

俄罗斯 PD-14 涡扇发动机项目分析

Analysis to Russian PD-14 Turbofan

■ 邹剑峰 刘翠玉 / 中国航发研究院

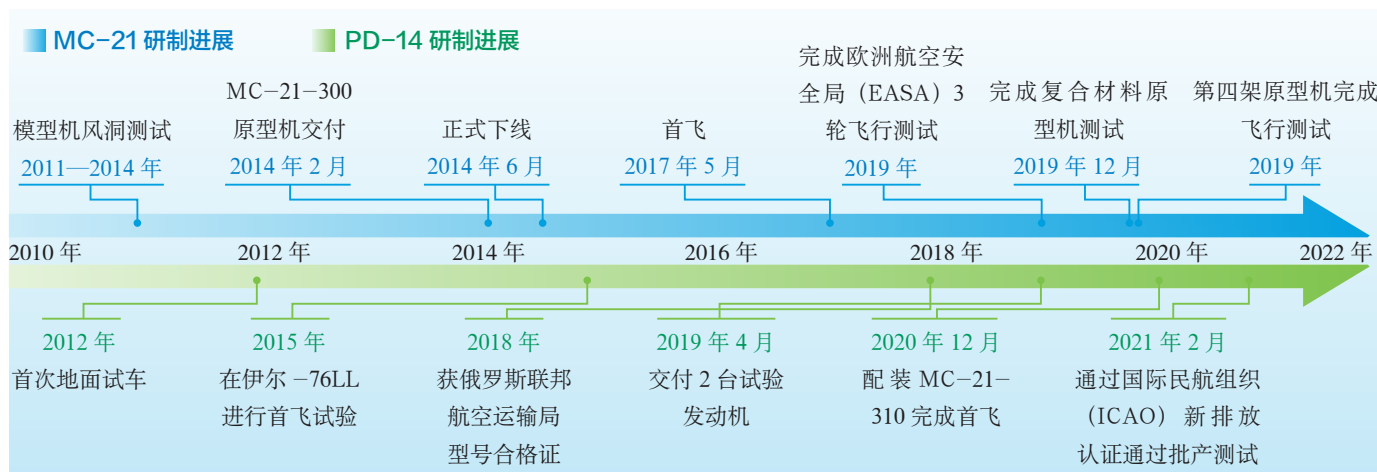
随着国际形势的变化，美国开始对俄罗斯实行制裁，使得MC-21面临随时失去动力支撑的困境，此时作为PW1400G替代产品的俄罗斯国产PD-14发动机被寄予厚望。2021年2月10日，PD-14通过批产认证成为俄罗斯民用航空工业的重要里程碑，也是近几十年来最具代表性和突破性的项目之一。

苏联解体后，俄罗斯航空发动机研发进展缓慢，与欧美国家的差距不断拉大。为重振航空大国的地位，俄罗斯民用航空工业启动了新型MC-21单通道飞机和PD-14涡扇发动机两个并驾齐驱的项目。MC-21项目于2003年赢得俄罗斯航天局竞标，2007年8月完成了第一阶段的重要研制工作，项目方案和商业计划得以确认。项目参与方几经变化，最终俄罗斯政府于2008年指定伊尔库特公司为项目主要承担者并给予资助。MC-21项目的目标不仅是取代老旧的图-154，而且要与空客公司的A320和波音公司的737开展竞争。在MC-21项目的初期，并未就是完全自主研制还

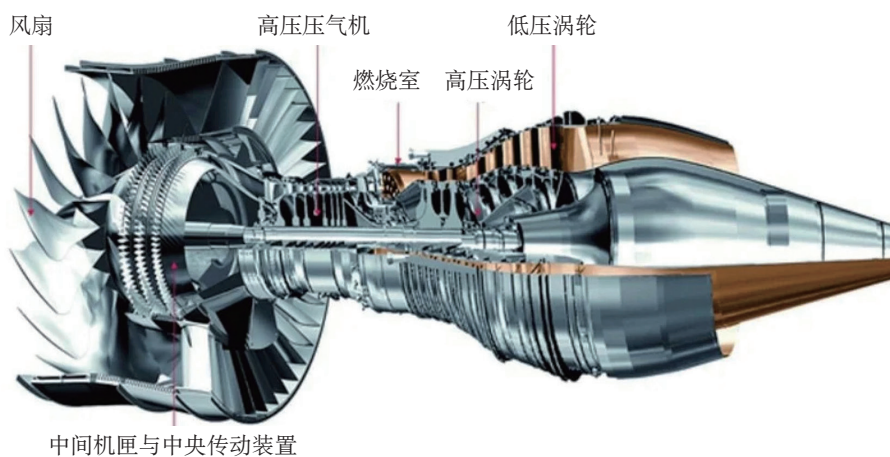


MC-21 配装 PD-14 发动机进行试飞

是利用国际合作方式进行研发达成明确的和最终的意见，因此既可以配装普惠公司的PW1400G发动机，也可以配装俄罗斯国产PD-14发动机。2014



PD-14 发动机和 MC-21 发展历程



PD-14发动机的结构

PD系列发动机主要参数对比

型号	PD-14A	PD-14	PD-14M	PD-10
起飞推力/kN	122.5	137.2	152.88	106.82
涵道比	8.6 : 1	8.5 : 1	7.2 : 1	
增压比	38 : 1	41 : 1	46 : 1	
巡航模式耗油率	比相同推力等级和用途的现代发动机低 10% ~ 15%			
风扇直径/m	1.9			1.677
适用机型	MC-21-200	MC-21-300	MC-21-400, 伊尔-214	SSJ-NG

注：给出的所有参数均未考虑进气道的损失，也未考虑飞机的引气和功率提取。

年，随着国际形势变化，美国开始对俄罗斯实施制裁，现在看来，俄罗斯突破重重难关自主研发国产发动机的做法是明智之举。

项目基本情况

普京于2008年批准了PD-14项目，这是继PS-90A以来，由俄罗斯完全自主研发的第一型符合国际规范 and 要求的民用涡扇发动机。PD-14发动机由联合发动机公司（UEC）下属的彼尔姆航空发动机公司设计，由彼尔姆马达公司制造。

PD-14发动机的基本参数

PD-14发动机结构紧凑，拥有经过验证的现代化设计、最佳涵道比和高效的核心机。发动机起飞推力约为137.2kN、增压比为41 : 1、风扇直径为1.9m、涵道比为8.5 : 1、涡轮前温度为1950K、耗油率54.08kg/(kN·h)，环保参数优于现行的排放标准。发动机采用1级风扇、3级低压压气机、8级高压压气机、2级高压涡轮和6级低压涡轮结构。

由于使用了多种创新技术和全俄航空材料研究院（VIAM）等机构开发的20多种新材料和50多种改进材料，使得发动机性能参数与同类产品相比有显著改善，工作效率大大提高，污染物排放降低，预计其运营成本将比现有同类发动机低

PD-14发动机与同类发动机参数对比列表

型号	PD-14	PW1400G-JM	LEAP-1A	LEAP-1B	LEAP-1C
适配机型	MC-21	MC-21	A320neo	737MAX	C919
起飞推力范围/kN	122.6 ~ 153.0	124.6 ~ 137.9	106.8 ~ 143.1	111.3 ~ 130.4	130.0 ~ 137.1
风扇直径/m	1.9	2.06	1.98	1.75	1.98
涵道比	8.5:1	12:1	11:1	9:1	11:1
增压比	41:1	47:1	40:1	40:1	40:1
发动机质量/kg	2870 (干质量)	2858 (干质量)	2990 ~ 3008 (含燃滑油)	2780 (干质量)	3929/3935 (干质量)
压气机/级数 (风扇+低压压气机+高压压气机)	1+3+8	1+3+8	1+3+10	1+3+10	1+3+10
涡轮/级数 (高压涡轮+低压涡轮)	2+6	2+3	2+7	2+5	2+7

PD-14 的衍生发展

类型	型号	应用	备注
客机与运输机用发动机	PD-14A	MC-21-200 客机	
	PD-14M	MC-21-400 客机	
	PD-8	安-148、SSJ-100、SSJ-75、图-334 和别-200 飞机	计划于 2023 年取证
	PD-18	伊尔-96、图-204	
	PD-10	SSJ-NG	
直升机发动机	PD-12	米-28 直升机	
	PD-12V	米-26 直升机、AVICopter AC332	计划于 2025 年完成
燃气轮机	GTU-8	燃气涡轮装置	功率 6.5 ~ 8.5 MW
	GTU-16	燃气涡轮装置	功率 12.4 ~ 16.5 MW
	PD-14GP-1/-2	天然气输送和燃气涡轮供电站	2030 年前向市场推出 200 台

14% ~ 17%，全生命周期成本则降低 15% ~ 20%。

PD-14 发动机主要参数和竞争优势表现为：较小的风扇直径可以减轻发动机的质量和降低短舱的阻力，减少推力损失；集合了先进的发动机研发技术与制造工艺；采用模块化设计和内嵌式诊断系统，全权限数字式电子控制（FADEC）系统可自动控制发动机运行中的燃油喷射、空气流量和点火参数，以最低的油耗保持最佳性能，保障实现高可靠性和可制造性，从而降低成本。

发展系列化衍生产品

为满足不同需要，PD 系列发动机在通用核心机的基础上，可以进行一系列改型，也可发展为地面燃气轮机。

项目研发特点

作为俄罗斯航空工业重整旗鼓的国家级项目，PD-14 发动机在研制过程中既吸取了航空工业几十年积累的经验与技术，也进行了

大量的技术、工艺、材料的创新，项目有以下特点。

行业内广泛协作

PD-14 发动机的研制由 UEC 领

导和组织，发动机设计由彼尔姆航空发动机公司负责，制造方为彼尔·姆马达公司。生产方面，UEC 下属各企业均发挥各自优势专长，如土星科研生产联合体、乌法发动机生产联合公司、礼炮燃气涡轮科研生产中心以及 UEC-STAR 公司。此外，还有一些俄罗斯科研院所参与其中，如金属工人-萨马拉开放式股份公司、机器制造者股份公司、沃罗涅日飞机制造股份公司、奥布宁斯克工艺科研生产企业等。

PD-14 发动机的研制和生产联合了俄罗斯发动机、冶金、材料等相关行业内最优秀的企业、科研院所和高校资源，代表了俄罗斯现今民用涡扇发动机的水平。

重视关键技术

PD-14 发动机项目不仅包括开发有国际竞争力的发动机，还包括

PD-14 发动机研制参与单位

序号	关键部件	研制单位
1	风扇叶片	彼尔姆航空发动机公司、乌法发动机生产联合公司、俄罗斯科学院材料超塑性问题研究所
2	低压压气机与分隔机匣	乌法发动机生产联合公司、土星科研生产联合体
3	前机匣	彼尔姆航空发动机公司、机器制造者股份公司
4	高压压气机	彼尔姆航空发动机公司、彼尔姆马达公司、乌法发动机生产联合公司
5	燃烧室	彼尔姆航空发动机公司、彼尔姆马达公司
6	高压涡轮	彼尔姆航空发动机公司、彼尔姆马达公司
7	低压涡轮与后轴承	彼尔姆航空发动机公司、乌法发动机生产联合公司、彼尔姆马达公司
8	喷管与尾锥	彼尔姆航空发动机公司、金属工人-萨马拉开放式股份公司
9	FADEC 和燃油附件	UEC-STAR 公司、彼尔姆航空发动机公司
10	中央传动装置和传动机匣	彼尔姆航空发动机公司、礼炮燃气涡轮科研生产中心、乌法发动机生产联合公司（铸件）
11	核心机机匣	彼尔姆航空发动机公司、彼尔姆马达公司、机器制造者股份公司

对试生产和批量生产进行技术改造，提升关键技术成熟度。在项目框架内，应用发展了16种关键技术。例如，风扇、压气机、涡轮燃烧室等主要部件设计时均采用三维气动设计方法；开发了钛合金空心宽弦风扇叶片的制造技术；高压压气机1、2、5级盘由钛合金制成，6~8级盘由新一代镍基合金制成。低污染排放燃烧室由耐热金属间化合物制成，安装了气动调节喷嘴，使用了第二代陶瓷热障涂层。高压涡轮转静子叶片由最新的单晶合金制成，同样采用第二代陶瓷热障涂层，叶盘由新一代镍基合金制成，采用主动间隙控制。低压涡轮1~6级的转静子叶片均为空心结构，采用主动间隙控制。

发动机短舱由彼尔姆航空发动机公司和VIAM联合研发，这也是俄罗斯的发动机企业与材料企业首次联合设计发动机短舱，短舱中碳纤维、玻璃纤维等新型复合材料占其总质量的65%，既保证了所需的弹性和强度，也减轻了发动机质量，还配备了电驱动栅格反推装置。

研发与应用国产新材料

PD-14发动机采用的俄罗斯国产新材料主要包括：转子叶片的单晶镍钨合金；喷管调节片的金属间化合物；高压涡轮的镍基高温合金，第二代陶瓷热障涂层；涡轮轴和吊架部件的高强度钢；高压压气机和涡轮盘的高温钛合金等。这些材料都通过了适航认证。

在材料研发过程中，VIAM、彼尔姆航空发动机公司和各冶金厂参与其中；VSMPO-AVISMA公司主要负责钛合金坯料和半成品研制；Elektrostal冶金厂、Ruspolymet公司、斯图皮诺

PD-14发动机新材料与应用部件

材料牌号	材料类型	主要研制公司	应用部件
VT25U	可变形高温钛合金	VSMPO—AVISMA	高压压气机5级盘
VV751P	高温镍合金	VILS	高压压气机6~8级盘； 高压涡轮1~2级盘
VZh175	变形高温合金	斯图皮诺冶金	高压压气机6~8级盘； 高压涡轮盘
VKNA-1VR	高温镍合金	VIAM	高压涡轮整流叶片
VZhM-4、VZhM-5	单晶高温镍合金	VIAM	高压涡轮1~2级 工作叶片
VZh172	变形等轴高温镍合金	Elektrostal、Ruspolymet	燃烧室机匣、 低压涡轮机匣
VKS-170	高强度马氏体时效钢	斯图皮诺冶金公司	低压涡轮轴、挂架
VTI4	高温变形钛合金	VSMPO—AVISMA	通风机匣、后机匣、 后轴承
γ-TiAl	高温合金	—	低压涡轮工作叶片
EP648PS	高温合金	VIAM	燃烧室头部旋流器 (增材制造)
VKU25/SYT-49C、 VKU29/VTKU-3、 VKU39/VTKU-2.200	碳纤维复合材料	VIAM	发动机短舱
VPS-48/7781	玻璃纤维复合材料	VIAM	发动机短舱

冶金公司等负责高温合金坯料与半成品研制，包括盘、轴和环件等；全俄轻合金研究所（VILS）负责粒状合金研制；阿申斯基冶金厂、兹拉托乌斯特冶金厂、乌拉尔锻造厂等负责管路、板材、带材、线材等钢与合金制坯料和半成品研制；Kamensk-Uralsky冶金厂负责铝合金坯料和半成品研制。新材料的使用使发动机质量减轻、性能提升。

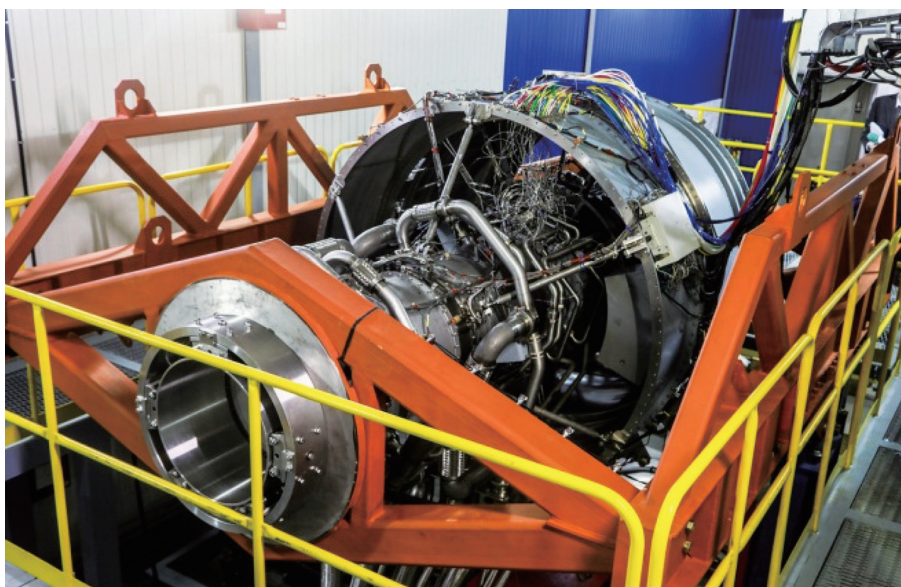
发动机短舱采用的新型碳纤维和玻璃纤维复合材料也是俄罗斯首次研发，据称，这些材料在参数上不逊于其他国家同等材料，保证了发动机短舱的性能。50种改进材

料包括VT20、VT8-1高温钛合金，VZh145、EI698、EP742、EP718、EP648高温镍合金，EP517-SH高温马氏体钢、VNL-5高温铬镍钼合金，VKS5渗碳钢等。

提升工艺与试验能力

PD-14发动机生产过程中采用了增材制造、数字化生产等先进工艺，各改型型号的零件统一规格程度达到80%。乌法发动机生产联合公司在PD-14发动机零组件生产时启用条码订单管理系统，改变了工作模式，使劳动生产率提高了15%~20%，也有利于实现质量管理体系数字化。

VIAM首次利用EP648PS镍基



传动部件和润滑系统测试设备



发动机材料和零件强度测试设备

合金以增材制造方式生产出燃烧室头部旋流器，缩短了制造周期，产品合格率达100%，并且就获取金属粉末、零件合成、加工处理等在内的全生产周期制定了全套规范文件。

在PD-14发动机项目研制过程

中，俄罗斯首次在UEC各企业和行业内先进机构（包括VIAM）建立材料与半成品性能试验理论数据库，这也为俄罗斯国产材料在欧美取证奠定了基础。

为保障各部件、核心机和全尺寸发动机的测试，UEC建造了现代

化测试设施和实验室，包括风扇和低压压气机模型测试设备、全尺寸风扇机匣防击穿测试设备、高压压气机测试设备、涡轮盘和转子测试设备、燃烧室机匣测试设备、核心机进口加压和加热测试台。尤其是建造了国内唯一能模拟海拔状况、侧倾角和俯仰角的多用途发动机传动部件和润滑系统测试设备，在发动机研制初始阶段即可确定润滑系统的工作性能。

结束语

作为高科技产品，航空发动机的研制不仅需要国家层面的政策扶持和资金投入，还需要行业内的广泛协作。PD-14发动机是俄罗斯航空发动机及相关领域通力合作的成果，研制过程虽充满波折，但挑战与机遇并存，已取得实质性突破。如果经济形势不急剧恶化，2022年MC-21-300型飞机和PD-14发动机有望进入俄罗斯市场。俄罗斯将继续按照EASA适航条例推进在欧洲的取证工作，一旦通过，PD-14发动机也可推向国际市场。此外，在PD-14发动机的研发过程中，积极开发并采用新技术、新材料和新工艺，尽管存在难度大、风险高、研发周期长的问题，但长远来看，可以提升行业技术研发与制造工艺的整体成熟度，尽快弥补俄罗斯航空发动机产品与西方国家的差距，推动航空发动机研制更上一个台阶。面对复杂多变的国际形势，只有独立掌握航空发动机技术与材料研发，才能摆脱其他国家对俄罗斯的技术掣肘。

航空动力

（邹剑峰，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机试验技术研究）