兵器广角

100多年前，飞机被发明后很快出现在了战场：从最初用于实施侦察，再到执行轰炸任务，直至为了打击对方空中力量，以消灭敌人飞机为作战目的的战斗机出现，战斗机之间的对抗开启了空战的序幕。

如今，现代战争的无人化趋势已经不可阻挡，无人机在低空领域大放异彩，可以大规模执行侦察、对地打击、自杀攻击等任务。但在高空领域，目前仍是有人战机主导的战场。

近年来，多国同时在推进符合自身实际情况的无人机空战项目研发，并取得了阶段性成果——美国的YFQ-44A“狂怒”，澳大利亚的MQ-28A“幽灵蝙蝠”和土耳其的“红苹果”三款无人机均在近期完成了使用空空导弹击落空中目标的试验——这并非孤立的技术表演，而是释放了一个明确信号：无人机执行空战的时代已从概念推演走向工程验证，人类正在叩响无人空战时代的大门。

无人空战时代离我们还有多远

■于 斌 贾婉茹



图①：美国YFQ-44A“狂怒”无人机。
图②：土耳其“红苹果”无人机。
阳 明供图

大势所趋

战争形态演进催生空战变革

为什么各国争相投入巨资推进无人战斗机项目？这不是一个选择题，而是战争形态演进的必答题。

为突破战斗机发展瓶颈，各方不约而同指向了同一个方向——无人化。

突破人类生理限制，释放飞行器潜能的必然。无论气动设计多先进、发动机多强劲，战斗机的机动性能始终被飞行员的生理承受能力所“封印”。无人机则解开了这道封印——不需要生命维持系统，没有疲劳和恐惧心理的约束，飞机可以持续做出高过载的极限机动。美国“阿尔法狗斗”试验已经证明，AI操纵的无人机在空战格斗中能以毫秒级反应速度、最优能量管理和高过载机动击败人类顶尖飞行员。当设计师不再需要“照顾”座舱里的人，就能放手追求更极端的隐身外形、更轻的机体结构和更长的滞空时间。

适应智能化要求，应对空战环境挑战的必然。现代空战环境已远超人类大脑的处理能力：机载雷达同时跟踪数十个目标，海量战场态势信息不断涌入，飞行员需要在数秒内完成“感知—判断—决策—行动”（OODA循环）。当双方的OODA循环都压缩到极限，胜负将倾向于“算得更快”的一方。AI能在毫秒级完成多目标威胁排序、拦截路径规划和武器分配，即使数据链被电子战干扰中断，也能依靠机载算力维持态势感知能力。若对手的“AI飞行员”已能自主完成从探测到开火的全流程，仍依赖人类反应速度的一方将陷入劣势。因此，“多元感知、自主决策、灵活行动”已成为各国无人空战试验的核心攻关方向。

降低空战成本，控制战损代价的必然。一架F-35A的飞离成本约8000万至1亿美元，培养一名战斗机飞行员需数百万美元投入和三到五年的周期，飞行员一旦损失，往往意味着不可弥补的人力资源断层。而一架XQ-58A“女武神”单价仅约300万至400万美元，美国空军将协同作战飞机（CCA）的目标定价计划控制在F-35的四分之一到三分之一。用低成本无人平台执行高风险的前出侦察、防区外拦截任务，由有人机在安全后方担任编队指挥，“有人-无人”混合编队的费效比优势一目了然。以数量优势和成本优势对抗质量优势，是无人空战的重要底层逻辑。

制胜之基

从“能够做到”到“能够打赢”

无人机发射空空导弹击落空中目标，证明了无人机执行空战“能够做到”；但从“能够做到”到“能够打赢”，中间横亘着由技术、工程和制度共同构成的鸿沟，必须满足一系列前提条件。

无人机执行空战任务，首先要有能充分适应复杂战场环境，具备空战优势的高性能无人空战平台，以全向隐身、全域感知与超高机动能力，构成无人空战平台核心竞争力。

一是全维全向隐身能力。在宽频雷达隐身、红外抑制与电磁管控三个层面实现全向低可探测性。当前主流的实现方式是采用飞翼无尾布局配合隐身涂层将雷达反射面积大幅缩小，同时运用S型进气道与喷管冷却技术大幅削减红外特征，使敌方难以形成稳定跟踪。

二是远程多元战场感知能力。通过搭载有源相控阵雷达、分布式光电孔径与电子支援设备实现360度多频谱态势感知。雷达探测距离需达200千米以上，方能在超视距阶段先敌发现、先敌锁定。

三是广域高机动能力。通过使用高强度机体和高性能发动机，具备远距离、长时间、高速度机动能力。这样才能进入有人机无法进入的空域，在战斗中连续做出高过载机动，占领有利战位，摆脱对方的探测和攻击。

高速、稳定、可靠的智能化信息网络同样不可或缺。前出数百公里的无人战斗机，需要与后方指挥机保持低延迟、高带宽的双向通信，既要接收指令，又要回传大量数据。美军现役Link-16等数据链的带宽远不能满足多机协同需求。目前发展的自组网架构让无人机群互为通信中继，使用激光通信以极高带宽和极低截获概率提供点对点连接，但这些技术距离实战大规模应用仍有不小差距。

可靠的机载算力与专用算法，是数据链被切断、GPS被压制时唯一能依靠的“大脑”。试验已证明AI在空战机动中的优势，但“黑箱”问题依然棘手——当一架无人战斗机突然做出“无法理解”的战术动作时，指挥官是否敢于信任？因此各国正推动可解释性AI研发，要求AI在关键决策时提供逻辑说明。此外，算法必须能够灵活更新，才能不断弥补缺陷、适应战场变化。

空战的最高控制权必须由人掌控。当前所有参与空战测试的无人平台均不享有独立开火决策权，武器释放决定权始终保留在人类操作员手中。这一原则，既是军事法理和国际人道法的刚性约束，也是技术伦理的最低共识。

但在电子战密集、数据链被压制的环境中，操作员与无人机的通信链路很可能中断。若敌方战斗机正在逼近而无人机已完成目标锁定，打还是不打必须在数百毫秒内决定，这已超出人类远程授权的反应时间，这就是“最后一公里”难题。目前无人机武器开火前仍有不可绕过的“人类确认”节点，在确保伦理底线的同时，也意味着极端情况下无人机可能陷入“能打但不敢打”的困境。

破局之要

求解无人空战落地之道

目前世界各国根据各自的国情、预算和战略需求制定出了不同的无人战斗机发展路线，但核心问题是无法绕过的，必须提前明确路线，才能扫清限制无人机执行空战的各类难题。

首先是性能与成本的取舍问题。无人飞行平台要在高性能、多功能、成本控制之间寻求平衡。追求高隐身和高机动能力，成本必然飙升；追求低成本可消耗，就不得不牺牲部分性能。体系化的“高低搭配”策略是很多国家的选择：一方面集中资源研制高性能专业无人战斗机，专注于机载算力和作战算法的高频迭代，形成对有人战斗机的压制；另一方面大批量装备成本低、可执行简单空战任务的无人机，作为“忠诚僚机”承担侦察、对地攻击等高风险消耗性任务。

其次是要预备多种AI解决方案，对冲可能的“沉没成本”。AI是无人空战平台的“大脑”，必须足够聪明、足够可靠、足够可解释。AI能力的打磨依赖算力、算法、数据三要素的持续投入。投入巨资训练的模型一旦被对手发现逻辑漏洞，可能在实战中瞬间失效。算力和算法针对硬件开发，硬件如果不能替换升级，算法与算力也失去上升空间。因此必须同步建设可替换升级的AI方案，美国A-GRA框架将自主软件与飞行器硬件解耦，政府掌握开放接口标准，使不同厂商的AI算法可以跨平台竞争和替换，“不把所有鸡蛋放在一个篮子里”，是降低AI系统性风险的关键。

最后是无人作战规则的构建，要以人类意志驾驭机器力量。战争是政治的延续，无人平台作战引发公众对“机器人杀人”的担忧，国际社会围绕致命自主武器系统的辩论持续多年，联合国《特定常规武器公约》框架下至今未能达成有约束力的国际条约。各国军方和决策者必须主动构建透明、可审计、不可绕过的无人作战规则体系。

首先，要在核心原则上达成一致：无人机的“自主”必须始终是“人类控制下的自主”，武器最终释放需人类授权。未来还需明确边界：什么级别的威胁允许无人平台自主做出防御性机动和电子对抗；什么级别的行动必须等待人类指令；在通信中断的极端情况下，AI自主做出的杀伤性决策，必须有完整、不可篡改的日志记录，接受事后审查和追责。

无人机发射空空导弹的试验，只是通往无人空战时代的第一级台阶，下一代无人空战平台必然向更高自主性演进。无人空战的时代正在叩门，我们应当以敬畏之心迎接它，以审慎之智驾驭它。

兵器漫谈

F-35“越狱记”

■白季平

不久前，荷兰国防部国务秘书吉斯·图因曼在接受媒体采访时表示：“你可以像‘越狱’苹果手机一样‘越狱’F-35。”此表态引发国际社会广泛关注。

F-35系列战机是由美国洛克希德·马丁公司主导研发的多用途五代机，目前已列装美国、以色列、荷兰等多个国家和地区。这款战机的核心竞争力不仅在于隐身性能和机动能力，更在于高度集成的信息化系统。作为一款“网络中心战”理念下的产物，F-35的软件更新、后勤保障等核心环节，均通过“自主后勤信息系统”（ALIS）完成，该系统后续因存在诸多问题，逐步过渡至“作战数据综合网络”（ODIN），但管控权限始终掌握在美国军方和洛克希德·马丁公司手中。

这种管控模式的设计，是美国维护其技术主导权的重要手段。据报道，F-35对使用国修改战机软件及地面配套系统的能力施加了严格限制，几乎所有在役F-35的软件更新都需通过云端网络完成，使用国无法自主修改核心程序。更关键的是，ALIS/ODIN网络不仅承担着软件更新和后勤数据处理功能，还是作战任务数据的上传下载端口，这些数据包含高度敏感的战场态势、敌方防空部署等情报，进一步强化了美国对这款战机的绝对掌控权。

值得注意的是，在所有F-35使用国中，以色列是唯一获得特殊授权的国家。以色列通过协商获得了在F-35I战机上安装本国开发软件的权限，可脱离ALIS/ODIN网络独立运行，拥有完全独立的基地级维护能力。然而，对于包括荷兰在内的其他使用国而言，涉及软件的相关工作仍需在美国军方的主导下进行，所谓的“自主”只是有限范围内的调整，无法触及核心管控权限。

F-35的“越狱”不仅面临极高的技术门槛，更会带来难以承受的现实代价，这也是其始终停留在概念层面的主要原因。

这款战机软件系统十分复杂，破解难度较高。随着系统的不断升级，F-35的源代码规模十分庞大，其软件系统采用了专业的军用加密技术。这对于任何一个使用国而言，破解该系统都是巨大的技术挑战。即便技术上能够实现“越狱”，也无法解决核心功能的依赖问题。F-35的任务规划、战场态势感知等功能高度依赖美国长期积累的技术和数据支撑，使用国即便破解了软件限制，也难以独立重建这些关键支持功能，无法保障战机正常发挥作战效能。

总的来说，“越狱”只能打破软件层面的限制，却无法改变F-35在核心技术、数据支撑上对美国的依赖，这也使得“越狱”失去了实际的军事价值。

从政治层面来看，“越狱”行为将直接违背合作约定，面临严重的追责。F-35的采购合同中，已明确规定了软件使用、系统修改的相关规则，未经美国授权擅自破解系统，属于违约行为，将面临洛克希德·马丁公司的法律诉讼，同时还可能引发外交摩擦。对于荷兰等依赖美国防务合作的国家而言，这种法律和外交风险，远远超出了“越狱”可能带来的收益。

不仅如此，“越狱”或将直接导致零部件供应中断，最终让战机陷入瘫痪。F-35的核心零部件，如发动机、隐身材料、雷达组件等，大多由美国企业生产，其供应体系与云端运维系统深度绑定。一旦使用国擅自“越狱”，美国很可能会切断零部件供应，战机将无法正常升空执行任务。

这一“越狱”风波，看似是一场关于战机软件管控的争议，实则折射出装备自主话语权的博弈——核心技术掌握在谁手中，谁就拥有话语权。美国凭借在核心技术、软件系统、后勤供应等领域的绝对优势，将参与F-35项目的盟友牢牢绑定在自身防务体系中，通过限制软件修改权限、掌控核心备件供应等方式，确保盟友对其技术的高度依赖，进而巩固自身在全球防务领域的主导地位。对于F-35的使用国而言，“越狱”言论的背后，反映出技术自主的迫切需求与现实依赖的矛盾。

“越狱”风波也进一步提醒各国，尖端装备的发展，不能只依赖外部技术输入，核心技术必须自主可控。无论是参与国际合作，还是自主研发装备，都应将核心技术掌握在自己手中，建立独立的研发、生产、维护体系，才能避免陷入“受制于人”的困境，真正实现防务装备的自主可控。

兵器控

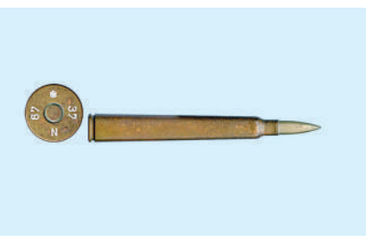
品味有故事的兵器

■本期观察：盖潇帅 崔浩浩 邹渝建

弹药家族庞大繁杂，有些弹药虽未大规模列装，却凭独特理念或超前技术在轻武器史上留下印记。本期“兵器控”，解读3款各具特色的“冷门”弹药。

另辟蹊径

波兰7.92×107毫米反坦克弹



20世纪30年代初，面对坦克装甲升级，各国纷纷研发大口径反坦克步枪，波兰却另辟蹊径，选择“小口径、高初速”路线研发出一款应用于实战的反坦克弹。

当时主流反坦克步枪弹口径大多为12.7毫米至14.5毫米，该弹口径则为7.92毫米，是世界上首款小口径反坦克步枪弹。该弹也是反坦克步枪弹中最早采用碳化钨穿甲弹芯的型号之一，弹头质量14.5克，子弹初速高达1280米/秒，300米距离可垂直穿透20毫米装甲钢板。

其弹壳长达107毫米，外观细长，装填颇为不便。然而，极高初速带来穿甲优势的同时，也导致枪管磨损极大，寿命仅200余发。

该弹1935年随wz.35反坦克步枪列装部队，二战爆发后停产，实际装备总量有限，随后退出历史舞台。

承前启后

德国7.92×33毫米短弹



二战期间，步兵交火距离大幅缩短，传统全威力步枪弹威力过剩、后坐力大、弹药过重，而冲锋枪和手枪使用的小口径弹又射程不足。德国率先在两者之间找到平衡。

1941年，波尔特弹药工厂以7.92×57毫米毛瑟弹为基础，将弹壳缩短至33毫米。该弹头质量约8克，初速约685米/秒，有效射程约300米。

其弹道虽不如全威力弹平直，但后坐力显著降低，单兵携弹量大幅提升。配用该弹的StG44突击步枪成为世界首款真正意义上的突击步枪，开创了“中间威力”弹药先河。

该弹列装时间较短，但后来苏联据此思路发展出7.62×39毫米中间威力弹，进而促成了AK系列步枪的诞生。

极致性能

美国.408 CheyTac狙击弹



如果说前两款弹药是因历史机遇而“被冷落”，那么.408 CheyTac则是一款为极致性能而生的“小众”弹药。

21世纪初，美国CheyTac公司以.505 Gibbs子弹为基础，研制了.408 CheyTac狙击弹。弹头质量约27.2克，使用铜镍合金经CNC精密加工而成，采用低阻力外形，在2000米外仍能保持超音速，存速性能优异。使用该弹的M200狙击步枪，曾创下在2122米距离射击3发子弹散布仅42厘米的纪录。

由于高昂的成本和极强的专业性，该弹在常规军警市场中应用场景不多，更多被视为一种技术标杆，而非面向普通部队的通用装备。