

GTF发动机关键设计分析

Key Design Analysis of GTF Engine

■ 梁晶晶 孙杨慧 谭智勇 / 中国航发商发

与传统的双轴直驱发动机相比，普惠公司的齿轮传动涡扇（GTF）发动机由于能够使风扇和低压涡轮在各自理想的转速下工作，具备高效率、低耗油率、低污染排放和低噪声等优点，因此，普惠公司将GTF发动机称作“改变行业游戏规则”的发动机。

随着商用发动机技术的飞速发展，低油耗、低污染排放、高安全性成为了涡扇发动机制造商竞相追求的目标，并在发动机设计和制造技术上进行了许多创新。普惠公司在风扇轴和低压轴之间引入了行星齿轮箱，并于2016年成功研制出了可配装干线飞机的齿轮传动涡扇（GTF）发动机PW1100G，标志着萌芽于螺旋桨飞机中的齿轮传动发动机从小推力逐步扩展到大推力，实现了发动机燃油效率的显著提升和噪声的大幅下降，同时，发动机的整

体结构设计也因齿轮箱的引入而发生了重大变化。

GTF发动机的沿革

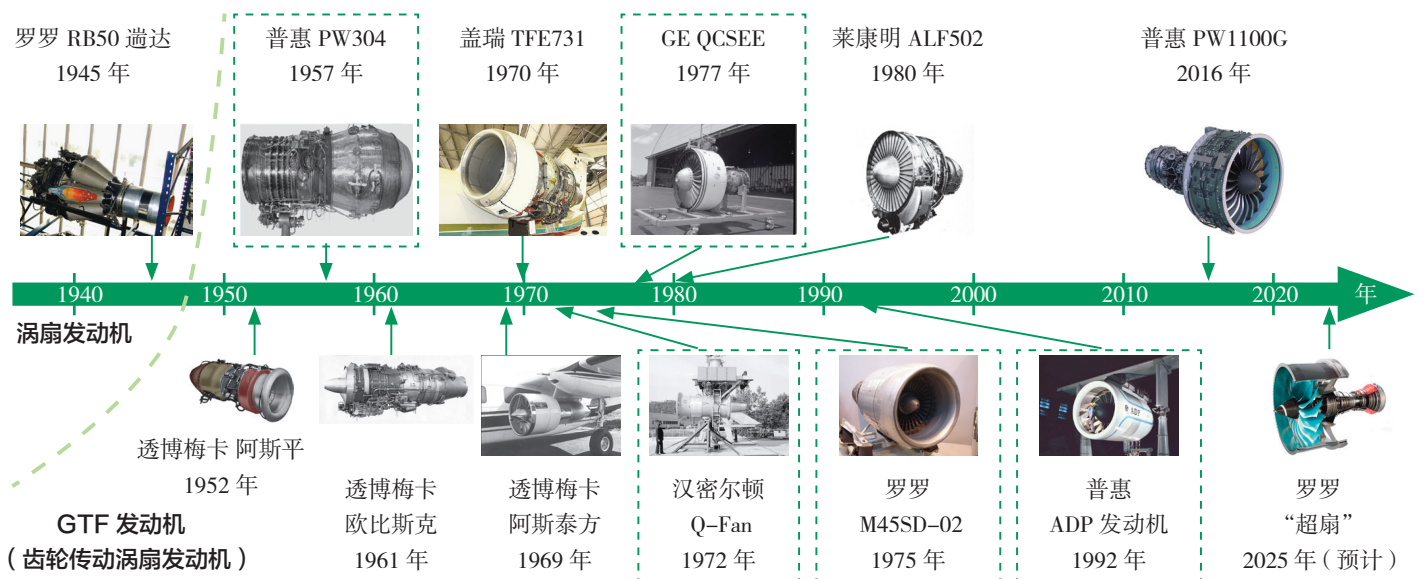
行星齿轮箱在航空领域的应用最早可追溯到活塞式发动机，之后被应用于涡桨发动机和涡扇发动机，GTF发动机的诞生有着一段曲折的发展史。

1951—2007年是GTF发动机的形成阶段，主要应用在小型发动机上。法国透博梅卡公司在大力研发涡轴发动机和涡桨发动机的同时，

在1950—1970年还陆续研制了3款采用行星齿轮箱的涡扇发动机：阿斯平（Aspin）、欧比斯克（Aubisque）和阿斯泰方（Astafan）。由于阿斯平只是试验用发动机，所以欧比斯克被认为是世界上第一台GTF发动机。

美国盖瑞（Garrett）公司于1970年成功研制出了TFE731发动机，主要装机对象是军机和公务机，也是第一台应用于公务机的GTF发动机。

GE公司与美国国家航空航天局（NASA）于1973年共同出资研究开发洁净紧凑试验发动机（QCSEE），



注：虚线框中为验证机项目，并未投产。

图1 GTF发动机技术的发展历程

开发了一系列高新技术并应用于风扇叶片、行星齿轮箱、涡轮等部件之中。在NASA 1977年发起的高效节能发动机(E³)研究计划中,GE公司也尝试在低压涡轮和风扇转子之间增加行星齿轮箱,但由于行星齿轮箱结构过于复杂并且维护费用非常高,用户对这种结构形式并不欣赏,因此GE公司开始更专注于核心机技术的发展与应用。

普惠公司从1957年开始在其研发的氢燃料涡扇发动机中引入了行星齿轮箱,但由于液氢的储存、运输和安全性要求远超当时的技术水平,项目最终宣告失败。20世纪80年代,在开式转子发动机设计的热潮中,普惠公司继续尝试将行星齿轮箱应用于涡扇发动机的设计之中。1998年,普惠公司尝试将其设计的行星齿轮箱应用到PW8000发动机的研制之中,但限于齿轮箱技术的高难度和持续高昂的资金投入需求,10年后,PW8000的研制也宣告失败。在这一时期,研制成功并投入

使用的GTF发动机大多数配备了军机和公务机,推力和涵道比都较小,能够用于商用的GTF发动机却由于应用准备不足、维护成本较高、技术难度大等问题只停留在了验证机阶段,未能投入商业化的生产和运营。

为适应绿色航空的要求,普惠公司在2008年决定再次发展GTF发动机,并改称为PW1000G系列。目前,普惠公司研制的PW1000G系列发动机已经交付了3种型号(PW1100G、PW1500G、PW1900G),其中2016年交付的PW1100G发动机被认为是第一台应用于干线飞机的GTF发动机。与之前的小型GTF发动机相比,PW1000G系列发动机在推力和涵道比方面都有显著的提升,其低油耗、低噪声的优良特性也在商用航空发动机行业中掀起了一轮GTF发动机的研发热潮。罗罗公司在融合一系列颠覆性技术的“超扇”(UltraFan)发动机中采用了行星齿轮箱,以实现节能、减排和降噪的

目标,其最大推力可达到440kN,涵道比预计能达到15:1。

GTF发动机的结构设计 关键问题

与传统的双轴直驱式发动机相比,GTF发动机的主要特征是引入了行星齿轮箱,实现了风扇轴与低压轴的转速分离,能在各自的最佳理想转速下工作。但行星齿轮箱的引入也对GTF发动机的整体结构布局产生了深远的影响,尤其是大量新结构和新技术的应用。因此,在GTF发动机的总体结构方案设计中,需要高度重视组件之间的综合匹配,从而降低发动机的故障率和运营风险。

转子支承方案

现代双转子风扇直驱式大涵道比发动机通常采用3支点方案,即在风扇端设计2个支点(滚珠+滚棒支承),在低压涡轮端设计1个支点。这种设计方案中,风扇、低压压气机和低压涡轮之间的“拔河”作用会抵消大部分轴向力。由于GTF发动机的齿轮箱只能传递扭矩而不能传递轴向力,以上抵消轴向力的设计思路无法在GTF发动机上实现。因此,GTF发动机的低压系统需要重新设计支承方案来平衡风扇产生的巨大轴向力(4种具有代表性的GTF发动机分别采用的风扇转子和低压转子支承方案详见表1,典型的GTF发动机轴承位置和承力框架如图2所示)。

传力路径

传力路径的设计是由支点位置决定的,支承方案基本约束了承力框架的数量和位置,同时也确定了支点处外传力的传导路径,因此不同的GTF发动机的传力路径设计也

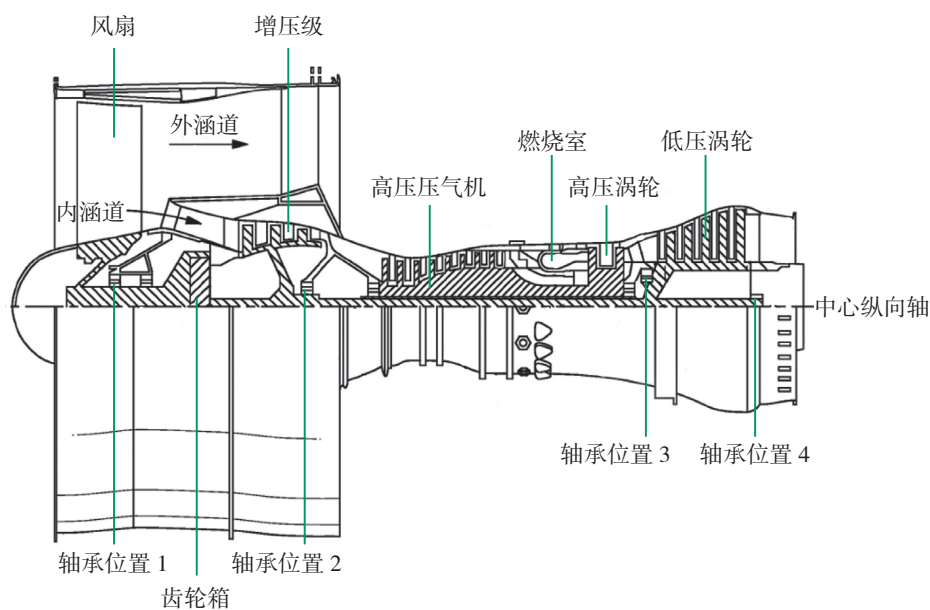


图2 GTF发动机典型的轴承位置

表1 风扇和低压转子支承方案与承力框架

型号	ALF 502	TFE 731	PW8000	PW1000G 系列
风扇转子支承方案	一排滚棒轴承加一排滚珠轴承的支承方案		双排圆锥滚子轴承支承方案	
低压转子支承方案	无增压级，将双排滚珠轴承置于1级低压涡轮和2级高压涡轮之间	在增压级的前端设置滚珠轴承支承，在低压涡轮的后端设置滚棒轴承支承	在增压级的后端设置滚珠轴承支承，并采用轴颈抬高轴承的外径，以提高其承载能力承受轴向力	在增压级的前端设置滚珠轴承支承，在低压涡轮的后端采用2个滚棒轴承支承，提高低压转子的弯曲频率和抗变形能力
承力框架数量及位置	3处，风扇后端+高压压气机和高压涡轮之间+低压涡轮级间	3处，风扇后端+高低压压气机之间+高压涡轮后	4处，风扇后端+增压级后端+高压涡轮前端+低压涡轮后端	4处，风扇后端+增压级前端+高压涡轮后端+低压涡轮后端

有所不同。除了PW8000发动机之外，其他3种GTF发动机均将风扇后支点、齿轮箱、增压级前支点支承于同一个承力框架下，这种设计能够使风扇和低压转子的轴向力在静子上得到平衡，从而减小承力框架所受的轴向载荷中。

行星齿轮箱的设计

行星齿轮箱（如图3所示）设计的第一步就是确定最佳的齿轮传动比，使风扇和低压涡轮都能在各自的最佳理想转速下工作。行星齿轮箱的设计方案有两种，即恒星系统和行星系统。在恒星系统中，一般由固定轴线的太阳轮作为主动轮带动齿圈转动输入动力，行星轮则作为从动轮输出动力；在行星系统中，一般由固定在行星架上的行星轮作为主动轮输入动力，太阳轮则作为从动轮输出动力。恒星系统适合于1.5 ~ 3.0 : 1之间的减速比，也适用于需要在风扇和低压涡轮之间反向旋转的情况；行星系统适合于3.0 ~ 5.0 : 1之间甚至更高的减速比，并且适用于风扇和低压涡轮需要同向旋转的情况。PW1000G系列发动机

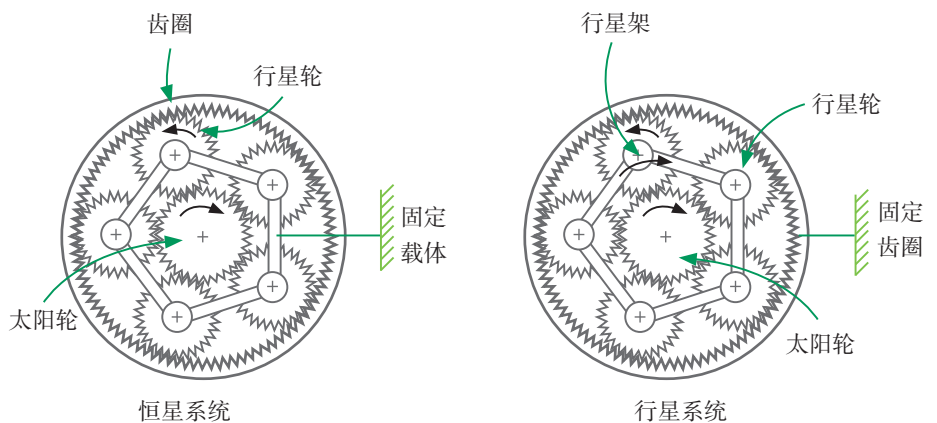


图3 行星齿轮箱的设计方案对比图

采用的就是恒星系统，风扇和低压涡轮的反向旋转设计使其具有良好的气动性能。

GTF发动机的行星齿轮箱设计应满足以下要求：一是大功率，以达到大推力发动机的工作要求；二是紧凑高效，以保证较高的齿轮传动效率；三是高可靠性，以应对不同工作环境甚至极端情况下的挑战；四是散热和封严设计，以解决齿轮箱发热量过大、齿轮箱和转轴之间的不同心和振动等问题；五是安装隔振，以保护齿轮箱不受发动机运行中的振动和挠曲影响。

低速风扇

GTF发动机和传统涡扇发动机的风扇部件在结构上的区别不大，主要的关注点有：GTF发动机的涵道比和风扇直径增大，会导致风扇叶片的质量增大，因而需要在设计选材等方面进行补偿，同时由于风扇转速下降、离心载荷变小，也有利于选用低密度的铝合金和复合材料；风扇叶片的叶尖速度减小，做功能力下降，因此需要采用先进的设计技术设计出满足做功需求的新型叶片。

高速增压级

传统大涵道比涡扇发动机的增

压级通常采用部分盘鼓结构，即在最后一级转子上设置一个盘心孔直径较大、厚度较薄的盘，其余部分则只有鼓而无盘，低压轴的前端与风扇盘相连。与传统的大涵道比涡扇发动机相比，GTF发动机中增压级转速提高、离心力的增大，传统的部分鼓式结构已无法承受增大的离心载荷，因此需要采用完全的盘鼓混合结构。

在叶盘连接方面，GTF发动机由于低压转子转速增大、离心力增大，需要采用轴向燕尾形榫头来增大对叶片离心力的承受能力。因此，GTF发动机的增压级叶盘结构更接近低压压气机。

GTF发动机增压级只采用一个轴承支承，需要在设计中采取措施提高轴承的承载能力，并加强增压级局部的刚性以提高其抗变形能力。此外，还需在设计中通过动力学分析来选取合理的支承位置，将高速下的振动和变形降到最低。

高速低压涡轮

大幅提高低压转子的转速提升了涡轮的做功能力，相比传统的风扇直驱式发动机，GTF发动机的低压涡轮级数显著减少。此外，相对于传统低压涡轮叶片，GTF发动机的高速低压涡轮叶片具有3个显著特点：小叶冠、锥形身和厚榫头，可以减小叶片的离心力使离心载荷沿叶身的分布更加均匀；将叶片设计成由叶根至叶尖逐渐变细的锥形结构，可以减轻叶片质量；用纵树形榫头连接叶根并且加长榫头的轴向厚度，可以提高叶根的承载能力。

主要故障及解决方案

自大推力的GTF发动机投入商业运

营以来，其特有的结构开始接受实际使用的检验。在解决故障的过程中，GTF发动机的相关关键设计也日臻成熟。

行星齿轮箱故障

2019年6月28日，美国联邦航空局（FAA）发布了一条适航指令（FAA-2019-0393）：因为已有多起发动机的空中停车（IFSD），要求普惠公司更换PW1100G的行星齿轮箱和发动机电子控制器（EEC）的软件版本。相关调查报告表明，行星齿轮箱内部的一体化驱动发电机（IDG）/主滑油泵（MOP）驱动齿轮在发动机运行到特定转速时会产生共振，在高周疲劳和共振的共同作用下导致驱动齿轮出现断裂。为此，普惠公司重新设计了行星齿轮箱的IDG/MOP驱动齿轮，采用了轴向更厚的齿轮腹板、径向更厚的齿轮缘并且减小了齿尖压力，从而提高了齿轮的耐久性和可靠性。此外，普惠公司还用一套全权限数字式电子控制（FADEC）软件替换了原有的EEC软件，优化了发动机的控制系统以缩短共振的时间，从而降低了驱动齿轮断裂的可能性。

高压转子的热弯曲问题

普惠的GTF发动机在刚投入运营时出现了高压转子的热弯曲问题。为此，普惠公司首先把起动间隔时间增加到了7min，从而保证发动机内部温度场均匀^[1]。但该措施引起了用户的强烈不满，普惠公司随后采取了以下改进措施：在3号、4号的支点处加装了弹性支座，以降低发动机的振动值；在第8级的叶尖上涂上了一层立方氮化硼（CBN），一旦它与围绕叶尖的环形耐磨衬环发生磨碰，就会在耐磨衬

环上擦出一条与叶片宽度一致的槽道，即可减少漏气损失；升级了FADEC的软件，使发动机的起动间隔时间缩短至200s（2016年12月），与V2500发动机的起动时间大致相同。

轴承腔封严处泄漏

截至2017年年初，印度靛蓝航空公司累计订购了约430台PW1100G发动机。2016年1月—2017年2月，靛蓝航空的空客A320neo飞机共更换了42台PW1100G发动机，其中有28台是由于3号轴承腔的封严处泄漏使金属微粒进入了滑油腔，最终激发了滑油碎屑探测器报警。3号轴承腔的封严处泄漏是由于FADEC的程序存在问题，PW1100G发动机中所用的端面石墨密封装置在一定高度上密封处气体压力不足，使端面石墨不能和相应的密封面紧密接触，才导致一些金属碎屑进入滑油腔。因此，普惠公司用刷封替代了端面石墨密封，并于2017年4月完成了此项改进。

结束语

在经济因素的驱动和航空业可持续发展的大背景下，GTF发动机未来将向着更高的涵道比、更大的风扇尺寸和更先进的涡轮技术等方向发展，并且将与混合电推进技术相结合，以持续聚焦低油耗、低噪声、低排放和高可靠性的目标。

航空动力

（梁晶晶，中国航发商发，工程师，主要从事航空发动机安全性分析和情报研究）

参考文献：

- [1] 曾涛.民用航空发动机转子热弯曲问题分析[J].航空动力,2019(3).