

引用格式: 胡明辉, 高金吉, 江志农, 等. 航空发动机振动监测与故障诊断技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(4): 630194.
HU M H, GAO J J, JIANG Z N, et al. Research progress on vibration monitoring and fault diagnosis for aero-engine
[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(4): 630194 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2024.30194

航空发动机振动监测与故障诊断技术研究进展

胡明辉^{1,2}, 高金吉^{1,3,*}, 江志农^{1,2}, 王维民^{1,3}, 邹利民², 周涛³,
凡云峰³, 王越³, 冯家欣³, 李晨阳²

封面
文章

1. 北京化工大学 高端压缩机及系统技术全国重点实验室, 北京 100029
2. 北京化工大学 发动机健康监控及网络化教育部重点实验室, 北京 100029
3. 北京化工大学 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029

摘要: 航空发动机汇集各领域高精尖技术, 是国家科技、工业和国防实力的综合体现。复杂结构与恶劣服役环境致使其故障频发, 发动机故障诊断与健康监测技术成为保障其安全、可靠运行的重要支撑。由于振动类故障是航空发动机的主要故障模式, 本文从整机振动监测与故障诊断的系统研制与应用、理论研究现状及发展方向3个方面, 对国内外现有航空发动机振动类故障诊断技术进行梳理、剖析, 具体包括动力学分析、信号处理及深度学习等相关技术, 分析航空发动机振动类故障诊断面临的问题与挑战, 并归纳未来发展趋势。

关键词: 航空发动机; 故障诊断; 振动分析; 动力学模型; 信号处理; 智能诊断

中图分类号: V263.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2024)04-630194-29

航空发动机是一个国家科技、工业和国防实力的重要体现, 作为“工业皇冠上的明珠”, 航空发动机在结构设计、材料和制造工艺及试验方面具有极高的要求。为保障国家安全和巩固大国地位, 中国自2015年相继启动“中国制造2025”计划、“两机专项”、国家“十四五规划纲要”和“2035年远景”目标纲要, 均明确了加快航空发动机核心技术发展的迫切需求^[1]。

先进航空发动机不断朝着高效率、高推重比的方向发展, 使得结构更为复杂, 且逐渐趋于轻量化, 同时发动机长期服役于高速、高温、高压的极端环境, 导致其关键部件的疲劳损伤、突发故障等问题频发^[2]。发动机故障一旦发生, 会直接

危及飞机的飞行安全, 极易导致机毁人亡等恶性事故, 如图1^[3]所示。因此, 因发动机故障导致飞机动力严重不足之前, 如果能及时、准确地监测诊断出故障原因, 对保障飞行安全、降低事故发生率具有重大意义。

从20世纪50年代开始, 欧美各国持续开展了状态监测和故障诊断技术的研究^[4-5], 发动机健康管理(EHM)系统也逐渐得到了广泛关注。EHM系统可在发动机运行过程中对关键部件状态进行实时监测, 通过振动分析、滑油监测、性能分析等技术实现故障预测、诊断和寿命管理, 进而向飞行员报告危及飞行安全的早期故障信息, 避免二次损伤和飞机事故。

收稿日期: 2024-01-19; 退修日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-22; 网络出版时间: 2024-02-25

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I4/630194>

基金项目: 国家自然科学基金(92160203); 特殊领域青年人才托举工程(2022-JCJQ-QT-059); 装备预研教育部联合基金(8091B022203)

* 通信作者: E-mail: gaojinji@263.net

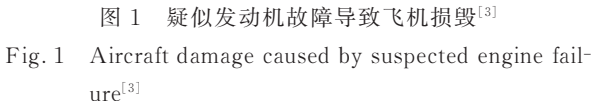


Fig. 1 Aircraft damage caused by suspected engine failure^[3]

航空发达国家发动机 PHM 技术的研究与应用均已取得了显著突破。PHM 技术的最早成功应用可追溯到 1977 年, TF-41 发动机监测系统, 将 A-7E 飞机的故障率降低了 91%, 且维修效率平均提高了 64%^[9]; 1979 年, 通用电气公司为 F414-GE-400 型发动机配装了 IECMS 发动机状态监测系统, 经美国海军应用评估, 发动机异常检测率为 100%、虚警率为 0%^[10]; 1987 年, 普惠公司为 F100-PW-200 发动机研制并安装了健康管理系统, 实现了所有同型发动机的健康监测和管理, 并增加了发动机监测数据趋势分析及故障诊断功能^[11]; 1990 年, 涡扇发动机 EJ200 配备的 EHM 系统采用机载系统和地面支持系统的综合健康管理架构方案, 已具备完善的状态监测和故障诊断功能^[12]。F135 发动机配装的健康管理系统延续了 F119 的双 FADEC 和 CEDU 模式, 并增加了故障预测功能, 提出了分层区域预测健康管理系统的概念, 集成先进传感器、先进算法和

Fig. 2 EHM system framework proposed by the United States^[6]

表 1^[12]总结了美国发动机监测系统、维修策略与相关技术文件的发展沿革。由此可见,PHM 是美国保障飞行安全和新型维修模式变革的主要实现技术,且日趋规范化^[16]。

表 1 美国航空发动机分段发展的预测与健康管理系统^[12]
Table 1 PHM systems for segmented development of American aero-engine^[12]

名称	状态监视系统	状态监测与诊断系统	诊断与健康管理系统	预测与健康管理系统
举例	F404-GE-400	F100-PW-200	F119	F135
系统特点	振动告警、振动趋势分析、修正平衡、频谱分析、响应特性分析	空中状况监测、振动测量、发动机寿命计数器、相对损伤图表	发动机状态监测、机载诊断、机载内试验和可检查性	机载振动监测、故障监测和故障隔离、故障预测、任务评估
维修策略	事后维修	定时/事后维修	视情维修	预测维修
军事需求	飞行安全	飞行安全/经济性	飞行安全/经济性	飞行安全/经济性
技术文件	SAE AS 8054A-2012, MIL-E-5007D	SAE ARP 1587, JSGS-87231A	SAE ARP 1587B, JSSG-2007A	SAE AIR 4061B, JSSG-2007B

与发达国家相比,中国对航空发动机 PHM 技术的研究与应用起步较晚。在役航空发动机仍主要采用以机上超限告警监测、机下离线飞参数据判读为主的监测诊断技术,往往在发动机部件损伤或结构故障发展到较严重程度才能发挥作用^[12]。

虽然近年来一些科研院所取得了部分技术成果,但鲜见实现机载的广泛应用。由北京飞机维修工程公司、中国东方航空集团有限公司等联合研制的发动机监测与诊断系统在 40 多台发动机上试用成功,可以实现气路故障的粗略分析,但无法实现故障部件的精确定位^[17]。清华大学研制了高速数据采集系统、信号处理系统及基于模糊聚类的故障诊断系统,通过地面实验进行了监测和故障诊断方法的探索^[18]。西北工业大学的张永峰^[19]开发了适用于飞行试验的发动机振动监测系统,能够有效实现稳态和过渡态振动参数的趋势分析和谱分析。北京航空工程研究所研制了一套发动机振动监测与分析系统,综合振动总量评估与频谱分析手段,对某型发动机开展多点振动监测分析,在试车台、外场通过多次实验验证了其 main 功能^[20]。

振动监测诊断是航空发动机健康管理最重要的方面之一,本文将从振动监测振动系统研制及应用、典型故障特征及诊断方法研究现状进行具体综述,并对整机振动类故障诊断技术的发展方向进行分析。

1 整机振动监测诊断系统研制及应用

气路、振动、滑油 PHM 技术是航空发动机预

测与健康管理系统的关键,这 3 种技术可以基本涵盖发动机的主要气路、转动和传动部件监测分析需求^[21]。

其中,振动类故障是航空发动机的主要故障模式。国外先进发动机 EJ200、F119、F135 配装的健康管理系统均包含振动诊断技术,并且随着发动机健康管理系统的发 展,振动诊断在整个系统中的比重随之加大^[12]。同时,根据中国某保障单位近 3 年的数据统计,振动超标、性能故障、滑油消耗量大、金属含量超标、漏油、滑油压力低等是某型现役发动机地面试车常出现的故障现象^[12],其中振动超标占 70% 以上。因此,提升振动 PHM 技术是中国航空发动机健康监测发展的重中之重。

国外航空发动机振动健康监测能力和水平已达到成熟的应用状态,在航空发动机振动监测与诊断技术及应用方面,具有代表性的是瑞士 Vibro-Meter 公司的 UEVM 系统^[22],罗罗(R-R)公司的 QUICK 系统^[23],美国 GE 公司的 HUMS 系统^[24],霍尼韦尔(HONEYWELL)的 Zing 系统^[25]等,这些用于涡扇发动机、燃气轮机等的状态监测预警与故障诊断系统已相对成熟。

瑞士 Vibro-Meter 公司研制的通用发动机振动监测仪(UEVM)已取得了大量应用,可实时监测整机振动状况,包括振动强度、频率等内容,同时实现远程监测及平衡调整,其系统架构如图 3^[22]所示。牛津大学与罗罗(R-R)公司联合开发了 QUICK 先进机载监测系统,能够实时监测航空发动机在飞行过程中的各项关键参数,包括振动、温度、压力等,并将振动数据与瞬时性能测量

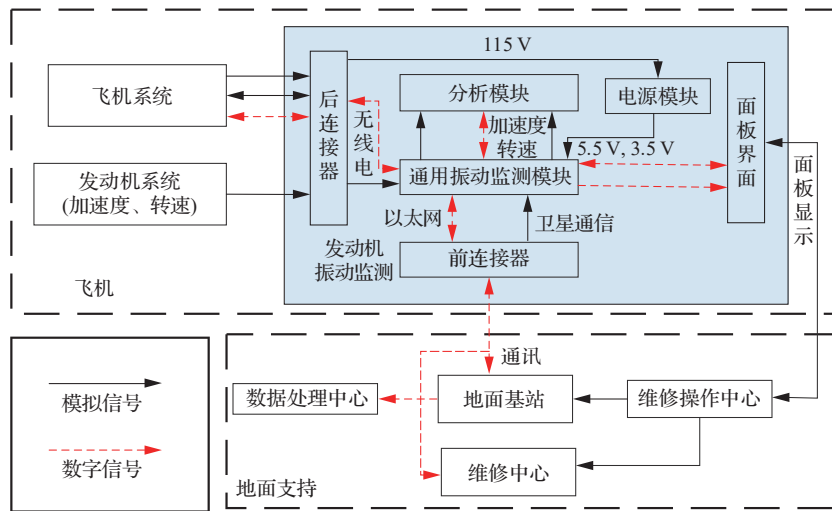

 图 3 Vibro-Meter 振动监测系统架构^[22]

 Fig. 3 Architecture of Vibro-Meter vibration monitoring system^[22]

值进行信息融合,针对航空发动机提供预测性维护方案。通用电气(GE)航空部门使用自研的HUMS振动监测系统,该系统在振动实时监测和振动故障诊断的基础上,可进一步实现自适应学习,能够根据设备的运行情况和环境变化进行动态调整,提高系统的故障识别准确性和效率。霍尼韦尔近年来推出了代号为Zing的健康状态与使用监控系统(HUMS),如图4^[26]所示,能够对涡轴发动机实现振动监测与故障诊断,并帮助维护人员进行航空发动机风险管理和安全评估。


 图 4 涡轴发动机用 HUMS 系统机载硬件^[26]

 Fig. 4 HUMS system onboard hardware for the aero-engine^[26]

可以看出,国外已经应用的系统实现了对航空发动机的振动健康监测。而中国的整机振动监测诊断系统仍处于起步阶段,机载主要功能为状态监视、严重故障告警,虚警率、漏警率均较高,导致发动机故障难以实现及时、有效的分析诊断。同时,地面振动检测设备也较为欠缺,主要依赖发动机地面检验操纵台、综合调节器地面

检查操纵台、孔探针、涡流检测仪等,导致发动机排故能力仍有待提高。因此,近年来中国航空发动机振动故障监测诊断技术研究受到广泛关注,但目前主要研究均集中在理论基础层面,急需进一步开展技术落地应用。

中国现役三代机发动机沿用的是俄制磁电速度式振动传感器和整机振动监控标准,实践发现,原俄制振动传感器存在频响低、数量少两大问题。频响低,主要满足转子转速跟踪用,导致轴承、叶片、齿轮等高频振动特征难以感知;数量少,现役发动机大多监测一个机载振动测点,导致测试信号难以直接、有效地监测主要旋转部件^[11]。

2 典型故障特征及诊断方法研究现状

2.1 转子不平衡故障

转子不平衡故障是由于转子部件质量偏心或转子部件出现缺损造成的。在实际生产中,不平衡质量是不可避免的,因此转子不平衡是航空发动机乃至旋转机械中常见的故障之一。据某发动机维修厂统计,每年因不平衡振动故障而造成的提前返厂量占返厂发动机总数的60%以上,严重影响发动机出勤率。

航空发动机多采用双转子结构,如图5所示。国内外学者通常将刚度、阻尼等线性化处理,以

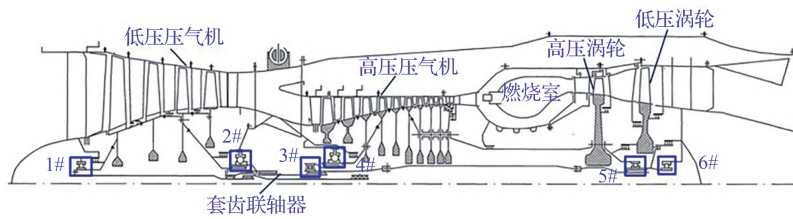


图5 航空发动机复杂转子系统

Fig. 5 Complex rotor system of the aero-engine

便分析双转子系统动力学特性。国外学者 Gupta 等^[27]将传递矩阵法和试验研究相结合,分析了双转子模型的不平衡响应,尽管该双转子模型与实际航空发动机转子系统存在差异,但仍能说明内外转子之间存在相互影响。Ferraris 等^[28]采用动力学建模的方法,研究了双转子系统同转以及对转时的响应特征。国内学者同样对转子不平衡故障开展了深入研究。胡绚^[29]、蒋云帆^[30]等研究双转子系统不平衡振动响应特性时,采用传递矩阵法与试验相结合的方式探究了双转子系统同转以及对转时,临界转速与不平衡响应的差异。韩军等^[31-32]利用传递矩阵法建立双转子模型,分析了双转子不同测点的不平衡响应与转速、不平衡量之间的灵敏度关系,并且通过对双转子同转或对转的数值仿真分析,发现当转速比较接近时发动机会出现拍振现象,引起振动强度过大。廖明夫等^[33-34]通过理论公式推导,分析了中介轴承刚度以及阻尼对双转子模型中高、低压转子不平衡响应的影响,同时也指出当高、低压转速接近时,会出现明显的拍振现象。马平等^[35]针对某型航空发动机结构,建立了四盘五支点双转子模型,研究了在不平衡激励下,转速、不平衡位置、不平衡量大小、不平衡相位、中介支承刚度等因素对双转子系统振动响应的影响。

航空发动机转子系统中,不同转子间常采用中介轴承连接,受联轴器、轴承、挤压油膜阻尼器等非线性部件的影响,航空发动机转子系统的动力特性更加复杂。国外学者 Hibner^[36]基于传递矩阵法分析对比了有/无非线性黏性阻尼时,多轴航空发动机转子系统的不平衡振动响应特点。Gunter 等^[37]、Bonello 和 Hai^[38]考虑在挤压油膜阻尼器的非线性影响下航空发动机转子的不平衡响应。国内学者同样对此展开了研究,陈曦等^[39]

针对大涵道比涡扇发动机低压转子中套齿式刚性联轴器结构,利用理论分析与试验验证,并通过改变轴向拧紧力矩来改变联轴器的非线性连接刚度,发现对应的不平衡响应幅值会有不同程度地改变,且改变不平衡量的位置会导致不平衡响应幅值大小及其变化率有所不同。路振勇^[40]、邓四二^[41]等考虑中介支承非线性影响,建立双转子系统动力学模型,研究了支承结构参数对双转子系统不平衡振动响应的影响。罗贵火等^[42]考虑中介轴承非线性影响,建立了航空发动机双转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型,采用数值分析与试验验证相结合的方式,对同转和对转双转子系统的不平衡响应进行了分析,指出对于同转和对转的双转子系统,当高、低压转子的转速差较小时,系统的拍振响应明显,振动响应较大。陈果^[43]针对典型双转子航空发动机结构,建立了双转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型,分析了挤压油膜阻尼器的减振性能以及系统对不平衡故障的灵敏度。杨喜关等^[44]综合考虑了轴承与挤压油膜阻尼器支承系统的非线性对双转子系统不平衡振动的影响。

国内外有关航空发动机转子不平衡故障的研究成果十分丰富。针对航空发动机转子不平衡的研究多集中在航空发动机复杂模型的建立、部件结构参数的影响、不同位置的响应特点、转子同转及对转的影响等方面。多利用工频幅值变化规律并结合航空发动机不平衡故障振动特性,综合诊断转子不平衡故障。目前,针对航空发动机转子不平衡故障问题,仍需要对以下几个方面进行进一步研究。

1) 考虑联轴器、轴承、挤压油膜阻尼器等多部件的耦合,建立起更加复杂全面的航空发动机模型。当前建立的模型对航空发动机各部件结

构进行了不同程度的简化,且多数文献只考虑某一部件结构的影响,忽略了其他部件结构的影响,仍需进一步研究。

2) 结合航空发动机实测数据,研究航空发动机不同位置发生不平衡,以及各部件结构参数变化时的不平衡响应特征。目前国内外已有大量文献研究了转子不同位置发生不平衡故障以及部件结构参数变化时的响应特征,且多通过搭建转子实验台进行实验验证,但转子实验台实验数据与航空发动机实测数据仍有很大差距。因此结合航空发动机实测数据进行分析及验证的问题仍需进一步深入开展。

3) 研究航空发动机转子不平衡的故障定位以及定量诊断技术。航空发动机的复杂结构、传递路径、多部件耦合等多种因素,以及工作条件恶劣、传感器安装位置受限等问题,使得航空发动机转子不平衡故障问题变得更加复杂。准确识别航空发动机转子不平衡故障位置以及故障程度,对航空发动机的安全稳定运行具有重大意义。

2.2 支承不同心故障

由于现代航空发动机对高效率、高性能等需求的提升,其转子系统多采用双转子结构设计。其中,低压转子系统作为大跨度柔性转子系统,为防止挠曲变形过大,常采用多支承的结构设计。这种结构设计虽然能够满足航空发动机的设计需求,但是受制造、装配和长时间工作的影响,转子支承结构的中心往往存在一定程度的相对偏移,各支承的中心很难保持在同一条轴线上,从而出现“支承不同心”问题,如图6所示。当转子系统发生支承不同心故障后,将直接影响发动机的正常运行,轻则造成转子振动加剧,轴承磨损,严重时甚至会发生动静碰摩故障。

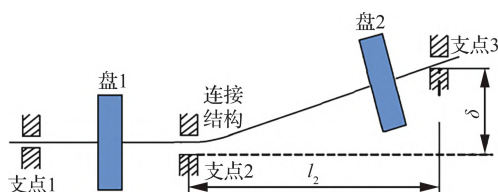


图6 支承不同心故障示意图

Fig. 6 Schematic diagram of misalignment fault

针对此类故障,目前主要研究集中在以下2大方面:一是通过动力学建模,研究支承不同心故障下转子系统的振动响应特征,为航空发动机支承不同心故障的诊断提供理论依据。这一方面研究的关键在于动力学建模方法。常见的航空发动机动力学建模方法有质心集中质量法、传递矩阵法、有限元法等。目前针对航空发动机支承不同心故障的动力学建模主要集中于质心集中质量法和有限元法,传递矩阵法鲜有提及。在利用质心集中质量法建模方面,国内于2012年,由张振波和Li等^[45-46]利用Lagrange能量法建立了适用于航空发动机转子支承不同心的动力学模型,该模型以增加非线性刚度项的方式引入支承不同心故障。通过研究模型中不同心量和不平衡量对振动响应的影响,获得了转子支承不同心时的频率响应特征。在此基础上,张振波和Ren等^[47-48]建立了不同连接结构的运动微分方程,得出了不同连接结构出现支承不同心后,不同心激振力各不相同的结论。进一步地,刘永泉等^[49]将当量刚度引入动力学建模,实现对航空发动机转子支承不同心时附加非线性刚度的定量描述。

在利用有限元法建模方面,国内的吴英祥等^[50]则利用支承轴承间隙模型描述转子支承不同心问题,研究发现支承不同心需要轴承的间隙补偿,同时过大的间隙会使转子运动呈现混沌现象。冯国全等^[51]将支承不同心看作轴承不对中问题,并将轴承不对中等效为不对中弯矩,基于此建立了转子支承轴承不对中有限元模型,利用模型分析发现,振动响应中转频的2倍频成分占据主导。王美令、张宏献和肖森等^[52-54]将支承不同心引起的附加载荷引入转子系统有限元模型中,得出了出现支承不同心故障后振动频率更加复杂以及振动响应特征的变化规律。柏长青等^[55]基于多体动力学建立了转子-轴承-支承系统的有限元模型,利用附加驱动转速的方式模拟支承不同心,分析发现轴向振动工频和倍频成分是转子支承不同心的典型特征。除此之外,Han等^[56-57]基于弹性鼠笼支承的刚性转子系统建立了有限元模型,对支承不同心时模型的应力、应变能分布进行了分析,发现不同心故障后鼠笼的应力水平显著增加,甚至具有损坏的风险。

以上是国内外研究学者针对航空发动机支承不同心故障的动力学建模方面的研究。通过比较国内外研究学者的研究现状,发现相较于国外学者,国内针对航空发动机支承不同心故障的动力学建模研究更为深入、全面;而国外研究学者普遍将支承不同心故障视为转子不对中故障的一部分,因此鲜少有国外学者将其单独考虑。

目前航空发动机支承不同心故障的振动特性可以总结为:

1) 振动响应中转子转频的2倍频响应占据主导地位。

2) 轴向和径向2倍频幅值相对于工频幅值的大小可以表征支承不同心故障的严重程度。

3) 轴心轨迹包含了轴承错位的位置和方向信息,可用于支承不同心故障的诊断。

二是通过开展航空发动机转子系统支承不同心故障模拟实验,进行航空发动机支承不同心故障的诊断方法研究。在该方向,国内的王美令等^[52, 58]设计了具有不同程度支承不同心故障的实验装置,通过调整垫片的厚度实现故障程度的模拟,实验分析发现支承不同心引起了明显的轴向振动,频谱图中以工频及其倍频成分为主导。马平平^[59]基于低压涡轮后支点不对中现象设计了相关模拟实验,通过实验分析发现故障后频谱图中出现显著的转频2倍频成分,同时轴心轨迹为水滴形。

目前航空发动机支承不同心故障的诊断方法可以总结为:采用频谱分析转子转频及其倍频成分(尤其是2倍频成分),同时结合轴心轨迹综合诊断支承不同心故障。

现有研究工作中对具有支承不同心故障的航空发动机整体建模研究较少,对航空发动机支承不同心故障的诊断方法考虑较少,使得目前故障诊断方法无法满足航空发动机支承不同心故障的诊断需求,未来的航空发动机支承不同心故障诊断的主要研究方向是:

1) 在动力学建模方面,考虑非线性支承等因素建立结构更加复杂的航空发动机动力学模型,探究飞机机动飞行状态下航空发动机支承不同心故障的影响,为故障诊断提供更加可靠的基础。

2) 在故障诊断方法方面,现有支承不同心故

障特征与转子不对中故障特征相似,未来需要基于支承不同心故障理论研究建立针对航空发动机支承不同心故障的诊断方法。

3) 航空发动机支承不同心故障的定量诊断。对于航空发动机来说,支承不同心故障的定量分析是一个难题,现有相关研究较少。故障的定量诊断对提高故障诊断准确率和保障设备安全运行具有重要意义,未来仍需要对航空发动机支承不同心故障的定量诊断进行深入研究。

2.3 转子不对中故障

转子不对中同样是航空发动机乃至旋转机械中典型故障之一,通常是指由于联轴器结构的制造误差、装配不当、热变形等因素,导致应在同一轴线的相邻转子存在一定的偏移或倾斜量的现象。因此联轴器不对中通常包括平行不对中、角度不对中以及综合不对中,如图7^[60]所示。转子不对中故障会引起转子系统的轴向振动和径向振动,严重时会影响整机稳定运行,导致发生严重事故。国外的统计表明,航空发动机整机振动与不对中相关的故障占到系统故障的50%~60%;据美国海军飞机维护库数据调查显示,40%的固定翼飞机和70%旋转翼飞机存在的附件花键连接损伤问题主要是与不对中故障有关^[60-62]。

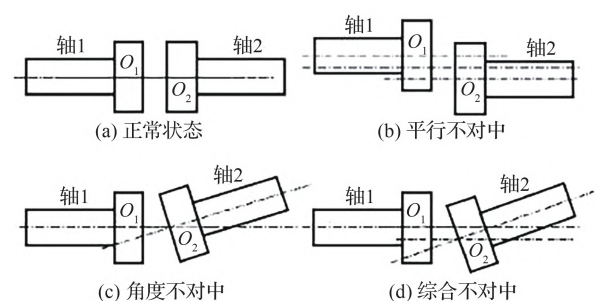


图7 不对中故障形式^[60]

Fig. 7 Form of Misalignment fault^[60]

国内外学者一般通过3种方法获得联轴器不对中的动力学模型^[60, 63]。第1种是根据联轴器结构特点,基于联轴器的变形几何关系和受力分析建模;第2种是对于自由度较少的转子系统,采用系统整体拉格朗日能量法建模;第3种是采用有限元或集中参数法,将联轴器看作转子系统的

一部分,用等效轴段建模。

国内外学者对航空发动机转子不对中故障的研究取得了一定成果。国外学者 Leen 等^[64]通过模拟试飞条件并结合三维有限元模型分析,研究了航空发动机联轴器的疲劳与微动磨损。航空发动机转子不对中问题在中国也受到了越来越多的关注。国内学者李全坤等^[65]根据几何关系与受力分析,建立了考虑不对中故障的双转子动力学模型,通过解析求解、数值分析和试验验证,研究了双转子系统存在不对中故障时,高、低压转子的振动响应特性。结果表明低压转子发生不对中故障时,由于高、低压转子间的耦合作用,低压转子不对中故障会影响高压转子的振动响应。陈果和李兴阳^[66]主要以航空发动机高压转子及后机匣为研究对象,考虑套齿联轴器综合不对中,并根据几何关系与受力分析,建立了转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型,通过数值仿真分析,发现不对中故障将引起系统的超谐共振,其中基频在临界转速下会引起共振,2倍频会在1/2临界转速下引起共振。李俊慧等^[67]利用有限元法对航空发动机常用的套齿联轴器结构进行了动力学分析,并提出了套齿结构动力学设计方法。蒋玲莉等^[68-69]以某型航空发动机双转子系统为研究对象,建立了航空发动机双转子系统有限元模型,对比了正常状态与平行不对中故障对固有频率的影响,并且考虑了联轴器的影响,将联轴器模化为一个当量轴段,之后通过数值仿真分析,研究了存在不平衡激励与联轴器发生角度不对中情况下不同支点处的振动响应与轴心轨迹规律,结果表明低压转子联轴器不对中振动特性可通过中介轴承传递到高压转子,进而影响高压转子的振动。

国内外有关转子不对中的成果十分丰富,但关于航空发动机转子不对中的相关文献仍旧较少。针对航空发动机转子不对中的研究多集中在联轴器的动力学建模、联轴器不对中与转子系统的耦合作用、转子不对中传递规律等方面。多采用频谱分析2倍频幅值变化,并结合航空发动机转子不对中故障振动特性,综合诊断转子不对中故障。针对航空发动机转子不对中问题,以下几方面仍需进一步研究。

1) 建立航空发动机联轴器动力学模型。国内外关于联轴器动力学建模已取得大量成果,但航空发动机的复杂结构以及工作环境等因素,使得航空发动机联轴器动力学建模问题更加复杂,仍需进一步研究。

2) 结合航空发动机实测数据以及动力学模型,研究航空发动机转子不对中传递规律。中介轴承耦合作用以及其他复杂结构使得航空发动机的振动信号传递十分复杂,使得诊断分析变得困难,仍需要进一步研究。

2.4 动静碰摩故障

碰摩故障是旋转机械中常见的故障类型,航空发动机作为一种高精度的气动热力旋转机械,出现动静碰摩故障的概率极大^[70]。目前,在航空发动机设计时,为了增加喘振裕度和提高压气机的效率,普遍将航空发动机设计成双转子-轴承-机匣机构的复杂耦合系统,这使得发动机的动力学特性变得复杂多变。同时,为了提高发动机的推重比和结构效率,转子与静子之间间隙设计的越来越小。这也导致了发动机碰摩故障发生的风险急剧增加^[71]。叶片与机匣碰摩示意图,如图8所示。当发动机发生碰摩故障时,会引起整机剧烈振动,严重时甚至会造成动静叶片断裂,转轴永久性弯曲等事故,从而严重影响生命以及财产安全。因此,针对航空发动机碰摩故障振动特性以及故障预测的研究有着极其重要的意义。

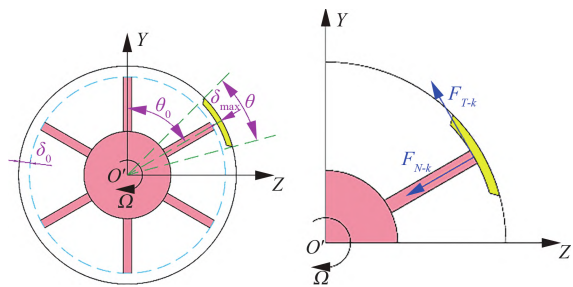


图8 叶片与机匣的碰摩示意图

Fig. 8 Schematic diagram of rub-impact between blades and casing

针对航空发动机碰摩故障,国外学者也在进行不断的研究。Prabith 和 Praveen krishna^[72]为代表的国外学者针对碰摩故障建立了多种碰摩

模型,通过模型仿真研究了碰摩故障的复杂振动特性。针对不同碰摩类型、系统参数变化以及碰摩引发的不同耦合故障机理进行着不断仿真和实验分析。

在航空发动机碰摩故障类型模拟以及各参数变化对碰摩故障的影响方面,国内学者做出了巨大贡献。林学森等^[73]建立了带柔性静子部件的轴承共腔结构的涡轴发动机的碰摩动力学模型。结果表明该结构与传统双转子结构中中介轴承具有相似的动力学特征。袁惠群等^[74]建立了双转子-机匣简化耦合系统的动力学模型,得出当碰摩刚度增加时,共振区范围以及振动幅值明显增加。张天程等^[75]建立了航空发动机双转子系统含碰摩力的弯扭耦合动力学模型,得出扭转振动信号频谱特性更适用于碰摩故障诊断的结论。罗贵火等^[76]提出了一种解决含局部非线性双转子动力特性的高效方法,并得出碰摩故障会严重影响内转子系统同步响应频率幅值。聂日敏等^[77]通过模型得出高压涡轮碰摩会导致系统发生反向涡动、低压涡轮碰摩会抑制高压碰摩以及高低压涡轮同时碰摩相比于高压涡轮碰摩呈现出转速区间更窄、振动幅值更低的特点。丁小飞等^[78]进行了高压涡轮叶片和机匣的碰摩仿真分析,仿真结果表明碰摩故障导致发动机振动幅值明显增大。秦海勤等^[79]得出可由转子和机匣频谱图判断是否发生局部碰摩,并提出高压转子的碰摩幅值随偏心量和碰摩刚度的增加愈加明显的结论。陈松霆和吴志强^[80]认为碰摩刚度和支承弹簧刚度的增大有利于保持系统的稳定性。张娅等^[81]通过模型分析得出仅由不平衡量导致的轴向碰摩系统具有较好的稳定性的结论。

航空发动机碰摩故障信号的处理方法也在不断的更新改进,以提高故障诊断的准确性。在碰摩信号处理方法方面。何田等^[82]提出了基于奇异值分解(SVD)的故障特征提取方法以适用于碰摩特征提取,能够在强干扰背景下诊断,并能够精确的检测不同位置碰摩发生先后。刘洋等^[83]认为基于傅里叶分解方法(FDM)的转子碰摩故障诊断方法,表现了出更高的可靠性和有效性。边杰等^[84]提出一种参数自适应的变分模态分解方法(APVMD)对双转子航空发动机振动状

态实测弹性支承应变信号进行分析。陈果等^[85]提出了一种基于倒谱分析的碰摩部位识别方法,可准确识别碰摩部位样本特征。左红艳等^[86]提出的小波变换和Hilbert-Huang变换方法在密度分布不均匀的多类型混合数据表现为更高的精度。张志禹等^[87]采用广义S变换方法检测和提取故障特征,该方法相对于小波变换的结果具有更精确的碰摩位置检测和良好的抗干扰能力。周海仑等^[88]利用支持向量机从大量样本中获取碰摩知识并进行判断,结果表明该方法针对碰摩故障具有很高的识别率。

现阶段,国内外学者都通过碰摩故障模型的搭建与改进,来不断完善理论碰摩故障模型。通过模型来不断分析不同碰摩类型以及不同参数下的碰摩故障特征。并且在碰摩故障振动信号的处理方面也在不断的更新,傅里叶变换、小波变换等处理方法的应用使得碰摩故障的诊断更加快速准确。但如今,国内外大多数学者关于碰摩故障的研究主要集中于对所建模型的数值仿真模拟进行计算,而缺乏真实的实际工程验证。在航空发动机运转过程中,复杂的运行机理可能会导致碰摩故障的振动特征难以凸显,难以验证所建模型及仿真分析结果的有效性。同时还应该进一步建立更靠近真实工况的碰摩模型进行碰摩分析并发展更为完善的碰摩损伤程度评估方法。

2.5 叶片断裂故障

航空发动机是一种高速旋转的动力机械,叶片作为航空发动机的关键部件,因为其工作环境恶劣,如高温、高压和高速,导致其成为故障频发的部件^[89]。据统计,叶片故障是航空发动机中常见的重大问题,约占整机故障的42%。叶片断裂会导致转子的平衡性被破坏,甚至可能导致灾难性事故和发动机的彻底毁坏^[90],如图9所示。目

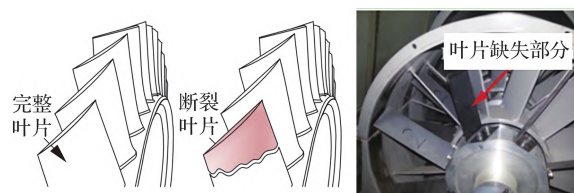


图9 叶片断裂故障示意图

Fig. 9 Schematic diagram of blade fracture fault

前国内外学者主要从以下几个方面对叶片断裂故障进行了研究。

2.5.1 基于动力学模型的叶片断裂故障

通过建立动力学模型来分析叶片断裂引起的系统响应特性的变化,分析模型中不同部件的耦合特性,发展了基于转轴振动、叶片振动和机匣振动跟踪分析的叶片故障诊断方法。

2013年,Sinha^[91]考虑风扇叶片断裂后转子的非对称特征。推导了具有可变形叶片的非对称转子的转子动力学方程。结果表明转盘中心和机匣响应中呈现出了非线性现象。Hong等^[92]提出了叶片断裂后转子的载荷传递系统的瞬时微分方程。得出叶片断裂后突加的冲击载荷在静子传递过程中会严重衰减,阻尼会降低冲击响应的极值。Hong等^[93-94]、Xie等^[95]研究了叶片丢失下航空发动机整机动力学响应,得到了叶片丢失使转子转速降低,并在复杂载荷激励下呈现出非线性特性的结论。当叶片丢失导致碰摩发生时,在转子系统响应中伴随有转子横向固有振动,持续碰摩还会改变系统的临界转速,同时提出了平均频率和带宽指标作为叶片损伤监测指标的一种方法。Wang等^[96-97]建立了叶片断裂下与机壳发生碰摩故障的双转子-叶片-机匣系统有限元模型。叶片断裂会在机匣上产生冲击频率为叶片通过频率的振动,并且在冲击频率附近激励起双转子转速差的倍频成分;由于陀螺力矩的影响,也会在转轴位移信号中激励出前2阶转子进动频率。Wang等^[98]基于有限元方法和自由度减缩,建立了航空发动机含叶片脱落的转子-叶片系统模型,通过采用分段拟合的方法对转子和叶片结构进行建模,通过试验台验证了模型的有效性,结果表明,叶片脱落的瞬间会产生较大的瞬态冲击力以及较大的系统阻尼,同时叶片会激起转子的低阶固有振型。

基于叶片动力学模型的叶片故障诊断方法是通过建立动力学方程,分析叶片断裂引起的响应变化,从而实现对叶片故障的诊断。在基于动力学模型分析叶片固有振动特性变化的研究中,尚需提高模型预测的准确性、增强叶片故障特征的解释性以及解决方法在工程实际应用中的可行

性与适用性问题。

2.5.2 基于信号处理的叶片断裂故障

基于叶片断裂故障的产生机理,分析叶片断裂前后叶片振动信号、位移信号、转轴振动信号、转速信号、声压信号、温度信号和机匣振动信号中的故障敏感特征,基于先进的信号处理算法形成不同的叶片断裂故障诊断方法。

2013年,Forbes和Randall^[99]首次根据航空发动机机匣振动信号估计叶片固有频率,并推导了旋转叶片的压力信号以及机匣振动响应模型(SDOF)。得出在机匣振动信号中包含以某个转频倍频±叶片固有频率间隔分布的窄带峰值。Liska等^[100]采用FFT、滤波、加权平均等算法提取轴振信号中倒频谱的叶片特征分量,可实时自动跟踪叶片的固有频率及其振幅,并在250 MV汽轮机中进行了商业验证。胡明辉等^[101-103]研究了基于机匣振动的航空发动机压气机叶片断裂故障机理,建立了叶片断裂下机匣振动响应的数学模型。分析了振动信号中叶片通过频率幅值、工频幅值、工频相位等断裂故障敏感特征,采用先进信号处理算法建立了基于机匣振动信号的叶片断裂故障诊断方法,并在实际燃气轮机叶片断裂故障案例中得到有效应用。Feng等^[104]提出了一种基于稀疏谐波积谱(SHPS)的燃气轮机叶片状态监测模型。该模型可实现叶片相关振动分量与机匣振动分量的准确分离,比传统的阈值法更早、更准确地挖掘潜在地叶片断裂等故障类型。Shan等^[105]以时域跟踪法和时频转换法计算了叶片的非线性响应,结果表明凸肩结构对于航空发动机风扇叶片的一阶弯曲振动有很好的减振效果,并且可以降低叶片发生断裂故障时的应力。Gubran和Sinha^[106]通过轴的瞬时角速度(IAS)信号来监测叶片的状态。叶片故障会导致在叶片固有频率附近出现2个或多个峰值及高次谐波,可为叶片的健康监测提供基础。Zhang等^[107]提出了一种基于自适应噪声完全集成经验模态分解(CEEMADAN)和变步长归一化最小均方(VSS-NLMS)算法的声压信号降噪算法,对含强噪声干扰下不同转速、不同状态(正常叶片、断裂叶片)产生的声压信号具有良好的降噪

效果,并且在断裂叶片频谱中,叶片通过频率及谐波频率被完整保留,可用于叶片断裂故障诊断。Abdelrhma等^[108]提出了2种具有高频分辨率和高时间分辨率的小波算法,用于识别多级转子系统中微弱的叶片故障特征。

基于信号处理算法的叶片故障诊断主要通过在与叶片相关的多种振动信号进行分析和处理,提取出故障敏感特征,并基于这些特征形成叶片断裂故障的诊断方法。主要的故障特征包括叶片固有频率、振动幅值、相位、工频幅值、工频相位以及谐波频率等。然而,基于信号处理的叶片断裂故障诊断方法仍然面临一些待解决的问题,主要体现在算法优化、特征解释性和工程实际应用等方面。

2.5.3 基于叶间定时技术的叶片故障

转子叶片振动测量技术分为接触式测量和非接触式测量2种。其中,非接触式测量相对而言具有很大的优势。叶尖定时(BTT)是一种新兴的叶片振动监测技术,用于检测、测量和分析旋转叶片组件中的叶片振动,通过分析BTT信号中与叶片故障相关的特征信息,可实现叶片故障诊断。

国外对叶尖定时方法的研究始于20世纪60~70年代,德国MTU(Motoren-und Turbine-Union)研究人员(2005)基于自主研发的BSSM叶尖定时系统,MTU的研究人员通过监测叶片二弯模态振动的最大应力,在共振状态下识别了高阶模态振动导致的高周裂纹^[109]。NASA Glenn研究中心和克利夫兰州立大学合作,开展了叶尖定时系统在转子轮盘裂纹故障检测中的探索^[110-111],GE公司则将叶尖定时系统和其他测量方法一起应用于TF41-A1B发动机的振动故障检测^[112-113]。韩国学者针对BTT信号欠采样的问题,定义了一个称为马氏距离的统计指标,并将其用于具有裂纹的旋转多叶片系统的故障诊断。并利用模拟模型获得的BTT信号,研究了裂纹存在和信噪比对所提出方法可靠性的影响^[114]。

中国学者对叶尖定时技术的研究起步较晚,天津大学段发阶团队通过建立BTT仿真模型,设计并搭建BTT测量系统,实现叶片的状态监

测^[115]。中国航发沈阳发动机研究所和湖南动力机械研究所引进了HOOD公司的BTT测量设备,并在相关的试车台上进行了测试实验,以获取振动数据用于叶片的强度分析^[116]。此外,西安交通大学、北京化工大学等对BTT技术也有较多文献报道,主要研究重点集中在高速数据采集、振动参数提取、优化探头布局及测振系统集成开发等方面。利用BTT信号实现叶片健康检测的主要难点之一在于准确获取叶片的振动参数,由于BTT信号具有严重的欠采样特性,近几年学者从不同的角度开发了许多分析方法来研究如何从BTT采样信息中有效地表征叶片的真实振动。Chen及其团队提出了一种有效且高效的基于时延的频谱重构方法,适用于大多数BTT方法的参数识别或频谱重构,为BTT测量提供了指导^[117]。

综上所述,基于BTT技术的叶片故障诊断依赖于对BTT信号特征信息的分析,以识别叶片振动参数和共振频率等特征,从而实现叶片健康状态的检测和故障诊断。但是,应用BTT技术实现叶片故障诊断仍需实现数据处理算法的优化、BTT系统的稳定性与可靠性的提高、工程实际应用以及故障诊断准确性的提高等。

2.5.4 基于人工智能的叶片断裂故障

基于人工智能的分类系统可有效识别航空发动机叶片故障,最大限度地减少人工干预。人工智能方法能从大量数据中提取故障敏感特征,并将其作为故障诊断分类器的输入,对叶片故障进行分类诊断。

Kuo等^[118]利用非线性系统的特性将完整涡轮振动信号加载到统一的混沌系统中,开发了一种涡轮叶片的故障诊断仪,根据可拓学理论对信号进行人工智能故障诊断。Li等^[119]提出一种结合历史监测数据的相似性传播聚类的故障诊断方法,并在航空发动机转子故障试验台上模拟叶片断裂故障并验证了方法的有效性。Shapiai等^[120-121]提出了基于小波变换的人工神经网络模型来识别航空发动机振动信号中的叶片故障特征,根据小波系数统计参数特征作为(ANN)的输入,结果表明,该模型对叶片故障分类的准确率为88.43%。

Wang等^[122]将多通道卷积神经网络(MCNN)算法应用于风力涡轮机叶片角度异常、叶片表面损伤、叶片断裂等故障诊断中,开发了一种叶片状态监测的故障诊断系统。Tan等^[123]提出了一种基于本征模态函数的经验模态分解和平均统计参数特征提取的叶片故障诊断方法。

综合来看,针对航空发动机中的叶片断裂故障,未来研究的重点将集中在深入挖掘实测数据,进一步完善叶片动力学模型、发展叶片的振动监测技术、结合信号处理算法和人工智能技术,实现对叶片断裂故障的精准诊断和预测,以提高叶片的安全性和可靠性。

2.6 结构共振类故障

振动问题一直是航空发动机设计、制造和使用中无法避开的议题,但引起航空发动机振动超标的原因很复杂^[124]。其中结构共振导致的振动超标虽不经常发生,但一有发生便易引起严重故障,因此针对航空发动机结构共振类故障的研究十分必要。航空发动机作为振动系统,拥有多子系统、多阶固有频率。当其出现某些振动故障后将在系统内引入激励,此时如果高、低压转频等激振频率接近某一阶固有频率,系统会出现结构共振,振幅急剧增大^[125]。这种由某些振动故障引起的故障共振称为结构共振类故障。

针对此类故障,目前主要研究集中在以下2大方面:一是通过动力学建模,研究结构共振故障下转子系统的振动响应特征,为航空发动机结构共振类故障的诊断提供理论依据。这一方面研究的关键在于故障转子系统的建立。常见的故障转子系统有裂纹故障转子系统、碰摩故障转子系统等。首先,对于裂纹故障转子系统,国外的Spagnol等^[126]将呼吸裂纹模型中重力主导的假设去除,并引入不平衡研究两者的耦合效应,研究结果发现较大的不平衡量和180°的偏角会导致超谐共振频率分量的消失。国内的Hou^[127-130]在呼吸裂纹模型的基础上,引入了机动载荷^[127-128]、惯性激励^[129]和不平衡激励^[130],通过分析系统的非线性响应,发现转子系统超谐共振的产生受到呼吸裂纹、惯性激励、机动载荷和不平衡激励的显著影响。牛和强^[131]建立了含斜裂纹、直裂纹和

半抛物线斜裂纹的转子系统有限元模型,研究发现半抛物线斜裂纹和斜裂纹在扭转方向会有明显的共振响应而直裂纹没有。

对于碰摩故障转子系统,国内的聂日敏^[132]建立了带有高、低压涡轮碰摩的航空发动机双转子模型,分析双转子的振动响应,研究结果发现转子碰摩会产生激励频率,引发组合共振。侯磊^[133]建立了水平盘旋飞行环境下的转子系统模型,对系统的全局分叉进行分析,发现当系统接近2倍临界转速时,机动载荷会诱发系统的亚谐共振,进而导致动静碰摩。Hou等^[134]在碰摩转子系统的基础上引入了机动载荷,通过模型分析发现,由于机动载荷作用,系统会发生次谐波共振,从而导致碰摩。

第二方面是通过实验分析,进行航空发动机结构共振类故障的诊断方法研究。在该方向,国内的马会防等^[135]基于某风扇增压级振动故障,研究发现动静碰摩造成了行波共振,使得振动突增。王海霞等^[136]基于航空发动机附件机匣振动超标问题,分析了具体的超标原因为固有频率共振,通过改变固有频率的措施,降低了振动。郑旭东和张连祥^[124]介绍了因甩油孔位置不当引发的自激振动故障,说明了共振故障对发动机的危害之大,在此基础上提出了改进方案,证明了有效性。

目前针对航空发动机结构共振类故障的研究多集中在故障转子系统的动力学建模、结构共振类故障的振动特性、结构共振类故障诊断方法研究等方面。有关航空发动机结构共振类故障的诊断方法可以总结为:利用临界转速状态的振动趋势图,结合频谱分析综合诊断结构共振类故障。

现有研究工作中对航空发动机结构共振类故障的诊断方法考虑较少,使得目前故障诊断方法无法满足航空发动机结构共振类故障的诊断需求,未来的航空发动机结构共振类故障诊断的主要研究方向是:

1) 目前,针对航空发动机结构共振类故障建立的动力学模型多以转子系统为研究对象,但真实情况下,信号多采集自航空发动机机匣测点。而转子系统响应信号与机匣采集信号间存在明

显差异。未来可在现有转子系统响应信号的基础上,研究响应信号与机匣采集信号间的传递关系,为后续故障诊断研究奠定基础。

2) 鉴于转子系统响应信号与机匣采集信号间的差异,未来需要建立考虑薄壁机匣结构特性的航空发动机动力学模型,为后续故障特征研究奠定基础。

3) 现有结构共振类故障案例积累较少,因此为实现对该故障的诊断,未来可将结构共振类故障案例与小样本学习相结合,通过小样本训练模型,实现对航空发动机结构共振类故障的分析和故障诊断。

2.7 主轴承损伤

航空发动机主轴承是发动机的关键部件,主轴承运行在极端苛刻工况及复杂环境条件下,承受着高温、高速、重载、贫油、断油等极端工况,失效形式十分复杂且可能出现多种失效并存,主要失效模式包括疲劳、磨损、热损伤、打滑蹭伤、保持架失效等。如图10^[137]所示。在振动信号检测方面,由于航空发动机结构限制,振动传感器布置严重受限,通常只能安装在外机匣表面。轴承振动信号的传递路径长且传递部件多为薄壁复杂结构,导致其频率成分复杂且信噪比极低。在相关研究中,陈果等^[138]通过对比分析机匣测点信号与轴承座测点信号,揭示了在机匣与轴承连接刚度较小时,机匣信号在传递路径中会发生较大的衰减。但通过选择合适的方法依旧可以进行较为准确的诊断。



图10 主轴承主要失效模式^[137]

Fig. 10 Main failure modes of bearings^[137]

目前,主轴承故障诊断的主要方法有4类:面向故障特征频率提取的振动信号分析、多传感器协同分析诊断、基于人工智能的故障辨识以及轴承剩余寿命预测。

通过提取振动信号的故障特征频率,计算时域特征、频域特征以及时频域特征可以对轴承状

态进行诊断。2015年在法国罗安理工学院举办的赛峰竞赛提供了民用飞机发动机的2个损坏轴承振动和转速信号^[139]。为准确诊断轴承故障,普遍采用的方法是首先在角域对信号进行重采样,然后采用不同滤波技术削弱背景噪声对轴承故障特征信号的影响。围绕航空发动机主轴承中的中介轴承,廖明夫等^[140]提出了转差域频谱和转差域包络谱的概念,并以此分析了中介轴承外圈故障的信号特征。北京化工大学诊断与自愈工程研究中心(DSE中心)也建立了相应的双转子故障模拟实验台,并基于主轴承(含中介轴承)信号传递特性,建立了一系列主轴承故障诊断方法,包括预白化、共振解调、转差域阶次跟踪等预处理^[2],变分模态分解^[141]、冲击脉冲法^[142]等特征分析,卷积神经网络^[143]、支持向量机^[144]等智能诊断方法。

此外,Zhang等^[145]提出了一种轴承故障诊断方法,在保持相似性以及特征结构完整性的同时,提高了高转速下主轴承故障的诊断精度。Rzadkowski等^[146]通过叶尖计时和叶尖间隙技术分析了涡喷发动机中介轴承故障,为涡喷发动机轴承故障分析提供了新的思路。西安交通大学的陈雪峰等^[147]提出了匹配同步压缩变换、匹配解调变换^[148]、瞬时频带与同步压缩方法^[149]方法,显著提升了时频分析方法的聚集性与航空发动机振动监测的有效性,并经过某型航空发动机整机试车验证,验证了方法在振动监测与振动突跳溯源排故中具有不可替代的作用。沙云东等^[150]提出了一种基于阈值参数筛选的航空发动机主轴承故障特征提取方法。西安交通大学Wang等^[151]提出了非凸正则化稀疏诊断、脊加权稀疏诊断方法^[152],显著提升了航空发动机轴承剥落故障特征提取与诊断能力。

由于振动信号采集方便,国内外学者也提出了许多基于振动信号的航空发动机故障诊断方法,并且通过实验证实了这些方法的可靠性。目前该方法对于机械系统进行故障诊断的理论已较为成熟,然而面对航空发动机高温、高应力、油雾环境、工况复杂、高背景噪声等条件,EMD、FFT、冲击脉冲法等单一方法不能有效提取故障特征,需要根据应用环境进行改进。

多传感器信息融合在主轴承故障诊断中亦

受到了广泛关注。主轴承故障特征弱、背景噪声强,常规监测手段仅通过单个传感器收集状态,而多传感器系统可将不同特征进行合理支配,将冗余互补信息进行融合,最终输出更有用的信息。鉴于上述思路,林桐等^[153]提出了基于标准化欧氏距离的多特征融合评估方法,该方法对于航空发动机轴承故障的不同类型、不同程度诊断有较高灵敏度。Ma等^[154]提出了一种基于弱磁检测的发动机轴承故障检测方法,可通过无损非接触方式实现振动信号和内圈、保持架、滚动元件旋转频率的同步采集,进而实现多传感器协同的轴承故障检测。目前多传感器信息融合的方法已经成为设备状态检测的一种趋势,主要的融合方式有数据融合、特征融合、决策融合3种方式。但是在其增强了振动信号有效性的同时,也带来了运算量较大,原始数据信息损失等问题。

基于人工智能的航空发动机主轴承故障辨识也正在一个主要的研究方向,该类方法主要包括神经网络、遗传算法、支持向量机等。Wang等^[155]提出了一种基于支持向量机(SVM)的智能诊断方法,用于定量诊断高速航空发动机轴承的早期微弱故障。张向阳等^[156]提出了基于卷积神经网络(CNN)的故障诊断方法,利用峭度图等方法将原始信号转变为图像信号,通过卷积神经网络对故障类型进行识别。为了满足航空发动机

滚动轴承在线监测的要求,Lin等^[157]提出了一种新的超球面距离判别方法(HDD),将振动加速度信号中提取的原始多维特征转换为分布在超球面的同维重构特征,利用距离判别分析模型实现轴承故障检测和退化评估。人工智能的监测方法主要依赖于观测数据,与系统的复杂程度无关,但其诊断精度却依赖于样本数据的完整性,需要对各种状态下的监测数据进行学习。

对轴承进行剩余寿命预测估计轴承状态亦是航空发动机主轴承故障状态识别的未来发展方向。西安交通大学李乃鹏等^[158]为了对轴承非线性随机退化行为进行表征,对传统的指数随机退化模型进行改进,引入贝叶斯更新和粒子滤波方法对退化模型参数和轴承损伤状态进行联合更新,降低了退化数据的随机波动对寿命预测的干扰;之后,进一步考虑了运行工况时变对轴承退化速率和监测数据幅值的影响,构建了双尺度工况转换的寿命预测方法,解决了时变工况下的滚动轴承寿命预测问题^[159];同时针对工程实际中很难获取完整的全寿命数据的问题,提出了一种自数据驱动的寿命预测方法框架,基于轴承自身部分退化数据从多样化模型库中自适应优选最佳模型用于退化过程的描述和预测^[160]。

综上,总结第2节内容,目前研究进展汇总如表2所示。

表2 故障特征及诊断方法研究现状汇总

Table 2 Summary of current research status on fault characteristics and diagnostic methods

故障类型	故障原因	故障特征	诊断方法	进一步研究内容
转子不平衡	零部件缺陷; 磨损或损坏; 装配不当; 叶片掉块; 热不平衡等	工频幅值变化是不平衡故障的一个显著特征; 在同转和对转的双转子系统中, 当高、低压转子的转速差较小时, 系统拍振响应明显, 振动响应较大改变中介轴承、挤压油膜阻尼器等部件的相关参数, 会影响转子系统不同位置的不平衡响应大小。	多采用频谱分析工频幅值变化, 结合航空发动机不平衡故障的振动特性, 综合诊断转子不平衡故障。	1) 构建考虑多部件耦合状态下的航空发动机模型, 并综合考虑各部件参数变化时的振动响应特性; 2) 研究航空发动机转子不平衡的故障定位以及定量诊断技术。
支承不同心	装配不当; 零部件损伤; 轴线偏移; 轴承故障; 设计缺陷等	振动响应中转子转频的2倍频响应占据主导, 是支承不同心故障的典型特征之一; 轴向和径向2倍频幅值相对于工频幅值的大小可以表征支承不同心故障的严重程度; 轴心轨迹包含了支承不同心的位置和方向信息。	多采用频谱分析转子转频及其倍频成分(尤其是2倍频成分), 同时结合轴心轨迹(但通常不具备实测条件), 综合诊断支承不同心故障。	1) 考虑非线性支承等因素建立结构更加复杂的航空发动机动力学模型。 2) 现有支承不同心故障特征与转子不对中故障特征相似, 未来需要基于支承不同心故障理论研究建立针对航空发动机支承不同心故障的诊断方法。 3) 对于航空发动机来说, 支承不同心故障的定量分析是一个难题。

表 2 续表

故障类型	故障原因	故障特征	诊断方法	进一步研究内容
转子 不对中	联轴器装配不当;转子轴线偏移;润滑不良;热膨胀;轴线偏移等	2倍频振动响应是不对中故障的一个显著特征;不对中故障可能引起系统的超谐共振,基频在临界转速下会引起共振,2倍频会在1/2临界转速下引起共振;联轴器的不对中量等参数会影响倍频振动的振幅变化;低压转子发生不对中故障时,由于耦合作用,低压转子不对中故障会影响高压转子的振动响应。	多采用频谱分析二倍频幅值变化,结合航空发动机转子不对中故障振动特性,综合诊断转子不对中故障。	1) 建立航空发动机套筒联轴器动力学模型,研究故障振动特性; 2) 结合航空发动机实测数据以及动力学模型,研究航空发动机转子不对中传递规律。
动静碰摩	装配不当;支承松动;叶片损伤;振动超标;过度热量等	1) 碰摩故障振动频谱包含:基频振动,倍频振动和分频振动,以及复合频率振动; 2) 参数变化对系统振动响应的影响,可辅助识别出碰摩故障; 3) 碰摩故障发生时扭转振动的特征频率更适合判断碰摩故障的发生。	对碰摩故障振动信号进行傅里叶变换、Wigner-Ville分布、小波变换和 HHT 变换等分析,可有效分析碰摩故障特征频率。	1) 构建考虑实际航空发动机复杂运行环境及快变工况的碰摩故障仿真模型。 2) 发展可基于有限测点数据的航空发动机碰摩故障诊断及损伤程度评估方法。
叶片断裂	疲劳裂纹;外部物体撞击;热膨胀;设计缺陷等	1) 叶片断裂后突加的冲击载荷在静子传递过程中会严重衰减,阻尼会降低冲击响应的极值; 2) 叶片脱落的瞬间会产生较大的瞬态冲击力及系统阻尼,同时叶片会激起转子的低阶固有振型; 3) 叶片断裂会在机匣上产生叶片通过频率振动的变化,并且在通过频率附近激起双转子转速差的倍频成分。	采用稀疏谐波积谱、时域跟踪、时频转换、高频小波、BTT 技术、倒频谱、自适应卡尔曼滤波等方法,结合多通道卷积神经网络等人工智能算法,可用于叶片断裂故障诊断。	1) 考虑航发多结构耦合下的叶片动力学模型,研究叶片断裂参数与故障特征之间的关联性,挖掘动力学模型所得响应特征在实际工程中的应用。 2) 研究机理与信号处理算法相结合的叶片断裂故障诊断方法,分析振动信号中叶片断裂故障的敏感特征。 3) 探索并着手应用基于叶片振动测试的断裂、裂纹故障监测诊断技术。 4) 人工智能技术在叶片断裂故障诊断方面的研究与应用。
结构共振	设计问题;温度变化;材料和结构缺陷;叶片失衡;复杂激振等	当转子产生裂纹时,形成的激励引发转子的亚谐共振和超谐共振,其中超谐共振响应以2阶、3阶为主;当转子产生碰摩时,形成的激励引发转子的亚谐共振,组合共振,其中亚谐共振以1/2阶为主。	利用激励频率的振动趋势图,结合频谱分析,综合诊断结构共振类故障。	1) 真实情况下,信号多采集自航空发动机机匣测点。未来可在现有转子系统响应特征的基础上,建立充分考虑薄壁机匣结构、弹性支承等复杂结构的航空发动机动力学模型,研究响应特征与机匣采集信号间的传递关系。 2) 现有高质量数据积累较少,可将案例数据与小样本学习相结合,实现故障的智能诊断。
主轴承 损伤	过度负载;振动超标;润滑不足;材料疲劳、磨损;装配不当等	时域参数包括有效值、方均根值、峰值等有量纲参数,峭度、峰值因数、波形因数、裕度指标等无量纲参数,监测特征参数随轴承故障发生、发展的变化规律;频域中故障特征频率及其倍频成分。	基于轴承故障信号的冲击、调制特性,学者们建立了一系列的降噪、解调算法,以从机匣大振动信号中提取轴承微弱故障特征;基于标准化欧氏距离等的多特征融合诊断评估;滑油屑末、弱磁检测等多传感器信息融合诊断;CNN、SVDD、SVM等智能诊断方法。	1) 虑及发动机薄壁结构、弹性支承等复杂结构,可用于发动机运行数据分析的特征提取方法; 2) 高精度、高计算效率的多元信息融合与智能诊断方法。 3) 对轴承进行定量诊断及剩余寿命预测。

3 整机振动故障诊断技术的发展方向

航空发动机这一复杂对象的实际特点,决定了常规的转子系统振动故障诊断方法并不适用。

虽然针对上述常见故障的振动机理、诊断方法研究较多,但大多通过严重简化的实验器进行验证,鲜见于成果在实际数据中验证及应用的公开报道,因此,航空发动机的振动故障诊断还面临

宽频高精度振动采集、振动机理与传递路径分析、机理与案例数据深度融合、机载智能诊断与地面大数据挖掘协同等诸多挑战。在总结上述工程应用、理论研究现状的基础上,借鉴国外发展经验,梳理航空发动机整机振动故障诊断技术的发展方向及已取得典型进展如下。

3.1 宽频高精度振动采集是技术发展的根基

以主轴承损伤、叶片断裂为代表的故障特征主要集中在数千甚至上万赫兹的高频带,而不平衡、不同心等转子类故障特征信号主要集中在几十至数百赫兹的中低频,因此需采集宽频振动信号,分析特定故障特征分量的变化,以实现航空发动机典型振动故障诊断。

同时,由于航空发动机振动测点多布置在外机匣上,转子系统及支承发生故障时,通过复杂路径(如图11^[161]所示)传递到测点位置时已极其微弱;并且,由于航空发动机的频繁、大幅变工况特点,其振动信号通常为具有强时变非平稳特性的快变信号,需要对快变过程每个瞬态的振动信号进行精准采集分析。

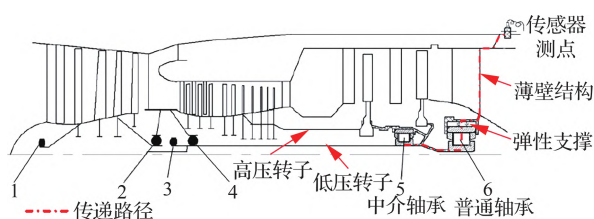


图11 某型双转子航空发动机支承结构示意图^[161]

Fig. 11 Schematic diagram of support structure for a certain type of the aero-engine^[161]

综上,发展航空发动机振动故障诊断技术以实现宽频高精度振动感知、快变条件下微弱特征分量的精准提取为根基。国内相关单位亦开展了相关探索研究,但机载的推广应用还需进一步加强:如针对C919客机自主研发的PHM系统^[162]、广州航新科技公司针对直升机开发的HUMS系统^[163]等。北京化工大学DSE中心亦致力于整机振动监测诊断技术的研究和应用工作,目前已取得丰硕的成果。PHM系统要求有足够的传感器才能获得实现预测与健康管理所必需的底层信息^[164-166],DSE中心与某发动机保障单位合作,综合考虑振

动敏感性与工程可行性^[167-168],实现了某型航空发动机前机匣、中介机匣、后机匣共7个测点的宽频高精度振动状态监测,已积累航空发动机宽频高质量数据2 000余台次。

3.2 整机试验及案例是技术发展的前提

航空发动机是试验科学的产物,故障诊断更需要实践和试验来指导。整机振动故障诊断技术研究主要涵盖4个方面:模型、专家知识、信号处理和数据,如图12^[168]所示。

基于模型的故障诊断,即通过建立发动机模型用以描述系统或部件的力学、数学特性,输入动态激励后求解系统故障响应,以此指导故障诊断^[169-170],而发动机的故障案例即是验证模型仿真结果准确性的重要依据。

基于专家知识的故障诊断,即以发动机故障诊断和维修保障等领域专家学者多年积累的系统性知识和经验为基础,构建典型故障诊断规则库,进而指导故障诊断^[171-172],发动机的故障案例是专家知识形成的主要依据。

基于信号处理的故障诊断,即对振动信号进行时域、频域、时频特征分析,对各个振动分量进行有效分离和特征提取,结合诊断知识对提取出的特征进行物理解释,用于故障诊断^[173-174],发动机故障案例是信号处理的主要对象。

基于数据的诊断方法,即通过学习算法挖掘隐藏在案例数据中的规律和特征,利用人工智能实现发动机状态评估与故障识别^[175-176],发动机的故障案例是机器学习的基础。

综上所述,发动机的故障案例在这4方面中均发挥着重要作用,是航空发动机整机振动故障诊断技术发展的前提。然而,发动机的故障案例存在样本少且分布极其不均的问题。因此,需要开展航空发动机整机试验,在最大程度还原发动机故障状态的情况下,补充故障案例,支撑振动诊断技术发展。

为弥补整机试验及案例高质量数据的缺失,相关单位已初步开展了2方面工作:① 整机故障模拟。北京化工大学DSE中心、某研究所分别以某型涡扇发动机为原型,建设了电驱真机故障模拟试验装置,主要用于在整机状态下开展轴承损

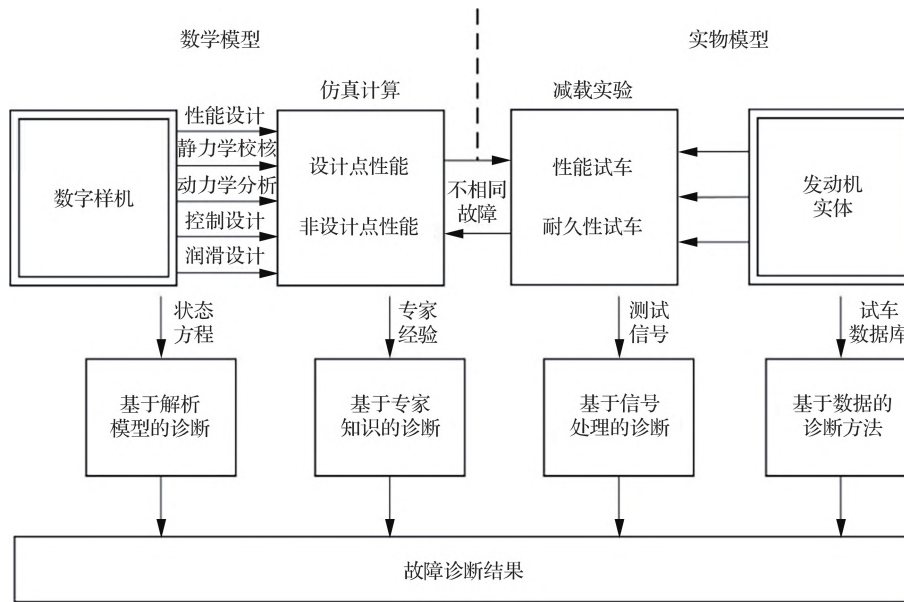

 图 12 故障诊断的主要方法^[168]

 Fig. 12 Main methods of fault diagnosis^[168]

伤、转子不平衡、动静碰摩、叶片损伤等典型振动故障模拟^[177]；② 真机案例的高质量数据积累。北京化工大学DSE中心与某保障单位、中国航发沈阳发动机研究所、中国航发株洲动力机械研究所、中国航发沈阳黎明航空发动机公司等单位合作，成功捕获了500余起典型振动故障案例；西安交通大学陈雪峰等^[147]通过与中国燃气涡轮研究院、中国航发西安航空发动机有限公司等单位合作，亦积累了航空发动机试车故障案例。上述数据的积累，可为诊断技术研究奠定良好的数据基础。

3.3 振动机理与传递路径分析是技术发展的基础

发动机整机振动机理研究是航空领域的重大课题^[178]。发动机转子-支承-机匣系统高度耦合，且受发动机结构和工作条件的制约，振动传感器大多分布于外机匣，因此分析典型故障振动机理、信号传递机理格外重要^[179]。以某型双转子航空发动机低压压气机工作叶片和盘产生的不平衡、不同心、叶片断裂等故障激励为例，该振动载荷通过鼓筒传递至前、后轴颈，再分别通过1号轴承和2号轴承传递到低压压气机静子机匣、中介机匣，信号经复杂薄壁结构、弹性支承等部件传递，振动响应必然会发生显著改变。因此，若

想实现航空发动机整机振动监测与故障诊断，首先必须以整机振动的激振源为出发点，结合发动机整机结构动力学，分析故障的发生发展机理、振动响应的传递规律。

关于振动机理相关研究，本文第2节已进行总结，此处不再赘述。在传递路径分析方面，天津大学^[180]、哈尔滨工业大学^[181]等都已形成了部分成果，但鲜见在实际航空发动机上应用的公开报道。故障机理及传递路径的研究，还需结合实际发动机结构及运行特点，通过整机试验、测试数据来继续深入。

3.4 机理与案例数据深度融合是技术发展的主要途径

航空发动机的复杂结构与多变工况，使得其与传统旋转机械差异显著，传统诊断理论与方法难以直接应用。数据驱动的诊断模型需要大量高质量的带标签故障样本作为训练条件，而积累了高质量数据的发动机故障案例样本匮乏，且人为标记的案例标签未必精确，导致其难以在航空发动机振动故障诊断中直接应用；同时，仅基于数据训练得到的模型由于其处于“黑箱”状态，其结果难以令人信服，也不利于进行故障源分析及方法优化改进。因此，结合机理知识的可解释性

与实际案例数据的真实性,构建机理与数据深度融合模型,可实现准确、可靠的发动机整机振动故障诊断。

该深度融合方式可被大致概括为2个方向:基于机理信息的嵌入算法与数字孪生。基于机理信息的嵌入算法是将物理知识融入机器学习过程中,利用机理知识对数据驱动的随机性起到限制作用^[182],西安交通大学 Wang 等^[183-185]提出了模型驱动的算法展开深度网络构造方法,不仅网络设计具有事前可解释性,网络学习结果亦具有事后可解释性,学习出了与故障机理相对应的网络卷积参数以及故障特征。而数字孪生则是一个更为广阔的方向,不止包含有效物理信息的输入,也包括实际案例数据对模型的参数识别,通过数字孪生模型将能为故障辨识提供与物理对象相同、甚至更多的信息,辅助数据驱动模型得到更好的学习结果。

为建立适用于航空发动机的故障诊断技术,依托国家重大项目支持,北京化工大学、西安交通大学、西北工业大学、中国航发等单位均开展了大量研究,但鲜见应用于真机试车、飞行中的实时分析^[19]。

3.5 机载智能诊断与地面大数据挖掘协同是技术发展的目标

随着现代振动信号处理、特征提取工程、人工智能技术的不断发展,航空发动机振动故障诊断技术也不断拓展、繁荣。传统事后维修、定期检修方式,费时费力,耗资居高不下,难以保障发动机长期有效工作,已无法满足现代飞机发动机故障诊断和维护需求,自动化、信息化、智能化已成为一种刚需,不只是地面检修维护,更亟需在空中飞行过程便对发动机振动故障进行智能告警与诊断。然而,受限于机载计算资源有限、难以实现多台次发动机的综合对比分析等条件,航空发动机的 PHM 体系通常还包括地面站的大数据分析平台。

针对于此,综合利用各项信号分析处理、机理模型构建及诊断技术,机载端实现典型故障的智能告警与快速智能诊断,地面站实现机群间对比分析、大数据挖掘及溯源诊断,两者协同,实现

航空发动机飞行过程中实时监测与快准诊断,及时准确地检测故障发生并提供相关告警,以辅助进行飞行决策,降低重大事故发生概率,保障飞行人员生命安全。同时,地面站可进行故障溯源与定位,指导后续靶向保障,转被动、事后维修为状态维修,缩短航空发动机维护时间,减少定期维修,提高发动机出勤率。

因此,机载智能诊断与地面大数据挖掘协同是航空发动机整机振动故障监测诊断的发展目标,也是未来智能发动机的迫切需求。针对这一难题,中国航发沈阳发动机研究所、中国航发株洲动力机械研究所、中国航发贵阳发动机设计研究所等工业部门正在联合高校开展相关理论研究与探索。

3.6 故障隔离与整机抑制是振动故障的快准解决策略

故障隔离是指当航空发动机某部分(或某台)发生故障时,采取停机/降速运行等技术手段,将故障隔离起来,使其对其他部分(或双发的另一台发动机)尽可能不产生/少产生影响,进而降低故障的危害性。

整机抑制包括微创抑振与自愈调控。微创抑振指发动机在地面保障过程中,采取整机动平衡、局部分解更换部件等方式,在不对发动机进行大范围拆解的条件下治愈振动故障;自愈调控指发动机在实际运行中,采取自动平衡、损伤自修复等技术,在运行中“自行”抑制或消除故障。

显然,上述技术是振动故障得到精准诊断后的快准解决策略,可极大保障发动机及飞机的安全,并显著提高维修效率。针对这一重大难题,北京化工大学联合中国航发沈阳发动机研究所、中国航发株洲动力机械研究所形成了2项成果:整机动平衡技术,真机试车验证了其有效性;积极探索了自动平衡方法,在部件试验器上验证了其抑振效果。

参 考 文 献

- [1] 金伟.“中国制造2025”下航空工业的发展前景[J]. 国防科技工业, 2016(7): 48-51.
JIN W. Development prospect of aviation industry under “Made in China 2025” [J]. Defence Science & Technol-

- ogy Industry, 2016(7): 48-51 (in Chinese).
- [2] JIANG Z N, HU M H, FENG K, et al. Weak fault feature extraction scheme for intershaft bearings based on linear prediction and order tracking in the rotation speed difference domain[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(9): 937.
- [3] 新浪军事. 歼10B坠毁原因疑似曝光:低空遇发动机停车老毛病 [EB/OL]. (2014-01-15)[2024-01-19]. <https://mil.news.sina.com.cn/2014-11-15/1620810946.html>. Sina Military. Reason for J10B crash suspected to be exposed: low altitude encounter engine stopping old problems [EB/OL]. (2014-01-15)[2024-01-19]. <https://mil.news.sina.com.cn/2014-11-15/1620810946.html> (in Chinese).
- [4] 曾声奎, Michael G Pecht, 吴际. 故障预测与健康管理 (PHM)技术的现状与发展[J]. *航空学报*, 2005, 26(5): 626-632.
- ZENG S K, MICHAEL G P, WU J. Status and perspectives of prognostics and health management technologies [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(5): 626-632 (in Chinese).
- [5] HESS A, CALVELLO G, DABNEY T. PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept [C] //2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2004: 3543-3550.
- [6] VOLPONI A J. Gas turbine engine health management: Past, present, and future trends[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 136(5): 051201.
- [7] SHIN J. The NASA aviation safety program: Overview [C] //Proceedings of ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. New York: ASME, 2014.
- [8] 张宝诚, 刘孝安. 航空发动机可靠性和经济性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- ZHANG B C, LIU X A. Reliability and economy of aero-engine [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998 (in Chinese).
- [9] BEALE J K, HESS A. Experiences with A-7E and the AV-8B engine monitoring systems: The good and the ugly[C] //2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 00TH8484). Piscataway: IEEE Press, 2002: 221-227.
- [10] HALL C L, LEARY S, LAPIERRE L, et al. F/A-18E/F F414 advanced inflight engine condition monitoring system (IECMS)[C] //2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8542). Piscataway: IEEE Press, 2001: 3069-3082.
- [11] 王偉生, 肖金彪. 航空发动机健康管理及其标准分析[J]. *航空动力*, 2019(1): 68-70.
- WANG W S, XIAO J B. Analysis of aero engine health management & its standards[J]. *Aerospace Power*, 2019(1): 68-70 (in Chinese).
- [12] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 等. 航空发动机预测与健康管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- WEI X K, YANG L, LIU F, et al. Aeroengine prognostics and health management [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014 (in Chinese).
- [13] BROWN E R, MCCOLLOM N N, MOORE E E, et al. Prognostics and health management A data-driven approach to supporting the F-35 lightning II[C] //2007 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-12.
- [14] WARWICK T. Overview of ARP 1587 Aircraft gas turbine engine monitoring system guide [R]. Warrendale: SAE International, 1980.
- [15] SAE. Aircraft gas turbine engine health management system guide: AIR1587B-2007 [S]. Warrendale: SAE International, 2007.
- [16] 曹明, 王鹏, 左洪福, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理: 现状、挑战与机遇-地面综合诊断、寿命管理和智能维护维修决策[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 625574.
- CAO M, WANG P, ZUO H F, et al. Current status, challenges and opportunities of civil aero engine diagnostics & health management II: Comprehensive off-board diagnosis, life management and intelligent condition based MRO[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 625574 (in Chinese).
- [17] 张津. 民用航空发动机状态监视和故障诊断系统研究[J]. *航空动力学报*, 1994, 9(4): 339-343.
- ZHANG J. Research on condition monitoring and fault diagnosis system of civil aviation engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 9(4): 339-343 (in Chinese).
- [18] 唐锡宽, 刘清瑞, 杨巍, 等. 高速数据采集和分析系统研究[J]. *航空动力学报*, 1994, 9(2): 60-64.
- TANG X K, LIU Q R, YANG W, et al. Research on high-speed data acquisition and analysis system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 9(2): 60-64 (in Chinese).
- [19] 张永峰. 飞行试验中航空发动机振动监测[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- ZHANG Y F. Research on inflight engine vibration monitoring [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003 (in Chinese).
- [20] 廖丽惠, 李喜发, 耿中行. 航空发动机振动监测与分析系统的研究与实现[C] //第二十一届全国振动与噪声高技术及应用学术会议, 2008.
- LIAO L H, LI X F, GENG Z X. Research and implementation of aero-engine vibration monitoring and analysis system [C] //21st National Conference on Vibration and Noise High Technology and Application, 2008 (in Chinese).

- [21] 曹明, 黄金泉, 周健, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康
管理现状、挑战与机遇-气路、机械和FADEC系统故障
诊断与预测[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 625573.
CAO M, HUANG J Q, ZHOU J, et al. Current status,
challenges and opportunities of civil aero-enginediagnostics
& health management I: Diagnosis and prognosis of en-
gine gas path, mechanical and FADEC [J]. Acta Aero-
nautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 625573 (in
Chinese).
- [22] GEGGIT T. Engine health and vibration monitoring[EB/
OL]. (2023-12-30) [2024-01-19]. <https://www.meggitt.com/products-services/engine-health-and-vibration-monitoring/>.
- [23] NAIRAC A, TOWNSEND N, CARR R, et al. A sys-
tem for the analysis of jet engine vibration data [J]. Inter-
grated Computer-Aided Engineering, 1999, 6(1): 53-66.
- [24] LAND J E. HUMS-the benefits-past, present and future
[C] //2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings
(Cat. No.01TH8542). Piscataway: IEEE Press, 2001:
3083-3094.
- [25] MATHUR A, HASTE D, DOMAGALA C. Applica-
tion of a dependency-model-based health inference and
troubleshooting strategy to a HUMS-enabled advanced
maintenance concept [J]. 2003.
- [26] 随时随地进行预测性维护: 霍尼韦尔引领互联直升机新时
代 [EB/OL]. (2018-04-03) [2024-01-19]. <http://www.air66.cn/tyhk/13103.html>.
Predictive maintenance anytime, anywhere: Honeywell
leads a new era of connected helicopters [EB/OL].
(2018-04-03) [2024-01-19]. <http://www.air66.cn/tyhk/13103.html> (in Chinese).
- [27] GUPTA K, GUPTA K D, ATHRE K. Unbalance re-
sponse of a dual rotor system: Theory and experiment
[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115(4):
427-435.
- [28] FERRARIS G, MAISONNEUVE V, LALANNE M.
Prediction of the dynamic behavior of non-symmetrical
coaxial co-or counter-rotating rotors [J]. Journal of Sound
and Vibration, 1996, 195(4): 649-666.
- [29] 胡绚, 罗贵火, 高德平. 反向旋转双转子稳态响应计算分
析与试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1044-1049.
HU X, LUO G H, GAO D P. Numerical analysis and ex-
periment of counter-rotating dual-rotor's steady-state re-
sponse [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7):
1044-1049 (in Chinese).
- [30] 蒋云帆, 廖明夫, 刘永泉, 等. 同转/对转双转子系统的动
力学特性[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2771-2780.
JIANG Y F, LIAO M F, LIU Y Q, et al. Dynamic char-
acteristics of co-rotating/counter-rotating dual-rotor sys-
tem [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12):
2771-2780 (in Chinese).
- [31] 韩军, 高德平, 胡绚. 一种基于模型的双转子不平衡故障
诊断方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 932-938.
HAN J, GAO D P, HU X. A model-based diagnosis
method of unbalance faults for dual-spool system [J].
Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 932-938 (in
Chinese).
- [32] 韩军, 高德平, 胡绚, 等. 航空发动机双转子系统的拍振
分析[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1369-1373.
HAN J, GAO D P, HU X, et al. Research on beat vibra-
tion of dual-rotor for aero-engine [J]. Acta Aeronautica
et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1369-1373 (in
Chinese).
- [33] 廖明夫, 刘永泉, 王四季, 等. 中介轴承对双转子振动的
影响[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(5): 641-646.
LIAO M F, LIU Y Q, WANG S J, et al. The vibration
features of a twin spool rotor system with an inter-bearing
[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace
Engineering, 2013, 32(5): 641-646 (in Chinese).
- [34] 廖明夫, 于潇, 王四季, 等. 双转子系统的振动[J]. 机械
科学与技术, 2013, 32(4): 475-480.
LIAO M F, YU X, WANG S J, et al. The vibration fea-
tures of a twin spool rotor system [J]. Mechanical Science
and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32
(4): 475-480 (in Chinese).
- [35] MA P P, ZHAI J Y, WANG Z, et al. Unbalance vibra-
tion characteristics and sensitivity analysis of the dual-
rotor system in aeroengines [J]. Journal of Aerospace En-
gineering, 2021, 34(1): 04020094.
- [36] HIBNER D H. Dynamic response of viscous-damped
multi-shaft jet engines [J]. Journal of Aircraft, 1975, 12
(4): 305-312.
- [37] GUNTER E J, BARRETT L E, ALLAIRE P E. De-
sign of nonlinear squeeze-film dampers for aircraft en-
gines [J]. Journal of Lubrication Technology, 1977, 99
(1): 57-64.
- [38] BONELLO P, HAI P M. A receptance harmonic bal-
ance technique for the computation of the vibration of a
whole aero-engine model with nonlinear bearings [J].
Journal of Sound Vibration, 2009, 324(1-2): 221-242.
- [39] 陈曦, 廖明夫, 李全坤. 带套齿联轴器的转子系统力学
特性研究[J]. 推进技术, 2015, 36(7): 1069-1077.
CHEN X, LIAO M F, LI Q K. Dynamic characteristics
of a rotor system with a spline coupling [J]. Journal of
Propulsion Technology, 2015, 36(7): 1069-1077 (in
Chinese).
- [40] LU Z Y, WANG X D, HOU L, et al. Nonlinear re-
sponse analysis for an aero engine dual-rotor system

- coupled by the inter-shaft bearing[J]. Archive of Applied Mechanics, 2019, 89(7): 1275-1288.
- [41] 邓四二, 付金辉, 王燕霜, 等. 航空发动机滚动轴承-双转子系统动态特性分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 195-204.
- DENG S E, FU J H, WANG Y S, et al. Analysis on dynamic characteristics of aero-engine rolling bearing/dual-rotor system[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 195-204 (in Chinese).
- [42] 罗贵火, 周海仑, 王飞, 等. 含滚动轴承的同向和反向旋转双转子系统动力学响应[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1887-1894.
- LUO G H, ZHOU H L, WANG F, et al. Dynamic response of co-rotating and counter-rotating dual-rotor system supported on ball bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1887-1894 (in Chinese).
- [43] 陈果. 双转子航空发动机整机振动建模与分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(6): 619-632.
- CHEN G. Vibration modeling and analysis for dual-rotor aero-engine[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(6): 619-632 (in Chinese).
- [44] 杨喜关, 罗贵火, 温卫东, 等. 支承非线性特性对双转子系统的响应特性影响研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(4): 572-582.
- YANG X G, LUO G H, WEN W D, et al. Impacts of support's nonlinear characteristics on response characteristics of dual-rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(4): 572-582 (in Chinese).
- [45] 张振波, 马艳红, 李骏, 等. 带有支承不同心转子系统的动力响应[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2321-2328.
- ZHANG Z B, MA Y H, LI J, et al. Dynamic response of aero-engine rotor system with bearing misalignment[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2321-2328 (in Chinese).
- [46] LI J, HONG J, MA Y H, et al. Modelling of misaligned rotor systems in aero-engines [C] //Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. New York: ASME, 2012.
- [47] 张振波, 马艳红, 李骏, 等. 航空发动机支承不同心转子系统力学模型研究[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 208-214, 228.
- ZHANG Z B, MA Y H, LI J, et al. Research on the dynamic model of aero-engine rotors with bearing misalignment[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 208-214, 228 (in Chinese).
- [48] REN D X, HONG J, WANG C. Research on dynamic model of rotors with bearing misalignment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 539: 3-8.
- [49] 刘永泉, 肖森, 洪杰, 等. 三支点柔性转子系统支承不同心激励特征及振动响应分析[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 220470.
- LIU Y Q, XIAO S, HONG J, et al. Excitation characteristic and dynamic response of misalignment of flexible rotor system with three supportings[J]. Acta Astronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 220470 (in Chinese).
- [50] 吴英祥, 张亚双, 陈果. 考虑航空发动机支承不同心的整机动力学建模及分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(5): 1-8.
- WU Y X, ZHANG Y S, CHEN G. Dynamic modeling and analysis of aeroengine with supporting non-concentricity[J]. Aeroengine, 2018, 44(5): 1-8 (in Chinese).
- [51] 冯国全, 周柏卓, 林丽晶, 等. 内外双转子系统支撑轴承不对中分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 142-147.
- FENG G Q, ZHOU B Z, LIN L J, et al. Misalignment analysis for support bearing in an inner-and-outer dual-rotor system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 142-147 (in Chinese).
- [52] 王美令. 不对中转子系统的动力学机理及其振动特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- WANG M L. Dynamics and vibration characteristics of misaligned rotor systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013 (in Chinese).
- [53] 张宏献, 黄良沛, 李学军, 等. 双转子系统内转子不同心频谱特性分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 701-709.
- ZHANG H X, HUANG L P, LI X J, et al. Spectrum analysis of a dual rotor bearing system under bearing elevation in inner rotor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(5): 701-709 (in Chinese).
- [54] 肖森, 黄光强, 赵正大, 等. 柔性转子系统支承不同心力学模型及振动响应分析[C]//第五届中国航空科学技术大会, 2021.
- XIAO S, HAUNG G Q, ZHAO Z D, et al. Mechanical model and dynamic response of flexible rotor system with misalignment[C]//Proceedings of the Fifth China Aviation Science and Technology Conference, 2021 (in Chinese).
- [55] 柏长青, 左彦飞, 耿斌斌, 等. 基于多体接触瞬态动力学支承不同心模拟分析方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 81-88.
- BAI C Q, ZUO Y F, GENG B B, et al. Bearing misalignment simulation and analysis method based on multi-body transient contact dynamics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 81-88 (in Chinese).
- [56] HAN Q K, CHEN Y G, ZHANG H, et al. Vibrations of rigid rotor systems with misalignment on squirrel cage supports[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(7): 4329-4339.
- [57] WANG M L, WEN B G, HAN Q K, et al. Dynamic characteristics of a misaligned rigid rotor system with

- flexible supports [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 8876190.
- [58] 王美令, 韩清凯, 关天民. 支点不同心转子系统振动特性试验研究[C]//第十五届全国非线性振动暨第十二届全国非线性动力学和运动稳定性学术会议, 2015.
- WANG M L, HAN Q K, GAUN T M. Experimental study of vibration characteristics of pivot point non-centric rotor system [C]//15th National Conference on Nonlinear Vibration and 12th National Conference on Nonlinear Dynamics and Motion Stability, 2015 (in Chinese).
- [59] 马平平. 航空发动机双转子系统振动特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- MA P P. Vibration analysis of the dual-rotor system for Aeroengine [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [60] 刘占生, 赵广, 龙鑫. 转子系统联轴器不对中研究综述[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5): 321-325.
- LIU Z S, ZHAO G, LONG X. Survey of the research on coupling with misalignment of rotary machinery [J]. Turbine Technology, 2007, 49(5): 321-325 (in Chinese).
- [61] 王永亮, 赵广, 孙绪聪, 等. 航空花键研究综述[J]. 航空制造技术, 2017, 60(3): 91-100.
- WANG Y L, ZHAO G, SUN X C, et al. Review on research of aviation spline [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(3): 91-100 (in Chinese).
- [62] 韩清凯, 王美令, 赵广, 等. 转子系统不对中问题的研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(1): 1-13.
- HAN Q K, WANG M L, ZHAO G, et al. A review of rotor systems with misalignment [J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(1): 1-13 (in Chinese).
- [63] 张宏献, 李学军, 蒋玲莉, 等. 航空发动机双转子系统不对中研究进展[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022717.
- ZHANG H X, LI X J, JIANG L L, et al. A review of misalignment of aero-engine rotor system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 022717 (in Chinese).
- [64] LEEN S B, HYDE T H, RATSIMBA C H H, et al. An investigation of the fatigue and fretting performance of a representative aero-engine spline coupling [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2002, 37(6): 565-583.
- [65] 李全坤, 廖明夫, 蒋云帆. 双转子不对中故障振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1916-1920.
- LI Q K, LIAO M F, JIANG Y F. The vibration features analysis of twin spool rotor with misalignment fault [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(12): 1916-1920 (in Chinese).
- [66] 陈果, 李兴阳. 航空发动机整机振动中的不平衡-不对中-碰摩耦合故障研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2277-2284.
- CHEN G, LI X Y. Study on imbalance-misalignment-rubbing coupling faults in aero-engine vibration [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(10): 2277-2284 (in Chinese).
- [67] 李俊慧, 马艳红, 洪杰. 转子系统套齿结构动力学设计方法研究[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 36-39.
- LI J H, MA Y H, HONG J. Dynamic design method of spline joint structure for rotor system [J]. Aeroengine, 2009, 35(4): 36-39 (in Chinese).
- [68] 蒋玲莉, 陈雨蒙, 李学军, 等. 双转子系统联轴器不对中振动响应分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(9): 1350-1356.
- JIANG L L, CHEN Y M, LI X J, et al. Vibration analysis of dual-rotor system with coupling misalignment [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9): 1350-1356 (in Chinese).
- [69] 蒋玲莉, 陈雨蒙, 赵广. 某型航空发动机不对中双转子系统动态特性对比分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 53-56.
- JIANG L L, CHEN Y M, ZHAO G. Comparative analysis of misalignment dynamic characteristics of an aero-engine dual rotor system [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 33(1): 53-56 (in Chinese).
- [70] 李源. 双转子系统弯扭耦合非线性振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LI Y. Research on nonlinear vibration characteristics of double-rotor system with bending-torsional coupling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 (in Chinese).
- [71] MA P P, ZHAI J Y, ZHANG H, et al. Multi-body dynamic simulation and vibration transmission characteristics of dual-rotor system for aeroengine with rubbing coupling faults [J]. Journal of Vibroengineering, 2019, 21(7): 1875-1887.
- [72] PRABITH K, PRAVEEN KRISHNA I R. Response and stability analysis of a two-spool aero-engine rotor system undergoing multi-disk rub-impact [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 213: 106861.
- [73] 林学森, 李本威, 黄帅, 等. 带柔性静子部件的轴承共腔涡轴发动机碰摩特征[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 1914-1926.
- LIN X S, LI B W, HUANG S, et al. Rub-impact characteristics of bearing co-cavity turboshaft engine with flexible static parts [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1914-1926 (in Chinese).
- [74] 袁惠群, 贺威, 韩清凯. 发动机双转子-机匣耦合系统碰摩故障分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2401-2408.

- YUAN H Q, HE W, HAN Q K. Analysis on rubs of double rotor-stator coupling system[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2401-2408 (in Chinese).
- [75] 张天程, 曹树谦, 李利青, 等. 碰摩双转子系统弯扭耦合振动分析与实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 643-655.
- ZHANG T C, CAO S Q, LI L Q, et al. Analysis and experiment of coupled bending and torsional vibration of a rub-impact dual-rotor system [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 643-655 (in Chinese).
- [76] 罗贵火, 杨喜关, 王飞. 高维双转子系统的碰摩响应特性研究[J]. 振动工程学报, 2015, 28(1): 100-107.
- LUO G H, YANG X G, WANG F. Research for response characteristics of rub-impact high-dimensional dual-rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(1): 100-107 (in Chinese).
- [77] 聂日敏, 曹树谦, 郭虎伦. 航空发动机双转子系统高/低压涡轮碰摩振动分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 243-253, 263.
- NIE R M, CAO S Q, GUO H L. Rub-impact vibration analysis of PH/LH turbines of aeroengine dual-rotor system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 243-253, 263 (in Chinese).
- [78] 丁小飞, 彭丹阳, 曹航, 等. 双转子涡扇发动机碰摩振动特征研究[J]. 航空发动机, 2021, 47(4): 91-97.
- DING X F, PENG D Y, CAO H, et al. Study on vibration characteristics of dual-rotor turbofan engine with rubbing[J]. Aeroengine, 2021, 47(4): 91-97 (in Chinese).
- [79] 秦海勤, 张耀涛, 徐可君. 双转子-支承-机匣耦合系统碰摩振动响应分析及试验验证[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 75-83.
- QIN H Q, ZHANG Y T, XU K J. Rubbing vibration response theoretical analysis and experimental verification for a double rotor support casing system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 75-83 (in Chinese).
- [80] 陈松霆, 吴志强. 反向旋转双转子碰摩振动分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 142-147.
- CHEN S T, WU Z Q. Rubbing vibration analysis for a counter-rotating dual-rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23): 142-147 (in Chinese).
- [81] 张娅, 王维民, 姚剑飞. 双盘转子系统轴向-径向碰摩非线性动力学特性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 141-145.
- ZHANG Y, WANG W M, YAO J F. Nonlinear dynamic behavior of a double-disk isotropic rotor system with axial and radial rub-impacts [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 141-145 (in Chinese).
- [82] 何田, 刘献栋, 李其汉. 一种改进的航空发动机转静件碰摩故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1093-1097.
- HE T, LIU X D, LI Q H. Improved fault diagnosis method for aero engine rotor-stator rubs [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1093-1097 (in Chinese).
- [83] 刘洋, 刘晓波, 梁珊. 基于傅里叶分解方法的航空发动机转子故障诊断[J]. 中国机械工程, 2019, 30(18): 2156-2163.
- LIU Y, LIU X B, LIANG S. Aeroengine rotor fault diagnosis based on Fourier decomposition method [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(18): 2156-2163 (in Chinese).
- [84] 边杰, 梅庆, 陈亚农, 等. 航空发动机高低压转子间碰摩故障特征提取[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 347-354.
- BIAN J, MEI Q, CHEN Y N, et al. Feature extraction of rub impact fault between high and low pressure rotors of aero-engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 347-354 (in Chinese).
- [85] 陈果, 于明月, 刘永泉, 等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 32-38.
- CHEN G, YU M Y, LIU Y Q, et al. Identifying rotor-stator rubbing positions using the cepstrum analysis technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 32-38 (in Chinese).
- [86] 左红艳, 刘晓波, 洪连环. 基于双阶自适应小波聚类的复合故障诊断[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(10): 2180-2191.
- ZUO H Y, LIU X B, HONG L H. Compound fault diagnosis based on two-stage adaptive wavecluster [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(10): 2180-2191 (in Chinese).
- [87] 张志禹, 吕延军, 张九龙. 航空发动机转子碰摩故障信号广义 S 变换方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 25-28.
- ZHANG Z Y, LU Y J, ZHANG J L. Generalized S-transform method of rotor impact-rub fault signal of aero-engine [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 25-28 (in Chinese).
- [88] 周海仑, 陈果, 李飞敏. 转子-滚动轴承耦合系统的转静碰摩故障分析与智能诊断[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 90-94, 114, 194.
- ZHOU H L, CHEN G, LI F M. Dynamic analysis and intelligent diagnosis for rubbing fault of a rotor-ball bearing coupled system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(10): 90-94, 114, 194 (in Chinese).
- [89] MADHAV S, ROY M. Failure analysis of compressor blades of aero-engine [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(3): 968-982.
- [90] 马艳红, 梁智超, 王桂华, 等. 航空发动机叶片丢失问题研究综述[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 513-526.

- MA Y H, LIANG Z C, WANG G H, et al. Review on the blade loss of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 513-526 (in Chinese).
- [91] SINHA S K. Rotordynamic analysis of asymmetric turbofan rotor due to fan blade-loss event with contact-impact rub loads[J]. Journal of Sound Vibration, 2013, 332(9): 2253-2283.
- [92] 洪亮, 臧朝平, 李全坤, 等. 模拟转子叶片丢失后外传载荷影响特性研究[J]. 推进技术, 2023, 44(10): 176-185.
- HONG L, ZANG C P, LI Q K, et al. Effects of external load on simulated rotor blade off event[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(10): 176-185 (in Chinese).
- [93] 洪杰, 郝勇, 张博, 等. 叶片丢失激励下整机力学行为及其动力特性[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 19-23.
- HONG J, HAO Y, ZHANG B, et al. Mechanical behaviors and dynamic characteristics of turbofan engine due to fan blade off[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 19-23 (in Chinese).
- [94] 洪杰, 栗天壤, 王永锋, 等. 叶片丢失激励下航空发动机柔性转子系统的动力学响应[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 257-264.
- HONG J, LI T R, WANG Y F, et al. Dynamic response of the aero-engine flexible rotor system under the blade-off[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 257-264 (in Chinese).
- [95] XIE J S, LIU J, CHEN J L, et al. Blade damage monitoring method base on frequency domain statistical index of shaft's random vibration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165: 108351.
- [96] WANG N F, LIU C, JIANG D X, et al. Casing vibration response prediction of dual-rotor-blade-casing system with blade-casing rubbing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 61-77.
- [97] WANG N F, LIU C, JIANG D X. Prediction of transient vibration response of dual-rotor-blade-casing system with blade off[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(14): 5164-5176.
- [98] WANG L K, YIN Y J, WANG A L, et al. Dynamic modeling and vibration characteristics for a high-speed aero-engine rotor with blade off[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9674.
- [99] FORBES G L, RANDALL R B. Estimation of turbine blade natural frequencies from casing pressure and vibration measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2): 549-561.
- [100] LISKA J, VASICEK V, JAKL J. A novel method of impeller blade monitoring using shaft vibration signal processing[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4932.
- [101] 党伟, 胡明辉, 江志农, 等. 燃气轮机压气机叶片断裂故障振动特征及其诊断方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 7-19.
- DANG W, HU M H, JIANG Z N, et al. Vibration features and diagnosis methods for rotor blade fracture in a gas turbine's compressor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 7-19 (in Chinese).
- [102] 江志农, 王钟, 胡明辉, 等. 燃气轮机叶片断裂故障振动特征及其识别方法研究[J]. 机电工程, 2021, 38(8): 935-943.
- JIANG Z N, WANG Z, HU M H, et al. Vibration feature and identification methods of gas turbine rotor blade fracture fault[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(8): 935-943 (in Chinese).
- [103] 江志农, 党伟, 胡明辉, 等. 基于OCSVM的燃气轮机叶片断裂故障诊断方法[J]. 机械设计与制造, 2022(12): 1-5, 10.
- JIANG Z N, DANG W, HU M H, et al. Gas turbine fault diagnosis method of blade fracture based on OCSVM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(12): 1-5, 10 (in Chinese).
- [104] FENG K, XIAO Y, LI Z Z, et al. Gas turbine blade fracturing fault diagnosis based on broadband casing vibration[J]. Measurement, 2023, 214: 112718.
- [105] 单颖春, 朱梓根, 刘献栋. 某带凸肩发动机风扇叶片非线性响应及断裂故障分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1): 95-99, 163.
- SHAN Y C, ZHU Z G, LIU X D. Investigation of nonlinear responses and crack fault of an engine fan blade with shrouds[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 95-99, 163 (in Chinese).
- [106] GUBRAN A A, SINHA J K. Shaft instantaneous angular speed for blade vibration in rotating machine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 44(1-2): 47-59.
- [107] ZHANG J Q, CHEN Y G, LI N, et al. A denoising method of micro-turbine acoustic pressure signal based on CEEMDAN and improved variable step-size NLMS algorithm[J]. Machines, 2022, 10(6): 444.
- [108] ABDELRHMAN A M, LEE G, LEONG M, et al. Early rotor blade fault detection in multi-stage rotor system based on wavelet analysis[M]. 2019.
- [109] PRZYSOWA R, RUSSHARD P. Non-contact measurement of blade vibration in an axial compressor[M]. 2019.
- [110] GYEKENYESI A L S J T, BAAKLINI G. Application of vibration monitoring techniques for damage detection in rotating disks[C]//The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, 2002.

- [111] ANDREW L G J T, SAWICKI G Y. Vibration based crack detection in a rotating disk: NASA/TM-2003-212624 [R]. Washington, D.C.: NASA, 2003.
- [112] LUO H G H R, HALLMAN D. Disk crack detection for seeded fault engine test: NASA/CR-2004-213069 [R]. Washington, D.C.: NASA, 2004.
- [113] LEWICKI D G. TF41 engine fan disk seeded fault crack propagation test[R]. Washington, D.C.: NASA, 2003.
- [114] CHUNG J P, YOO H H. Blade fault diagnosis using Mahalanobis distance[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(4): 1377-1385.
- [115] YE S H. Research on rotating blade vibration monitoring system for aero engine[C]. 2008.
- [116] 胡伟, 王德友, 杜少辉, 等. 非接触式数字光纤叶片测振系统研究及应用[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 38-41.
HU W, WANG D Y, DU S H, et al. Investigation and application of non-contact digital optical fiber rotor blade vibration measurement system[J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 38-41 (in Chinese).
- [117] CAO J H, YANG Z B, TIAN S H, et al. Time delay-based spectrum reconstruction for nonuniform and sub-Nyquist sampling in blade tip timing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200: 110552.
- [118] KUO Y C, HSIEH C T, YAU H T, et al. Study on unified chaotic system-based wind turbine blade fault diagnostic system[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2015, 25(3): 1550042-4144.
- [119] 李丽敏, 王仲生, 姜洪开. 基于相似性传播聚类的航空发动机突发故障诊断[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1): 51-55.
LI L M, WANG Z S, JIANG H K. Abrupt fault diagnosis of aero-engine based on affinity propagation clustering [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1): 51-55 (in Chinese).
- [120] NGUI W K, LEONG M S, SHAPIAI M I, et al. Blade fault diagnosis using artificial neural network[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(4): 519-526.
- [121] KENG N W, LEONG M S, SHAPIAI M I, et al. Blade fault localization with the use of vibration signals through artificial neural network: A data-driven approach[J]. Pertanika Journal of Science and Technology, 2022, 31(1): 51-68.
- [122] WANG M H, LU S D, HSIEH C C, et al. Fault detection of wind turbine blades using multi-channel CNN[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1781.
- [123] TAN C Y, NGUI W K, LEONG M S, et al. Blade fault diagnosis using empirical mode decomposition based feature extraction method [C] //MATEC Web of Conferences, 2019.
- [124] 郑旭东, 张连祥. 航空发动机整机振动典型故障分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(1): 34-37.
ZHENG X D, ZHANG L X. Typical failure analysis of aeroengine vibration[J]. Aeroengine, 2013, 39(1): 34-37 (in Chinese).
- [125] 侯磊, 陈予恕. 非线性共振及其计算和应用[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 1-12.
HOU L, CHEN Y S. Nonlinear resonance and its calculations and applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 1-12 (in Chinese).
- [126] SPAGNOL J P, WU H, XIAO K Q. Dynamic response of a cracked rotor with an unbalance influenced breathing mechanism[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(1): 57-68.
- [127] HOU L, CHEN Y S, LU Z Y, et al. Bifurcation analysis for 2: 1 and 3: 1 super-harmonic resonances of an aircraft cracked rotor system due to maneuver load[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 81(1): 531-547.
- [128] HOU L, CHEN Y S, CAO Q J, et al. Nonlinear vibration analysis of a cracked rotor-ball bearing system during flight maneuvers [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 105: 515-528.
- [129] HOU L H, CHEN Y S. Super-harmonic responses analysis for a cracked rotor system considering inertial excitation [J]. SCIENCECHINA: Technological Sciences, 2015, 58(11): 1924-1934.
- [130] LU Z Y, HOU L, CHEN Y S, et al. Nonlinear response analysis for a dual-rotor system with a breathing transverse crack in the hollow shaft[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(1): 169-185.
- [131] 牛和强. 裂纹转子一轴承系统动力学特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
NIU H Q. Research on dynamic behaviors of a rotor-bearing system with crack faults [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014 (in Chinese).
- [132] 聂日敏. 航空发动机双转子系统高/低压涡轮碰摩振动特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
NIE R M. Vibration characteristics analysis of high/low pressure turbines rub-impact of an aeroengine dual-rotor system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019 (in Chinese).
- [133] 侯磊. 机动飞行环境下转子系统的非线性动力学行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
HOU L. Research on nonlinear dynamics of rotor systems in maneuvering flight environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).
- [134] HOU L, CHEN Y S, CAO Q J. Nonlinear vibration phenomenon of an aircraft rub-impact rotor system due to hovering flight[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(1): 286-297.

- [135] 马会防, 张辉, 吴志青, 等. 某风扇增压级行波共振故障机理研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 130-136.
- MA H F, ZHANG H, WU Z Q, et al. Mechanism of travelling wave resonance fault of a fan booster stage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(22): 130-136 (in Chinese).
- [136] 王海霞, 袁惠群, 冯鑫. 发动机附件机匣振动分析与故障排除方法[J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(增刊1): 206-209, 232.
- WANG H X, YUAN H Q, FENG X. Vibration analysis and troubleshooting method of engine accessory gearbox [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(Sup 1): 206-209, 232 (in Chinese).
- [137] 刘朋, 王黎钦, 张传伟, 等. 航空发动机主轴承状态监测研究现状与发展趋势[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 330-343.
- LIU P, WANG L Q, ZHANG C W, et al. Research status and development trend of condition monitoring on main-shaft bearings used in aircraft engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 330-343 (in Chinese).
- [138] 陈果, 郝腾飞, 程小勇, 等. 基于机匣测点信号的航空发动机滚动轴承故障诊断灵敏性分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2874-2884.
- CHEN G, HAO T F, CHENG X Y, et al. Sensitivity analysis of fault diagnosis of aero-engine rolling bearing based on vibration signal measured on casing[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2874-2884 (in Chinese).
- [139] ANTONI J, GRIFFATON J, ANDRÉ H, et al. Feedback on the Surveillance 8 challenge: Vibration-based diagnosis of a Safran aircraft engine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 97: 112-144.
- [140] 廖明夫, 马振国, 刘永泉, 等. 航空发动机中介轴承的故障特征与诊断方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2752-2758.
- LIAO M F, MA Z G, LIU Y Q, et al. Fault characteristics and diagnosis method of intershaft bearing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2752-2758 (in Chinese).
- [141] HE Y, FENG K, HU M H, et al. An MCM-enhanced compressive sensing for weak fault feature extraction of rolling element bearings under variable speeds[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1745184.
- [142] HE Y, HU M H, FENG K, et al. Bearing condition evaluation based on the shock pulse method and principal resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3509212.
- [143] HE Y, HU M H, FENG K, et al. An intelligent fault diagnosis scheme using transferred samples for intershaft bearings under variable working conditions[J]. IEEE Access, 2020, 8: 203058-203069.
- [144] JIANG Z N, HU M H, FENG K, et al. A SVDD and K-means based early warning method for dual-rotor equipment under time-varying operating conditions[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 5382398.
- [145] ZHANG H, CHEN X F, ZHANG X L, et al. Aero-engine bearing fault detection: A clustering low-rank approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106529.
- [146] RZADKOWSKI R, ROKICKI E, PIECHOWSKI L, et al. Analysis of middle bearing failure in rotor jet engine using tip-timing and tip-clearance techniques [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76-77: 213-227.
- [147] 陈雪峰, 王诗彬, 程礼. 航空发动机快变信号的匹配同步压缩变换研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 13-22.
- CHEN X F, WANG S B, CHENG L. Matching synchrosqueezing transform for aero-engine's signals with fast varying instantaneous frequency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 13-22 (in Chinese).
- [148] WANG S B, CHEN X F, CAI G G, et al. Matching demodulation transform and SynchroSqueezing in time-frequency analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(1): 69-84.
- [149] CHEN S W, AN B T, YAN R Q, et al. Instantaneous frequency band and synchrosqueezing in time-frequency analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing: A publication of the IEEE Signal Processing Society, 2023, 71: 539-554.
- [150] 栾孝驰, 赵俊豪, 沙云东, 等. 基于阈值参数判决筛选的航空发动机主轴承故障提取方法[J/OL]. 航空动力学报, 2023: 1-13 [2024-01-03]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230341>.
- LUAN X C, ZHAO J H, SHA Y D, et al. Aircraft engine main bearing fault feature extraction method based on threshold parameter decision screening[J]. Journal of Aerospace Power, 2023: 1-13 [2024-01-03]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230341> (in Chinese).
- [151] WANG S B, SELESNICK I, CAI G G, et al. Nonconvex sparse regularization and convex optimization for bearing fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7332-7342.
- [152] TONG C W, WANG S B, SELESNICK I W, et al. Ridge-aware weighted sparse time-frequency representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 136-149.
- [153] 林桐, 陈果, 张全德, 等. 航空滚动轴承振动特征的故障灵敏度分析与融合技术[J]. 航空动力学报, 2017, 32

- (9): 2205-2218.
- LIN T, CHEN G, ZHANG Q D, et al. Fault sensitivity analysis and fusion technology for vibration features of aero-engine rolling bearings [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(9): 2205-2218 (in Chinese).
- [154] MA J, ZHUO S, LI C, et al. Study on noncontact aviation bearing faults and speed monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-21.
- [155] WANG B J, ZHANG X L, SUN C, et al. A quantitative intelligent diagnosis method for early weak faults of aviation high-speed bearings[J]. *ISA Transactions*, 2019, 93: 370-383.
- [156] 张向阳, 陈果, 郝腾飞, 等. 基于机匣信号的滚动轴承故障卷积神经网络诊断方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2729-2737.
- ZHANG X Y, CHEN G, HAO T F, et al. Convolutional neural network diagnosis method of rolling bearing fault based on casing signal [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(12): 2729-2737 (in Chinese).
- [157] LIN T, CHEN G, OUYANG W L, et al. Hyper-spherical distance discrimination: A novel data description method for aero-engine rolling bearing fault detection [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 109: 330-351.
- [158] LI N, LEI Y, LIN J, et al. An improved exponential model for predicting remaining useful life of rolling element bearings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7762-7773.
- [159] LI N P, GEBRAEEL N, LEI Y G, et al. Remaining useful life prediction of machinery under time-varying operating conditions based on a two-factor state-space model [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 186: 88-100.
- [160] LI N P, XU P C, LEI Y G, et al. A self-data-driven method for remaining useful life prediction of wind turbines considering continuously varying speeds [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165: 108315.
- [161] FENG K, LI Y, HE Y Z. Modulation signal bispectrum optimization for fault diagnosis of intershaft bearings [C]//2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [162] 大飞机 C919 将装备具有自主知识产权的 PHM 系统 [EB/OL]. (2016-08-05) [2024-01-19]. <http://www.ccaonline.cn/news/hot/278805.html>.
- The C919 will be equipped with a PHM system with independent intellectual property rights [EB/OL]. (2016-08-05) [2024-01-19]. <http://www.ccaonline.cn/news/hot/278805.html> (in Chinese).
- [163] 广州航新科技公司. 公开发行可转换公司债券的论证分析报告 [EB/OL]. (2022-10-02) [2024-01-19]. <https://wenku.baidu.com/view/953c01f3fb0f76c66137ee06eff9aef8941e48b8.html#>.
- Guangzhou Hangxin Science and Technology Company. Demonstration and analysis report on public offering of convertible bonds [EB/OL]. (2022-10-02) [2024-01-19]. <https://wenku.baidu.com/view/953c01f3fb0f76c66137ee06eff9aef8941e48b8.html#> (in Chinese).
- [164] SIMON D L, GARG S, HUNTER G W, et al. Sensor needs for control and health management of intelligent aircraft engines [C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air*. New York: ASME, 2008.
- [165] GARG S, SCHADOW K, HORN W, et al. Sensor and actuator needs for more intelligent gas turbine engines [C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*. New York: ASME, 2010.
- [166] BEHBAHANI A, SEMEGA K. Sensing challenges for controls and PHM in the hostile operating conditions of modern turbine engine [C]//*Proceedings of the 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. Reston: AIAA, 2008.
- [167] 秦海勤, 徐可君, 江龙平. 某型航空发动机机载振动监测点选择[J]. *推进技术*, 2007, 28(6): 697-702.
- QIN H Q, XU K J, JIANG L P. Research on distribution of airborne vibration monitoring measuring points for the aeroengine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(6): 697-702 (in Chinese).
- [168] 王俨凯, 廖明夫, 丁小飞. 航空发动机故障诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- WANG Y K, LIAO M F, DING X F. Fault diagnosis for aero-engine [M]. Beijing: Science Press, 2020 (in Chinese).
- [169] HONG J, JIANG L M, XU X R, et al. High cycle fatigue failure with radial cracks in gears of aero-engines [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(10): 2620-2632.
- [170] HONG J, SONG Z H, MA Y H, et al. Robust design method for dynamics of high-speed rotor system with interface [C]//*International Conference on Vibration Problems*. Singapore: Springer, 2021: 629-645.
- [171] 丁小飞, 廖明夫, 韩方军. 航空发动机振动突增问题分析[J]. *航空发动机*, 2023, 49(2): 105-111.
- DING X F, LIAO M F, HAN F J, et al. Analysis of sudden increase of vibration in aeroengine [J]. *Aeroengine*, 2023, 49(2): 105-111 (in Chinese).

- [172] 邓明, 金业壮. 航空发动机故障诊断[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
DENG M, JIN Y Z. Fault diagnosis for aero-engine[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012 (in Chinese).
- [173] PENG Z K, CHU F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 18(2): 199-221.
- [174] ZHANG M, JIANG Z N, FENG K. Research on variational mode decomposition in rolling bearings fault diagnosis of the multistage centrifugal pump[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93: 460-493.
- [175] LEI Y G, YANG B, JIANG X W, et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106587.
- [176] LIU R N, YANG B Y, ZIO E, et al. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 33-47.
- [177] 高金吉. 航空发动机振动故障监控智能化[J]. 测控技术, 2019, 38(1): 1-4.
GAO J J. Intelligent monitoring of aero-engine vibration faults[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38 (1): 1-4 (in Chinese).
- [178] 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 Y S, ZHANG H B. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32 (8): 1371-1391 (in Chinese).
- [179] 汪才, 艾延廷, 陈仁桢, 等. 航空发动机振动传递特性研究进展 [J]. 航空发动机, 2023, 49(2): 72-88.
WANG C, AI Y T, CHEN R Z, et al. Research progress on vibration transmission characteristics of aeroengine[J]. Aeroengine, 2023, 49(2): 72-88 (in Chinese).
- [180] 侯兰兰. 航空发动机双转子系统振动传递及非线性动力学研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
HOU L L. Research on vibration transmission and nonlinear dynamics of aeroengine dual rotor system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021 (in Chinese).
- [181] 林荣洲. 航空发动机整机系统振动传递特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LIN R Z. Research on vibration transfer characteristics of aero-engine system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese).
- [182] DENG W K, NGUYEN K T P, MEDJAHHER K, et al. Physics-informed machine learning in prognostics and health management: State of the art and challenges [J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 124: 325-352.
- [183] AN B T, WANG S B, ZHAO Z B, et al. Interpretable neural network via algorithm unrolling for mechanical fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3517011.
- [184] ZHAO Z, LI T, AN B, et al. Model-driven deep unrolling: Towards interpretable deep learning against noise attacks for intelligent fault diagnosis [J]. ISA transactions, 2022, 129(Pt B): 644-662.
- [185] AN B T, WANG S B, QIN F H, et al. Adversarial algorithm unrolling network for interpretable mechanical anomaly detection [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023.

(责任编辑: 张晗)

Research progress on vibration monitoring and fault diagnosis for aero-engine

HU Minghui^{1,2}, GAO Jinji^{1,3,*}, JIANG Zhinong^{1,2}, WANG Weimin^{1,3}, ZOU Limin², ZHOU Tao³, FAN Yunfeng³, WANG Yue³, FENG Jiaxin³, LI Chenyang²

1. State Key Laboratory of High-end Compressor and System Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
2. Key Lab of Engine Health Monitoring-Control and Networking of Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China
3. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring and Self-Recovery for High-end Mechanical Equipment, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: Aeroengine amalgamates state-of-the-art technologies across diverse domains, serving as a comprehensive manifestation of a nation's prowess in science and industry. Frequent malfunctions occur due to its complicated structure and harsh service environment. Therefore, it is essential to employ prognostic and health management technology to provide crucial support for aviation safety and reliable operations. As vibration faults constitute a primary failure mode in aeroengine, this paper, grounded in this premise, systematically reviews and analyzes existing vibration monitoring and fault diagnosis for aviation engines both domestically and internationally. The analysis is categorized into three dimensions, covering the application of overall vibration monitoring and diagnostic systems, typical fault characteristics and diagnostic methods, and the overall vibration fault diagnostic technology, including dynamic analysis, signal processing techniques, and relevant technologies such as deep learning. Then, the problems and challenges faced by the existing vibration fault diagnosis of aeroengine are identified. Furthermore, future development goals are provided.

Keywords: aeroengine; fault diagnosis; vibration analysis; dynamical model; signal processing; intelligent diagnosis

Received: 2024-01-19; **Revised:** 2024-02-05; **Accepted:** 2024-02-22; **Published online:** 2024-02-25

URL: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I4/630194>

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (92160203); Youth Talent Support Project (2022-JCJQ-QT-059); Joint Fund of the Ministry of Education of the People's Republic of China (8091B022203)

* **Corresponding author.** E-mail: gaojinji@263.net