

普惠PW1500G发动机声疲劳事件分析

Analysis to Acoustic Fatigue Incidents of PW1500G Engine

■ 冯建文 甄博 / 中国民用航空适航审定中心

普惠公司的PW1500G发动机在投入商业运营不久即发生了数起低压压气机非包容性事件，为该型发动机的“职业生涯”带来短暂波折。

普惠公司齿轮传动涡扇(GTF)发动机PW1500G发动机,在2019年6月—2020年2月,连续发生了数起低压压气机第一级整体叶盘破裂并穿透机匣的事件。事件发生后,加拿大航空局(TCCA)发布了紧急适航指令对PW1500G发动机的运行包线进行了限制以避免共振条件。经调查,美国国家运输安全委员会(NTSB)认为,这一系列事件是由低压压气机2.5级放气阀的声激励导致叶盘振动疲劳失效引起的。最终,普惠公司将2.5级放气阀的放气导管截短,使得涡声振动频率与结构固有频率避开,从根本上消除了声疲劳隐患。本文根据轮盘碎片材料检测报告、NTSB动力装置分委员会原因分析报告和事件最终调查报告,介绍PW1500G发动机声疲劳排查过程。

事件背景

普惠公司GTF发动机的显著特征是在风扇转子与低压转子之间安装齿轮减速器,实现了同一轴系下风扇转子以较低的转速运转,而低压转子以较高的转速运转,提高了压气机效率,并使发动机的噪声水平显著下降。

PW1500G发动机是空客A220的动力装置,于2016年5月取得

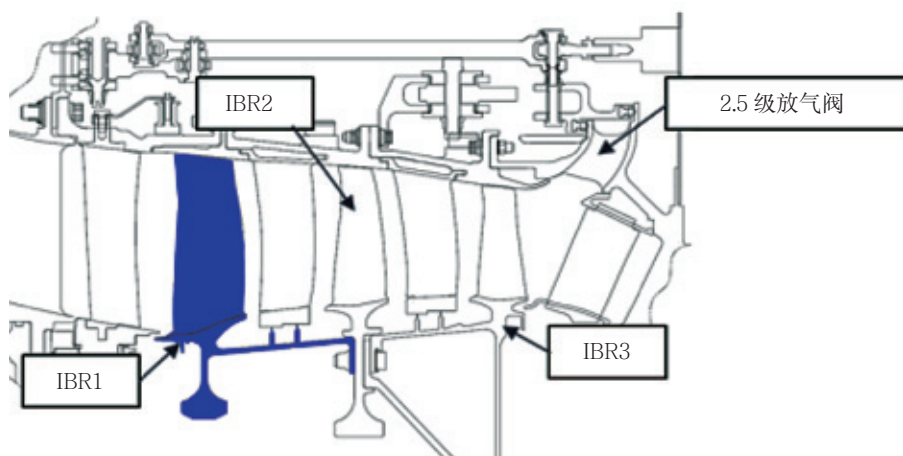


图1 PW1500G发动机低压压气机以及2.5级放气阀

美国联邦航空局(FAA)颁发的型号合格证并于同年7月投入运营。PW1500G发动机的电子发动机控制(EEC)软件在发动机取证后进行了修改,自V2.11.7.2起,修改了低压压气机可调进口导向叶片控制律,使之在大功率状态时处于更加闭合的位置,以提高压气机喘振裕度。然而,使用升级后EEC软件的发动机发生了4起整体叶盘爆裂事件,造成非包容破坏以及空中停车。

PW1500G发动机低压压气机采用3级整体叶盘转子(IBR)构造,在第三级整体叶盘转子(IBR3)后布置了2.5级压气机放气阀用于防止喘振,如图1所示。在此次系列事件中,发生破裂的是低压压气机第一

级整体叶盘转子(IBR1)。

事故调查人员对破裂的IBR1进行分析发现,轮盘因高周疲劳断裂,裂纹起源于叶身前缘根部过渡处。经扫描电子显微镜分析确定,断裂起点位于材料表面下方约0.084mm处。裂纹源附近没有材料或加工异常的迹象,断裂表面也没有疲劳循环扩展的纹路。

事件发生后,普惠公司在安装有EEC软件V2.11.7版本的发动机机队的排查分析中发现,两台发动机的IBR1存在裂纹。

事件原因调查

为确定失效原因,普惠公司使用多种分析方法,包括二维流体力学计

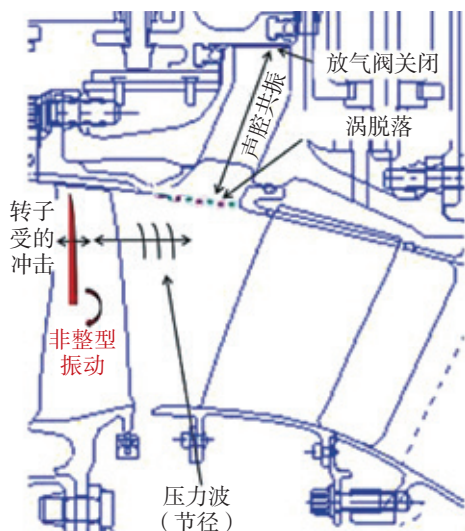


图2 IBR3振动与涡脱落噪声的耦合

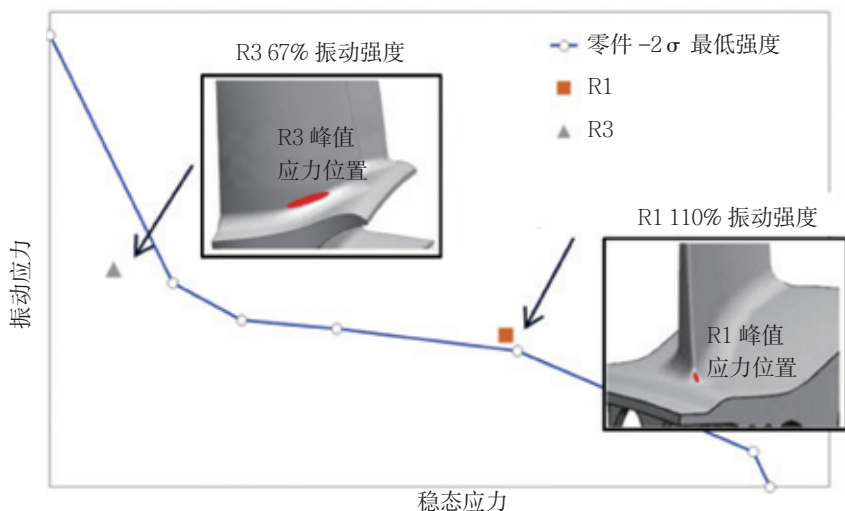


图3 IBR1和IBR3应力状态古德曼曲线

算、声学测试以及飞行应力测量等，最终确定的失效原因是IBR1和IBR3的耦合模式与2.5级放气阀腔体的声激励产生了共振。

分析计算

分析计算结果显示，发动机M1转速较高时，IBR3叶片尖端会产生湍流并通过位于IBR3下游的2.5级放气阀。叶尖端流在2.5级放气阀的腔体处产生的涡脱落噪声引起了IBR3叶片沿垂直于叶盘平面的第一阶弯曲振动（1弯振动），如图2所示。恰好IBR1在这个激励频率下存在一个叶片平行于叶身弦线方向振动模式（即SWB模式），因此，IBR3的1弯振动进一步激起IBR1叶片SWB振动。该IBR振动不是由转子机械振动激起，所以频率不是发动机转速的整数倍频，称作非整型振动（Non-Integral Vibration）。

单元体试验

普惠公司开展了PW1500G发动机低压压气机（LPC）转子组（IBR1 ~ IBR3）声激励振动试验，并使用一系列环绕转子圆周的扬声器来识别共振。试验证实了IBR1和

IBR3具有耦合振动模式，符合计算预测。

将声激励振动应力叠加到原先测得的PW1500G发动机振动应力上，发现共振使得IBR1叶根前缘产生了较大的振动应力，超过了古德曼（Goodman）曲线的许用值，与IBR1高循环疲劳破坏吻合，如图3所示。IBR3虽然振动应力比IBR1大，但是由于离心应力小，所以其应力状态位于古德曼曲线下方，不会发生高循环疲劳破坏。

飞行试验

普惠公司首先使用A220飞机开展了发动机飞行测试。试验中将Kulite压力传感器分别装在3级整体叶盘转子前方用于监测叶片颤振。当IBR3处传感器的压力波动超过103Pa时，就标志颤振开始。在A220的飞行试验中观测到了发动机颤振。

普惠公司还在波音747飞行试验台上对PW1500G发动机进行了更全面工况下的动应力测试。在测试发动机的2.5级放气阀腔中增加2个Kulite压力传感器，如图4所示。普惠公司开展了7次飞行试验，全面探

测了颤振边界并评估了更紧密的IBR叶片尖端间隙对颤振开始和振幅的影响，以及不同LPC静子叶片开闭角度、2.5级放气阀位置和阀门开闭瞬态下的颤振水平。

普惠公司还特别测试了2.5级放气阀开闭对于IBR3振动应力的影响。测试中，保持M1转速和LPC进口导向叶片位置不变，2.5级放气阀台阶式关闭—打开—关闭以测试放气对于IBR3振动的影响，试验在放气阀开闭的过程中发现了较大的峰值振动应力。

调查结论

事件调查最终结论认为，EEC软件版本升级之后导致IBR1的SWB模式与IBR3的1弯模式耦合振动的因素包括频率裕度、叶尖马赫数和叶尖间隙。

频率裕度

频率裕度指IBR3的1弯频率与2.5级放气阀声腔激振频率之差。当2.5级放气阀声腔激振频率接近IBR3的1弯频率时将会激发颤振。频率裕度与M1转速以及2.5级放气阀位置处气温 T_{25} 相关。IBR3叶片1弯频率

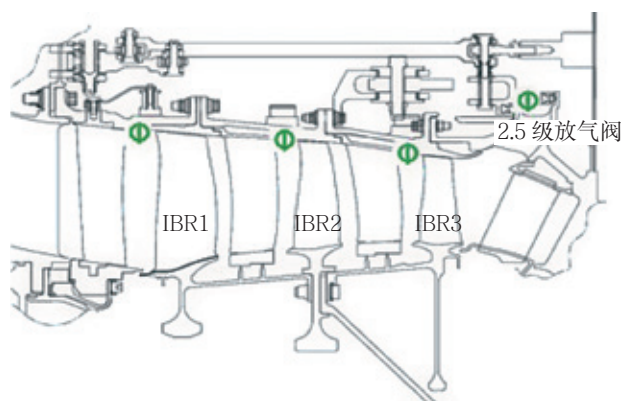


图4 Kulite压力传感器布置

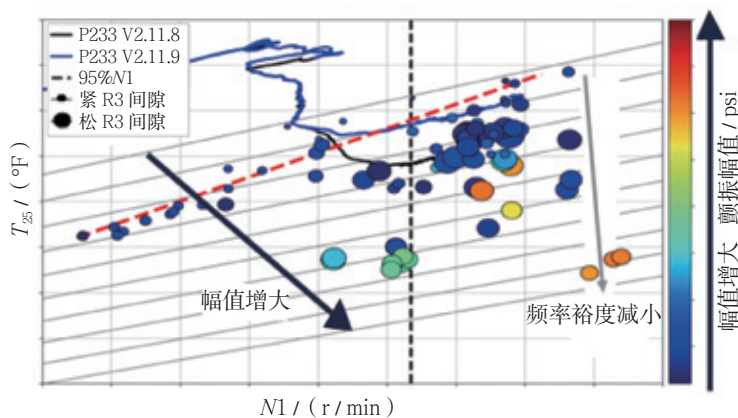


图5 颤振峰值响应与 $N1$ 和 T_{25} 的关系

与 $N1$ 相关；EEC软件升级使得压气机进口导向叶片处于更加闭合的位置，降低了压气机工作线以及 T_{25} ， T_{25} 决定声速并影响2.5级放气阀声激振频率。Kulite测试也发现，当 T_{25} 降低， $N1$ 升高时，颤振幅值（以压强衡量）趋于明显，如图5所示。

叶尖马赫数

低频率裕度可以激起IBR振动，但仍需要能量输入形成颤振。 T_{25} 降低提高了叶尖马赫数，较高的IBR3叶尖马赫数和由此产生的气流不稳定压力会增加转子的声激励输出，因此增加了振动耦合强度，形成正反馈，引起气弹失稳。

叶尖间隙

新发动机IBR叶尖间隙小，在叶尖附近产生了较强的不稳定气流。当发动机使用过一段时间以后，随着叶尖的碰摩，间隙增加，不稳定气流强度弱化，颤振不容易发生。普惠公司在发动机飞行试验中也发现，经过一段时间碰摩的老发动机的颤振边界明显大于新发动机的颤振边界。发生IBR1开裂的几台发动机均为新出厂台份，循环数未超过300，叶尖间隙偏小。

事件原因调查清楚之后，普惠

公司将PW1500G发动机和PW1900G发动机2.5级放气阀的放气导管截短，从而使得涡声振动频率与结构固有频率避开，消除了声疲劳隐患。

对振动设计及适航验证的启示

普惠公司PW1500G发动机声疲劳事件是一起由声波激励导致高周疲劳失效案例，失效原因比较复杂，涉及多部件的耦合，且由声波激励导致失效，在以往发动机振动失效案例中比较少见，值得重点研究。在民用航空发动机振动设计及适航验证中应吸取该系列事件的经验教训。

第一，在发动机振动应力测量中，除了转子的物理转速应覆盖发动机额定最大转速外，表征气流激励强度的转子换算转速也应该覆盖发动机预期的转速范围。

第二，可调静子叶片角度（包括其调节容差）、压气机引气、附件加载等操作工况及其组合，应该在振动应力测量中予以考虑。此外，如果EEC软件涉及到这些操作控制律的修改，则应对振动应力进行重新评估。

第三，由于发动机颤振可能对

零件的公差等边界条件非常敏感，因此在适航取证阶段验证的颤振边界，应保留一定裕度以覆盖发动机与发动机台份间的差异，以及发动机老化等分散性的影响。

第四，整体叶盘式转子由于缺乏榫头—榫槽的摩擦机械阻尼，系统的阻尼相当大程度依赖于气动阻尼，存在较大不稳定性，因此整体叶盘振动设计及振动测量需要引起格外的重视。

结束语

近年来，数个型号的发动机发生过声激励振动疲劳事件，发生疲劳的零部件除了整体叶盘外，还涉及封严篦齿、封严盘、燃油总管等薄壁构件，因此，声激励振动引起了越来越多的关注。在发动机非整型振动的分析和试验考核中，除了考虑不稳定气流的因素外，还应该考虑声激励以及涡声耦合效应。普惠公司对PW1500G发动机声疲劳的调查过程不啻为教科书式的振动问题排查案例，值得借鉴。

航空动力

（冯建文，中国民用航空适航审定中心，高级工程师，主要从事发动机结构专业审查工作）