

VAATE计划下的革新性发动机

Revolutionized Engine of VAATE Program

孙明霞 梁春华 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

摘要: 通用的经济可承受的先进涡轮发动机 (VAATE) 研究计划是继综合高性能涡轮发动机技术研究计划之后, 由美国国防部、国家航空航天局、能源部和工业界联合制定、于2003年开始部分实施、2005年开始全面实施的一项技术研究计划。综述了由美官产学研机构正在联合开发和验证的一些革新性发动机概念, 如高速涡轮发动机、高马赫数涡轮发动机和自适应循环发动机等。

关键词: 先进涡轮发动机研究计划; 革新发动机

Keywords: advanced turbine engines program; revolutionized engine

0 引言

美国武装部队21世纪的航空愿景是: 在费用更低的情况下, 作战飞机在任何时间、任何地点, 都能够预测、发现、跟踪、锁定、瞄准任何目标, 并进行作战和评估。这就要求其航空武器系统具有持久且快速反应的情报/监视/侦察(ISR)、极长时间续航、快速打击、持久攻击、全球到达、多任务机动和快速响应进入太空等能力。同时, 这些未来武器系统要求涡轮发动机必须既要具有高性能, 又要

降低费用。前者包括增大推力、降低耗油率、减轻质量、提高耐久性、降低噪声与排放等, 后者即降低研制、采办、使用和保障等费用。为此, 美国实施了通用的经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)研究计划。自2003年开始实施以来, 以VAATE研究计划为框架, 美国官产学研机构瞄准了一些革新的发动机概念, 并且正在按照其确定的研究目标开展工作, 目前已经取得一定的进展。

1 革新发动机验证机的研制目标和进展

1999年, 在综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)研究计划取得的部分重要成果和成功经验的基础上, 美国国防部、国家航空航天局(NASA)、能源部和工业界联合制定了IHPTET研究计划的后续计划即VAATE研究计划。该研究计划于2003年开始部分实施, 于2005年开始全面实施, 计划分3个阶段到2017年结束。其目标是为未来轰炸机、无人作

度, 在凸出区域减少速度以增加厚度。

3 实际生产结果

表1总结了两架F-35B飞机分别进行手工喷涂和使用RAFS喷涂的结果, 后者是RAFS首次用于F-35飞机涂层的实际生产的测量结果。4次喷涂操作的材料类型、位置、目标厚度和公差范围都不同。数据显示RAFS喷涂的涂层效果极好, 厚度变化范围远小于手工喷涂的结果。

AST

参考文献

[1] O'Keefe M. Robotic coatings

automation[J]. Technology Review Journal, Northrop Grumman, 2004.

[2] Drotning W. Robotic aircraft maintenance activities[R]. Intelligent Systems and Robotics Center, Sandia National Laboratories, Joint Technology Exchange Group, 2001.

[3] Warwick G. The F-22 story, painting by numbers[J]. A Flight International Supplement, 1997.

[4] Thornton J. Simulations speed & smooth automated coatings on F-35 aircraft[J]. Robotics World, 2006(1).

[5] Thornton J. DELMIA Simu

lations help Lockheed Martin Ft. Worth put final coatings on F-35 aircraft—with precision[J]. DELMIA, 2007(6).

[6] Ponticel P. Lockheed goes with common interface for F-35 painting [J]. Aerospace Engineering and Manufacturing, 2011(4).

[7] Seegmiller N A. Precision robotic coating application and thickness control optimization for F-35 final finishes[J]. SAE Journal, 2010 (3).

战飞机、先进隐身作战飞机、先进运输机、低成本空间飞行器和垂直/短距起降(V/STOL)飞机提供包括增加航程、缩小保障规模、提高战备完好率,降低噪声、排放和可探测性(隐身),以及提供高速续航等能力。

VAATE研究计划的愿景说明了其本质:发展、验证和转移先进的多用途涡轮发动机技术,以使各种现役、在研与未来的军用推进和动力系统在经济可承受性方面取得革命性改进,同时具有明显的军民两用特性。VAATE研究计划的制定既是为了实现传统涡轮发动机部件的改进,也是为满足推进系统正在改变的要求,特别是为了满足更高飞行高度和更长续航能力的要求。故VAATE研究计划被誉为未来涡轮发动机研究的样板。

在VAATE研究计划第1阶段,GE公司以F136发动机为基础,开发和验证大型涡扇发动机验证机,作为适应性多用途发动机技术(ADVENT)研究计划的起点;普惠公司以F135发动机为基础,开发和验证大型涡扇发动机验证机XTE68/LF1,重点验证先进的涡轮叶型材料、热障涂层、预诊性健康管理技术

等下一代热端部件技术,以改进更高温度且更大推力的F135发动机。另外,普惠公司还以民用发动机核心机为基础,匹配先进的风扇和一体化起动机/发电机,开发和验证XTE67/A1发动机验证机,以重点验证系统集成技术。

在规划VAATE研究计划第2阶段的工作时,将加力燃烧室设计系统、涡轮发动机技术转移和综合热管理系统3个方面列入了关键领域,进行重点开发和验证。与此同时,美国官产学研机构也在大力探索研究如图1所示的一些革新的发动机方案。

1.1 高速涡轮发动机

高速涡轮发动机验证机(HiSTED)是DARPA和美国空军在VAATE计划下联合实施的一项研究计划,是为多种武器发射平台设计、制造和验证的用途广泛、费用低、马赫数4以上的一次性使用高温、中等压比的单转子涡喷发动机,使导弹到达目标的时间缩短80%,过载超过0.5,并且可灵活地执行超声速巡航/亚声速待机任务。该发动机验证机由罗-罗北美技术公司和威廉姆斯公司合作开发和验证,由前者开发和验证的被命名为XTE18/SL1,由后者开发和验

证的被命名为XTE88/SL1。XTE18/SL1发动机是一种高温、中等压比、单转子无加力涡喷发动机,在“黑鸟”侦察机的J58发动机的基础上,采用Lammiloy技术来提高工作温度,进而降低油耗。其试验机YJ102R的单位推力、质量、直径和长度分别为J58发动机6倍、6%、25%和20%,已经于2009年1月成功地完成初步试验验证:在整个包线(包括只有核心机工作和核心机与风扇同时工作)上的性能指标超过了设计目标;无火焰稳定器的发动机使用JP8+100和JP10燃料,能够在只有自动点火的情况下成功地启动和工作。下一步将进行跨声速加速和马赫数3以上巡航的试验验证。该发动机也有可能用于美国海军“时敏远程打击(RATTLRS)革新途径”技术验证计划的飞行器动力。RATTLRS发动机结构简单、经济且更加有效。洛克希德·马丁公司认为,RATTLRS是40年来高马赫数涡轮推进技术进步的一个顶点。XTE88是一种低涵道比加力式涡喷发动机。

1.2 高马赫数涡轮发动机

高马赫数涡轮发动机是为满足未来高速情报/监视/侦察(ISR)飞行器、全球攻击机和快速响应空间飞行器的要求,所开发和验证的可重复使用的高马赫数涡轮基推进系统。研究重点是:在宽广的马赫数范围内提高部件性能和可操作性的技术;高温轴承和润滑系统;综合热管理系统;提高加力燃烧室可操作性的技术。最终产品包括:生成专用于高马赫数涡轮发动机轴承系统的一组热管理要求和潜在解决办法;得到用于估算和管理热载荷的集成分析工具;采用目前的轴承设计和轴承试验数据完成分析工具的第1级验证;为将来的型号验证推荐试验配置方法。

1.3 高效小型推进系统

高效小尺寸推进系统(ESSP)是

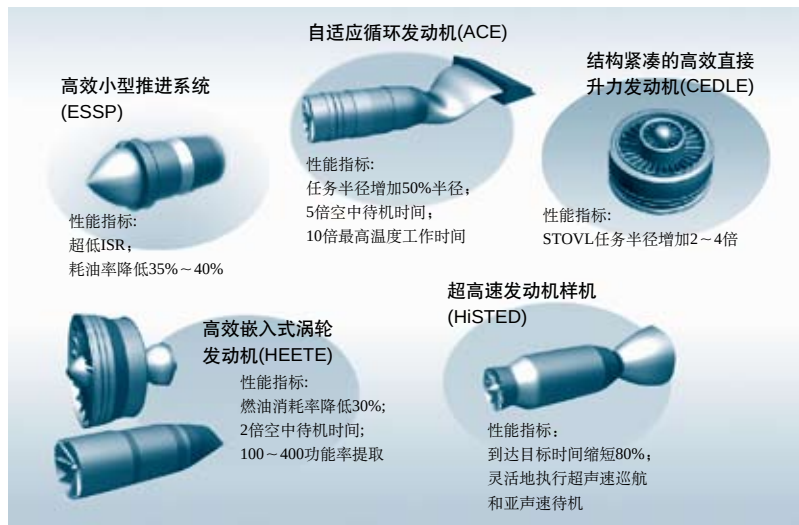


图1 革新的发动机方案

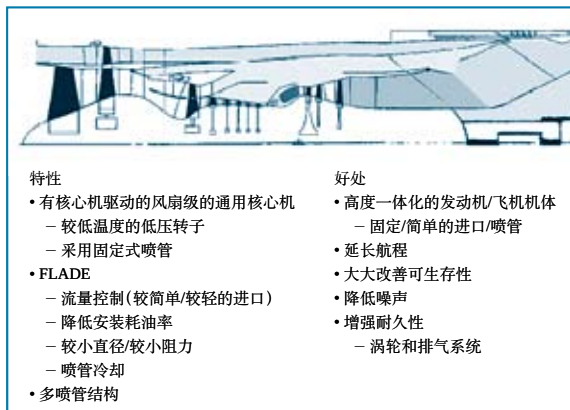


图2 自适应循环发动机的特性和好处

为巡航导弹、小型无人机、未来延程攻击机和持续作战/情报/监视/侦察(ISR)飞行器等开发和验证的先进的亚声速一次使用/短寿命发动机。其研究目标是使生产费用显著降低、耗油率降低35%~40%、航程与待机时间延长。其研究重点是:提高推重比的技术;降低耗油率的技术;降低生产、研制和维护费用的技术。最终产品包括为1000lb(453.6kg)和/或2500lb(1134kg)导弹和/或无人机开发的可满足第II阶段目标的涡扇发动机和涡轴/涡桨发动机,生成发动机配置和循环性能估算结果。

1.4 小型重油发动机

小型重油发动机(SHFE)是为未来无人机与旋转翼飞机开发和验证的低油耗与低费用的700shp涡轴发动机,可使旋转翼飞机和无人机的航程延长、载荷增大和耐久性提高。该发动机的验证机由霍尼韦尔公司开发和验证,由以下关键部件构成:双离心压气机,采用三维气动设计,以在保持较大喘振裕度的同时取得较高的效率,并且不需要可调几何结构;紧凑的环形RQL燃烧室,采用先进的燃油混合技术和高效的壁冷技术,以提高燃烧效率和降低排放;先进的大加功量高压涡轮,采用革新的叶型,以提高涡轮能力;双合金的动力涡轮转子,采用简化设计、高速混合的陶瓷轴承和

气动密封,以大大降低费用。通过采用这些先进技术和部件,使发动机的耗油率降低20%,功重比提高50%,全寿命费用降低35%。

1.5 先进的经济可承受的涡轮发动机

先进的经济可承受的涡轮发动机(AATE),是针对未来的军用和商用旋转翼飞机所开发的。通过重点开

发革新的部件和/或循环结构,用以验证能够达到或超过预期目标且提供极好的可靠性、可维护性、耐久性与可生产性的3000shp的涡轴发动机。其总目标是,相对2000年外场使用的发动机,耗油率降低25%,功重比提高65%,设计寿命延长20%,研制费用降低15%,生产和维护费用降低35%;具体目标是:(1)在中等额定功率、海平面标准天气下,耗油率小于或等于0.347;在55%的中等额定功率、4000ft(1219m)高度、95°F(35℃)温度下,耗油率小于或等于0.410;(2)在中等额定功率、海平面标准天气下,功重比大于或等于6.5;(3)生产费用(基于250台、2000财年)小于或等于650美元/台;(4)发动机的寿命为6000h(15000个循环),其涡轮叶片和燃烧室火焰筒的寿命为3000h(7500个循环);(5)维护费用(按每年飞行250h计算)相对合同商提出并得到政府认可的基线值降低35%以上;(6)研制费用相对军用型号规范规定的降低15%。其实施时间为2007~2012年,预期政府总投资为3475万美元(FY07/08为975万美元;FY09为750万美元;FY10为850万美元;FY11为900万美元;FY12为0)。

1.6 结构紧凑的高效直接升力发动机

结构紧凑的高效直接升力发动机(CEDLE)是普惠公司为使未来大型运

输机具有远程、高亚声速巡航和短距起飞/(垂直)降落能力而开发和验证的先进升力发动机,将使目前的升力风扇发动机不再需要轴和离合器等部件,任务半径增大2~4倍。

1.7 高效嵌入式涡轮发动机

高效嵌入式涡轮发动机(HEETE)是为满足未来的中高空情报、监视和侦察(ISR)平台的无人作战飞机和运输机的超强耐久性和超长航程需求,所开发和验证的在飞机上以嵌入式安装的8900~15575daN推力的小型涡扇发动机。其总的开发目标是,与基准机相比,耗油率降低30%,推重比提高60%,待机时间延长2倍,功率提取达到400kW。

在VAATE研究计划的第1阶段,该发动机由霍尼韦尔/普惠公司和罗-罗北美技术公司开发和验证。后者获得了1960万美元的验证合同,重点研究超高压比压气机和集成的热管理系统,目标是使空军无人机的航程延长30%或负载和燃油载荷增大50%,待机时间延长90%;使海军作战无人机的航程延长1倍,待机时间延长1倍。2008年5月,该发动机验证机已经完成方案论证和初步设计评审,进入到详细设计阶段。

在规划之中的第2阶段,该发动机的开发目标是:与基准发动机相比,到2014年,总压比提高2.3倍,最大推力状态的压气机出口温度保持在325°F(163℃),进而使耗油率降低25%。其研究重点包括:高效的高压比压气机气动设计技术;低泄漏的空气密封技术;大剩余马力的核心机;综合的热管理系统;主动间隙控制技术;主动流场控制技术;大功率提取技术;嵌入式安装技术;紧凑轻质换热器技术(冷却预冷空气);第三股气流利用技术和气流保持技术。

1.8 自适应循环发动机

自适应循环发动机(ACE)是在自

适应通用发动机技术(ADVENT)分研究计划下,为亚声速战斗机、超声速巡航战斗机、超声速运输机、无人机、以马赫数2.5巡航的飞行器等多种飞行平台开发和验证的变循环发动机。该发动机能够独立地改变风扇/核心机的空气流量和压比,将在起飞和机动期间所需的高推力和在执行远程、持久攻击和侦察任务的亚声速飞行期间所需的低燃油消耗集成于一体。预期的收益与目标是:在多种飞行条件下达到性能最优;推进系统质量减轻25%;在最高温度下的工作时间延长10倍;总耗油率降低25%;使用半径增大50%;待机时间延长5倍。其关键技术包括:轻质简单的变循环特征件;高效、宽流量范围的压气机;工作范围大的高效高温涡轮;高效轻质隐身的排气系统。图2示出了一种自适应循环发动机方案的特性和好处。

在某种程度上,ACE是以GE公司的可控压比发动机(COPE)为基础开发的。作为GE公司和艾利逊公司联合研究的第四代变循环发动机,COPE最重要的部件是位于风扇和压气机之间的核心驱动风扇级(CDFS),它在风扇和核心驱动级之间设有一个涵道阀门,在核心驱动级和压气机之间有一个专门的涵道。在巡航飞行模式下,涵道阀门打开,空气可直接从风扇流到喷管,在此模式下核心驱动级可以做很少的功。如果同时关闭涵道阀门,并调整核心驱动级的静子叶片,就会增大核心机流量,并“关闭”核心驱动级,因而能够提高发动机的总压比。由于可以有更多的空气通过核心机,因此发动机可产生更大的功率。虽然其结构确实较为复杂,但是能够控制总压比和空气流量。目前,发动机的空气流量和压比都是恒定的,只可以对喉道面积和温度实施独立控制,将喷管设计成喉道面积和出口面积可

以改变的结构,会使喷管结构复杂且质量增加明显。

由于适应性循环发动机将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,因此将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以降低研制成本,而且也是目前无人机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。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。

2007年8月,美国空军研究试验室选定了GE公司(2.31亿美元)和罗-罗北美技术分公司(2.96亿美元)所开发和验证的自适应循环发动机。目前,正在进行关键部件(自适应风扇系统)的台架试验和全台发动机初步设计。

预计,在2009年中期,将从上面两家承包商中选出的1家承包商,完成详细设计阶段(2009~2012年)的工作,包括发动机验证机详细设计和制造、台架试验、发动机验证机地面验证,最终使发动机新技术达到技术准备等级(TRL)6。之后,该发动机验证机可能开始进入工程研制阶段,到2020~2022年投入使用。但是这很可能会错过配装美国下一代轰炸机的机会,该轰炸机计划于2018年投入使用。

2 结束语

综上所述,美国在VAATE研究计划下开发了高速涡轮发动机验证机、高效小型推进系统验证机和自适应循环发动机等革新发动机。其中的一些方案在探索中,一些方案相对较为成熟,如自适应循环发动机正在作为美国下一代战斗机发动机进行大力开发。这些发动

机的方案和技术非常值得关注。AST

参考文献

- [1] AIAA Air Breathing Propulsion Technical Committee. The versatile affordable advanced turbine engines (VAATE) initiative: an AIAA position paper[R]. www.aiaa.org, 2006.1:1-10.
- [2] Cheryl H, Gary S. Modernizing systems through data integration: a vision for EHM in the United States Air Force[R]. AIAA-2004-4049.
- [3] James F, William T. Affordability development approach of advanced gas turbine engines for UAV applications[R]. AIAA-2003-6526.
- [4] Richard J H. The challenge of IHPTET [R]. ISABE-93-7001.
- [5] Philip R V. The impact of IHPTET on the engine/aircraft system integrated high performance turbine engine technology [R]. AIAA-89-2137.
- [6] Dunbar L W. Turbine configuration impact on advanced IHPTET engine system mission capabilities. [R]. AIAA-90-2739.
- [7] Huffman M F. Component and engine structural assessment research (CAESAR) [R]. AIAA-93-2609.
- [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, 2:1-4.

作者简介

孙明霞, 助理工程师, 从事情报研究专业。

梁春华, 研究员, 从事情报研究专业。