

航空动力技术发展展望

Prospective Development of Aeroengine Technology

刘永泉 / 中航工业沈阳发动机设计研究所

导读: 归纳总结了航空动力技术现状及当前技术前沿热点, 分析未来需求, 对先进动力技术的发展趋势进行了综合分析, 并对我国航空发动机未来的发展方向进行了展望。

关键词: 航空动力; 技术前沿; 发展方向

Keywords: aeroengine; advanced technology; future trend

0 引言

100多年来, 航空发动机由活塞发动机发展到涡喷发动机、涡扇发动机, 军用小涵道比发动机推重比达到10, 在性能、全寿命周期成本、适用性、可维护性、可靠性/耐久性、可生产性等方面实现了均衡设计; 民用大涵道比发动机在性能、可靠性、耐久性、经济性和环保水平等方面都有了巨大进步。

1 航空动力技术发展现状

经过几十年的发展, 战斗机发动机已从早期的涡喷发动机发展到第四代涡扇发动机, 推重比达10, 不加力耗油率已从 $1.0 \sim 1.2 \text{ kg}/(\text{daN} \cdot \text{h})$ 下降到 $0.6 \sim 0.7 \text{ kg}/(\text{daN} \cdot \text{h})$, 空中停车率降至每1000飞行小时0.2~0.4次, 热端零件寿命已超过2000小时。

目前, 配装民用飞机的大涵道比涡扇发动机目前的最大推力已超过50000daN, 发动机的空中停车率下降到每1000飞行小时0.002~0.005次, 返修率仅为每1000飞行小时0.06~0.01次, 发动机在飞机上不拆换的工作时间达到16000小时, 最长超过40000小时。与早期的涡喷发动机相比, 噪声强度和污染物排放分别降低了75%和80%。如今,

CFMI、罗罗公司重新开始经济性更好的桨扇发动机(也称开式转子发动机)的技术研究, 并与普惠公司的齿轮传动风扇发动机(GTF)一起竞争下一代波音737和A320动力的位置。

无人机动力装置的可靠性逐渐提高、使用维护成本逐步降低。活塞发动机和涡轴发动机适用于起飞重量较小的低速、中低空无人机, 涡喷和涡桨发动机对中空高起飞重量较大的无人机有较好的适用性; 涡扇发动机耗油率相对较低, 广泛适用于高空长航时无人机及先进的无人战斗机, 飞机起飞重量可以很大, 如“全球鹰”达到10吨以上。

发动机能力的提升依赖于发动机技术的进步。先进的非定常全三维气动设计等技术的采用, 提高了叶片机级负荷水平和效率, 大幅减少级数(第四代战斗机动力压缩系统级数从12~14级减少到8级左右)和部件重量; 先进的多通道强迫对流加膜冷却技术、高温性能更好的单晶材料、先进的物理气象沉积热障涂层使涡轮前温度提高到1973K以上; 二元矢量喷管为飞机提供直接力控制并减少红外辐射, 使飞机有可能实现超机动性并提高隐身能力; 空心风扇叶片、整体叶盘、复合材料和金属间化合物

等更大范围的使用极大地降低了发动机的重量, 提高了发动机推重比等指标。

2 技术发展前沿管窥

国外通过实施大量的先进航空发动机技术发展和验证计划, 为下一代航空发动机的发展奠定了坚实的技术基础, 同时将大量技术成果应用于军民航空发动机新型号研制以及现有型号的改进改型。

美国于2005年完成了综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划, 实现了航空推进系统能力翻一番的目标, 即发动机的推重比(功重比)增加100%~120%, 耗油率下降30%~40%, 生产和维护成本降低35%~60%。在大型涡扇发动机方面, 发展了串列风扇、掠形叶片、空心钛金属基复合材料风扇、碳化硅纤维增强叶环、TiAl金属间化合物压气机静子、Ti₃Al合金压气机转子叶片、陶瓷基复合材料火焰筒、分区环形燃烧室、驻涡燃烧室、多通道扩压器、对转涡轮、陶瓷基复合材料高压涡轮导向叶片、金属基复合材料低压涡轮轴、双合金涡轮盘、“铸冷”和“超冷”涡轮叶片、球形收敛矢量喷管、气动矢量喷管、磁浮轴承和内置式启动/发电机等多电

技术、变循环技术、端面气膜密封、模块式FADEC等先进技术。

美国预期2017年完成的多用途且经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)计划,大型涡喷/涡扇发动机的目标是验证推重比20的技术,继续降低耗油率和全寿命周期成本,发动机的经济可承受性(也称为能力/成本比)达到基准发动机的10倍。该计划包含通用核心机、耐久性和智能发动机三个重点研究领域,发展的技术包括综合热管理系统、有隐身功能的进气道、多用途宽流量范围压气机、紧凑高效的低污染燃烧室、综合健康管理系统、非线性适应性控制系统、轻量化抗畸变风扇、高效耐热时间长的涡轮、先进的燃油添加剂/热稳定高热沉燃料、与涡轮后框架一体化的加力燃烧室、耐久的推力矢量喷管等。除了动力技术外,还全面发展综合考虑任务、使用环境、与飞机一体化等方面的技术。

在高超声速飞行器动力技术方面,美国、俄罗斯、法国、日本等国家自20世纪90年代以来陆续取得重要技术进展,并相继进行了地面和飞行试验,主要采用双模态超燃发动机、火箭冲压组合发动机、涡轮冲压组合发动机三种技术途径。

从20世纪90年代以来,欧美投入大量资金,开展了一系列民用发动机研究计划,主要围绕持续降低耗油率、全寿命周期成本、污染物(特别是 NO_x)排放、噪声等目标。例如,CFM1公司实施的Tech56计划,发展的技术包括金属材料空心风扇叶片、6级压比15的高压压气机、双环腔预旋流燃烧室(TAPS)、锯齿型喷管(降噪3dB)、低成本控制系统等。后续实施的LEAP56计划除了开发和验证常规大涵道比涡扇发动机的先进技术外,还将桨扇发动机技术纳入进来。

为满足今后航空器发展对成本、速

度、环境和燃料高效利用等方面新的更高要求,国外积极开展了大量非传统航空发动机概念研究,包括智能发动机、多电发动机、变循环发动机、骨架结构发动机、波转子发动机、间冷回热发动机、脉冲爆震发动机(PDE)、组合发动机、分布式矢量推进等,多角度推动航空动力技术发展。另外,为解决能源问题,各国都在积极研究开发利用生物燃料等新燃料和新能源发动机。预计将来燃料电池发动机、氢燃料发动机会会有广泛的应用。一些研究机构甚至在重新评估核能用于航空的可行性。

3 航空动力发展趋势特点分析

基于作战的需要,军用飞机将具有更大的作战半径、更强的生存能力、更灵活的战场适应性、更高的可靠性以及更低的全寿命周期成本等特点,这就要求其动力装置继续向着提高推重比、降低耗油率、改善可靠性、适用性、维修性和经济性的方向发展。对于民用飞机发动机,还有环保等适航要求。通过综合分析,未来动力发展具有以下显著特点。

1) 推重比不断提高,要与适用性、可维护性、可靠性/耐久性、经济性等指标综合权衡

目前,国外部分推重比10一级的发动机如F119、M88等已经服役,美国、法国、英国等航空技术先进国家把2017年前后的目标定位在实现推重比18~20。同时,要求发动机耗油率不断降低,以增加飞行器航程和作战半径,增加有效载荷,增强远程打击能力。另外,为保证机队完好率和高战斗生存力,发动机的可靠性、维修性以及隐身设计成为关键。

航空发动机的设计已改变了早期单纯追求高性能的做法,适度平衡包括性能、全寿命周期成本、适用性、可维护性、可靠性/耐久性、可生产性等各种特

性。通过并行工程、虚拟设计、仿真技术和优化技术等手段,最大程度地实现飞机/发动机、发动机总体/部件/系统一体化设计,寻求最优设计方案。

2) 提高任务适应性

未来航空发动机的使用将从传统的最高20~30km以下空中飞行向临近空间(60~70km高度)扩展,甚至实现跨大气层飞行,而飞行速度也将由现在的亚声速、超声速向马赫数超过4以上的高超声速跃进,由此将引发航空发动机技术的一场革命。为适应更为宽广的工作包线,需要解决相关的各种新技术,包括大幅度变循环发动机技术、组合发动机技术、预冷发动机技术、新型高热值燃料、先进热管理技术、新型轻质耐高温材料等。另外,以涡轮发动机为动力的情况下,在更高的飞行高度时仍保持较大的推力需要其压缩系统有高的流通能力,这也是涡轮发动机用于高空高速飞行的关键。

3) 增强环境适应性

未来要求新一代发动机能在各种复杂自然环境和恶劣气象条件下安全可靠工作,采用先进的光/机/电综合控制系统,具有很强的抗进气畸变、防冰、防雨、防雷电和高低温工作能力。对于作战飞机,发动机还要具有抵御电磁攻击带来的不利影响的能力。

智能发动机主动控制系统和健康管理系统能够依靠传感器数据和专家模型全面了解发动机和/或部件的工作环境和发动机状态,实现发动机性能和状态的主动和自我管理,并根据环境因素平衡任务要求,提高发动机的性能、可操纵性和可靠性,延长发动机的寿命,降低发动机的使用与维修成本,可有效提高环境适应能力和生存力。

4) 大幅提升经济可承受性

未来先进战斗机高昂的采购价格

决定了生产规模不可能太大,在需要发动机性能大幅提升的同时,还要求其全寿命周期成本要可担负得起。美国通过IHPTET计划技术研究,经济可承受性达到基准发动机的3倍以上,通过VAATE计划,经济可承受性达到基准发动机的10倍。民机发动机除了提高性能,还要不断降低全寿命周期成本。

围绕成本控制目标,采用多种措施提高发动机的经济可承受性。比如,“一机多型”满足了用户的多种任务需要,降低了采购成本;开发通用技术,研制“通用核心机”,实现用途多元化,发展出将来使用的更高性能、更高耐久性和更低费用的军用和民用发动机等。

4 我国航空发动机技术发展方向

考虑我国航空发动机技术现状和未来需求,应当关注以下的方向。

1) 加强技术预研,制定长期规划并稳步实施

航空发动机研制是涉及多学科、多专业、综合性非常强的先进技术,并且与材料、工艺等工业基础息息相关,研制周期长、风险高、投资大。必须制定国家级长期规划并稳步实施,通过先期开展系统深入的预先研究,打好基础,加强技术储备,提前为发动机产品研制提供成熟的新技术。

2) 发展高超声速动力技术,加强涡轮组合发动机研究

基于未来作战、高超声速运输以及探索太空等需要,吸气式高超声速成为未来军、民用航空器重要的战略发展方向之一。以涡轮组合发动机(TBCC)为动力的飞行器具有可重复使用、发射和着陆地点灵活、耐久性高、运行成本低等优点,采用碳氢燃料的TBCC适用于马赫数5~8(采用氢燃料的TBCC可使马赫数达到12以上)的高超声速飞行

器,是未来很有前途的高超声速动力概念,需加大研究力度。

3) 涡扇发动机逐步成为无人机动装置发展的重点,并不断提高智能化程度

随着技术的不断发展,军用无人机由执行侦查扩展到执行作战多种打击任务,民用无人机也不断扩大使用范围,无人机能力增强,推力需求提高,涡扇发动机逐步成为无人机动装置发展的重点。从经济性、安全性、可靠性等方面考虑,以成熟的军民用发动机为基础发展无人机动装置是主要发展途径。另外,无人机发动机的智能水平将不断提高,直至达到智能发动机的程度,实现性能和状态的主动管理,相关技术应当及早开展研究。

4) 研发民机动力要兼顾经济性、可靠性和环境友好等要求,并储备齿轮传动涡扇发动机、开式转子发动机等新技术

民机动力的市场竞争非常激烈,民机动力产品的研发和使用除了对燃油经济性和使用维护成本的要求越来越高,还必须解决安全可靠和环境保护问题,我国大型客机动力的研制同样要兼顾性能、可靠性、经济性、维护性、环保等要求,重视适航技术的研究和应用。另外,也要及早开展齿轮传动风扇发动机、桨扇发动机等技术的预研和储备,为后续产品的升级换代提前准备,在未来的民用航空动力市场中拥有自己的地位。

5) 重视非常规动力技术,提升技术创新能力,实现航空动力技术跨越发展

与传统航空发动机相比,多电发动机、脉冲爆震发动机、核能发动机等非常规发动机技术都具有各自独特优势,拥有良好的应用前景,而且与国外相比,我们的技术差距相对要小,可以选择这些领域作为突破口,利用后发优势,实现跨越发展,这是一条迅速赶上

世界先进水平的可能途径,应当选定合适的项目重点投入,取得实效,不但获得技术成果,还将带动行业提升自主创新的能力。

AST

参考文献

[1] 林左鸣. 战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J]. 航空发动机, 2006, (1): 1~8.

[2] 李勇. 发动机产品发展和未来航空动力的分析与展望[J]. 航空发动机, 2006, (2): 1~8.

[3] 刘大响. 加速发展我国航空发动机事业[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(3).

[4] 吴静敏. 经济可承受性—军用航空发动机发展的一项重要指标[J]. 国际航空, 2010.9.

[5] 胡晓煜. 开式转子发动机, B737/A320的后续机动力[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(3).

[6] Graham Warwick. 美国空军/海军定义下一代战斗机要求[J]. 国际航空, 2010.08.

[7] A. Bartolotta and Nancy B. McNelis. High Speed Turbines: Development of a Turbine Accelerator(RTA) for Space Access. AIAA2003.

[8] VAATE 研究计划的主要特点和在其下开发的革新性发动机[Z]. 606所档案资料.

[9] 第四代战斗机发动机的研制道路和关键技术[Z]. 606所档案资料.

作者简介

刘永泉, 中航工业航空动力技术首席技术专家, 沈阳发动机设计研究所总设计师, 研究员, 长期从事重点型号研制及先进技术预研等工作。