

F-35战斗机换发计划分析

Analysis to F-35 Alternate Engine Program

■ 王翔宇 谭米 / 中国航空发动机研究院

在F-35战斗机动力系统能力提升的迫切需求牵引下，普惠公司和GE公司围绕F-35战斗机换发合同展开了激烈竞争。虽然GE公司的自适应发动机方案有更大的性能提升可能和后续升级空间，但普惠公司的F135发动机升级方案在经济性、兼容性和安全性等方面表现更优，成为了美国空军最终的选择。

在美国国防部将F-35战斗机合同授予洛克希德-马丁（洛马）公司20多年后，如今战斗机的作战需求正在超越其配装的F135发动机的性能极限，关于F-35战斗机的换发选择引起了多方的关注。从2021年开始，普惠公司和GE公司针对F-35战斗机动力系统升级项目推出了各自的竞标方案，2023年3月，美国空军决定在2024年为F135发动机核心机升级（ECU）计划拨款2.45亿美元，并停止自适应发动机转化计划（AETP）。旷日持久的F-35换发之争最终以普惠公司的F135发动机改进升级方案胜出落幕，而GE公司力推的自适应发动机则将专注于六代机动力需求。这也是一次技术先进性与产品适用性和安全性、经济承受性之间的深层次权衡。

F-35战斗机换发背景

1996年，作为洛马公司、波音公司和诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司这3个F-35战斗机竞标者共同的动力选择，F135发动机由普惠公司在F119核心机的基础上进行开发。2001年，普惠公司正式获得了一份为期10年，价值48亿美元的发动机研发生产合

同，相关试验测试工作于2003年开始。尽管过程中出现了涡轮导向叶片腐蚀损坏、风扇叶盘破裂、升力风扇失速和机载发电机功率不足等一系列问题，但F135发动机还是成为了F-35战斗机项目中为数不多的没有发生经费超支和周期延误的部件系统之一。2010年普惠公司向美国空军交付了首台生产型F135发动机，2016年12月，普惠公司宣布F135发动机研发结束，准备全面进入生产阶段。

在F-35战斗机服役的近10年时间里，其机体部件进行了3次重大升级，但依旧维持着原始的F135发动机配置，发动机性能正在制约F-35战斗机发挥理想作战效能，主要包括以下5个方面内容：一是F-35战斗机的长度、翼展和质量较初始设计分别增长了13%、16%和30%，需要更大的推力来保证飞行机动性；二是飞机尺寸和质量的增大使得F-35战斗机的航程缩短了15%，需要提高燃油效率从而扩大作战半径；三是F-35战斗机的冷却需求从最初的15kW上升到了30kW，未来可能会进一步达到47kW，相应的发动机热管理能力至少要提高2倍以上；四是由于大量引气被抽出用于冷却，燃油效率进一步下降，运行温度高于设计点，部件磨

损加剧导致发动机故障率高于预期；五是先进计算机、雷达和光学系统的应用使得飞行用电量急剧增长，需提升发动机功率提取能力并为兼容高能激光武器提供基础。

2019年，美国空军瞄准在太平洋战区作战的战略需求提出第四批次增量升级（Block 4.X）计划，这也是F-35战斗机有史以来最大的一轮升级。Block 4.X计划涉及70余项升级任务，动力系统现代化被列为5项重点任务之一，发动机更大的推力、更高的燃油效率、更长的使用寿命、更强劲的冷却和发电能力将是F-35战斗机换装其他全新任务系统的基础。不仅如此，由于缺乏针对新涂层设计缺陷的维修技术、备用发动机供应不足以及过度依赖全球共享库等因素，从2020年开始，F135发动机频频延迟交付，造成F-35战斗机大量停飞，可以说即便是单纯考虑维持F-35战斗机现有作战能力，F135发动机升级换代也是一项十分紧迫的工作。

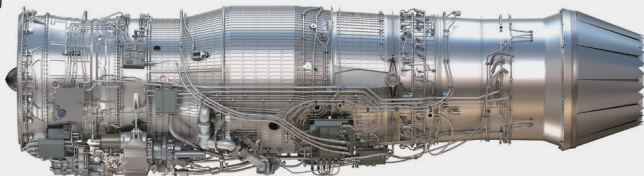
F-35战斗机换发的两种方案 换装自适应发动机

自适应发动机概念于2006年由美国空军研究实验室（AFRL）提出，

XA100

GE 公司 XA100 自适应发动机验证机包含了全新的架构，以及更先进的材料和制造技术

陶瓷基复合材料的应用使发动机质量更轻，性能更加强劲
 燃油消耗降低 25%
 有史以来首个三涵道自适应架构，实现性能和效率的平衡
 飞行航程提升 30% 以上



最大推力提升 10% 以上，且响应速度最快
 技术研发投资超过 10 亿美元
 增材制造为先进设计提供更多可能

GE 公司自适应发动机宣传图

可以通过改变涵道比等循环参数来适应不同飞行条件的需求，相比常规构架发动机可以实现更大的工作范围和更高的性能指标。2016年，AFRL 授予 GE 公司和普惠公司各 10 亿美元以开展 AETP 的研发，要求在现有动力的基础上将耗油率降低 25%、推力提高 10% 并显著改善热管理水平。两家公司需要将自适应发动机技术成熟度提升到 6 级，并于 2021 年之前制造出用于台架试验和飞行测试的 200kN 推力级原型机。当时美国空军对其应用场景有 3 个设想，包括用于 F-35 战斗机现代化升级，将缩放通用核心机用于下一代空中优势 (NGAD) 战斗机，或用于 F-22/F-15/F-16 等其他战斗机升级。

2021 年 5 月，GE 公司宣布其首台三涵道自适应发动机验证机 XA100 完成测试。与当前发动机相比，XA100 发动机燃油效率提高了 25%，推力提高了 10%，加速时间缩短了 18%，热管理能力提升了 167%，预计配装飞行平台的航程将增长 35%。2022 年 9 月，GE 公司宣布完成第二

台 XA100 发动机验证机测试，准备进入工程和制造发展 (EMD) 阶段，其深度衍化型号被命名为 XA102。普惠公司也于 2021 年 9 月宣布其自适应验证机 XA101 成功完成测试，推力提高了 10%，燃油效率和热管理能力提高了 25%。普惠公司表示 AETP 中开发的三分之二的技术都可以应用到现有的发动机产品之中，包括与发动机配套的材料、附件和其他机械系统。

F135 发动机升级

F135 发动机模块化的设计和先

进的数字架构允许灵活再开发并进行螺旋式的软硬件升级。2017 年，普惠公司发布了 F135 发动机的增长选项 1.0 (Growth Option 1.0) 升级方案，可实现 5% ~ 6% 的耗油率优化和 6% ~ 10% 的推力提升，但因为没有把技术关注点集中在电力供应和热管理上，遭到了 F-35 战斗机联合计划办公室的否定。2018 年 6 月，普惠公司又提出了增长选项 2.0 升级方案，着重于提高电源和热管理系统 (PTMS) 容量。2022 年 12 月，柯林斯宇航公司和普惠公司公布了一种新的应急动力和冷却系统 (EPACS)，可以使 F-35 战斗机航程和推力增加 7%，冷却能力提高 1 倍。该系统兼容空军型 F-35A、海军陆战队型 F-35B 和海军型 F-35C 等 3 种子型号，2023 年技术成熟度即可达到 6 级，改进后的 F135 发动机预计于 2028 年投入使用。事实上 2022 年 12 月，普惠公司就赢得了美国空军一份价值 1.15 亿美元的初步合同用于 F135 发动机核心机升级，这也为 ECU 方案的最终胜出埋下了伏笔。

F-35 换发方案比较

此次自适应发动机方案与 F135 发动

F135 ECU



核心属性

- 基于高可靠性、高安全性的战斗机发动机演化发展
- 面向所有客户，以最短的时间提升作战能力
- 唯一兼容 F-35 战斗机不同型号的动力方案
- 只需研发新发动机三分之一的资金投入，全生命周期有望节省上百亿美元
- 能够满足 F-35 战斗机 Block 4.X 乃至后续进一步升级的性能要求

普惠公司 F135 发动机核心机升级方案宣传图

机升级方案的竞争并不是F-35战斗机第一次选发之争。此前，GE公司和罗罗公司联合开发的F-35战斗机备用发动机F136项目，尽管在缺乏飞机制造商、美国军方和政府机构支持的情况下最终下马，但在1998—2010年依旧获得了美国国会13项专项拨款，累计经费达到了15亿美元。可以说，在F-35战斗机过往的近30年时间里，GE公司一直试图在这个有史以来规模最大、价值最高的配套发动机研发项目上找到一个合适的位置。如今历史再次重演，虽然没有人否认自适应技术代表战斗机动力的未来，AETP验证机也展现出了前所未有的动力性能提升和广阔的后续发展空间，但经济成本过高、通用性不足和技术风险较大始终是换装自适应发动机方案无法回避的3个问题。

根据美国空军的估计，自适应发动机前期开发成本约为67亿美元，这笔钱足够采购70架F-35战斗机，约是普惠公司F135发动机升级方案24亿美元报价的3倍。同时，后者还可避免重复性的生产线和供应链建设，能在F-35项目全生命周期内节省400亿美元。更为关键的是，自适应发动机无法满足整个F-35机队的动力需求，特别是难以兼容海军陆战队型F-35B战斗机，美国空军相关负责人多次表示空军是唯一对自适应发动机有浓厚兴趣的军种，但换装自适应发动机高昂的研发经费需要空军独自承担，也是空军绝对承受不起的。此外，美军从未有过不经双发飞机长期验证，就直接将新发动机应用到像F-35这样单发飞机的先例，与仅完成验证机测试的自适应发动机相比，F135发动机

已交付了1000多台，完成了60多万h的安全飞行，在拥有经过各种实战检验的高性价比选项的情况下，换装一款零飞行时间的动力装置似乎是不明智的。

除了关于两种方案的直接对比，长期以来美国社会围绕F-35战斗机选发还有两种争议观点。一是在普惠公司之外，引入像GE公司这样的额外参与者能否更好激活市场竞争从而节省资金。事实上军工领域从来都不存在完全开放自由的市场，如果有限的研发资金分配到两家公司，那么二者可能会专注于最大化自己的利润份额而不是在质量和经济性上相互竞争，最终政府还是要为两个研究团队重复的开发设计以及两个供应链的复杂保障买单，这

种“为了竞争而竞争”的做法甚至可能会起到适得其反的效果。二是担忧国防开支过度集中在个别公司会破坏美国航空发动机的工业基础。虽然工业基础这个概念看起来很大，但这里实际上就是GE公司及其配套企业的发展，而F-35战斗机选发对于GE公司经营的重要性显然被有意无意地夸大了。作为当前美国军方最大的发动机供应商，GE公司在未来相当长的时间内都有海量的军用和商用发动机项目和订单。

一个有意思的事实是，2023年7月美国众议院军事委员会版本的《2024年国防授权法案》中尝试为AETP继续提供5.884亿美元的资金，这显然与几个月前美国国防部的预算申请相悖，美国公民反对政府浪

自适应发动机未能成为F-35战斗机换发方案的十大理由（来源：福布斯）

1	理由不充分	通过升级F135发动机能够满足未来F-35战斗机的作战需求，而将新的发动机直接应用到单发战斗机上失之操切
2	价格过于昂贵	仅研发自适应发动机将多付出数倍的经济代价，这还不包括新建供应链的花费
3	削弱军种间的互操作性	自适应发动机难以适配F-35战斗机不同的子型号，各军种之间的联合作战会出现新的挑战
4	削弱盟国间的互操作性	近20个国家已经或确定采购F-35战斗机，但除美国外没有一个国家倾向换装自适应发动机，海外联合作战面临新的问题
5	难以利用现有保障体系	引入自适应发动机使F-35机队的保障更加复杂，各类维护活动不具有通用性，可能会增加数百亿美元的成本
6	技术还不够成熟	作为跨时代的动力产品，自适应发动机刚刚完成了地面验证，距离成熟应用还有很多技术问题有待解决
7	存在较大的延期风险	美国各军种都对能否快速部署F-35战斗机表示焦虑，而换装新的发动机肯定需要比升级旧的发动机更长的周期
8	发动机出口前景堪忧	即使有盟国愿意采购一些自适应发动机，也需要等待美国漫长的重新认证过程，这对于发挥其产业带动效应非常不利
9	F135发动机仍具有相当大的开发潜力	F135发动机至今尚未经历一次大型升级，就这样被新的发动机取代是不负责任的，是对前期巨大研发投入的浪费
10	国防预算已经捉襟见肘	美国联邦债务屡创历史新高，谨慎的成本管理成为多方共识，还坚持过于昂贵超前的解决方案显得不合时宜

费协会（CAGW）甚至评价为“一些国会议员决心牺牲国家安全需求来满足其狭隘的选票利益”^[1]。事实上，长期以来美国立法系统无视政府和军方的意见而强行为符合个别企业和地方利益的项目提供资金并不是什么新鲜事，例如，从2007年美国国防部不再为F136备发项目申请预算到其最终下马历时长达5年，仅2009年众议院就为其提供了4.65亿美元的匿名专项资金，那些来自俄亥俄州和印第安纳州的议员对此表现格外活跃，而GE公司设计制造F136发动机的工厂主要就在这两个州。未来相当长的一个时期，很大可能会出现AETP既不会用于F-35战斗机，同时相关投入也不会完全停止的妥协局面。

几点思考

整体来看，此次F-35战斗机换发将对未来美军空中作战力量发展产生深远影响，其中涉及的技术路径之争既体现了航空动力制造商在相同平台需求牵引下的不同应对思路，也反映了美国军方在装备研发采办过程中所进行的考量与取舍。

第一，功率提取技术和热管理技术已成为航空发动机升级的关键，不仅影响发动机自身的使用寿命和飞行能力，而且制约战斗机其他机载设备作战效能的发挥。未来发动机需要尽快从单纯的化学能到机械能转化装置发展成全面的能量提供者和管理者，美国空军已经针对未来空中优势平台的需求，先后实施了飞行器能量综合（INVENT）计划、综合动力与热管理验证机（INPPAT）计划以及电力、能量、热、综合和控制（PETIC）计划等，涵盖基础预

研和演示验证各个环节。

第二，换发是多因素、多维度权衡的结果，技术先进性绝不是评判发动机好坏的唯一指标。在满足作战需求的前提下，F135发动机升级这样的快捷通用、低成本、低风险方案显然更容易受到认可，将“高版本”的动力系统（自适应发动机）应用到“低版本”的飞行平台（F-35战斗机）不但无法发挥其真正能力，也可能产生多种附加问题。

第三，ATEP的终止并不意味着美国暂停自适应技术研发，相反这将是验证阶段过渡到型号阶段的开始。2023年7月美国参议院通过法案，将投入2.8亿美元用于开发六代机动力技术，美国空军正在推动将ATEP前期工作融入到下一代自适应推进（NGAP）项目的产品研发中，虽然AETP和NGAP项目使用的技术基本相同，但未来配装NGAD战斗机的发动机尺寸与F-35战斗机有所差异，ATEP的要素必须进行调整和重新设计以配适NGAD战斗机。

第四，随着动力系统技术越来越复杂、研发投入越来越大，一机配双发的时代已经过去，胜者通吃的零和博弈将成为常态。在全方位的成本管理压力下，鼓励市场竞争和巩固工业基础之类的观念逐渐淡化，有限的财政预算更多流向单一市场参与者及其配套供应链，同质化的发动机产品很难再存在所谓的备份或替补型号，这种情况下围绕六代机动力需求，GE公司的XA100/102和普惠公司的XA101之间的自适应发动机之争必然空前激烈。

第五，尽可能降低政治因素的干扰、更好完善采办退出机制确有必要。每一次的选发都关系到海量

资金的分配，科学问题之外所附加的企业利益、地方利益乃至政客的个人利益考量有凌驾于国家安全优先事项和政府高效运作之上的趋势，无论是否对有潜力的落选方案提供持续发展机会，都需要客观公允、思路清晰、理由充分的果断决策，多方势力反复揪扯会对技术更新以及行业良性发展产生巨大的负面影响。

结束语

针对F-35战斗机的换发需求，美国军方选择了对F135发动机升级而不是将全新的自适应循环发动机取而代之。一方面，是认为升级后的F135发动机能够提供满足F-35战斗机对推力、油耗、热管理和功率提取等能力日益增长的需求，同时增强发动机耐久性和使用寿命；另一方面，则是出于最小经济代价、最低技术风险和最广配装对象的考虑，充分利用当前已有的供应保障体系，避免破坏性和昂贵的产品更换。而随着自适应发动机被进一步明确为六代机的动力装置，不远的未来普惠公司和GE公司将再次展开选发对决，后续发展态势值得持续跟踪关注。

航空动力

（王翔宇，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）

参考文献

- [1] Citizens Against Government Waste(CAGW). The F-35 Does Not Need an Alternate Engine[R/OL]. [2023-10](2023-11-15). <https://www.cagw.org/sites/default/files/pdf/F35Engine.pdf>.