

# 浅析航空发动机约束 / 载荷解耦结构设计

## Design of Constraint / Load Decoupling Structures

■ 牟园伟 / 中国航发研究院

航空发动机的一些结构受到性能、强度、振动、质量等多设计目标约束或气、固、热载荷耦合作用，设计难度加大。采用约束 / 载荷解耦结构设计可分散难点，化难为易，值得借鉴。

所谓发动机约束 / 载荷解耦结构设计是指一些受性能、强度、振动、质量等多目标约束或气、固、热载荷耦合作用的结构，通过将多重约束 / 载荷解耦，分开承载，最终实现结构设计要求的全部功能。航空发动机结构设计是航空发动机研制与使用中的一个重要环节，不仅要保持发动机性能稳定，还要具备很高的可靠性与耐久性。现代航空发动机结构设计理念是尽可能使发动机零件数减少、质量减轻、发动机结构和支承方案简单。为此，小展弦比、高增压比压气机叶片、整体叶盘、焊接转子、空心风扇叶片等一系列结构形式应运而生。随着发动机结构简化、质量减轻，发动机结构载荷也趋近强度极限，与发动机性能、可靠性设计要求产生了矛盾。如何综合性能、强度、振动、质量等多因素进行平衡设计，是现代航空发动机结构设计的新挑战。因此，在整机结构采用减重措施的前提下，可以在局部关键位置适当增加结构质量及零件数，以实现发动机更高的性能与可靠性。航空发动机约束 / 载荷解耦结构设计正是体现了这一思想。

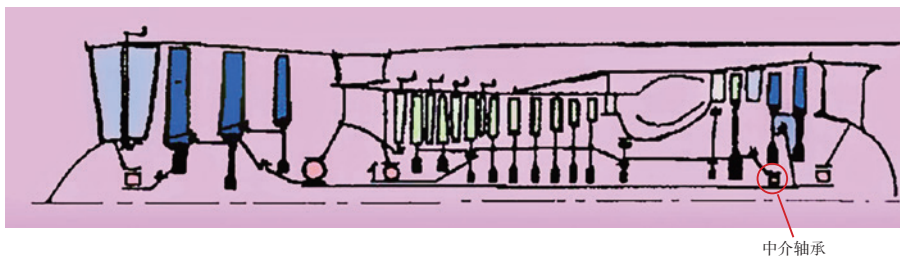


图1 F110 发动机支承方案简图

### 发动机典型结构解耦设计分析

#### 发动机高压涡轮转子后支点设计

GE公司的F101、F110等发动机采用了双转子5支点支承方案设计。其高压转子采用了1-0-1的两支点支承，高压涡轮后轴通过中介轴承支承于低压涡轮轴（如图1所示）。这种支承方式可使发动机承力构件减少，发动机长度也缩短。但这同时也带来一个新的问题，即将大直径的高压转子支承于直径较小的低压轴上，高低压转子既要控制自身的振动问题，又要防止低压转子的振动、变形对高压转子的影响。为了尽量减小这种影响，低压转子涡轮轴与风扇轴之间需采用刚性联轴器连接。该方案对转子、机匣的加工精度要求很高，如果不能保证足够

高的加工精度，高低压转子之间的耦合作用将带来整机振动、性能衰退等一系列问题。例如，D-30K系列发动机就曾多次出现金属屑超标、钛火、低压涡轮轴断裂等严重危及飞行安全的故障，主要原因是D-30K发动机的高低压转子间采用了中介轴承，要求低压转子、机匣各支点保持良好的同心度，但加工精度达不到要求，导致发动机故障频发。

欧美研制的发动机EJ200、GENx、LEAP、PW1000G等均采用了另一种支承结构——用高低压涡轮间承力框架取代中介轴承，支承高压涡轮后支点，以将高低压转子之间的相互作用隔离。取消中介轴承后，低压转子可以采用柔性联轴器，从而极大地降低了低压转子的加工精度要求。

涡轮间承力框架要承受热、固

耦合载荷作用，承力结构在高温燃气作用下极易变形且刚度、强度下降。在承力框架的设计中，采用了将受力件与受热件分开设计的思路，从而将热、固载荷分开承担。承力支板从低压涡轮空心导向叶片中穿过，有冷却空气对其冷却，导向叶片允许在轴向、径向与周向自由膨胀，提高了结构可靠性与耐久性。

### PW1000G发动机齿轮传动转子设计

传统航空发动机风扇、增压级与低压涡轮都是遵循同轴共转速设计。对于大涵道比发动机，风扇与增压级、低压涡轮转速耦合，严重制约了增压级与低压涡轮的性能。其原因是风扇直径远远大于增压级与涡轮直径，设计时受风扇叶尖速度限制，低压转子只能采取较低转速。为了满足总压比要求以及驱动风扇的功率需求，增压级与低压涡轮级数较多。发动机零件数及质量均大大增加。

基于风扇与增压级、低压涡轮转速解耦设计理念，PW1000G发动机增加了齿轮传动结构，使风扇转子与增压级、涡轮转子工作在各自的最佳转速。采用此设计方案，可以带来以下好处：风扇转速低，使风扇在较低的叶尖速度与压比下工作，提高风扇效率，降低噪声，提高叶片抗外物打击能力；增压级转速高，级增压比大，2~3级的增压级比传统设计的5~7级的增压级增压比还大；低压涡轮转速高，级功率大，减少了涡轮级数。

虽然齿轮传动系统增加了发动机质量，由于低压转子级数的减少较多，齿轮传动发动机总质量将低于传统设计发动机总质量。

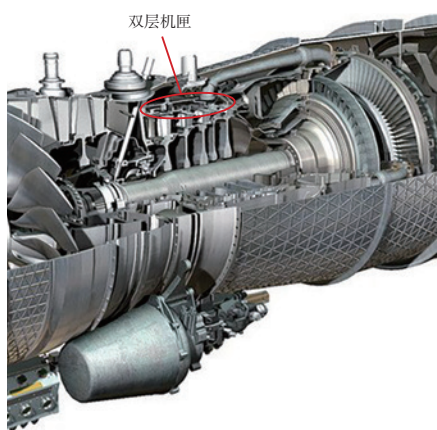


图2 EJ200发动机剖视图

### CFM56发动机高压压气机前支点设计

CFM56-3发动机高压压气机前支点由一个滚珠轴承支承，此轴承要承受径向载荷与轴向载荷双重作用，工作条件较差，故障率高。在后续改型发动机中，此支点改为一个滚珠轴承与一个滚棒轴承并列设计。其设计思路是将高压转子前支点径向载荷与轴向载荷解耦，由两个轴承分开承担。滚珠轴承承担轴向载荷，滚棒轴承承担径向载荷。既提高了轴承耐久性，又限制了转子回转运动，保持了叶尖间隙均匀。为了实现两种载荷分开承担，将滚珠轴承支承于弹性支座，而滚棒轴承支承于刚性支座。

### PW4000发动机风扇轴1号轴承位置设计

PW4000发动机低压转子滚珠轴承是设在风扇盘后的1号轴承。风扇盘后轴通过套齿联轴器与涡轮轴相连。风扇后轴既传递大扭矩，又传递大轴向载荷。如果1号轴承直接安装在风扇后轴，在原有载荷基础上，还会叠加径向载荷，将会给风扇后轴的安全性设计带来困难。基于载荷解耦设计理念，将1号轴承安装位置与套

齿位置沿轴向错开，位于风扇轴的后端。风扇轴在此处既不传递扭矩，也不传递轴向力，极大地提高了可靠性。

### EJ200、RB211发动机核心机双层机匣设计

发动机机匣在工作过程中既要作为传力构件，还要构成气流通道。EJ200、RB211发动机为了防止发动机性能随着使用时间的增长而衰减，采用了核心机双层机匣结构设计(如图2所示)。双层机匣中，外层作为承力结构，内层机匣作为气流通道的包容环。由于内层机匣不参与承力，发动机在受到各种载荷作用后，外层机匣可能发生变形，但内层机匣不会受到影响，始终保持良好的圆整度，因而能保持核心机中压气机与涡轮的叶尖间隙不会变化，性能保持较好。目前，大多数高涵道比发动机高压压气机的后面级都采用双层机匣设计，这种设计虽然增加了结构质量，但带来了发动机性能方面的极大收益。

### 结束语

发动机约束/载荷解耦结构设计是在发动机质量减轻、结构简化的大原则下，反其道而行之，在局部关键位置增加结构数量与质量，以换取性能、可靠性或整机质量的更大收益。该设计理念通过将约束/载荷解耦，分开承载，降低了耦合条件下结构设计的难度。在发动机设计、材料、工艺水平还未发展到能够直接承受耦合约束/载荷的阶段，解耦设计是一种化难为易、巧妙可行的设计方法。

航空动力

(牟园伟，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机总体论证与结构强度研究)