

俄罗斯未来军用运输航空系统计划下的动力发展

The Development of Aero Engine Under Russian PAK TA Program

■ 刘晓瑜 索德军 / 中国航发动动力所

俄罗斯未来军用运输航空系统 (PAK TA) 计划, 力图打造全系列运输机和配套动力, 实现老旧产品全面替换, 助推俄罗斯提升航空产业竞争力。

为了全面替换老旧运输机及动力, 推进航空产品国产化, 俄罗斯于2013年提出PAK TA计划^[1], 与未来前线航空系统 (PAK FA)、未来战略轰炸系统 (PAK DA)、未来远程截击系统 (PAK DP) 及未来舰载航空系统 (PAK KA) 共同构成俄罗斯未来军用战略航空体系。PAK TA的目标是研制从中型、重型到超重型的全系列军用运输机及配套动力, 目前已知方案有配装PD-30和PD-14发动机的伊尔-106运输机、配装PD-35发动机的“大象”运输机和翼身融合方案。

伊尔-106运输机及其动力

在PAK TA计划下, 伊留申航空综合体股份公司于2015年宣布重启因苏联解体而中止的伊尔-106项目。新的伊尔-106运输机载重在80 ~ 120t之间, 将在常规气动布局和尺寸的基础上采用现代化的技术设计, 用以替换伊尔-76运输机和安-22运输机, 如图1所示。

老版伊尔-106运输机计划配装推力为78.5 ~ 225.6kN的桨扇发动机NK-92 (后改称NK-93), 但该发动机研制也一度停滞。2011年, 俄

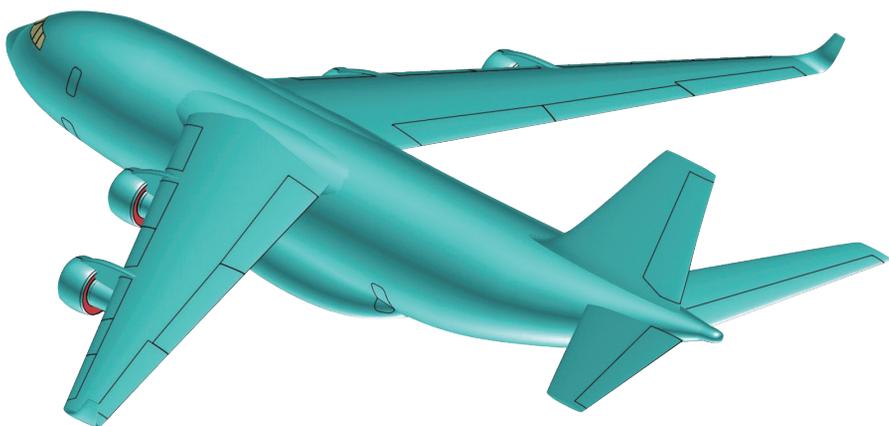


图1 伊尔-106运输机

罗斯工业与贸易部的相关批示表明, NK-93发动机已无法确保提高运输机竞争力, 继续研制是不合理的, 但不排除在未来军民用运输机动力研制中运用其技术成果。新版伊尔-106运输机计划采用4台PS-90A1作为过渡动力, 未来更换4台新一代大涵道比涡扇发动机PD-30。此外, 也有采用双发构型的设想, 即2台以PD-14核心机为基础衍生的推力为343.4 ~ 392.4kN的发动机。

PD-30 发动机

PD-30发动机是库兹涅佐夫设计局在NK-32发动机核心机基础上研制的, 沿用了NK-32发动机的三

转子结构, 如图2所示。主要特点包括: 进气道、短舱和反推装置均采用复合材料; 风扇采用带蜂窝芯的宽弦空心叶片; 低压压气机采用空心叶片, 中、高压压气机采用整体叶盘; 采用低排放燃烧室, 可有效降低污染物排放水平; 低压涡轮为3级, 中、高压涡轮采用带冠单晶叶片; 采用全权限数字式电子控制 (FADEC) 系统; 减速齿轮箱采用动压滑动轴承支承。PD-30发动机主要性能参数如表1所示。

PD-14 发动机

PD-14发动机由俄罗斯彼尔姆航空发动机公司牵头, 联合发动

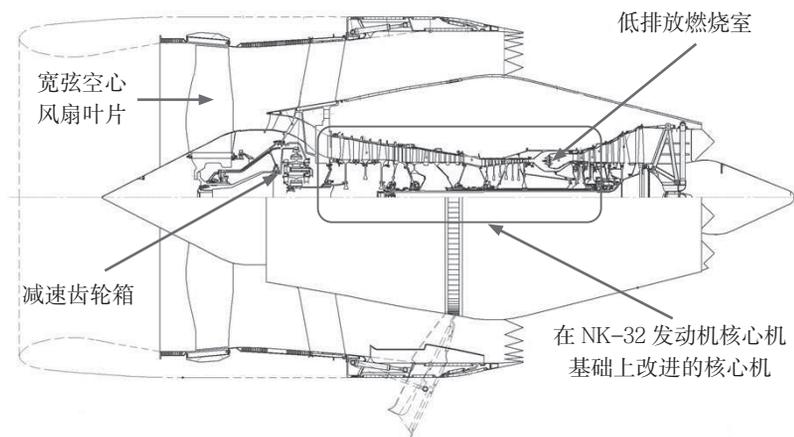


图2 PD-30发动机

机制造集团(UEC)下属的多家企业,俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)等科研院所参与研制。PD-14发动机采用双转子结构,内外涵道分开排气,其结构如图3所示。项目于2008年正式启动,2017年通过了独联体适航局的适航认证,2020年12月 配装MC-21客机成功首飞。据俄罗斯国家技术集团透露,PD-14发动机将于2024年开始批量交付。

PD-14发动机结构特征包括:短舱较短,带有栅格式电传动反推装置;短舱使用的复合材料占比高达65%^[2];风扇为单级,带有18片

合金宽弦空心叶片;低压压气机为3级;高压压气机为8级,其中1、2、5级为钛合金整体叶盘,6、7、8级叶盘采用新一代镍基粉末合金制造;采用低污染环形燃烧室,燃烧区零件采用金属间化合物制造,并采用第二代陶瓷热障涂层;高压涡轮为2级,带有高效冷却系统,工作叶片和导向叶片采用新一代单晶合金制造,叶盘采用新一代镍合金制造;低压涡轮为6级高效涡轮,转子叶片和静子叶片均为空心结构,采用了主动间隙控制技术;采用了FADEC系统。PD-14发动机的主要性能参数如表2所示。

表1 PD-30发动机主要性能参数

参数	状态		
	最大起飞	起飞	巡航
飞行高度/km			11
马赫数(Ma)			0.76
推力/kN	319.3	289.3	55.9
耗油率/(kg/(kN·h))			51
换算空气流量/(kg/s)		1138	1295
涵道比	8.6		
压气机增压比		28.7	35.4
涡轮前燃气温度/K	1604	1570	1391
风扇直径/m	2.95		
质量(无反推装置)/kg	5140		

PD-14发动机代号“PD”意为“未来发动机”,已发展了PD-14A、PD-14M、PD-10和PD-18P等改进型号,分别用于MC-21-200、MC-21-400、伊尔-214、SSJ-NG、图-214和伊尔-96-300/400等民用运输机。彼尔姆航空发动机公司以PD-14发动机为基础,规划了核心机衍生发展道路,实现装配对象推力级全覆盖,其中就包括满足伊尔-106运输机推力要求的改型。

“大象”运输机及其动力

2017年8月,俄罗斯中央空气流体动力学研究院(TsAGI)公布了“大

表2 PD-14发动机主要性能参数

参数	数值
起飞推力/kN	137.3
耗油率/(kg/(kN·h))	53.7
涵道比	8.5
总压比	41
涡轮前燃气温度/K	1950
风扇直径/m	1.9
噪声	比国际民航组织(ICAO)第四阶段标准低15~20dB
NO _x 排放	比航空环境保护委员会(CAEP)制定的CAEP/6标准低45%

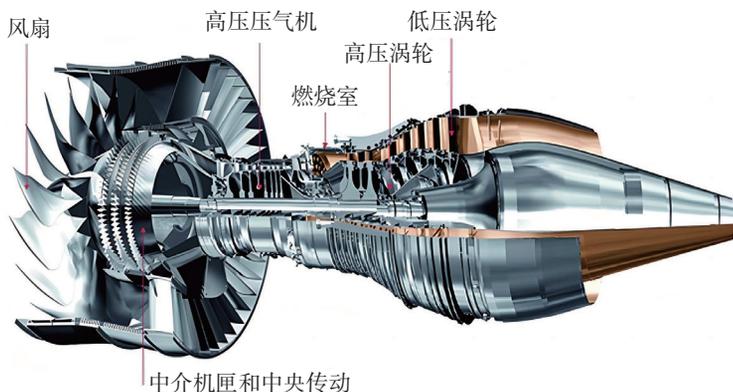


图3 PD-14发动机



图4 “大象”运输机风洞模型

“大象”运输机概念模型。该机旨在替代安-124运输机，最大有效载荷为180t^[3]。2019年11月，TsAGI对外公布了“大象”运输机的风洞模型，如图4所示。2020年3月，“大象”运输机模型在TsAGI的T-106风洞完成第一阶段空气动力学试验，试验结果符合最初的计算结果。

“大象”运输机计划配装4台大涵道比涡扇发动机PD-35，如图5所示。2016年，彼尔姆航空发动机公司和土星科研生产联合体共同开启PD-35发动机项目，计划研制周期为10年，总投资额达1800亿卢布。原计划于2024年开始台架

试验，2025年开始进行飞行试验，2028年开始批量生产。但2022年12月，彼尔姆航空发动机公司迫于西方制裁的压力，宣布将PD-35发动机研制周期推迟2年。2023年10月，PD-35发动机成功完成首次核心机试验，评估了1500多个参数（包括压力、温度、燃油和滑油流量、应力、振动等），试验结果超出预期。

PD-35发动机采用层流短舱、1级宽弦风扇、3级低压压气机、9级高压压气机、低排放环形燃烧室、2级高压涡轮、6级低压涡轮、内外涵道分开排气的喷管和FADEC系统。其中，直径为3.1m^[4]的风扇叶片由

全俄航空材料研究院（VIAM）研制的复合材料和土星科研生产联合体开发的三维编织技术制成，可减轻风扇叶片整体质量的20%~30%，这是俄罗斯航空工业历史中首次采用复合材料风扇叶片^[5]，风扇机匣也采用了复合材料；高压压气机压比为23，正在研究高压压气机进口导向叶片电力驱动，并提出了两种方案，一是通过旋转运动实现，二是通过平移运动实现，电力驱动主要用于可调叶片的机械定位，使发动机在起动、稳定和过渡状态下能够实现快速动作；高压涡轮采用碳化硅-碳化硅（SiC-SiC）和碳-碳化硅（C-SiC）两种陶瓷基复合材料制造，提高了耐热能力。此外，发动机研制过程中还采用了增材制造、旋转摩擦焊和复杂异形铸造等先进制造工艺。PD-35发动机的主要性能参数如表3所示。

埃尔玛克翼身融合方案及其动力

俄罗斯公开报道中给出的未来翼身融合方案概念图标注的是伊尔-106/



图5 PD-35发动机

表3 PD-35发动机主要性能参数

参数	数值
起飞推力/kN	343
涵道比	11
总压比	53
风扇直径/m	3.1
耗油率	比同等推力等级和用途的现代发动机低2%~5%
噪声	比ICAO第四阶段标准低17%~20%
NO _x 排放	比CAEP制定的CAEP/6标准低50%~60%



图6 埃尔马克运输机

埃尔马克运输机^[6]，如图6所示。然而从已知信息看，重启的伊尔-106仍然采用常规布局，并非翼身融合方案。可见，PAK TA并非只有1种运输机，根据已公开的有限信息可以推测，俄罗斯将苏联时期中断的伊尔-106项目重新提上日程，前期将推出常规布局的运输机，随后将研发埃尔马克运输机。

俄罗斯军方提出的性能要求包括可在土质跑道起降、设计简洁以及可作多用途，巡航速度为900km/h，可将80t以上的载荷运送到4500km之外。另外，俄罗斯未来还计划在翼身融合方案基础上进一步发展，最终实现超声速飞行，速度最高达2000km/h，飞行距离可达7000km，并且能够将200t载荷的人员与装备在7h内准确投送至全球任何地方，超声速设计还未正式公布。

在动力选择上，埃尔马克运输机在机体背部靠近V形尾翼处安装1台背负式兼具发电功能的大涵道比涡扇发动机，所产生的电力储存在进气道前方机体背部空间内的能量储存系统中。由该系统将电力分配到机翼根部2个巨大空腔内的2台电

力驱动风扇，所产生的高速气流通过机翼后缘的锯齿状喷管流出，产生推力。机翼后缘还可以通过偏转产生推力矢量^[7]。机体上方的背负式进气道与内置两肋风扇均能有效地防止地面雷达探测，减少雷达截面积（RCS）。再结合专业的作战装置和机载设备，可以帮助飞行员在敌方防空系统近前进行作战行动，实现整体隐身。

PAK TA的翼身融合布局方案及发动机的研究尚处于探索阶段，或将代表俄罗斯未来运输机发展的方向。

动力发展特点

PAK TA计划下各型运输机的动力装置在延续苏联时期技术特点的同时，进行了技术创新，将常规布局与新概念并行研究，通过有效的军民融合，实现产品系列化发展。

“常规加创新”模式发展

运输机动力历经了活塞、涡桨、中小涵道比以及大涵道比涡扇发动机。大涵道比涡扇发动机自20世纪70年代诞生后，逐渐成为军用运输机，尤其是重型运输机的主流选择。目前在研的下一代运输机动力多数

为大涵道比涡扇发动机，如图7所示。从短期和中期来讲，俄罗斯重型运输机动力仍将以常规的大涵道比涡扇发动机为主。然而，大涵道比发动机也存在一定局限性。通过增大涵道比，提高燃气温度，提高增压比和采用新材料等来改进大涵道比涡扇发动机也存在极限。未来除了改善发动机本身，也要协同飞机提高整体的经济性，如采用多电概念、分布式推进等。也就是说，采用非常规动力是必然趋势。

成体系发展

PAK TA计划下研制的运输机覆盖了从中型、重型到超重型运输机体系。在运输机动力层面，正在开展各推力级动力的研制。除了推力级为289.3~319.3 kN的PD-30发动机，以PD-14核心机为基础进行全系列衍生发展，PD-35发动机未来改型机推力有望达到490.5 kN。PAK TA计划下可形成完整体系的运输机动力，全面保障俄罗斯未来运输机国产化。

军民融合发展

大型军民用运输机和动力之间的共通性很高，军民融合的理念一直贯穿着俄罗斯运输机及动力的发展历程。像伊尔-76、安-124等军用运输机也在民用运输市场上运用，且多型军用运输机动力都是在民用动力基础上改型而来。在下一代运输机动力发展中，同样注重军民技术协调发展。

2022年俄乌冲突爆发以来，西方逐渐加大对俄罗斯制裁力度，波音公司和空客公司已停止向俄罗斯航空公司提供支持服务。在此形势下，俄罗斯决定推迟PD-35发动机研制，全力支持MC-21、SSJ-100的配套动力PD-14和PD-8发动机研

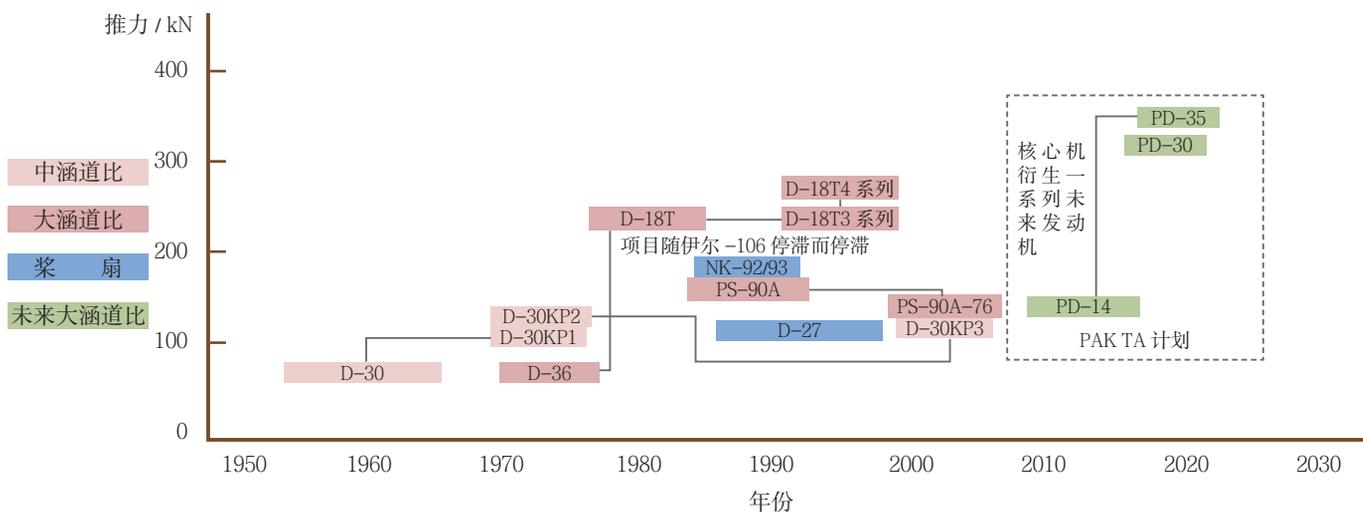


图7 苏联/俄罗斯军用运输机动力发展

制。做出这两项决定主要是出于以下考虑：首先，在西方制裁下，俄罗斯民用航空进口替代更加紧迫；其次，PAK TA计划尚处于预研阶段，PD-35短期市场需求不明确，不能立刻产生经济效益；最后，加快推进PD-14发动机成熟可为PD-35发动机奠定技术基础，也可为之带来资金支持。

总之，面对新形势，俄罗斯从国家层面积极布局，从资金支持、市场开拓等角度大力扶持民用航空产品，以加快实现进口替代，促进军民运输机及动力的技术转换和融合，推动军民协同化和体系化发展，实现军民运输机和动力的全面国产化。军民运输机的结合也应成为未来运输机发展要考虑的问题。

结束语

俄罗斯在PAK TA计划下以研究常规布局运输机方案和大涵道比涡扇发动机为主，同时又面向未来，进行非常规翼身融合方案及电推进技术探索。俄乌冲突和西方制裁一方面更加明确了俄罗斯对下一代重型

军用运输机的需求；另一方面也给PAK TA计划带来了一定阻力。迫于西方制裁压力和国内经济形势，俄罗斯延迟PD-35项目也是无奈之举，这也在客观上加速了俄罗斯民用航空产品的进口替代。通过有效的军民技术转换融合，成熟的民用航空产品也可以为下一代重型运输机及动力的发展提供技术和资金支持。发展下一代重型运输机和配套动力不仅是为了满足俄罗斯当前需求，也有助于俄罗斯全面提升航空产业能力，以加快实现航空产品国产化进程，摆脱对外依赖。

（刘晓瑜，中国航发动机所，工程师，主要从事航空情报工作）

参考文献

[1] Тяжёлый транспортник ПАК ТА станет заменой Ан-124[EB/OL]. (2021-02-66) [2023-5-14].<https://dzen.ru/a/YCoatgRU9hRqfyv7>.

[2] ПД-14 – инновационный российский двигатель[EB/OL]. (2021-07-16) [2023-10-08]. <https://naukatehnika.com/pd-14->

innovacionnyij-rossijskij-dvigatel.html.

[3] КРУТОВ АА, Пигусов ЕА, Черновских Ю.Н. Концептуальное проектирование тяжёлого транспортного самолёта нового поколения[J].Труды МАИ,2018,99.

[4] ОДК провела презентацию двигателя ПД-35[EB/OL].(2022-10-27) [2023-10-08]. <https://aviation21.ru/odk-provela-prezentaciyu-dvigatelya-pd-35/>.

[5] Перспективный Двигатель ПД-35. Новый испытательный комплекс, технологии, планы[EB/OL]. (2022-05-25) [2023-10-08]. <https://naukatehnika.com/plany-superdvigatelya-pd-35.html>.

[6] Успеём или нет завершить проект Ермак до 2024 года?[EB/OL]. [2023-10-08].<https://aviarf.ru/uspeem-ili-net-zavershit-proekt-ermak-do-2024/>.

[7] 施维. 俄未来重型军用运输机系统 PAK TA 项目研究 [J]. 飞机设计参考资料, 2019(4):9.