美俄战略轰炸机发动机发展研究

Research on the Development of US and Russian Strategic Bomber Engine

■ 陈健 廖忠权 / 中国航发研究院

战略轰炸机是军事强国不可或缺的武器装备，对维护国家安全有着重要的军事意义。发动机作为战略轰炸机的核心部件，对轰炸机的发展至关重要。

战略轰炸机是世界军事强国重要的威慑装备，也是核武器的重要载具，是海陆空三位一体核打击体系不可或缺的一环。第二次世界大战后，经过70多年的发展，世界军事技术和防空体系获得了长足的进步，战略轰炸机虽历经多次更迭换代，但作为大国强国战略装备的地位仍未动摇，甚至愈加稳固，而作为战略轰炸机“心脏”的发动机相对其他部件颇具特殊性，是军事强国重点发展的核心装备之一。

美国隐身战略轰炸机 B-21 首飞

轰炸机及动力发展历程

自第二次世界大战结束以来，世界军事强国防空系统主要经历了4个阶段的发展。作为大规模攻击性武器的战略轰炸机为了突破对方防空系统，相应经历了高空突防、超声速突防、低空突防，以及隐身突防4个发展阶段。轰炸机动力也跟随不同时期轰炸机的作战需求而不断变化。目前，美俄在役的轰炸机主要包括美国的B-1B、B-2A、B-52H，以及俄罗斯的图-95、图-22、图-160M。在研的轰炸机主要包括美国的B-21和俄罗斯的未来战略轰炸系统（PAK DA）。

高空突防（20世纪40—50年代）

核武器自出现以后就成为了冷战时期的主宰因素，当时运载核武器的工具只有战略轰炸机，因此备受重视，军事强国都把战略轰炸机作为核战略的支柱。当时，防空武器主要为各式高射炮，各国根据战争经验和科技发展程度，不断改进高射炮的性能。对此，轰炸机的发展思路是：更快的速度、更高的飞行高度、更优的飞行性能，动力采用燃气涡轮发动机（主要采用涡喷、涡扇和涡桨发动机取代活塞式发动机）；依靠轰炸机优越的飞行性能，采用高空突防战术，以避开高射炮的攻击。

典型轰炸机及动力包括B-52（配装J57）、B-47（配装J47）、图-95（配装NK-12）。

超声速突防（20世纪50—60年代）

20世纪40—50年代出现的喷气轰炸机都是亚声速飞机，而此时战斗机的速度达到了超声速。当时服役的喷气轰炸机自卫能力不强、机动性较差、速度偏低、战场生存能力差。对此，军事强国采取的对策是提高轰炸机的最大速度，以快制快，摆脱战斗机的截杀，以提高生存能力。基于此战术思想，轰炸机的发展思路是：在得不到战斗机全程护航的条件下，轰炸机主要依靠自身的飞行性能与机载设备，进行高空、低空和超低空超声速突防，同时具有核打击与常规打击能力；

进一步增大轰炸机的航程，使之能够进行更大范围的作战。

发动机采用大推力燃气涡轮发动机，例如，美国XB-70超声速远程战略轰炸机的动力YJ93涡喷发动机，单台推力达到137 ~ 147kN，如此大推力的涡喷发动机在当时非常罕见，即使与今天先进的小涵道比涡扇发动机相比，这一推力水平也极其惊人。由此可见，先进战略轰炸机的动力要求极高。

典型轰炸机及动力包括B-58（配装J79）、XB-70（配装YJ93）；M-50（配装VD-7M）、T-4（配装VD-7M）。

低空突防（20世纪60—80年代）

地空导弹出现以后，超声速飞机从高空突防又遇到严重威胁。当时地空导弹系统的速度和过载能力都远高于以高空高速突防为主的战略轰炸机，实战表明高空高速飞行为主的作战飞机都很难逃脱地空导弹的攻击。对此，美国空军提出开发一种既能高速低空突防，又能高空高超声速飞行的先进战略轰炸机。借助地面雷达杂波掩护，低空突防攻击，在敌方防空火力做出反应前，从高空高速脱离战区，以安全撤离。苏联也做出了同样的战略选择。

为了满足轰炸机的低空突防需求，其发动机推力进一步增大。例如，图-22M/M2采用两台NK-22涡扇发动机，单台最大加力推力为215.6kN；图-22M3则是换装了推力更大的NK-25发动机，加力推力达到245kN，使得飞机高空最大速度从*Ma*1.65增至*Ma*2.05。图-160的动力为4台NK-32涡扇发动机，加力推力为245kN，该发动机的强大推力使得图-160成为迄今为止飞得最快的轰炸机，高空最大速度可达到*Ma*2.1。

典型轰炸机及动力包括变后掠翼轰炸机B-1A（配装F101）；图-22M/M2/M3（配装NK-22）、图-160（配装NK-32）。

隐身突防（20世纪80年代—21世纪）

自20世纪70年代以后，信息化技术越来越先进，空间军事侦察卫星、空中预警机、地面预警系统，以及纵横交错的信息网络不断完善，各种侦察手段获取的战场信息实时传输到各个作战单元，信息盲点大幅减少，战场环境也更加透明，综合防空系统的性能快速增长。这使得飞机仅以速度和高度突防不能取得绝对优势，低空高速突防也逐渐过时。之后，世界各国又普遍发展了空间卫星、各种侦察机、预警指挥机、地（海）面警戒与指挥机构和地下指挥所组成的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦查（C4ISR）系统网络，并以此为基础构筑了严密的防空网络。鉴于此，自20世纪70年代以后，采用隐身飞机突防就成为了航空强国的重要选项，对轰炸机及动力隐身性的要求大大提升。

为了满足轰炸机的隐身需求，发动机也开始采用隐身设计。配装美国F-117A隐身战斗轰炸机的F404-GE-F1D2发动机和配装B-2A隐身战略轰炸机的F118-GE-110涡扇发动机都采用了隐身设计。

典型轰炸机及动力包括F-117A（配装F404）、B-2A（配装F118）。

美国战略轰炸机发动机发展策略

战略轰炸机装备数量一般较少，所需发动机数量也少，单独为战略轰炸机开发全新发动机并不十分经济。对此，美国多采取利用其他飞机平台动力衍生发展轰炸机发动机的策略。

衍生发展

20世纪70年代初至今，专门为B-1战略轰炸机研发的F101发动机是美国唯一一型专门为轰炸机研制的涡扇发动机，其他的轰炸机用涡喷、涡扇发动机几乎都是由当时的战斗机或运输机发动机改型，或由其核心机衍生发展而来，从最初的J47、J79、TF33，再到F404-F1D2（F-117隐身飞机动力）、F118-110（B-2A轰炸机动力）和F130（B-52换发动力），全都沿袭了这一发展模式，为了满足不同时期轰炸机技战术性能需求，其动力往往也是当时美国推力较大的中小涵道比涡扇、涡喷发动机。此外，美国的轰炸机发动机没有专门一贯的制造商，针对每一型轰炸机，选择几家发动机竞标商提供的最优方案。

美国在研的下一代隐身战略轰炸机B-21已于2023年11月10日完成首飞，将在加利福尼亚州爱德华空军基地进行飞行测试。据推测B-21可能采用F135发动机（F-35战斗机动力）改进型，同样是上述衍生发展战略的延续。

升级换发

在不同的历史时期，随着军事环境的变化，以及发动机技术的进步，为了保证轰炸机的作战性能跟上时代发展和满足国家军事需求，往往会对服役年限非常长的轰炸机进行升级换发。

升级换发在B-52轰炸机上体现的十分明显：B-52第一批生产型是B-52B，1955年开始装备军队，动力采用J57-P-19W涡喷发动机；

美国典型轰炸机及动力

年代	轰炸机类型	轰炸机型号	发动机型号	基础发动机型号	推力/kN	投产时间	状态
20世纪60年代前	中型轰炸机	B-47	J47	J35	32.65	1948年	退役
		B-57	J65		32.06	1950年	退役
		B-58	J79	J79（配装F-4战斗机）	44.48	1956年	退役
	战略轰炸机	B-52	TF33	JT3D（配装波音707）	78.8	1960年	在役
			F130	BR725（配装公务机）	74.1	—	在研
20世纪70年代	战斗机/轰炸机	FB-111	TF30	TF30（配装F-14战斗机）	90.45	1971年	退役
	战略轰炸机	B-1B	F101		75.6	1974年	在役
20世纪80年代后	战斗机/轰炸机	F-117A	F404-GE-F1D2	F404（配装F-18战斗机）	46.8	1983年	退役
	战略轰炸机	B-2	F118	F101、F110	84.5	1993年	在役
21世纪	战略轰炸机	B-21	F135改（推测）	F135（配装F-35）	—	—	在研

B-52B的改进型B-52C，动力采用J57-P-29涡喷发动机；B-52的改进型B-52F，1958年装备军队，动力换成了J57-P-43W；B-52H是B-52G的改进型，1961年装备军队，动力又换成了推力更大的TF33-P-3涡扇发动机，推力为77.71kN。

自20世纪70年代开始，有关B-52H换发的建议就不断被提出，但一直未实施。随着使用年限的延长，B-52H配装的TF33发动机面临可持续性制造和保障的难题，美国空军在2021年预算申请随附的文件中表示，预计到2030年这些发动机将变得不可用；此外，由于TF33发动机的生产线已经停产多年，寻找发动机备件变得越来越难，提高了后期维护的成本，TF33发动机的基地级维修成本从1996财年的25.7万美元大幅增加到2019财年的170万美元，23年时间里增加到6倍。基于多种原因，美国空军于2018年重启了B-52H换发工作，并命名为B-52商用发动机更换计划（CERP）。

CERP对发动机提出了以下要求：燃油效率提高20% ~ 40%；具有与TF33发动机相同的推力等级；航程增加40%；在最小控制空速不变的情况下，维持当前的作战上限和起飞性能；发动机必须与B-52H的电气、液压、气动和燃油系统兼容，同时不影响外部武器性能。

2020年5月19日，CERP需求建议书规定了TF33发动机将与新发动机一对一换发。随后GE公司、普惠公司和罗罗公司递交了投标书。GE公司的竞标产品是CF34-10发动机和“通行证”（Passport）发动机，普惠公司的竞标产品是PW815发动机，罗罗公司的则是F130发动机（BR725的军用改型）。

2021年9月24日，罗罗公司竞标成功，获得了美国国防部一份价值5.009亿美元的初始合同，用于在B-52H轰炸机上对F130发动机进行开发和测试。随后，将为美国空军所有76架B-52H轰炸机更换650台新型F130发动机，包括42台备用发动机，总价值26亿美元。

2023年3月，罗罗公司开始测试F130发动机，并计划在2023年年底前完成F130发动机的初步测试。

俄罗斯战略轰炸机发动机发展策略

俄罗斯战略轰炸机动力发展自成体系，专门针对每一型轰炸机开发全新发动机，其发展具有较强的技术继承性。

延续发展、专门设计

俄罗斯研制过的轰炸机发动机主要有NK-12、NK-22、NK-144B、NK-25和NK-32。其中，NK-12涡桨发动机是图-95战略轰炸机的动力，是迄今为止世界上功率最大的涡桨发动机，也是俄罗斯唯一的轰炸机用涡桨发动机。除了NK-12发动机之外，俄罗斯其他轰炸机的发动机都是在苏联时期库兹涅佐夫设计局NK-6涡扇发动机的基础上专门发展而来。

NK-6是苏联第一型国产涡扇发动机，也是当时世界上推力最大的发动机。该发动机于1958年5月进行了首次试验，原计划用于图-22轰炸机和图-123无人攻击机，但最终只是在图-95飞行试验平台上试飞过。库兹涅佐夫设计局借鉴NK-6涡扇发动机的研制经验研制了NK-22

图-160轰炸机及NK-32发动机

涡扇发动机和NK-144涡扇发动机。NK-22用于图-22M/M2超声速轰炸机；NK-144B用于图-22MO超声速轰炸机。在NK-22发动机的基础上，库兹涅佐夫设计局又研制了NK-25三转子涡扇发动机，用于图-22M超声速轰炸机，于1976年开始批量生产。NK-25发动机与NK-22发动机的区别是增大了推力、提高了高压压气机的增压比、提高了燃油的燃烧效率。

NK-32发动机则是库兹涅佐夫设计局于20世纪80年代专门为图-160轰炸机研制的三转子加力涡扇发动机，并采用了隐身设计。设计局在NK-25的基础上，于1980年为图-160研制了NK-321三转子涡扇发动机。与NK-25发动机相比，NK-321发动机巡航状态和超声速状态的推力增加了，但NK-321发动机并未批产。设计局于1981年又在NK-321发动机的基础上改型研制了NK-32发动机，1983年，在古比雪夫发动机工厂批量生产，共计生产250多台。值得一提的是，NK-25发动机和NK-32发动机是当今仍在服役的推力最大的两型轰炸机发动机。

俄罗斯目前正在推进PAK DA的研制，预计2025—2026年首飞。针对PAK DA的动力，俄罗斯官方披露的信息极少，但据2022年俄罗斯媒体的报道，俄罗斯正在为PAK DA专门开发“产品”RF发动机，目前已经对发动机原型机进行了基准测试，这也延续了俄罗斯专门为轰炸机开发全新动力的发展理念。

制造商唯一

俄罗斯轰炸机发动机产品和行业发展的一大特点就是，轰炸机用涡桨和涡扇发动机全部是由联合发动机制造集团（UEC）旗下库兹涅佐夫设计局设计。俄罗斯所有的轰炸机发动机都用“NK”命名，这是俄罗斯第一代轰炸机发动机设计师尼古拉·库兹涅佐夫的缩写，轰炸机动力设计局也以库兹涅佐夫的名字命名。

俄罗斯典型轰炸机及动力

年代	发动机系列	发动机型号	起飞功率/kW 推力/kN	投产时间	配套飞机
20世纪60年代前	NK-12（涡桨）	NK-12	9321	1955年	图-95
		NK-12M	11185.5	1956年	图-95、图-114
		NK-12MA	11185.5	1966年	安-22、安-22A
		NK-12MP	11185.5	1979年	图-95、图-126、图-142、图-114
20世纪60—80年代	NK-22（涡扇）	NK-22	196.1	1969年	图-22M
	NK-25（涡扇）	NK-25	245.2	1976年	图-22M3、图-22MP
	NK-144（涡扇）	NK-144B	196.1	1975年	图-22MO、图-144
	NK-32（涡扇）	NK-32	245.2	1983年	图-160
21世纪	“产品”RF	—	—	—	PAK DA

结束语

战略轰炸机发动机的发展仍将大有可为，隐身性、经济性，以及作为战场节点指挥无人机等将是其主要发展趋势，为支持隐身战略轰炸机的发展，轰炸机发动机的发展至关重要。美国和俄罗斯采用了不同的轰炸机发动机发展思路，俄罗斯的轰炸机发动机几乎都是专门为轰炸机设计，然后又用于其他飞机平台，而不是利用其他成熟军民用发动机衍生发展，这和美国的发展思路刚好相反，这两种不同的发展思路都值得参考借鉴和甄别选择。 航空动力