

GENx发动机的故障分析

Analysis to the Failures of GENx

■ 陈光

GENx发动机在不到8年的服役时间里，较为严重的故障时有发生。通过对这些故障的分析，可以使我们更深刻地认识到航空发动机研制的复杂性，也可算是提供一些前车之鉴。

在GE90的基础上，GE公司为波音787“梦想飞机”和波音747-8“洲际飞机”研制了新一代高涵道比涡扇发动机GENx。由于采用了更高的涵道比(10.0)和更高的总压比(45.0)，以及最新发展的一些先进技术，GENx发动机兼具低油耗、低污染和低噪声的特点。其巡航耗油率比用于空客A330的CF6-80E1A4(1990年投入使用)低15.4%，比用于波音777的GE90-94B(1995年投入使用)低6.9%。

锥形齿轮共振造成空中停车事件

2016年8月6日，捷星航空公司(Jetstar Airways)的一架波音787执行从日本东京飞往澳大利亚黄金海湾的JQ12航班任务，机上有乘客309人、机组成员9人。在飞行2h后，飞机的发动机指示与机组报警系统(EICAS)显示右发2号发电机(每台发动机装有两台交流发电机)出现故障，机组立即断开此发电机与附件传动机匣(AGB)的连接，同时启动了辅助动力装置(APU)向飞机供电系统供电。约30min后，在看到右发滑油油量低和油压低的指示后，飞行员将右发关停，然后将飞机用左发飞到距离370km的关岛机场，飞机安全着陆，无

人员伤亡，这次事件被定义为一次空中停车事件。

当打开发动机短舱后，检修人员发现发动机下部集有大量滑油，在滑油管路中发现大量金属屑末，发动机被拆下并送回GE公司进行检查。检查人员通过滑油屑末检测器记录发现，飞行1h后屑末探测器开始记录屑末数，当飞行员断开右发2号发电机时有7个屑末，过了42min后，有8个屑末，并发出右发屑末过多的警示，再过4min后屑末达到11个且滑油大量泄漏。EICAS发出警示，飞行员关掉故障发动机。

在大涵道比涡扇发动机的附件传动系统中，中央传动部分(IGB)通过传动杆将扭矩传到换向齿轮箱(TGB)中的主动锥形齿轮(锥齿)，

将扭矩传到附件传动机匣中。这次故障就是换向齿轮箱中的主动锥齿(或称伞齿轮)发生共振引起的。在检测中，维修人员发现TGB破裂，其中的锥齿损坏，如图1所示；滑油滤被金属屑末堵满，滑油屑末探测器(又称磁堵)上吸满金属屑末，如图2所示。



图1 换向齿轮箱与锥齿受损情况



图2 吸满屑末的磁堵与被屑末堵住的油滤

与一般正齿轮相比，锥齿做得较厚实，通常不容易出现共振引发的故障。尽管如此，并不能排除在某些特定情况下，出现共振造成严重后果的事件。

捷星航空这次锥齿共振造成空中停车事件并不是GENx发动机的第一次——在此之前已出现过7次，相比之下，GE90发动机在投入运行的20年中，由于不同故障造成的空中停车事件仅4次，由此可以看出锥齿共振的严重性。早在捷星事件前5个月，即2016年3月31日，GE公司发布了SB72-0298服务通告，指出TGB中的主动锥齿会出现共振，共振会引起锥齿断裂，引发滑油泄漏并造成空中停车。为此，GE公司对锥齿进行了改型，即在锥齿上加装1个减振环，以减轻共振时的破坏力。

该通告列出了换用改型锥齿的时间表(以2016年3月31日为起点)，表中规定：换向齿轮箱从开始使用起，当累计的循环数(CSN)为300时，在1年内更换；CSN为300~1000时，10个月内更换；CSN>1000时，8个月内更换。而此次出事的TGB的CSN仅为181，远远低于在1年后更换的要求。这说明，在出现第一次事件后，GE公司就应该对外场的发动机更换改进的锥齿，而不是用几个月到1年的时间逐步更换。并且，发生故障的锥齿是装在发动机外的TGB中，更换锥齿时不需要下发，可在翼更换。如果及时处置，这8起锥齿共振引发的故障完全可以避免。

低压涡轮轴断裂造成发动机包容故障

2012年7月28日，即将交付给印度航空公司的一架波音787飞机在做地

面滑行试验时，所配装的GENx发动机发生了一起严重的包容故障，发动机中损坏的碎片由尾喷口轴向喷出，对机翼与机体下部造成了小的碰伤与灼伤。经检查，这是一起断轴故障，即低压涡轮轴，也称作“风扇中间轴”(FMS)，从前端紧固螺栓的螺纹根部处断裂，如图3所示。由于GENx发动机装有防止低压涡轮轴断裂后不会引起涡轮盘超转的措施，所以涡轮盘未破裂，而是在涡轮轴向气动力作用下，涡轮转子向后窜移，工作叶片与导向叶片相碰撞，造成一些叶片破裂，断片随喷气流轴向甩出发动机。紧固低压涡轮轴与风扇轴的紧固大螺帽和垫圈仍残留在低压涡轮轴前端。图4所示为低压涡轮轴的断口，可以明显看出无疲劳条带。断口显示出有两种故障模式：一是逐渐开裂，二是瞬断。表面上85%处颜色有异样，表明曾较长时间暴露在外部环境下，是逐渐开裂的，其余是在大应力下突然

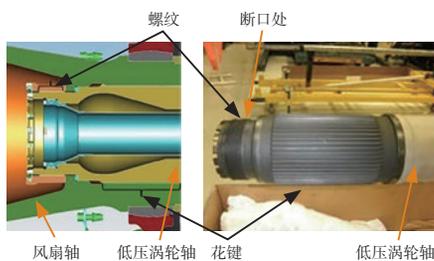


图3 低压涡轮轴与风扇轴连接处结构



图4 低压涡轮轴断裂处的断口

断裂，这说明轴是先开裂，最后在大应力作用下瞬断的。

这次事件中的发动机仅工作了18h16min，其中台架试车9h21min，装在飞机上后在地面工作8h55min，在这么短时间内出现断轴事件，实属罕见。据GE公司统计，在过去的10年中，GE公司与CFM国际公司约有2.5万台发动机在使用，累计飞行约6亿小时，只出现过6次断轴事件。

在此事件发生6周后，即2012年9月17日，一架俄罗斯空桥货运公司的波音747-8货机从上海起飞后，其中1台GENx发动机出现了低压涡轮轴断裂的包容故障，与上述故障一致，造成发动机空中停车，飞机在其他3台发动机工作下安全返回机场。

经过分析研究发现，断轴是螺纹件的涂料不合适造成的。GE公司以往在受力较大的螺纹上，涂有一薄层铅基的干膜润滑剂MolyDag 254，为了易于装配，在螺纹上涂有发动机用的合成滑油与油脂。但在GENx发动机中，换用了一种不含铅的新干膜润滑剂Everlube 9002，装配时用了石墨脂。试验证明，采用Everlube 9002干膜润滑剂是发生这次故障的原因。

随后，GE公司发展了一种用超声扫描检测低压涡轮轴螺纹处是否有裂纹的方法，对所有使用中的以及库存中的GENx发动机的低压涡轮轴进行了检测，确实发现了1台发动机的低压涡轮轴在螺纹后端处有类似的裂缝。这台发动机虽然已装到1架波音787-8飞机上，但还没有进行飞行，由此避免了一次可能的重大故障。

此后，美国国家运输安全委员会(NTSB)向美国联邦航空局(FAA)

发布了紧急建议：发布适航指令，要求对于那些尚未用超声检查过低压涡轮轴的GE_{nx}发动机在下次飞行前，均须对低压涡轮轴进行超声扫描检查；用户应经常对该轴进行检查，以查明是否存在快达到临界长度的裂纹。为此，FAA发布了AD-2012-19-08适航指令，要求对低压涡轮轴重复进行超声波检查，以确定轴上是否有裂纹存在。

GE公司停止使用Everlube 9002及石墨脂，改回到以前用的MolyDag 254及合成滑油。根据FAA适航指令的要求，每工作100h要对该轴进行超声波检查。

高空飞行中冰晶在发动机内结冰

2013年年底，GE公司公布GE_{nx}发动机在当年发生过9次高空吸入冰晶（ice crystal）引起推力损失事件。这9次事件均发生在热带及亚热带的12000m左右高空，空气清洁无云也不在雷暴区内，不仅飞行员看不出大气中有冰晶存在，连气象雷达也无法探测到。

在邻近雷暴区的上空，有时大气温度会突然上升，使空气变潮，其中的水在-40 ~ -30℃的气温下，形成微小的冰晶。高空中的冰晶大小与面粉颗粒相当，其直径约为40 μm，通常在强烈的对流雷暴区附近形成，强烈的对流雷暴区面积相当大，直径约为645km。美国国家航空航天局（NASA）称，冰晶会从主风暴区飘移到56km以外。

通常，飞机穿过雷雨区时，雨水撞击到温度较低的飞机表面上，会立即在飞机表面结冰，可是冰晶在发动机内部结冰的过程与之不同。

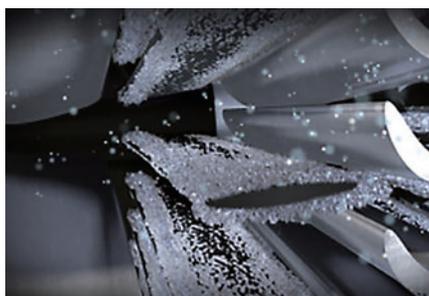


图5 冰晶在高压压气机静子叶片上融化后结成的冰层

当冰晶吸入发动机核心机后，撞击到温度较高的高压压气机后几级静子叶片时冰晶融化，融化后的水在随后流入的冷空气作用下，在静子叶片周边结成冰层，如图5所示。静子叶片结冰会堵塞气流通道，影响压气机及发动机的正常工作，推力会短时下降，约20s后推力恢复到原值，有时还会引起发动机喘振；另外，冰块从叶片上脱落后，会对其后的工作叶片、燃烧室甚至涡轮叶片造成二次损伤。

2013年7月31日，俄罗斯空桥货运公司（Air Bridge Cargo）的一架波音747-8HVF货机执行莫斯科—香港—芝加哥任务。途经成都附近上空约12000m高度时，在黑夜中为避开雷暴区而绕行，却误入看不出的且气象雷达也未发现的含有冰晶的空域。空气温度在86s内上升了

20℃，飞机在这一“高温区”飞行了约20min。发动机吸入冰晶造成发动机核心机结冰，引起2号发动机喘振停车，但随后发动机重新起动，推力恢复到原值；1号发动机转速下降70%且未恢复到原值。飞机到香港降落后，维修人员对4台发动机进行分解检查，发现1、2与4号发动机第8、第9级高压压气机中均有薄片被冰块打坏。这是一次比较典型的高空吸入冰晶造成发动机出现损伤的事件。

2013年11月22日，波音公司发布安全警告，称由于GE_{nx}发动机存在冰晶结冰风险，建议波音747-8和波音787两款飞机在飞行时避免靠近雷暴区。声明称，为了减少结冰，建议飞行员在驾驶航班时应与雷暴区最少保持92.5km的距离。随后，FAA正式警告运营配装GE_{nx}发动机的波音747-8和波音787飞机的运营商避免进入冰晶结冰区域，FAA还命令GE_{nx}发动机运营商检查所有进入结冰区的发动机。

为此，GE公司提出了一项针对发动机全权限数字式电子控制（FADEC）系统进行软件升级的措施，如图6所示。新的软件能够探测出移向发动机核心机的冰晶，一旦有冰晶进入发动机，FADEC将命令位于

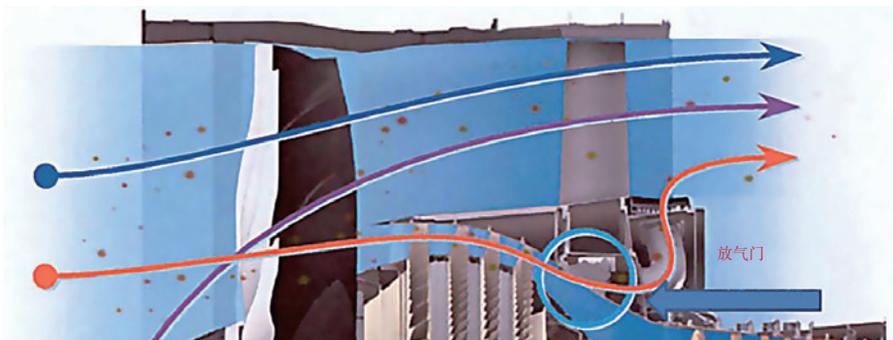


图6 GE_{nx}设在增压压气机后的可调放气阀

增压级后的可调节放气阀打开，以便将冰晶排到外涵道，不会对发动机核心机有影响。此项改进在2014年3月完成。大涵道比涡扇发动机在增压级后转弯处，大都装有可调节的放气阀，起飞时打开，将可能进入发动机核心的沙石冰块等甩到外涵，起飞后此阀门关闭，GE公司利用此阀门来放出冰晶。罗罗公司最新的遑达XWB发动机当探测到可能有冰晶时，会向分流环内通入可控的热空气，将进入核心机的冰晶融化，如图7所示。

风扇叶片脱落冰块造成空中停车

2016年1月29日，一架日本航空公司（JAL）的波音787执飞温哥华至东京的JL17航班任务，在距成田机场约160km，高度降低至有结冰条件的6080m高度时，2号发动机突然停车，且无法再次起动。随后，飞行员用单发将客机安全降落在成田机场，无人员在此事件中伤亡。经检查分析，飞机穿过6080m时风扇叶片开始结冰，当叶片上的冰块较厚而脱落时，造成风扇转子不平衡，

叶尖与机匣内的耐磨层刮蹭，引起极大的振动，使发动机多处受损，导致发动机停车且无法再次起动。

装在这架飞机上的两台发动机中，2号发动机是GENx-1B PIP 2，而1号发动机是GENx-1B PIP 1，PIP 2是在PIP 1的基础上减小风扇叶尖间隙等降低油耗的性能提高型。由于风扇叶尖间隙减小，引起在结冰条件下2号发动机的风扇叶尖与机匣刮蹭，最终造成空中停车。而在相同飞行结冰条件下，1号发动机的风扇叶片也有结冰，但冰块脱落后未造成叶尖与机匣相刮蹭，发动机中只有微小的损伤而没有空中停车。这次空中停车事件说明是由于风扇叶尖间隙过小造成的，而且也说明PIP 2的提高性能的改型是不成功的。

考虑到如果JAL这次事件的飞机上装有两台PIP 2可能会造成双发停车，因此，FAA在3月份颁发了紧急适航指令，要求GE公司尽快对PIP2采取措施消除隐患，并且装有两台PIP 2的波音787须在9月底前完成发动机的修复。

3月11日，GE公司发布了一份

服务通告，宣称将采取用专用磨具磨削掉2.54mm厚度的风扇机匣内与风扇叶尖对应的耐磨层金属，以此来增加叶尖间隙。每修复一个风扇机匣需用时16h，修理时无须从飞机上下发，这样不会对航空公司的飞行计划造成大的麻烦。GE公司宣称，按FAA的指令在10月1日前完成所有装两台PIP 2发动机的波音787中的一台发动机修复工作，即从10月1日起，就没有装两台PIP 2的波音787飞机了。4月22日，FAA又颁布了一项于5月9日生效的适航指令，要求波音公司修改波音787飞机飞行手册，加入新的如何处理风扇结冰的程序，以减少风扇冰块脱落带来损坏发动机的可能性。即在3800m飞行高度以上时，飞行员如果怀疑风扇结冰或指示灯指示结冰时，要求飞行员每5min一次、短暂地增加发动机转速，即将油门推到最大时的85%，以避免冰在风扇叶片上积累过多。

结束语

波音787“梦想飞机”的GENx发动机于2011年年底投入使用，在不到8年的时间内，出现了文中所述的几个影响较大的故障。一方面说明，航空发动机工作条件十分恶劣，在工作中会遇到各种挑战，稍有不慎，就会出问题；另一方面再次证明，在研制发动机时，要处理好性能与可靠性之间的矛盾，不能仅仅从提高性能方面考虑，GENx发动机从PIP 1升级到PIP 2所遇到的风扇叶片冰块脱落造成空中停车的事件，就充分说明了这一点。 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）



图7 遑达XWB分流环引入热空气