

先进变循环发动机技术研究

Research on Advanced Variable Cycle Engine

中航工业燃气涡轮研究院 姚艳玲 黄春峰



姚艳玲

助理工程师, 2009年毕业于南京理工大学, 现为航空发动机高空模拟航空科技重点实验室研究人员, 从事航空发动机高空模拟试验研究和高空模拟试车台建设工作。

现代航空发动机技术走过了百年的辉煌历程, 已经发展得非常成熟。今天, 传统的航空动力技术将面临严峻的挑战, 世界航空动力技术呈现出强劲的加速发展态势, 将引发第三次动力“革命”。为适应未来新一代先进战机的更高、更强、更狠、更霸的发展需要和对成本、速度、环境和燃料高效利用等方面的高要求, 一些主要航

为适应未来新一代先进战机的更高、更强、更狠、更霸的发展需要和对成本、速度、环境和燃料高效利用等方面的高要求, 一些主要航空国家持续实施先进航空发动机研究和发展战略计划, 加速研发以变循环及组合发动机为特征的第5代航空发动机。

空国家持续实施先进航空发动机研究和发展战略计划, 加速研发以变循环及组合发动机为特征的第5代航空发动机^[1]。

专家一致认为, 新一代战斗机的竞争将不再是机械性能和飞行员的素质的较量, 而是人工智能的比拼。第五代战机的性能将包括高于5马赫的速度、多光谱隐形能力以及传感器融合能力等, 同时还将具备无人驾驶的飞行能力, 并且有可能采用核动力航空发动机。第五代战机的动力为超声速、超智能、超隐形、超低成本全新概念的发动机^[2-3]。

变循环发动机军事需求与发展背景

传统航空涡轮发动机的热力循环特性是固定不变的, 一种发动机只能在一种模式下工作, 并且仅在有限的

飞行范围内具有最好的性能。先进的变循环发动机(Variable Cycle Engine, VCE)则不同, 它是一种多设计点发动机, 通过改变一些部件的几何形状、尺寸或位置, 来调节其热力循环参数(如增压比、涡轮进口温度、空气流量和涵道比), 改变发动机循环工作模式(高推力或低油耗)使发动机在各种飞行情况下都能工作在最佳状态。与此同时, 变循环发动机能以多种模式(包括涡轮模式、涡轮风扇模式和冲压模式等)工作, 因而在亚声速、跨声速、超声速和高超声速飞行状态下都具有良好的性能。在涡喷/涡扇发动机领域, VCE研究的重点是改变涵道比, 如发动机在爬升、加速和超声速飞行时涵道比减小, 接近涡喷发动机的性能, 以增大推力; 在起飞和亚声速飞行时, 加大涵道比, 以涡扇发动机状态工作, 降低耗油率和噪声^[4]。

在未来陆、海、空、天、电多维力量和多维战场的信息化战争中, 配装先进动力系统的航空武器装备是一个重要环节, 是夺取制空权和决定战争胜负的决定性因素之一。VCE 概念的提出可以追溯到 20 世纪 60 年代, 随着涡轮风扇发动机的问世, 它优越的亚音速性能, 高的推进效率, 使得发动机设计师不断地追求更大涵道比的发动机。在超音速飞行状态, 由于大涵道比的涡扇发动机耗油率明显高于等推力级的小涵道比涡扇发动机, 因此限制了超音速飞机发动机涵道比的进一步增加。为了使航空发动机在亚音速和超音速状态下都具有较好的性能, 国外航空发动机科学家提出了变几何和 VCE 思想^[4-5]。

VCE 的优点就是在宽广的飞行包线内, 都能保持很好的效率和较低的耗油率, 可以看作将亚音速性能很好的大涵道比涡扇与超音速性能很好的小涵道比涡扇、涡喷取各自优点, 结合成一台发动机。实践证明, VCE 技术以其内在的性能优势, 能够满足强大的军事需求, 并显示出巨大的应用发展潜力(见图 1), 已经受到了各航空强国的重视, 是目前航空动力主流的研究方向。

特别是在先进战斗机研究方面, 自 20 世纪 60 年代以来, 战斗机一方面朝着多用途方向发展; 另一方面, 飞机的飞行包线不断扩大, 特别是在 20 世纪 80 年代后, 人们更加重视飞机机体 / 推进系统一体化设计。由于 VCE 在满足上述指标方面的优势

尤为明显, 于是, 对军用战斗机用的 VCE 研究逐步开展起来。国外最早的 VCE 是美国 20 世纪 60 年代初在 SR-71 “黑鸟”上投入使用的 J58 发动机^[6], 该发动机可在涡喷发动机模式和冲压发动机模式之间转换, 是到目前为止投入生产的变循环发动机。

迄今, VCE 技术已有 50 年的探索研究与发展历程(1960~2010 年)。国外各大航空发动机公司, 如英国的罗·罗公司、法国的 SNECMA 公司、日本的工业科学与技术研究所和美国的 GE 公司等, 均在不断地进行变循环发动机概念设计和方案设计研究, 并进行试验验证。从早期的 VCE 概念提出, 到目前具有实际使用功能的 VCE F120、F136 的研制成功, VCE 设计概念和设计方法大致经历了 5 次大的技术发展, 开发出了具有代表性的 5 代 VCE, 分别是 YJ101、GE21、GE37、可控压比发动机(COPE——Controlled pressure ratio engine)和 Advent 发动机(表 1)^[7-8]。GE 公司的 F120 是第一台经过飞行试验验证的(双外涵)变循环发动机。现在 F120 发动机的 JSF 改

表1 VCE的5个发展阶段

| 时 期 | 代表机型 | 典型特征 | 总体结构 |
|-----------|------------|-----------|--------|
| 1960~1970 | VAPCOM | 涵道比可调 | 双轴、单外涵 |
| 1970~1974 | MOBY VCE | 分布式风扇 | 三轴、双外涵 |
| 1974~1985 | GE21、GE23 | 复杂多变量调节 | 双轴、双外涵 |
| 1985~1995 | F120、F136 | 自适应模态选择阀门 | 双轴、双外涵 |
| 1995~2010 | RTA、Advent | 宽适用性 | 双轴、双外涵 |

型 F136 发动机作为 JSF (F-35) 轻型多用途联合攻击机的备用推进系统正处于发展、研制和完善中。

变循环发动机技术的新发展

1 ADVENT (自适应发动机) 计划

自适应发动机是国外正在发展的先进变循环发动机。国外研究的变循环发动机的方案主要有单涵道、双涵道、串联 / 并联式选择放气变循环等类型。目前, 国外正在发展带第三个涵道的自适应发动机(Adaptive Variable Cycle Engine, ADVENT), 其技术特征是第三个涵道内的气流温度较低, 可用于提取更多的功率和实现更好的热管理, 也可减小安装阻力, 改进进气道总压恢复, 降低排气温度, 减少红外信号。这不仅为未来军民飞机带来航时、航程、速度和隐身等方面的巨大收益, 同时可以满足传感器、武器和通信设备对发动机功率提取的更高要求。美国空军研究实验室(AFRL) 预计, 自适应发动机的燃油效率将比 F135 发动机的高 25%, 可以使飞机的作战半径增加 25%~30%, 续航时间增加 30%~40%。可以满足下一代战斗机、轰炸机、战术战机、超声速客机和高超声速飞行器等多种军民用飞行平台的动力需求, 是当前世界航空发动机领域的发展重点。

ADVENT 计划是 IHPTET 计划后续计划 VAATE 第二阶段的一个标志性计划, 计划发展的技术将使发动机能够独立地改变通过风扇和核心机的空气流量和压比, 实现大幅度的变循环功能。国内外普遍认为, 自适应发

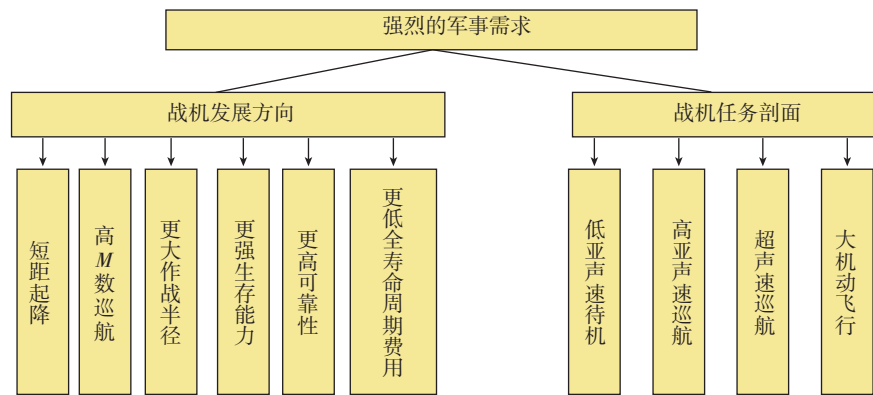


图1 面对变循环发动机技术的军事需求

动机将成为是航空涡轮发动机发展史上又一个重大里程碑,其意义相当于涡喷发动机向涡扇发动机的跨越,是真正的“游戏规则改变者”,其发展将引发航空推进领域的一场革命,也将实现航空航天领域的深度融合与跨越式发展^[9]。

自适应发动机是在 GE 公司第四代 VCECOPE 基础上发展的,是 VCE 的第 5 个发展阶段。它在 COPE 布局上又增加了一个部件,即在发动机外围又增设一个涵道,有一个从主风扇出来的单独流道,并且采用一个“Flade”级——接在转子叶片上的风扇(fan-on-blade),这是接在风扇外围的一排短的转子叶片,后面有单独可调静子^[10]。在超声速运输机上,这种设计理念能够使发动机改变其空气流量和单位推力,以适应超声速巡航、跨声速加速和亚声速巡航要求,使发动机兼有民用飞机高涵道比涡扇发动机和战斗机低涵道比涡扇发动机的特点。因此此款发动机适用于多种飞行平台,包括超声速、亚声速的攻击/运输及情报、监视和侦察平台。另外,发展多用途的发动机不仅可降低研制成本,而且也是目前无人动力发展的必由之路。因为这些飞机的生产数量一般不会大到足以支持发展一种新的发动机的地步。目前,美国海军正在考虑将 ACE 用于其无人空战系统(UCAS-N)及改装 F/A-18E/F 和 EA-18G 飞机。

ADVENT 计划瞄准未来战斗机发动机,将发展的技术有:单独可变量和压比的辅助风扇;高温多转子机械系统;高剩功率、流量和压比可变的核芯机;可在大流量范围工作的高效涡轮;综合的热管理技术;进/排气综合改进技术。ADVENT 计划中要研究的关键部件是低压系统,以及如何通过风扇流量变化来改变涵道比的技术。通过这种改变使发动机实现变循环特性,从而保证飞机在起飞时具有较大推力,在巡航状态具有低耗油率。

自适应发动机未来的路还很长。按照美国国家航空航天局(NASA)对技术完备或成熟程度(TRL)共 9 级的定义和分类,其中达到 TRL=5 说明技术已经完成了部件验证。TRL=6 表明完成了验证机试验,技术已经可以用于型号原型机的研制。TRL=9 就已经是批生产、成熟并具有使用经验的技术。例如,先进的 F135 发动机的有关技术部分达到了 9 级水平并已经用于型号,而自适应通用发动机技术需要通过验证机来达到 6 级的水平,通过 30 多年来研究的变循环技术才能用于实用型号发动机的设计^[11-12]。

目前,国外自适应发动机技术已进入加速发展阶段,欧美在自适应发动机技术研究方面取得了突破性进展。2007 年 4 月,GE 公司和美国罗·罗公司各赢得美国空军研究实验室的 ADVENT 项目第一阶段合同,其中 GE 公司和罗·罗公司分别获得的 2.3 亿美元和 2.96 亿美元合同。主要工作包括概念探索、关键部件技术研发和试验,并开始整机的初步设计和详细设计、分析,以及风险减少研究。其中 GE 公司负责核芯机设计,罗·罗公司负责低压系统设计,关键部件的试验包括全环燃烧室试验、陶瓷基复合材料部件的研究与试验,并完成一台核芯机试验。在 ADVENT 计划第一阶段,技术重点放在使耗油率降低 25% 和降低用于热管理的冷却空气温度的开发上。

根据计划安排,美国军方最初希望在第一阶段结束后,最终的 VCE 设计由单个的承包商完成。但是,在 2009 年 10 月,美国空军决定由罗·罗公司和 GE 公司继续参与 ADVENT 计划第二阶段工作,罗·罗公司继续承担其负责部件的试验和整机集成技术,GE 公司继续研制核芯机。这一阶段的工作将完成达到技术成熟度 TRL6 的发动机详细设计,开发一台风扇流量和压比可变的自适应发动机技术验证。该计划中的全尺寸验证机预计在 2013 年进行地面验证,验证成熟的技术有可能用于

2018~2020 年间推出的 VCE 上^[13-14]。

2012 年 9 月,美国空军选择了 GE 和 P&W 公司参与为其 4 年的自适应发动机技术发展(AETD)计划,将变循环发动机技术的发展推向了一个新的阶段,ADVENT 和 AETD 计划的成功实施将使自适应发动机技术完全成熟,并可能提早进入工程与制造发展阶段(EMD)。

2 RTA (革新涡轮加速器)计划

格林公司组合循环发动机技术是在 NASA 革新涡轮加速器(Revolutionary Turbine Accelerator, RTA)计划下发展。组合式发动机结合了各单一发动机的优点,使其能够在宽的马赫数—高度范围内高效率工作。其研究难点主要是发动机各要素之间的匹配性。对于完全一体化的组合循环发动机目前还处于研究试验阶段。

组合循环发动机从结构上分主要有以下 2 种:基于涡轮的组合循环(TBCC)和基于火箭的组合循环(RBCC)。其中,基于涡轮的组合循环发动机主要有涡轮火箭发动机和涡轮冲压发动机。TBCC 将成为 21 世纪从地面起降的空天飞机的动力,可使未来的高超声速飞行器象飞机一样工作,并且可重复使用(大于 1000 次任务,每年可飞行 100 次),用途多样,有灵活的发射和着陆点,耐久性高,单位推力大,能采用普通的燃料和润滑剂、成本低。目前,美国、日本和印度等国都在发展 TBCC 技术,并准备在 2006 年以后进行地面试验验证^[15-16]。

革新涡轮加速器(RTA)项目,研究用于入轨飞行器低速段的涡轮基推进系统,涡轮基推进系统的应用有可能使太空飞行更接近于飞机的飞行,从而大幅度降低发射费用,提高安全性,并可利用现有的机场地面设施,引发太空飞行的革命性变化。近期,RTA 可用于高超声速巡航导弹和第一代攻击战斗机,中期 RTA 与冲压发动机组合可用于全球快速到达/攻击机,远期可用于进入太空的动力。

RTA 计划将在目前涡轮发动机(如 J58,最高飞行 M 数 3)的基础上,到 2012 年使飞行马赫数增加 25%,推重比提高 250%,部件寿命周期提高 2 倍。到 2015 年,使 M 数提高 35%,推重比提高 375%,关键部件寿命提高 4 倍。RTA 发动机的推重比将为 15~20, $M4-5$ 。

目前,美国 GE 公司已经获得了缩尺地面试验用发动机的合同,正在发展一种中等尺寸的(直径 89~102cm)的发动机用于地面试验,威廉斯国际公司和艾利逊先进发展中心(AADC)正在竞争 $\phi 48\text{cm}$ 的用于 X-43B 的发动机合同。2003 年,决定了 X-43B 飞行验证机用小发动机的合同商。在 2005~2006 年,最终决定所选择的 RBCC 或 TBCC 发动机系统。

中等尺寸的 RTA 地面试验发动机(GTE)将评估和验证 M4 以上的涡轮机械和达到 M4 所需的先进技术。RTA 的 GTE 将为全尺寸的 50%~60%,并且验证机将采用所有辅助部件如燃油热交换器。GTE 主要评估 M4 以上的涡轮加速器的下列特性:发动机循环性能和适用性、高马赫数下的风车运转、全尺寸 RTA 的技术验证、高马赫数涡轮部件的可靠性和耐久性、热管理问题、涡轮向冲压的模式转换、与发动机进气道和喷管的综合、燃油系统和冷却系统、发动机控制系统。

在美国引领着先进 VCE 技术向前发展的同时,近 30 年来,国外其他航空发动机公司也在不断地进行 VCE 概念设计和方案设计研究,并进行试验验证,如英国的罗·罗公司、法国的 SNECMA 公司、日本的工业科学与技术研究所等,并取得了一定的研究成果^[17]。进入 20 世纪 90 年代后,美国、欧洲和日本又掀起研究超声速($Ma=3$)和高超声速($Ma \geq 5$)科技推进系统的热潮。英国罗·罗提出可选择放弃 VCE。法国 SNECMA 公司提出了中间风扇的 MCV99VCE 方案,风扇设在压气机出口处,有辅助进气口供气,由单独的涡轮带动,该涡轮又由压

气机引气驱动。在起飞和亚声速巡航时,外涵道、辅助进气门和压气机引气门打开,风扇系统工作,呈涡扇模式。在超声速巡航时,这 3 个门都关闭,以涡喷模式工作。

变循环发动机的关键技术研究

VCE 技术是一项综合性较强的技术,与传统涡扇发动机相比技术跨度很大,主要表现为调节参数增加,控制规律更加复杂,对发动机可靠性、维修性也带来了挑战。由于增加了核心机驱动风扇,传力路径和整机布局也与传统发动机有很大不同。同时,对变循环的热力循环机理本身尚存在认识上的欠缺。因此,要使 VCE 成为现实,需突破总体性能、总体结构、控制系统和机构学等一系列关键技术,如 VCE 性能仿真、核心机驱动的风扇级 CDFS 设计、高效可控涡轮导向器、面积可调涵道导向器、低污染燃烧室、高性能低污染外涵加力燃烧室、反速度场同心环喷管、VABI 和多变量智能控制系统(自适应控制技术),单级高负荷跨声速高压涡轮和双级无导叶对转低压涡轮等,为 VCE 的研制提供技术支持^[18-19]。

高负荷跨声速高压涡轮气动设计与双级无导叶对转低压涡轮的优化需要完美的多学科组合,包括气动、传热和结构动力学。从高压涡轮来的跨声速气流的强迫响应需要与低压涡轮的气动性能、冷却和结构响应综合考虑。从变循环发动机涡轮系统计划得到的数据将用来修正设计程序,使低压涡轮设计的重量轻、效率高和抗高周疲劳能力强。

结束语

在航空发动机的百年发展历程中,航空发达国家持续研究新型动力装置以满足先进飞机的需要,由此先进 VCE 技术应运而生。VCE 是正在研究发展中的五代机的重要动力特征。

VCE 技术成功解决了战机对单位

推力和低耗油率之间的矛盾,能够在同一台发动机上实现涡喷工作模式和涡扇工作模式,使发动机在超声速和亚声速飞行时都有优良特性。

与涡喷、涡扇发动机相比,变循环发动机在超声速和亚声速混合飞行任务中综合性能优势明显,高单位面积推力的涡喷循环模式工作,以满足飞行器高速、高机动性飞行;低耗油率的涡扇循环模式工作,以满足长时间续航且对飞行速度无严格要求。因此具有广阔的军事需求,对军机或民机都是非常有用。VCE 被誉为是未来飞行器的最佳动力装置之一。

在美国 IHPTET 等计划的强大支持下,VCE 技术得到很大的发展。目前,美国的 VCE 已进入工程实用阶段,GE 公司研制的装配 YF22 飞机的 F120 双涵道 VCE 的成功研制已经充分证明了 VCE 技术的先进性和可行性,其相关技术的成熟度达到了 7 级左右。目前,我国正在举国家之力,努力突破航空发动机发展的瓶颈。在这种环境下要研制出先进 VCE,技术难度相当大。

鉴于 VCE 优异的技术特性、强大的军事需求和实际应用的重要性,我们应高度重视这项新技术的探索研究。通过分析国外在 VCE 领域的研究成果,借鉴国外的成功经验,结合国内已有的研究基础,制定顶层研究方案,突破 VCE 工作原理、结构设计、建模和计算、关键技术(核心机驱动风扇级、变面积涵道引射器、可调涡轮导向器和自适应控制技术等),探索 VCE 研究的零部件和整机试验条件和技术要求条件,掌握其试验方法,为 VCE 的验证机与工程研制提供技术储备与支持,最终实现我国先进航空动力的跨越式发展。

本文共有参考文献 19 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 三丰)