

军用运输机发展及动力选型

Development of Military Transport Aircraft and Powerplant Selection

张丹玲 唐宇峰 丁宁 索德军 / 中国航发动机所

军用运输机的巡航速度一般是陆上最快运输方式高铁速度的2~3倍，是海上运输速度的20倍以上，航程能达数千甚至上万千米，经空中加油后还可实施全球到达。现代战争的快节奏、远距离、大机动，使得运输机的作用更加明显。

军用运输机是一种军用支援保障类飞机，主要承担实施兵力机动和后勤支援任务，可以快速将部队及其装备部署转移到目标区域，并为部署在前沿或前线作战的部队提供人员、装备和其他物资。按照任务性质和能力的不同，军用运输机一般分为战略运输机和战术运输机两大类。战略运输机主要承担远距离、大量人员、大中型装备的运输任务，有的还承担大规模空降任务。战术运输机多在战区附近及战区以内承担近距离运输任务，一般为中小型飞机，短距起降性好，对机场条件要求低。按最大起飞质量和有效载荷，运输机又可分为大、中、轻型3个类别。起飞质量大于150t，有效载荷大于36t的通常为大型运输机，最大起飞质量小于40t、有效载荷小于9t的为轻型运输机，介于中间的为中型运输机。最大起飞质量超过350t，载荷超过100t的，为重型运输机（具



图1 C-130运输机及其最新动力AE2100D3发动机

体分类见表1)。

军用运输机及其动力发展历程

最早的军用运输机是在民用运输机的基础上发展起来的。美国自1938年开始将民航客机DC-3改装为C-47A军用运输机。当时，世界上著名的军用运输机还有德国的容克斯52和苏

联的AHT-9等。但这些机型基本上都是从民用客机或轰炸机改装而来。

20世纪40年代，世界上最早广泛使用的全金属结构运输机是美国道格拉斯飞行器公司研发的C-47“空中火车”运输机，配装2台普惠公司的R-1830-90C活塞式发动机，起飞质量为11t，为轻型战术运输机，是第二次世界大战中的主要军用运输机。

20世纪40—50年代，美军装备了起飞质量33.5t的C-54“空中霸王”运输机，采用的是4台普惠公司的R-2000-7活塞式发动机。随着发动机技术的变革，洛克希德-马丁（洛马）公司在20世纪50年代研制了

表1 军用运输机分类

按用途分类	按质量分类	最大起飞质量/t	有效载重/t	航程/km
战略运输机	大型运输机	>150	>36	5000 ~ 12000
战术运输机	中型运输机	40 ~ 150	9 ~ 36	<5000
	轻型运输机	<40	<9	<3000



图2 安-124运输机及其动力D-18T-3发动机

C-130“大力神”中型多用途战术运输机，运载能力达到18t，起飞质量大约70t，其动力采用了涡桨发动机，代替当时使用活塞式发动机的中程运输机，提高了飞机的载荷、延长了飞机使用寿命。

20世纪60年代，中小涵道比涡扇发动机得到广泛应用。美国空军根据作战需求，提出一种专用的中型战术运输机C-141“运输星”，最大起飞质量129t，采用4台TF33-P-7中涵道比涡扇发动机，单台推力93.42kN。1962年，苏联开展了大型战略运输机安-22的研制，是世界上最大的配装涡桨发动机的飞机，最大起飞质量250t，配装4台HK-12MA涡桨发动机，单台功率11185kW。

20世纪70年代，苏联的伊尔-76大型战略运输机交付使用，作为军事空运主力机型，配装4台D-30KP II涡扇发动机，起飞质量为170t，作为军事空运主力机型，弥补了苏联军事空运能力的不足。之后经过多年的发展，形成了伊尔-76T、伊尔-76M、伊尔-76TD T、伊尔-76MD M、伊

尔-76MF等衍生型。其中，伊尔-76-MF起飞质量210t，配装4台PS-90AN大涵道比涡扇发动机，总载荷40t时的航程达到5200km。苏联还相继研制了安-124和安-225大型战略运输机，分别配装4台和6台D-18T三转子大涵道比涡扇发动机，地面起飞推力为229.77kN，风扇直径2.33m。

D-18T发动机于1977年基于缩小版的D-36三转子技术验证机开始研制，20世纪90年代为了延长发动机寿命和可靠性，衍生出D-18T-3系列发动机，寿命现已提高到50000h。

美国同期的典型机型为C-5大型战略运输机，起飞质量380t，配装4台TF39-GE-1C大涵道比涡扇发动机，后发展了衍生型C-5A/B/C。其中，C-5M“超级银河”是C-5原型的现代化改型（得益于2001年启动的航电系统现代化和可靠性增强改进计划），配装4台F138-GE-100大涵道比涡扇发动机。其中，F138-GE-100是CF6-80C2L1F的军用型号，是CF6-80C2的衍生型，起飞推力222.4kN，通过可靠性增长计划，保证C-5飞机可以使用到2040年。按照起飞质量划分，安-124、安-225和C-5飞机被称为大型军用运输机。

20世纪80年代中期，苏联开始研制安-70飞机，起飞质量145t，配



图3 C-5运输机及其动力F138-GE-100发动机

表2 典型的运输机及发动机情况

飞机	运输机型号	起飞质量/t	发动机	发动机类型	单台起飞推力(或功率)
战术运输机	C-47	11	R-1830-90C (×2)	活塞式	-
	C-27J	31.8	AE2100D2 (×2)	涡桨	3458kW
	C-54	33.5	R-2000-7 (×4)	活塞式	4028kW
	C-37A	38.6	BR710-A1-10 (×2)	涡扇	65.63kN
	C-124	89	R-4360-20WA (×4)	活塞式	2800kW
	C-141	129	TF33-P-7 (×4)	涡扇	93.4kN
	C-135ER	134.7	F108-CF-100 (CFM56-2B1) (×4)	涡扇	97.9kN
	A400M	136.5	TP400-D6 (×4)	涡桨	8203kW
战略运输机	伊尔76-MF	210	PS-90A (×4)	涡扇	156.9kN
	安-22	250	HK-12MA (×4)	涡桨	11185kW
	C-17	265	F117-PW-100	涡扇	185.5kN
	C-5	378	TF39-GE-1 (×4)	涡扇	182.8kN
	C-5M	380	F138-GE-100 (×4)	涡扇	222.4kN
	安-124	402	D-18T (×4)	涡扇	229.8kN
	安-124-100M	402	D-18T-3 (×4)	涡扇	229.8kN
	安-225	600	D-18T (×6)	涡扇	229.8kN

装4台D-27桨扇发动机。鉴于桨扇发动机介于涡桨发动机和涡扇发动机之间的特点，安-70飞机以最大巡航速度飞行时，其耗油率比使用传统涡扇发动机的运输机要低20%~30%，而最大飞行速度达到800km/h，高于配装涡桨发动机的运输机。

美国麦道公司研制的C-17“环球霸王III”是同期产品，最大起飞质量265.5t，最大载荷超过70t，空载航程8700km，满载航程4630km，于1993年开始服役，是C-124“环球霸王II”的升级产品，全面覆盖C-5的运输范围。C-17配装4台F117-PW-100大涵道比涡扇发动机，该发动机是波音757使用的PW2040发动机的军用型，推力为185.5kN，

除了反推力装置，F117-PW-100与PW2040基本相同。此时，中型战术运输机和大型战略运输机已形成系

列化发展和装备成熟的局面。

从20世纪90年代至今，欧盟于1993年开始启动研制新一代战术运输机A400M，飞机空重55t，起飞质量110t以上，最大商载32t，载重航程5037km，巡航速度 $Ma0.68 \sim 0.72$ ，与现有的运输机相比，其主要优势在于速度快、能耗低。配装欧洲螺旋桨公司的4台TP400涡桨发动机（2011年取证），其安装功率达到7979kW，是目前在役最大的配装涡桨发动机的运输机。

我国在20世纪50年代发展了运-5小型运输机，其动力活塞5发动机仿制苏联AI-62NP型发动机。60—70年代，由于对航空军事运输的重要性有了更深刻理解，我国先后研制了运-7H和运-8军用运输机，动力装置分别采用涡桨5和涡桨6发动机。其中，运-8运输机是20世纪70年代以苏联安-12运输机为基础研制的中型运输机，最多能搭载20t的物资，一次最多能搭载96名全副武装的士兵，航程超过6000km。运-8在后续的发展历程中，衍生出了远距离支援干扰机、电子侦察机、反



图4 C-17运输机及其动力PW2040发动机



图5 PAK TA概念图

潜巡逻机、技术侦察机等。进入21世纪，国产自主研发的首款大型运输机运20飞机以及配装的自行研制的大涵道比涡扇发动机已实现首飞；国内首个第三代先进涡桨发动机正在研制，用于配装运9飞机及其为平台发展的升级改进型。

大型运输机及动力发展最新进展

随着发动机技术的迅猛发展，运输机配装的动力装置按照活塞式发动机—涡桨发动机—中小涵道比涡扇—大涵道比涡扇的历程发展，形成了军用运输机动力装置的谱系。现阶段，美俄在军用运输机方面形成了较为完整的轻型—中型—大型—超大型的运输机谱系。在此基础上，两国针对现代和未来战争对军用运输能力的需求，展开了积极探索。

进入21世纪，俄罗斯推出了多项新装备研制计划，其中包括“运输航空兵未来航空系统”（PAK TA）研究计划。根据2015年披露的信息，PAK TA将以2000km/h速度进行超声速飞行，有效载荷高达200t，主要任务是运送阿玛塔坦克、火炮、导弹系统等重型军事武器，飞行距

离超过7000km，增强俄罗斯的战略运输能力。由于PAK TA速度快、航程大，这意味着可以在7h内，把装甲部队部署到世界上的任何地方。该项目还公布了一款亚声速设计方案，其巡航速度为900km/h，有效载荷为90t，航程为4500km。这款PAK TA概念采用了1台大涵道比涡扇发动机，布置在机身背部靠近V形尾翼的地方。该发动机兼具发电功能，所产生的电力储存在储能系统中，用于驱动两台电力风扇和为机载设备提供电力，它们运转时产生的高速气流通过机翼后缘的锯齿状

喷管流出，形成推力，机翼后缘还可以通过偏转产生矢量推力，从而可以提高短距起降能力。2020年8月，PAK TA计划公布了进展情况，俄罗斯伊留申航空联合体股份公司正领衔实施一款全新大型军用运输机的初步设计工作，计划在2021年开始下一阶段的试验设计工作。该型运输机将配备4台涡扇发动机，单台推力为196~245kW，正在研制中的PD-35发动机被视为候选发动机之一。

为了满足美国空军面向未来的需求，美国洛马公司提出了混合翼身融合体（HWB）运输机概念，并在美国空军研究实验室（AFRL）所资助的“低油耗高效新型布局”（RCEE）项目中，进一步研究和细化了这一概念，使其在保留低油耗高效率特点的同时，在设计和制造方面满足经济性，且能够承担美国空军当前所有的运输任务。最终确定的技术要求包括：HWB运输机在标准海平面条件起飞滑跑距离要小于2000m；在携带100t货物时航程为6000km；特大尺寸货物运输能力



图6 洛马公司混合翼身布局隐身运输机概念图

不低于C-5；具备运输设备、集装箱和伞兵的能力；可以快速装卸货物。另外，HWB飞机在设计时要考虑短距起降性能，但不做专门要求。

在方案设计中，洛马公司选取了3种备选的发动机，包括GE航空集团已研制成功的GENx以及正在研制的开式转子发动机，还有到2030年开始服役的罗罗“超扇”(UltraFan)发动机。针对这3型发动机，洛马公司开展了发动机与机体的一体化设计研究工作，并评估了采用每种发动机的综合性能收益。通过研究发现，与当前战略运输机的发动机相比，GENx、超扇和开式转子发动机的单位耗油率分别可降低25%、30%和35%。考虑到发动机尺寸巨大，特别是GE航空集团的开式转子发动机，其转子直径达到6.4m，因翼下高度不够而无法采用翼下吊装，因此HWB飞机采用发动机翼上后缘布置的形式。与常规的翼下吊装相比，这种形式能将气动效率提高5%，并在抵抗外物损伤(FOD)、噪声、发动机维护等方面获得益处。

运输机动力装置选型分析

轻型战术运输机动力装置

轻型运输机主要在战区附近承担近距离运输兵员及物资任务，可执行通信联络、伞降训练等任务，要求反应速度快、适应能力强，具备短距起降能力。针对上述需求，对现有发动机进行选型分析，可以得到以下结论：一是活塞式发动机是运输机最早采用的动力，其结构简单，在输出功率要求不高的情况下具有较高的效率，航程较短，功重比不高，现已逐步退出历史舞台；二是涡扇发动机体积小，推力大，

具有高速、高空性能好的特点，但是耗油率较高，结构较为复杂，设计难度较大；三是涡桨发动机低速效率要高于同等推力级涡扇发动机，低空性能好，起飞距离短，受到螺旋桨效率的影响，巡航速度略低。

中型战术运输机动力装置

中型运输机主要在战区附近承担近距离运输兵员及物资任务。要求反应速度快、机场适应能力强，具备短距起降能力。通过选型分析，可以得到以下结论。

一是涡桨发动机通常用于起飞质量不超过90t，载重30t以下的中型运输机，飞行速度一般为500~600km/h，螺旋桨特性(含滑流增升、反桨、倒车)和机翼构型决定了其良好的地面起飞/着陆性能，可以大幅度缩短起飞/着陆距离，对跑道要求低，战场环境适应能力强。涡桨发动机的推进效率高于涡喷/涡扇发动机，耗油率低，低空、低速性能好。

二是中、大涵道比涡扇发动机能满足飞机长航时、长距离、大载重的运输任务，飞行速度一般为700~900km/h，飞行升限高可达11000m以上，高空性能和高速巡航能力优于涡桨发动机，噪声较低，飞行稳定性较好，风扇叶片飞出时，机匣具有包容性，安全性较高。

三是桨扇发动机兼顾涡扇发动机和涡桨发动机的特点，巡航速度和高度比同等功率级的涡桨发动机高、耗油率优于同等推力级的涡扇发动机，由于技术水平有限，桨扇发动机舒适性和安全性较差，目前采用桨扇发动机的军用运输机只有安-70飞机。

大型战略运输机动力装置

战略运输机主要承担远距离、

大量兵员和大型武器装备运输任务，要求战略空运能力、更高的巡航速度，并具备短距起降能力，是现在和未来重点发展方向。其动力具备大推力、长寿命、高可靠性、高安全性、低油耗、低噪声、低污染排放等特点。综上，对现有发动机类型进行分析，可得到以下结论。

一是大涵道比涡扇发动机具有大推力、长航时、长寿命的特点，随着技术进步，发动机可靠性大幅提升、耗油率逐渐降低，先进大涵道比涡扇发动机耗油率能够达到0.052kg/(N·h)以下，推力范围基本覆盖了107.9~343.2kN，满足大型战略运输机载重大、巡航速度大、远距离执行任务等需求，并且提高了飞机舒适性和安全性。

二是世界范围内采用涡桨发动机作为战略运输机动力的只有安-22，由于历史原因，20世纪60年代的苏联涡桨发动机技术较为成熟，因此安-22选用了涡桨发动机，但是由于飞行速度低，载货量少，目前已被淘汰。

结束语

现代战争要求在最短时间内将人员、装备、物资直接运送至前线，这必然对运输机的装载航程和巡航速度提出更高要求，以进一步提高作战运输效能，同时具备良好的短距起降能力和野战机场适应性。未来军用运输机发动机将向着飞机与发动机高度一体化设计、兼顾隐身、耗油率更低等方向发展。 **航空动力**

(张丹玲，中国航发动力所，高级工程师，主要从事大涵道比涡扇发动机总体设计)