

普惠的齿轮传动涡扇发动机的几起故障分析

Analysis to PW1000Gs' Failures

■ 陈光/北京航空航天大学

与其上一代发动机相比，普惠公司新推出的齿轮传动涡扇（GTF）发动机的性能优异。但在服役前后，各类故障频频发生，令人对其可靠性产生担忧，也令空客等飞机制造商及其用户感到比较“头疼”。

齿轮传动概念的由来

大涵道比涡扇发动机自20世纪70年代初投入使用以来，一直存在风扇转速较低造成低压压气机（亦称增压级）与低压涡轮在不利转速下工作的窘境，这种问题随着涵道比的加大愈发凸显。

受风扇叶片榫根与风扇轮盘强度所限，一般风扇叶片的叶尖切线速度不应超过400~450m/s，在风扇直径较大的情况下，只能选择降低风扇转速。因此，与风扇转子连接的低压转子（低压气机和低压涡轮）只能在较低的转速下工作，而为了满足驱动风扇的功率需要以及发动机总体性能要求的需要，只得增加低压压气机与低压涡轮转子的级数。涵道比越大，低压转子不仅级数多，而且效率也低。

为了解决上述困境，设计人员考虑在风扇转子与低压转子之间，安装一套减速器（如图1所示），使风扇转子可在较低转速下工作，而低压转子则在较高转速下工作，这就是齿轮传动涡扇发动机（GTF）的工作原理。

普惠公司早在20世纪90年代后期就推出过推力为115~162kN的齿轮传动涡扇发动机——PW8000。

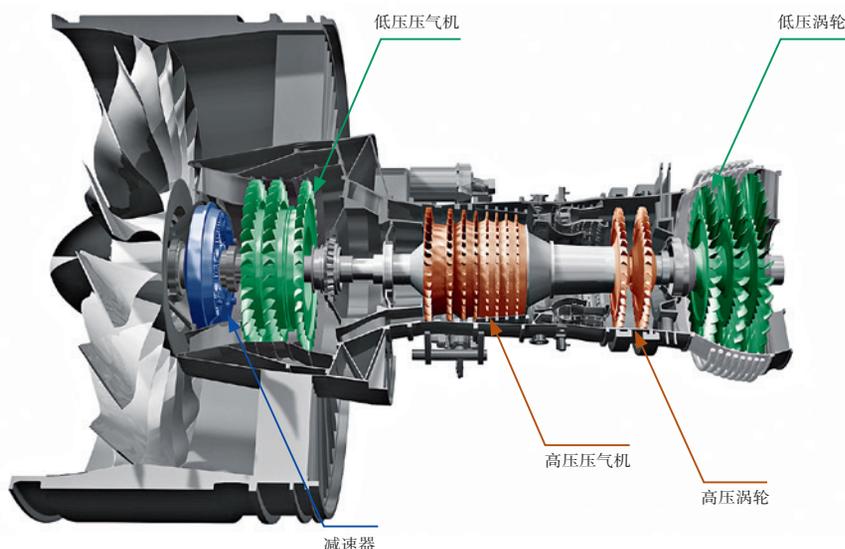


图1 齿轮传动涡扇发动机

当时无适合的飞机可以选装，该型发动机在提出后不久便悄无声息了。2007年，普惠公司再次以齿轮传动涡扇发动机——GTF之名，推出齿轮传动的涡扇发动机，被日本三菱重工的70~90座级的三菱支线飞机MRJ选作唯一动力装置，发动机的推力为66.5~75.7kN，计划2014年投入使用。由于有了用户，普惠公司加紧了GTF的研制工作，并宣称GTF将是“改变游戏规则”的发动机。2008年7月，普惠公司在英国范堡罗航展上宣布，GTF发动机被正式

命名为“Pure Power PW1000G”，即“静洁动力PW1000G”型发动机。

PW1000G的涵道比为10~12，采用了普惠公司特有的泰龙（TALON）燃烧室技术，并在压气机、涡轮、材料工艺、发动机监测和控制上进行了重大的技术改进，制造出了环保、低油耗、高效、低维修成本的新一代发动机。与现役主流发动机相比，油耗降低12%以上，氮氧化物（NO_x）的排放减少50%。噪声比国际民航组织（ICAO）规定的第四阶段的要求低20dB等。据普惠公司

计算，装两台PW1000G发动机的飞机，每架飞机每年可以减少1000t的二氧化碳(CO₂)排放。

目前，PW1000G系列发动机有PW1100G(A320neo)、PW1200G(MRJ70/90)、PW1400G(MC-21)、PW1500G(庞巴迪C系列)、PW1700G(E-Jets E2 175)、PW1900G(E-Jets E2 190/195)共6个型号，已有多型PW1000G发动机投入商业运营，但在投入运营前及运营中，PW1000G发生了数起影响较大的故障。

PW1500G在地面试车时发生涡轮盘爆裂非包容故障

PW1500G在2013年取得适航证后，装在庞巴迪C系列的CS100飞机上进行取证试飞。2014年5月29日，安装在CS100左翼的PW1500G在地面检验性试车中，第1级低压涡轮盘爆裂甩出发动机，造成一起严重的非包容故障。

对故障发动机检查分析发现，是从涡轮间承力框架后、向低压涡轮第1级轮盘吹冷却空气的引气口(如图2所示)喷出了高温燃烧气体，像喷灯一样对着第1级低压涡轮轮盘

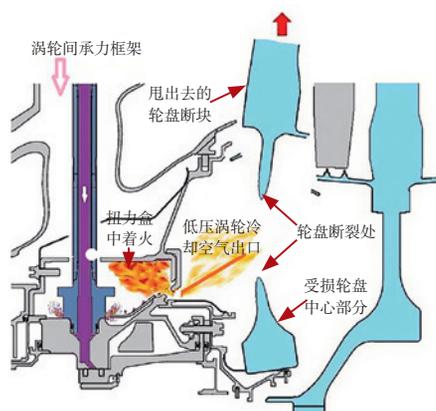


图2 一股燃烧的气体喷向1级涡轮轮盘

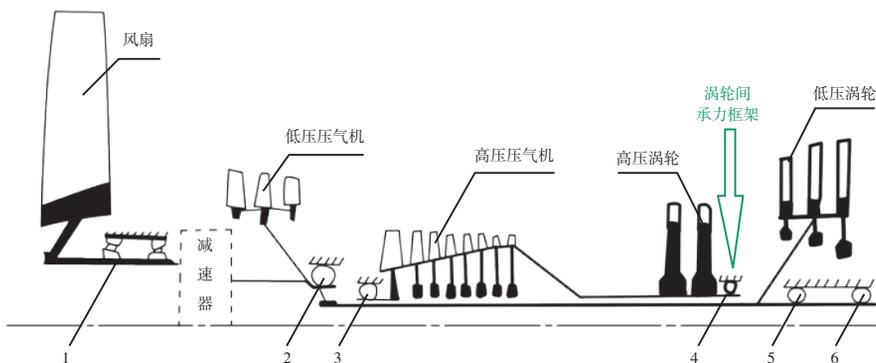


图3 PW1000G转子支承简图

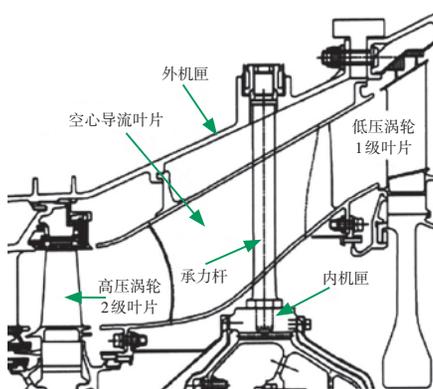


图4 涡轮间承力框架示意图

的轮毂处喷火，结果在轮盘的轮毂处形成一周的烧熔断口，轮盘外缘部分在离心力作用下破裂，击穿机匣甩离发动机，而轮盘的中心部分像一个面包圈似的残留在低压涡轮轴上，这种故障模式极为罕见。

为了说明火焰从何而来，可先对此处结构做进一步分析。图3为PW1000G转子支承简图，由图可见高压转子后支点(4号)是位于涡轮间承力框架中的。图4为涡轮间承力框架简图。涡轮间承力框架是位于高低压涡轮间的将高压转子后轴承(即4号轴承)负荷传至外机匣的结构，它是由外机匣、内机匣、连接内外机匣的承力杆以及套在承力杆外面的空心导向叶片组成，4号轴承

座固定在内机匣上。

PW1000G的涡轮间承力框架(如图5所示)中，内机匣做成环形的盒状结构，普惠公司称此机匣为扭力盒；在内外机匣间，装有14片空心导流叶片，其中有7片有传力的承力杆；滑油供油管、回油管与通风管以及对低压涡轮进行冷却的冷却空气导管等则从另外几片空心导流叶片中通过。

对4号轴承供滑油的供油管见图5，供油管插入到扭力盒上的油孔中，在供油管的端头与油孔接触处，装有特氟龙(Teflon)封严圈。对低压涡轮冷却的流路见图6，来自高压压气机4级处的空气通过一个承力杆中心导管被引入扭力盒中，冷却空气由扭力盒后端的出气口对着第1级低压涡轮轮盘吹出。

普惠公司在PW1500G的试车指南中规定，停车前必须在低于70%高压转子转速(N₂)下再至少运转10min，以冷却发动机，使主轴承腔中的滑油不结焦，并减少启动时转子的弯曲。再次启动发动机时，需停车8h且发动机排气温度低于90℃。在停车后再次启动发动机，则须在20min内多次冷转发动机，每次90s，直到排气温度低于90℃；或

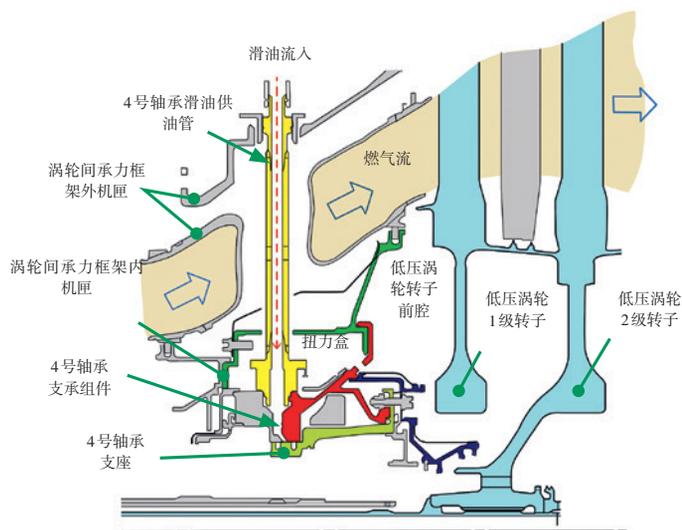


图5 PW1000G 涡轮间承力框架油路示意图

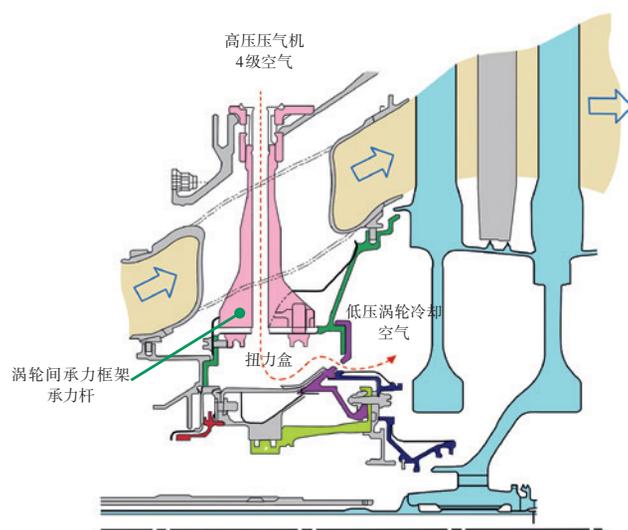


图6 PW1000G 涡轮间承力框架冷却气流示意图

者冷转发动机5次，在 N_2 为0后的5min测量排气温度，如低于 90°C ，可以再次起动发动机。

发动机工作时，4号轴承既承受高速旋转产生的摩擦热量，还要承受通过轮盘、轴等传来的涡轮叶片热量，这些热量由滑油带走，确保轴承能正常工作。但是，如果发动机停车前不经过一段时间的冷却（低转速下运转），直接从大功况下停车，这时涡轮叶片处于极高的温度，其热量大部分会经轮盘和轴传至轴承，并通过轴承座传至扭力盒，使扭力

盒温度升高。其结果不仅会使轴承腔中滑油产生结焦、轴承游隙减少甚至成负游隙，还会使高压转子产生热弯曲等不利影响。

在5月26日发生故障前的一次试车中，发动机在78% N_2 下运转后，只进行了19s的冷却便停车，并在50min后再次起动发动机，造成扭力盒温度升高较大，使滑油进油管的特氟龙封严圈的工作温度达到 190°C ，大大超过它所允许的工作温度（大于 162°C 时变形，大于 180°C 时永久变形），封严圈失效，滑油向

外泄漏，如图7所示。另外，由于滑油导管在穿过扭力盒外壳时，外壳与导管间有一定的缝隙，因此扭力盒腔与空心导向叶片的内腔是连通的（参见图5），导向叶片内腔的热空气进入扭力盒腔，同时，冷却低压涡轮的气流是从第4级高压压气机处引来的温度较高的气流也进入了扭力盒腔（参见图6），在这二股热气流的作用下，导致泄漏的滑油自燃，形成连续不断的火焰吹向第1级低压涡轮盘，如图8所示。由于此次试车时间不长，所以轮盘虽已受损

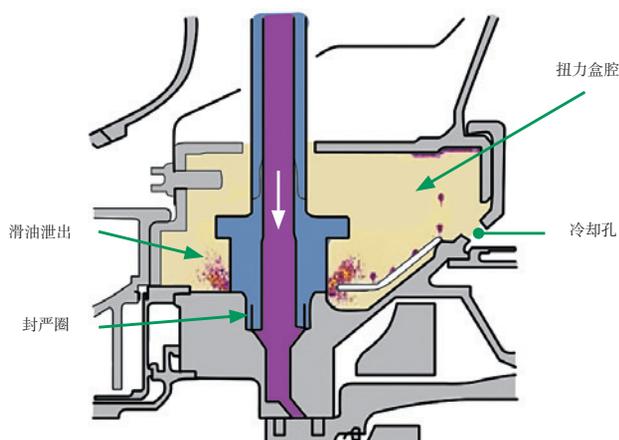


图7 封严圈失效滑油外泄

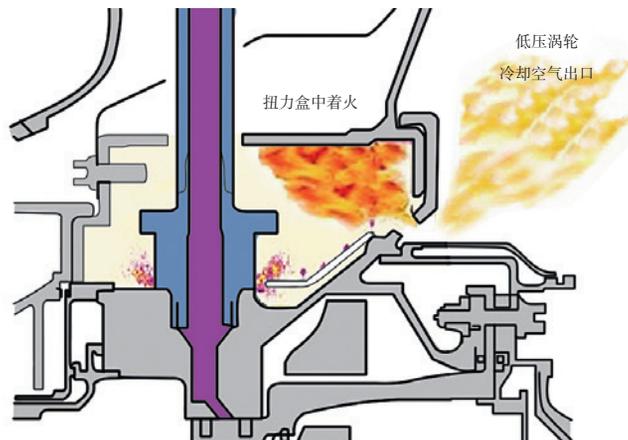


图8 泄漏的滑油自燃形成连续的火焰

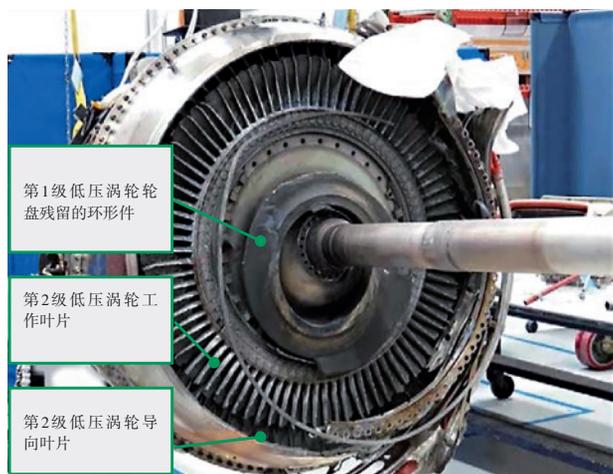


图9 残留的低压涡轮部件



图10 外机匣的撕裂裂缝



图11 轮盘断块

但未破裂，只是滑油消耗量增大。

在5月29日试车中，当发动机转速保持在74%N1近6min时，第1级低压涡轮的轮毂在连续的火焰喷射作用下失去强度，随后在离心力作用下被甩出，参见图2，其碎片打坏飞机多处结构，幸好无人员伤亡。

由图9残存的低压涡轮部件可见，第1级轮盘仅剩类似面包圈的中心部分，第2级低压涡轮导向叶片仅剩极少的残件，第2级低压涡轮工作叶片与轮盘基本完整。由图10的发动机外形照片可见，在第1级低压涡轮处，机匣被甩出的碎片撕裂出一条近340°的环形裂缝。图11为甩离发动机的第1级低压涡轮轮盘断块。

普惠公司在总结这次故障原因后，采取了以下几项措施：停车前发动机需在慢车状态下运转20min以冷却发动机；在滑油管封严处增加金属封严垫；在低压涡轮前腔装热电偶监测腔温；每天飞行后检查滑油消耗量；封严圈使用温度限制在148℃；每天进行孔探检查等。在生型发动机中，已将供油管与冷却

气流分开。

这次低压涡轮盘爆裂故障使得C系列飞机投入商业运营的计划从2014年延期至2016年7月。

PW1100G服役初期的故障

装PW1100G的A320neo于2016年1月20日投入商业运营。在使用初期遭遇两个问题：其一是全权限数字式电子控制（FADEC）系统过多地在驾驶舱显示屏幕上发出虚警，干扰了飞行员的注意力，这个问题在进行软件更新后得到解决；其二是高压压气机转子的热弯曲问题。

当发动机停车时，如果发动机的冷却（或慢车状态下运转）时间太短，发动机内部仍处于高温状态，而且发动机上部的温度会高于下部的温度，这种高压转子上下温度不一致，造成了转子上下热膨胀不一致，导致出现热弯曲。如果短时间停车再次起动发动机时，热弯曲不仅会造成发动机振动，而且叶尖会刮蹭机匣内衬，特别是第8级叶片（热弯曲时它处于弯曲的最大处），使发

动机效率降低等。因此，普惠公司采取将起动时间加长到7min，使发动机逐步升温度，消除热弯曲效应，但这种措施引起了用户的不满。

为此，普惠公司采取了三项改进措施：在3号、4号支点处加装弹性支座，以降低振动值；在第8级叶尖处涂上一层极硬、极尖的立方氮化硼（CBN），当它与围绕叶尖的环形耐磨衬环相磨碰时，会在耐磨衬环上擦出一条与叶片宽度一致的槽道，能减少漏气损失。另外，对FADEC的软件进行了相应的改进，使发动机的起动时间缩短至300s（2016年6月）、200s（2016年12月），这个起动时间已基本等同于V2500发动机的起动时间。

PW1100G的故障使航空公司在短时间内频繁换发

印度靛蓝（IndiGo）航空公司是A320neo的大用户，共订购了430架（其中25架为A321neo）。截至4月30日，该公司接收了32架A320neo。由于印度天气炎热干燥、潮湿、污染和空气中盐分较多的原因，对发

动机的工作造成了较严重的影响。自2016年年初到2017年2月24日的13个月中，靛蓝航空公司的A320neo换发42台，其中28台是由于3号轴承腔封严处泄漏使金属微粒进入滑油腔，激发滑油碎屑探测器报警；13台由于燃烧室火焰筒的进气孔被盐分堵塞使燃烧室性能恶化，下降25%（通过孔探仪查出的）；1台是由于主减速器故障（滑油碎屑探测器报警）。

3号轴承腔封严处原来采用了端面石墨密封装置，这种密封装置封严效果好，普惠的PW4000发动机主轴共有7处须封严，其中6处是采用端面石墨密封，工作状态一直良好。但在PW1100G中所用的端面石墨密封装置中，由于FADEC的程序问题，在一定高度上密封处气体压力不够，使端面石墨不能和与其相配的密封面紧密接触，造成一些金属碎屑进入滑油腔。报道称，普惠现采用刷封替代端面石墨密封，于2017年4月完成此项改进。

对于火焰筒通气孔被堵塞的问题，普惠对火焰筒进、排气处增加了通气孔的数目，几乎比原设计增加了一倍，于2017年9月完成改进。

在此期间，美国精灵（Siprit）航空公司的5架A320neo由于3号轴承腔滑油碎屑探测器报警而停飞。另外，该公司的A320neo还由于在高空中放气阀会结冰卡滞，要求飞行员将飞机保持在9100m（30000ft）高度以下飞行，印度的A320neo也遇到此类问题。

在过去的30年中，由于发动机技术水平的提高，发动机故障造成的换发次数约为每年25次，但是印度靛蓝航空公司32架A320neo所用

的PW1100G发动机，从2016年5月到2017年11月间却换发69次，平均每周换发一次，也算是创造了一项世界纪录。

新改进的高压压气机后篋齿封严件存隐患

2017年12月，普惠公司认为第8级高压压气机盘后锥轴上的篋齿封严环的性能未达到预期的水平，而进行了改型。从发动机生产序号为ESN P770450及其后的发动机均采用了这种改型的封严环。

但很快发现，这种新的封严环易掉块，封严环失效，发动机易喘振且造成空中停车。例如，由2018年2月24日至3月12日，印度的靛蓝航空公司发生两起、GoAir航空公司发生一起空中停车。鉴于这一故障对飞机的安全飞行影响较大，欧洲航空安全局（EASA）于2018年2月9日发布了紧急适航指令（AD 2018-0041-E），所涉及的是生产序号为P770450以及其后的发动机，指令中规定：如果一架飞机上装有两台受影响的发动机，在此指令生效后只能再飞3次起降就应停飞；如果一架飞机上装有一台受影响的发动机，此指令生效后，除1次起降外，不能再飞双发延程飞行（ETOPS）。中国民航局（CAAC）于2月11日发布了CAD2008-A320-05号适航指令，指令中转发了EASA紧急适航指令的内容。空客公司在EASA发布上述指令后，决定暂停接受PW1100G发动机。

在EASA发布上述指令后，印度民用航空管理局（DGCA）考虑到前述的三次空中停车事件，于3月13日决定将装有受影响发动机的11架A320neo全部停飞，约占A320neo全

部服役飞机113架中的10%。其中8架为靛蓝公司的，3架为GoAir公司的。在民用航空史中，一次停飞全机群中十分之一的飞机，实属罕见。

普惠公司共交付了98台装有这种篋齿封严件的发动机，其中55台交付给空客公司，有43台已装在航空公司运营的飞机上，印度有12架A320neo受影响。普惠公司为了解决这一问题，临时恢复了改进前的结构，这一改动耗费了5000万美元。

结束语

普惠公司“改变游戏规则”的新款齿轮传动涡扇发动机的性能的确比其上一代发动机要好很多，这也是多款新型客机采用它的原因。但自服役起，不断发生故障，仅印度靛蓝航空公司一家，在一年半时间内就换发67次，平均每周一次，也算是创造了新发动机投入运营时的新纪录。因此，在研制新型发动机时，不能单纯追求性能，而要性能、可靠性与维修性三性并举，这是20世纪美国普惠公司在研制第三代战斗机用F100发动机过程中总结出的重要经验，也成为军民用发动机研制时必须遵循的原则。普惠公司是世界三大航空发动机公司之一，从军用发动机到民用发动机研制过多型，设计经验、使用经验与排故经验都比较丰富，但在GTF研制中依然麻烦不断。由此可以看出，航空发动机的设计中，没有大问题与小问题之分，任何会引起发动机性能或可靠性的问题，都得认真对待，这也是我们应从GTF发生的故障中汲取的经验教训。

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。）