兵器广角

今年6月15日，俄罗斯空天军一架图-22M3在飞行训练期间因机械故障发生坠机事故。就在同日，美空军一架改进型B-52H在开展新雷达换装适应性飞行试验期间坠毁，导致8名机组人员全部遇难。一日发生两起轰炸机事故，不禁引发业界关注。

美俄老旧轰炸机将何去何从

■柴水萍

虽已“老迈”，仍是大国军队“标配”

从现有机队构成来看，美俄目前均保有三型轰炸机，均处于新机未到、老机担纲的状态。其中美空军以B-52H、B-1B和B-2A为主，总计约140架。俄空天军以图-22M3/M3M、图-95MS/MSM和图-160/M为主，总计约110架。从两国轰炸机现状来看，有几个鲜明特点。

“老龄机”占比较高。美空军轰炸机平均机龄约45年，其中，B-52H平均服役寿命约65年，最为“长寿”且占比高，而相对“年轻”的B-1B和B-2A平均服役寿命也超过30年。俄空天军轰炸机平均机龄约38年，总体上比美空军机龄“小”，其中，图-22M3/M3M与图-95MS/MSM的平均服役寿命已近40年。目前比较新的是图-160系列，平均机龄34年，由于近年来图-160M的复产，某种程度上缓解了整体老化程度。

去核化程度不一。前期受美俄战略武器“核裁军”条约限制及任务调整，美空军完整保留B-2A的核打击能力、选择性取消了少量B-52H的核打击能力、不可逆地把B-1B机队去核化。究其原因，主要是考虑到B-2A隐身能力强、B-52H机队规模大，而B-1B机体结构老化、核突防能力偏弱。同时也基于整个轰炸机机队任务功能、核运维成本和安全风险等多因素综合考量，决定将B-1B作为常规轰炸机使用。俄空天军则认为其机队规模有限，并未实质性拆除任何一型轰炸机的核硬件，只是将图-22M3/M3M不计入“重型战略轰炸机”范畴、不执行核打击任务，所有机型均保留核常双重打击能力。当前，随着“核裁军”条约到期失效，两国或将增大可执行核打击的战略轰炸机比重。

完好率不断下滑。美俄轰炸机使用频次高，近几场局部战争均有参战。美国方面，B-52H常年担负核威慑值班、远程战略巡航、前沿轮换部署、联合演习活动以及日常应对与训练任务，出勤率最高，部件老化问题比较突出，完好率有所下降。B-2A以执行高等级战备或作战任务为主，完好率相对较高，但隐身涂层维护极其耗时，大修周期长。B-1B近年来故障多发、备件短缺，维护工时长、完好率低。而俄空天军轰炸机近年在俄乌冲突中担负任务重，战损较多，完好率持续走低。

运维费用持续飙升。根据美国防部今年6月通报的2025年轰炸机经费开销率来看，B-52H平均每小时飞行成本约6.6万美元、B-1B约8.94万美元、B-2A高达9.69万美元，其中B-2A比最初设计的稳定运营成本6.5万美元/飞行小时高出近50%，如遇战时，使用和维保费用将进一步高涨。俄空天军轰炸机机队总体使用成本低于美空军，以比较先进的图-160M为例，平均每小时飞行成本在6.5万美元左右，但整个轰炸机机队近些年高频作战、寿命透支、零备件严重不足，长期作战带来的隐形成本在增加。







图①：美国B-52H轰炸机；图②：俄罗斯图-22M3轰炸机；图③：美国B-1B轰炸机。 阳 明供图

生存力面临挑战。随着战场环境日趋复杂，导弹、无人机及隐身战机威胁不断增加，传统轰炸机随之暴露出各种“不适应”，面临生存危机。除B-2A外，大多轰炸机没有隐身能力，机体尺寸大、起降条件要求严苛，无法适配前线简易机场，且机身布局、红外及声学信号特征明显，一旦被敌机或防空导弹系统锁定，难以逃脱。尤其是在复杂电磁环境下，轰炸机自身无法独立进入防空火力圈作战，只能在敌方防空区外实施远程打击，若无战斗机、预警机等护航，自身难以承担首轮高危突防任务。此外，近年不少典型战例表明：在机场防护不得力的情况下，轰炸机极易遭遇无人机群袭击或导弹齐射打击。

目前，虽然美俄现役轰炸机机队普遍老龄化、适战能力下滑，但作为大国军队“标配”，仍在发挥着主力作用，没有大规模退役计划，主要原因有两个：一是当前多线多向作战需求大、战备任务重；二是后继型“难产”，短期内批量交付难。

美空军在研的B-21远程打击轰炸机虽已完成首飞，但离规模化替换B-1B和B-2A有差距，在未来相当长一段时期内需要老旧混编才能保持现有战备规模。为此，今年4月美空军宣布调整退役计划，两型轰炸机将继续服役至2037年，B-52H按前期计划升级延寿至2050年及以后。俄空天军新型战略轰炸机（PAK-DA）项目受战争影响进度相对缓慢，在青黄不接的情况下，预计很长一段时间内仍需现役轰炸机担任主力。

多措并举，试图书写不老神话

在当前情况下，美俄基于不同战略考量、现实任务所需，针对老旧轰炸机采取了多种举措，力求让其增加新能力、焕发新活力，试图书写不老神话。

恢复生产线，提性能保规模。俄罗斯于2015年正式决定生产全新型号图-160M，同步将老旧的图-160全部升级至M标准。俄空天军这一做法不是简单的复刻，而是从发动机到航电系统再到材料工艺实现全面换新，核心目的是将该型机的现代化程度大幅提升，作为有效过渡方案填补现有轰炸机力量缺口、强化空基核打击能力、保住轰炸机产业链。

增量加装改，拓功能保战力。这是美俄通用做法，均针对老旧轰炸机短板和升级空间余量，定制不同升级方案。其中，美空军对B-52H的升级力度最大，提出了“换装发动机”“雷达现代化”计划并叠加航电系统改造、武器配置更新、结构强化等一揽子升级项目，旨在打造出B-52J全新升级款轰炸机，最长的有望服役至2060年以后，将其打造成“百年轰炸机”。据称，B-52J换装F130发动机后，油耗将降低约30%，推力、航程和供电能力大幅提升。而在换装新型有源相控阵雷达后，全天候多目标精确跟踪识别、抗干扰和电子战能力将增强。今年6月发生事故的B-52H就是目前唯一一架已经换装了新型发动机和雷达的试验机，虽然事故导致试验受挫，但美空军在事故发生后明确表示：升级计划不会中止，将重新改装并加速试验。

优化后勤保障流程。美空军全球打击司令部针对老旧轰炸机长期存在的备件短缺、维修周期长、任务可用率偏低等问题，于2025年启动了“北极星战备提升行动”专项计划，通过改革供应链、建立跨基地备件横向调拨快速通道，将跨基地备件转运时间从7天压缩到2~3天，同时联合厂商优化基地级维修流程并压缩大修排队周期。今年8月美空军宣布，这些做法有效提升了老旧轰炸机前沿部署效率。

挖掘潜能，努力实现换羽新生

随着未来新型轰炸机的列装、无人机和各类导弹的不断发展，战场上的各种变化正在加速演进，各种挑战压力正在持续增大。但从作战需求和现有装备能力来看，现有轰炸机一些独有的功能仍是其他平台所不能取代的，且其自身还有潜能可以“二次开发”“深度利用”。

保留“潜力股”，填补能力缺口。目前来看，常规轰炸机所承担的部分打击任务或将向高超声速导弹、远程打击无人机等转移，但面对未来大规模作战、打击深埋目标或大型舰艇等任务，能携带巨型钻地弹以及高超声速导弹等大载荷弹药的重型战略轰炸机仍将不可或缺。这也是美空军持续推进B-52H升级和俄空天军推动图-160M复产并深度改进的重要原因。

逐步精简机型构成。根据美空军未来规划，随着B-21规模服役，将逐步替换B-1B和B-2A，未来轰炸机机队将只保留B-21和B-52J两型机，一方面可以打造高低搭配、功能互补的精干轰炸机体系，另一方面也将简化后勤保障，降低机队整体运维成本。在任务分配上，B-21数智兼备，负责隐身穿透、战场指挥、目标分配。B-52J载弹量大，负责大规模打击任务，合力放大作战效果。俄罗斯或将采取逐步汰换模式，未来将保留图-95系列和图-160M，并与未来可能的新型轰炸机混编机队，提高作战效能。

变身“武库机”，支持规模作战。轰炸机是改装“武库机”的最佳平台，通过加装“托盘化”弹药系统、增设多联挂架、扩容内置弹舱以及改装航电系统等，将其打造成“空中弹药库”或“空中弹仓母机”，实施远距离饱和打击。目前，美空军已经在做相关尝试，实战中，轰炸机可接收预警机、隐身战机、无人机、舰艇和卫星提供的目标信息，在强对抗环境下可实现“A射B导”。

化作“新节点”，另作他用。历史上，美军曾将B-17改装为遥控巨型爆破无人机、大型空中靶机、核试验空气采样机的案例，苏联也有将图-4、图-16改装成遥控靶机的尝试。然而，现役轰炸机造价普遍较高，将其改装成无人轰炸机，成本不会低，若是将其变成一次性可消耗平台更是不划算，目前还没有相关立项方案。

未来，随着技术不断提升、作战需求发生改变，老旧轰炸机或将化身为新的“空中火力点”或“空中无人机母机”，实现换羽新生。

兵器科普

浅说弹药三种击发方式

■王 杰 强裕功

弹药的击发点火是枪支射击的关键环节，这一环节直接影响枪支的射击可靠性、精度与射速。历经长期技术演进，目前主流的弹药击发方式主要有三种，从传统机械撞击到电击发，再到激光触发，原理特性各有不同，适用场景也各有侧重。

机械击发是发展最久、应用最广的经典击发方式，也是绝大多数枪械与常规火炮的主流选择。机械击发依托纯机械结构传递能量，扣动扳机后，击针在弹簧作用下高速撞击弹药底部的火帽，火帽受挤压发火后，火焰通过传火孔引燃弹壳内的发射药，产生的高压燃气随即推动弹头射出枪管。

机械击发只依靠自身机械结构即可完成完整发射循环，结构简单、成本低廉、可靠耐用，不受断电与电磁干扰影响，在严寒、沙尘等恶劣环境下仍能稳定工作。俄军AK系列步枪、美军M4系列步枪以及各国列装的牵引式火炮，普遍采用机械击发模式，适配日常战备与大规模常规作战需求。这种击发方式的局限性在于，长期往复撞击会造成机械零件磨损，长期使用后可能出现击发力度下降、可靠性降低的问题。

电击发是武器电气化升级背景下的技术产物。它依靠电流触发弹药点火，武器电极与弹药专用电底火对接，电路接通后，底火内部的发热元件快速升温，依次引燃点火药与主发射药，最终完成发射流程。

得益于无机械撞击的设计，电击发几乎不存在机械撞击造成的零件磨损问题，击发响应速度更快，每发弹药的点火一致性更高，还可实现多发弹药同步击发，十分适配对射击精度与射速要求较高的武器平台。美军MK45型舰载火炮是这类技术的典型应用，凭借稳定的电击发结构，可满足舰艇高频次、持续射击需求。电击发的短板也较为突出，其全程依赖供电系统，一旦出现电路故障或遭遇强电磁压制，便无法正常工作，复杂战场环境下的整体可靠性弱于机械击发。

激光击发是当前最前沿的新型击发技术。它以高能激光束作为能量载体，由激光发射器输出光束，直接照射弹药配套的激光底火，通过光能在极短时间内引燃发射药，完成击发动作。激光击发的击发延迟极低，不存在机械损耗，且激光传输不受电磁干扰影响，还能大幅降低弹药意外殉爆的风险，在精度与安全性上相较传统击发方式有明显优势。

目前该技术主要应用于欧美多国的高精度弹药研发项目与新型火炮试验平台，美国陆军在远程火炮技术验证中，就曾测试激光击发方案。受技术条件限制，激光击发目前难以大规模普及，相关设备精密度高、造价昂贵，且激光光路易受沙尘、污物遮挡，对使用环境要求较高，战场容错能力相对较低。

总体来看，三种击发方式各有所长，不存在绝对的优劣之分。机械击发稳妥可靠，电击发高效精准，激光击发技术潜力巨大。三者各展所长互为补充，共同构成现代武器弹药的核心击发体系，也将伴随材料与技术进步持续迭代发展。

兵器控

品味有故事的兵器

■本期观察：白季平 卢 涵

现代海空对抗环境日趋复杂，反舰导弹、弹道导弹等威胁多元交织，舰载雷达已经成为战舰感知战场态势的重要装备。各国根据自身舰艇定位，走出不同的雷达技术发展路径。本期“兵器控”，聚焦3型各具特色的舰载有源相控阵雷达。

海空之眼

AN/SPY-6有源相控阵雷达



如何在复杂电磁条件下兼顾远程防空与反导任务？AN/SPY-6是美国海军为替代SPY-1系列研制的新一代舰载雷达，主要装备“阿利·伯克”级FlightⅢ型驱逐舰，衍生型号还可适配护卫舰、两栖舰艇等平台。

该雷达采用氮化镓器件与标准化雷达模块组件，依靠增减模块实现性能伸缩，可同步开展远程对空搜索、弹道导弹跟踪、海面目标监视等任务，灵敏度较SPY-1大幅提升，抗干扰能力显著增强。然而，高性能的背后，是对舰艇供电、冷却系统提出的严苛要求，旧舰艇装备该雷达需要改装舰上配电冷却系统，采购与升级成本较为高昂。

桅顶瞭望

Furke-4有源相控阵雷达



茫茫大洋之上，防空作战讲究“料敌于先”，能否尽早捕捉空中来袭目标，直接关乎战舰生存。俄罗斯Furke-4旋转有源相控阵雷达，便是护卫舰桅顶的“防空瞭望哨”，安置在主桅杆顶端雷达罩内。

该装备是单面旋转三坐标对空搜索雷达，主要担负远程海空警戒任务，可自动完成目标探测、分类与航迹跟踪，为舰上的四面阵雷达提供目标指示，协同构建舰艇防空体系。它既能盯防高空远距目标，也可捕捉掠海来袭目标，设备体量紧凑，适配中型舰桅杆安装条件。受机械旋转体制限制，其目标数据刷新速率低于固定四面阵，在强电磁干扰环境下，对小型低可探测目标的持续跟踪能力有所欠缺。

均衡之选

“海火500”有源相控阵雷达



中型护卫舰怎样平衡防空战力、载荷限制与后期升级需求？作为FDI型护卫舰的核心探测装备，法国“海火500”有源相控阵雷达提供了一套解决方案。

该型装备为全数字化S波段四面固定阵雷达，搭载氮化镓收发单元，可同时处理数百个空海目标，承担远程预警、掠海目标捕获，还能为“紫苑”舰空导弹提供火控支持。依托软件定义架构，舰艇无需返厂即可完成雷达能力升级，模块化配置可适配不同吨位舰艇。

受单S波段体制约束，该雷达没有独立X波段专用火控阵面，部分高精度末端制导任务需要舰上其他传感器协同完成，对全舰体系协同提出更高要求。