

航空发动机叶片丢失过程分析及危害定量评估方法

张博

(中国航发沈阳发动机研究所 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 本文从风扇叶片丢失力学过程出发,按照时间次序,分别对转子—支承系统和静子机匣系统在叶片丢失下的力学行为和力学特征进行了分析。针对叶片丢失导致的故障危害程度,提出损伤因子的概念,将已有的发动机相关经验进行融合整理,为叶片丢失的安全性评估提供定量评估新的途径与方法。

关键词: 叶片丢失;物理过程;力学特性;损伤因子

0 引言

航空燃气涡轮发动机是一种高速旋转的复杂动力机械,不断提高的热力性能和气动效率需求使其呈现“轻质”和“重载”的特征,因而其结构强度和振动面临的挑战也随之增加。叶片丢失作为一种极端恶劣的载荷工况,可能导致转子系统丢失、静子件严重碰摩等损毁事故,严重影响飞行安全。发动机结构安全性和完整性均要求结构能够承受叶片丢失载荷的影响,叶片丢失载荷作用下的动力响应问题贯穿了发动机研制和使用的全过程,也是发动机通过适航认证的关键。叶片丢失的载荷作用时间短,具有冲击效应,系统瞬态振动响应突增,动力学特征上具有整体耦合性、局部破坏性以及响应非线性,其力学过程和响应机理极其复杂,对于叶片丢失的研究涵盖载荷传播过程、力学模型机理、仿真分析方法以及试验验证技术各个环节。英国 R·R 公司针对叶片丢失安全性设计,提出大型涡扇发动机叶片丢失的计算指南,从叶片丢失的力学过程、计算模型以及输入输出参量等方面进行发动机结构和动力学设计的指导。

本文针对高涵道比涡扇发动机风扇叶片丢失问题,从叶片丢失的严重后果出发,基于对风扇叶片丢失物理过程的分析,按照时间次序,分别论述了转子—支承系统和静子机匣系统在叶片丢失载荷作用下的力学行为和力学特征。在此基础上,针对叶片丢失可能产生的故障模式,提出评价叶片丢失危害程度的损伤因子概念及其计算方法,为叶片丢失适航认证提供定量评估的途径和方法。

1 叶片丢失的危害性

叶片丢失指的是发动机在运转时,转子叶片的局部甚至整个叶身断裂飞出,由于风扇叶片的质量以及转动惯量远高于其他各级叶片,因此风扇叶片丢失(Fan Blade Off,简称 FBO)产生的危害显得尤为突出。美国联邦航空局(FAA)要求,发动机各制造商必须通过试验验证以确保发动机可承受风扇叶片丢失的载荷作用,安装节不至脱离发动机挂架,且在没有任何非包容的风扇叶片碎片和失火的情况下仍能至少运转 15S。伴随着叶片丢失过程,发动机系统内瞬时发生巨大的能量转移,转子系统不平衡量突增,机匣被高能碎断叶片穿透、转静子碰摩、轴承破碎、安装节断裂等严重故障均可能发生。

2 叶片丢失物理过程

从宏观特征上看,叶片丢失的物理过程主要分为两个阶段,一是叶片丢失瞬时的冲击载荷作用阶段,二是叶片丢失后系统在大不平衡载荷下运转阶段。在第一阶段,主要是叶片丢失产生的冲击载荷作用,载荷作用时间通常是 20 ~ 600ms 之间,产生的冲击载荷主要包含三部分:转子径向冲击、转子周向冲击以及丢失叶片对静子的撞击。丢失叶片脱离轮盘瞬时,轮盘质心位置突变,由此产生的径向离心载荷直接作用于转子上,并将冲击效应沿传力路线上的支承轴承、轴承座、承力机匣、安装节外传。在第二阶段,由于丢失叶片所在的轮盘质量偏心,系统工作于大不平衡载荷下,转子的瞬态响应突增,产生剧烈的横向振动,导致转静子间的碰摩,在摩擦转矩和气动转矩的双重作用下,转速迅速降低并稳定在风车转速运转。

下面分别以转子—支承系统和静子机匣系统为对象,结合物理过程,按照时间次序,对叶片丢失后系统的力学行为和力学特征进行分析。

3 转子—支承系统力学行为

丢失叶片所在轮盘截面中 S 表示风扇组件的几何形心(假设与初始之心重合),R 为丢失叶片的质心,r 为丢失叶片质心半径。当叶片丢失时,轮盘质心位移由 S 移至 G。假设质量矩为 mr 的叶片在 12 点钟位置丢失,相当于不平衡 mr 加在风扇组件的 6 点钟位置,轮盘质心偏心量, $e=mr/M$, 其中 M 为风扇组件的质量。此时,在各轴承的约束下,转子仍绕几何形心 S(而非叶片丢失后的质心 G)旋转。由于质心位置的突然变化,风扇轮盘处突加的不平衡量将对各支点轴承施加极大的径向冲击载荷。轴承承受的径向冲击载荷沿轴承座外传:一部分由传力路线上的前安装节、挂架和飞机的刚性变形承受,另一部分由发动机和短舱结构的惯性承受。在支承受较大径向载荷作用时,支承刚度非线性突增,对于转子—支承系统的固有动力特性影响较大,如转子临界转速可提高 50% 以上、转子系统的振动响应放大等。由于转子继续旋转,丢失叶片与尾随叶片碰撞,对转子施加周向的冲量。之后,带有不平衡量的转子运动轨迹偏离初始状态,转子在不平衡载荷的激励下产生剧烈的横向振动,横向振动的位移使得转子和机匣碰摩,甚至高、低压转子间也产生碰摩,转子的激励力同

时包含不平衡力以及带有冲击载荷特征的摩擦力。

4 静子机匣系统力学行为

对于静子机匣系统,叶片丢失直接或间接使其承受的载荷包括三部分:一是丢失叶片对机匣的冲击;二是静子和转子间的碰摩;三是转子减速时角动量的变化形成的转矩作用于机匣。前两种载荷在上文已做分析,此处着重分析机匣转矩的成因及作用效果。发动机运转时,转子绕转轴的动量矩为: $H_z=J_z\omega$ 式中, z 为转子转轴, J_z 为转子对转轴 z 的转动惯量, ω 为转动角速度。依据动量矩定理,质点系对某个轴线的动量矩对时间的导数等于作用于质点系上外力的矢量和对该轴之矩,即 $dH_z/dt=\sum M_z$ (2)式中, M_z 是对转轴 z 的外力矩。

叶片丢失后转子转速 ω 迅速下降,使得转子的角动量 H_z 骤降,从而产生巨大的附加扭距,此处由减速过程产生的转矩即为发动机机匣承受的转矩。转矩经机匣传至安装节,瞬时施加的转矩脉冲中含有的频谱成分可能激起发动机整机绕挂架的扭转振动。发动机在短时间内丧失推力,不仅可使发动机产生扭转振动,还可以产生沿发动机轴向的摆动型振动。在发动机工作时,推力 F 使挂架产生拉伸变形,发动机前端向前上方移动约1英寸(25.4mm)左右,当推力短时间内丧失时,挂架回弹,将激起发动机绕挂架的摆动型振动。

5 叶片丢失危害程度评估

风扇丢失叶片力学过程和载荷特征复杂、破坏程度严重,是叶片丢失研究中最为恶劣的情形。从前文对叶片丢失的物理过程及力学行为的分析可见,叶片丢失产生的破坏形式多样,各种破坏形式对于系统安全性、结构完整性以及适航性的影响不尽相同,而且在实际发动机中,丢失的叶片可能位于不同位置,因此需要对发动机各类叶片丢失的破坏程度进行综合考核和评估。

下面提出一种定量评估叶片丢失对发动机危害程度的评估方法,基于已有发动机在设计、分析、试验和使用过程中获得的经验数据,融合整理后构成叶片丢失损伤因子。损伤因子的内涵,包括三个方面内容,一是各种故障模式的破坏程度,二是各类叶片(风扇、压气机、涡轮等)发生丢失的可能性,三是各种故障模式发生的概率。具体含义如下:

(1) 故障相对破坏程度(Relative Damage Severity) — R_D

表示叶片丢失后可能诱发的各种故障的相对严重程度,取之范围为1~10,以封严涂层磨损为最轻,数值为1;以发生空中停车为最严重故障,数值为10。

(2) 各位置叶片丢失发生概率(Probability of Loss-blade Location) — P_L

表示风扇丢失或者高压涡轮叶片等丢失的发生概率,基于大量发动机试验、试车及使用数据整理获得。例如,

以发动机在1000小时的运转中发生一起风扇叶片丢失事件。

(3) 丢失后故障发生概率(Probability of Damage Occurring) — P_O

将必然发生的事件定位1,数值越低表示故障发生概率越低。

将上述三个数值简单相乘,得到叶片丢失损伤因子 F_{DS} (Damage Severity Factor)的计算公式: $F_{DS}=R_D \times R_L \times P_O$;采用损伤因子,可以对各类叶片丢失造成的危害程度和发生概率进行综合评估,将设计经验、飞行数据与研究目标相结合,为叶片丢失的研究方向和关注重点提供依据。同时损伤因子可用作发动机适航性验证的定量评估参数,通过结构设计降低叶片丢失概率、降低各类故障模式的破坏程度,从而减少损伤因子数值,提高结构可靠性。

6 结语

本文针对航空发动机叶片丢失问题,在对物理过程分解的基础上,进行转子—支承系统和静子机匣系统在叶片丢失载荷作用下的力学行为分析,提出对叶片丢失危害程度定量评估的损伤因子及其评估方法,得到如下主要结论:

(1) 风扇叶片丢失过程主要分为两个阶段,叶片丢失瞬时的冲击载荷作用阶段及叶片丢失后系统在大不平衡载荷下运转阶段。冲击载荷作用阶段的载荷包括:转子径向冲击、转子周向冲击以及丢失叶片对静子的撞击。大不平衡运转阶段的特征:转子的激励频率随转速降低,转子由超临界状态切换到亚临界状态,减速通过临界转速并稳定在风车运转状态。

(2) 转子—支承系统在叶片丢失后,各支点受到冲击载荷的作用,支承刚度增加,导致转子系统临界转速提高、转子振动响应放大。转子系统的不平衡激励频率和幅值均随转速而降低。

(3) 静子机匣系统在叶片丢失后,受转子减速时角动量变化产生的扭曲作用,可激起发动机机匣绕挂架的周向扭转振动,同时由于推力骤降激发发动机前后摆动。

(4) 叶片丢失损伤因子结合故障数据、飞行数据及设计数据,综合描述了叶片丢失导致的各种故障模式的危害程度以及发生频率,定量评估叶片丢失的危害,为发动机适航验证及提升发动机可靠性设计水平提供评估途径和方法。

参考文献:

- [1] 洪杰,马艳红,张大义.航空燃气轮机总体结构设计与动力学分析[M].北京:北京航空航天大学,2014(08).
- [2] 王宗勇,龚斌,闻邦椿.刚度与阻尼突变转子系统的动力学研究[J].振动与冲击,2008,27(4):73-77.

作者简介:张博(1980.03-)男,山东昌邑人,硕士研究生,研究方向:航空发动机总体结构。