

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.046

北美涡轴和涡桨航空发动机发展路线研究

吴小伟^{1,2}, 朱如鹏², 李维³, 刘子娟³, 李发家³

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

3. 中国航发湖南动力机械研究所中小型航空发动机叶轮机械重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘要:通过对北美霍尼韦尔、GE 公司两大知名航空发动机供应商的 4 个典型系列产品发展路线及技术发展路径进行研究, 归纳出北美涡轴和涡桨发动机的 5 大发展规律和特点: 作战模式和使用场景变化是航空发动机新产品研制的源动力; 先进航空发动机研制共同遵循了“验证机技术验证—型号/产品研制”发展规律; 改进改型和衍生发展是产品系列化发展的最有效途径。结合美国实施的 IHPTET、VAATE、SHFE 等技术发展计划, 可以预测未来航空动力将朝多元化方向发展, 同时实现传统构型动力与新概念动力同步快速发展。

关键词: 涡轴发动机; 涡桨发动机; 发展路线; 技术路线; 发展启示

中图分类号: V23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0254-09

Research on Development Route of North American Turboshaft and Turboprop Engine

WU Xiaowei^{1,2}, ZHU Rupeng², LI Wei³, LIU Zijuan³, LI Fajia³

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Key Laboratory of Impeller Machinery for small and Medium Aeroengine, AECC Hunan Aviation powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: The study on the four typical product development routes and technology development paths of Honeywell and GE Company, the famous aero-engine suppliers, induces five development rules and characteristics of North American turboshaft and turboprop engine: the changes of combat mode and use scene are the source power of the new product development of aero-engine; the development of advanced aero-engine jointly follows the development law of "verification machine technology verification model / product development"; improvement, modification and derivative development are the most effective means for the development of product series; with the combination of a series of technology development plans such as ihptet, vaate and shfe implemented in the United States, it is predictable that the future aviation power will develop in the direction of diversification, and the synchronous and rapid development of traditional configuration power and new concept power can be achieved as well.

Keywords: turboshaft engine; turboprop engine; development route; technology roadmap; development implications

0 引言

航空发动机是飞机的心脏, 是现代工业皇冠上的明珠, 属于大国重器, 是衡量一个国家综合科技水平、科技工业基础实力和综合国力的重要标志。当今世界, 美英法等发达国家在垄断航空发动机、掌握核心技术的同时, 还对其他国家长期实行技术封锁; 他们一方面通过高强度的资金投入来研发新技术, 占领航空发动机技术的制高点; 另一方面依靠高性能材料、先进的制造/装配工艺以

及成熟的设计验证体系, 不断开发出具有竞争力的产品, 引领航空发动机发展方向, 从而达到垄断世界航空发动机市场的目的^[1-5]。

1941 年英国罗罗公司的惠特尔 W.1 涡喷发动机装在格罗斯特飞机公司 E.28 飞机上成功试飞后, 世界上首台燃气涡轮发动机诞生。经过 80 余年的发展, 燃气涡轮发动机已成功发展出涡喷型、涡桨型(含桨扇)、涡轴型和涡扇型四大类型, 其中涡轴型和涡桨型同为轴功率输出型燃气涡轮发动机已发展到第五代^[6-9]。涡轴发动机自问世

基金项目: 中国航发自主创新专项基金项目(CXPT-2020-003)

第一作者简介: 吴小伟(1983—), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 研究方向为航空发动机总体性能, whw102738@163.com。

以来,功率在 260 kW 以上的直升机发动机基本取代了活塞发动机;涡桨发动机以在中低速飞行和起飞时良好的工作特性及经济性,广泛作为民用客机、军用运输机、无人机和多用途通用航空器的动力装置。从整体上看,涡轴和涡桨发动机起源于欧洲,但是在北美得到了较大发展,尤其是 T53、T55、T58、T64、T700、PT6 等系列发动机的问世,深刻地影响了世界航空产业的发展和走向。进入本世纪以来,美国在综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划的子计划联合涡轮先进燃气发生器(JTAGG),以及多用途、经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)计划的支持下,攻克了一批先进的涡轴涡桨发动机设计和制造技术,促进了 T5317BCV、T55-ACE、T58-GE-16A、T64-GE-419、T700-T6E/T6E1、PT6T-9 等型号发动机的改进改型,美国最先进的 T900 和 T901 涡轴发动机以及 Catalyst(催化剂)涡桨发动机的新型号诞生^[10-19],有望开创直升机和固定翼涡桨飞机设计和使用的新时代。

“十三五”以来,我国制定了军、民用航空融合发展战略,并适时率先启动航空发动机及燃气轮机国家科技重大专项,从基础技术、关键技术验证和产品研制等维度开展技术攻关,力图解决制约我国飞机“心脏病”的问题。在此背景下,本文将针对北美霍尼韦尔、GE 公司两大知名航空发动机供应商的涡轴和涡桨发动机技术发展路径和产品发展路线进行深入研究,为我国涡轴和涡桨发动机的发展提供借鉴,推动直升机、固定翼涡桨飞机发展。

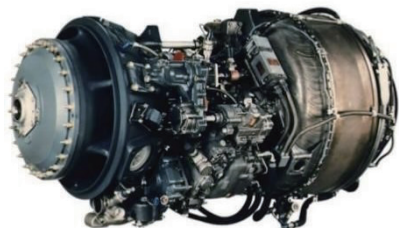


图1 T53 发动机

1 霍尼韦尔涡轮发动机

1.1 T53 涡轮发动机发展路线

T53 发动机(图1)既是美国霍尼韦尔国际公司(原阿芙科·莱康明公司,以下简称霍尼韦尔)20 世纪 50 年代进军燃气涡轮发动机市场的第一个产品,又是北美第一型可用于直升机的燃气涡轮发动机。霍尼韦尔首次提出的“通用发动机”设计理念^[20-24],T53 发动机设计方案采用自由涡轮式,能够发展成涡轴和涡桨发动机以及坦克动力或其他地面动力,超前的设计理念不单击败了竞争对手,还赢得了美国陆军新的多用途直升机招标合同,从而成为贝尔直升机公司“休伊”直升机动力。

通过不断解决伊“眼镜蛇”AH-1 系列专用攻击直升机、UH-1 系列武装运输直升机在实战中暴露的高温、高原能力不足,尘沙导致压气机失速、发动机喘振等突出问题,先后改进研制出了 T53-L-5、T53-L-9 和 T5317A-1 等系列军用涡轴发动机;根据市场需求,基于军用 T53 涡轴发动机的基础,又先后改进研制出 T5311A、T5313B 和 T5317BCV 等系列民用涡轴发动机,满足了贝尔 204B、205A、205/205A-1、210 等民用直升机对动力的需求;又改型研制出 T53-L-3 和 T53-L-701 军用涡桨发动机,满足 OV-1 系列莫霍克侦察机、台湾 T-CH-1A 飞机对动力装置的需求;除此之外,还根据需要衍生发展出 AGT1500 燃气轮机^[25-28]。T53 系列发动机功率覆盖 600~1 300 kW,产品发展路线如图 2 所示。

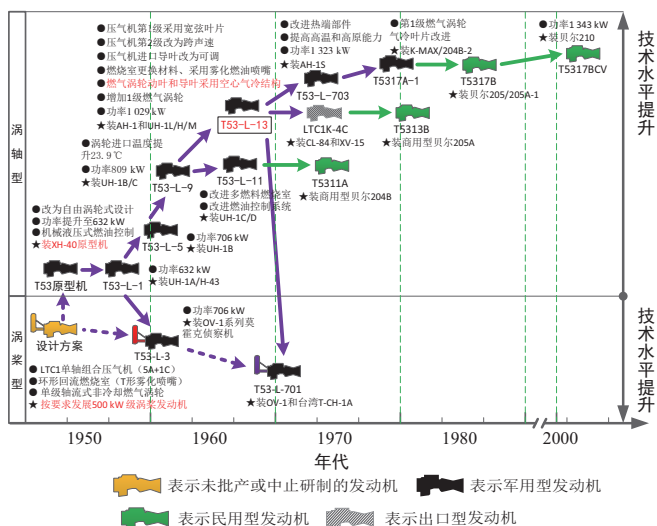


图2 T53 系列发动机发展路线图

1.2 T53 涡轮发动机技术发展路径

在基本保持发动机框架尺寸不变的情况下,

通过改进压气机冷端部件以及燃烧室、燃气涡轮和动力涡轮热端等部件,来进一步提升涡轮进口

温度,增加发动机输出功率,提高发动机的高温和高原能力;通过研制增加惯性原理的粒子分离器,解决发动机因吸入沙尘,导致压气机失速、发动机喘振以及零部件沙蚀问题。T53 发动机基本型部

件有单轴 5A+1C 组合压气机、环形回流燃烧室、单级轴流式燃气涡轮、单级轴流式自由涡轮。具体改进措施及技术发展路径,如表 1 所示。

表 1 T53 发动机改进措施及技术发展路径

改进步骤	压气机	燃烧室	燃气涡轮	动力涡轮	其他	典型机型
第一阶段	- 第 1 级采用宽弦叶片 - 第 2 级改为跨声速设计 - 进口导叶改为可调	- 更换为更好的合金材料 - 采用 T 形雾化燃油喷嘴 - 改进多燃料燃烧室	- 增加 1 级燃气涡轮 - 更换钢制材料 - 工作叶片采用空心气冷结构 - 导向叶片采用空心气冷结构	单级轴流式自由涡轮改为双级	增加惯性原理的粒子分离器	T53-L-9 T53-L-11 T53-L-13
第二阶段		改为蒸发管式燃油喷嘴	第 1 级气冷叶片改进			T5317B T5317A-1 T5317BCV

1.3 T55 涡轮发动机技术发展路线

T55 发动机(图 3)是霍尼韦尔进军大功率涡轴发动机(相对于 20 世纪 50 年代在研涡轴/涡桨和活塞发动机而言)市场的拳头产品,霍尼韦尔公司更加注重“通用发动机”设计理念,提出了“设计简便、压气机耐用”新思想,强调既保持发动机尺寸基本不变,又同时满足轻质量、小尺寸、低油耗并预留较大的功率增长空间要求,满足了美国空军和陆军“战场机动性”对重型直升机动力的要求。

霍尼韦尔借鉴了 T53 发动机设计经验,在 4 kg/s 级进口空气流量 T53 发动机的基础上,通过增加空气流量、增加轴流压气机级数等技术途径,发展出了进口空气流量 13 kg/s 级自由涡轮式

单转子双轴高功率发动机,研制出的 T55-L-5、T55-L-714 和 T55-ACE 等军用涡轴机型,满足了 20 吨级 CH-47“支奴干”系列重型直升机对动力的需要;改进研制的 T5508D、AL5512 等民用涡轴机型,被贝尔 214B、波音 234 和波音 360 等直升机选为动力装置;除此之外,改型发展出 T55-L-1 涡桨机型,LF502R 和 F102-LD-100 等涡扇机型,TF25、TF40 和 TF80 等燃气轮机,分别被“挑战者”600 公务机、BAe146 支线客机、气垫船/快艇/轮渡选为动力装置^[29-34];T55 系列发动机在其 60 余年的发展历程中,累计生产交付 6 000 多台、运行时间超过 1 200 万 h,产品功率覆盖 1 100 ~ 4 400 kW 级,发展路线如图 4 所示。

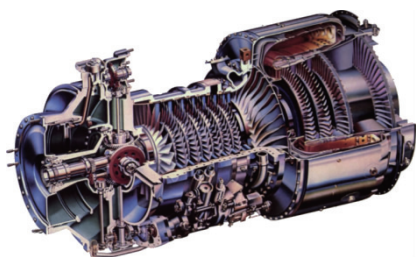


图 3 T55 发动机

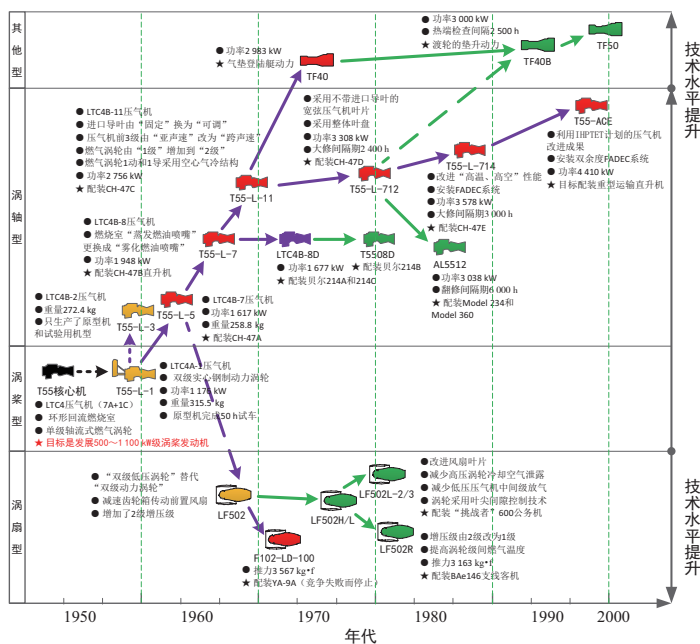


图 4 T55 系列发动机发展路线图

1.4 T55 涡轮发动机技术发展路径

T55 发动机的技术改进,主要是针对在越南战争服役期间,发动机遇到的实际问题,对发动机的冷端部件和热端部件进行了较大技术改进,并根据不同时间段和不同问题的改进,通过 T55-L-11 的不同批次进行了贯彻;通过将压气机改为整体叶盘、进口级压气机改为不带进口导叶的宽弦压气机叶片,解决发动机可靠性、维修性和耐久性方面的问题;通过充分利用 IHPTET(综合高性能

涡轮发动机技术)计划的技术成果,采用改进压气机、减少叶尖间隙、加装超温超转防护装置、发动机控制系统改为双余度 FADEC 系统等措施,将发动机工作温度降低 21.1℃,从而提升了发动机的总体性能,增加了输出功率,解决了发动机高空高原和热天性能不足等问题。T53 发动机基本型部件有单轴 7A+1C 组合压气机、环形回流燃烧室、单级轴流式燃气涡轮、双级轴流式自由涡轮。具体改进措施及技术发展路径,如表 2 所示。

表 2 T55 发动机改进措施及技术发展路径

改进步骤	压气机	燃烧室	燃气涡轮	动力涡轮	其他	典型机型
第一阶段	· LTC4B-8 压气机改为 LTC4B-11 · 压气机进口“固定”导叶改为“可调”导叶 · 前 3 级压气机改为“跨声速”设计	· “蒸发燃油喷嘴”改为“雾化燃油喷嘴”	· 由 1 级燃气涡轮改为 2 级 · 燃气涡轮第 1 级工作叶片采用空心气冷结构 · 燃气涡轮第 1 级导向叶片采用空心气冷结构			T55-L-7 T55-L-11
第二阶段	· 将 7A+1C 组合压气机改为整体叶盘 · 进口级压气机改为不带进口导叶的宽弦压气机叶片设计 · 采用不锈钢压气机机匣	· 采用机械加工的火焰筒	· 采用扇形段导向器 · 改进涡轮也偶按叶尖间隙控制,减少冷却空气漏气量	· 改进自由涡轮叶片设计	· 改进燃油控制系统 · 安装 FADEC 系统 · 改善转矩测量系统 · 安装金属屑末探测系统	T55-L-712 T55-L-714
第三阶段		· 采用新的隔热涂层 · 提高燃烧室的空气流量	· 采用新的隔热涂层; · 采用更加有效的防腐涂层 · 进一步减少叶尖间隙;		· 安装双余度 FADEC 系统 · 加装超温超转防护装置 · 加装故障诊断系统	T55-L-714A T55-ACE

2 GE 涡轮发动机

2.1 T58 涡轮发动机发展路线

T58 发动机(图 5)是美国通用电气公司(简称 GE 公司)20 世纪 50 年代进军美国军用涡轴发动机市场的第一个产品。该发动机为初始技术方案与 T53 发动机竞争失利后改进型采取了将 J47 涡喷发动机的 8 级全轴流式压气机进行压缩尺寸,燃气涡轮采用双级,动力涡轮设计为单级等技术措施。XT58 涡轴发动机验证机成功赢得美国海军研制合同,为卡曼 UH-2“海怪”、西科斯基 UH-3“海王”和波音 CH-46/UH-46“海骑士”等直升机提供动力。

因 T58 发动机的出色性能表现,被美国空军选用,T58-GE-3 配装到了贝尔 UH-1F 获得美国空军 120 架采购量。GE 公司在民机市场进行了探索,在军机基础上先后改进研制的 CT58-GE-

100-1、CT58-GE-110、CT58-GE-140 等机型,被西科斯基 S-62、伏托尔 107 II 等民用直升机选为动力装置;CT58-GE-100-1 涡轴发动机于 1959 年取得适航证,成为美国历史上第一型获得 FAA 适航证的涡轴发动机。T58 发动机改型 YT58-GE-4 涡桨发动机、T58-GE-8F 涡喷发动机,以及 LM100 燃气轮机用于应急电力系统、油管泵油、非高速路车辆、气垫飞船等领域^[35-41]。T58 发动机在其近 70 年的发展历程中,产品功率覆盖 700~1 400 kW,发展路线如图 6 所示。

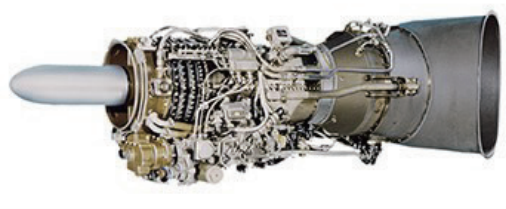


图 5 T58 发动机

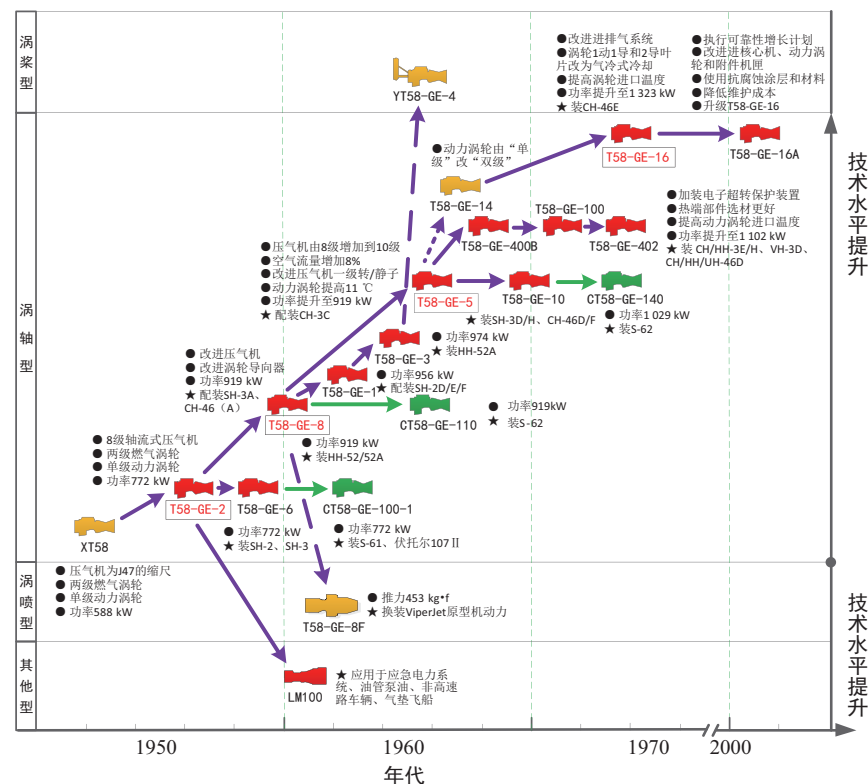


图 6 T58 系列发动机发展路线图

2.2 T58 涡轮发动机技术发展路径

GE 公司通过实施“可靠性增长计划”,通过更换材料、采用新设计技术,改进压气机、燃气涡轮和动力涡轮等技术措施,提高 T58 发动机的总体性能,增加发动机输出功率,延长发动机寿命,并降低维护成本。采用可变几何结构设计技术使

压气机效率提升到 85%,将静子可调技术第一个应用在小功率燃气涡轮发动机中,开发了“光滑转子压气机新设计技术”,也成为 T64 和 TF34 发动机压气机的设计基础。T58 发动机基本型部件有 8 级全轴流式压气机、双级燃气涡轮、单级轴流式自由涡轮。具体改进措施及技术发展路径,如表 3 所示。

表 3 T58 发动机改进措施及技术发展路径

改进步骤	压气机	燃烧室	燃气涡轮	动力涡轮	其他	典型机型
第一阶段	改进压气机		改进涡轮导向器			T58-GE-8
第二阶段	空气流量增加 8% 轴流式压气机 8 级改 10 级 前 3 级压气机改为跨声速设计 进口级导叶可调设计 前 3 级整流叶片采用可调设计	更换为更好的合金材料	更换为更好的合金材料	动力涡轮进口温度提高 11℃	加装电子超转保护装置 热端部件选材更好	T58-GE-5 T58-GE-10 T58-GE-100 CT58-GE-140 T58-GE-402
第三阶段			第 1 级转子叶片改为空心气冷结构 第 1 级导向叶片改为空心气冷结构 第 2 级导向叶片改为空心气冷结构	自由涡轮由单级改为双级	改进进排气系统	T58-GE-16
第四阶段	改进进核心机 使用抗腐蚀涂层和材料 降低维护成本			改进自由涡轮	改进附件机匣	T58-GE-16A

2.3 T700 涡轴/涡桨发动机发展路线

20 世纪 60 年代中期,美国陆军开始实施“1100kW 级先进涡轴发动机验证机研制计划”,GE 公司总结并汲取了 T58 与 T53、T64 与 T55 发动机竞争失利的经验和教训,提交了进口流量 4 kg/s 级较为激进的 GE12 验证机设计方案,与普惠公司 ST9 和霍尼韦尔 PLT27 进行竞争。最终 GE12 以高性能指标、易维护性和可靠性、高生存能力等优势,赢得美国陆军“通用战术运输系统(UTTAS)直升机计划”、“先进攻击直升机(AAH,即全天候反坦克直升机)计划”研制合同,从此开启 T700 发动机(图 7、图 8)的成功大门^[42-45]。

研制的 T700-GE-700、T700-GE-401/701、T700-GE-401C/701C、T700-GE-701D、T700-T6E/T6E1 等军用涡轴机型,满足了 UH-60“黑鹰”、AH-64“阿帕奇”、SH-60“海鹰”、SH-2G“海

妖”、AH-1W、NH-90、贝尔 214ST 等直升机对动力的急需;改进研制的 CT7-1、CT7-2、CT7-6、CT7-8/8A 和 CT7-8E 等民用涡轴机型,被波音 179、西科斯基 S-90、韦斯特兰 30 系列 200/300 等直升机选为动力装置;改型研制的 CT7-7A 军民用涡桨机型,被 CASA 支线客机 CN-235 和军用型 CN-235 系列 10 飞机选为动力装置;改型研制的 CT7-5A、CT7-9/9B/9D 等民用涡桨机型为萨伯 SF340/340B 支线客机、45 座级 CN-235 系列 100 飞机、捷克 40 座级 L610G 支线客机提供动力装置。T700 系列发动机产品功率覆盖 1 100~2 200 kW 级。在近 40 年的服务中,生产交付了 2 万多台发动机,为 50 多个国家 130 多个客户的 25 种军用和民用直升机及固定翼飞机提供动力,装机运营时间超过了 1 亿个飞行小时,成为目前世界上最成功的发动机之一,其发展路线如图 9 所示。



图 7 涡轴型 T700



图 8 涡桨型 CT7

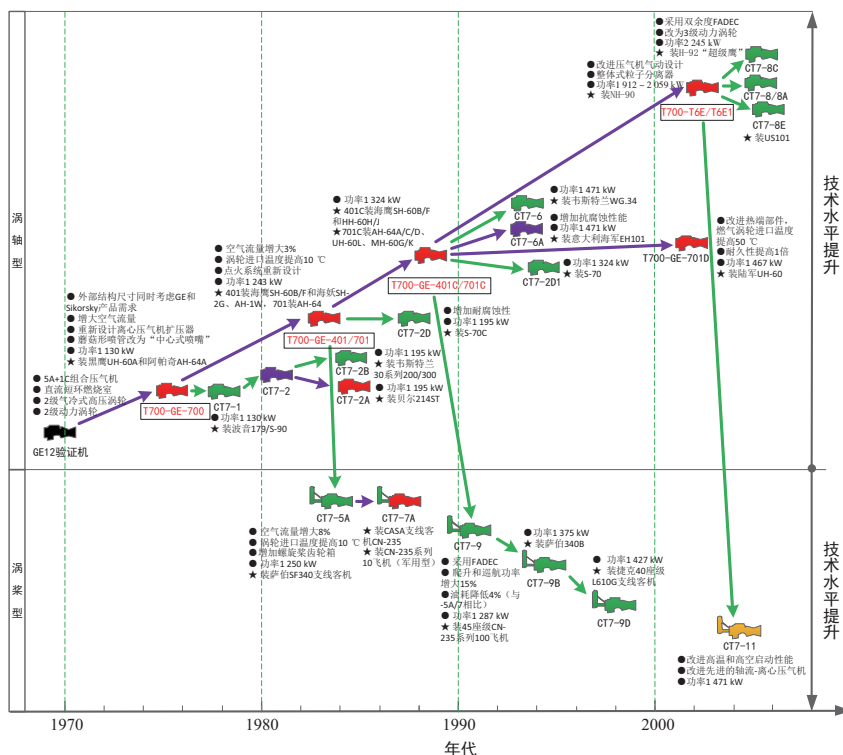


图 9 T700 系列发动机发展路线图

2.4 T700 涡轴/涡桨发动机技术发展路径

以 GE12 验证机先进的指标为牵引,将轻量化、高放热效率、低冒烟、低污染、长使用寿命、易维护性等综合指标作为其核心竞争力,借助“T700 成熟计划”、“部件改进计划”、“共用发动机计划”和“IHPTET 计划”,持续开展并应用三维气动黏性流设计和分析技术、部件模块化设计与拆换技术、飞发一体化技术设计、控制技术等先进的设计技术、新材料及先进的辊扎焊接棒材环机加工技术。通过解决发动机研制中出现的实际问题,促进技术不断发展,如为解决积碳和使用寿命不稳定等问题,将蘑菇型汽化喷嘴更改为“中心式

喷嘴”的新燃油喷射系统,这一喷射系统设计成为后续 GE 公司航空发动机的设计标准;根据 T58 和 T64 发动机加装可拆卸式粒子分离器的使用经验,当拆下粒子分离器清洗或维修时,发动机不带粒子分离器工作会发生裂纹,飞行员在高空飞行时往往关闭粒子分离器,而着陆时又常常忘记打开粒子分离器等问题,专门开发了整体式粒子分离器,有效解决了这些问题。T700 发动机基本型部件有 5A+1C 组合压气机、直流短环形燃烧室、双级轴流式燃气涡轮、双级轴流式自由涡轮。具体改进措施及技术发展路径如表 4 所示。

表 4 T700 发动机改进措施及技术发展路径

改进步骤	压气机	燃烧室	燃气涡轮	动力涡轮	其他	典型机型
第一阶段	- 增大压气机进口直径,增大发动机进口空气流量 - 整体叶盘设计 - 降低第一级压气机叶片径向比 - 离心压气机扩压器由“锥喉形结构”改为“并列喉形结构” - 轴流级压气机工作叶片采用低展弦比、宽弦叶片、前缘叶片较厚的设计 - 轴流级压气机导叶采用后掠式设计	- 燃油喷射系统“蘑菇型汽化喷嘴”更改为“中心式喷嘴” - 先进的辊扎焊接棒材环机加工技术	高压燃气涡轮采用气冷式设计	动力涡轮工作叶片采用带冠设计	- 粒子分离器采用整体式设计 - 外部结构尺寸考虑多平台需求 - 飞发一体化技术设计	T700-GE-700 CT7-1 CT7-2A CT7-2B
第二阶段	- 空气流量增大 3% - 改进离心式压气机叶轮 - 改进封严系统	- 重新设计点火系统 - 采用新的冷却系统	- 涡轮进口温度提高 10℃ - 采用新的冷却系统 - 改进封严系统		增加螺旋桨齿轮箱	T700-GE-401 T700-GE-701 CT7-2D CT7-5A CT7-7A
第三阶段	- 离心式压气机改进气动设计 - 离心压气机采用 Inco718 材料 - 采用表面涂层 - 采用新的进口导流叶片 - 改进 1-2 级轴流压气机静子叶片		- 燃气涡轮改进气动设计 - 第 1 级导向器用 X-40 合金铸造 - 燃气涡轮进口温度提高 50℃ - 低压涡轮叶片和导向器叶片进行了改进	改进自由涡轮		T700-GE-401C T700-GE-701C T700-GE-701D CT7-9
第四阶段	- 空气流量增大 10% - 改进压气机气动设计 - 头 3 级采用可调静子 - 压气机采用最新的三维气动粘性流设计和分析技术 - 压气机基本全由 AM355 钢和 Inco718 制造 - 压气机上增加一个由动力涡轮驱动的增压级		- 涡轮耐久性进行了改进 - 涡轮进口温度提高 17℃ - 涡轮导向器采用陶瓷叶冠 - 涡轮转子叶片为单晶材料制造,并采用隔热涂层 - 叶片和转子内腔采用先进的冷却流路	自由涡轮由 2 级改为 3 级	- 采用双余度 FADEC - 整体式粒子分离器	T700-T6E T6E1 CT7-11 CT7-8C CT7-8E

3 北美涡轴和涡桨发动机的发展规律和启示

通过对北美的霍尼韦尔 T53、T55 和 GE 公司的 T58、T700 等四大系列涡轮、涡轴和涡桨发动机产品发展路线和技术发展路径的对比分析和研究,总结以下六个方面的共同规律和特点。

1) 作战模式和使用场景的变革是航空发动机新产品发展的源动力。“垂直包围”战术、“工蜂作战”行动、“战场机动性”要求等新军事思想变革和作战模式的变化,既促进了直升机发展,又加速了涡轴发动机替代活塞发动机的步伐,牵引涡轴和涡桨发动机朝着更大输出功率和更高总体技术水平方向发展;全疆域实战化应用,对航空发动机“三高”(高温、高原和高空)性能、海洋“三防”(防湿热、防盐雾和防霉菌)腐蚀性、安全可靠、维护性和经济性等方面的需求,促进了航空发动机的快速发展。

2) 竞争择优机制是航空发动机不断推陈出新和综合技术水平不断提升的关键。T53 与 T58、T55 与 T64、GE12 与 ST9 和 PLT27 等机型竞争择优的实践证明:只有先进的设计思想/理念、大胆的技术革新和进步,才能造就知名的航空发动机产品,才能在竞争中处于优势。航空发动机产品的最大特点之一是即使在竞争中失利,但若能及时调整定位,采取差异化发展策略,仍有取得较大发展的机会。

3) 实现跨代发展需要遵循“验证机技术验证—型号/产品研制”发展规律。霍尼韦尔和 GE 公司分别通过 T55 核心机以及 T53、XT58、T64、GE12 等验证机研制,新技术进行先期的技术验证,为 T55、T58、T64、T700 初始型发动机研制基本上扫清了技术障碍,也为后续的改进改型、系列化发展和衍生发展奠定了基础。

4) 改进改型和衍生发展是航空发动机系列化发展的最有效途径。以初始型发动机为基础,通过“轴改桨”或者“桨改轴”方式实现涡轴和涡桨发动机共生发展;通过改进部件设计、采用新材料、提升压气机效率和涡轮前温度、改变发动机控制方式和控制规律等措施,实现发动机的纵向系列化发展;以核心机或发动机为基础,通过增加增压级、改进风扇叶片、用低压涡轮替代动力涡轮等措施,改型发展出中小推力级涡扇发动机或涡喷发动机;通过对涡轴或涡桨发动机为基础,进行适应性改进,衍生发展出燃气轮机满足功率舰船动

力和拖动市场需求;系列化发展也有助于降低产品成本,并扩大市场占有率。

5) 新型号/产品发展需求及趋势带动部件/系统技术持续发展。飞机/直升机一方面要求动力输出功率不断增大、性能不断提升,另一方面又要求发动机安装/外廓尺寸基本保持不变或可进行原位换装,迫使发动机供应商通过不断地改进/优化设计、采用新技术新材料新工艺,来提升发动机部件效率,从而达到提升发动机综合技术水平和增大输出功率的要求。

6) 技术进步和产品发展由企业行为逐渐上升成为国家行为。20 世纪 80 年代前,各发动机供应商主要依靠自身力量来实现技术突破和产品发展,从而赢得竞争并扩大市场占有率;80 年代中后期开始,美国将航空发动机视为国家战略性新兴产业,通过不间断实施 IHPTET 计划、VAATE 计划、小型重油发动机计划(SHFE)、先进经济可承受涡轮发动机计划(AATE)、改进涡轮发动机计划(ITEP)、未来经济可承受涡轮发动机计划(FATE)和替代概念发动机计划(ACE)等一系列研究计划,取得了在涡轴和涡桨发动机技术领域的压倒性优势,为新型号/产品研制及成熟产品改进发展奠定了技术基础。

通过对霍尼韦尔、GE 公司两大世界知名航空发动机供应商的典型产品及美国 IHPTET、VAATE、SHFE 等一系列技术发展计划的研究,未来航空动力将朝着多元化方向发展,可实现传统构型动力与新概念动力同步快速发展的局面。传统构型的涡轴和涡桨发动机技术,除追求传统低的生产和维护成本、低油耗、高可靠性、易维护性、长寿命等指标外,还对轻量化、高单位功率、高功重比等方面提出了更高的要求。在碳达峰和碳中和的发展指引下,桨扇发动机、氢能源动力、智能发动机、混合电推进系统、多电推进系统和全电推进系统将迎来前所未来的发展机遇。

参考文献:

- [1] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 490-496.
- [2] 焦华宾,莫松. 航空涡轮发动机现状及未来发展综述[J]. 航空制造技术, 2015, 58(12): 62-65.
- [3] 晏武英. 美欧航空发动机重大科技专项计划分析[J]. 航空动力, 2021(2): 39-44.
- [4] 刘大响,金捷. 21 世纪世界航空动力技术发展趋势与展望[J]. 中国工程科学, 2004, 6(9): 1-8.

- [5] 陈懋章. 航空发动机技术的发展[J]. 科学中国人, 2015(28):10-19.
- [6] 斯坦利·胡克(Stanley Hooker). 我是怎么设计航空发动机的:斯坦利·胡克传[M]. 王岭,陈娇,译. 上海:上海交通大学出版社,2018.
- [7] 邹望之,郑新前. 航空涡轴发动机发展趋势[J]. 航空动力学报,2019,34(12):2577-2588.
- [8] 刘大响,陈光. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 北京:航空工业出版社,2003.
- [9] 李建华,蔡建兵,申余兵. 涡轴发动机发展展望[J]. 国际航空,2013(9):75-77.
- [10] 肖蔓. AATE 和 ITEP 计划下的涡轴发动机分阶段研发综述[J]. 航空发动机,2016,42(2):98-102.
- [11] 王巍巍,郭琦,黄顺洲. IHPTET 计划的先进项目管理方法[J]. 燃气涡轮试验与研究,2011,24(2):58-62.
- [12] 胡晓煜. IHPTET/JTAGG 美国未来直升机发动机计划进展顺利[J]. 国际航空,2001(3):59-60.
- [13] 葛宁. 涡轴发动机发展与技术趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(2):145-156.
- [14] 罗安阳,周辉华,申余兵. 航空涡轮螺旋桨发动机发展现状与展望[J]. 航空科学技术,2013,24(5):1-5.
- [15] 蓝琼. 两类涡轮螺旋桨发动机的差异[J]. 中国科技信息,2015(9):40-41.
- [16] 周辉华. 国外涡桨发动机的发展[J]. 航空科学技术,2013,24(1):18-22.
- [17] 刘新建. 国产涡桨发动机的发展方向剖析[J]. 电子世界,2014(3):106-107.
- [18] 钱锟,李怡然. 涡轮螺旋桨发动机简史[J]. 航空世界,2015(10):75-78.
- [19] 蔡建兵,吴施志. 涡轴发动机技术发展[J]. 航空动力,2018(5):37-39.
- [20] WANG J. Development trend of turboshaft engine for helicopter[J]. International Aviation, 2014(11):76-78.
- [21] 黄太平. 民用航空涡轮发动机现状与发展趋向[J]. 机电技术,2003,26(增刊1):38-46.
- [22] AIAA Air Breathing Propulsion Technical Committee. The versatile affordable advanced turbine engines (VAATE) initiative[R]. Virginia, USA: AIAA, 2006.
- [23] 阳尧,崔响,徐志晖,等. 航空燃气涡轮及其发展趋势[J]. 山东工业技术,2017(14):35.
- [24] 黄维娜,李中祥. 国外航空发动机简明手册[M]. 西安:西北工业大学出版社,2014.
- [25] 闫晓军. 典型航空发动机结构对比与分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [26] 尹泽勇,曾源江,石建成,等. 涡轴(涡桨)/涡扇(涡喷)发动机通用核心机技术[J]. 航空动力学报,2008,23(11):2088-2094.
- [27] 程荣辉,古远兴,黄红超,等. 民用航空发动机核心机技术发展研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2007,20(1):1-7.
- [28] 龚光英. 航改工业燃气轮机设计特点分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2012,25(增刊1):55-60.
- [29] 付青峰,杨细莲,刘克明. 航空发动机高温材料的研究现状及展望[J]. 热处理技术与装备,2018,39(3):69-73.
- [30] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等. 航空发动机用耐高温材料的研究进展[J]. 材料导报,2014,28(11):27-31,37.
- [31] 刘巧沐,黄顺洲,刘佳,等. 高温材料研究进展及其在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2014,27(4):51-56.
- [32] 张磊磊,付前刚,李贺军. 超高温材料的研究现状与展望[J]. 中国材料进展,2015,34(9):675-683,658.
- [33] GUNSTON B. Jane's aero-engines[M]. Surrey, UK: Jane's Information Group, 2020.
- [34] 詹姆士·圣·彼得(James St. Peter). 美国飞机燃气涡轮发动机发展史[M]. 张健,译. 北京:航空工业出版社,2016.
- [35] 伍赛特. 航改燃气轮机技术发展历程及未来趋势研究[J]. 上海节能,2020(3):213-220.
- [36] 翁一武,闻雪友,翁史烈. 燃气轮机技术及发展[J]. 自然杂志,2017,39(1):43-47.
- [37] 倪金刚. GE 航空发动机百年史话[M]. 北京:航空工业出版社,2015.
- [38] 赵明菁,邹志鹏,孙明霞. GE 公司航空发动机技术文献的统计研究[J]. 科技视界,2019(22):203-204,154.
- [39] 李山,张光星. 航空发动机数字化制造技术的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术,2009,52(7):66-69.
- [40] 伍赛特. 民用航空发动机制造技术现状及未来趋势展望[J]. 现代制造技术与装备,2019(3):13-15.
- [41] 李添宇. 航空发动机关键制造技术现状及趋势[J]. 世界制造技术与装备市场,2019(2):77-79.
- [42] 许飞. 民用航空发动机维修成本分析与控制研究[D]. 天津:中国民航大学,2014.
- [43] 胡晓煜. T700 发动机发展综述[R]. 中国航空工业发展研究中心研究报告,北京:中国航空工业发展研究中心,2003.
- [44] DONOHIE H G. T700/CT7 growth engine for European helicopters[C]// The 11th European Rotorcraft Forum. London: [s. n.], 1985.
- [45] 任光明. T700 航空涡轮轴承发动机及其发展[J]. 世界直升机信息 2003(2):38-44.

收稿日期:2023-11-06