

美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展特点及趋势分析

索德军 孙明霞 梁春华 梁彩云
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要 :旨在为战斗机发动机技术研究和产品研制提供参考与借鉴,全面综述了美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展历程和典型成果,并归纳和总结了其发展特点与趋势。技术研究是产品研制的坚实基础,而核心机和发动机验证机只是用于开发与验证技术,特别是正在验证的自适应循环技术还需要深入验证。型号研制受国防武器需求牵引,是众多先进技术的有机集成,提高技术指标始终是战斗机发动机的发展趋势,高可靠性和耐久性是型号使用的必然要求,并逐步成为发展趋势,提高经济可承受性是航空发动机最终追求目标。

关键词 :战斗机发动机;技术研究;产品研制;发展特点

中图分类号 :V268.7 **文献标识码** :A **doi** :10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.06.013

Review on Technical Investigation and Product Development of Fighter Engine in US

SUO De-jun, SUN Ming-xia, LIANG Chun-hua, LIANG Cai-yun

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aim to provide references for fighter engine technology investigation and product development, the development course and results of U.S. fighter engine were summarized based on the literatures. The development characteristics and tendency of U.S. fighter engine were summarized based on results of introducing fighter engine development. The research results show that technical development is solid foundation for product development, core engine and engine demonstrator are used for technical development and demonstration, and the adaptive cycle technology need to be demonstrated deeply. In terms of product development the engine model development pulled by national defense weapon demand was organically integrated by the various advanced technologies. The development tendency of the fighter engine is the engine performance improvement all the time, and the improvement of the engine reliability and durability is the inevitable requirement, and that would become the development tendency. The final goal of aero engine development is the economic affordability improvement.

Key words: fighter engine; technology investigation; product development; development characteristics

0 引言

经过近百年的发展,战斗机发动机的推力显著增大,推重比逐步提高,燃油消耗率明显降低,可探测信号大大减弱,战斗机的速度由亚声速提高到超声速,又由超声速提高到超声速巡航,同时机动性、敏捷性、可靠性、耐久性等也显著提高,航程大大延长,全寿命期费用明显降低。特别是美国,基于国家战略、国防战

略和领域规划,坚持技术研究长远规划与短期/专项计划并行实施,实现了技术水平的快速提高,坚持不断吸取成功经验和失败教训,产品研制得到科学与快速发展,目前以 F-22/F119 和 F-35/F135 为标志的第 5 代战斗机/发动机达到了世界领先水平,第 6 战斗机/发动机正在筹划之中。

因而,本文总结和分析了美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展特点,对于中国及至其他国家

收稿日期:2016-06-07

基金项目:国家重大基础研究项目资助

作者简介:索德军(1978),男,高级工程师,从事航空发动机和燃气轮机情报研究工作 E-mail: sdj27@163.com。

引用格式:索德军,孙明霞,梁春华,等.美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展特点及趋势分析[J].航空发动机,2016,42(6):82-89. SUO Dejun, SUN Mingxia, LIANG Chunhua, et al. Review on technical investigation and product development of fighter engine in US[J]. Aeroengine, 2016, 42(6): 82-89.

开展战斗机发动机技术研究与产品研制具有非常重要的参考作用与借鉴价值。

1 战斗机发动机的发展

直到20世纪50年代末,受到“重导弹、轻飞机”高层决策思想和“涡轮发动机技术已经成熟,已经没有什么事情可做”论调的影响,美国政府不重视战斗机/发动机的技术研究和产品研制工作,其技术水平和产品发展速度明显落后于前苏联。

20世纪60年代初,美国空军和国防部认识到战斗机发动机研制时间比战斗机的要长得多,如果想实现战斗机与发动机同步使用,就需要提前开发发动机技术,为此美国开始投资实施轻质燃气发生器(LWGG)研究计划、先进涡轮发动机燃气发生器(ATEGG)研究计划、飞机推进系统集成(APS)计划。正是在这些计划下开发和验证的核心机及发动机验证机,为20世纪70、80年代的F100、F404、F101、F110等发动机的研制成功打下了坚实的基础。PW公司的STF200核心机发展为JTF22发动机验证机,并在70年代初研制成功著名的F100发动机,实现了跨声速和超声速性能的显著提高,GE公司的ATEGG1、ATEGG2核心机发展为GE1、GE9等发动机验证机,并在80年代中期研制成功F110和F404发动机,取得了性能、可靠性、可维护性和安全性的综合平衡。到了80年代,美国战斗机发动机技术水平和产品能力已经超过前苏联的,居于世界先进水平。

20世纪70~80年代,美国空军/海军联合实施联合技术验证发动机(JTDE)研究计划。其目标是将推重比提高25%,耗油率降低7%~10%,全寿命期费用降低25%,具有推力转向、推力反向和隐身能力。PW公司开发和验证了ATEGG685和XTC65等核心机,JTDE690和XTE65等发动机验证机,并以此为基础成功地研制出当时最先进且最经济的F119发动机,取得了前所未有的性能、质量、可靠性、耐久性、适用性、费用和可生产性的综合平衡,GE公司开发和验证了ATEGG3、ATEGG4和XTC45等核心机,GE23、GE29和GE33等发动机验证机,并以此为基础发展了双涵涡喷/涡扇变循环发动机YF120。另外,利用在这些计划和部件改进计划(CIP)、发动机型号衍生计划(EMDP)、发动机结构完整性计划(ENSIP)、发动机耐久性和损伤容限评估(DADTA)计划、发动机热

端部件(HOST)与低循环疲劳(LCF)计划等开发和验证的高负荷的风扇与压气机、短环形燃烧室、高温高负荷涡轮、分区供油稳定的加力燃烧室、收敛扩散喷管等部件和技术,改进改型研制了F100、F404和F110系列发动机。

1988年,为了继续扩大领先优势,美国政府和工业界又实施了综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)研究计划。其最终目标是实现战斗机发动机推重比提高100%,耗油率降低40%,成本降低35%以及信号特征明显减弱。该计划的综合性体现在:不但开发和验证技术水平翻1番的推进系统技术,同时也开发和验证现役发动机改进改型的技术;不但开发和验证气动热力学技术,也开发和验证结构、强度、材料和工艺等技术。PW公司先后开发和验证了XTC66和XTC67等核心机和XTE66和XTE67等发动机验证机,利用开发的技术和XTE66发动机验证机,改进了F100、F119、F135等战斗机发动机和竞争研制新一代战斗机发动机。GE公司先后开发和验证了XTC76与XTC77等核心机和XTE76与XTE77等发动机验证机,正在利用开发的技术和XTE76等发动机验证机,研制F136发动机和竞争研制新一代变循环战斗机发动机。

21世纪初,美国组织有关专家对2020年航空技术发展进行了预测:(1)如果没有先进的推进系统,未来作战飞机在任何时间任何地点对任何目标都能够预测、发现、跟踪、锁定、瞄准、交战和评估的美国武装部队未来航空愿景就根本无法满足。(2)燃气涡轮发动机技术发展确实有很大的潜能,并且仍然是航空推进系统的主要形式,在未来没有哪种推进系统可以取代。(3)喷气发动机技术相当复杂和精深,新技术通常需要用10~15a才能从试验室转入实际生产。基于这些结论,为了继续保持世界领先地位,美国国防部继续加强对涡轮发动机研究和发展的投资,实施技术目标更宏大、应用范围更广泛、技术途径更实际的通用经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)研究计划,开发和验证先进技术,研制新型发动机产品。其目标是到2017年使发动机经济可承受性较基准(如F119)发动机的提高10倍。

21世纪初,美国政府发布了《美国空军2020年愿景》、《美国航空航天倡议》、《美国国防部空间科学与技术战略》等国家级政府文件,基本明确:对未来武

器装备的宏观需求是全球到达、快速打击、持久攻击、持久且快速反应的情报/监视/侦察(ISR)、多任务机动、灵活保障等;对下一代战斗机的基本要求:可能为可选有人与无人驾驶和具备超声速巡航与作战、超常规机动、超级隐身、超远程打击、超越物理域和信息域的实时控制等能力;对其发动机的基本要求:可能为超大推力与推重比、超低油耗、超级隐身、超机动、长耐久(寿命)、超低费用。因而,美国第6代战斗机发动机可能的结果:以高效高耐久核心机为基础,实现大推力与高推重比;以低压自适应部件和智能控制为基础,实现多任务适应性与低油耗;以高隐身结构的进口与喷管与超级隐身材料为基础,实现超级隐身;以增加矢量控制技术为基础,实现更高机动性;借鉴预研与型号经验,实现长耐久和超低费用。目前,GE公司基于VAATE计划开发和验证的自适应通用发动机技术(ADVENT)发展的自适应循环发动机,采用“3流道”技术,即在传统涡扇发动机的核心机流道和外涵道流道的基础上增加由自适应风扇产生的第3个外流道。ADVENT3流道变循环发动机如图1所示。PW公司以F135和“静洁动力”PW1000发动机为基础,采用在VAATE计划下开发和验证的变循环技术和自适应风扇技术发展的PW9000发动机如图2所示。



图1 ADVENT3流道变循环发动机

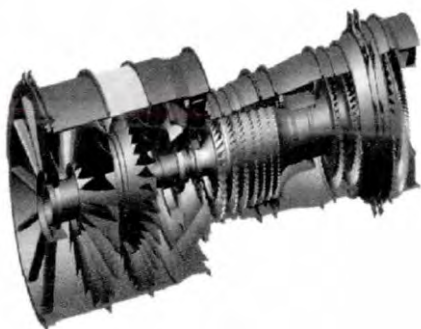


图2 PW9000发动机

2 战斗机发动机技术研究与产品研制的发展特点与趋势

美国战斗机发动机的技术研究与产品研制的发展历程如图3所示。综合分析美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展,可以发现以下发展特点和趋势。

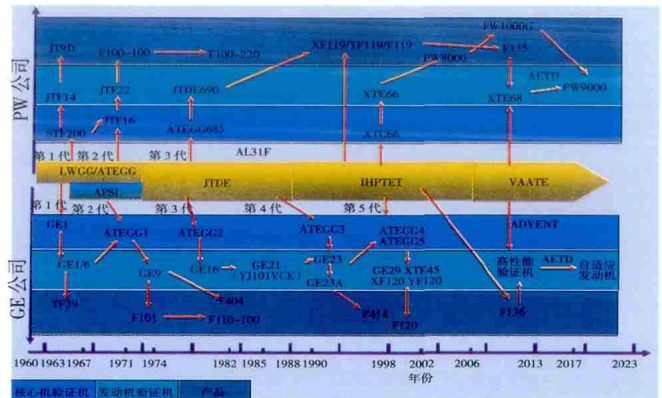


图3 美国航空燃气涡轮发动机发展概况

2.1 战斗机发动机技术的发展特点与趋势

2.1.1 技术研究是战斗机发动机技术产品研制的坚实基础

美国战斗机发动机技术与产品的发展,基于需求牵引和技术推动的政策。

20世纪60年代中后期,美国制订了1套比较完整的分阶段的发动机研究和研制全过程的组织和管理体制文件。其核心是把发动机技术研究和产品研制的全过程分为研究、探索发展、预先研制、工程研制和作战系统发展5个阶段。各阶段的投资都是专款专用。在此期间,美国官产学实施了ATEGG、APSI等技术研究计划,开发和验证了大量的新技术、新材料和新工艺,为TF39、TF30、F100、F101等发动机的性能提高和成功研制打下了较好的基础。

20世纪70年代,由于F100和TF30等发动机较差的可靠性、耐久性和作战适应性影响了战斗机的使用,除了在之后继续进行的JTDE等技术预研计划中明显增加了耐久性和可靠性验证内容外,美国军方(空军和海军)和工业界(PW、GEAE公司等)于70年代末和80年代初还实施了部件改进计划(CIP)、发动机型号衍生计划(EMDP)、发动机结构完整性大纲(ENSIP)、发动机耐久性和损伤容限评估(DADTA)、发动机热端部件(HOST)和低循环疲劳(LCF)等技术预研计划,开发和验证军用发动机的性能提高、耐久性改进、费用降低等先进技术,为性能与可靠性、耐久

性、可维修性的综合平衡的 F100-PW-220 和 F110-GE-100 发动机提供强有力的技术保障。

20 世纪 80 年代末以来,美国官产学又联合实施了高速推进技术 (HSP)、IHPTET、HCF 和 VAATE 等技术预研计划,开发和验证军用发动机的性能提高、耐久性改进、费用降低等前沿技术,为 F100、F110 和 F414 等第 4 代发动机的改进改型, F119、F135 和 F136 等的第 5 代发动机的研制和改进,为未来战斗机发动机的研制都提供强有力的技术保障,同时引入了技术成熟度 (TRL) 度量标准,以验证其可实现性,从而降低研制风险。

总之,美国政府部门和空军/海军等使用部门,根据当时特别是未来的需要,制定了综合性和前瞻性的远期技术预研计划,开发和验证了大量的新技术、新材料和新工艺,为先进战斗机发动机的全新研制打下了坚实基础;同时,为了解决型号在研制中使用中暴露的问题,实施了一些部件改进和专项技术预研计划,为现役型号和在研型号提供了有力的技术保障。这些系统成套的技术预研计划所开发和验证的技术,既满足了战斗机发动机远期的研制和发展要求,也满足了战斗机发动机近期研制和改进的需要,使战斗机发动机走上了“使用一代、改进一代、研制一代、预研一代、探索一代”的科学发展道路。

2.1.2 核心机和发动机验证机是技术开发与验证的平台

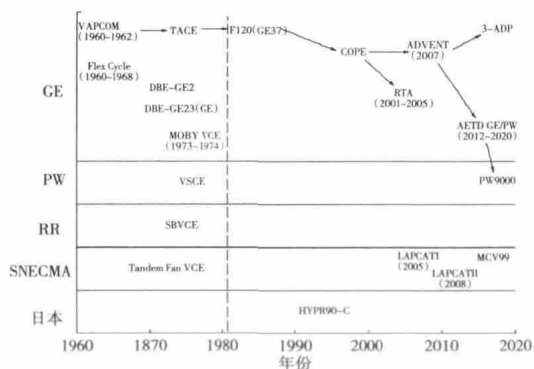
自 1963 年美国提出 ATEGG 计划来验证航空发动机的核心机技术后,就一直秉承着利用核心机和发动机验证机来验证发动机技术的基本思路,并持续实施。美国在预研计划下开发和验证的核心机和发动机验证机是为了更真实和高技术成熟度地验证先进技术的产物,更多的是技术开发与验证的平台。美国技术预研计划实施原则包括 (1) 在真实的全尺寸核心机环境下对部件进行试验 (2) 应用经过考验的现有平台对工业界研制的新技术和部件进行试验验证; (3) 输出的推力或空气流量处于适当发动机等级、所做的全部部件都与同一空气流量相匹配 (4) 允许其成功但不能保证其成功。

据不完全统计,从1963年实施涡轮发动机燃气发生器(ATEGG)研究计划、1967年实施飞机推进系统综合(APS)计划、1973年实施的JTDE计划、1988年实施IHPTET计划和2006年实施VAATE计划以

来 ,PW 公司从最初 JTF14、JTF16 到 JTDE690、XTE65、XTE66、XTE67 等开发了几十种核心机或发动机验证机 ,而形成发动机型号的只有 F100、F119、F135 等发动机 ,GE 公司从 GE1 开始发展到 GE37 以及 XTE76、XTE77 等 40 多种核心机或发动机验证机 ,而真正形成发动机型号的只有 TF39、F110(F101 同核心机)、F404、F414、YF120(未定型)、F136(未装备)等发动机。可以说 ,在众多的验证机中 ,能够形成型号装备部队的寥寥无几。这也充分说明美国实施技术预研计划的目的是通过核心机和发动机验证机来开发和验证先进技术 ,保持技术的持续发展和领先 ,用以改进现有产品和研制未来产品 ,而不是单纯追求产品。

2.1.3 变循环(自适应循环)技术还需深入开发与验证

双外涵变循环涡喷/涡扇发动机的发展源于 20 世纪 50 年代末 60 年代初美国轰炸机和运输机对超声速和超声速巡航的需求。对于变循环发动机: 60~80 年代初期美国主要进行方案探索研究, 80 年代中期以来, 美国、英国、法国和日本等国家主要进行方案优选和验证。发展历程如图 4 所示。

图4 国外变循环发动机发展概况^[11]

20 世纪 70 年代,美国 NASA 实施超声速巡航研究(SCR)计划,对变循环发动机的实质性进行研究,从上百个方案中优选出能够满足亚声速和超声速飞行要求的 2 种变循环发动机,即 GE 公司的双涵道发动机(DBE)和 PW 公司的变流路控制发动机(VSCE)进行集中研究。在 1976 年还特别制定了单独的超声速推进技术研究计划——变循环发动机(VCE)计划。

20 世纪 80 年代,GE 公司在美国第 5 代战斗机竞争中对采用变循环技术的 YF120 发动机进行地面验证和飞行验证,最终因研制风险较大败于 F119 发动机没有进入工程研制。1985 年后,美国的变循环发

动机研究计划工作纳入 NASA 的高速推进研究计划 (HSPR) DBE 和 VSCE2 种方案继续得到发展。

从 20 世纪 80 年代末到 21 世纪初,在 IHPTET 研究计划下,GE 和 Allison 公司以 XTC16/XTC76/XTC77 核心机验证机和 XTE76/XTE77 发动机验证机为平台,开发和验证双外涵变循环涡喷/涡扇发动机技术——可控压比发动机(COPE)技术。

21 世纪初,在 VAATE 研究计划第 1 阶段中,美国空军实施了自适应通用发动机技术(ADVENT)研究计划,将自适应循环发动机(变循环发动机)技术作为下一代军用发动机的技术授予 GE 和 RR 公司进行开发和验证。美国国防部于 2012 年夏天投资 2.136 亿美元,确定 GEAE 和 PW 公司参与实施为期 4 a 的自适应发动机技术验证(AETD)计划。AETD 计划是 ADVENT 计划的继续,是 1 项技术成熟计划,目的是促进采用 3 涵道结构的自适应发动机技术成熟,以为未来 3 a 内可能开始工程研制阶段的美国空军下一代战斗机或轰炸机等多种作战平台提供动力技术。AETD 计划分 2 个阶段进行,第 1 阶段到 2015 年中期结束,完成初始发动机设计,以及全环形燃烧室、高压压气机和陶瓷基复合材料部件的试验,第 2 阶段到 2016 年结束,将完成风扇和核心机试验,首台发动机整机试验最早在 2017 年进行。AETD 计划在 2013 年 2 月进行初始概念评估、2014 年进行压气机台架试验、2015 年进行风扇和核心机试验、2016 年完成发动机的整机地面试验,技术成熟度 TRL6,具备正式开始发动机研制的条件。2020 年将开始飞行试验,技术成熟度达到 TRL8。

总之,尽管变循环发动机经过了 40 多年的发展,并且几乎发展为第 5 代战斗机发动机,但是随着认识的加深和需求的变化,一些关键技术还需要更深入开发与验证,有理由相信这项颠覆性的技术很可能用于美国第 6 代战斗机发动机上。

2.2 战斗机发动机产品研制的发展特点与趋势

2.2.1 型号研制受国防武器需求牵引,众多先进技术有机集成

美国发动机型号研制,是在国防武器需求的强烈牵引下,集成之前型号成熟经验和在验证机上开发和验证的先进技术实现的,如 F100、F404、F110、F414、F119、F135 等发动机。

20 世纪 60 年代中后期总结越南和中东 2 次战

争的经验与教训,为了应对 MiG-25 战斗机并取得空中优势,美国决定研制中空格斗战斗机。该战斗机既要具有突出的空中格斗性能,又要兼顾对地攻击能力,因而要求配装的发动机具有较高的推重比和较好的进气道/发动机匹配性能。为了满足美国空军的要求,PW 公司采用“尽量增大发动机推力和减轻发动机质量”的总体设计思想,在 60 年代初实施的 LWGG、ATEGG APSI 计划研究成果的基础上,采用了美国当时几乎所有可行的新技术、新结构和新材料,研制了 F100 发动机。

20 世纪 80 年代初,随着 Su-27 和 MIG-29 等战斗机以及空对空导弹技术的不断进步,F-15/F-16 等战斗机空中优势堪忧,美国军方筹备研制新一代空中对抗战斗机。对新一代战斗机发动机的要求是具有高推重比、推力矢量能力、低红外和雷达信号特征、低不加力耗油率、大喘振裕度、高可靠性和耐久性、良好的维修性和低的全寿命期费用。为此,美国空军选定 PW 公司研制 F119 发动机,其充分吸取 F100 发动机的研制和使用经验,采用低风险策略、一体化产品研制、发动机完整性大纲等手段,采用高负荷/空心/无高循环疲劳的整体叶盘结构风扇转子、复合材料风扇静子、轻质随机转子、先进阻尼叶片、浮动壁燃烧室、单晶涡轮转子和导向叶片、高负荷超冷涡轮、刷式密封、轻质且结构简单的喷管、以光纤做部件的先进发动机数字控制系统等技术,实现了性能高、结构紧凑、可靠性高、耐久性和保障性好,很好地满足了 F-22 战斗机的战术要求。

20 世纪 90 年代中期,为了节省费用,美国国防部取消了多用途战斗机(MRF)和 A/F-X 研制计划,先后启动了联合先进攻击技术(JAST)和联合攻击战斗机(JSF)研制计划,选定 PW 公司研制 F135 发动机。F135 主推进系统以 F119 发动机核心机为基础,重新设计了风扇和低压涡轮,改进了加力燃烧室和喷管,采用了在 IHPTET、VAATE、等研究计划下开发和验证的进口外物损伤检测技术、耐高循环疲劳的风扇叶片、先进热障涂层、高温刷式密封、金属基复合材料、低可探测性轴对称喷管、变排量燃油泵、整体式启动/发电机、分布式控制系统、在线健康诊断等先进技术,实现了推重比高、涵道比小、增压比高、涡轮进口温度高、耐久性好、可维护性好和保障性好。

总之,美国战斗机发动机的全新研制和改进改

型,都受国防武器需求牵引,继承较多之前型号研制积累的成熟技术保持可靠性和耐久性,采用经过预研计划验证的较多的先进技术提高综合能力,实现了综合性能、研制费用和研制风险之间平衡的理性发展。

2.2.2 提高技术指标始终是战斗机发动机的发展趋势

战斗机发动机最重要的技术指标是推重比和耗油率,二者直接影响着战斗机的作战半径、加速性、爬升率、持续转向力、最大平飞速度等核心指标。

世界现有型号发动机和美国 IHPTET 与 VAATE 计划理想的发动机验证机的推重比发展趋势如图 5 所示。从图中可见,美国战斗机发动机的推重比已经由 F100 发动机的 7.0 级提高到 F119 发动机的 10.0 级,最新的 F135 发动机的推重比也只达到 10.0 级;而 IHPTET 计划的目标是 16.0 级,VAATE 计划的目标是 20.0,显著高于实际产品所能达到的目标。

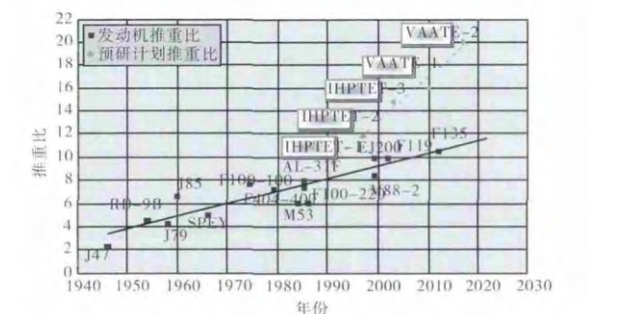


图 5 航空发动机推重比的发展

世界现有型号发动机和美国 IHPTET 与 VAATE 计划理想的发动机验证机的耗油率发展趋势如图 6 所示。从图中可见, PW 公司的战斗机发动机的耗油率已经由 F100 发动机的 0.70 级降低到 F119 发动机的 0.60 级,而 IHPTET 计划的目标是较 20 世纪 80 年代末的水平降低 40%, VAATE 计划的目标是较 F119 发动机的降低 25%,也均高于实际产品所能达到的目标。

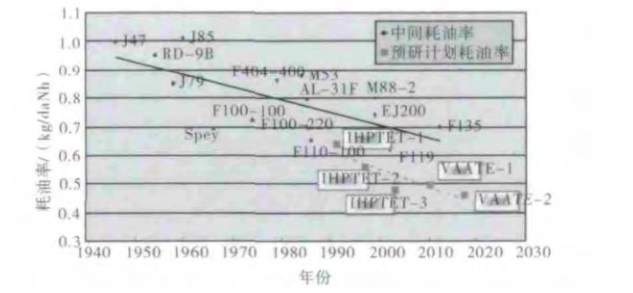


图 6 航空发动机耗油率的发展

总之,美国一直追求提高推重比和降低耗油率等战斗机发动机关键指标,并开始了一系列的开发与验

证工作,也取得了明显效果,但是其技术指标变为产品指标都要经过很长时间。

2.2.3 高综合性能是型号使用的必然要求,并逐步成为发展趋势

20 世纪 40~50 年代是航空涡轮发动机发展初期,美国战斗机发动机的研制以解决气动热力问题、推力和耗油率等性能指标达标为重点,没有能力考虑寿命和耐久性问题,只能采取“武器库思想”解决“有与无”的问题。

20 世纪 60 年代初,以解决战斗机与发动机间及各部件间的匹配问题为重点,开始考虑降低型号研制风险,取得了初步成果。60~70 年代,战斗机发动机的研制将提高性能作为重中之重,强调“3 高 1 低”,没有将可靠性放在同等重要的地位,导致投入使用后,出现大量作战适应性、可靠性、耐久性和维修性问题,严重地影响了战斗机的作战使用,大大增加了全寿命周期成本。在 1979~1985 年,实施了发动机型号衍生计划,将先进的部件技术应用到 F100 生产型发动机中,改型研制了“性能降低、耐久性与可靠性提高”的 F100-220 发动机,解决了长期困扰的非常严重的作战适用性、可靠性、耐久性和维护性的问题(见表 1),于 1985 年投入生产。

| 表 1 F100-PW-220 发动机验证的可靠性和可维修性 | | | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 指标 | F15/F100 | F16/F100 | F15/F100 | F16/F100 |
| | -PW-100 | -PW-200 | -PW-220 | -PW-220 |
| 推重比(T/W) | 7.6 | 7.6 | 7.5 | 7.5 |
| 耗油率/(kg/dan/h) | 0.72 | 0.72 | 0.73 | 0.73 |
| 返修率/1000 发动机飞行小时 | 4.9 | 7.5 | 2.2 | 2.7 |
| 航线可换组件/1000 发动机飞行小时(O) | 3.7 | 2.3 | 1.4 | 1.4 |
| 维修工时/发动机飞行小时(O&L) | 1.2 | 1.8 | 0.39 | 0.55 |
| 平均维修间隔时间/h | 63 | 60 | 132 | 147 |
| NRIFSD/1000 发动机飞行小时 | | 0.008 | | 0.0 |

20 世纪 80 年代,在 F119-PW-100 发动机的研制中,美国政府和工业界充分吸取了 F100 发动机的研制和使用经验,采用低风险策略、一体化产品研制、发动机完整性大纲、风险管理和并行工程等,使 F119 发动机具有性能高、结构紧凑、可靠性高、耐久性和保

障性好等优势,不但继承了第 4 代飞机发动机的性能优点,而且在结构、耐久性、可维护性和保障性上也有所突破,零件数量减少 40%~60%,耐久性提高 2 倍。20 世纪 90 年代中期,在 F135 推进系统的研制中,美国政府和工业界充分吸取了 F100 和 F119 发动机的研制和使用经验,以 F119 发动机核心机为基础,实现综合性能明显提高。具体表现包括:推力增大 10%;质量减轻,使 F-22 战斗机实现超声速巡航,耗油率降低 2%~3%;工作中油门移动速度不受限制,空中起动成功率 100%,机动性与可操纵性大大提高,可靠性与耐久性提高(见表 2),全寿命周期费用降低的同时,也使研制风险大大降低。

表 2 F119 发动机相对于 F100-PW-220 发动机的可靠性和可维修性改进

| 指 标 | 改 进 | 指 标 | 改 进 |
|--------------------------|------|----------------------|------|
| 外场可换组件拆换率 (次/1000EFH) | -50% | 维修工时/h | -63% |
| 返修率(次/1000EFH) | -74% | 平均维修间隔时间 (EFH) | +62% |
| 提前换发率 (次/1000EFH) | -33% | 空中停车率 (次/1000EFH) | -20% |

进入 21 世纪,美国空军实施 VAATE 计划开发、验证和转移先进的多用途涡轮发动机技术。VAATE 计划仍传承 IHPTET 计划的战略目标,但更强调涡轮发动机的技术经济性(体现在国防方面:经济的战争→经济的战争持久→持久的战争能力=必胜的战争→战争的经济回报的良性循环)。其目标是到 2017 年使现役、在研和未来的军、民两用推进系统的经济可承受性较基准推进系统(如 F119 发动机)的提高 10 倍。

总之,随着型号研制经验的丰富、先进技术的不断验证,美国战斗机发动机的评价指标已经由最初只重性能到注重性能与 4 性技术的协调,再到综合性能和经济可承受性的不断提高,以研制出用户能买得起、用得起、用得好的发动机。

3 结束语

综上所述,美国基于国家战略和国防战略,通过实施长远且系统的 ATEGG、JTDE、IHPTET 和 VAATE 等计划,在近百种核心机和发动机验证机平台上不断地开发和验证新技术、新结构、新材料和先进循环,通过技术牵引实现了技术领先,通过需求牵引适时地将

先进的核心机和发动机验证平台发展为型号验证机,并不断吸取型号成功经验和失败教训,研制了著名的 F101、F100、F110、F404、F414、F119 和 F135 等战斗机发动机,产品研制得到科学与快速发展。20 世纪 90 年代以来一直处于世界领先水平。21 世纪已经开始筹划研制第 6 代战斗机发动机。随着 ADVENT 和 AETD 等计划的不断实施,自适应变循环发动机将逐步成熟,并很可能成为第 6 代战斗机发动机,而且,高超声速、太阳能、脉冲爆震等仍处于概念探索阶段的发动机的发展潜力将逐步明朗,但在 2030 年前配装下一代战斗机的可能性并不大。

参考文献:

- [1] Committee on Air Force and Department of Defense Aerospace Propulsion Needs, National Research Council. A review of United States Air Force and Department of Defense Aerospace propulsion needs[R].IS-BN0-309-66243-5, National Academies Press, 2006.
- [2] Geis J P, Kinnam C J, Hailes T, et al. Blue horizons: future capabilities and technologies for the air force in 2030[R]. AD-A-509005.
- [3] Office of the Air Force Chief Scientist. Report on technology horizons: a vision for Air Force science and technology during 2010-2030 [R]. AD-A-525912.
- [4] 梁春华,刘红霞,索德军,等.美国航空航天平台与推进系统的未来发展及启示[J].航空发动机,2016,39(3):6-11,45.
LIANG Chunhua, LIU Hongxia, SUO Dejun, et al. Future development and enlightenments for US aerospace platform and propulsion system[J]. Aeroengine, 2016, 39(3):6-11,45. (in Chinese)
- [5] 梁春华.第 3 代战斗机发动机的改进改型[J].航空发动机,2004,30(4):53-58.
LIANG Chunhua. Retrofit of the third-generation fighter engines [J]. Aeroengine, 2004,30(4):53-58. (in Chinese)
- [6] 梁春华.现代典型军民用涡扇发动机的先进技术[J].航空科学技术,2004(2):20-24.
LIANG Chunhua. Advanced technologies of typical military and commercial turbofan engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2004(2):20-24. (in Chinese)
- [7] 方昌德.航空发动机的发展前景[J].航空发动机,2004,30(1):1-5.
FANG Changde. Prospective development of aeroengines [J]. Aero-engine, 2004,30(1):1-5. (in Chinese)
- [8] 吴大观.关于新版综合高性能涡轮发动机技术计划——兼谈航空发动机研制中“基础技术”和“验证机”的重要作用[J].航空发动机,2003,29(2):1-4.
WU Daguan. Recent progress of IHPTET-the role of pervasive technology and demonstrator in aircraft engine development[J]. Aeroengine, 2003, 29(2):1-4. (in Chinese)
- [9] 梁春华.通用的经济可承受的先进涡轮发动机研究计划的主要特点[J].航空发动机,2011,37(5):58-62.

- LIANG Chunhua. Key features of versatile affordable advanced turbine engine program[J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 58-62. (in Chinese)
- [10] 梁春华. 通用的、可承担起的先进涡轮发动机(VAATE)计划[J]. 航空发动机, 2001(3): 44.
- LIANG Chunhua. The versatile, advanced, affordable turbine engines program [J]. Aeroengine, 2001(3): 44. (in Chinese)
- [11] 梁春华, 刘红霞, 孙明霞. 国外变循环发动机的发展与关键技术[R]. 沈阳: 中航工业沈阳发动机设计研究所, 2014.
- LIANG Chunhua, LIU Hongxia, SUN Mingxia. The development and key technology of the foreign variable cycle engine [R]. Shenyang: AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, 2014. (in Chinese)
- [12] 刘红霞. GE 公司变循环发动机的发展 [J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 94-98.
- LIU Hongxia. Development of Variable Cycle Engine in GE[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 94-98. (in Chinese)
- [13] 黄顺洲, 胡骏, 江和甫. 核心机及其派生发动机发展的方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 241-247.
- HUANG Shunzhou, HU Jun, JIANG Hefu. Investigation of core engine and derivative aero-engine development [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 241-247. (in Chinese)
- [14] Hamer D, Ballard G. F-15 fight test experience with the F100-PW-100 engine[R]. AIAA-74-1162.
- [15] Hatt F G, Hancock D M. Recent fight experience with the F100 engine in the YF-16[R]. AIAA-74-1163.
- [16] Sams H. F-15 propulsion system design and development [R]. AIAA-75-1042.
- [17] Caleen R L, Bahan T E, Johnson E A. Logistics management of F100 engine through operational introduction[R]. AIAA-75-1291.
- [18] Sammons J, Ogg J. Using accelerated mission testing as a tooling within the F100 engine CIP program[R]. AIAA-78-1085.
- [19] Deskin W J, Hurrell H G. Summary of NASA/Air Force full scale engine research using the F100 engine[R]. AIAA-79-1308.
- [20] Lancaster L T G, Eshbach R E. The F100 engine[R]. SAE 801110.
- [21] Myers L, Mackall K, Burcham F W. Flight test results of a digital electronic engine control system in an F-15 airplane [R]. AIAA-82-1080.
- [22] Burcham F W, Myers L P, Zeller J R. Flight evaluation of modifications to a digital electronic engine control system in an F-15 airplane [R]. AIAA-83-0537.
- [23] Cowie W D, Stein T A. Development trends in engine durability[R]. AIAA-83-1297.
- [24] Burcham F W, Myers L P, Walsh K R. Flight evaluation results for a digital electronic engine control in an F-15 airplane [R]. AIAA-83-2703.
- [25] Edmunds D B, McAnally W J. Lessons learned developing a derivative engine under current air force procedures[R]. AIAA-84-1338.
- [26] Koff B L. Designing for durability in fighter engines [R]. ASME 84-GT-164.
- [27] King T T, Hurchalla J, Nethaway D H. United States Air Force engine damage tolerance requirements[R]. AIAA-85-1209.
- [28] Auzier T, Bonner G A, Clevenger D, et al. Military engine durability improvements through innovative advancements in turbine design and materials[R]. AIAA-85-1221.
- [29] Creslein W E. Developing a derivative engine[R]. AIAA-85-1462.
- [30] Childre M T, McCoy K D. Flight test experience of the F100-PW-220 engine in the F-16[R]. AIAA-87-1845.

(编辑 张宝玲)