

俄罗斯 PD-35 发动机项目分析

Analysis to PD-35 Turbofan of Russia

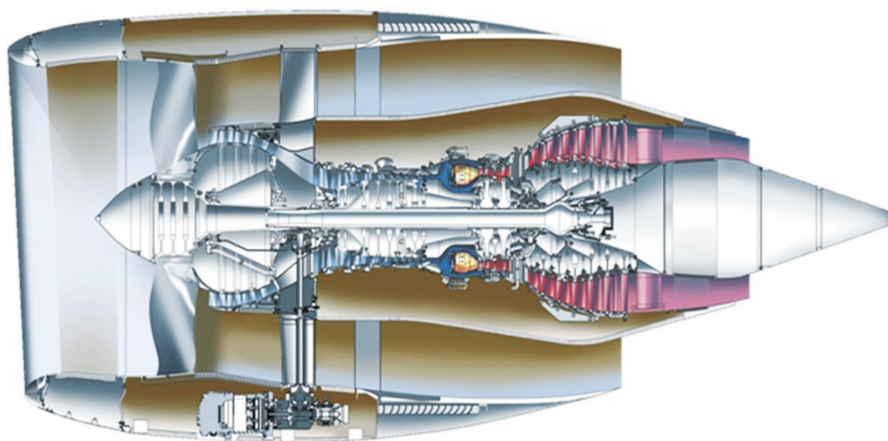
■ 唐宇峰 张丹玲 徐嘉悦 丁宁 / 中国航发动动力所

俄罗斯工业部门基于 PD-14 发动机，改进研制了起飞推力达到 340kN 的 PD-35 发动机，能够为民用宽体飞机和军用运输机提供动力，同时引领俄罗斯航空工业研发能力提升。

俄罗斯双转子大涵道比涡扇发动机 PD-35，起飞推力为 340kN，是俄罗斯历史上推力最大的商用航空发动机。PD-35 发动机研制项目由俄罗斯联合发动机公司（UEC）、俄罗斯联合飞机公司（UAC），以及众多主要领域的科研组织共同承担。2016 年，UEC 下属的彼尔姆航空发动机公司和土星科研生产联合体共同开启了 PD-35 发动机研制项目，该项目的计划研制周期为 10 年，采用了很多创新技术和新材料，包括采用树脂基复合材料制造发动机零部件、采用复合材料制造层流环绕的大尺寸发动机短舱、利用增材制造技术制造大型复杂剖面机匣零件、应用新的热强合金和金属间化合物研制低辐射燃烧室等。

技术方案

PD-35 发动机为常规双转子大涵道比涡扇发动机，采用双涵道双轴、内外涵道气流分开排气方案，宽弦复合材料风扇叶片以及复合材料风扇机匣，结构包括 1 级风扇、3 级增压级、9 级高压压气机、环形燃烧室、2 级高压涡轮和 6 级低压涡轮。其中，发动机控制采用全权限数字式电子控制（FADEC）系统。



PD-35 发动机结构

官方透露的 PD-35 发动机具体参数有限，主要包括：起飞推力 323 ~ 392kN；巡航耗油率约 53kg/(kN·h)；风扇直径约 3.1m，发动机最大直径约 4m；发动机长度大于 8m。

研制安排

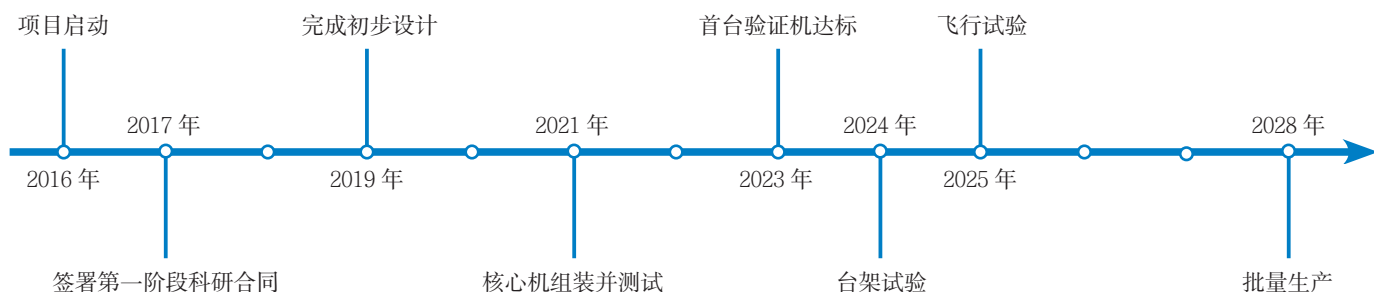
2016 年，PD-35 发动机启动项目研制，预计 2023 年交付首台技术验证机，完成第一阶段研制工作；2021 年 9 月，PD-35 发动机的核心机完成组装，力争在 2025 年左右获得俄罗斯国内的适航证；据简氏网站 2021 年 10 月 15 日报道，PD-35 核心机已开始早期静态测试，项目取得实质性进展。

关键技术

PD-35 发动机采用了 18 项重大新技术，包括使用增材制造、轻质材料、耐热涂层和数字技术等，用于实现复合材料风扇叶片、复合材料风扇机匣、新的高压压气机、低排放低辐射燃烧室、层流短舱和其他先进部件的设计和制造。

风扇技术

PD-35 发动机的风扇直径为 3.1m，是俄罗斯航空工业历史中首次采用复合材料风扇叶片，同时还采用了复合材料风扇机匣。因为 PD-35 发动机尺寸非常大，如果采用钛合金空心叶片会导致风扇质量很大，而采用复合材料可将风扇叶



PD-35发动机主要研制节点

片整体质量减轻20% ~ 30%。2020年6月，用于PD-35发动机的复合材料风扇叶片完成了第一阶段试验，由于PD-35发动机仍处于研制阶段，因此发动机验证机的风扇采用了按比例缩尺的形式，并对其进行试验。

2021年1月，UEC在研制PD-35发动机的过程中，尝试了聚合物复合材料风扇叶片的制造方法。为了降低风险，公司明确了两个技术方向：一是将预浸料在模具中分层，随后在高压灭菌器中进行聚合（预浸料技术）；二是形成三维编织增强框架，随后在模具中进行压力浸渍和聚合（三维编织技术），这项新技术正在PD-14发动机上进行试验（小的风扇叶片尺寸为0.75m，大的为1.25m）。

高压压气机技术

PD-35发动机的高压压气机进口直径为0.815m，高压压气机级数为9级，压比为23，平均级压比高达1.417。目前，PD-35发动机的高压压气机拟采用电力驱动的形式对进口导向叶片进行驱动，主要有两种方案，一种是通过旋转运动实现驱动，另一种是通过平移运动实现驱动。两种方案均用于实现高压压气机可调叶片机械定位，以确保在发动机起动状态、稳定状态和过渡状态下能够实现快速动作。

涡轮技术

为使涡轮正常工作，PD-35发动机综合采用新材料以及先进的冷却系统，包括碳化硅-碳化硅（SiC-SiC）和碳-碳化硅（C-SiC）两种陶瓷基复合材料（CMC）。全俄轻金属研究院于2017年开始研究最新的镍基高温合金制造可变结构的涡轮盘，还在对最新的高温高强镍基粉末合金VV753P进行试验和检验。VV753P合金的研制充分吸取了粉末金属的研制经验，采用高熔点稀有金属钽和铌，能够极大地提高合金性能，如持久强度、抗蠕变性和高温耐腐蚀性等，并降低疲劳裂纹扩展速率。

材料/制造技术

全俄航空材料研究院（VIAM）负责研发PD-35发动机所需的新一代材料，即在高温下具备更好特性的耐热合金、CMC、未来轴承合金、大尺寸零部件所用轻聚合物复合材料等。2019年5月，在俄罗斯圣彼得堡国立海洋技术大学进行了PD-35发动机工作小组会谈，讨论了采用增材制造技术生产PD-35发动机的问题，就后续采用增材制造技术制造PD-35发动机的大尺寸零件达成一致。

试验测试技术

2020年5月，UEC下属彼尔姆

发动机测试中心开始建设。新建的测试中心可服务于PD-14、PS-90A、PD-35和PD-8等发动机的开发和生产；2021年10月，PD-35发动机核心机完成组装，并进行了试验验证，这是PD-35发动机研制中最重要的步骤，也是项目首次取得实质性成果；2023年，将完成核心机、压气机和燃烧室测试台架建设，包括海平面测试台架，于2024年投入使用。预计该中心将于2028年开始服务于发动机批量生产。

先进性分析

PD-35发动机作为双转子大涵道比涡扇发动机，结构形式和采用的先进技术与GENx较为接近，与同等推力的GENx和遛达系列相比性能相当，但风扇直径较大，将带来发动机质量的增加。PD-35发动机与其他大推力量级发动机主要参数对比如表1所示。

衍生发展

PD-35发动机是在PD-14发动机成熟的核心机基础上，通过放大和加级的方式实现发动机推力的增长，这一思路也是目前主流发动机制造商所采用的模式，缩放技术作为一种成熟技术，可以缩短发动机研制周期，降低项目风险，减少研制费用。

表1 PD-35发动机与其他大推力量级发动机主要参数对比

发动机型号	研制公司	起飞推力/kN	总压比	耗油率/(kg/(kN·h))	风扇直径/m
PD-35	UEC	340	40(参考)	53.04	≈ 3.1
GE9x	GE公司	295 ~ 338	52 ~ 58	53.55	2.66 ~ 2.82
GE90	GE公司	417 ~ 511	39 ~ 46	56.1	3.1 ~ 3.26
遑达800	罗罗公司	331	41.9	57.12	≈ 2.8
遑达900	罗罗公司	311	41.1	53.04	≈ 3.0
D-18T	伊夫琴科进步机械制造设计局	229	27.5	59.67	2.33

2008年, PD-14发动机项目正式启动, 发动机起飞推力为137kN, 风扇直径为1.9m, 项目进展顺利, 2010年开始核心机试验, 2012年开始验证机地面试验。在PD-14发动机的研制过程中, 突破了包括钛合金空心风扇叶片制造技术、新一代单晶涡轮工作叶片制造技术、陶瓷涂层涂覆技术等在内的14项关键技术。此外, VIAM等单位研制了多种新型高温合金和复合材料, 有效地减轻了发动机的质量。

与PD-14发动机项目一样, PD-35发动机项目也计划系列化发展。公开的信息显示, 以340kN的PD-35发动机为基础, 俄罗斯将分别研制推力为240kN的PD-24和280kN的PD-28两型发动机。前者将用于近中程宽体客机和未来的重型军用运输机, 后者则用于远程宽体客机。

PD-35发动机和PD-14发动机相比, 除了推力级别放大所带来的设计差异以外, 包括风扇叶片在内的相当多部件都比常见的双发窄体客机的发动机尺寸要大得多, 甚至不少部件已经突破了俄罗斯现有生产设备所能支持的极限, 需要进行相关的特殊改进、或者是进行全新

的研制和采购。

应用前景

如果PD-35发动机进展顺利, 双发远程干线客机就又多了一种商业发动机可供选择。有俄罗斯专家指出, 开展PD-35发动机研制并不是为了与西方的发动机产品进行竞争, 而是为了解决俄罗斯国内航空工业所承受的巨大压力。目前, 俄罗斯虽然有伊尔-96宽体客机, 但与西方国家同类产品相比缺乏竞争力。如果将伊尔-96的4发更换为2台PD-35发动机并实现减轻质量, 其竞争力将会明显提升, 出口前景将得到改善。同时, 未来的PAK TA“大象”运输机也将PD-35发动机作为其动力选型之一, 且该发动机的改型也可以用于军用运输机等军用项目, 将对改善俄罗斯现有老旧军用运输机机队起到重要作用。

启示

通过成熟核心机进行发动机衍生发展, 是目前世界上主流的研制方法。PD-35发动机的研制不仅充分应用了PD-14发动机的核心机技术, 而且应用了俄罗斯前期预先技术研究

和关键技术攻关成果, 有助于缩短研制周期, 在研制过程中, 设置技术验证机, 阶段性达到预期目标, 逐步成熟, 降低了技术风险。

PD-35发动机技术指标与罗罗公司和GE公司生产的同等推力级别发动机相比, 虽然聚合了俄罗斯最顶尖的研发和生产力量, 可是竞争力却十分有限, 但俄罗斯仍然进行PD-35发动机研发, 一方面可打破民用航空动力市场的高度垄断, 不受西方技术制约; 另一方面可提升整个航空工业的研发和制造水平, 有助于实现航空复兴。

在PD-35系列发动机研制过程中, 俄罗斯航空工业经历了不断的整合, 国家通过增加国有资产比重的方式, 加强了对航空工业的控制权, 军机和民机研发有效融合, 提升了项目研制效率, 节省了开支, 在进口替代计划的推动下, 俄罗斯航空工业配套系统和部件的专业能力建设得到了快速发展, 并带动国内相关产业链企业的发展。

结束语

PD-35发动机凭借先进的设计和制造技术, 具有大推力、低油耗、长寿命、高可靠性等特点, 是目前最先进的大涵道比航空发动机之一, 可为民用宽体飞机提供动力, 通过适应性改进, 还将快速形成大/重型军用运输机动力。航空发动机具有研发周期长的特点, PD-35发动机未来能否成功地投入运营, 还具有许多不确定因素, 有待开展更充分的工作。

航空动力

(唐宇峰, 中国航发动力所, 高级工程师, 主要从事航空发动机总体性能设计)