

遑达 1000 几起严重故障带来的启示

Lessons Learned from Trent 1000's Serious Faults

■ 陈光 / 北京航空航天大学

遑达 1000 是罗罗公司为波音 787 “梦想飞机” 研制的高涵道比 (11)、高总压比 (51)、低油耗、低污染及低噪声的新一代发动机, 是遑达系列发动机中较新的型号。为了满足 21 世纪绿色航空的要求, 它不仅继承并发展了遑达系列发动机的设计, 吸取了其研制与使用中的经验与教训, 而且还采用了一些最新发展的先进技术。具备良好的设计基础及诸多先进技术的遑达 1000 发动机, 在取得适航证之前及使用中却一度严重故障频发, 其中一些经验和教训值得借鉴。

在波音公司于 2004 年 4 月 6 日宣布选用 GE 公司的 GEnx 与罗罗公司的遑达 1000 作为波音 787 的动力后, 罗罗公司开始了遑达 1000 的研制工作。2006 年 2 月 14 日, 首台遑达 1000 进行了地面台架试车, 2007 年 6 月 18 日完成了飞行台的飞行试验, 2007 年 8 月 7 日同时取得美国联邦航空局 (FAA) 与欧洲航空安全局 (EASA) 的适航证。2011 年 10 月 26 日, 遑达 1000 安装在日本全日空 (ANA) 航空公司的波音 787 上进行了首次商业飞行, 如图 1 所示。

遑达 1000 由单级风扇、8 级中压压气机、6 级高压压气机、单级高压涡轮、单级中压涡轮与 6 级低压涡轮组成, 如图 2 所示。为满足 3 种型号的波音 787 系列飞机的推力要求并考虑飞机今后发展的需要, 发动机设计推力为 236 ~ 370kN。

遑达 1000 虽由遑达系列型号衍生发展而来的, 具有良好的发展基础, 但在取得适航证之前及使用中, 却发生了多起严重故障, 其中的经验与教训值得借鉴。



图1 ANA 配装遑达1000的波音787飞机

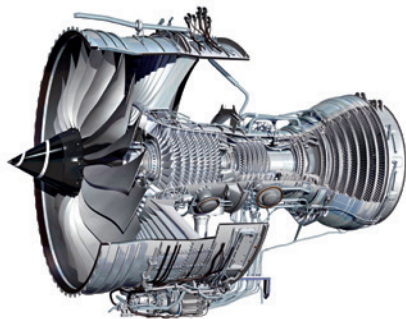


图2 遑达1000发动机结构剖视图

中压转子联轴器失效造成非包容性故障

2010年8月2日, 遑达1000在罗罗公司的室内58号试车台试车时, 由于发动机内部滑油燃烧, 造成中压涡轮轮盘非包容性严重故障, 轮盘断块击穿机匣, 打坏了台架的一些设备。3个多月后, 同样由于发动机内部滑油燃烧造成中压涡轮轮盘

非包容故障发生在空客 A380 的 遡达 900 上。当时，该飞机共载有 466 人由新加坡飞往悉尼，破裂的多个轮盘断块击穿机匣，打坏了飞机许多构件、管道与导线，在飞行员的精心操纵下，这架严重受损的飞机得以安全着陆，这就是航空史上有名的 QF32 航班事件。

遡达 1000 是在遡达 900 的基础上衍生而来的，这两型发动机在同一时间内发生了同样的严重故障，这在航空史上实属罕见。事后罗罗公司发表声明宣称，虽然两起故障后果相同，但起因各异。遡达 900 是由于一个滑油管制造不佳，导致管壁厚度不均，最薄处仅 0.35mm（设计值为 0.91mm），工作一段时间后疲劳断裂，滑油由裂缝处喷出，在高温气体的作用下自燃。燃烧的高温火焰使中压涡轮盘后的承力环与中压涡轮轴连接处（如图 3 所示）失去强度而断开。中压涡轮与中压压气机断开后，中压涡轮在高温燃气的作用下，转速迅速上升达到飞转，

轮盘在极大的转速下破裂，断块则在极大的离心力作用下击穿机匣甩离发动机。对于遡达 1000 的故障原因，罗罗公司开始并未做出更多的说明，由于它还未投入航线使用，因而适航部门并未介入对此事件的调查。

恰在此时，FAA 准备批准一个关于 A380 的遡达 900 中压转子刚性联轴器的适航指令指出，在分解遡达 900 时，发现多台发动机中压转子刚性联轴器（中压涡轮轴与中压压气机后轴连接处）的套齿端面的磨损量超出规定值。罗罗公司这时才承认，遡达 1000 的故障也是由于刚性联轴器套齿端面磨损量过大引发滑油自燃造成的。

刚性联轴器套齿端面磨损量过大会使中压涡轮转子后移，而移动量过大会使轴承腔两端封严篦齿的转子、静子间错开，使两端篦齿封严均失效，造成高温气体由前篦齿处窜入轴承腔，使腔中滑油在高温下自燃，燃烧后的高温燃气由后封严处逸出，使

中压轮盘后的承力环与中压涡轮轴连接处失去强度而断开，随后就与遡达 900 一样，中压涡轮飞转，轮盘破裂，断块在极大的离心力作用下击穿机匣，打坏试车间的设备。与遡达 900 一样，遡达 1000 在中压转子上也没有安装防止轴断后使中压涡轮不会超转的安全设计。

一般套齿式的刚性联轴器均用大螺母将两根轴牢牢连接在一起。遡达 1000 中，估计螺母拧紧力不够，受向后作用力的影响，涡轮轴后移，造成螺母端面与套齿端面间出现缝隙，两端面相对摩擦，随着工作时间的增长，磨损越来越大，造成涡轮轴向后窜移量过大，最终导致涡轮盘破裂甩出发动机。

刚性联轴器套齿端面磨损不仅出现在遡达 1000 中，还多次出现在遡达 900 中，主要是因螺母拧紧力矩不够所造成的。

换向齿轮箱故障

2012 年 7 月 21 日，ANA 接到波音公司通知，787 的遡达 1000 发动机换向齿轮箱（TGB）存在腐蚀隐患，而该隐患可能导致发动机停止运转。ANA 的 11 架波音 787 中，有 5 架受到影响，因此该公司停飞了正在运营的 5 架波音 787，等待罗罗公司提供更换部件。

遡达 1000 的附件传动系统由中心传动部件、径向传动轴、换向齿轮箱、横向传动轴与附件传动机匣组成，如图 4 所示。在大涵道比涡扇发动机普遍采用的设计是径向传动轴不直接与附件传动机匣相连，而是通过装在发动机机匣外的换向齿轮箱及横向传动轴驱动附件传动机匣。因此，当换向齿轮箱出问题后，很容易在外场更换。

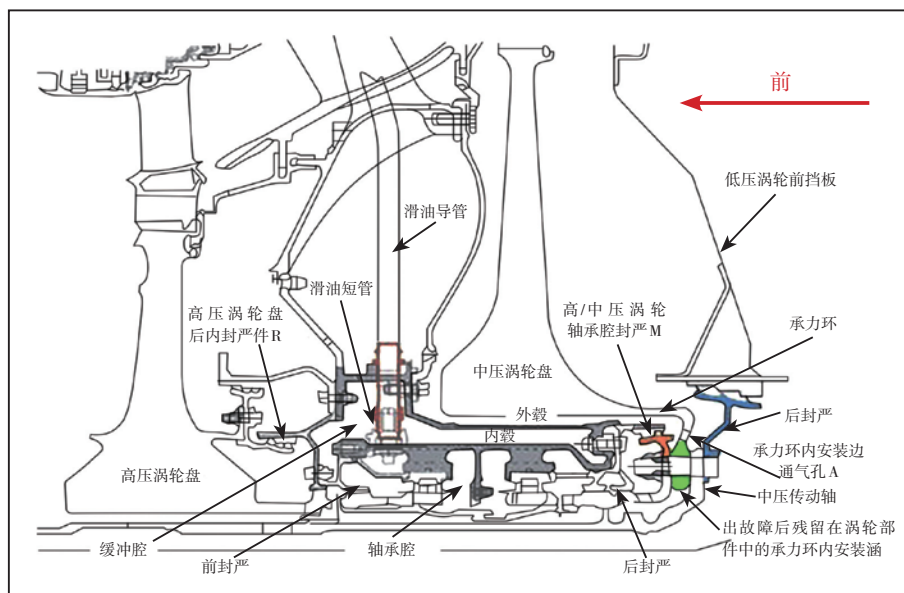


图3 遡达900、遡达1000高压、中压涡轮间承力框架结构

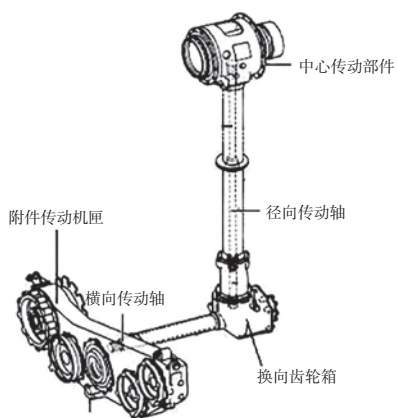


图4 遄达1000附件传动系统

在遄达1000的地面试车过程中，换向齿轮箱内的锥形齿轮由于受到腐蚀，致使发动机停车。在经过调查分析后，EASA当即发布AD No. 2012-0137-E紧急适航指令指出，在锥形齿轮加工过程中，有一批产品因工艺的改动造成了零件的腐蚀，因此要求对装有该生产批次齿轮的换向齿轮箱进行更换。共有17台发动机受到影响，包括ANA的5架波音787。

中压压气机工作叶片断裂

2016年11月26日，斯库特（Scoot）航空公司的一架载有357人的波音787-9执行由悉尼飞往新加坡的航班任务，在起飞爬升过程中，飞行员根据座舱指示仪表发现右侧发动机（即2号发动机）低压转子振动值偏大但仍在规定范围内，当飞机转入水平飞行时振动值变小。因为预感到右发可能有问题，飞行员仍然高度关注振动值的变化。当飞机在新加坡机场降落时，机组成员听到“嘭”的一声巨响，同时发现右发已自动停车。随后，飞机在单发工作下安全降落，无人员伤亡，因此将此次



△ 丢失的叶片 ○ 叶根开裂的叶片

图5 第1级中压压气机

故障定为“事件”（incident）。这台发动机已工作7196 h / 1797飞行循环，经返修后工作378 h / 79飞行循环。事件发生后，新加坡运输安全调查局（TSIB）负责此次故障的调查工作。

经地面维修人员检查发现：中压压气机第1级工作叶片及可变进口导流叶片各有1片丢失，在发动机气流流道中有许多碎片，多个风扇叶片前缘有轻微的撞击痕迹，5片风扇叶片尾缘有明显的撞击损伤。右发及飞机未查出受损现象。

在维修车间分解发动机后，发现在中压压气机第1级除丢失一片叶片外，还有7片叶片在叶片根部榫头侧面处有裂纹，如图5所示。裂纹是由后向前发展的，长度为30.5mm，如图6所示。

从7片有裂纹的叶片中任意挑出3片，将裂纹打开进行显微镜检测，发现这3片叶片中，疲劳源在距叶根后端面1.5 ~ 2.0mm处。

中压压气机中，第2级~第6级叶片均被掉下的叶片断片打伤（机械损伤），第6级~第8级叶片还被钛火烧伤（着火损伤），如图7所示。在高压压气机中，所有叶片的叶身

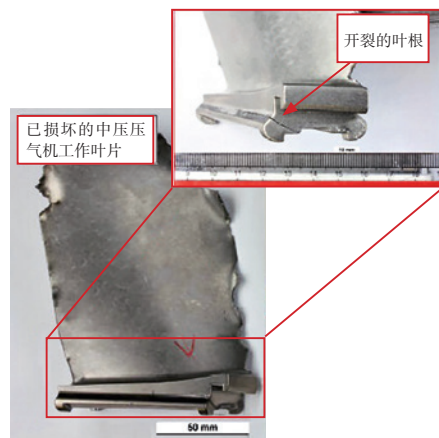


图6 工作叶片叶根处产生的裂纹

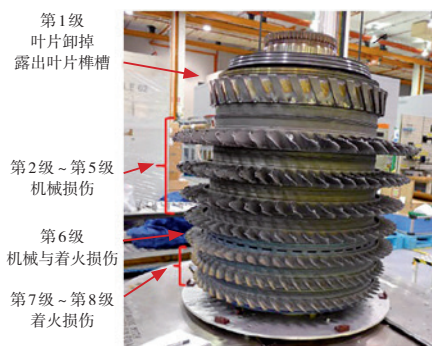


图7 中压压气机转子受损情况



图8 高压压气机转子中仅剩有残留的叶根

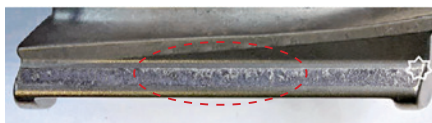


图9 叶片榫根接触面上的磨蹭痕迹

均被打掉，仅在转子上留有叶根的残骸，如图8所示。调查人员分析后认为，这些损伤不是由进入发动机的外物打伤的。

所有中压压气机第1级工作叶片

榫根与榫槽接触的表面上均有明显的磨蹭痕迹，如图9所示，且中间磨蹭痕迹较深（图中红线圈中）。磨蹭痕迹的深度及严重程度在叶根出现裂纹或没有出现裂纹的叶片中没有明显的差异。磨蹭痕迹是在发动机发生振动时，叶片榫根与轮盘榫槽间相互摩擦产生的，估计是装配间隙不合适造成的。对中压压气机第1级工作叶片榫根应力值进行核算，发现应力最大处接近裂纹起始点。

在发生这次事件时，已有多台同型号的发动机在罗罗公司的维修车间进行过大修，为此，罗罗公司对9台已修过的发动机进行检查，结果发现有一台发动机中压压气机第1级工作叶片中2片有裂纹，另外两台发动机中各1片有裂纹，这说明中压压气机第1级工作叶片榫根在设计与制造中肯定存在问题。

在2016年11月26日的事件后，又发生了两起类似的故障，即2017年6月10日同一航空公司的一架波音787的发动机，发现中压压气机的第1级工作叶片丢失了1片；2017年7月27日，同为这家航空公司的波音787在爬升过程中，中压压气机第1级工作叶片出现故障，发动机停车后飞机安全降落。

显然，中压压气机第1级工作叶片榫根处产生裂纹是一起多发的故障，有些现象尚需罗罗公司开展深入的研究分析。例如，裂纹的产生是设计缺陷还是生产缺陷导致；飞机在爬升及巡航时，低压转子振动不正常的原因以及裂纹产生和低压转子振动有什么内在联系等。

罗罗公司在与TSIB共同进行初步研究分析后，采取了以下临时措施：由于发动机装在翼下时，用孔

探仪无法查到中压压气机第1级工作叶片榫根处是否有裂纹，罗罗公司开发了一套超声探测设备来检查裂纹，并于2017年8月发布了(NMSB)72-AJ814通告，要求用户每隔200飞行循环做一次检查，但适航当局为安全起见，要求用户将200飞行循环缩减至130飞行循环。

最后，TSIB建议罗罗公司重新设计逾达1000的中压压气机第1级工作叶片，防止裂纹的产生（RA-2017-034建议）。EASA也提出了相同的要求。2018年年初，罗罗公司已按TSIB的建议，重新设计了中压压气机第1级工作叶片。

中压压气机封严环损坏

2016年年底，1架以逾达1000为动力的波音787在起飞滑跑过程中，当速度达到110 ~ 120 km/h时，飞行员察觉到1台发动机出现异常现象，于是关停了该发动机。飞机返回到登机口后，经地面维修人员检查，发现是中压压气机封严环前端损坏。事后罗罗公司称，在其他几台发动机中也发现了这一故障，因此发布

了服务通报，要求用户用孔探仪对此处进行检查。EASA认为此部件的损坏，会造成发动机空中停车，影响飞机飞行安全，除要求罗罗公司修改设计外，还发布了AD No. 2017-0017R2适航指令，要求航空公司在装机状态下用孔探仪检查此处。随后，FAA也发布了类似的适航指令。由于发现此故障及时并迅速采取了预防措施，所幸没有造成飞机停飞事件。

中压涡轮工作叶片腐蚀断裂

2016年，ANA的波音787遭受3次逾达1000中压涡轮工作叶片腐蚀断裂，事件中飞机均安全着陆，无人员伤亡。ANA是波音787的启动用户，共拥有50架波音787，均选用罗罗公司的逾达1000发动机。罗罗公司称，由于涂层早于预定的寿命而脱落掉块，导致中压涡轮工作叶片直接与高温燃气接触，因燃气中硫的腐蚀而断裂。为此，罗罗公司更改了设计，计划用3年时间对ANA的50架波音787所装的100台发动机更换新设计的叶片，新叶片的设计已



图10 英国维珍大西洋航空公司的波音787

于2016年年底完成。

曾有人提出ANA出现的问题不会在其他公司的飞机中出现，罗罗公司发言人称，“出现问题的发动机仅限于机群中的一小部分，我们正与ANA密切合作解决这一问题，不会对航班造成更大冲击”。但事与愿违，随后，多家航空公司的遛达1000接连不断地出现中压涡轮工作叶片腐蚀断裂的事件。更为严重的是，由于罗罗公司缺少涡轮工作叶片备件，不能及时为故障发动机提供更换叶片，也没有足够数量的备用发动机为受影响的飞机换发。航空公司的遛达1000发动机只要出现类似故障，波音787飞机只能停飞，有的公司只能抽调其他机型的飞机来完成波音787原定的航班任务。

在ANA出事后不久，英国维珍大西洋航空公司的波音787，如图10所示，也出现了类似事件，使该公司取消了一百多个航班。在2017年下半年，多家航空公司又出现波音787受遛达1000的影响而停飞的事件。

结束语

归纳起来，遛达1000发生的这些故障中有的的是因为设计不够严谨导致的，例如，低压转子刚性转子联轴器大螺母拧紧力设计值不恰当，造成发动机内滑油失火、中压涡轮轮盘破裂击穿机匣窜出发动机；中压压气机第1级叶片榫根前端应力设计值过大。有的的是因为所采用的新工艺新涂层没有经过严格的试验考核导致的，例如，中压涡轮工作叶片涂层过早脱落，造成叶片叶身与高温燃气接触而腐蚀断裂的重大故障；中传动机匣中的锥形齿轮采用了原想改善工作条件的化学腐蚀工艺，



图11 LEAP发动机中使用的3D打印喷嘴

却造成齿轮失效的故障。

在采用新工艺、新材料与新涂层时应特别注意，因为航空发动机工作条件恶劣且多变，在一般设备上能用并不表明在航空发动机上能安全长期使用。例如，GE公司关于3D打印技术加工零件的研究工作已开展多年，其先进涡桨发动机（ATP）中，有三分之一的零部件是用3D打印技术生产的。但在大涵道比涡扇发动机中，仅LEAP发动机的燃油喷嘴，如图11所示，采用了3D打印技术生产；目前正在试飞的GE9X发动机，也仅有燃油喷嘴与低压涡轮工作叶片是采用3D打印技术生产的。遛达1000的中压涡轮叶片断裂引起波音787大面积停飞就是涂层脱落引起的。隔热涂层一方面要能耐高温，与基体材料（叶片）有牢靠的黏合性，另一方面膨胀系数还要与基体材的膨胀系数基本一致，如果膨胀系数相差较大，每一次工作就会在涂层与基体材料间产生剪切力，多次工作

后会涂层疲劳断裂、掉块。设计人员往往对膨胀系数的影响不太注意，造成涂层过早损坏。早在20世纪80年代，普惠公司用于波音757的PW2037发动机的高压涡轮叶片采用了性能比较好的涂层，但在使用一段时间后，发生涂层过早脱落故障，于是普惠公司不得不改用原来的涂层，为用户免费更换叶片。

遛达1000是遛达系列较新的衍生改进型，不仅继承了以前各型号的优点，而且加入了21世纪新发展的许多新技术，按道理讲，它应该是一型性能先进、工作可靠与寿命长的发动机，但是事与愿违，该型号在投入使用前后发生了多起严重故障，不仅使罗罗公司的声誉受到影响而且经济损失巨大，还给787的安全飞行带来隐患，从事航空发动机工作的我们，应从中吸取其经验教训。

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。）