

中国军用航空发动机现状

1. **WS10**: 用于歼 10、歼 11 后期动力。WS10 的研制始于 1986 年当时是考虑为歼 10 配套的, 10A 是 WS10 的核心机。1980 年代从某国引进 2 台某民用发动机, 我国在某国核心机基础上对核心机进行了改进。1992 年 10 月验证机在 086 号飞行台上开始试飞, 1997 年开始型号研制(飞行前试验阶段), 2000 年 10 月 624 所高空台具有了大推力发动机的试验能力, 随后开始型号的高空台试验, 型号装机首飞是在 2001 年 7 月, 2002 年 6 月装一台 WS10 的歼 11 取得阶段性成果, 2002-2003 年间型号开始装歼 10, 2003 年 12 月装两台 WS10 的歼 11A 首飞。WS10 于 2004 年 9 月开始批量生产, 2005 年底定型。WS10 有单发和双发两种型号, 分别为 B 型和 C 型。WS10 的涡轮前温度已从原有的 1747K 提高到 1800K, 推重比也由原来的 7.5 提高到 7.8 左右, 推力也由 132KN 提高到 138KN。
2. **WP13B2**: WP13B2 即 WP13C, 推力为 7300KG, 与昆仑持平, 推重比估计 6.0 以上, 低于昆仑的 6.5, WP13FIII 为其单发型, 其具体试飞日期不详, 不过我们可以从中航一集团网站对 WP13B2 的报道中可以推断出大概, 1991 年正式开始整机研制, 1999 年该型发动机被列为国家重点型号工程, 2002 年 6 月 16 日开始进行全寿命考核长期试车(而 WP13B 是在 96 年 4 月进行的 150 小时长期试车, 03 年定型), 估计要到 2007 年左右定型, 其发展型值得期待。
3. **WS9**: 用于“飞豹”歼轰机。英国 R&R 公司许可生产的 Spey MK 202 发动机, R&R 公司已经向汉和总编辑 PKF 证实他们正在帮助中国改良 Spey MK202, “斯贝”的改良工作已顺利完成。
4. **昆仑**: 用于歼 8 换发的涡喷发动机。昆仑的研制应用了斯贝 MK202 的技术, 其高压压气机段即参考斯贝 MK202。昆仑的加力推力为 7300 千克, 不加力推力为 5165 千克, 加力耗油率为 0.202, 不加力耗油率为 0.10, 推比 6.5。2002 年昆仑 2 的加力推力为 7800 千克, 现已提高到加力 8010 千克, 最大 5780 千克, 推重比 7.22。发展型昆仑 3 加力为 8930 千克, 推重比 8.05。现新昆仑涡喷发动机(昆仑 2)已装在 J-8F 上。
5. 关于推比八的中推: 第一阶段: 1980—1983 年, 1980 年, 高推预研在经过了充分论证的基础上正式开题, 以定向基础研究为主, 开展单项课题研究, 进行理论方法、计算方法和试验方法的探索研究; 第二阶段: 1983—1989 年, 以先进部件关键技术为主, 重点围绕三大高压部件及其相关的强度、控制等系统进行综合应用研究; 第三阶段: 1989—1992 年, 进行三大高压部件全尺寸试验件的设计和试验研究; 第四阶段: 1991—1994 年 1 月, 进行三大高压部件匹配技术、亦即核心机的设计试验研究。其后, 在“八五”期间, 我国自行研制的推重比 8 一级核心机已完成地面和高空性能试验; “九五”期间完成了推重比 8 一

级的验证机设计；“十五”期间对推重比 8 一级发动机的风扇和低压涡轮进行了改进，为在核心机基础上进行发动机派生发展提供了技术储备。

6. **WS13 泰山**：用于 FC—1“枭龙”、FBC—1“飞豹”后期动力。WS13 是在 RD33 的基础上结合推比八的中推的技术而研制的，长 4.14 米，最大外直径 1.02 米交付使用质量 1135 千克，发动机加力推力 86.37 千牛，加力耗油率为 2.02，不加力推力为 56.75KN，不加力耗油率为 0.73，巡航推力 51.2KN，巡航耗油率 0.65，进气量 80kg/s，涵道比 0.57 总压比 23，大修间隔 810H，涡轮进气口温度 1650K，寿命 2100H，推重比 7.8，2004 年 1 月点火，预计 2006 年定型。
7. **推力矢量喷管**：推力矢量喷管是在 2002 年初上的 606 所的试车台，估计在 WS10，2005 年定型后装上歼 11 首飞。
8. **权限数控系统**：我国的全权限数控系统是在 2002 年下半年装机首飞的，首飞所装发动机型号估计为 WP13，2003 年初装上 WS10，2003 年底第一套上天试飞的发动机全权限数字控制系统演示验证通过验收

=====

20 世纪 80 年代初期，中国航空研究院因 70 年代上马的歼 9、歼 13 等项目的纷纷下马，与之配套的研发长达 20 年的涡扇 6 系列发动机也因无装配对象被迫下马，于是中国在战斗机动力方面与世界发达国家的差距拉到 20 年以上。面对中国航空界的严峻局面，国家于 80 年代中期决定发展涡扇 10 系列发动机。依据装配对象的不同，涡扇 10 系列有涡扇 10、涡扇 10A、涡扇 10B、涡扇 10C、涡扇 10D 等型号，其中涡扇 10A 是专门为中国赶超世界先进水平而上马的新歼配套的。中国为加快发展涡扇 10 系列发动机，采取两条腿走路方针：一是引进国外成熟的核心机技术。中美关系改善的 80 年代，中国从美国进口了与 F100 同级的航改陆用燃汽轮机，这是涡扇 10A 核心机的重要技术来源之一；二是自研改进。中国充分运用当时正在进行的高推预研部分成果(如 1992 年试车成功的中推核心机技术，性能要求全面超过 F404)，对引进的核心机加以改进，使核心机技术与美国原型机发生了较大变化，性能大为增强。涡扇 10/10A 是一种采用 3 级风扇，9 级整流，1 级高压，1 级低压共 12 级，单级高效高功高低压涡轮，即所谓 3+9+1+1 结构的大推力高推重比低涵道比先进发动机。该发动机在研制时成功地采用了超音速风扇；气冷高温叶片，电子束焊整体风扇转子，钛合金精铸中介机匣；挤压油膜轴承，刷式密封，高能点火电嘴以及整机单元体设计等先进技术。其中涡轮叶片采用定向凝固高温合金先进材料，以及采取了对流、前缘撞击加气膜“三合一”的多孔回流复合冷却的先进技术，使涡轮叶片的冷却效果提高了 2 倍。涡扇 10 的涡轮叶片虽然是定向结晶的 DZ125，但采用了我国独创的低偏析技术，其综合性能可以和第一代的单晶高温合金媲美。但同样存在不足，最大缺点是涡轮叶片有中空部分，某些部位壁薄，在凝固时柱状界面之

间容易产生裂缝，使得制造上受到限制。但总体来说，涡扇 10A 的性能参数在国内还是首屈一指，这也使得中国航空动力事业达到了发达国家 80 年代中期水平，在中国航空发动机发展史上具有里程碑式的重要意义。

另外值得一提的是，涡扇 10A 于 1998 年装在歼 10 上首飞，并进行过长达 40 分钟的超音速试验。2000 年在一次与从俄罗斯进口的 AL-31F 发动机混装试飞时，发生了空中熄火险情，再加上涡扇 10 系列研制进度的严重滞后等问题，制约了涡扇 10 系列发动机的运用。在首批生产的歼 10 战斗机上安装的很可能是从俄罗斯引进的 AL-31F 涡扇航空发动机，其单台静推力 77 千牛，加力推力可达 122.6 千牛。发动机高温部件采用钛合金制造，并带有加力燃烧室，发动机喷管的收敛扩张喷口装置。该发动机为歼-10 在空战中发挥高超性能提供了有力支持，但就目前得到的数据看，涡扇 10A 的推力应大于 AL-31F 的 12500 公斤，估计在 13000 公斤左右，推重比应高于 8，而因为涡扇 10 装有比 AL-31F 更有效的压缩机，使得单晶涡轮叶片比 AL-31F 的涡轮叶片更能忍受高温，引擎控制系统也更加先进。所以，用涡扇 10A 代替 AL-31F 只是时间上的问题，有朝一日歼 10 装备涡扇 10A 后，在空战推重比、载弹量和飞机的机动性、灵活性方面，其综合飞行性能都将有大幅跃升。

一、北海来风

盎格鲁撒克逊人历来是精明的商人，古板而不死板，保守而又务实。自东亚某国建国以来，他们从来没中断过与该国关系。70 年代初，随着中美关系的解冻，英国人来了。

1972 年，英国同意向我方单方面出售民用“斯贝”发动机，1973 年 7 月 17 日，英方又约见我驻英大使，表示已授权罗·罗，谈判向我方出售军用斯贝发动机，1975 年 8 月，中英双方进行实质性谈判。1975 年 12 月 13 日，签定了中国引进英国斯贝发动机专利的合同。

斯贝发动机，中国型号定名为涡扇 9，定点西安航空发动机厂试制生产。西安航空发动机厂于 1976 年开始试制工作，此前西安生产的是涡喷 8，是仿制苏联的 ПД-3М 的产品，用于轰 6。经过 3 年多的努力，1979 年下半年，分两批装出了 4 台发动机。同年 11 月，由中英双方共同在中国完成了 150 小时持久试车考核。1980 年 2 月到 5 月，又在英国完成了高空模拟试车、零下 40 摄氏度条件下的起动试车，以及 5 大部件的循环疲劳强度试验，结果都符合技术要求。中英双方代表签署了中国制造涡扇 9 发动机考核成功的文件。涡扇 9 发动机的初步研制成功，使中国有了一台推力适中的涡扇发动机，填补了空白，并有效提高了自行研制的水平和能力；通过试制引进了 70 年代水平的新材料、新工艺、新技术，机械加工工艺比原来提高一级精度以上，工厂掌握了诸如金属喷漆、真空热处理等 12 项具有世界先进水平的技术和 46 项国内先进工艺技术。同时，国内冶金、材料、化工、机械等工业的技术水平，也相应得到提高，从而较大幅度缩短了整个发动机制造技术与世界水平的差距。而且，斯贝发动机的引进还为航空工业迎接新时期的改革开放，引进先进技术，开展技术合作与交流，提高发动机及配套产品的技术水平，开了个好头。

需要指出的是如果没有涡扇 9，那飞豹也就前途未卜了。但由于种种原因，WS9 的研制一直踌躇不前。90 年代初期，随着飞豹研制工作的展开，涡扇 9 的全面国产化工作也提到议事日程上来，95 年 11 月，部分国产化的涡扇 9 通过 150 小时试车，此时涡扇 9 的国产化率已达到 70%，仍有部分零件不能生产。1999 年下半年，涡扇 9 发动机全面国产化工作启动，西安航空发动机厂先后攻克无余量精锻(精铸)工艺，数字式电子控制系统等一系列难关，西航集团公司仅

用了 20 天时间就完成了发动机的装配，在成功进行了两次冷运转后，于 2000 年底一次点火成功，随即开始的 150 小时工艺试车于 2001 年圆满结束，试车检验结果表明各项性能技术指标均达到要求，涡扇 9 被重新命名为秦岭发动机，2002 年 6 月 1 日上午，凝聚着西航航空人无数心血和汗水的秦岭发动机首飞成功。2003 年 7 月该发动机通过技术鉴定，从此，中国开始有了全国产的大推力涡扇发动机。

斯贝发动机的原型改自民用发动机，因此也秉承了民用发动机耗油率低的特点。约翰牛的务实精神在斯贝发动机上体现得淋漓尽致；可靠，喘振余度高是斯贝的最大的特点，斯贝也正象一头老黄牛一样，勤勤恳恳，任劳任怨。斯贝是最早采用三元流技术的发动机，该理论是我国著名航空发动机专家吴仲华教授提出的。但是斯贝的推比却是长期以来一直被人们所诟病的，的确，斯贝的推比太低了，其推比与 WP7 相比也是非常低的，要知道 WP7 的原型 P11Φ-300 发动机只是 50 年代初的技术，50 年代中期的产品。罗罗也确有改进斯贝的计划，可最终因为需求少而迟迟没有启动。

这里，读者不妨以另外一种发动机做比较，那就是雄猫之心 TF30，该发动机最早也是民用型，当时的代号叫 JTF-10A，但未获得应用，1961 年末，美国空海军提出了 F111 战术战斗机的设计要求，并选中 JTF10A 的军用加力型 TF30-P-1，该型发动机于 1962 年夏在 B-45 飞行试验台上开始飞行试验，1964 年 12 月装于 F111A 首次飞行，1965 年 8 月完成定型试验，并用于 F111A 的发展型和头 5 架的生产型，，最初的 TF30 的推比只有 5.0 和斯贝 MK202 相同，而到了 F111F 所装的 TF30-100 型，其推比达到了 6.3，类似的经历，不禁使人浮想联翩，既然 TF30 能从推比 5.0 提高到了 6.3，那斯贝 MK202 呢？如果把斯贝的风扇换掉，使用高效率，高压比的风扇的话，斯贝的推力肯定可以增加不少，如果再替换高压段，采用预研的核心机技术，把高压压气机和高压涡轮换掉，更新燃烧室的话，推力肯定还会增加，在增推方面可以做的，在减重方面也可以做到，毕竟斯贝 MK202 的材料都是 30 年前的了，如果在压气机叶片上广泛采用钛合金，在高压涡轮叶片上采用单晶合金，并在涡轮盘材料上采用粉末盘，整体叶盘技术，风扇叶片采用复合材料，空心宽弦风扇叶片，这样重量完全可以大大减轻，由此可见斯贝推比增加的潜力是巨大的，短期估计能达到 6.5，远期在 7.0 以上也是可能的。

二、阿拉伯人的友谊

中国和阿拉伯人的友谊源远流长，远自唐代就有交往，而在现代，中国人的武器更是源源不断的武装了我们的伊斯兰兄弟，看看中华人民共和国的武器出口史，可以说就是和阿拉伯世界的友谊史，当然有来就有往，我们付出了，就有了回报，70 年代末，我们得到了我们想要的东西，米格 21MF 和米格 23，附带的发动机我们也得到了，那就是 P13Φ-300 和 P29。

自从研制了 P11Φ-300 以后，图曼斯基设计局一刻也没有停止过对该发动机的改进，随后的 P13Φ-300 和 P25 就是它的直系后代，当然在千里之外的中国，人们也在做着同样的努力，空心涡轮叶片的研制成功，使中国继美国之后成为第二个拥有该技术的国家，以致于若干年后罗罗的总师胡克看到这一成果时说的第一句话就是不虚此行。但随后的岁月里，封锁和动乱使 WP7 的改进陷于停滞，直到我们得到了 P13Φ-300，有很多人认为 WP13 就是 P13Φ-300 的仿制品，而国内的权威刊物则称该发动机是涡喷 7 的发展型，但笔者认为 WP13 既不可能是仿制品，也不可能就是简单的来自 WP7，它极有可能是参照了 P13Φ-300 的设计，在 WP7 的基础上研制出来的，在研制过程中 WP13 开始在压气机上采

用钛合金，取代了原本的合金钢，当然 WP13 也吸取了 WS6 的成果，WS6 在风扇的用钛量上已经很高了同时参照了 WS6 的结构，WP13 的某些改型在涡轮叶片上用定向凝固合金取代了合金钢，这样既减轻了重量，又提高了涡前温度，WP13 的空气流量相比 WP7 略有提高，尺寸也有所加大，加力燃烧室的火焰稳定器开始采用我国的沙丘驻涡技术，高压压气机级数相比 WP7 增加了两级，这样压比也有所提高，循环参数的变化使 WP13 的推力明显增加，满足了 80 年代战斗机对发动机推力的需求，也使我国初步步入能参照设计研制中等军用加力涡喷发动机的国家，环顾当时的世界，除了几个发动机大国，美、英、法、苏之外，能做到这点的也只有中国了。

日本和印度当时的情况都处于授权制造阶段，而且国产化率还很低，即使到了今天，日本也只不过是初步具有了研制中等推力发动机的能力，但成果还没出来，日本的中等推力大涵道比发动机 XF-710 至今还未研制成功，至于印度的卡佛里发动机研制完成还是遥遥无期，印度的基础设施建设还未搞好呢，印度卡佛里发动机的飞行台和高空台试车都是在俄罗斯进行，发动机的零部件转包给欧洲国家进行研制，印度人认为搞发动机就象搞软件一样轻松，可事实证明他们太天真了。印度象显然不能称为有自主研制能力的国家。

WP13B 是 WP1 的大改型发动机，主要的改进是更换了低压压气机，使低压压气机的压比增加，流量增大，效率提高。该系列发动机的研制始于 91 年，95 年进行性能摸底试车，当时达到的加力推力为 68.65 千牛 7 吨不加力推力达到 47.56 千牛 859 吨)，重量为 1.28 吨。96 年春节过后上高空台用了 2 个月的时间进行了 10 次高空模拟试验，4 月 12 日返回黎阳进行 150 小时长期试车的考验，99 年被军方列为重点型号，02 年 6 月 16 日进行全寿命考核长期试车，03 年定型，13B2 属于 B 的增推型号，推力约为 7300KG，13F2 是 13B 的适应性单发改型，97 年 8 月顺利通过地面试车，98 年 6 月 8 日装歼 7FS 首飞。现 13B2 已开始配装歼 8 2F 战斗机。

纵观世界中等推力的涡喷发动机发展，7 吨推力或许是个阶段性的标志，如果越过这个界标前面就是一片坦途，美国人的 J79 是这样，法国人的阿塔 9K50 是这样，英国人的埃汶 300 也是这样，俄罗斯人的 R25 更是这样，有了 7 吨推力的涡喷发动机，战斗机的研制基本就没问题了，尽管 5 吨推力的发动机就能实现 2 倍音速的飞行，但要实现更好的机动性和起飞性能，7 吨是个临界点。

在这些发动机中 J79 的重量最重，有 1.8 吨，几乎可以和大推力的 F110 发动机的重量相提并论，当然它出来也早，推比也低。但在当时，J79 的重量是相当轻的。相比 J57 和 J75，它轻多了，可以说 J79 是美利坚 60-70 年代的当家花旦。第一种超过 2 倍音速的单发战斗机 F104，A5 双发超音速攻击机，F4 重型舰载制空战斗机用的都是它。甚至于犹太人的幼狮也想到了它。有了 J79，幼狮的性能连高傲的美国人也不敢忽视，这也难怪，动力是自家的嘛。

再看阿塔 9K50，如果用一个词来形容法兰西人的动力，那就是勤勉，高卢人的喷气发动机是在条顿科学家的帮助之下发展起来的，从阿塔 101 到阿塔 9K50，高卢人搞了近 20 年，推力从 1 吨起步，一直搞到了 7 吨，尽管它还是单转子的，但法兰西人从此出师了，发动机四强的桂冠戴在了高卢雄鸡的头上，有了阿塔 9K50，法国人也可以玩玩 2 倍音速常规布局的飞机了，虽然幻影 F1 的推比相比幻影 3 降下来了，可起降性能却上去了，如果说幻影 3 上用无尾布局是由于阿塔 9B 的推力太小的无奈之举，那现在看来阿塔 9K50 的推力是足够了。

英吉利人的产品与其说是工业品，更不如说是艺术品，埃汶 300 也不例外，作为英国第一种轴流式发动机 AJ.65 的发展型，英国人从来就是精益求精，而且英吉利人从来相信慢工出细活，1945 年，二战刚刚胜利的那年 AJ.65 就开始研制了，而埃汶 300 的研制开始于 50 年代，1951 年，罗罗在埃汶 100 的基础上搞出了埃汶 200，随后又搞出了埃

汶 300。埃文 300 和闪电战斗机成为了一对绝配，闪电在短时间内的跨音速巡航，就得益于它有一颗强劲的心脏，闪电的加速性极好，甚至超过他的晚辈 F15，要知道 F15 的推力几乎比闪电大一倍，而埃汶 300 的推比要比 F15 的发动机 F100 和 F110 小的多。

R25 的动力是强劲，任何人都不应该轻视他。60 年代后期，图曼斯基设计局在 P13-300 的基础上发展出了 P25-300 发动机，并将他装备米格 21 比斯战斗机，P25 主要做了如下改进。1)重新设计低压压气机，压比由 8.85 提高到 9.1，进气流量也有所增大。2)为提高加力状态的推力，加力状态的喷口直径缩小了 9.4~10 厘米，涡前温度提高 50~80 度。R25 虽然相比 J79，阿塔 9K50 以及埃汶出来的要晚，但性能上却有过之而无不及，可以说在以上这些发动机中，R25 的压比最低，压气机级数最少，但推力几乎和其它发动机相等，而且重量也较轻，有了 R25，米格 21 比斯的增重才能成为现实。

WP13B 的出生相比以上这些发动机实在是太晚了，但晚未必是坏事，正因为有了 WP13B 我们才完成了从发动机制造国向发动机设计国的一次转型，可以说 WP13 就是一个转折点。

至于 R29，国内编号 WP15，国内曾想仿制，后来由于没有装机对象转入技术储备。

艰苦之路！！

三、高空台上的跨越

中国很早就想搞高空台，高空台是一个发动机大国的标志。可长时期以来没有自己的高空台一直是中国航空动力人的悲哀，什么时候有中国人自己的高空台一直是中国几代航空人魂牵梦萦的心愿。

高空台短时间内无法完成，航空人想到了飞行台。中国的发动机高空试验正是从 086(226)飞行试验台起步的。该飞行台是在 60 年代确定方案，由轰 6 改装而来，1971 年完成全部改装。226 飞行试验台可以试直径 1~1.5 米，重量小于 3.6 吨，推力不超过 16.5 吨的各类涡喷和涡扇发动机，其试飞包线为高度 1 万 2 千米，最大 M 数 0.88，最小飞行速度 350KM/H。试验发动机安装在由弹舱改装的发动机吊舱内。试验过程中吊舱可以收放，应急时可以抛掉，以保证飞机安全。为防止被试发动机发生意外，吊舱配有很强的灭火系统，被试发动机由两名空中试验员操作，226 飞行试验台可以在真实飞行条件下完成规范要求的试验项目和专题性攻关，预研项目。已进行过的试验项目有：

发动机风车特性试验

发动机空中起动试验

发动机加、减速试验

加力燃烧室接通、切断和工作稳定性试验

发动机防喘系统试验

进入 80 年代，086 飞行试验台又进行了较大的改进和改装。该机经历了 30 多年的试飞生涯，担负了不少重要型号发动机的空中试飞，如 WP5、WP6、WP7、WP8、WP11、WP13、WP14、以及 WS11、WEJ11 等国产发动机。为国产战机定型和装备部队立下了汗马功劳，尤其值得指出的是 1992 年 10 月 086 进行国产验证型涡轮风扇发动机（太行的验证型）试验的时候，发动机风扇叶片在高速旋转下断裂并击穿了吊舱隔板，并打坏了母机右起落架的液压控制系统，造成该起落架无法正常收放，为保存这台来之不易的珍贵发动机，机组人员决定冒险进行 2 点着陆，虽然着陆造成右机翼损坏，但发动机却被完整的保存下来。如今，086 飞行台已经退役，而第二代以伊尔 76 为平台的飞行台已经开始服役。