

航空发动机叶片丢失问题研究综述

马艳红^{1,2}, 梁智超¹, 王桂华³, 张大义^{1,2}, 洪 杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 对近年来航空发动机叶片丢失问题的研究进展进行了综述. 简述了叶片丢失过程相关的力学问题, 重点探讨了叶片丢失激励下转子和整机结构系统的瞬态动力特性以及持续生存能力方面的力学机理、数值仿真和试验研究成果, 包括叶片丢失过程中的载荷及力学行为、整机动力学建模和求解技术、整机和机理性试验研究等. 研究表明: 对于恶劣载荷环境下复杂结构系统, 需要以整机系统为研究对象并考虑载荷时效特征, 通过结构和动力学安全性设计策略提升结构完整性和可靠性.

关 键 词: 叶片丢失; 结构安全性; 瞬态动力特性; 持续生存能力; 突加不平衡; 严重碰摩; 非对称转子

中图分类号: V23

文献标志码: A

Review on the blade loss of aero-engine

MA Yan-hong^{1,2}, LIANG Zhi-chao¹, WANG Gui-hua³,

ZHANG Da-yi^{1,2}, HONG Jie^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Research progress on the blade loss of aero-engine was reviewed in recent years. The mechanical problems related to the blade loss process were outlined. The mechanical mechanism, numerical simulation and the test study of the transient dynamical characteristic and survival ability due to blade loss in the rotor and whole aero-engine structural system were discussed emphatically. The studies involved the load and mechanical behavior, the techniques of modeling and calculation, the test of mechanism and the whole aero-engine. The results show that it's necessary to take the whole aero-engine system as object and consider the load aging characteristic of the complex structural system in severe environment. The structural integrity and reliability can be improved by structural and dynamical design strategy.

Key words: blade loss; structural safety; transient dynamical characteristic; survival ability; sudden unbalance; heavy rub-impact; anisotropic rotor

收稿日期: 2014-07-25

作者简介: 马艳红(1975—), 女, 辽宁铁岭人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机整机动力学、旋转机械振动控制、智能结构与新型阻尼材料等方面的研究.

通讯作者: 张大义(1979—), 男, 辽宁抚顺人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机结构强度振动方面的研究. E-mail: dayi@buaa.edu.cn

航空燃气涡轮发动机(以下简称发动机)是一种高速旋转的复杂热动力机械,气动热力性能和结构效率的综合需求使其呈现“轻质”和“重载”的特征^[1],在全寿命使用周期内的工况和承受的载荷十分复杂,结构系统面临高温、高强和复杂振动的挑战,对安全性和可靠性要求较一般机械系统大幅提高。

叶片丢失是发动机可能遭遇的一种典型恶劣载荷工况,指部分或者整个转子叶片断裂后飞出,可由叶片或榫槽的疲劳失效、大尺寸的鸟撞或其他外物撞击等多种原因引起,将导致发动机严重的结构破坏,甚至引起飞行器损毁。航空安全管理机构基于适航安全性需求,对叶片丢失提出了明确要求,美国联邦航空管理局^[2]要求高涵道比涡扇发动机必须通过叶片丢失的试验,以验证涡扇发动机在发生风扇叶片丢失时,至少在15 s内保持在安装挂架上不脱落,且不发生任何非包容故障或引发失火的情况,并在最长的飞行期间内(有机型要求最长飞行时间为3 h)保证涡扇发动机处于安全状态,不致引发危险性故障,以使飞机可以安全返航。欧洲航空安全局^[3]、中国民用航空局^[4]也有类似的要求。此外,在发动机结构完整性和可靠性规范^[5]中也对叶片丢失工况下的安全性设计提出要求,说明叶片丢失是发动机研制过程中必须解决的重要问题。本文对发动机叶片丢失过程中与整机及转子系统相关的研究进展进行综述。

1 叶片丢失相关的力学问题

依据适航标准和设计规范,需要保证发动机在叶片丢失情况下:碎断件被包容且不导致二次破坏;发动机保持悬挂于机翼;不发生着火;能维持运转。这就意味着在工程设计中,需要考虑以下4类技术要求:①机匣包容性;②安装节结构完整性;③转静子系统瞬态动力特性;④转子系统的持续生存能力。

机匣对高能碎断叶片的包容能力,目的是防止断裂叶片穿透机匣打伤发动机及飞机部件,研究范畴属于冲击力学领域,研究思路上是丢失叶片作为投掷体,包容机匣作为目标体,研究目标体抵抗破坏的包容能力,研究方法主要是数值仿真和试验验证,研究成果体现于包容机匣的多层纤维结构设计^[6-7]。安装节的结构完整性设计主要是结构静强度和疲劳强度的研究,研究思路上是结构的优化设计,使得结构具有低应力水平、慢裂纹扩展速率、高疲劳寿命。对于整机及转子系

统的瞬态动力响应研究,研究对象为转子及承力系统,研究范畴涉及结构动力学、转子动力学、冲击动力学等,响应特征上具有整体耦合性和高度非线性。早期的研究主要是通过严酷的试验验证,但是其耗资巨大,近年的研究趋势是设计初期尽量避免或减少整机的试验,尽可能通过分析和模拟的手段验证结构的动力响应规律和特征^[8]。转子系统在风车状态^[9]下的持续生存能力,是近年新兴的一个研究方向,其特点是转子具有非对称性、转静件间严重碰摩引起复杂激励载荷和多变的约束条件,研究主要针对非对称转子在低转速范围内宽频共振和转子全周碰摩的振动响应问题。

对于前两类问题,主要是以部件为对象的强度问题,尤其是包容问题,目前的研究成果较为丰富,Naik, Stahlecker 等^[10-11]、宣海军等^[6]进行过详细综述。后两类问题的研究对象为转子乃至整机系统,载荷形式多样且作用机理复杂,目前尚无成熟的研究方法和设计体系,国际各发动机设计部门在力学机理模型、数值模拟仿真以及试验等方面进行了一定的探索性研究,下面着重针对这类问题的研究进行综述。

2 叶片丢失载荷及力学行为研究

针对复杂结构系统的复杂力学行为直接进行研究是十分困难的,需要提炼关键力学问题,通过一定的简化建模,获得其力学特征和规律,从而指导结构及动力学的优化设计并实现对动态行为的有效控制。本节依次对与叶片丢失过程中与转子系统相关的力学问题,如转子突加不平衡、转静件严重碰摩、非对称转子、转速时变过程等方面的研究进展进行梳理和分析。

2.1 突加不平衡激励

在转子动力学领域,突加不平衡响应为瞬态动力响应分析的重要内容之一^[12],对于突加不平衡响应的研究,主要关心两方面问题:一是转子瞬态位移和支反力的响应峰值,以及关键参数(不平衡量值、结构阻尼、陀螺力矩、支承刚度等)对振动响应的影响规律;二是转子系统振动响应的稳定性^[13],是否存在导致振动发散的因素,以及阻尼结构对振动的抑制作用。

以 Jeffcott 转子为对象,Genta^[14]对无阻尼转子系统进行分析,分析转子在不平衡载荷阶跃突增时的振动响应,结果如图1所示,横纵坐标为量纲一位移,为实际响应位移与稳态振幅之比值,表

明瞬态振动响应与转子的工作状态有关,在亚临界、临界转速附近以及超临界状态的振动响应不同,振动响应峰值取决于工作转速与临界转速的比值 ω/ω_n ,超临界状态比亚临界状态转子瞬态振动响应剧烈.另外,转子在两个方向的峰值位移响应是不同的,分别为稳态响应的 2 倍和 $(1+\omega/\omega_n)$ 倍.王宗勇等^[15-18]对有阻尼转子系统在质量、激励幅值、激励频率、刚度及阻尼突变情况下的动力学特性进行了研究,分析了各种参数突变前后稳态振幅之间的关系以及对轴心最大位移的影响.研究表明,各力学特征参数的突变都会导致转子系统的瞬态振动响应增大,瞬态响应过程的持续时间受到力学参数突变的程度、参数突变时的轴心位置以及转子的工作状态的综合影响.

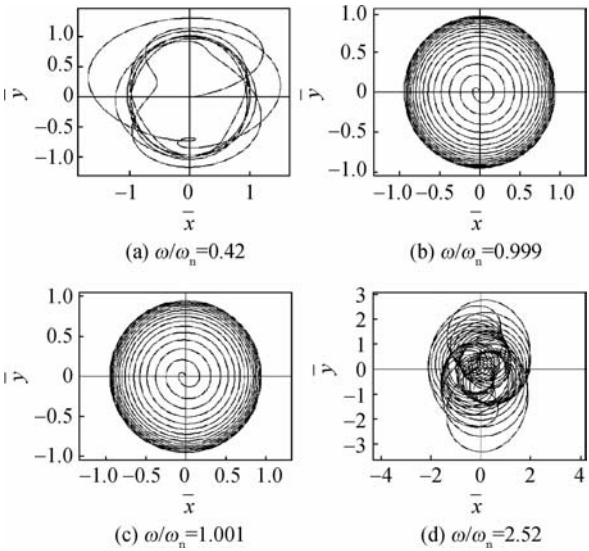


图 1 不同转速下突加不平衡响应轴心轨迹
Fig. 1 Axis orbits due to sudden unbalance response at different rotating speeds

在考虑陀螺力矩影响时,李涛等^[19]分析偏置单盘转子突加不平衡响应特征,结果表明突加不平衡会引起转子较大幅值的瞬态振动并最终趋于稳定,振动峰值响应和最终稳定值都近似正比于突加不平衡量,而转速越高,突加不平衡振动响应峰值反而越小. Dzenan^[20]基于单盘悬臂转子系统模型,对考虑刚度分布特征的转子系统进行了突加不平衡响应仿真分析,通过与 3 个发动机转子试验数据对比,结果表明在方案设计阶段采用简化模型可以有效预测分析转子的瞬态动力响应特性.

对于具有复杂结构特征的转子系统突加不平衡响应研究,任兴民等^[21-23]建立了瞬态盘传递矩阵方法,在计算中考虑了加速度的影响.晏砺堂

等^[13]对比分析了带有挤压油膜阻尼器的刚性转子和柔性转子在突加不平衡激励下的响应,采用传递率来表征系统的稳定性,传递率定义为通过阻尼支承的外传力与系统不平衡激振力的比值,当比值大于 1 时,转子失稳. Kalinowski 等^[24]定义突加不平衡冲击响应因子为瞬态响应峰值与稳态幅值的比值,如图 2 所示,以此来衡量突加不平衡产生的冲击效果.

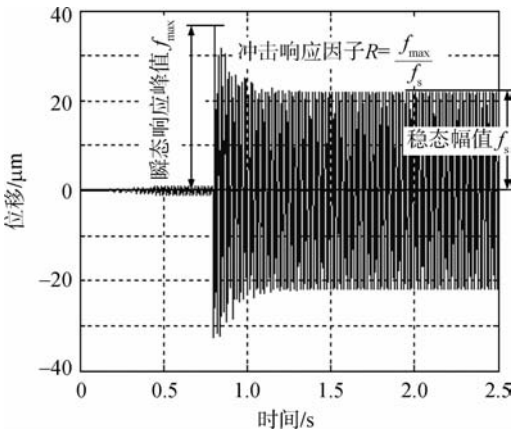


图 2 转子突加不平衡冲击响应因子
Fig. 2 Impact factor due to sudden unbalance response of rotor

上述研究表明,转子系统受到突加不平衡载荷作用时,转子瞬态振动响应突增,随后逐渐衰减为稳态,冲击效果与转子的工作状态有关,超临界状态工作的转子突加不平衡产生的冲击效果明显.

2.2 转静件严重碰摩

碰摩故障是旋转机械的常见故障^[25],由于其多发性和严重危害性,国内外学者在理论、仿真和试验方面均对其进行过大量的研究工作,包括系统在碰摩时可能出现的周期运动^[26-27]、概周期运动局部碰摩^[28-29]、混沌^[30-32]、干摩擦反向涡动^[33-35]以及碰摩与其他故障的耦合响应^[36-37]. Jacquet-Richardet 等^[38]对近年的碰摩研究进展进行了详尽的综述.

常规运行情况下的转静件碰摩与叶片丢失时的转静件碰摩大有不同.由于转子在巨大不平衡载荷作用下的振动响应剧烈,转子与机匣发生严重的持续刮蹭,属于碰摩分类中最为严重的全周碰摩问题,常采用的碰摩分析模型主要有 3 种^[39]

- 1) 弹性支承的刚性静子模型(将静子简化为一个弹性支承的刚性环);
- 2) 弹性转-静耦合模型(将静子简化为一个

弹性支承的弹性环)；

3) 附加刚度模型(将静子简化为附加刚度).

叶片丢失后引起的碰摩故障将在发动机的持续运转过程中不断发生,这对于转子系统而言,受到机匣附加于转子系统的非光滑约束作用.目前对于非光滑系统的研究多集中于简单结构的非线性机理,而对于带有复杂结构特征的柔性转子系统则鲜有研究,难以指导发动机的结构安全性设计.

2.3 非对称转子系统

叶片丢失后的发动机虽然丧失了推力,但飞机仍需继续飞行,前方的来流推动发动机转子继续旋转,转速取决于飞机的飞行速度,这个状态称为发动机的“风车状态”^[9].适航标准^[2]要求叶片丢失之后的发动机能够维持风车状态,因此需要验证转子的振动不会导致机体和关键部件的破坏,直至飞机完成剩余航线并安全着陆,这个过程可能长达数小时.在这个过程中,发动机转子系统呈现显著的非对称特征:一方面来源于转静件持续严重碰摩,机匣对转子的约束刚度非对称;另一方面来源于丢失的大叶片(风扇叶片)导致轮盘截面在互相垂直的主轴上具有不同的转动惯量,即转动惯量非对称.

早期的研究,主要是基于集中质量模型推导非对称转子系统的运动平衡方程,研究非对称转子的稳定性,包括非对称刚度、转动惯量、内外阻尼、重力等参数单独作用或者在不同组合状况下对转子稳定性和响应的影响^[40-41].Yamamoto等^[42]分析了弹性支承下的非对称转子的稳定性,当转子转速频率的2倍等于转子两个方向上的固有振动频率之和时,转子失稳.Yamamoto等^[43-45]研究非对称转子的强迫响应及在非线性支承下的稳定性,发现对于非对称转子,在激励频率作用下,响应频率不一定与激励频率相同,满足一定条件时响应频率等于2倍转速与激励频率之差.Ardayfio等^[46]进一步考虑了支承弹性对非对称转子稳定性的影响.Liu等^[47]建立了同时考虑转子和轴承非对称的转子系统数学模型,分析外阻尼、转子刚度各向异性系数、支承刚度各向异性系数以及支承相对柔度系数对转子稳定的影响.肖锡武等^[48-49]分别对非对称转子的参数激励强迫振动和非线性振动进行了研究.

转子临界转速附近的振动响应变化剧烈,对于临界转速附近的振动响应和稳定性的研究具有

重要的意义.Ikeda等^[50]对弹性基础支承的非对称转轴在临界转速附近的响应和稳定性进行了研究.Ganesan^[51]研究了支承和转子的非对称特征在临界转速附近对转子稳定性的影响,在转子的稳定性计算时考虑了转速变化的影响.

从上述文献中可以看出,非对称刚性转子系统的稳定性是以往对转子系统非对称问题的研究重点,研究背景来源于发电机转子、地面燃气轮机的裂纹转子等.然而对于发动机叶片丢失导致的转子非对称问题,研究对象为支承刚度非对称和转动惯量非对称耦合作用下的高速柔性转子系统,目前对其振动响应特征及稳定性的研究较少,而这恰恰是影响发动机转子系统安全性重要因素之一.

2.4 转速时变过程

失去动力后的发动机转速将迅速降低至风车转速状态,因而转速变化也是叶片丢失故障过程中的一个典型特征.转子在变速过程中除不平衡量产生的径向离心载荷外,还包含角加速度引起的切向惯性载荷.此外,转子的不平衡载荷(正比于转速平方)和陀螺力矩(正比于转速)均为时变参数.

Hassenpflug等^[52]、张萌等^[53]、缪红燕等^[54]分析了转子加、减速过程对临界转速响应的影响,结果均表明:转子的振动最大幅值随加速/减速比增大而减小.在变速过程中,临界转速附近振动响应出现拍振现象,原因在于转子通过临界时振动响应为固有频率和转速频率的耦合作用.张萌等^[53]分析加速/减速通过临界转速的响应特征,表明转子变速通过临界转速时振动响应具有滞后性,即加速过临界时峰值响应对应的转速高于临界转速,减速过临界时峰值响应对应的转速低于临界转速.

Lawrence等^[55]研究了转动惯量不对称的转子在减速过程中的瞬态响应特征,分析了减速时间对振动响应的影响,选取减速时间分别为1.0s和0.1s.结果表明,减速过程越短,陀螺力矩作用效果越小,转子振动响应程度越低.减速时间为1.0s的峰值位移是15.20mm,而减速时间为0.1s的位移峰值只有3.76mm,两者相差75%.

通过上面的分析可知,发动机叶片丢失力学机理研究的复杂性体现在几乎不可能通过建立一个力学模型实现对全过程力学特征的完整描述,但又不能将各种载荷完全割裂以分别研究,而需要依据载荷的时间历程和特征,建立考虑载荷作

Fig. 5 Whole aero-engine model based on solid elements

了试验的对比研究,为叶片丢失力学行为的预估提供了数据支撑。

上面两种整机计算模型尽最大地可能保留了整机的结构几何特征和结构力学特征,但对于分析叶片丢失这类考虑冲击效应、需要缩短时间步长的计算仿真来说,有必要在动力学等效的基础上进行模型的减缩,以提高计算效率。Husband^[62]在对高涵道比涡扇发动机进行风扇叶片丢失的仿真研究时,为满足显式计算的需求,进行了大幅的缩减,整机模型规模少于5000单元,如图6所示,并且在关键位置考虑了碰摩和连接结构的影响,基于模型进行了叶片丢失过程中的能量传递、支反力、碰摩力、部件界面反力、安装节反力以及过程中各位置变形及位移响应的分析研究。

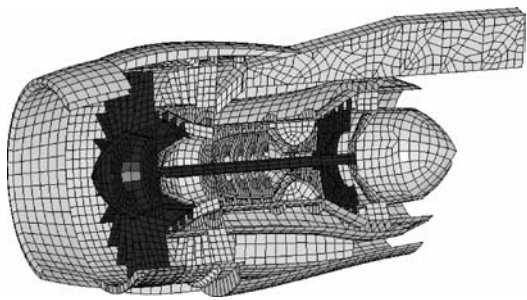


图6 基于壳单元建立的整机模型

Fig. 6 Whole aero-engine model based on shell elements

国内对于发动机整机振动的研究虽起步略晚,但起点较高,近年的研究成果也十分显著。陈萌等^[63]采用三维实体单元对发动机进行整机建模,分析了发动机承力系统的前、后支承的动刚度,并研究了动刚度、盘轴耦合以及转子-机匣耦合等对转子动力特性的影响。王海涛^[64]建立了双转子发动机整机模型,计算了机匣的振动模态及各支承的静刚度和动刚度,初步分析了连接结构、支承刚度、双转子转速关系对系统临界转速的影响。

在整机建模时,计算对象多,结构复杂程度高,如何提高模型的保真度十分重要,高金海等^[65]对建模过程中的简化方法和等效建模原则进行了研究,依据刚度和质量等效原则,对机匣系统中的辐板结构、孔类零件、附件机匣等提供了简化建模依据,结果表明合理的简化能大幅缩减模型规模、提高计算效率,并且能够满足整机动力学计算需求。

发动机整机建模技术和计算方法不断发展和完善,综合考虑转静子结构动力学特征、耦合效应和陀螺效应的有限元分析方法已经在动力特性分

析中广泛应用。对于线性/准线性系统的固有特性和响应分析方法已经比较成熟,然而对于强非线性问题,高保真的建模技术和自由度减缩技术是提高计算效率的基础,目前的研究尚不完善,还有待于进一步发展适用于发动机这类复杂旋转机械整机系统的非线性动力学响应分析的建模方法。

3.2 基于整机模型的数值求解技术

叶片丢失引发的动力学问题具有非线性的特征,包括结构系统的非线性(支承刚度、连接刚度等)、激励载荷的非线性(冲击载荷、碰摩载荷等)以及材料非线性。对于简单结构的力学行为研究,可采用非线性理论和方法进行研究,如分析动力学方程解的存在性、唯一性、周期性和稳定性等问题。但是对于复杂转子系统,其解析解是无法获得的,数值方法则更为有效,可用于系统的响应特征和规律的分析。从数值方法的差分格式上看,分为隐式和显式两类。显式方法^[66]主要有:中心差分法、Runge-Kutta法等;隐式方法^[67]主要有:Newmark法、Wilson- θ 法、精细积分等。

3.2.1 显式方法

显式方法适用于非线性系统的求解,因为非线性分析中,每个增量步的刚度矩阵式被修改,采用显式算法,避免了矩阵求逆的运算,具有明显的计算效率优势。但是显示方法也存在一些局限性:网格质量要求极高,整机建模复杂难度高;计算步长小,对于计算机的运算能力要求高,对于叶片丢失全过程分析采用显式计算程序不切实际;计算输出的数据复杂,对于决策而言不便于提供简单形式的结果。

对于碰撞、冲击等过程的仿真分析,常采用显式求解算法^[55,62,68],可以捕捉到动力响应的很多细节特征,由于其对模型规模和单元质量的限制,许多分析仅仅在部件模型的基础上完成的。

3.2.2 隐式方法

隐式方法的优点是,参数适当选取时,算法是无条件稳定的;求解过程中的线性方程组的系数矩阵保持了有限元系统矩阵的稀疏性和对称性;在不考虑结构非线性的情况下,每个时间步的系数矩阵是相同的,这时系数矩阵只需分解一次。缺点是本身的求解精度有限,并且精度对步长的依赖性很强;另外,在每一时间步都需要求解线性方程组,当系统矩阵随时间发生变化时,计算效率较低。

隐式求解方法适合于一般的整机动力特性的分析,包括固有模态分析、临界转速分析、稳态不

平衡响应分析等,其求解效率高,对于常规载荷的分析准确度经过了试验验证^[69-71],而对于系统参数时变的系统以及具有冲击效应载荷作用下的系统而言,这种算法就存在较大的局限性。

3. 2. 3 显式与隐式相结合求解方法

鉴于显式方法和隐式方法各自的优缺点以及叶片丢失过程的力学特征,目前国外普遍采用将两者相结合的方法,既能将叶片丢失的动力学问题考虑得更为全面精细,同时保有较好的计算效率。波音公司和 GEAE^[72]基于有限元方法对发动机整机计算模型进行了风扇叶片丢失激励下的动力学仿真,认为风扇叶片丢失引发的结构动力响应具有高度非线性的特征,需要在设计阶段对其进行精准和高效的仿真分析,提出了基于 NAS-TRAN 程序的隐式-显式-隐式的计算方法对叶片丢失进行仿真分析。俄罗斯土星公司^[68]采用隐式-显式结合方法分析叶片丢失响应,采用软件 ANSYS 隐式算法计算叶片的静应力,将其以预载荷形式加载,通过程序 LS-DYNA 显式算法分析叶片丢失过程中的动力响应。基本流程如下:

- 1) 通过隐式求解得到在旋转离心载荷和静态载荷(重力或过载载荷)下的预应力效应;
- 2) 风扇叶片丢失情况下转动数圈的显式解,仿真碎断叶片对机匣和尾随叶片的撞击过程,以及转子的横向弯曲振动和扭转振动;
- 3) 切换到隐式求解模块,以上步显式计算结果作为初始条件,继续对风车状态的转子进行仿真。

3. 3 叶片丢失力学行为仿真

国外针对叶片丢失激励下转子-支承-机匣系统的动力学仿真分析进行了大量的工作,其中最早的研究于 1983 年由 GEAE 的 Stallone 等^[73]完成,之后各发动机公司也都开展了相关的研究,例如 Alam 等^[74-75]进行了转子系统的冲击响应谱分析; Verrier 等^[76], Ortiz 等^[77], Cosme 等^[78], Jain^[79], Sinha, Heidari 等^[8, 72, 80], Husband^[62]对整机系统在叶片丢失激励下的动力响应进行了仿真分析。其中以 Sinha 等和 Husband 的研究工作较为全面、具有代表性,本小节主要列举他们的研究结论。

Sinha 等^[61]模拟得到风扇轮盘和风扇后支承位置处在叶片丢失激励下的轴心轨迹,如图 7 所示,转子振动响应增大,呈螺旋线轨迹,不同轴向位置的响应幅度和特征存在差异。

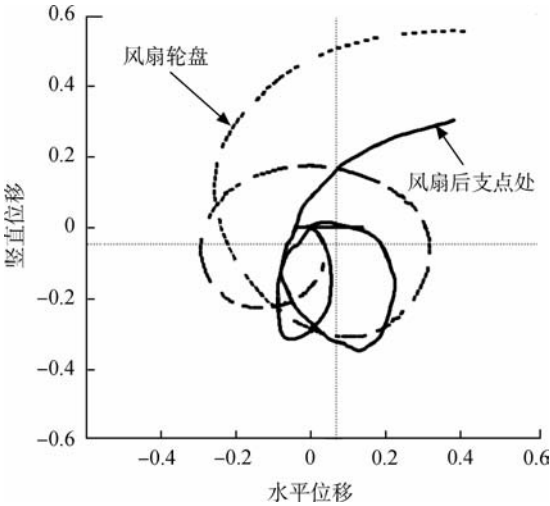
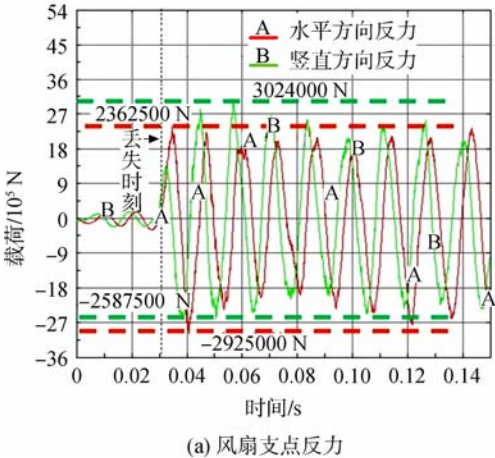


图 7 风扇轮盘和风扇后支承位置处轴心运动轨迹
Fig. 7 Axis orbits of fan disk and support behind fan

叶片丢失后,振动载荷通过轴承传递到静子系统,巨大的载荷可能引起轴承过载甚至破坏,因此对于叶片丢失后的支承载荷研究至关重要。图 8 所示为叶片丢失激励下风扇支点和涡轮支点的载荷响应,风扇叶片丢失对靠近风扇支点影响显著,在算例中其载荷的峰值超过涡轮支点载荷的 6 倍。

断裂飞出的叶片撞击机匣后产生冲击载荷,其余转子叶片则会与机匣发生持续碰摩,如图 9 所示。图 10 为叶片丢失后机匣上承受的载荷,机匣首先承受了来自于丢失叶片冲击载荷,之后,承受叶片与机匣的碰摩产生的径向的碰撞载荷和切向的摩擦载荷。

发动机内部的各种载荷最终通过安装和挂架传递到飞机机体上,通常情况下,安装节的载荷是为准静态的载荷。由于叶片丢失的发生,对安装节突加了瞬态载荷的作用。对于安装节的安全性分析,首先需要确定其受载情况,如图 11 分别为叶片丢失时,主安装节和副安装节的反力随时间的



(a) 风扇支点反力

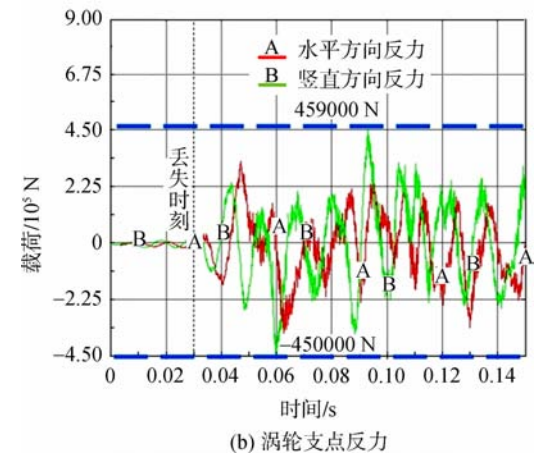


图 8 叶片丢失激励下支点反力响应
Fig. 8 Response of reaction force of support point due to blade loss

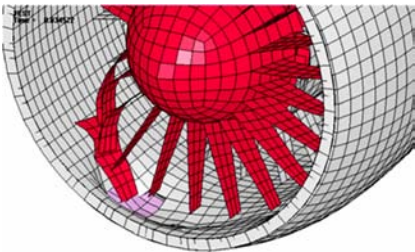


图 9 丢失叶片与机匣及其他叶片的相互作用
Fig. 9 Interaction among loss blade, case and other blades

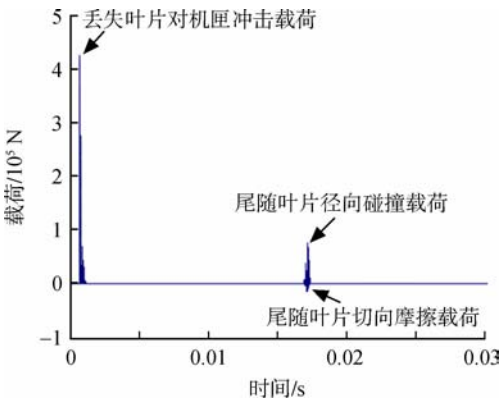


图 10 叶片丢失激励下机匣响应
Fig. 10 Response of case due to blade loss

变化曲线。叶片丢失发生后,主安装节和副安装节的载荷都产生了突增,随后载荷持续振荡,可能诱发安装节低周疲劳,甚至发生断裂失效。主安装节垂直方向载荷为拉压交变载荷,而水平方向载荷在几个周期之后只承受单向的拉力载荷。

基于有限元程序的数值仿真方法已经广泛应用于发动机结构与动力学设计中,也是目前国内

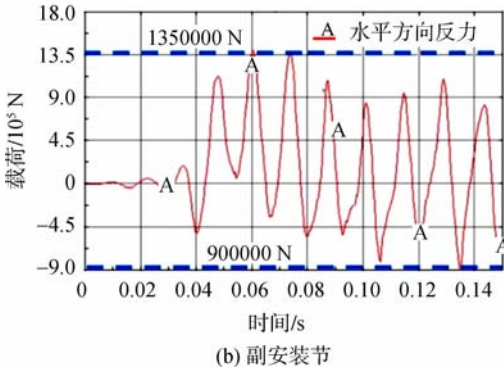
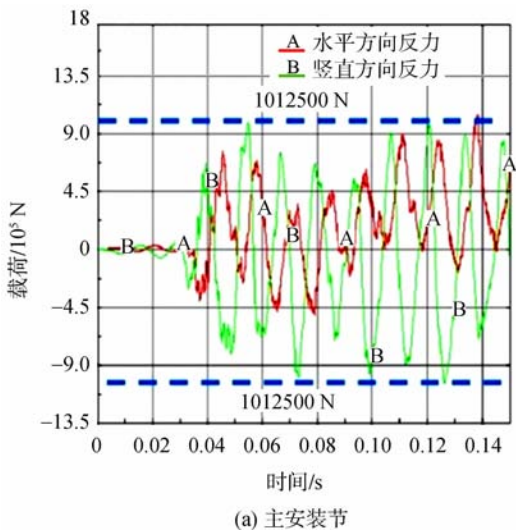


图 11 叶片丢失激励下安装节响应
Fig. 11 Response of mount due to blade loss

外发动机设计部门采用的主要手段,可大幅提高设计效率,降低研制成本。以整机为研究对象的数值仿真,尤其是恶劣载荷作用下的整机动力响应仿真,国外虽不断地进行探索,仍尚未形成标准的流程,国内的研究则更少,仅停留在整机固有特性和基础的动力特性计算层次,因此需要建立一套适用于叶片丢失激励下整机动力分析的仿真方法,为结构与动力学一体化设计提供有效途径。

4 叶片丢失试验研究

航空安全管理机构^[2]对叶片丢失整机试验的载荷输入要求是“在以最大允许转速运转期间,最危险的压气机或风扇的一个叶片失效,该叶片失效必须出现在轮缘最外层的固定榫槽处,或对于整体叶盘转子,叶片必须至少缺损 80%”。为满足要求,各型号高涵道比涡扇发动机必须通过严酷整机叶片丢失试验,这类试验对于整台发动机的破坏是毁灭性的,代价十分昂贵。

4.1 整机叶片丢失试验

典型的高涵道比涡扇发动机研制过程^[62]如图 12 所示,叶片丢失试验位于高涵道比涡扇发动机验证阶段后期,只有通过了叶片丢失验证,高涵道比涡扇发动机才能通过适航认证. 国际各型号高涵道比涡扇发动机大批量生产之前,无一例外必须经过整机的叶片丢失试验. 图 13 分别 PW

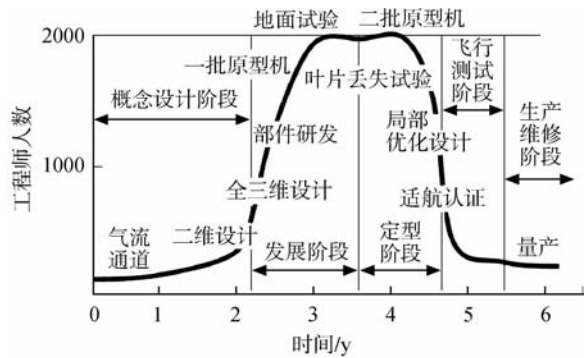


图 12 典型的高涵道比涡扇发动机研制过程
Fig. 12 Process of typical high bypass ratio turbofan engine design

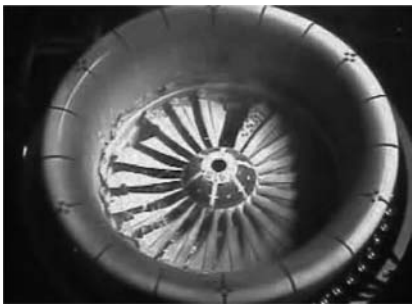


图 13 PW4084 发动机叶片丢失试验
Fig. 13 Blade loss test of PW4084 engine

(普惠)公司对 PW4084 发动机进行叶片丢失整机试验照片. 国内的高涵道比涡扇发动机处于研制阶段,对于叶片丢失的整机试验几乎没有实际经验.

通过整机叶片丢失试验,需要验证如下内

容^[62]:

- 1) 叶片必须被包容,不致击穿机匣;
- 2) 燃油系统安全切断不致起火;
- 3) 安装节保证完整;
- 4) 不允许打断超过 0.5 个尾随叶片,导致加剧转子不平衡程度;
- 5) 整个过程振动水平不超限,转子不发生失稳,包括叶片丢失瞬时及风车状态.

4.2 转子突加不平衡试验

20 世纪 70 年代,美国 Lewis 研究中心与普惠公司合作^[81]对柔性转子系统在叶片丢失载荷作用下的动力响应进行了试验研究,对运转于弯曲临界转速之上的转子突加不平衡载荷,以模拟叶片从发动机转子上丢失. 试验台的示意图如图 14 所示,5 个轮盘对称布置在轴上,两端的轮盘用于产生陀螺力矩,中间的轮盘含有 36 个孔,正常运转时各孔内安装平衡质量,当飞出一个平衡质量时,即产生突加不平衡载荷. 试验结果表明,转子突加不平衡载荷冲击时,首先激起瞬态响应,如果当时转速接近某 1 阶临界转速,会产生显著的拍振,在突加不平衡后 1 个周期内,振幅达到稳态不平衡响应的幅值,再经 2~3 个振动周期后,振幅达到最大,幅值将比稳态不平衡振幅增大 2~4 倍(与临界转速接近程度有关),拍振消失后,转子能否形成稳态的大不平衡振动,取决于丢失的转动部件结构,在瞬态响应和拍振消失后,还会产生稳态的不平衡振动;如果转轴在不平衡载荷作用下产生了塑性弯曲变形,转子振动可能失稳,严重时可引发断轴.

李其汉等^[82]对带弹性阻尼支承的转子系统由于叶片丢失突加不平衡产生的瞬态响应进行了研究,目的在于获得转子在突加不平衡条件下挤压油膜阻尼器抑制振动的有效性,进行了在不同转速和油膜间隙情况下,对转子施加不同的突加不平衡量的试验,观察转子系统由于非线性引起的一些特殊现象,如“锁死”、双稳态跳跃和亚协调

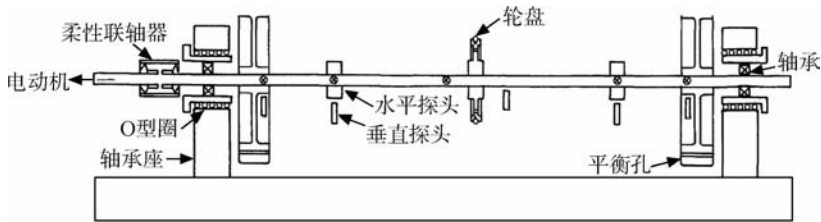


图 14 柔性转子突加不平衡载荷试验台
Fig. 14 Test rig of flexible rotor due to sudden unbalance load

进动等。

Kalinowski 等^[24]建立了叶片丢失转子模拟试验器,研究转子系统在突加不平衡载荷作用下的动力特性,试验器如图 15 所示.研究对象为亚临界工作状态的刚性转子系统,验证了突加不平衡响应的冲击效果,为其力学模型和仿真分析提供试验数据支撑。

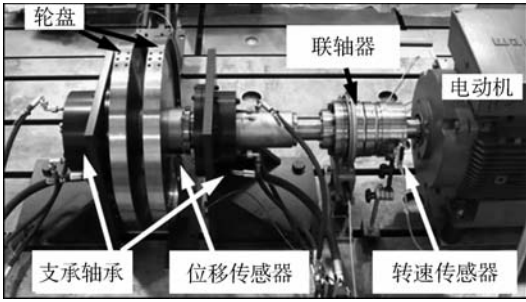


图 15 叶片丢失转子模拟试验台

Fig. 15 Rotor simulation test rig for blade loss

4.3 转静件碰摩试验

在转静件碰摩的试验研究方面,国内外的研究成果丰富,主要是针对碰摩故障的特征提取、识别及诊断. Jacquet-Richardet 等^[38]对碰摩试验的研究进展进行了详细综述,国内在这方面的研究成果较为领先,既有叶片与机匣碰摩机理试验,也有带有实际结构特征的发动机碰摩试验. 本小节简述国内几个具有代表性的碰摩试验研究成果。

高艳蕾等^[83]采用转子-机匣模型试验器,分别对发动机试车过程中所遇到的单点碰摩、双点碰摩、偏摩和双转子碰摩进行了模拟,并对各类碰摩的故障特征进行了总结. 研究发现,单点碰摩时,高频分量明显,倍频成分丰富,尤其是 2 倍频表现突出,振动的幅值不大,但是波形有明显改变,轴心轨迹也有明显的弹回点或凹陷点. 双点碰摩时,振幅普遍较大,高频成分更加丰富,并出现边频现象,每个周期有两个以上的弹回点或凹陷点. 偏摩时次谐波分量增加,轴心轨迹上存在多个弹回点或凹陷点. 双转子碰摩发展到一定程度时,机匣幅值谱中除了含有高、低压转子的倍频成分外,还含有高、低压转子的某一种或几种频率成分的组合。

卢文秀等^[84]利用试验对单盘、多盘的单转子和柔性连接的双转子系统的碰摩进行了研究,观察到了不同形式的周期运动和混沌运动. 发现通常情况下系统的响应会出现倍频和半频成分,特

殊情况下会出现 1/3 倍频成分. 对不同偏心的单盘和双盘碰摩转子系统进行试验研究,发现转子系统发生碰摩时,转子的轴心轨迹出现明显的碰撞折返特点、而振动波形有明显的削波现象;转子的振动既含有工作频率成分,也明显出现了高频谐波分量。

马辉等^[85]对单一碰摩和裂纹耦合碰摩故障进行了模拟,采集了故障转子系统的位移信号,利用关联维数和重排小波尺度图对两种故障进行了时间序列分析. 研究发现在不同系统运动形式的分岔点,会出现关联维数的突变,同时重排小波尺度图也会出现频率成分的变化。

刘书国^[86]、梁智超等^[87]建立了转子-支承-机匣系统碰摩模拟试验器. 对叶片与机匣间轻微碰摩和严重碰摩两种工况下转子和机匣振动响应进行了试验测量,并基于连续小波变换和连续小波包能量的时-频分析方法,分别对转子和机匣的振动信号进行了特征提取,结果表明轻微碰摩时以碰撞冲击效果为主,机匣响应主要为高频冲击信号,严重碰摩时摩擦效应增强,机匣响应信号同时包含高频冲击信号和低频摩擦信号。

目前的研究多针对局部碰摩故障,如点碰和偏摩,但是对于全周碰摩的试验研究成果较少。

4.4 非对称转子试验

在对非对称转子的研究中,国内外学者考虑了多种形式的转子非对称来源,对转子系统进行振动特征的测试和分析。

Hull^[88]设计试验对支承非对称、转子非对称及双重非对称转子的振动响应进行试验研究外,其他与非对称转子相关的文献中的试验均是验证试验,对理论或仿真分析所得结论的试验结果进行验证. Toshio 等^[45]设计了一个竖直放置的单盘转子,通过将圆盘材料进行部分切除来模拟惯性非对称转子,通过该装置进行试验,验证其“非对称转子强迫响应的频率不一定等于激励频率”的结论. Yamamoto 实现刚度非对称和惯性非对称的转轴和圆盘的结构形式被其他学者广泛采用, Kang 等^[89-90], Ikeda 等^[50], Ishida 等^[91], Nagasaka 等^[92]在他们的非对称转子验证试验设计中均采用了类似的结构形式。

5 结论及展望

本文针对叶片丢失激励下与发动机整机及转子系统相关的力学问题研究进展进行了综述,得到主要结论及研究展望如下:

1) 叶片丢失的过程及载荷特征研究. 发动机结构在恶劣载荷下的动载荷传播过程和力学特征与一般的准静态载荷不同,具有较强的时效性和破坏性. 目前国内发动机结构设计准则和手册中,缺乏对恶劣载荷作用力学特征的准确描述和模拟方法,对于复杂转子结构系统的冲击动载荷的传播过程及其力学特征没有深入的认识. 对于典型的恶劣载荷作用下产生的失效模式和失效机理尚未明确,因此建立的力学模型缺乏精度和有效的说服力. 有必要深入研究叶片丢失全过程中载荷的作用机理,有助于更好地理解叶片丢失的力学行为.

2) 叶片丢失的力学行为仿真与试验验证. 在恶劣载荷环境下,结构的动力学特征呈现整体耦合性特征,因而在结构安全性设计上,发动机整机结构,甚至飞机与动力装置构成了不可分割的整体,需要共同作为研究对象进行研究. 而国内目前的计算仿真能力,对结构的整体分析技术和一体化设计能力还需要进一步加强. 为了提高发动机模型的精度,应该考虑转子、承力系统以及安装节的相关动力学影响,建立更接近实际结构的三维模型. 开展发动机整机建模技术研究,使之能够进行瞬态过程的精确模拟,可以用于分析风扇叶片丢失的时序变化. 另外,目前在工程分析中,在方法上以线性分析为主,对于强冲击载荷作用下的大载荷、大变形非线性问题研究不足,分析模型精度不高,同时也亟需开展相关的试验研究,为数值仿真技术提供数据支撑.

3) 针对叶片丢失的结构安全性设计技术. 国外发动机设计部门均对叶片丢失进行了深入的研究,形成了较为成熟的设计体系. 在国内,高涵道比涡扇发动机的研制工作尚属起步,对于叶片丢失的设计和验证更是没有实际经验. 因此,需要对发动机的安全性设计技术进行深入细致的研究,包括宏观的设计准则和策略以及具体的设计方法和技术,从而完善现有发动机的设计体系,对于加快我国发动机的设计进程、提高其结构完整性和可靠性具有重要的意义.

参考文献:

[1] 马艳红,陈璐璐,张大义,等. 航空发动机转子系统结构效率评估参数及计算方法[J]. 航空动力学报,2013,28(7):1598-1606.
MA Yanhong, CHEN Lulu, ZHANG Dayi, et al. Assessment parameters and calculation methods of structural efficiency on rotor system in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1598-1606. (in Chinese)

[2] Federal Aviation Regulations. 14 CFR Part 33 Airworthiness standards: aircraft engines[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1993: 81-99.
[3] European Aviation Safety Agency. CS-E Certification specifications for engines[S]. Cologne, Germany: European Aviation Safety Agency, 2009: 140-141.
[4] 中国民用航空总局. CCAR-33-R2 航空发动机适航规定[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2011: 38-78.
[5] United States Air Force. MIL-HDBK-1783B Engine structural integrity program[S]. Washington: United States Air Force, 2002: 9-16.
[6] 宣海军,陆晓,洪伟荣,等. 航空发动机机匣包容性研究综述[J]. 航空动力学报,2010,25(8):1860-1870.
XUAN Haijun, LU Xiao, HONG Weirong, et al. Review of aero-engine case containment research[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1860-1870. (in Chinese)
[7] YANG Bin. Blade containment evaluation of civil aircraft engines[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(1): 9-16.
[8] Sinha S K. Rotordynamic analysis of asymmetric turbofan rotor due to fan blade-loss event with contact-impact rub loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(9): 2253-2283.
[9] Gotz V G. Windmilling in aero-engines[D]. London, UK: Imperial College London, 2001.
[10] Naik D, Sankaran S, Mobasher B, et al. Development of reliable modeling methodologies for fan blade out containment analysis; Part I experimental studies[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 1-11.
[11] Stahlecker Z, Mobasher B, Rajan S D, et al. Development of reliable modeling methodologies for engine fan blade out containment analysis; Part II finite element analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3): 447-459.
[12] 付才高,郑大平,欧园霞,等. 航空发动机设计手册:第19册 转子动力学及整机振动[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
[13] 晏砺堂,张世平,李其汉. 高效多孔环挤压油膜阻尼器的减振特性研究[J]. 航空动力学报,1993,8(3):225-233.
YAN Litang, ZHANG Shiping, LI Qihan. Vibration characteristics of rotor systems with porous squeeze film damper (PSFD) supports[J]. Journal of Aerospace Power, 1993, 8(3): 225-233. (in Chinese)
[14] Genta G. Dynamics of rotating systems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
[15] 王宗勇,龚斌,闻邦椿. 质量及激励幅值突变转子系统动力学研究[J]. 振动与冲击,2008,27(8):48-51.
WANG Zongyong, GONG Bin, WEN Bangchun. Research on rotor dynamics with sudden change of mass and excitation magnitude[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 48-51. (in Chinese)
[16] 王宗勇,龚斌,闻邦椿. 激励频率突变转子系统的动力学研究[J]. 中国机械工程,2008,19(8):985-989.
WANG Zongyong, GONG Bin, WEN Bangchun. Research

- on rotor dynamics with sudden change frequency[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 985-989. (in Chinese)
- [17] 王宗勇, 龚斌, 闻邦椿. 激励幅值突变转子系统的动力学研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 55-59.
WANG Zongyong, GONG Bin, WEN Bangchun. Research on rotor dynamics with sudden change frequency[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(3): 55-59. (in Chinese)
- [18] 王宗勇, 林伟, 闻邦椿. 质量突变转子系统的动力学研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(13): 1586-1589.
WANG Zongyong, LIN Wei, WEN Bangchun. Research on rotor dynamics with sudden change mass[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(13): 1586-1589. (in Chinese)
- [19] 李涛, 任兴民, 岳聪, 等. 单盘转子突加不平衡瞬态响应特征研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 924-927.
LI Tao, REN Xingmin, YUE Cong, et al. Transient response of single-disc rotor system under sudden unbalance load[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 924-927. (in Chinese)
- [20] Dzenan H. Mechanical loads on a turbofan engine structure at blade-off[D]. Lulea, Sweden: Lulea University of Technology, 2009.
- [21] 任兴民, 顾家柳. 航空发动机转子-支承系统的突加不平衡响应[J]. 振动工程学报, 1991, 4(3): 75-82.
REN Xingmin, GU Jialiu. Response of suddenly applied unbalance for aeroengine rotor-support system[J]. Journal of Vibration Engineering, 1991, 4(3): 75-82. (in Chinese)
- [22] 任兴民, 顾家柳. 带挤压油膜阻尼器的转子系统瞬态动力响应计算方法[J]. 西北工业大学学报, 1991, 9(3): 290-297.
REN Xingmin, GU Jialiu. Transient dynamic response of rotor system with squeeze film damper bearings[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1991, 9(3): 290-297. (in Chinese)
- [23] 顾家柳, 任兴民. 求解转子系统突加不平衡响应方法的研究[J]. 应用力学学报, 1991, 8(4): 56-62.
GU Jialiu, REN Xingmin. A study on solution of suddenly applied unbalance of a rotor-support system[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1991, 8(4): 56-62. (in Chinese)
- [24] Kalinowski P, Barga O, Liebh R. Vibrations of rotating machinery due to sudden mass loss[C]//Proceeding of the 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. Seoul, Korea: IFToMM, 2010: 584-590.
- [25] 邓小文, 廖明夫, Liebh R, 等. 碰摩转子的弯曲和扭转振动分析[J]. 航空动力学学报, 2002, 17(1): 97-104.
DENG Xiaowen, LIAO Mingfu, Liebh R, et al. Coupled bending and torsional vibrations due to rotor-to-stator contacts[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 97-104. (in Chinese)
- [26] Li Q, Lu Q. Single rub-impacting periodic motions of a rigid constrained rotor system[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2000, 5(4): 158-161.
- [27] 褚福磊, 汤晓璇, 唐云. 碰摩转子系统的稳定性[J]. 清华大学学报, 2000, 40(4): 119-123.
CHU Fulei, TANG Xiaoying, TANG Yun. Stability of a rub-impact rotor system[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(4): 119-123. (in Chinese)
- [28] Kim Y B, Noah S T. Bifurcation analysis for a modified Jeffcott rotor with bearing clearances[J]. Nonlinear Dynamics, 1990, 1(3): 221-241.
- [29] Kim Y, Noah S T. Quasi-periodic response and stability analysis for a non-linear Jeffcott rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(2): 239-253.
- [30] Khanlo H M, Ghayour M, Ziaei-Rad S. Chaotic vibration analysis of rotating flexible continuous shaft-disk system with a rub-impact between the disk and the stator[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(1): 566-582.
- [31] Muszynska A, Goldman P. Chaotic responses of unbalanced rotor bearing stator systems with looseness or rubs[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1995, 5(9): 1683-1704.
- [32] Qin W, Chen G, Meng G. Nonlinear responses of a rub-impact overhung rotor[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004, 19(5): 1161-1172.
- [33] JIANG Jun, SHANG Zhiyong, HONG Ling. Characteristics of dry friction backward whirl: a self-excited oscillation in rotor-to-stator contact systems[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(3): 674-683.
- [34] Wilkes J C, Childs D W, Dyck B J, et al. The numerical and experimental characteristics of multimode dry-friction whip and whirl[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(5): 785-794.
- [35] Yu J J. On occurrence of reverse full annular rub[R]. ASME Paper GT2011-45153, 2011.
- [36] Patel T H, Darpe A K. Coupled bending-torsional vibration analysis of rotor with rub and crack[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326(3/4/5): 740-752.
- [37] Luo Y, Ren Z, Ma H, et al. Stability of periodic motion on the rotor-bearing system with coupling faults of crack and rub-impact[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21(6): 860-864.
- [38] Jacquet-Richardet G, Torkhani M, Cartraud P, et al. Rotor to stator contacts in turbomachines: review and application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(2): 401-420.
- [39] 张华彪, 陈子恕, 李军. 弹性支承-刚性转子系统同步全周碰摩的分岔响应[J]. 应用数学和力学, 2012, 33(7): 812-827.
ZHANG Huabiao, CHEN Yushu, LI Jun. Bifurcation on the synchronous full annular rub of a rigid-rotor elastic-support system[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 33(7): 812-827. (in Chinese)
- [40] Crandall S H, Brosens P J. On the stability of rotation of a rotor with rotationally unsymmetric inertia and stiffness properties[J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(4): 567-570.
- [41] Brosens P J, Crandall S H. Whirling of unsymmetrical rotors[J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(3): 355-362.

- [42] Yamamoto T, Ota H. On the unstable vibrations of a shaft carrying an unsymmetrical rotor[J]. Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(3): 515-522.
- [43] Yamamoto T, Ishida Y, Aizawa K. On the subharmonic oscillations of unsymmetrical shafts[J]. Bulletin of JSME, 1979, 22(164): 183-191.
- [44] Yamamoto T, Ishida Y, Ikeda T. Summed and differential harmonic oscillations of an unsymmetrical shaft[J]. Bulletin of JSME, 1981, 24(187): 183-191.
- [45] Toshio Y, Hiroshi O, Kiyoomi S. On the forced vibrations of the shaft carrying an unsymmetrical rotor: forced vibrations having the circular frequencies differing from the rotating angular velocity of the shaft[J]. Bulletin of JSME, 1966, 9(33): 58-66.
- [46] Ardayfio D, Frohrib D A. Instabilities of an asymmetric rotor with asymmetric shaft mounted on symmetric elastic supports[J]. Journal of Engineering for Industry, 1976, 98(4): 1161-1165.
- [47] Liu Z S, Huang S L, Su J X. An analysis of the stability of an asymmetrical rotor-bearing system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(1): 70-72.
- [48] 肖锡武, 肖光华, 杨叔子. 不对称转子系统的参激强迫振动[J]. 振动工程学报, 2002, 15(3): 71-74.
XIAO Xiwu, XIAO Guanghua, YANG Shuzi. Parametrically excited and forced oscillations of an unsymmetrical rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(3): 71-74. (in Chinese)
- [49] 肖锡武, 杨正茂, 肖光华, 等. 不对称转子系统的非线性振动[J]. 华中科技大学学报, 2002, 30(5): 81-84.
XIAO Xiwu, YANG Zhengmao, XIAO Guanghua, et al. Nonlinear oscillations of an unsymmetrical rotor system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002, 30(5): 81-84. (in Chinese)
- [50] Ikeda T, Murakami S. Dynamic response and stability of a rotating asymmetric shaft mounted on a flexible base[J]. Nonlinear Dynamics, 1999, 20(1): 1-19.
- [51] Ganesan R. Effects of bearing and shaft asymmetries on the instability of rotors operating at near-critical speeds[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(5): 737-752.
- [52] Hassenpflug H L, Flack R D, Gunter E J. Influence of acceleration on the critical speed of a Jeffcott rotor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1981, 103(1): 108-113.
- [53] 张萌, 任兴民, 段向春. 单盘转子的瞬态不平衡动力响应分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(1): 116-118.
ZHANG Meng, REN Xingmin, DUAN Xiangchun. Transient dynamic response of Jeffcott rotor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2006, 25(1): 116-118. (in Chinese)
- [54] 缪红燕, 高金吉, 徐鸿. 转子系统瞬态不平衡响应的有限元分析[J]. 振动与冲击, 2004, 23(3): 1-4.
MIAO Hongyan, GAO Jinji, XU Hong. Transient response of unbalanced rotor system through its critical speed[J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(3): 1-4. (in Chinese)
- [55] Lawrence C, Carney K, Gallardo V. Simulation of aircraft engine blade out structural dynamics[R]. NASA/TM-2001-210957/REV1, 2001.
- [56] 张大义, 刘焯辉, 洪杰, 等. 航空发动机整机动力学模型建立与振动特性分析[J]. 推进技术, 2015, 36(5): 768-773.
ZHANG Dayi, LIU Yehui, HONG Jie, et al. Investigation on dynamical modeling and vibration characteristics for aero engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(5): 768-773. (in Chinese)
- [57] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1371-1391.
CHEN Yushu, ZHANG Huabiao. Review and prospects on the research of dynamics of complete aero-engine systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1371-1391. (in Chinese)
- [58] Dascotte E, Schonrock A. Validation and updating of an aeroengine finite element model based on static stiffness testing[C] // Aerospace Users' Conference Proceedings. Long Beach, US; MSC Company, 1999: 1-7.
- [59] Shinozaki M, Funatagawa O, Kobayashi M. Study of stator structure modeling for rotor dynamic analysis[R]. ASME Paper 2001-GT-0254, 2001.
- [60] 郑旭东, 张连祥, 刘廷毅. 航空发动机整机振动特性及应变能计算与分析[J]. 航空发动机, 2000, 26(2): 42-46.
ZHENG Xudong, ZHANG Lianxiang, LIU Tingyi. Vibration and strain energy of aeroengine[J]. Aeroengine, 2000, 26(2): 42-46. (in Chinese)
- [61] Sinha S, Dorbala S. Dynamic loads in the fan containment structure of a turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22(3): 260-269.
- [62] Husband J B. Developing an efficient FEM structural simulation of a fan blade off test in a turbofan jet engine[D]. Saskatoon, Canada; University of Saskatchewan, 2007.
- [63] 陈萌, 马艳红, 刘书国, 等. 航空发动机整机有限元模型转子动力学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1013-1016.
CHEN Meng, MA Yanhong, LIU Shuguo, et al. Rotordynamic analysis of whole aero-engine models based on finite element method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1013-1016. (in Chinese)
- [64] 王海涛. 某型航空发动机整机振动特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
WANG Haitao. Research on whole body vibration of aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [65] 高金海, 洪杰. 航空发动机整机动力特性建模技术研究[J]. 战术导弹技术, 2006(3): 29-35.
GAO Jinhai, HONG Jie. Study of modeling technique for dynamic characteristics of engine casing[J]. Tactical Missile Technology, 2006(3): 29-35. (in Chinese)
- [66] Padmanabhan C, Singh R. Analysis of periodically excited

- non-linear systems by a parametric continuation technique [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 184(1): 35-58.
- [67] 陈予恕. 非线性动力学中的现代分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [68] Shmotin Y N, Gabov D V. Numerical analysis of aircraft engine fan blade-out[R]. AIAA-2006-4620, 2006.
- [69] Kumar M S. Rotor dynamic analysis using ANSYS[C]// *Proceedings of International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics*. New Delhi India; Springer, 2011: 153-162
- [70] Jeon S M, Kwak H D, Yoon S H, et al. Investigation on the rotordynamic characteristics of the turbopump with the casing structural flexibility[R]. AIAA-2007-5543, 2007.
- [71] HONG Jie, CHEN Meng, LIU Shuguo. Application of whole engine finite element models in aero-engine rotordynamic simulation analysis [R]. ASME Paper GT2007-27162, 2007.
- [72] Heidari M, Carlson D, Sinha S, et al. Anefficient multi-disciplinary simulation of engine fan-blade out event using MD Nastran[R]. AIAA-2008-2333, 2008.
- [73] Stallone M J, Bach L J, Black G, et al. Blade loss transient dynamic analysis of turbomachinery [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(8): 1134-1138.
- [74] Alam M, Nelson H D. A blade loss response spectrum for flexible rotor systems[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, 107(1): 197-204.
- [75] Alam M. Shock spectra analysis of rotor-bearing systems [D]. Arizona, US: Arizona State University, 1985.
- [76] Verrier P, Martinal H, Kohli-Lynch S. Blade loss simulations of bending vibrations applied to a 1 750 MW turbo generator set[C]// *Proceedings of 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics*. Seoul, Korea; IF-ToMM, 2010: 725-730.
- [77] Ortiz R, Herran M, Chalons H. Blade loss studies in low-pressure turbines; from blade containment to controlled blade-shedding[J]. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2009, 10(1): 2495-2499.
- [78] Cosme N, Chevrolet D, Bonini J, et al. Prediction of transient engine loads and damage due to hollow fan blade-off [J]. *European Journal of Computational Mechanics*, 2002, 11(5): 651-666.
- [79] Jain R. Prediction of transient loads and perforation of engine casing during blade off event of fan rotor assembly[C]// *Proceedings of International Symposium on Structural Failure and Plasticity*. Rhode Island, US; Society for Experimental Mechanics, 2010: 1-10.
- [80] Sinha S K. Dynamic characteristics of a flexible bladed-rotor with Coulomb damping due to tip-rub[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 273(4/5): 875-919.
- [81] Hibner D R, Bzlono D F. Experimental study of transient dynamics of a flexible rotor[R]. NASA CR-2703, 1976.
- [82] 李其汉, 赵福安, 张世平. 带弹性阻尼支承的转子系统丢失叶片瞬态响应试验研究[J]. *航空动力学报*, 1992, 7(2): 103-107.
- LI Qihan, ZHAO Fuan, ZHANG Shiping. Experimental investigation on blade loss transient response of rotor with flexible damped support[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1992, 7(2): 103-107. (in Chinese)
- [83] 高艳蕾, 李勇, 王德友. 转子-机匣系统碰摩故障特征试验研究[J]. *航空发动机*, 2002, 28(4): 16-21.
- GAO Yanlei, LI Yong, WANG Deyou. Experimental investigation of rotor-to-casing rubbing faults[J]. *Aeroengine*, 2002, 28(4): 16-21. (in Chinese)
- [84] 卢文秀, 褚福磊. 转子系统碰摩故障的实验研究[J]. *清华大学学报*, 2005, 45(5): 614-617.
- LU Wenxiu, CHU Fulei. Experimental investigation of rotor rubbing faults[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2005, 45(5): 614-617. (in Chinese)
- [85] 马辉, 李焕军, 刘杨, 等. 转子系统耦合故障研究进展与展望[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(17): 1-11.
- MA Hui, LI Huanjun, LIU Yang, et al. Review and prospect for research of coupling faults in rotor systems[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(17): 1-11. (in Chinese)
- [86] 刘书国. 航空发动机转静子碰摩的动力学响应研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- LIU Shuguo. Studies on dynamics of the rotor-to-stator rub-impact in aero engine [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [87] 梁智超, 张振波, 刘书国, 等. 转子-支承-机匣系统碰摩试验及特征提取[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(3): 604-611.
- LIANG Zhichao, ZHANG Zhenbo, LIU Shuguo, et al. Experimental investigation of rub-impact in rotor-support-case system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 604-611. (in Chinese)
- [88] Hull E H. Shaft Whirling as influenced by stiffness asymmetry[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1961, 83(2): 219-226.
- [89] Kang Y, Liu C P, Sheen G J. A modified influence coefficient method for balancing unsymmetrical rotor-bearing systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 194(2): 199-218.
- [90] Kang Y, Lee Y G, Chen S C. Instability analysis of unsymmetrical rotor-bearing systems using the transfer matrix method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 199(3): 381-400.
- [91] Ishida Y, Inoue T. Internal resonance phenomena of an asymmetrical rotating shaft[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2005, 11(9): 1173-1193.
- [92] Nagasaka I, Ishida Y, Liu J. Forced Oscillations of a continuous asymmetrical rotor with geometric nonlinearity: major critical speed and secondary critical speed[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2008, 130(3): 1-7.