，可以基于飞机有限寿命开展目标寿命设计，通过去掉不必要的零部件达到简化发动机结构的目的，以降低加工难度的同时降低加工成本的手段实现低成本发动机。对于“相对低成本”的忠诚僚机，受限于高性能要求，其发动机性能要求也会比较苛刻，在保证性能基础上，各国多采用以下新研发技术和手段保障低成本：一是在研

发管理方面贯彻数字工程理念，通过探索发动机模型库、方法库、环境库的方法，建立发动机在不同阶段、不同状态下的数字模型库，采用流程化、标准化发动机的设计、仿真与验证方法，实现以数字化和仿真为重要手段的敏捷研发；二是采用数字孪生技术，构建精准映射实际研发过程的数字化空间，对发动机研制过程中的“需求—功能—架构—定义—实现”各环节开展基于数字孪生的虚拟设计、验证和迭代，减少试验时数和物理迭代轮次，进而达到提升设计质量，降低研制成本，缩短研发周期的目的；三是基于传统发动机研制方法，按照通用化、模块化的设计思想，采用已经过有人战机应用检验的成熟发动机核心机技术，缩短研制周期，降低研制费用；四是运用增材制造等先进且成熟的加工工艺，减少昂贵材料的损耗，降低加工成本。

结束语

美国忠诚僚机经过多年的发展，其思路正在从以侦察和电子战功能为主的绝对低成本，向注重对空和对地作战功能、与有人战机相比的相对低成本转变，并已形成了多种方案，未来可能覆盖第五代、第六代战斗机和下一代轰炸机。忠诚僚机的意义在于以较低成本实现较高的作战效能，其本身的低成本技术和发动机的低成本技术都值得关注，航空发动机研制机构应提前布局，加强发动机低成本技术研究，从而满足未来作战体系装备需求。

航空动力

（赖耀胜，中国航发涡轮院，工程师，从事航空发动机设计及试验研究工作）