

美国自适应发动机技术转化应用前瞻

Foresight of U.S. Adaptive Engine Technology Transformation

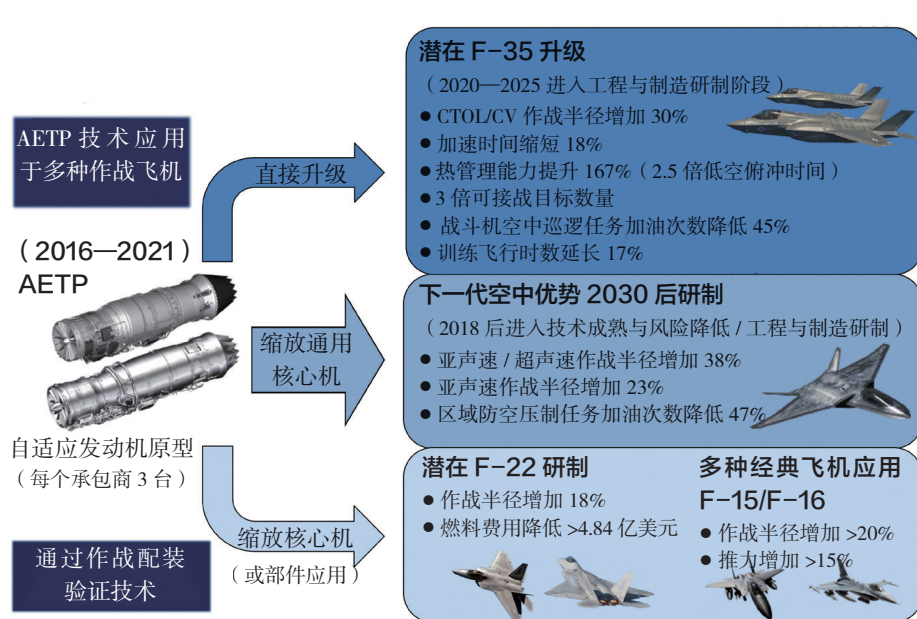
■ 晏武英 谭米 / 中国航发研究院

2021年，GE公司和普惠公司相继完成了首台自适应发动机的地面测试，美国自适应发动机转化项目（AETP）也随之接近尾声，项目的技术成果转化成为各方关注的焦点。

自适应发动机概念从2006年提出至今已历时15年，历经自适应通用发动机技术（Advent）计划、自适应发动机技术发展（AETD）计划和自适应发动机转化项目（AETP），到2021年终于实现了整机集成验证。承担AETP项目的GE公司和普惠公司宣布分别在2021年5月和9月完成了第一台自适应发动机（XA100和XA101）地面测试，均达到原定燃油效率提升25%、推力增加10%的目标。两家公司下一步将继续开展第二台发动机的测试，美国空军也宣布将在2022年在阿诺德工程发展中心对两家的原型机进行为期一年的试验。同时，美国空军正式启动了面向下一代战斗机（美国划代标准下的六代机）的下一代自适应推进（NGAP）项目，开展原型发动机的设计、制造和评估。美国空军曾经在AETP项目启动时设想过3种技术转化路径：直接用于F-35发动机升级、缩放通用核心机用于六代机动力，以及缩放核心机或部件用于F-22、F-15、F-16等现役飞机发动机改进。当前，自适应发动机技术已经基本成熟，转化应用到哪型飞机和发动机则成了各方关注的重点，也引发了各种争论。

F-35 换发：镜花水月

截至2021年11月，美国空军在役



美国空军设想的自适应发动机技术转化应用路径

的F-35战斗机超过300架，但却因发动机交付延迟和故障频发导致大面积停飞：2020年计划交付的136台F135发动机有115台延迟，平均每台发动机暴露出的质量问题超过1200个；2021年发动机短缺最多时达48台，停飞率超过15%。同时，美国空军还计划对F-35进行重大升级，2023年服役的第4批次飞机将提高武器挂载数量和种类、换装新型传感器、提升机载设备能力，这也就需要更高的推力、功率和冷却能力，现有的F135发动机已经无法满足需求。此外，F135发动机即将

迎来2000h的首次翻修，这些因素的叠加促使美国国防部开始考虑对F-35战斗机的动力系统进行升级或替换。

2021年7月13日，美国空军采购主管达琳·科斯特洛和副参谋长戴维·纳霍姆中将在众议院武装力量委员会的听证会上表示，空军非常关注AETP发动机的测试。分析表明，AETP发动机相比F135发动机油耗降低25%，可使F-35的航程增加30%、加速时间缩短18%、空气系统热管理能力提升167%，从而将飞机应对的目标数量提高3倍或消除对加

油机的依赖，增加飞机生存能力并满足第4批次及后续批次提升任务系统和武器载荷能力的要求。F-35项目将持续密切关注AETP的进展，一旦空军的需求明确，将考虑对AETP配装F-35进行评估。上述表态随即引来各方关注。

美国空军全生命周期管理中心先进飞机项目办公室负责人戴尔·怀特将军在2021年8月12日表示，AETP与现有发动机在结构和技术上差异较大，因此不太可能用新的动力装置对现有飞机进行改造。

而众议院在2021年8月30日提交的2022财年国防授权法案(NDAA)草案中要求国防部提供一份采办策略，用于AETP推进系统持续研发和集成，并从2027财年开始用于F-35A，同时还要求海军提供一份将AETP或其他先进推进系统整合入F-35B和F-35C的报告。众议院武装力量委员会主席亚当·史密斯此前抨击F-35项目为“老鼠洞”，他在2021年8月31日指出，随着近

些年导弹技术的进步，F-35的生存能力已经在高对抗环境失去优势，而应发展更小、更易生存的平台，特别是无人机。同时，他还力推在F-35项目中引进更多的竞争，尤其是发动机，认为目前美国已经有足够能力来实现面向未来的竞争。

2021年9月15日，F-35项目执行官埃里克·菲克中将表示，第4批的F-35确实需要更大的推力和冷却能力，并与普惠公司和国防部共同研究一系列增强动力的选项。但如果空军想将AETP发动机用于F-35A上，就得自行承担全部研发和集成费用，因为这种发动机并不适用于其他军种和其他国家的F-35，而这些用户一致同意为了尽量保持一致性而节省成本，“谁想要不一样的就必须自己花钱”。

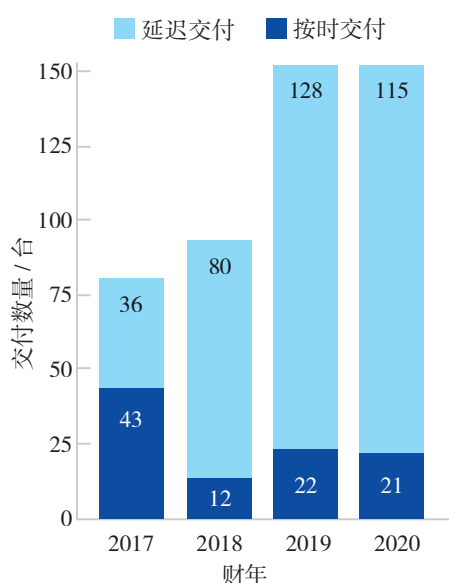
2021年9月20日，空军部长弗兰克·肯德尔表示，空军非常希望将AETP项目发展的新发动机用到F-35A上，但其在经济上是否可承受要取决于海军是否参与，他已经与海

军部长德尔·托罗进行了磋商，但结论尚不明朗。自美国空军成立以来，喷气式战斗机由于寿命相对较短，且国防装备论证和采办策略日渐成熟，尚未对战斗机进行过换发，仅有美国海军的F-14舰载战斗机由于TF30发动机实在难堪重任，迫不得已地换为更加稳定的F110发动机。

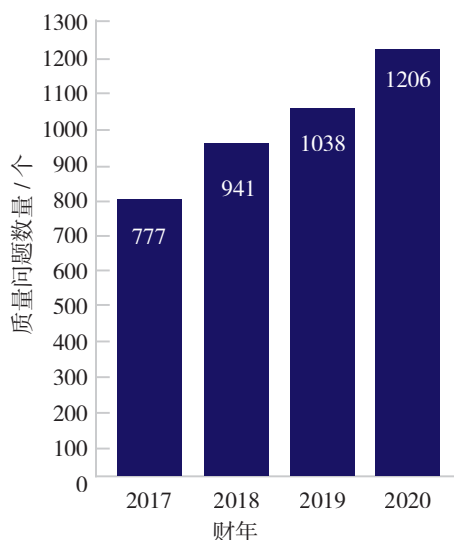
作为AETP项目的承担方之一，GE公司表示能够满足众议院提出的时间表，并渴望接受挑战，但这种发动机无法满足F-35B的要求，如果加以改进的话会大大超出众议院设定的预算和时间表。另一承担方普惠公司则表示，尽管AETP可以适用于F-35A，但更换新发动机会使整个项目在50年的生命周期内成本增加400亿美元，而且也赶不上F-35A第4批次在2023年服役的需要，会造成整个机队同时运行两种不同的发动机，增加了生产、维护和培训的成本。普惠的母公司雷神技术公司总裁格雷格·海斯则反对为F-35换装自适应发动机，认为这将是一项困难且昂贵的工作，而且时间表过于激进。

与之对应的是，普惠公司一直在努力推动F135发动机的升级，2021年3月提出的两份改进方案可使推力和航程提高10%以上，F-35B的垂直升力提高5%，热管理提高50%。9月又将其整合为F135“增强型发动机套件”(EEP)，可在前期已经将F135单位成本降低50%的基础上，再降低36%的首次翻修成本，并在2028年无缝接入现有的生产线。

综合相关各方反应，在AETP项目实现自适应发动机验证和F135无法满足飞机要求的背景下，美国参议院力主将AETP发动机用于



F135 发动机交付情况



单台发动机平均质量问题数量

F135 发动机交付延迟和质量问题情况 (来源: GAO-21-226)



普惠公司提出的F135“增强型发动机套件”

F-35；而F-35项目管理方也试图推动F-35动力升级或换发；美国空军认为AETP的确可以对F-35有很大的提升，但又因为这种发动机只适用于F-35A而不得不独自买单，正在试图寻求海军一起承担研发费用。供应商方面，GE公司自然是希望获得重新进入美国五代机动力的庞大市场，而且在六代机动力尚需时日并需要与普惠竞争的情况下，多一种选择未尝不可；但普惠公司并不愿意失去在F-35战斗机发动机唯一供应商的位置，因此主推的是分两阶段实施的F135改进方案。即第一阶段可以视为小改方案，利用已有的技术，重点针对F135存在的问题尽快实现推力提升和质量稳定；第二阶段则是充分利用AETP项目的成果，大量引入除三涵道架构以外的技术，对F135进行重大升级，类似于从F100-100到-220、再到-229的过程，最终实现F135的稳定成熟。

从各方的反应来看，F-35发动机能力的提升是必须实施的，但升级和换发两种途径各有优劣：升级成本低、见效快、潜力小；换发收

益高、成本高、时间长。尽管众议院对换发颇为积极，但国防授权法案还需要参议院和总统审议，能否保留对AETP项目的预算尚未可知。同时，国会和国防部还可以利用普惠公司的心理，以推动AETP发动机竞争为筹码，施压普惠公司拿出成本更低、性能更好、进度更快的F135改进方案。因此，以F135升级作为F-35的发动机能力提升途径的可能性更大一些，而从费效比的角度看，换发则并不划算。

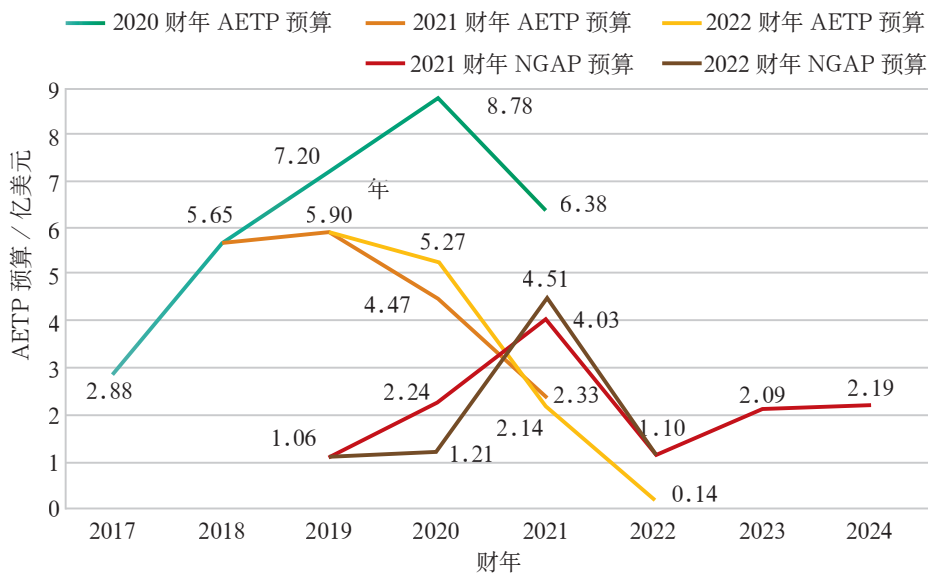
AETP：蜡炬成灰

尽管F-35换发屡屡成为各方的争论焦点，但AETP项目最核心的目的仍然是为用于六代机的发动机提供低风险的技术储备，其主要任务是设计和制造自适应发动机原型，完成部件试验评估和性能表征，并为制造工艺改进提供信息。原型发动机将开展海平面、高空等多种状态试验和耐久性评估来演示燃油效率的提高、推力的增加和新的部件技术，从而对性能以及热管理、可靠性和可支持性等领域的风险进行量化。

GE公司和普惠公司都计划研发全新的核心机，并各自制造3台试验发动机。首台发动机将测试基本的机械设计，第二台用来评估性能和可操作性，第三台则用于评估耐久性。

AETP项目包括详细设计、发动机制造和发动机评估3部分，初步设计则由之前的AETD项目完成。AETD项目在2012年启动时，作为自适应发动机技术预先研究的ADVENT计划并未结束，承担研究任务的GE公司和罗罗公司都尚未实现技术验证。但美国国防部于2011年中止了GE公司和罗罗公司联合承研的F-35替换发动机项目F136，而普惠公司的F135发动机研发工作也基本告一段落，都面临着战斗机发动机团队无米下锅的窘境。而当时美国空军下一代战斗机的图像仍未清晰，国防部不得不先启动自适应发动机验证项目保留住研发力量，然后尽量放慢节奏等待飞机需求确定。因此整个项目被分为了两个阶段，各4年时间。第一阶段是AETD，完成自适应发动机的整机方案设计（即初步设计）、关键部件和核心机的研发和验证；第二阶段为AETP，在AETD的整机方案基础上进一步完成详细设计、发动机制造和试验评估。这种安排也给了普惠公司充足的时间，从只有一个三涵道风扇到实现整机集成验证，勉强与GE公司站到了同一起跑线上。

尽管美国国防部在AETP项目伊始给两家企业的合同都不到10亿美元，但到2020财年，在空军提交的预算中，整个项目的预计经费合计达到了30.9亿美元。在2021财年预算中，AETP所属的预算项目下新增了下一代自适应推进（NGAP）项目，并已经在2019财年拨付了1.06亿美



AETP和NGAP项目预算变化情况

元，且编列了到2024财年总计12.7亿美元的经费预算。同时，AETP的经费相比此前的预算发生了大幅下降，2021财年甚至只有原计划的三分之一左右。相应调减的经费则分配给了NGAP项目，二者总和相加仍接近34亿美元。而从GE公司和普惠公司近期公开的信息来看，各自都只会完成两台AETP发动机的测试，原计划的第三台基本确定取消，这也与AETP经费的削减相互印证。

新增加的NGAP项目的任务是开展能够满足下一代空中优势(NGAD)能力的自适应发动机原型设计和部件风险降低工作，演示可以通过缩放满足NGAD发动机尺寸要求的自适应发动机技术，同时确保适当的制造和技术就绪水平。2016年，GE公司和普惠公司被授予的AETP合同中都包含了NGAP任务的选项，一旦六代机需求确定就立刻激活。因此，2019年5月，美国空军六代机需求确定后，NGAP也随之启动。由此可见，AETP发动机并不能直接满足六代机的需要，必须由全新的NGAP项目来

满足尺寸要求，说明六代机动力的尺寸与AETP相去甚远，无法由后者简单“缩放”来实现。

从以上分析可以看出，AETP项目本来就是为了在六代机需求尚未明确的情况下，临时以F-35为配装对象设计的自适应发动机验证机，而在需求明确且与其差异较大时，AETP也就完成了其历史任务。也正是在这种情况下，美国参议院本着物尽其用的原则，为AETP找到了另一条出路——F-35换发，并建议将

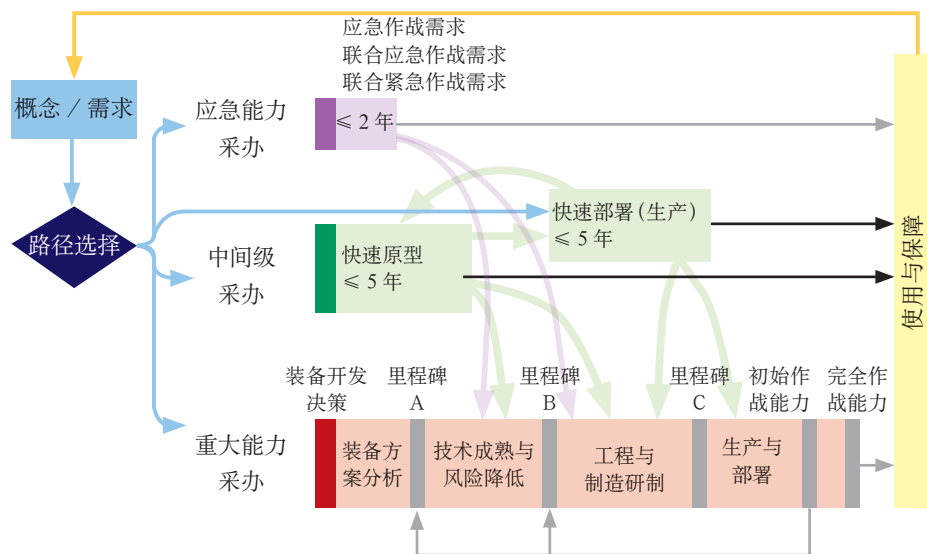
2022财年的1350万美元经费大幅提高到2.7亿美元，以加速将AETP整合入F-35战斗机。只不过AETP发动机只适合F-35A，与其他机型适配难度过大，难以撼动F135的正统位置，美国空军也不可能同时研发两种大小不一、性能相近的六代机发动机，最终AETP转化为型号的几率很小，而实际上称之为自适应发动机“过渡”项目更加契合一些。

NGAP：天选之子

在美国空军2022财年的预算申请中，NGAP项目的工作内容包括初始设计、初步设计、自适应原型计划、详细设计、发动机制造和发动机评估共6部分。其中，第一阶段（初始设计、初步设计）从2020财年第一季度到2023财年第二季度，第二阶段（自适应原型计划、详细设计、发动机制造、发动机评估）从2022财年第三季度到2026财年第四季度，两阶段之间存在一年的重叠期。在经费分配上，在2020财年和2021财年为GE公司和普惠公司各提供约2.8亿美元的初步设计经费后，从2022财年开始，NGAP的详细设计和原型



美国空军六代机数字化敏捷研发概念



美国国防采办流程“中间级采办”路径定位

开发经费授予方为“待定”。此举表明，美国空军先让两家公司开展需求分析（初始设计）和方案设计（初步设计），结合AETP发动机的实测结果，到2022财年进行对比，最终有可能只选一家进入详细设计阶段。

尽管NGAP项目的周期长达7年，但结合美国空军六代机数字化研发理念和国防采办流程创新，六代机动力的研制进度或许会大大出乎预料。六代机数字化研发理念的核心是通过应用敏捷开发、数字工程和开放式架构，实现快速迭代发展。具体来说，不再强调经久耐用，只求在10~15年里保持足够先进；不再强调在性能上均衡地全面领先，只要关键技术到位，就着手研发和装备；不再强调规模经济，可能每年订购24架，只持续3~5年，总数不超过几百架，但利用数字化设计与制造、增材制造降低成本。按照这一理念，美国空军在2019年5月完成NGAD的备选方案分析，到2020年9月就完成首架验证机试飞，仅仅用时一年多，充分体现出数字

化研发的优势。

而众议院武装力量委员会在国防授权法案中提出，期望国防部对AETP改装F-35A采用“中间级采办”能否实现快速原型和部署进行评估，这也是AETP能在2027年服役的关键。“中间级采办”模式是美国国防部于2018年在国防采办程序中增加的，包括采用创新性技术在5年内开发出原型机的快速原型项目，以及采用经过验证的技术在6个月内投入生产并在5年内完成部署的快速部署项目。这种采办模式能够实现技术的快速验证和转化，与美国六代机数字化研发理念不谋而合，对于已经实现多轮技术验证的自适应发动机更是相得益彰，预计美国很可能在六代机动力研发中采用“中间级采办”，从而实现到2027年完成飞行验证并达到可用状态。

在NGAP发动机的推力等级上，上文已经分析过与AETP存在较大差异。据美国《航空周刊》报道，NGAP的尺寸可能更支持下一代双发战斗机，推力可能会明显低于F119

发动机。而美国空军表示NGAD飞机可能是包含多种机型的“系统簇”概念，且单个机型并不强调全面领先，其推力的需求可能会大幅下降，但在研制进度和数字化程度的要求会大幅提高。此外，NGAD首架验证机从研发到首飞仅用时一年多，其动力必然在当前在产且推力适当的发动机中选择。目前美国空军仍在接收的战斗机发动机仅有F135与F110、F100两种级别，F135推力与AETP接近，且明显高于F119，可供选择的就只有129kN的F110和F100了，即使扩大到其他军种，也只有推力98kN的F414发动机。因此，可以初步判断NGAD验证机有可能采用两台推力在100~130kN之间的发动机，而NGAP的推力级别也不会相差太大。

结束语

自适应发动机技术经过十多年的研发已经基本成熟，在下一步转化路径的选择上，当前风头无两的AETP项目由于不符合六代机的需求而面临完成即终结的命运，成为名副其实的“过渡”项目。为了物尽其用，美国众议院力推将AETP用于F-35，但这种用途面临各种困难，更可取的是利用其技术成果对F135加以改进。而真正面向六代机的NGAP有可能采用数字化敏捷研发和“中间级采办”等创新途径，到2027年左右就将完成工程研制。最终美国自适应发动机技术的转化应用可能会是明修栈道(AETP)、暗度陈仓(NGAP、F135改进)。

航空动力

(晏武英，中国航发研究院，高级工程师，从事航空发动机科技情报与战略规划研究)