

美苏第三代战斗机用发动机结构设计对比

Structure Design Difference Between America and Soviet Third Generation Fighter Engines

■ 陈光

20世纪60年代，美苏两国几乎同时开始了第三代战斗机（按照美国的战斗机划代标准）的研制工作，对配套发动机的性能乃至设计都提出了巨大挑战。为满足推重比要求，美苏在发动机结构设计方面采取的措施或异曲同工，或大相径庭。

美国F-15是一型全天候、高机动性的战术战斗机，为获得与维持空中优势而设计，是美国空军现役的主力战机之一，是第三代战斗机典型机型。为了获得高机动性，美国空军要求F-15的推重大于1.0，为此采用了两台推重比为8.0级的普惠公司F100-PW-100小涵道比加力式涡扇发动机（如图1所示）。单发F-16同属第三代战斗机，所用发动机的型号为F100-PW-220。

苏-27是苏联的单座双发全天候空中优势战斗机，与F-15一样同属于第三代战斗机，主要任务是国土防空、护航、海上巡逻等。该机于1969年开始研制，1977年5月20日首飞，1979年投入批生产，1985年进入部队服役，比F-15晚11年。苏-27采用了两台推重比为8.0级的AL-31F小涵道比加力式涡扇发动机（如图2所示）。

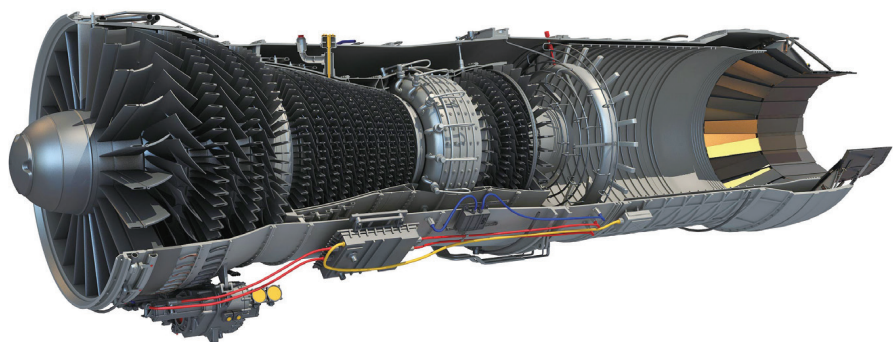


图1 F100发动机

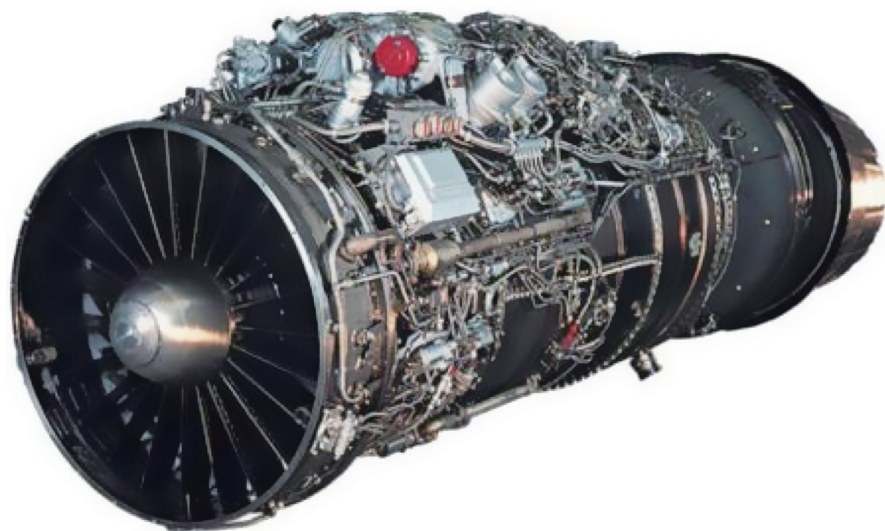


图2 AL-31F发动机

F100与AL-31F发动机概况

F100是世界上最早投入使用的推重比达8.0级的军用发动机。F100-PW-100由3级风扇、10级高压压气机、短环形燃烧室、2级高压涡轮、2级低压涡轮与带平衡梁式收敛-扩张型喷管的加力燃烧室组成。F100-

PW-100于1970年3月开始全面工程研制，1972年2月进行60h飞行前规定试验，1973年10月通过150h定型试验，1974年11月交付空军使用。

F100的推力增长型F100-PW-229采用提高了效率的核心机、增加流量的风扇、多区燃烧的加力燃烧室、寿命为2000h的齿轮式燃油泵和提高

表1 F100-PW-100与AL-31F发动机主要参数

型号参数	涵道比	总压比	推重比	涡轮前温度/K	空气流量/(kg/s)	中间推力/kN	最大加力推力/kN	中间耗油率/(kg/(N·h))	最大加力耗油率/(kg/(N·h))	最大直径/m	长度/m
F100-PW-100	0.6	25.0	7.8	1672	101.1	65	105.9	0.0720	0.231	1.18	4.856
AL-31F	0.6	23.6	7.1	1665	112.0	76.2	122.6	0.0795	0.200	1.30	4.950

了性能的数字式电子控制系统，检修间隔为4000循环。

AL-31F发动机是由苏联留里卡土星科研生产联合体于1976年在AL-21的基础上研制的带加力燃烧室的小涵道比涡扇发动机。AL-31F发动机由4级风扇、9级高压压气机、环形燃烧室、1级高压涡轮、1级低压涡轮与带收敛-扩张式喷管的加力燃烧室组成。在研制过程中，AL-31F发动机遇到了超重和涡轮效率比设计值低两个严峻考验。通过对总体结构的大改和提高涡轮前温度（同时改进了涡轮冷却设计，并采用了更先进的工艺、材料和涂层），设计人员最终克服了上述两大困难，成功实现了发动机的定型。

风扇结构设计

大部分军用小涵道比涡扇发动机的风扇为3级，但AL-31F却采用了4级风扇，其增压比为3.6（平均级压比1.38）。因此AL-31F发动机零件数、质量与长度均大于F100的3级设计。为了提高风扇叶片抗外物打击能力与解决叶片振动问题，AL-31F的前3级风扇采用了叶身中间凸肩，凸肩间相互抵紧形成整环，第1级的凸肩还用于解决叶片颤振问题。F100-PW-100的3级风扇叶片全部采用了叶身中间凸肩，但F100-PW-229中仅前2级采用叶身中间凸肩。

在风扇转子叶片方面，AL-31F出人意料地采用了大展弦比（即窄弦）设计。早在20世纪50年代，苏联的发动机如R-11F-300的压气机转子叶片就采用了宽弦设计，而当时的英美发动机全都采用窄弦设计；到20世纪80年代，英美发动机的风扇与压气机转子叶片逐渐由窄弦向宽弦设计过渡，而苏联发动机却走了相反的发展道路。窄弦设计使AL-31F的风扇叶片承受外物打击的能力变差。尽管后来在飞机设计上采取了防外物进入发动机的措施（如可收放的防尘网等），但这一缺陷还是对飞机的出勤率造成了影响，甚至引发了几起严重事故。

高压压气机转子结构设计

F100-PW-100设计年代较AL-31F

早几年，高压压气机转子的轮盘与鼓环之间还是采用复杂的多根短螺栓连接方式。F100-PW-229则采用焊接转子，前2级钛合金轮盘与鼓环焊为一体，第3级钛合金轮盘为单独个体，后7级高温合金的轮盘与鼓环焊接成一体，整个转子由3个组合件在第3级盘处用短螺栓连接，这是现代发动机广泛采用的结构。由于当时苏联无法将高温合金的轮盘与鼓环焊接在一起，因此AL-31F的高压压气机转子采用了焊接与长螺栓两种连接方式，即前3级钛合金轮盘与鼓环焊为一体，第4~6级钛合金轮盘与鼓环焊为一体，后3级采用多根长螺栓连接。整个转子由3个组合件组成，即前3级转子在第3级盘处用短螺栓与第4~6级转子连接，而后3级转子用长螺栓与第6级轮盘后伸

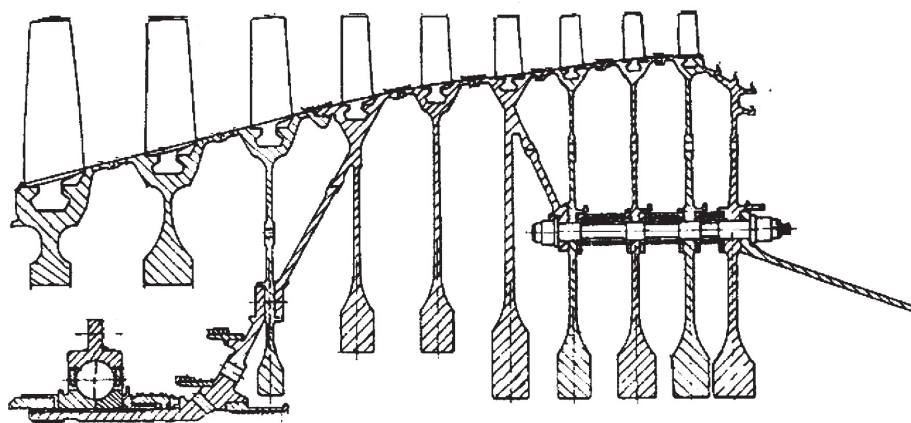


图3 AL-31F高压压气机转子

的锥轴连接在一起，这是一种不得已而采用的过渡设计（如图3所示）。

AL-31F的9级高压压气机转子叶片全部采用环形燕尾榫根装在轮盘轮缘的环形燕尾槽中，这是唯一的整个转子所有级全都采用环形燕尾榫根的发动机（RD-33中前3级为纵向燕尾榫根）。环形燕尾榫根结构最早用于CF6-6发动机中，这种结构除了可简化轮盘榫槽加工外，最大的好处是能在打开压气机机匣后拆换叶片，但其承载离心力的表面比纵向燕尾榫根显著减小。因此，在绝大多数发动机中，高压压气机前几级叶片较大、离心力大，不采用环形燕尾榫根。F100-PW-100高压压气机的转子叶片全部采用传统的纵向燕尾榫根，而F100-PW-229高压压气机转子的前4级叶片采用了纵向燕尾榫根，后6级则采用环形燕尾榫根。

高压涡轮冷却系统

为解决因涡轮前温度提高带来的涡轮叶片断裂问题，AL-31F的冷却系统

中有一处独特的设计，即由高压压气机出口处引出的冷却空气经过换热器降温后，再去冷却高压涡轮部件，以提高冷却效率。具体做法是，由燃烧室机匣外壁处引出占内涵道空气量8.9%的高压空气，流入置于燃烧室机匣上换热器中（如图4所示），与由外涵道流入的温度较低的空气进行热交换，使由高压压气机引出的空气降温125~210℃。这些冷却后的空气中，有一部分经高压涡轮导向器的中腔进入，除用于导向叶片冷却外，还进入高压涡轮盘前对轮盘冷却；另一部分冷却后的空气用于高压涡轮转子叶片冷却。采用这种方法可使涡轮工作叶片能承受更高的燃气温度，或保持一定的温度降低对涡轮叶片材料的要求。

附件中心传动装置主动锥齿安装方式

F100的高压压气机前滚珠轴承外环装在折返式弹性支座中，内环装在高压压气机前轴上，附件中心传动装置中的主动锥形齿轮直接装在滚

珠轴承前端。这种设计在许多发动机中得到应用，如F404、CFM56、GE90与PW4000（如图5所示）等。在这些发动机中，高压压气机前滚珠轴承均是通过弹性支座支承于机匣中的，说明此处采用弹性支座后，对锥形齿轮啮合间隙以及锥形齿轮正常工作影响不大。

AL-31F的高压压气机前滚珠轴承也是通过弹性支座支承于机匣，但附件中心传动装置中的主动锥形齿轮却未装在高压压气机前轴上，而是将主动锥齿支承在两个轴承上。高压压气机前轴与主动锥齿通过浮动套齿轴连接，即浮动套齿轴前端的外套齿与主动锥齿的内套齿啮合，后端的外套齿则与高压压气机前轴的内套齿啮合。当时的设计人员认为，如果将主动锥齿直接装在高压压气机前轴处，滚珠轴承所用的弹性支座会在工作中影响锥形齿轮副的啮合间隙，对附件传动链工作不利，因此才将主动锥齿与高压压气机前轴分离出去，单独支承。在这种观点的影响下，同期研制的RD-33也采用了类似

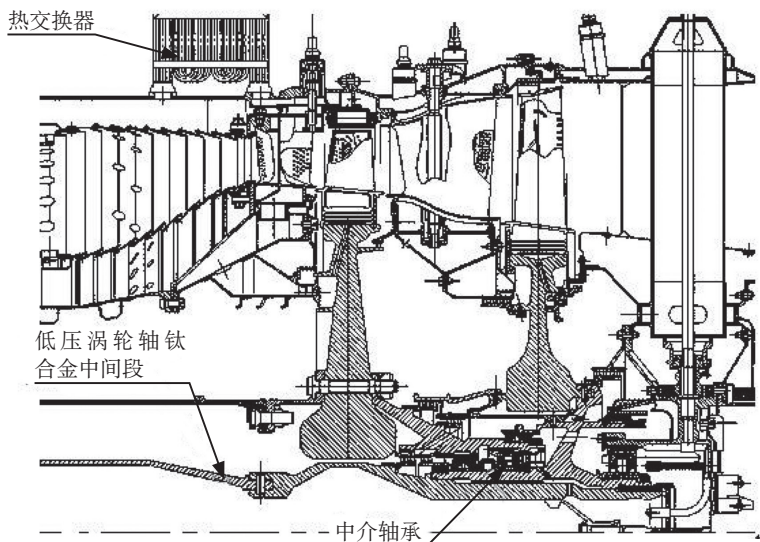


图4 AL-31F用于涡轮冷却的热交换器

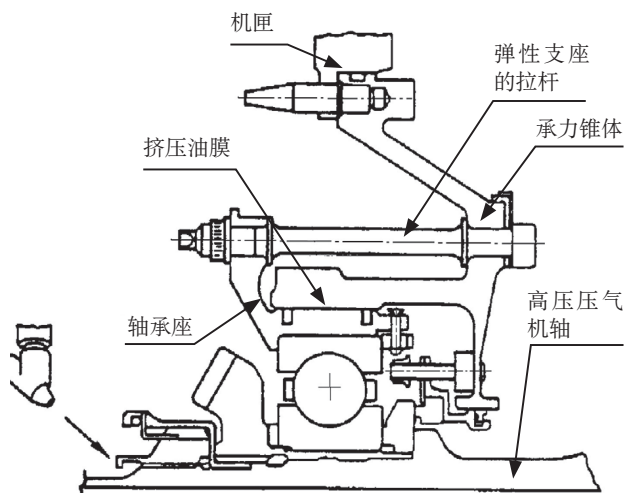


图5 PW4000主动锥齿直接装在高压压气机前轴上

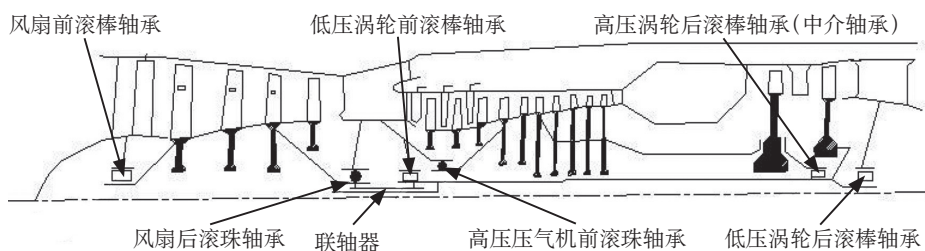


图6 AL-31F发动机转子支承方案

的设计。设计人员事后意识到，AL-31F的这种设计与F100发动机相比是典型的简单问题复杂化——不仅增加了零件与轴承数量，而且使发动机质量增加。

高压涡轮后端支承方式

F100发动机高压涡轮后端的支承方式采用了普惠公司的传统设计，即高压涡轮后端的滚棒轴承置于高压压气机与高压涡轮之间，通过燃烧室机匣将负荷外传，这种设计不仅使发动机多1个轴承腔，而且2级涡轮轮盘还是悬臂支承的，显然对高压转子的转子动力学特性不利。AL-31F的高压涡轮后滚棒轴承支承于低压转子上，成为一个中介轴承，高压涡轮后轴承的负荷通过低压转子后轴承外传，整台发动机因此可减少1个承力机匣与轴承滑油腔，不仅使发动机零件数减少，而且发动机长度也可减少。

在小涵道比涡扇发动机中，一般高压转子由两个支点支承，低压转子则由3个支点支承，即风扇转子支承于前后两个支点上，低压涡轮转子后端支承于1个支点上，其前端通过联轴器支承于风扇后支点处。以往的3支点的设计必须采用柔性联轴器，以适应3支点的不同心，即低压涡轮转子允许绕轴心偏离一个角度。但当高压涡轮通过中介轴

承支承于低压涡轮转子时，就不能采用柔性联轴器，否则高压转子后支点会颠簸，造成叶尖间隙极不均匀，并影响高压转子的动力学特性。为此，在3支点的低压转子支承方案中，必须采用刚性联轴器，这就需要提高机匣与转子的加工精度，保证机匣中3个轴承安装孔要在同一根轴线上，同时转子上装3个轴承的轴颈处应保证同心。

由于当时苏联对长度较长的低压涡轮轴的加工精度达不到要求，因此AL-31F的高压转子选择了目前普遍采用的1—0—1方式（如图6所示）。即高压压气机前采用滚珠轴承与高压涡轮后采用滚棒轴承；低压转子却采用了最原始的4支点方案，即风扇转子支承于前后两个支点上，低压涡轮转子也支承于前后两个支点上。由于低压涡轮转子是支承于前、后两个支点上，工作会非常平稳；高压转子后轴承支承其上，工作也较平稳。为了克服柔性联轴器对高压转子带来的问题，AL-31F采取的上述措施虽然解决了问题，但却在发动机中增加一套零件多、结构复杂的联轴器，增加了发动机质量。

AL-31F发动机的高压涡轮轮盘与涡轮前、后轴是通过多根螺栓连接起来的，即在轮盘轮毂上开有多个螺栓孔。由于这种在轮毂上开孔的设计比较简单，在早期发动机

上就曾采用过，但在轮毂上开孔会影响轮盘的强度与使用寿命，因此，20世纪70—80年代发展的发动机已不采用这种结构。F100发动机高压涡轮轮盘轮毂处向后有用于连接的向内的安装边，螺栓孔开在此安装边上，避免在轮毂上开孔，这种连接方式在近些年研制的发动机中被较多采用。

AL-31F的钛合金低压涡轮轴

为了减轻发动机的整体质量，AL-31F发动机连接低压涡轮与风扇间的低压涡轮传动轴前后分为3段。前、后段因为有传递扭矩的花键，由高强度的合金钢制成，中段仅传递扭矩与轴向力，由钛合金制成，3段间用径向销钉连为一体。这种以将细长的传动轴做成由3段不同材料制成的结构来减轻发动机质量的方式十分罕见。

结束语

AL-31F与F100同属于第三代战斗机的发动机，但投入服役的时间晚了10年。尽管AL-31F在结构上有一些奇思妙想的独特设计，但在整体设计水平上却落后于F100。而对比第二代战斗机用发动机，苏联的R-11F-300发动机在结构设计中的许多方面是优于美国J79发动机的。究其原因，笔者认为主要是受赫鲁晓夫“两弹打天下”战略思想的影响，飞机与发动机的资金缺乏、发展受限，以致在短短几年的时间，美苏间的航空技术能力与水平就拉开了差距，其中的教训值得深思。

航空动力

（陈光，北京航空航天大学退休教授，著名航空发动机专家）