

无人僚机竞逐空战新赛道

■赵薇 胡永江

今年6月,在美军“勇敢之盾-2026”演习中,MQ-28“幽灵蝙蝠”与F-35、F-15EX战斗机,以及E-3预警机、EA-18G电子战飞机等多型有人作战平台开展大规模协同演练。

也是在今年,德国柏林航展有多款新型无人僚机集中对外亮相;美国空军与通用原子、安杜里尔公司签订FQ-42A“暗影梅林”、YFQ-44A“狂怒”无人僚机量产合同;英国则正式启动了“风暴战士”无人僚机项目。

作为有人战斗机在高空空域的“力量延伸”,无人僚机被多国视为未来空战体系的关键节点,步入多方竞速的密集赛道。各国推出的代表性机型有着怎样的技术特点与战力优长?不同发展路径暴露出哪些短板与瓶颈?从试验验证到实战运用还需跨越何种现实门槛?请看本文解读。



被动;为兼容多类载荷,任务舱需在尺寸、供电、散热等方面预留冗余空间,挤占燃油舱与电子设备安装空间,一定程度制约了航程与态势感知能力的提升。该机型目前仍处于测试与升级阶段,模块化架构在强对抗战场环境下的可靠性,还有待后续实战验证。

S-70“猎人”:重型化突前的实战派

与MQ-28“幽灵蝙蝠”的模块化适配路线不同,俄罗斯S-70“猎人”选择了重型化突前的发展路线。该机由苏霍伊公司研制,2019年8月完成首飞,同年9月完成与苏-57战斗机的首次伴飞试验。此后持续推进多项靶场测试,2024年进入测试收尾阶段。今年以来,俄罗斯陆续披露了该机作为苏-30SM战斗机“忠诚僚机”的更多细节,这款重型无人作战平台的作战定位逐渐清晰。

该机采用飞翼布局,背负式进气道位于机身上方,机体大量使用复合材料并涂覆吸波涂层。2024年公开的新版本换装扁平隐身尾喷口,红外隐身能力进一步提升。机腹设有内置弹舱,载弹量约2.8吨,是当前全球载荷最大的无人作战飞机之一。

“猎人”的设计逻辑十分明确:依托重型平台与生俱来的载荷与航程优势,由无人机率先突入高危作战空域,遂行前沿侦察、防空压制、纵深打击等任务;由有人机在后方指挥决策,降低其直面敌火力打击的风险。在未来作战中,苏-30SM或苏-57在后方相对安全的空域实施指挥,多架“猎人”前出突防,执行压制防空和纵深打击任务。这种“有人指挥、无人突前”的分工模式,旨在让重型无人平台独立承担高危任务,充分释放重型单机作战效能。

大吨位平台带来了多重作战增益:机身空间充裕,既可容纳更多弹药与燃油,也能搭载大功率雷达、光电和电子设备,增强独立态势感知能力;部分作战环节不必完全依赖后方指令,可在远离己方编队的空域长时间活动。但偏大的体量是把“双刃剑”:飞控算法复杂,需要大量试飞校验不同飞行姿态下的稳定性,对隐身设计、地面保障也提出了更高要求。2024年10月,一架S-70原型机在顿涅茨克地区坠毁。据俄方通报,该机因技术故障失事,被伴飞的苏-57发射导弹击落,残骸落入乌克兰控制区域。这起事件暴露出重型无人平台对通信链路的高度依赖,一旦数据链路中断,就会存在平台失控等风险。尽管俄方曾计划2025年启动该机的量产,但截至目前,该机型仍处于测试完善阶段,强对抗条件下的综合作战效能仍有待进一步观察。

XQ-58A“女武神”:规模化消耗的践行者

不同于“幽灵蝙蝠”的模块化适配和“猎人”的重型突前,XQ-58A“女武神”走出了成本优先、侧重规模化消耗的发展路线。该机由克拉托斯公司研制,脱胎于美国空军研究实验室“低成本可消耗飞行器技术”项目,于2019年3月完成首飞,2023年完成人工智能自主飞行科目,通过持续迭代验证平台能力。

根据美国海军陆战队航空气计划,截至2025年10月,F-35与XQ-58A已累计完成4次有人-无人编组试验飞行。2026年1月,美国海军陆战队选定XQ-58A为其首款“忠诚僚机”,旨在与F-35B等有人战机协同作战。

“女武神”采用梯形机翼搭配V型尾翼布局,机长9.1米,翼展8.2米,最大起飞重量约2.7吨,巡航速度0.72马赫,航程约4800千米。机腹设有内部弹舱,内置有效载荷约272千克,机翼中段挂点还可额外携带约272千克载荷。该机采用火箭助推起飞、降落伞回收模式,不依赖传统跑道,具备在前线简易阵地部署的潜力。单机造价约300万至400万美元,若实现年产50架以上的规模化生产,成本仍有下探空间。

“女武神”的设计出发点,并不追求单机性能“面面俱到”,而是依靠成本优势谋求数量规模。其思路是依托批量部署形成规模效应,弥补单机性能短板,迫使对手消耗昂贵的防空弹药,以此放大非对称对抗中的效费比优势。这一定位使其任务集中于诱饵诱骗、战场侦察、通信中继、对地打击以及电子战干扰等领域,对空作战能力也在同步拓展中。

这一路线同样存在难以规避的短板。受平台吨位与成本约束,该机在载荷、航程和隐身能力方面存在明确的“天花板”;机身内部空间有限,难以搭载大功率感知设备,态势感知能力无法对标重型无人平台;火箭助推加降落伞回收模式虽摆脱了跑道束缚,却加剧了机体损耗,装备可重复使用次数受限;大规模列装运用也对后勤保障体系、编队协同控制能力提出更高要求。

依托“女武神”积累的技术成果与飞行经验,美国空军无人僚机项目于今年6月正式转入批量装备阶段。通用原子公司和安杜里尔公司分别获得FQ-42A“暗影梅林”、YFQ-44A“狂怒”的量产合同,两款机型均为XQ-58A衍生而来的后继量产型号,在任务定位与成本水平上形成高低搭配的装备格局。

与此同时,XQ-58A的应用探索还在继续。2025年7月,空客公司与克拉托斯公司达成合作,计划为德国空军改装两架XQ-58A,集成欧洲自研的任务系统,预计在2029年前形成作战能力。2026年

4月,多架XQ-58A在加利福尼亚州南部,配合美国海军陆战队F-35、F/A-18战斗机开展电子战科目测试,其作战领域从对地攻击、侦察拓展至电磁频谱对抗。从概念探索到助推后继型号走向量产,再到跨国、跨军种开展应用验证,“女武神”正从单纯的技术验证平台,向体系化无人作战链条中的关键节点延伸。

赛道未定,终局尚远

从模块化适配,到重型化突前,再到规模化消耗,三款无人僚机的发展路线背后,不仅映射出各国对未来空战形态的不同预判,也是其结合自身工业基础、技术积累与预算约束作出的综合选择,虽各有侧重,却也面临着若干共同的技术瓶颈与现实挑战。复杂战场环境下,无人僚机自主作战能力有限,面对突发态势难以独立处置,关键决策仍需人工干预;多机协同编组稳定性不足,遭遇高强度电磁干扰易导致编队紊乱;有人-无人协同高度依赖数据链路,一旦通信中断,平台便会面临失控或信息泄露等风险。只有攻克这些难题,无人僚机才可能真正走向实战。

展望未来,无人僚机的演进或将沿着几条主线持续深化。

智能水平持续提升。依托机载AI算法迭代优化,重点强化复杂态势感知、目标甄别与战术研判能力,逐步降低对人工指令的依赖,实现自主规划、自主协同与自主避障,具备复杂战场的自适应作战能力。由“半自主”到“全自主”的跨越,将是决定无人僚机能否深度融入实战体系的核心变量。

体系融合不断深化。无人僚机将跳出单纯的辅助定位,进阶为空战网络中的关键节点,全面打通与战斗机、预警机、电子战飞机及地基平台的数据交互链路,实现侦察、干扰、打击、保障全要素信息互通,实时共享战场态势,深度嵌入联合作战杀伤链,成为体系对抗的有力支点。

装备编组趋于多元。不同吨位、不同定位的无人僚机协同运用正成为现实,装备谱系由单一型号向多型共存演进。未来,重型平台将专注远程突防与纵深打击,中小型平台承担侦察牵制、电磁干扰与消耗敌防空火力等任务,通过编组联动构建优势互补的无人作战集群,以适配多样化战场需求。

无人僚机的发展赛道远未定型,不同路线各有其适用场景,交叉融合或将成为未来的现实答案。无人僚机究竟能在多大程度上重塑空战格局,答案或将留待实战揭曉。

图①:MQ-28“幽灵蝙蝠”无人机;图②:S-70“猎人”无人机;图③:XQ-58A“女武神”无人机。

阳 明 供图

★兵器档案

在战机发展历程中,有一个十分有意思的变化。半个世纪前,空战比拼的是谁飞得更快。美国F-4战机最大速度可达2.23马赫,苏联米格-25战机极限速度可达3.2马赫,两款战机靠着极致超音速性能称霸天空,飞行速度几乎是战机体力的代名词。可如今,部分国外现役主力隐身战机最大速度已降至不足两倍音速,不仅比不上老式战机,超音速飞行还得严格控制时长。战机越造越先进,速度却不升反降,这个看似反常的变化,恰恰藏着现代空战模式的巨大转变。

冷战时期,空战打法简单直接,拼的就是速度和机动性。那时候作战以近距离拦截、贴身格斗为主,只要战机飞得够快,就能追上敌方轰炸机、躲开来袭导弹,速度就是最硬核的战斗力。因此,各国研发战机,都把提升速度放在第一位。但到了新一代隐身战机研发阶段,空战环境彻底改变,各国不再一味追求极致速度,而是把战机生存能力、联网协同作战能力放在了首位。战机速度的降低,本质是空战战力评判标准的全面更新。

其实早在20世纪60年代,美国SR-71“黑鸟”侦察机就已突破3马赫,至今仍是有人驾驶吸气式飞机的速度纪录。由此可见,把飞行速度提至极速,半个多世纪前就已实现,但惊人的油耗、极短的航程和较短的发动机寿命,让各国对继续提速的念头逐渐冷却。

战机主动放慢速度,最直接的原因就是物理规则的限制,是隐身和速度之间的务实取舍。战机超音速飞行时,机身会和空气剧烈摩擦产生高温,速度越快,机身温度越高。现代战机依靠隐身涂层规避雷达探测,可这种涂层耐高温能力有限,一旦长时间高速飞行,高温会让隐身涂层失效,机身的雷达反射信号会大幅增强,直接丢掉隐身优势。在目前的材料技术水平下,极致高速和完美隐身很难同时实现。

而真正让战机放弃极致速度追求的,是超视距空战的普及。过去空战讲究近距离贴身缠斗,谁先抢到有利位置谁就占优,速度优势至关重要。现在空空导弹射程大幅提升,上百公里外的超视距打击成为空战主流。空战的胜负关键,早已从比拼飞行速度,变成了谁先发现目标、谁先锁定开火,谁的体系协同更顺畅。正因如此,五代机不再追求极速,转而强化隐身、

探测、组网、对抗能力,把自己打造成空中信息节点,适配全新的空战规则。

如今的空战中,战机飞得再快,也比不上空空导弹的末端冲刺速度,很难靠速度躲开拦截。同时,高速飞行产生的高温,会让战机红外信号变得更明显,更容易被敌方探测锁定。反过来,把战机有限的空间和重量,用来搭载更先进的雷达、光电探测设备和电子战系统,能大幅提升战场感知和生存能力,实战价值远高于小幅的速度提升。

当然,战机减速只是现阶段的技术妥协,不代表飞行速度已经失去作用。当下的取舍,是受限于隐身材料、热防护技术的短板,是速度、隐身、体系能力之间的平衡。目前各国都在攻坚耐高温隐身材料、新型航空发动机等核心技术,旨在打破现有瓶颈,兼顾高速机动和隐身突防两大优势。下一代战机机会飞多快,让我们拭目以待。

球鼻艏:助力战舰跑得快听得远

■李晓迪

千秋,适配不同的作战定位。有的采用钝头或长鼻型球鼻艏,优先适配大型声呐设备,美国的“阿利·伯克”级驱逐舰就采用这种设计,兼顾了高速性和反潜能力;有的采用适配大型声呐基阵的球鼻艏,内部空间更大,能安装更大尺寸的声呐设备,日本金剛级驱逐舰以此提升远程反潜探测能力;还有的采用撞角形球鼻艏,适合破冰航行,俄罗斯核动力破冰船的球鼻艏能轻松撞开厚厚的冰层。

这些设计差异背后,是流体力学与声学工程的深度权衡。大型航母的球鼻艏通常体积更大,不仅要减阻,还要平衡舰艏的重量,防止航母在风浪中过度纵摇;而小型护卫舰的球鼻艏则更小巧,优先保证进海航行的通过性。随着计算流体力学的发展,工程师们能通过仿真模拟不断优化球鼻艏的形状,让减阻和降噪效果达到最优。

值得一提的是,球鼻艏的性能离不开船体线型的协同配合。船体线型决定了整体的水流分布,而球鼻艏则是对局部水流的精准调控,二者相辅相成。这一“整体设计+局部优化”的思路,让舰艇在速度、航程和作战能力之间找到了最佳平衡点。

下图:安装了球鼻艏的“阿利·伯克”级驱逐舰。

资料图片

当我们关注航行中的驱逐舰时,会注意到舰艏水线以下那个圆滚滚的凸起。它不像尖锐的舰艏那样引人注目,却是战舰跑得快、听得远的关键所在——这就是球鼻艏。

球鼻艏的工作原理藏在水流的奥秘里。当战舰高速行驶时,舰艏会劈开海水形成巨大的波浪,这些波浪会产生强大的阻力,拖慢舰艇的速度。而球鼻艏能提前产生一个相反的波浪,抵消舰艏波浪的能量,大幅降低航行阻力。据统计,拥有球鼻艏的船舶比没有的在燃料使用效率上高出约12%至15%。同时,这个球形空间还能容纳舰艏主声呐,让战舰拥有更敏锐的水下听觉。

海洋环境瞬息万变,不同航速、不同海况下的兴波特性千差万别。如果没有球鼻艏,舰艇在高速航行时会消耗大量燃料,航程大打折扣;声呐裸露在外也容易受到水流噪声的干扰,探测距离大幅缩短。尤其在反潜作战中,球鼻艏带来的静音优势和探测增益,能让舰艇更早发现敌方潜艇,占据战场主动。

如今,各国舰艇的球鼻艏设计各有

球鼻艏:助力战舰跑得快听得远

■李晓迪

千秋,适配不同的作战定位。有的采用钝头或长鼻型球鼻艏,优先适配大型声呐设备,美国的“阿利·伯克”级驱逐舰就采用这种设计,兼顾了高速性和反潜能力;有的采用适配大型声呐基阵的球鼻艏,内部空间更大,能安装更大尺寸的声呐设备,日本金剛级驱逐舰以此提升远程反潜探测能力;还有的采用撞角形球鼻艏,适合破冰航行,俄罗斯核动力破冰船的球鼻艏能轻松撞开厚厚的冰层。

这些设计差异背后,是流体力学与声学工程的深度权衡。大型航母的球鼻艏通常体积更大,不仅要减阻,还要平衡舰艏的重量,防止航母在风浪中过度纵摇;而小型护卫舰的球鼻艏则更小巧,优先保证进海航行的通过性。随着计算流体力学的发展,工程师们能通过仿真模拟不断优化球鼻艏的形状,让减阻和降噪效果达到最优。

值得一提的是,球鼻艏的性能离不开船体线型的协同配合。船体线型决定了整体的水流分布,而球鼻艏则是对局部水流的精准调控,二者相辅相成。这一“整体设计+局部优化”的思路,让舰艇在速度、航程和作战能力之间找到了最佳平衡点。

下图:安装了球鼻艏的“阿利·伯克”级驱逐舰。

资料图片

球鼻艏:助力战舰跑得快听得远

■李晓迪

千秋,适配不同的作战定位。有的采用钝头或长鼻型球鼻艏,优先适配大型声呐设备,美国的“阿利·伯克”级驱逐舰就采用这种设计,兼顾了高速性和反潜能力;有的采用适配大型声呐基阵的球鼻艏,内部空间更大,能安装更大尺寸的声呐设备,日本金剛级驱逐舰以此提升远程反潜探测能力;还有的采用撞角形球鼻艏,适合破冰航行,俄罗斯核动力破冰船的球鼻艏能轻松撞开厚厚的冰层。

这些设计差异背后,是流体力学与声学工程的深度权衡。大型航母的球鼻艏通常体积更大,不仅要减阻,还要平衡舰艏的重量,防止航母在风浪中过度纵摇;而小型护卫舰的球鼻艏则更小巧,优先保证进海航行的通过性。随着计算流体力学的发展,工程师们能通过仿真模拟不断优化球鼻艏的形状,让减阻和降噪效果达到最优。

值得一提的是,球鼻艏的性能离不开船体线型的协同配合。船体线型决定了整体的水流分布,而球鼻艏则是对局部水流的精准调控,二者相辅相成。这一“整体设计+局部优化”的思路,让舰艇在速度、航程和作战能力之间找到了最佳平衡点。

下图:安装了球鼻艏的“阿利·伯克”级驱逐舰。

资料图片

球鼻艏:助力战舰跑得快听得远

■李晓迪

千秋,适配不同的作战定位。有的采用钝头或长鼻型球鼻艏,优先适配大型声呐设备,美国的“阿利·伯克”级驱逐舰就采用这种设计,兼顾了高速性和反潜能力;有的采用适配大型声呐基阵的球鼻艏,内部空间更大,能安装更大尺寸的声呐设备,日本金剛级驱逐舰以此提升远程反潜探测能力;还有的采用撞角形球鼻艏,适合破冰航行,俄罗斯核动力破冰船的球鼻艏能轻松撞开厚厚的冰层。

这些设计差异背后,是流体力学与声学工程的深度权衡。大型航母的球鼻艏通常体积更大,不仅要减阻,还要平衡舰艏的重量,防止航母在风浪中过度纵摇;而小型护卫舰的球鼻艏则更小巧,优先保证进海航行的通过性。随着计算流体力学的发展,工程师们能通过仿真模拟不断优化球鼻艏的形状,让减阻和降噪效果达到最优。

值得一提的是,球鼻艏的性能离不开船体线型的协同配合。船体线型决定了整体的水流分布,而球鼻艏则是对局部水流的精准调控,二者相辅相成。这一“整体设计+局部优化”的思路,让舰艇在速度、航程和作战能力之间找到了最佳平衡点。

下图:安装了球鼻艏的“阿利·伯克”级驱逐舰。

资料图片

球鼻艏:助力战舰跑得快听得远

■李晓迪

千秋,适配不同的作战定位。有的采用钝头或长鼻型球鼻艏,优先适配大型声呐设备,美国的“阿利·伯克”级驱逐舰就采用这种设计,兼顾了高速性和反潜能力;有的采用适配大型声呐基阵的球鼻艏,内部空间更大,能安装更大尺寸的声呐设备,日本金剛级驱逐舰以此提升远程反潜探测能力;还有的采用撞角形球鼻艏,适合破冰航行,俄罗斯核动力破冰船的球鼻艏能轻松撞开厚厚的冰层。

这些设计差异背后,是流体力学与声学工程的深度权衡。大型航母的球鼻艏通常体积更大,不仅要减阻,还要平衡舰艏的重量,防止航母在风浪中过度纵摇;而小型护卫舰的球鼻艏则更小巧,优先保证进海航行的通过性。随着计算流体力学的发展,工程师们能通过仿真模拟不断优化球鼻艏的形状,让减阻和降噪效果达到最优。

值得一提的是,球鼻艏的性能离不开船体线型的协同配合。船体线型决定了整体的水流分布,而球鼻艏则是对局部水流的精准调控,二者相辅相成。这一“整体设计+局部优化”的思路,让舰艇在速度、航程和作战能力之间找到了最佳平衡点。

下图:安装了球鼻艏的“阿利·伯克”级驱逐舰。

资料图片



球鼻艏:助力战舰跑得快听得远