

小型弹用涡扇发动机系列化发展方向及关键技术综述

余海生 马同玲 焦华宾

北京动力机械研究所, 北京, 100074

余海生, 高级工程师, 涡轮发动机总体技术, 联系方式: 010-68375229

摘 要 在我国现有弹用涡扇发动机技术基础上, 对其系列化及改型发展进行了研究论证, 提出了在导弹、高空长航时飞行器 and 小型地面燃气轮机三个应用领域上的市场需求分析与发展方向, 并对其关键技术进行了论述, 作为未来我国小型涡扇发动机技术发展方向之探讨性研究。

主题词 弹用涡扇发动机 系列化 改型 关键技术

1 引 言

根据航空发动机研制规律, 一种新型发动机研制成功后有30年左右的使用寿命期, 在此期间, 除纠正使用中暴露的缺陷、提高可靠性、延长寿命和降低成本外, 还可根据需求对产品进行系列化发展, 通过改型提高产品性能或扩大用途。发动机系列化发展, 不仅可以节约研制成本、缩短研制周期、降低研制风险, 而且由于通用零件产量的增多, 降低了单件生产的成本, 减少了备件的费用, 可使维护程序标准化, 改善了互换性, 简化了维修保障, 从而降低使用维护费用; 与全新研制相比, 系列化发展具有投资少、周期短、风险小和产品可靠性好等优点。^{[1][2]}

目前我国已有小型弹用涡扇发动机产品定型并批量装备部队, 本文基于现有弹用涡扇发动机系列化设计经验, 针对其短寿命、低维护需求等设计特点, 结合未来导弹及小推力量级(或功率量级)飞行器的需求, 对小型弹用涡扇发动机市场需求、系列化发展方向和技术方案进行了分析探讨, 提出了涉及的关键技术。

2 弹用涡扇发动机系列化发展方向分析

通过对类似产品的总结分析, 提出了如下几种弹用涡扇发动机可能的系列化改型发展方向:

- a. 以降低成本、提高推力、降低耗油率、降低红外特征等为主要目的的系列化改型, 应用目标为导弹推进动力;
- b. 以延长工作寿命、提高高空工作性能为主要目的的改型设计, 应用目标为高空长航时无人机、小型公务机等飞行器动力;
- c. 以延长工作寿命、提供轴功输出、使用清洁燃料、降低排放污染和噪声等为主要目的的小型地面燃气轮机改型, 其应用范围为地面长期或应急供电、小型车辆或舰艇推进动力等。

3 作为导弹推进动力的小型涡扇发动机改型设计

3.1 弹用涡扇发动机市场需求分析

自 20 世纪 60 年代末以来,世界各国争相研制并装配小型弹用涡轮发动机,其中最具代表性的是美国威廉斯国际(Williams International)公司为“战斧”系列巡航导弹研制的 F107、F112、F415 等系列小型涡扇发动机,配套作为多国主战装备的巡航导弹,军方需求量巨大,例如在 1999 年仅持续 78 天的科索沃战争中,北约即发射各类巡航导弹 1300 余枚。^{[3][4]}

美国军火巨头雷声(Raytheon,又名雷神、雷锡恩)公司从 2004 年开始向美国海军交付最新型“战术战斧”Block IV 巡航导弹,至 2008 年 6 月,累计交付 1000 枚,在 2010 年 2 月 25 日,雷声公司宣布向美国海军移交了第 2000 枚“战术战斧”Block IV 导弹。可见作为导弹推进动力的小型涡扇发动机需求量之巨大。

3.2 弹用涡扇发动机改型技术途径

以提高推力、降低耗油率等为目的的性能改进和降低制造和战备成本、降低红外特征的改进都是小型弹用涡扇发动机技术的发展目标,但在实际研制中这些目标却是互相矛盾的,性能提高必然会带来成本的提高,降低成本则或多或少以牺牲性能为代价,而在现有分开排气产品基础上进行的降红外特征改型设计,不仅会带来成本的上升,同时也会对发动机的性能产生负面影响。

所以实际产品设计中,需要结合飞行器总体的需求,开展一体化综合论证和权衡,找出需求商、飞行器总体和动力装置都能满意的折中方案。下面分别对各发展方向的技术途径进行论证探讨。

a. 性能改进技术途径分析

未来远程、高升限导弹要求动力装置具有更高的推力和更低的耗油率,其解决途径主要有提高总压比、提高部件效率、增大涵道比、提高燃烧室出口燃气总温等措施。由于受导弹外形尺寸限制,上述技术途径只能在在发动机总体外形尺寸变化不大的限定条件下进行,给设计改进带来难度。具体分析如下:

- 部件性能改进:提高总压比和提高部件效率主要依赖于压气机和涡轮设计技术的进步,通过风扇、压气机非定常、有粘全三维设计技术,采用叶片弯掠技术、宽弦长、小展弦比叶盘、叶背附面层抽吸技术、紊流发生器等技术,可达到提高叶轮负荷能力和性能,提高级压比、绝热效率和喘振裕度的目的;此外采用刷式封严装置等先进结构设计技术,降低漏气损失,也可以提高发动机整机性能^{[5][6]}。
- 增大涵道比:该途径可有效提高发动机空气流量,提高推力和降低耗油率。在核心机不变的情况下,可以通过对风扇和低压涡轮的适应性改进得以实现,研制周期短,代价低;但由于发动机直径和长度也相应变大,因此其具体情况需和总体协调确定。
- 提高燃烧室出口燃气温度:该措施可以有效提高循环热效率,但由于弹用涡扇发动机热端部件裕度相对较小,而尺寸变动有限,因此需要对燃烧室、涡轮进行较大的设计改进。涉及的主要技术包括燃烧室冷却改进设计、涡轮材料及工艺改进(如采用单晶叶片、定向凝固等新材料新工艺)、气冷涡轮设计等。从研究论证结果来看,由于涡轮冷却结构的复杂性,工艺和生产难度过高,带来加工成本大幅升高,不适合在一次性使用的弹用发动机上采用。

b. 低成本改型设计技术途径分析

现代高技术战争既是人员素质、武器装备的较量，又是金钱的大比拼。美国巡航导弹最初的发展改进中，涡扇发动机一直是向着大推力、低油耗的方向发展的，但随着美国战略思想和军事需求的发展，对弹用涡扇发动机提出了在“够用”的前提下尽量低廉的新要求。

战斧 Block 3 导弹在 1993 年时的单枚官方定价为 110 万美元，科索沃战争中，北约仅巡航导弹一项，花费即高达约 15 亿美元。出于降低战争费用的考虑，美国海军对战术战斧 Block 4 的价格提出了单价不能超过 15 万美元的硬性指标。虽然最终的定价可能大大超过该指标，但仍远低于 BLOCK 3 的价格；根据动力装置占全弹费用 $1/4 \sim 1/3$ 的一般比例，其使用的 F415-WR-400 涡扇发动机成本仅为约 15~20 万美元，同之前的型号相比，有了大幅的降低。^{[3][4]}

降低成本需要从产品的设计、工艺、使用、维护等多方面采取措施，本文从产品的设计方面进行技术途径探讨：

- 总体设计单位应该对发动机性能指标进行充分论证，在“够用就行”的前提下，适当降低性能要求，取消没有必要的指标要求，避免盲目留余量、加冗余、追求全面先进指标的做法，例如适当降低发动机的最大推力和耗油率要求以换取成本的降低等；
- 尽量降低零部件数量：多采取整体式或结构一体化的部件，可以大幅降低零件数量，减少加工和装配成本，例如某型弹用涡扇发动机的轴流压气机，共有叶片、轮盘、固定螺母、止动垫圈等 87 个零件，改为整体式结构后，仅剩下整体式轴流轮和压气机机匣 2 个零件，零件总数可减少 97.7%；采用无油润滑（如脂润滑）方式可取消润滑系统包括滑油箱、滑油泵、滑油管路在内的绝大部分部件，有效降低弹用发动机成本和减重；
- 在满足使用需求的前提下，换用便宜的原材料，如某型发动机为了减轻总重量，在一些性能要求不太严酷的地方也较多的使用了钛合金材料，如改用铝或钢合金，可大幅降低产品成本；
- 合理确定产品设计精度要求，降低生产加工难度，提高零件合格率，也可有效降低产品制造成本。

c. 低红外特征技术途径分析

红外辐射源主要来自发动机本身的热辐射、尾喷管喷出的高温喷流、对环境辐射的反射等。对于巡航导弹，红外探测设备和红外制导武器的威胁波段主要在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段，而该波段的红外辐射源为发动机的喷口热壁面和热喷流，因此降低红外特征的主要措施是发动机排气系统的红外抑制。低红外特征是未来武器技术发展的方向之一，国内外都在开展相关研究。通过尾部设计降低红外特征的方法往往会带来性能的损失，对于小推力弹用发动机的影响较大，所以如何同时兼顾低红外和发动机性能不降低，是在弹用发动机上使用红外抑制技术的难点之一。降低红外特征技术的主要设计措施如下：

- 二元喷管技术：通过将圆形喷管改为二元喷管，可以加大尾喷管和外部空气的接触面，能够降低燃气温度，有效减弱红外辐射；

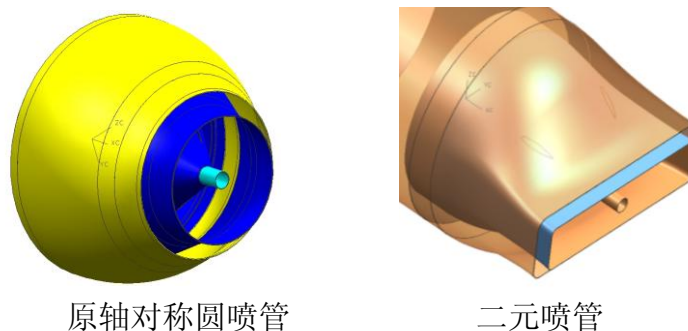


图 1 二元喷管与原轴对称喷管对比

- 采用引气冷却等措施，降低热壁面温度，减少喷口热壁面红外辐射；
- 采用内外涵混合排气技术，可以降低排气温度，减少红外辐射。

4 适应高空长航时飞行器需求的小型涡扇发动机改型设计

4.1 市场需求分析

本文论述的高空长航时飞行器主要针对高空长航时无人机和小型公务机，两者对其动力装置的需要较为类似，美国的许多无人机和小型公务机均使用同一型号的涡扇发动机，例如美国的“暗星”无人机和塞斯纳桨状 CJ1 公务机使用的发动机均为美国威廉斯国际（Williams International）公司生产的 FJ44-1 发动机。

在美国近年来进行的包括海湾战争、伊拉克和阿富汗战争在内的多次局部战争中，无人机卓有成效地完成了包括情报侦察、精确目标打击等在内的多种军事任务，其突出战绩使各国军事专家刮目相看，对其作为军队战斗力倍增器的作用与地位及其潜在的军事价值取得了共识，从而为无人机的迅速发展提供了强大动力。目前世界各国争相大力发展各种无人飞行器，其中以美国和以色列发展最快，已有 30 多个国家共研制出了 200 多种无人机。由此可见，研制和发展各种用途的无人机已势在必行。而其中能够满足高空长航时无人机使用需求的，只有小型涡扇发动机。^{[7][8]}

公务机是指个人或公司在行政事务和商务活动中用作交通工具的飞行器，座位数量一般在 3~20 左右；其中起飞重量 10 吨以下，座位数 1~10 左右的小型公务机，由于价格便宜，操纵简便，适合作为入门级飞行和个人飞行驾照拥有者自驾飞行，因此在国外公务航空市场得到了广泛的发展。巴西航空工业公司 2005 年的统计数据表明，当年全球共有约 13100 架喷气式公务机在运营中；出于安全舒适和经济性考虑，小型公务机无一例外的选用了耗油率低、噪音小、经过严格适航认证的小型涡扇发动机；同时均选用了双发/三发方案以提高飞行过程中的安全性。随着我国经济的快速增长，小型公务机市场急剧膨胀，赵本山、成龙等明星都已经拥有了自己的公务机^{[9][10][11]}。

由以上分析可见，适用高空长航时无人机和小型公务机的小型涡扇发动机市场巨大，亟待开发。

4.2 适应高空长航时飞行器需求的小型涡扇发动机改型方向及技术途径

针对导弹使用需求的弹用涡扇发动机一般设计为长期贮存、一次性短寿命工作，工作寿命短，巡航飞行高度低；而高空长航时飞行器对发动机要求的首翻期寿命一般不小于 3000h（总寿命不小于 10000h），巡航飞行高度在 7000~14000m 甚至更高。因此弹用

涡扇发动机适应高空长航时飞行器改型设计的关键技术主要包括长工作寿命和高升限改型技术。

a. 长工作寿命改型设计

制约弹用涡扇发动机工作寿命的薄弱环节主要有轴承腔密封、轴承及涡轮转子，具体分析如下：

- 提高发动机轴承腔密封结构的长时间工作能力；

某型弹用涡扇发动机轴承腔使用了端面石墨封严装置，在发动机长时间工作时，石墨环磨损量过大是影响其长时间工作能力的主要因素。工作的重点是更换封严结构方案或改进现有石墨封严装置的结构。

- 提高发动机轴承的长时间工作能力；

现有弹用涡扇发动机轴承的工作寿命指标仅适用于弹用短寿命产品，无法满足长时间工作的需要。需要开展轴承长时间工作能力论证和考核，根据需求进行轴向力调整或开展长工作寿命轴承的研制。

- 提高高压涡轮的长时间工作可靠性；

高压涡轮转子是发动机上工作条件最恶劣的部件，也是发动机整机工作寿命最大的限制因素。弹用发动机高压涡轮长时间工作可靠性的提高途径主要是航空发动机新技术的研究和应用，例如使用单晶叶片、定向凝固等，或采取气冷涡轮设计等措施，可在提高或维持高压涡轮转子工作温度不变的同时，大幅提高其使用寿命。

b. 高升限改型技术

提高小型涡扇发动机高空工作性能主要从以下方面进行改进：

- 改进发动机高空工作控制规律，适当提高发动机工况；

现有控制规律下，发动机在高空推力较小，不满足使用需求；由于发动机在高空的热负荷和机械负荷相对较低，远离发动机使用极限，因此可以通过控制规律的改进，适当提高发动机工况（提高转子折合转速），增加可用推力。

- 发动机部件高空工作性能研究及改进技术；

由于弹用涡扇发动机尺寸相对较小，在高空低马赫数飞行状态，主要部件（风扇、压气机、涡轮）的性能受雷诺数影响比较严重，同时高空条件下压缩部件稳定工作裕度的下降，都会影响到发动机的总体性能；因此需要进行分析验证，必要时进行改进或重新设计。

- 发动机润滑系统适应性改进；

弹用涡扇发动机润滑系统大多不能适应高空低气压条件下的长时间工作，需要进行适应性设计改进，例如为保证滑油泵前压力，润滑系统需要增加压力调节机构；改进通风器设计，提高其分离效率，提高滑油泵工作能力以适应需求等。

5 小型涡扇发动机改燃气轮机设计（“航机改燃机”设计）

5.1 小型燃气轮机市场需求分析

小型地面燃气轮机由于具有体积小、便于安放和移动等特点，在以下领域得到了广泛应用：

a. 发电系统, 与发电机和传动系统一起组成发电机组, 用于医院、银行、部队或其他重要部门的应急供电, 海上石油开采平台、小型海岛、边远地区常备或应急供电等;

b. 经改装后, 可用在坦克、汽车、小型快艇上作为动力装置;

目前国内在 200kW~1000kW 范围的小型燃气轮机领域基本处于空白状态 (31 所开发的微燃电站用小型燃气轮机功率在 100kW 以内), 现有应用较广的柴油发电机组存在功率小、噪音大、高海拔地区性能恶化严重等缺点; 由于我国小型海岛及边远地区数量面积巨大, 因此在 1000kW 以下级别的供电需求很大, 市场潜力巨大。^{[12][13][14][15]}

5.2 “航机改燃机”技术途径

由于弹用涡扇发动机工作寿命和任务剖面等使用特点, 使得小型涡扇发动机“航机改燃机”关键技术与大型航空发动机有所不同, 在小型涡轮发动机技术基础上, “航改燃机”需要突破以下关键技术:

a. 长寿命设计技术;

相对于工作寿命一般不超过 10 小时的弹用涡扇发动机, 地面燃气轮机一般要求大修间隔时间不低于 2~3 万小时, 总寿命不低于 10 万小时; 为此需提高产品的工作寿命, 采取的措施可参见“4.2 适应高空长航时飞行器需求的小型涡扇发动机改型方向及技术途径”中的相关内容。

b. 从喷气推进改为轴功输出的总体设计技术;

从双涵道喷气推进的涡扇发动机, 改为以输出轴功为主的燃气轮机, 同时要求满足经济高效、耗油率低的目标, 总体方案设计是技术难点之一; 涉及到总体性能及结构优化、起动方式及点火起动系统改型设计、涡轮改型设计、尾喷管排气改型设计, 以及动力涡轮和传动机构设计等;

c. 多种燃料、高燃烧效率、低排放技术改进;

目前的弹用涡扇发动机均以航空煤油为主要燃料, 排气污染相对较大; 在燃气轮机上, 目前已经广泛使用天然气、煤改气等“清洁燃料”, 现有的燃油控制系统需要进行相应改进, 同时需对燃烧室的适应能力进行论证或改进。

4 结束语

在成熟可靠的基本型基础上, 开展系列化设计并最终实现动力装置的更新换代, 是世界航空发动机技术发展的有效技术途径, 依托于航空航天工业的大平台, 经过数十年的技术攻关和开拓, 我国弹用涡扇发动机技术日趋成熟, 着眼于未来, 打破技术局限, 用好得之不易的技术基础, 做好小型航空动力的技术发展规划, 提供更高、更远、更好用的动力装置, 是动力设计者义不容辞的使命和责任; 弹用涡扇发动机系列化和改型发展任重道远, 但前景广阔、大有可为。

参考文献

- [1] 刘大响. 跨世纪航空发动机技术的发展和建设[C]. 1998珠海航空学术会议航空动力研讨会.
- [2] 罗广源. 国外发展航空发动机值得重视的若干做法[J]. 航空制造技术, 2002. 2: 24- 25.
- [3] 战斧导弹大扫描[J]. 飞航导弹, 2005. 11: 1-7.
- [4] 赵刚. 战术战斧导弹的五大新特点[J]. 飞航导弹, 2002. 10: 63-64.

- [5] 郭琦, 李兆庆. 无人机和巡航导弹用涡扇/涡喷发动机的设计特点[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007. 2: 58-62.
- [6] 叶蕾. 飞航导弹用涡喷/涡扇发动机的发展及关键技术[J]. 飞航导弹, 2009. 2: 49-54.
- [7] 王海斌, 葛雪雁, 宋玉珍. 无人机的发展趋势与技术预测[J]. 飞航导弹, 2009. 11: 46-52.
- [8] 祝小平, 向锦武, 等. 无人机设计手册[M]. 国防科技出版社, 2007.
- [9] 卢小松. 浅谈公务航空的发展和对中国市场展望[J]. 空运商务, 2006. 30: 16~19.
- [10] 《世界中小型航空发动机手册》编委会. 世界中小型航空发动机手册[M]. 航空工业出版社, 2006.
- [11] 赵爱玲. 公务机市场现“井喷”. [J]. 中国对外贸易, 2010. 7: 56-59.
- [12] 施磊, 李孝堂. 中国航改燃气轮机的现状及发展[J]. 航空发动机, 2004. 2.
- [13] 朱阳历, 张华良等. 航空发动机陆用改型设计与分析[J]. 航空工程进展, 2011. 2: 100-104.
- [14] 朱丹书, 蒋文静. 小型燃气轮机的发展前景[J]. 上海汽轮机, 2000. 4: 51-56.
- [15] 徐智珍, 赵永建, 张轲. 国外舰船航改燃气轮机的发展特点[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010. 5: 58-62.