

## 军工T型台

**F-35战机在未来改进中将换装什么型号发动机？**  
前段时间，美国多家军工企业就F-35战机换装发动机问题展开激烈争论，洛马公司和通用电气公司公开支持为F-35战机换装基于自适应变频技术的新一代发动机，这与美国军方升级F135发动机的计划背道而驰，也遭到发动机制造商普惠公司的反对，一时间各方争执不下。  
可以说，此次纷争反映出美国军工企业背后复杂的

的利益角逐，也凸显美军对航空发动机发展方向的举棋不定。众所周知，F-35战机发动机缺陷问题自服役以来就一直存在。美国空军高层曾表示，由于维护问题，部分F-35A战机因发动机故障原因无法出动，F-35战机换“心”计划已迫在眉睫。  
一款发动机为何受到各方如此重视？这场F-35战机换“心”带来的纷争会引发怎样的连锁反应？请看本文解读。

# F-35战机的换“心”之争

■姜子哈 宋 鹏 党秉权



## 一家独大埋下祸根，战机“心脏病”久治不愈

军用航空领域，一代发动机研发一般需要30年，发动机厂商通常选择“生产一代、研制一代、预研一代”的发展战略。因此，一款新型航空发动机的设计思路，将直接影响下一代战机的战场表现，改变未来战争的走向。

这一研发理念，在20世纪60年代逐渐成熟——冷战时期，美苏两国为赢得军事竞赛先机，各自推出新型发动机研发计划。美国国防部曾提出用同一个核心机发展两种发动机的决定，为空军选用更可靠的发动机提供备份。据估算，研发一款航空发动机的经费约占全机费用的25%。如何最大限度提升发动机效费比，是摆在各国军方面前的难题。

近年来，美国国防部在军购中引入市场竞争和经济评估，开始精打细算过日子。2011年，耗资数亿美元的通用电气公司F136发动机项目被裁减，方案更为保守的普惠公司F135发动机赢得F-35战机订单，打破了美军坚持40多年的“战机发动机双生产商采购政策”。

F136发动机项目终止，固然可以减轻美国财政压力，但也为未来发动机发展埋下隐患。据媒体报道，F135发动机的研发经费超支近20亿美元，更为重要的是，F-35战机失去了备份发动机，F135发动机稍有故障，极易造成整个F-35机队停飞。

这并非危言耸听，F135发动机在此前的研制阶段，曾发生2次发动机涡轮叶片损毁。此外，F135发动机还出现过滑油泵漏油的问题，导致整个机队2次停飞。战机“心脏病”问题久治不愈，让美国空军头疼不已。

前不久，美国国会一份报告指出，由于F135发动机出现严重缺陷，美国国防部已投入380亿美元的资金进行大规模维修，以确保其正常运转。这无疑对美军发动机更新计划造成重大冲击。

种种事件表明，战机要想持续发展，既要扶持重点厂商，也要避免出现垄断现象。据统计，普惠公司生产的发动机曾一度占据美军近一半的需求份额。F135发动机被曝出维护和供应链

问题，引起多个采购F-35战机的国家高度关注。

2021年9月，美国空军一名高官曾表示，尽管F-35战机换装新发动机计划造价不菲，且周期漫长，但他依然支持该计划。主打研发新一代变频发动机的通用电气公司迅速作出回应，其研发的XA100变频发动机节约的燃油可以抵消前期的高额成本，为彻底解决战机“心脏病”问题提供了新思路。

## 旧“心”难堪大用，新型发动机研制遥遥无期

航空界有句名言：“一代发动机决定一代战机。”以第五代发动机为例，相比上一代发动机，燃气温度和推力都有很大提升，能够帮助战机实现超声速巡航。美国国会表示，从2027年开始，为F-35机队换装性能更好的发动机。

面对更新换代需求，通用电气公司迅速向美国国防部提出新方案：为F-35战机更换全新的XA100变频发动机。作为变频发动机的研制方之一，洛马公司也同样认为，换装变频发动机是确保F-35战机在未来战场上夺取制空权的关键。

在今年巴黎航展上，洛马公司一名高管针对美国国防部当前的F-35战机发动机改进规划提出质疑：“我认为现在的一些做法非常短视，观念上缺乏更长远的考虑……”言语间，直指F135发动机已不具备改进价值。

目前，通用电气公司仅制造了2台XA100原型机。该项目负责人在发动机测试方面也是含糊其词，并没有给出准确数据。扑朔迷离的研发周期、造价不菲的换装计划，为变频发动机研发蒙上了一层阴影。

相比通用电气公司，眼下的“既得利益者”普惠公司则主张通过改进现有发动机和升级冷却系统来解决当前发动机问题，以降低维护保障成本，并对洛马公司提出强烈谴责：“研制新型发动机，美国必须多掏数百亿美元，建立与之配套的后勤保障体系。”这无疑是为了自身利益而对美国军费预算造成额外负担的行为。

显然，普惠公司并不愿意把已经吞下去的“蛋糕”拱手让人——这不单单

意味着经济上的损失，也可能带来一系列连锁反应。比如，美国空军可能会在此后很长时间内丧失对普惠公司产品的信心。尤其是面对美国空军对换装计划的直接支持，普惠公司更迫切需要争取客户信任。

争议的背后是各方势力的角逐，美国参议院和众议院的选边站队更是将此次竞争推向高潮。参议院主张对现有发动机进行改进，在保证F-35战机可靠性的同时，减少军费支出；而众议院则是希望结束普惠公司F135发动机的垄断地位，认为有必要选择全新的下一代发动机，以确保美国在军事上的领先地位。

角力之下，美国军方成为天平倾斜的最后一个砝码。今年初，美国国防部发布2024财年预算，削减了研制下一代变频发动机的预算。这无疑给新型发动机的研制蒙上阴影。迄今为止，一些议员们还在推动国会令空军修改预算，把支持F-35战机换装发动机的经费补回去。如何在平衡军事需求、经济压力和利益冲突的同时，推动F-35战机发动机顺利升级，是对美国军方的一大考验。

## 各方利益错综复杂，换“心”费用难以平衡

事实上，为F-35战机选择发动机，美军内部的态度也并不一致。美国空军、海军、海军陆战队三大军种，虽然同为F-35战机用户，但他们有着完全不同的战略需求，装备F-35战机的具体型号和规模数量也不尽相同。在这种情况下，F-35战机的改进升级，需要平衡各方作战性能指标和使用成本。

相比F-35A战机采用的常规陆基版本发动机，F-35B和F-35C都需要长时间在海洋环境下使用，对于防潮排水、防盐雾腐蚀等方面性能有着特殊要求，这意味着大量部件从基本材料、表面处理工艺、紧固件选用都不相同。

其中，F-35C需要频繁进行撞击式降落的着舰飞行试验，发动机结构和紧固件需要进行额外强化，才能保证可靠性和使用寿命。而F-35B的发动机差异最大，它不仅需要从前方分流巨大的机械功率用于驱动专门的升力风扇，而且尾喷管也必须是更复杂的可偏转

结构。

按照目前公布的数据，美国空军计划购买1763架F-35A，美国海军计划购买273架F-35C，美国海军陆战队计划购买353架F-35B和67架F-35C。当前，美国空军实际服役320架F-35A，美国海军陆战队实际服役127架F-35B，美国海军实际服役26架F-35C。不难看出，F-35A的数量，特别是尚未投入制造的数量，远高于F-35B和F-35C。如果考虑到F-35战机的全球市场，拥有大吨位常规起降航母和两栖攻击舰的客户很少，F-35B和F-35C的数量比例劣势还将进一步放大。

显而易见，如果F-35战机要装备新一代变频发动机，最占便宜的一定是美国空军，花的钱最少，能改装的战机最多，军种整体作战能力提升最大，形成战斗力也最快。按照此前通用电气公司的表态，如果一切顺利，XA100变频发动机的正式版本A-100，最早可以在2027年装备在F-35A上交付使用。

相比之下，美国海军要吃亏不少，他们要支付更多的额外费用用于发动机研发，而且只能分摊在200多架战机上。而美国空军则是投入更少费用，分摊到1000多架战机上。

如果只是从技术角度来讲，美国海军陆战队是最渴望更新换代发动机的。F-35B垂直起降的特殊设计，占据了战机很多可用空间和重量指标。XA100变频发动机的更高推力、更低油耗，可以使F-35B的载荷能力、作战打击半径等方面获得性能提升。

但出于经济角度考虑，美国海军陆战队恐怕是对换装XA100最不感兴趣的军种。一方面，研发XA100垂直起降发动机的成本高昂，远高于研制舰载机常规起降版本。另一方面，目前F-35B战机已经交付超过1/3，考虑到为XA100适配升力风扇、偏转喷管等额外工作所需要的时间，将使战机服役时间变得遥遥无期。

对五代机的改进升级，新一代变频发动机有着巨大吸引力，但不同F-35战机型号之间存在使用需求差异，决定了F-35B和F-35C换装新型发动机，将面临远高于F-35A的研发成本。未来，可能会出现部分F-35A换装变频发动机，而F-35B和F-35C均继续使用F135改进型发动机的情况。而这样的高低搭配效果如何？仍需进一步观察。

上图：F-35B战机停靠在航母甲板上。

## 军工世界观

今年上半年，韩国自主研发的防空反导系统L-SAM再次进行了试射。根据之前计划，韩国将在2024年底前完成L-SAM的研发和测试，2026年实现批量生产。

韩方表示，L-SAM具备陆基远程防空作战和末端高空反导作战能力，是“韩国型导弹防御系统”的核心装备。然而，被韩国寄予厚望的L-SAM却存在多处短板弱项，其发展前景难言乐观。

一是反导预警探测能力有待提高。韩国为L-SAM研制的多功能相控阵雷达，集目标探测与跟踪、敌我识别、拦截弹制导等功能于一体，虽然实现了小型化和车载机动部署，但在探测距离和精度、信号和数据处理、抗干扰效果、一体化协同作战等方面同世界一流反导雷达尚有差距。据悉，该雷达采用防空和反导兼用的S波段，并未采用更加适合反导探测的X波段，最大探测距离仅有数百公里，反导作战能力有限。事实上，目前韩国在反导预警探测方面仍然依赖美军通过天基卫星、陆基和海基反导雷达等手段获取并共享的预警信息，而单凭韩国从以色列购买的“绿松”反导雷达和韩国海军“宙斯盾”雷达显然很难满足其预警探测需求。

二是拦截弹推进动力不够先进。据韩方披露的信息显示，L-SAM的反导拦截弹的最初设计是采用双脉冲火箭发动机和推力矢量控制装置，但承担拦截试验任务的样弹却变更为两级固体火箭发动机。双脉冲火箭发动机有助于优化导弹能量管理，有效增加导弹射程，提高末端拦截速度，结合推力矢量控制技术还能增强末端机动性和突防能力，是世界先进反导拦截弹的首选推进系统。不难看出，韩国L-SAM的反导拦截弹的初始设计标准很高，但受制于整体技术能力不足，在高水平火箭发动机的开发应用方面显得“力不从心”。

三是动能拦截技术研发难度大。韩国为L-SAM的反导拦截弹配备了动能拦截弹头——以直接碰撞方式摧毁来袭导弹。通常情况下，针对战机、无人机、巡航导弹等目标的防空导弹多采用破片杀伤弹头，但弹头的战斗部对高速飞行的弹道导弹毁伤效果一般，因此反导拦截弹普遍采用动能拦截技术。动能拦截器技术研发难度大，被韩国视为L-SAM的关键核心技术。尽管韩国实现了动能拦截弹头从无到有的突破，但

# 韩国发展防空反导系统前路漫漫

■周默草

其技术沉淀有限，实战效果还有待检验。据悉，韩国还为L-SAM研制了破片式拦截弹头，此举是否出于对自研动能拦截技术的信心不足耐人寻味。

近年来，韩国构建分层防空反导体系的步伐明显加快，但想要凭借L-SAM打造一流反导系统难度颇大。构建分层防空反导体系是一项系统性和综合性工程，韩国在预警探测、指挥控制、火箭发动机技术、结构材料、热防护等方面仍面临诸多挑战，未来发展前路漫漫。

## 子弹弹头为何有圆有尖

■孙超然 褚玉奎

## 军工科普

射击前，我们往弹匣压子弹时，会发现步枪子弹大多是尖头，而手枪子弹则为圆头。子弹弹头有圆有尖，这是为什么呢？

首先，弹头外形取决于作战需求。步枪子弹通常是对数百米外敌人进行射击，尖头子弹就像一枚锋利的钉子，对掩体和防弹衣保护下的目标造成有效杀伤。而手枪多用于城市街区的近距离作战，横截面大的圆弹头在命中后更容易停留在目标体内，使全部能量作用于敌人，令其迅速丧失行动能力，实现一招制敌的同时，也避免了弹头贯穿目标误伤人质的情况。

其次，弹头的外形源于其在空气中飞行特性。现代空气动力学研究表明，手枪子弹的发射速度约为300至500米/秒，很多情况下处于亚声速，设计为圆头，会使子弹在空气中飞行阻力更小。而步枪子弹的发射速度为700至850米/秒，处于超声速，设计为尖头可以使子弹飞得更远、更准。

此外，子弹外形还与装填供弹方式有关。相同质量的子弹如果制作成圆

头，要比制作成尖头所占空间小。手枪不需要步枪那样双手握持，主打灵活便捷，它的弹匣宽度要满足手掌的握持要求。因此，手枪子弹长度非常短，通常会设计为圆头。

当然也有例外，比如旧中国仿制德国1888式委员会步枪的“汉阳造”，使用的子弹就是圆头子弹。而新中国5.8毫米手枪，使用的则是尖头子弹。

为了追求极致杀伤力，除尖头和圆头子弹外，枪械设计师还设计出扩张型、粉碎型弹头。这些子弹在击中目标后会发生形变，对人体造成极大损伤。

无论圆头还是尖头，子弹的设计永远贴合“杀伤力”这一属性，确保不同弹头在战场上发挥最大效用。

图①：采用圆头子弹的手枪。

图②：采用尖头子弹的步枪。

资料照片

