

# 战略轰炸机的动力装置需求分析

## Requirement Analysis of Powerplants for Strategic Bombers

■ 党举红/航空工业一飞院

目前，美国、俄罗斯两国的新型战略轰炸机已经进入到型号研制阶段。在动力装置的选择上，两国既有相同的侧重点，也有结合自身情况的特殊考量。对上述情况进行探究，可为我国的战略轰炸机的动力选择提供一定的参考价值。

美国的新型战略轰炸机项目可追溯到1999年，项目名称从最初的B-3轰炸机到2018轰炸机、新一代轰炸机(NGB)、远程打击轰炸机(LRS-B)，直至2015年10月被正式命名为B-21飞机(如图1所示)。

B-21飞机的基本要求是远程、高生存力，能够突破未来的“反介入/区域拒止”(A2/AD)环境并在其中作战。该机核常兼备，能够被美国空军在未来的高端威胁环境中使用，并赋予美国空军从本土起飞、向全球任何地区投送空中打击的能力和灵活性。截至目前，美国空军未披露B-21飞机的详细技术指标，但明确提出了三项基本设计要求：一是可兼容现有机载武器，包括核武器；二是大航程；三是单机价格限制在5.5亿美元以内(2010年币值，基于100架的采购数量，未摊销研制费)。

同样，出于国家安全考虑，俄罗斯也启动了新一代战略轰炸机“远程航空兵未来航空综合体”(PAK-DA，如图2所示)的研制工作。2013年4月，正式披露了批准的方案设计和战技指标，2015年5月转入工程研制，预计2025—2026年飞机首飞。



图1 尚未揭开面纱的美国下一代战略轰炸机

俄罗斯新型战略轰炸机强调的是单机隐身突防、超远航程和核常兼备的打击能力。

对比美、俄战略轰炸机，其主要技术特征几乎一致：首先，在航程方面，俄罗斯提出了超远航程，美国B-21飞机要求大航程，从B-21飞机的推测技术数据看，最大起飞重量减小，飞机最大载弹量也同步减小，然而飞机的载油量并未同步缩小，从一个侧面印证了“大航程”要求；其次，两种飞机均要求核常兼备，这是大国军事存在的基本要求；第三，都要求高隐身，尤其俄罗斯

还特别强调单机隐身突防，这说明俄罗斯在隐身方面的要求更为迫切。区别之处在于，PAK-DA飞机最大起飞重量达180 t，而B-21飞机的最大起飞重量据推测只有80 t，属中型飞机；另外，美国特别提出了生产成本要求，这符合美国人一贯强调经济可承受性的特点。

### 美俄新型战略轰炸机的动力选择

#### B-21飞机的动力选择

自从B-21飞机项目启动以来，官方披露的消息较少，初步消息是选

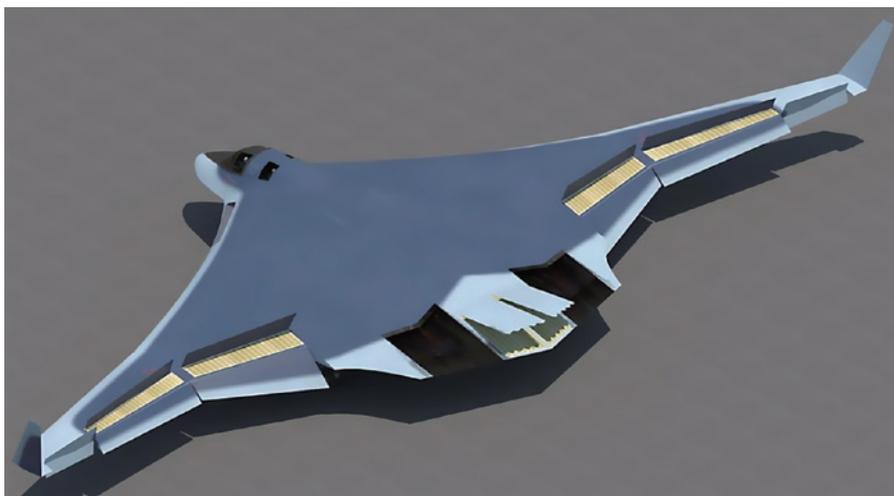


图2 PAK-DA轰炸机虚拟图

择了普惠公司的发动机作为动力。据此，外界普遍认为，B-21飞机采用F135发动机（如图3所示）改进型的可能较大。作此猜测的理由如下：B-21飞机最大起飞重量较小，采用两台F135推力级的发动机，按中间推力算，飞机推重比为0.313，可以满足要求，不像B-2飞机必须采用4台发动机；F135是F-35飞机的动力装置，2006年首飞，目前已经成熟，该型发动机推力大、推重比大、耗油率低，符合轰炸机一般不新研发动机、重视成本控制的惯例；在F135的“系

统家族”中曾有F135-PW-100发动机的技术方案。

当然，B-21飞机也可能采用自适应发动机。美国空军研究实验室（AFRL）预计，自适应通用发动机技术（ADVENT）计划和自适应发动机技术开发（AETD）计划研究的“可变循环推进系统”可以使耗油率下降25%以上，普惠的PW9000耗油率甚至可以降低30%，使飞机的作战半径增加25%~30%，续航时间延长30%~40%，从而可以较好地满足B-21飞机大航程的要求。

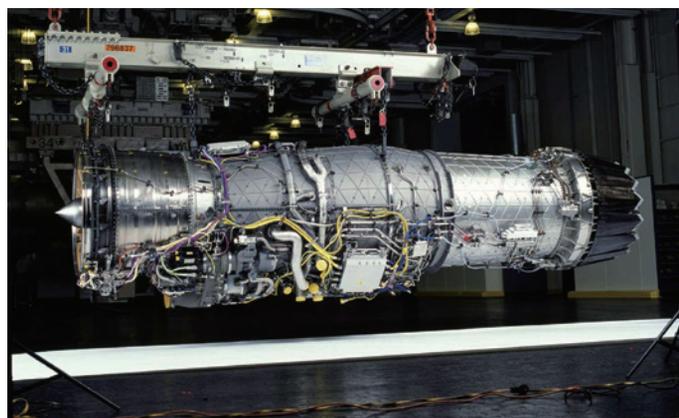


图3 F135发动机



图4 NK-32发动机

### PAK-DA飞机的动力选择

目前，俄罗斯的航空发动机新型号比较少，尤其是近年，经济持续低迷对发动机研制造成较大困难，因此PAK-DA飞机的发动机只能采用NK-32发动机（如图4所示）的改进型。

NK-32发动机是图-160远程战略轰炸机、图-144重型超声速客机和图-22M中程超声速战略轰炸机的动力，由库兹涅佐夫发动机试验设计局于1977年研制。该发动机为三转子涡扇发动机，是当时世界上推力最大的涡扇发动机，也是世界上首批采用了雷达和红外隐身技术的涡扇发动机之一。

NK-32发动机将在生产型的基础上分批次改进：第一阶段是满足现役图-160轰炸机首批改进型图-160M1；第二阶段是满足图-160轰炸机的深度改进型图-160M2；第三阶段是配装未来新一代轰炸机PAK-DA。2017年12月，俄罗斯联邦国防和安全委员会主席维克托·邦达列夫表示，PAK-DA轰炸机原型机设计已经接近完成，由于决定恢复生产图-160M2战略轰炸机，新型轰炸

机PAK-DA的研发工作只能推迟，PAK-DA试验可能在2023—2024年开始。

作为比较，表1给出了世界主要轰炸机的技术参数，表2给出了几型先进发动机的技术参数。

## 战略轰炸机的动力装置需求分析

和其他军用飞机发动机相比，战略轰炸机的发动机除强调推重比大、可靠性高之外，更重视低耗油率，更小的耗油率是大航程的保证；其次，考虑飞机隐身要求，发动机需

要内装，发动机的几何尺寸要求更小；第三，也由于隐身要求，发动机噪声要小，抗电磁干扰能力要强，红外信号特征要弱；第四，考虑到飞翼飞机无垂尾，其操纵难度更大，对发动机的推力矢量和推力转向要求更高，这在提高飞机操纵性的同时，也可以提高飞机生存力；第五，现代飞机强调低成本，发动机从生产到使用维修成本要更低。

### 大推重比和高可靠性

对于飞机设计而言，载重量永远是不够的。所有飞机，从民用到军用，整个设计过程贯穿的一个主

题就是减重。军用飞机系统中，仅发动机系统就占到飞机使用空重的12.81%~26.13%，同样推力级的发动机，推重比从6增加到8，意味着发动机的质量减轻25%，自重小、推重比大的发动机就能实现飞机性能上的突破，也可以给其他机载系统留出更多的质量空间。相比推重比，发动机可靠性的要求更强烈一些。一型可靠性高的发动机是飞机型号成功的保证。可靠性不仅仅是一些指标，它的内涵更加表现在以下方面：一是发动机要在各种恶劣工况下长时间稳定可靠地工作；二是发动机要尽可能地减少维修工作量，寿命及定检间隔要更长一些；三是发动机系统使用的元器件可靠性筛选要更严一些，因小部件失效引起的发动机故障就会降低很多。先进发动机的可靠性非常高，除技术因素外，还得益于整体结构件的采用和零部件数量的大幅减少。例如，F119发动机的零部件数量比F100-PW220发动机大约减少了40%，F119发动机的平均维修间隔(EFH)比F100-PW220发动机提高了62%，而F100-PW220发动机的EFH已经达到了147h。目前，国产发动机的可靠性和寿命是一个难点，还有很大的提升空间，采用整体结构件、减少零部件数量是一个途径。

### 低耗油率

低耗油率发动机对飞机航程和作战半径的提高是明显的。例如，轰6飞机更换发动机后，耗油率由0.952 kg/(daN·h)降至0.7 kg/(daN·h)，降幅达26.5%，飞机的航程大幅度提升。尽管现在可以空中加油来增加飞机的航程和作战半径，但战略轰炸机的任务性质决定了飞机本身需要较

表1 世界主要战略轰炸机的主要技术参数

项目	轰-6	图-160	B-2飞机	B-21飞机	PAK-DA
最大起飞重量/t	75.8	275	181	80	180
最大载弹量/t	9	40	22.6	9.1	30
最大航程/km	6000	12300	18520		12500
作战半径/km		7300	6400	4600	5000
最大飞行马赫数(Ma)	0.75	2.1	0.95	亚声速	亚声速
发动机型号	D-30	NK-32	F118-GE-100	F135改进	NK-32改进
发动机类型	不加力涡扇	加力涡扇	不加力涡扇	不加力涡扇	不加力涡扇
发动机推力(中间)/kN	2×73.52	4×137.22	4×84.53	2×191.29	4×122.50

表2 世界几型先进发动机的主要技术参数

型号	F100-PW100	F118-GE100	EJ200	F119	F135-PW100/400
不加力推力/kN	65.38	84.53	60	97.86~113	124.6
不加力耗油率(kg/(daN·h))	0.694	0.683	0.8	0.62	0.737
涵道比	0.63	0.76	0.4	0.45	0.57
涡轮前温度/K	1606	1700	1803	1853~1923	1897
推重比	7.7	5.95	10	≈10	10.5
使用年代	1974年	1989年	1994年	1997年	2006年
飞机型号	F-15C和F-16	B-2	欧洲战斗机	F-22	F-35

大的航程和作战半径，因此发动机的耗油率越低越好。近年来的技术进展表明，发动机的技术进步已经成为提高飞机经济性或是轰炸机航程和作战半径的主要因素，普惠公司的战斗机发动机的耗油率已经由F100发动机的0.70级（单位为 $\text{kg}/(\text{daN}\cdot\text{h})$ ）降低到F119发动机的0.60级，而美国通用经济可承受先进涡轮发动机（VAATE）计划的目标是在F119发动机的耗油率基础上再降低25%。

### 隐身和抗电磁干扰能力

对于现在及未来飞机而言，隐身是全方位的，不仅包括电磁隐身，还包括红外、声响、视觉等其他信号特征隐身。涉及到发动机的主要有电磁隐身和红外隐身，这两方面和发动机系统的进气道设计、喷管设计有关。现在流行采用S形进气道、S形喷管，目的是为了减少雷达和红外信号特征，其他形式的进气口和排气口设计也在探究之中。发动机本身如果能采用更多的隐身技术如三涵道技术、综合热管理技术

和发动机的尾迹管理等，降低雷达和红外信号特征，会较大程度地减轻飞机隐身设计的压力。

随着人工智能和自动控制技术的发展，航空发动机的自动化控制程度越来越高，发动机的智能控制水平也越来越高，能够较大地改善发动机的可靠性和维修性，但也会带来控制系统电磁干扰的问题，发动机控制系统的抗电磁干扰能力是确保飞机安全航行的前提。

### 推力矢量和推力转向

依靠推力矢量（如图5所示）和推力转向进行飞行和控制，完全或部分代替飞机操纵面，就可以取消飞机的外露部件，如垂尾、腹鳍和其他操纵面，这样除能减少飞机雷达截面积（RCS）外，还可减轻整机质量、增加内部燃油空间、降低系统复杂性、提高敏捷性、降低全生命周期成本等。利用推力矢量控制时，不管迎角多大和飞行速度多低，均可以利用这部分操纵力进行飞机操纵，并且量值和方向易变，可以增加

飞机操纵裕度，提高飞机的生存力。美国曾在F-18飞机上进行过推力矢量飞行控制试验，并且更进一步，曾有取消飞机所有操纵面，仅依靠推力矢量进行飞行控制的研究计划。无疑，推力矢量控制飞行是未来发展方向之一。

### 低成本和经济可承受性

低成本是武器装备发展永恒的主题，并且随着现役武器装备研制成本的快速攀升显得尤为重要。B-2轰炸机单价达到10亿美元，并且有严格的维修保障要求。这些因素限制了其在海外的部署与作战使用，也导致美国明确要求LRS-B的成本降低到5.5亿美元以下。远程轰炸机和任何军机一样，均强调低的制造成本和使用成本，提高经济可承受性，才能装备更多、使用更加灵活和方便。

## 结束语

与美俄相比，我国的航空发动机技术比较落后，短期内难以研制成功战略轰炸机所需的新一代高性能发动机，可以先用其他成熟发动机做适应性改进后装配战略轰炸机。同时，瞄准航空发动机的先进水平，参考世界发达国家的发动机研究计划，如美国的综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）计划和VAATE计划等，积极开展未来发动机技术的预研工作，在技术成熟基础上开展新一代军用航空发动机的研制，待新发动机研制成功后，进行轰炸机的换发工作，这未尝不是一个好的选择。

**航空动力**

（党举红，航空工业一飞院，研究员，主要从事飞机总体设计、飞机质量与平衡设计研究。）

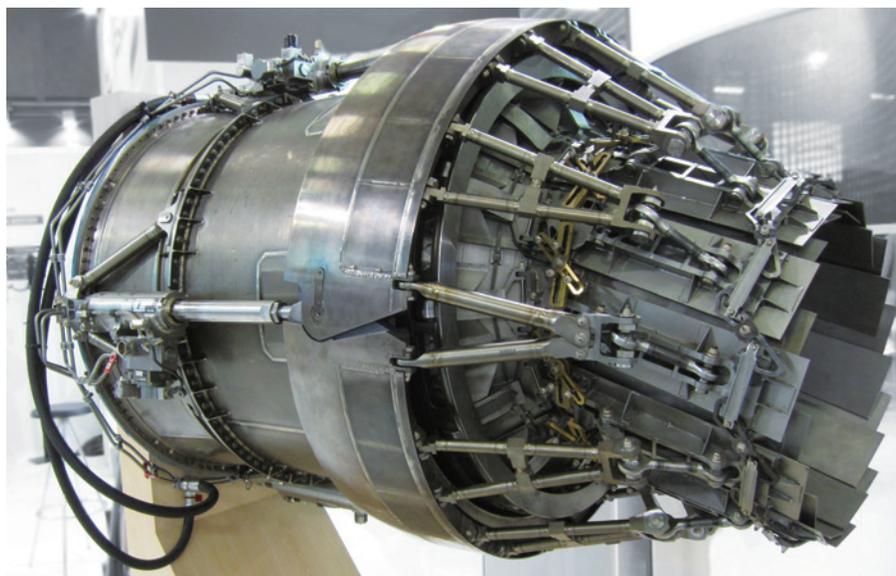


图5 EJ200轴对称三维矢量喷管