

专 家 介 绍



张帅,高级工程师,研究方向为航空发动机结构强度与振动特性试飞、健康状态监测与故障诊断、旋转机械流固耦合特性等。负责基础加强计划预研、装备联合基金、民机预研等多项研究项目。以第一作者发表中文核心/EI检索论文十余篇,获授权专利十余项;获得航空工业集团科技进步三等奖、陕西航空工业管理局创新成果奖一等奖等。担任《应用力学学报》《环境技术》等期刊青年编委。

航空发动机结构健康状态监测与评估研究进展

张帅

(中国飞行试验研究院发动机所,710089 西安)

摘 要:随着我国航空装备技术及产业的迅速发展,航空发动机的健康状态监测、故障诊断、趋势预测与状态评估等技术对于保障发动机高性能、高稳定性、高可靠性工作至关重要。航空发动机结构健康监测能够在飞行试验和服役全过程中对发动机结构状态进行监测与评估,通过开展科学的故障诊断与隔离、结构健康趋势预测与状态评估,进而实现对发动机结构的视情维护,提升发动机可靠性、维护性与故障可控性,以及应对紧急状况的能力,同时降低发动机费效比。围绕航空发动机结构健康监测与评估技术,系统分析了发动机健康状态监测对于推进系统与飞行器健康、稳定、安全运行的必要性,对于提高装备执行任务完成率、降低全寿命周期的费效比的必要性;详细阐述了国内外发动机健康状态监测的研究现状,梳理了应用于航空发动机结构健康状态监测与评估研究的先进传感技术、监测系统与方法、典型故障特征提取方法与健康状态评估方法等的研究进展,并对航空发动机结构健康监测与评估技术的发展趋势进行了展望。

关键词:航空发动机;结构健康;状态监测;先进传感;故障诊断;特征提取;健康基线;状态评估

中图分类号: O342; V231.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.002

文章编号: 1000-4939(2026)01-0014-24 **CSTR:** 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.002

Research progress in aero-engine structural health monitoring and evaluation technologies

ZHANG Shuai

(Aero-Engine Flight Test, Chinese Flight Test Establishment, 710089 Xi'an, China)

收稿日期:2025-07-18

基金项目:基础加强计划基金资助项目(No. 2022-JCJQ-ZD-195-02)

通信作者:张帅,高级工程师。E-mail: zhangs101@avic.com

引用格式:张帅. 航空发动机结构健康状态监测与评估研究进展[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 14-37.

ZHANG Shuai. Research progress in aero-engine structural health monitoring and evaluation technologies[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 14-37.

Abstract: With the rapid advancement of aviation technology and industrial capabilities, the monitoring, diagnosis, prediction, and assessment of aero-engine health status have become increasingly critical. These capabilities are essential in ensuring high performance, operational stability, and reliability throughout the engine lifecycle. Aero-engine structural health monitoring (SHM) enables continuous observation and evaluation of the engine's structural condition during flight tests and throughout its service. By applying scientific methods in fault diagnosis and isolation, predicting structural health trends, and assessing real-time conditions, condition-based maintenance of engine structures can be achieved. This approach enhances the engine's reliability, maintainability, and fault tolerance, while also improving its ability to respond to unexpected events and reducing life-cycle costs. As a result, aero-engine SHM and assessment technologies have attracted significant attention. This paper focuses on SHM and evaluation technologies for aero-engines. It systematically analyzes the necessity of engine health monitoring in ensuring the healthy, stable, and safe operation of both the propulsion system and the aircraft, as well as its role in improving mission completion rates and reducing life-cycle cost ratios. The research status of engine health monitoring at home and abroad is elaborated in detail. Furthermore, the paper reviews recent progress in advanced sensing technologies, monitoring systems and methods, techniques for typical fault feature extraction, and health assessment methodologies applied in aero-engine SHM. Finally, future development trends in aero-engine SHM and assessment are discussed.

Key words: aero-engine; structure health; status monitoring; advanced sensing; fault diagnosis; feature extraction; health baseline; status assessment

健康管理、状态监测的概念起源于美国商业保险领域,是医疗保险公司通过对参加医保的人进行相对系统的健康管理、状态监测,进而能够有效地控制其疾病的发生或发展,明显降低出险概率,最终达到保险赔付的损失最小化目的^[1]。此后,各行业专家学者对健康管理、状态监测进行深入研究与发展,使得健康管理的理念在诸多专业领域得到应用,而将健康管理概念引入高度集成的航空航天工业设备管理领域,是一次重大的创新行为^[2]。

美国 NASA 建立了航空飞行器分布式健康管理技术构架,其功能领域分为多个子系统的健康管理模块,如飞行器子系统健康管理、结构健康管理、推进系统健康管理及软件健康管理^[3]。航空发动机健康管理(engine health management, EHM)是航空飞行器健康管理研究的重要分支,以航空发动机为研究对象,利用先进的传感技术与数据采集系统,数据处理与统计方法、数据模型等,以提高航空发动机的可靠性、维修性和安全性为目标,采用先进传感技术对发动机的健康状态进行实时监测,能够定位故障类型、原因及位置,给飞行器综合管理系统提供诊断和预测报告,达到给出维修决策与视情维修的目的,进而减少定检与维修次数,降低维护费效比,进而提高发动机的使用效率^[4]。

通过对美国 1981—2001 年间发生 7 000 余架飞机事故统计分析,起落架(ATA32)和发动机(ATA72)是发生最多的机械结构故障类型,推进系统机械结构故障比重为 36%^[5-6]。因此,航空发动机的结构健康状态监测是航空发动机安全运行的重要保障手段,对于提升航空发动机运行效率、安全性能等具有重要意义。

国内航空发动机结构健康监测领域正处在追赶与攻关的关键阶段,虽然部分单项技术取得突破,但在实现全面、精准、实时的状态感知与健康管理方面,仍面临严峻挑战。主要技术瓶颈包括数据感知获取、故障诊断预测、系统集成验证与行业生态基础。在数据感知获取方面,由于发动机内部空间和环境极端,测点数量与位置受限,旋转件信号传输稳定性与精度不足;在故障诊断预测方面,因缺乏完整的正向设计经验和机理模型库,故障难以准确定位和演绎推理,性能预测模型精度与适应性不足;在系统集成验证方面,由于故障机理复杂,涉及气动、热力、机械等多物理场强耦合,缺乏能够模拟真实极端服役环境的试验装置,验证平台不完善,健康管理技术与发动机设计过程相对脱离;在行业生态基础方面,健康管理正向设计经验不足,研发模式常跟随特定型号,缺乏对核心、基础技术的长期、持续性

独立研发投入^[7]。

本研究围绕航空发动机结构健康状态监测与评估主题,系统分析发动机健康状态监测的需求,对国内外发动机健康状态监测的研究现状进行梳理,总结应用于发动机结构健康状态监测的先进传感技术与监测系统、典型故障特征提取与状态评估方法等内容,展望了未来的航空发动机机械结构健康监测与评估技术的发展趋势。

1 航空发动机健康状态监测需求分析

1.1 提升发动机执行任务完成率的需求

1.1.1 提升发动机性能衰减和故障可控性

现代空战以夺取制空权为目标,在执行此类任务过程中,往往处于复杂的战场局势之中,飞机和飞行员都面临着巨大的考验,飞行员则要时刻保持极高的专注力在格斗中,将对于装备的注意力抽离出来,这就需要飞机时刻保持稳定可控的状态以应对瞬息万变的情况^[8]。因此,发动机的性能状态是影响任务完成情况的重要因素。由技术人员和地面维护人员时刻掌握发动机的健康状况,是保证发动机能够正常使用的重要手段。

实现发动机故障的可控,最终要预测故障发生的时机,提高任务成功率。利用先进技术感知发动机健康状况,对于在何时会发生何种等级的故障都能够做到把控有度,就能够真正提高发动机的健康管理水平。即使在执行任务中,出现故障征兆,也能够最大程度地保证任务完成。

1.1.2 降低发动机故障风险

航空发动机作为飞机的动力组成部分,给飞机提供最根本的飞行推力和系统的液压及电力,是保证正常飞行不可缺少的部分。一旦发动机出现故障,战机失去动力,必将导致任务失败,严重时飞行员的生命安全都无法保证。而发动机组成复杂,集成度高,工作环境极其恶劣,高温、高压、高转速等问题造成了发动机故障频发、故障起因复杂的现状。因此,重点关注航空发动机的健康状况是提升任务完成率的重要手段^[9]。

预测故障的能力,是化解或降低故障风险的保证。时间越早,预测精度越高,越能够将飞行的风险降至最低,飞行员可以通过降级使用、提前返航等规避动作以避免更大的事故发生,最大程度保证飞行安全。

1.1.3 提升应对紧急情况的能力

和平时期的武器装备维修工作是使其保持高的战备完好率。《装备综合保障通用要求》(GJB 3872A—2022)中对装备综合保障系统提出要对影响系统战备完好性关键因素的分析和改进等要求,从使用可用度、能执行任务率、出动架次率等方面对飞行器的战备完好性进行评价^[10]。发动机的结构故障,会直接导致飞机无法起飞,对其战备完好性会直接产生影响。

在装备健康状况可控的情况下,准确评估其各子系统的健康状况,可以减少甚至消除不必要的维修,减少装备不可用的几率,提高装备完好性。在故障定位准确的情况下,可以对故障部位或即将产生故障的部位进行直接检查和维修,省去了全面检查耗费的时间,缩短维修时间。通过以上两点,基本能够做到随时保证装备在性能良好,无结构故障征兆,才能够达到使用要求。

1.2 降低航空发动机全寿命周期费效比的需求

1.2.1 减少保障设备和人力需求,降低维护费用

航空发动机在日常检查和试验中所需的保障设备,排除故障时所需要的检查设备,在进行保障和检查的技术人员,都会增加维护开支。通过先进的技术评估装备的健康状况,能够大量削减随机配置的地面保障设备提高装备的机动性。

联合攻击机(JSF/F-35)项目提出了健康管理主导的思想,该方法能够实现装备在全寿命周期内的费用降低、效率提高,而且该系统还是先进的装备管理系统,如自主后勤全球保障系统(autonomic logistics global sustainment, ALGS)等中的核心组件,将个体装备的健康管理纳入全球性的管理网络,能够以最少的人力,更加少的保障设备,进行全球范围内的全面、快速的保障和维护^[11-12]。

1.2.2 减少不必要的维修和备件,降低费效比

通过故障定位和预测实现零件的健康状态评估,开展零件寿命管理与计划更换、零件后勤保障、简化供应链等工作^[12]。采用科学的评估与管理方法使得现场检查与检测、隔离故障和更换维修的时间缩短,进一步促进维护人员和测试设备需求简化,有效降低了费效比^[11]。

准确的故障定位可以减少维护时间,减少装备不可用的几率,提高装备利用率,在降低费效比的要求下,通过PHM系统的介入,可以从降低费用和提

高效率两个方面同时对费效比进行减少^[13]。

2 发动机健康状态监测国内外研究现状

随着监控及测试技术发展,国外出现了飞机健康管理系统(aircraft health monitoring, AHM)、健康与使用监测系统(helicopter health and usage monitoring system, HUMS)、综合载运工具健康管理(integrated vehicle health management, IVHM)、预测与健康管理系统(prognostics health management, PHM)等,对健康管理技术提出更高层次要求^[14-18]。此外,欧盟最新实施新维修概念的技术与工艺(technologies and techniques for new maintenance concepts, TATEM),通过状态监控和故障诊断等,提供与飞机故障相关的状态^[19]。美国从上世纪90年代起实施综合高性能涡轮发动机技术(integrated high performance turbine engine technology, IHPTET)计划^[20]、多用途经济可承受的先进涡轮发动机(versatile affordable advanced turbine engine, VAATE)计划^[21]、综合系统健康管理(integrated system health management, ISHM)计划等, IHPTET与VAATE提出降低发动机制造与维护费用的目标与具有革命性的智能发动机概念, ISHM计划的先进性体现在联合攻击机JSF使用的PHM系统中^[22-23]。

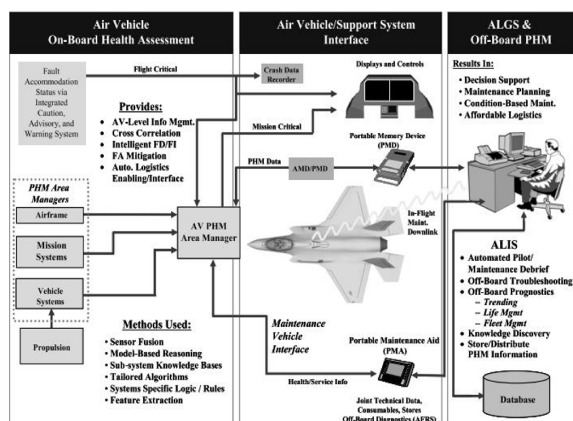
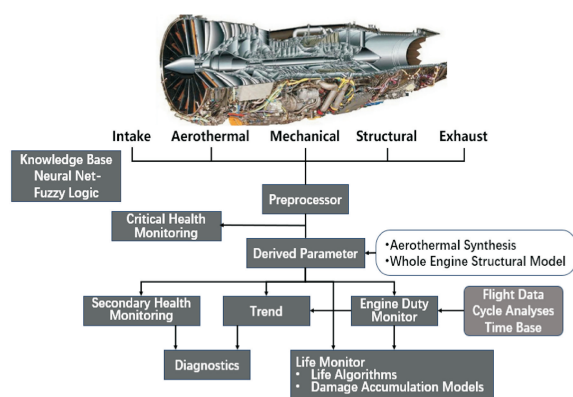
2000年,美国国防部将PHM技术列入《军用关键技术》,确立PHM技术在实现美军武器装备战备完好性和经济可承受性方面的重要地位, PHM系统和联合分布式信息系统(joint information distribution system, JIDS)已成为自主后勤系统(autonomic logistics system, ALS)的重要基础^[3]。目前PHM技术已广泛应用于美、英等国家的直升机领域,并具体演变为状态使用监控系统(health and usage monitoring system, HUMS)^[24]技术。据美国陆军航空与导弹司令部透露,装备了基于状态维修系统设备的飞行大队,其执行任务率提高5%,同时飞行小时数增加一倍,并且这些技术已经装备了20%的陆军航空部队,其中已经装备的有阿帕奇A和D型号、支奴干D和F型号以及黑鹰A、L和M型号等,并且装备范围在逐步扩大^[25]。

美国相关机构也开展与PHM/HUMS类似的技术项目,空军提出的综合系统健康管理系统方案,海军的综合状态评估系统和预测增强诊断系统,陆军的诊断改进计划、嵌入式诊断和预测同步计划等都

在研究和应用^[3]。

图1为美国JSF项目的装备PHM系统,其目标是从传统的“计划性维修”和“事后维修”转变为“视情维修”,是实现保障性和生存性、经济承受性目标的关键,该技术不仅能实现机上故障诊断测试,还可预测、评估故障影响,实现自主式保障^[26]。该技术使保障装备减少50%,维护人员减少20%~40%,架次生成率增加25%;F-35的PHM系统是一个封层、分布式的智能系统,其架构可以分为机载层面、地面层面、企业层面;机载层面为安装于飞机上的“感官神经”,包括遍布机身的传感器网络(用于监视发动机、升力风扇、传动系统健康状态的振动传感器,用于监视燃油、液压、环控、润滑系统的温度/压力传感器,用于监视机翼、机身等结构疲劳和损伤的应变计,用于监视润滑油中的金属碎屑、判断发动机和传动部件磨损的碎屑传感器,用于监视航电系统和电力系统性能的电流/电压传感器)、区域管理器(负责收集各个区域内所有传感器的原始数据,并进行初步的数据处理和特征提取,减轻中央处理器的负担)、飞机管理器(接受所有来自于区域管理器的预处理数据,运行更复杂的诊断和预测算法);地面层面是PHM系统的“高级大脑”和“决策中心”,位于后勤保障基地,主要包括自主后勤信息系统(autonomic logistics information system, ALIS)、作战信息系统(operational data integrated network, ODIN)和地面站PHM服务器(拥有整个F-35机队的海量数据,服务器可进行更深层次的分析,包括机队级分析、更复杂的预测模型、生成维修计划);企业层面为最高层级,涉及制造商和各级供应商,主要负责数据回传与分析,用于改进下一代产品的设计,并为现有机队发布服务通告和软件升级,持续优化PHM算法。PHM系统的工作流程包括机上实时监控、数据记录与预处理、着陆后自动下载、地面深度分析与决策、反馈与学习等。

F-135发动机的故障预测和健康管理系统是F-35飞机PHM的组成部分,是该系统中最成熟、最关键的子系统之一,该系统集成了微粒监控(engine data management system, EDMS)、涡流叶片监控(eddy current blade screening, ECBS)、吸入碎片监控(ingested debris monitoring system, IDMS)、滑油微粒监控(oil debris monitoring, ODM)等,能实现飞行中自动探测发动机故障、调整发动机工作状态,图2为发动机健康监视系统功能结构图^[27]。

图1 F-35 PHM 系统设计图^[26]Fig. 1 F-35 PHM system design diagram^[26]图2 发动机健康监视系统功能结构图^[27]Fig. 2 Engine health monitoring system functions^[27]

发动机故障预测和健康管理系统功能主要包括振动监视、性能参数监视、滑油系统监视、寿命消耗监视、发动机诊断系统等。振动参数监视通过分析振动的幅度和频率特征,可以精确判断转子是否失衡、轴承是否磨损、叶片是否出现裂纹或外伤。性能参数监视包括转速、温度、燃油流量、可调几何作动器位置等,系统通过比较这些参数的实测值与发动机模型的预期值,来评估性能的衰退。滑油系统监视包括监视滑油油量/压力/温度装置、金属屑末监视器等。寿命消耗监视会记录发动机在不同载荷下的工作时间,特别是高应力状态下的循环次数,然后换算至关键热端部件的“低周疲劳”寿命消耗情况,预测其剩余寿命。发动机诊断系统是发动机故障预测和健康管理系统“的大脑”,集成于飞机管理器中,其综合所有传感器数据,运用基于模型的推理或数据驱动算法进行故障检测、故障隔离与故障预测。同时通过 F-35 战斗机机载的多功能数据链 (multi-function advanced data link, MADL) 将数据实时传递到基地,在飞机着陆前完成部件更换准备^[27-29]。

GE 公司从 1967 年开始研发黑鹰 (UH-60) 直升机的涡轴发动机状态监视系统,用于对发动机性能、燃滑油系统监视,通过发动机历史记录仪对超限事件记录,并增加低周期疲劳 (LCF) 计数^[30];该公司还研制了 A7E 攻击机的 TF41-A-2 发动机的机载状态监视系统 (integrated engine condition monitoring system, IECMS), IECMS 随后成功应用于 F/A-18 的 F404-GE-400 发动机,该系统的集成性使得成本和质量最小,当飞行出现严重异常情况时系统会警告飞行员,该系统降低了发动机事故率,减少发动机维护成本^[18,31-32]。

从 1970 年起, P&W 公司开发了 ECM1 到 TEAM3 的多种状态监视和故障诊断系统,从有限逐渐完善到扩展发动机监视系统,成功应用于 JT9D 等发动机^[18]。P&W 与 McDonnell 公司联合开发了 F100-PW-100 涡扇发动机的发动机诊断系统 (engine diagnostic system, EDS), 用于 F-15 的发动机机载监视与故障诊断;1982 年开始开发 F100-PW-200 发动机的 CMS 系统,1987 年该系统实现与飞机综合和后勤数据库兼容^[33-34]。F119-PW-100 发动机的状态监控系统实现了机载性能、振动、油液和寿命监视的功能,并可结合分析软件,全面实现发动机状态监控。1994 年,罗罗公司为 T-45A 飞机配装的 F405-RR-401 Adour 涡扇发动机制定了提高耐久性计划,对其基本的性能参数特征进行监视,这是 EHM 系统的发展初期。具有代表性的发动机监视系统见表 1。

国内关于发动机健康管理技术的研究起步较晚,范作民等^[35]提出了主因子模型,采用主因子方程进行故障诊断,并对故障相关性准则及合理性准则对诊断结果进行优化。张津^[36]开发了基于主因子模型方法的 EMD 软件,对 JT9D-7R4 发动机上已有的 35 个故障样本进行诊断,诊断正确率达到 75%。钟诗胜等^[37]基于发动机台架试验数据,通过多项式拟合法建立基线方程,实现了发动机状态监测。宋云雪等^[38]根据发动机排气温度与气路参数的回归方程对排气温度的变化趋势进行了预测。李永平等^[39]通过对机队的发动机性能参数的大小对发动机的健康状态进行排队分析,并提出对性能差的发动机进行重点监控。WANG 等^[40]通过灰色聚类 and 层次分析法,对影响发动机性能状态的多因素进行综合分析,并对发动机的健康状态进行了综合评估。王帅等^[41]通过层次分析法,从发动机机队飞行数据、试车数据、大修后循环数等方面进行分析,

采用层次分析法对机队的发动机进行健康评估排队。WANG 等^[42]从信息融合的角度出发,对多个发

动机性能参数进行融合,实现对发动机的健康状态进行综合评估。

表 1 国外典型发动机状态监视和故障诊断系统

Tab. 1 Foreign typical engine condition monitoring and fault diagnosis systems

系统代号	系统名称	诊断水平	适用发动机型号	年代
ECM I	发动机状态监视 I	发动机	JT3D/JT8D	1970
ECM II	发动机状态监视 II	发动机	JT3D/JT8D/JT9D/PW4000	1982
ADEPT	飞机数据工程性能趋势	发动机	CF6-50/CF6-80/CFM56	1985
TEAM I	涡轮发动机 AIDS 监视 I	单元体	JT3D/JT8D/JT9D	1977
TEAM II	涡轮发动机 AIDS 监视 II	单元体	JT3D/JT8D/JT9D/PW4000	1983
IECMS	发动机空中状态监视	单元体	TF41	1979
EDS	发动机诊断系统	单元体	F100	1980
FEMS	疲劳和发动机状态监视	单元体	F110/F404	1986
GEM	地面发动机监视	单元体	CFM56/TAY/CF6	1987
COMPASS	状态监视和性能分析软件系统	单元体	V2500/RB211/TAY	1987
TEMS	涡轮发动机监视系统	单元体	TF34	1987
ACMS	机载飞机状态监视系统	单元体	PW4000	1987
EMD	发动机监视与诊断	单元体	JT9D/CF6/CFM56	1992

通过文献分析发现,国内外航空发动机结构健康监测系统存在较大的差距,这种差距是系统性的、多方面的,可以归结为技术积累、工程应用、产业链等方面。技术积累层面是最根本的差距,主要包括高性能传感器技术和模型算法,国外在专用测试传感器,尤其是耐高温传感器领域长期研发投入,传感器在精度、可靠性和耐久性等方面都经历了数十年迭代验证;而国内在高性能、高可靠性专用传感器方面仍有较大差距,特别是在材料、封装工艺、可靠性上存在短板,往往依赖进口或处于实验室样机阶段。在模型算法方面,国外拥有基于海量真实数据的高保真物理模型(如压气机/涡轮气动模型、转子动力学模型、疲劳损伤模型等),其健康管理算法是“模型驱动”与“数据驱动”的深度结合;而国内在模型精度和数据积累上存在明显差距,由于长期缺乏足够多的、完整的发动机全寿命周期数据来验模和修模,物理模型的准确性受限,目前的研究更多是“数据驱动”的算法,在工程上难以用于高可靠性的飞行决策。在工程应用层面,国外在系统集成与验证能力方面拥有完整的体系,而国内将所有这些技术集成为高可靠性、高安全性的系统级产品的经验不足;国外在适航取证与标准制定、流程、方法等方面具有主导权,并有能力用充分的验证数据向局方证明其结构健康管理系统的安全性和有效性,而国内在适

航取证方面是学习者,需要摸索如何构建符合适航要求的验证体系,积累经验与验证数据。在产业链层面,国外拥有成熟的供应链、软件与工具链,从特种金属材料、芯片、专用软件(商用 CAE、专用 PHM 设计软件等)等都有稳定、高质量的供应商,而国内在这些领域仍存在较大差距。国内外发动机结构健康监测状态监测系统是“体系性”的差距,需要长期稳定的投入、真实环境的迭代、全产业链的协同与人才队伍建设。

3 发动机结构健康状态监测先进传感技术

发动机结构健康状态监测的本质是从感知到认知,再到决策的闭环过程,而传感技术为闭环的起点。传感技术是结构健康状态监测的数据源头,传感技术的类型、可靠性与精度等对监测能力具有重要影响;同时,发动机结构健康状态监测需求驱动传感技术的持续发展,包括结构健康从诊断到预测的需求、新监测对象的需求。传感技术是保障安全、提升效率、实现智能化运维的基础,是航空发动机的“感官神经”。

传感技术发展始于 20 世纪初,早期以机械式和电气式传感器为主,应用于工业控制和军事领域。

随着电子技术和计算机技术的发展,出现了半导体、光纤等先进传感技术,并向着智能化、微型化、集成化和网络化方向发展^[43]。先进传感技术在发动机健康状态监测中的优势包括实时监测的能力、多参数同步测量的能力、抗干扰和稳定的能力以及支持预测性维护的能力等。

3.1 应变监测传感技术

应变监测技术用于结构健康监测系统能够实现结构的力学特性的测量^[44]。应变电测法作为实验力学的重要组成部分经历长期发展,已广泛用于各种结构的应力分析,并推广于各领域^[45]。而随着结构损伤和事故情况多发,应变测量技术被引入结构健康监测系统^[46]。

电阻应变片和光纤光栅为机械结构中常用的应变监测传感技术,应变片由具有应变效应的导体或半导体敏感栅元件夹在两层绝缘基底构成,应变计测量原理是将被测物体的压缩与拉伸变形转化为栅丝变化引起的电信号变化,实现对被测结构的形变监测^[47]。而随着航空发动机性能提升,发动机许多典型部件的工作温度都远超常温,由热应力引起的损坏或失效问题突出,长期工作在高温环境中,结构强度、寿命及可靠性会直接影响其安全性,因此基于高温应变测量的发动机典型部件健康状态监测就显得尤为重要^[48]。

F-35 飞机在行过程中,对其关键承力部件等重要承力部件改装电阻应变,进行了飞行实测^[49]。开展了基于发动机转子叶片接触式应变测量的外物撞击试验研究,形成了基于统计分布、外物损伤试验和冲击数值模拟的外物损伤容限概率设计准则、外物损伤预防军用标准 MIL-STD-980^[50]。

房剑锋^[51]采用基于机匣应变测量的方法对发动机结构健康状态进行实时监测,实现了转子碰磨故障的识别。陶冶等^[52]在发动机转子叶片上改装应变传感器,通过应变测量与时频分析实现外物撞击发动机转子叶片实时监测。图3为其所建立的基于叶片表面应变测量的发动机外物撞击监测识别系统。

许艳芝等^[53]在发动机喷管单元的关键承力部件改装高温应变传感器,实现了喷管结构单元的健康状态监测与机构完整性考核,图4为发动机试验过程中高温拉杆载荷的历程曲线。

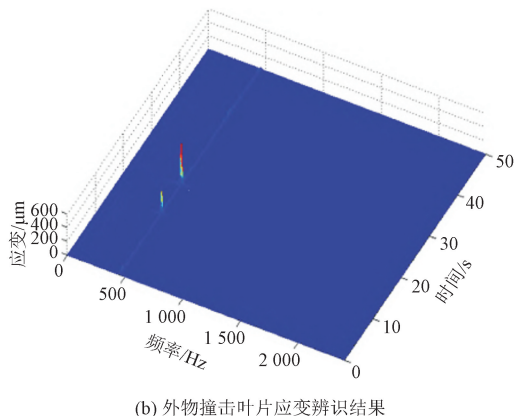
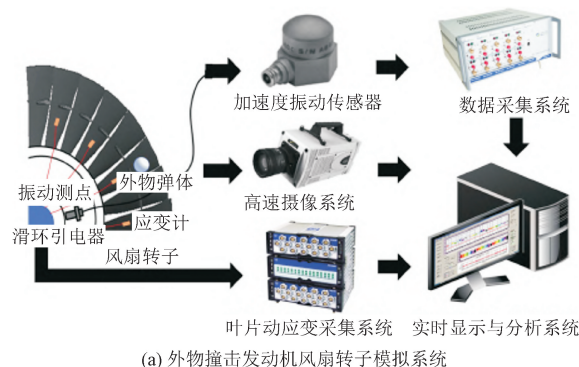


图3 基于叶片表面应变测量的发动机外物撞击监测系统^[52]

Fig. 3 Aero-engine foreign object impact monitoring system based on blade surface strain measurement^[52]

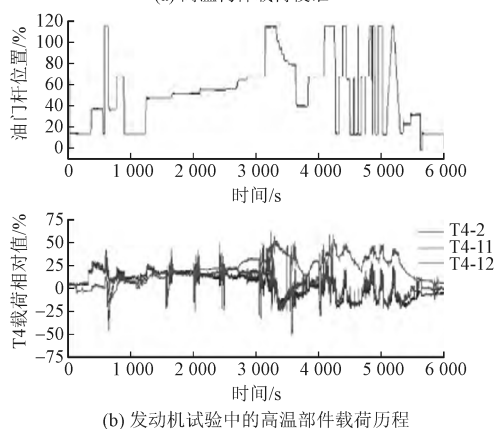


图4 基于高温应变电测的发动机高温部件载荷测量^[53]

Fig. 4 Load measurement of engine high temperature components based on high temperature strain measurement^[53]

3.2 光纤传感技术

光纤光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器基于中心波长与振动、温度、应变等的关系,采用波长编码调制解调技术,实现对动、温度、应变的准分布式测量,具有可靠性高、适应环境能力强、质量轻、抗干扰能力强、易于改装、多测点感结结合等特点,图5为光纤光栅透射特性示意图^[54]。光纤光栅温度传感器、光纤光栅应变传感器、光纤光栅加速度传感器等在结构健康监测专业技术领域已经得到了广泛的应用^[55-56]。

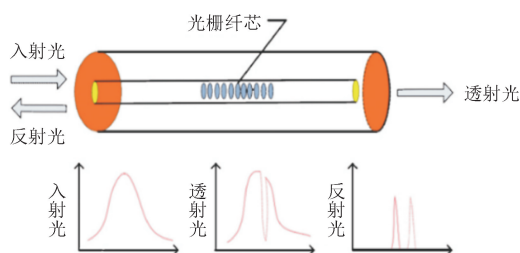


图5 光纤光栅透射特性示意图^[54]

Fig. 5 Transmission characteristics of fiber grating^[54]

1978年,加拿大通信研究中心基于光纤纤芯的光敏感性的基本原理,采用增加光辐射时间的方法在光纤纤芯制成光纤光栅^[57]。1998年,NASA为了在X-33航天器的燃料储存箱结构上实现健康状态监测,在其表面改装了基于FBG传感器的多点温度和应变测量系统(图6)^[58]。2010年,NASA在某新型无人机机翼表面改装了分布式光纤传感器,实现了机翼表面分布式应变的变化规律,且对飞机性能无影响。为了对叶片疲劳试验过程的结构状态进行监测,在叶片表面构建高分辨率的分布式光纤传感器,成功预测了疲劳裂纹的出现及变化特征^[59]。



图6 X-33飞行器光纤传感器分布

Fig. 6 X-33 aircraft optical fiber sensor distribution

袁紫衣^[60]采用基于分布式光纤传感技术对发动机压力管路的健康状态进行监测,实现了管路裂纹的检测识别。邹东伯^[61]开展了分布式光纤振动传感技术研究,建立了光纤振动传感数据采集交互界面、数据存储以及算法处理分析模块,实现了光纤振动信号的处理分析算法验证。陈晓梅等^[62]在飞

机关键部位改装光栅应变、温度及加速度传感器,并开展了飞行实测,验证其满足结构健康状态监测要求。张承等^[63]研制了光纤振动传感器,在航空发动机叶片振动测量试验中进行了验证。李恒春^[64]建立了基于高温光纤光栅传感器的高温涡轮叶片变形测量系统,能够实现高温涡轮叶片结构健康状态监测(图7)。

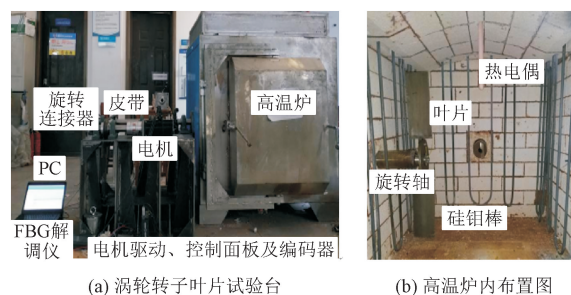


图7 基于光纤传感器的高温涡轮叶片变形测量系统^[64]

Fig. 7 High temperature turbine blade deformation measurement system based on optical fiber sensor^[64]

3.3 MEMS 传感技术

航空发动机零部件繁多,为实现其健康状态监测,就需在许多附件及本机位置处安装众多传感器,由于常用传感器质量重、体积大以及测试参数单一等,很难安装于理想位置^[65]。采用基于MEMS(micro-electro-mechanical system)原理的微型传感器,具有集成度高、多参数测量、易改装、体积小、质量轻等特点,对发动机结构本身特性影响小,且不受空间限制^[66]。将该技术用于航空发动机,可以更好地实现对发动机典型部件的损伤进行监测,达到航空发动机健康状态监测智能化的目的^[67]。MEMS是随半导体集成电路加工和超精密机械加工技术发展起来的,是集微机械与电子功能于一体的微型机系统,其构成要素包括集成电路、微传感器与电源等^[68]。加速度计是MEMS技术在工业领域的成功案例,应用于汽车安全气囊、防抱死系统等^[69]。

在航空发动机领域应用中,用MEMS技术研制用于航空发动机的新型传感器和驱动器^[70],应用领域主要包括典型结构部件健康状态监测、流动与燃烧过程控制、滑油系统健康状态监测等^[71-73]。为了获取关键结构部件的损伤信息,对航空发动机典型结构部件进行健康状态监测,可实现趋势与故障预测,提升发动机可靠性与安全性、优化发动机维修决策^[74]。

通过MEMS振动传感器、应变传感器、温度传感

器、加速度计等对发动机结构表面裂纹、应变、温度等参数的测量,可分析发动机结构的状态情况,构建结构的故障诊断与预测模型,进而实现结构的健康状态监测^[75]。SADLER 等^[76]研制了如图 8 所示的微型电涡流传感器,能够实现构件表面细微裂纹的监测。AZEVEDO 等^[77]采用硅基底的 SiC 材料刻蚀,研制基于应变监测的 MEMS 传感器,通过齿结构响应频率的测量获取被监测部件的应变量,可在 0~300 °C 温度范围对发动机冷端结构部件的健康状态进行监测。

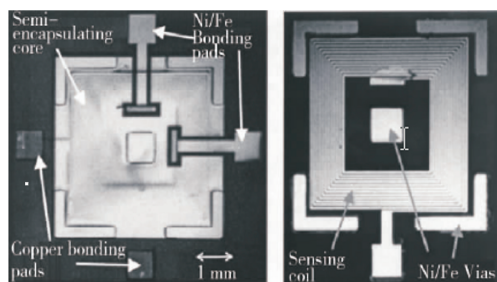


图 8 用于监测构件裂纹的电涡流传感器^[76]

Fig. 8 Eddy current sensor for monitoring component crack^[76]

为解决发动机内部参数测量数量大及引线难的问题,可以结合 MEMS 传感器与无线数据传输技术,通过布置更多传感器来获得更加全面的监测数据,实现航空发动机结构损伤监测的无线传感器监测网络系统,进而准确预测发动机结构件的健康状况^[78-79]。图 9 为 HUDAK 等^[80]采用薄膜传感器监测叶片疲劳损伤,最后将信号利用无线传输方式传输至输出端。

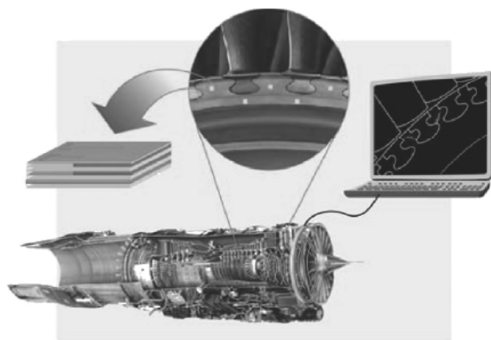


图 9 基于薄膜式无线传感器的发动机疲劳损伤监测系统^[80]

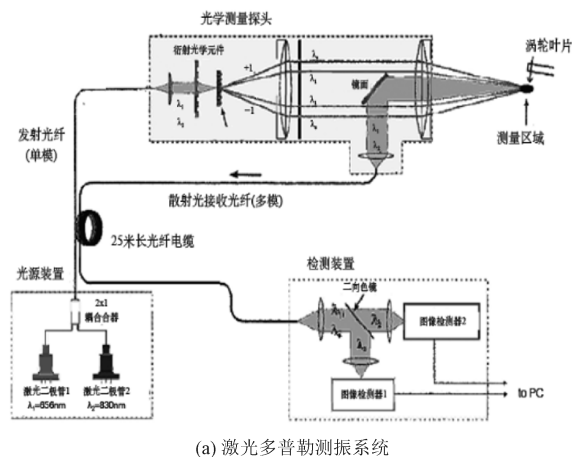
Fig. 9 Engine fatigue damage monitoring system based on thin film wireless sensor^[80]

3.4 非接触式振动监测传感技术

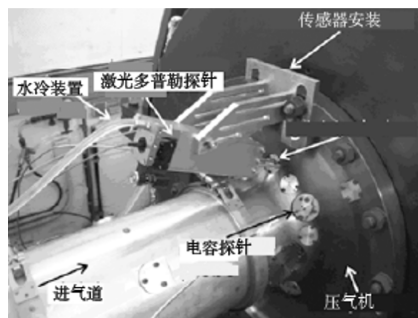
随着发动机叶片材料与制造工艺的提升,其结构与气动性能亦随之提升,但叶片疲劳损伤、断裂事故仍高发,对转子叶片叶尖振动实时测量可监测

其健康状态,支撑发动机安全运行^[81]。相较于传统测振方法而言,非接触式测振方法具有很大的优势,叶尖定时方法是目前国内外研究的热点领域,其他的叶片非接触振动测量方法还有间断相位法、激光多普勒等多种方法^[82]。

20 世纪 60 年代有学者提出基于激光多普勒原理的高速旋转叶片振动测量方法,利用传感器测量从叶尖表面散射回光的多普勒频移来重构叶片振动信息^[83]。2008 年,MOREAU 等^[84]采用光纤激光多普勒位移传感器测量涡轮叶尖间隙和振动,图 10 (a) 为激光多普勒测振系统,在转子速度与叶片频率分别为 586 m/s 和 21.7 kHz 时进行振动和间隙测量,所测结果与电容传感器相符,与传统探针测量结果相比具有相对更优的精度与不确定度,并在压气机试验台上进行了验证(图 10b)。



(a) 激光多普勒测振系统



(b) 激光多普勒测试系统测量发动机转子叶尖振动

图 10 基于激光多普勒原理的发动机转子叶尖振动测量^[84]

Fig. 10 Vibration measurement of engine rotor tip based on laser Doppler principle^[84]

国外在 20 世纪 60 年代开始对叶尖定时方法的研究,美国空军阿诺德工程研发中心(AEDC)根据其非介入的测量特性,称其为非介入式应力测量系统(NSMS),德国 MIU 公司将其称为非接触叶片振动测量系统(BSSM)^[82]。叶尖定时测量是对叶片的端部相对位移进行间断测量的一种方法,该系统可

采用涡流、电容、光学和微波等几种不同原理的传感器^[85-86]。

图 11 为美国 HOOD 技术公司研制的非接触叶尖振动监测系统构成示意图^[87],叶片测振系统一般采用涡流传感器和光学传感器两种,光纤传感器最高可耐 1 100 ℃ 高温。

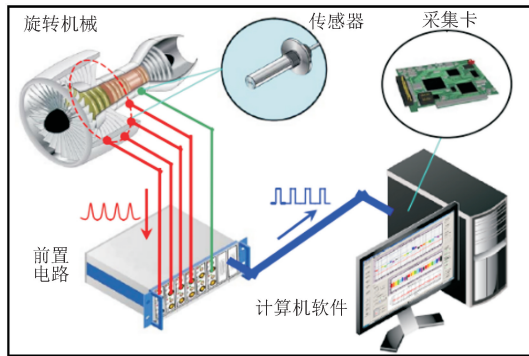


图 11 HOOD 技术公司非接触叶尖振动监测系统图^[87]

Fig. 11 Non-contact blade tip vibration monitoring system diagram of HOOD Technology Company^[87]

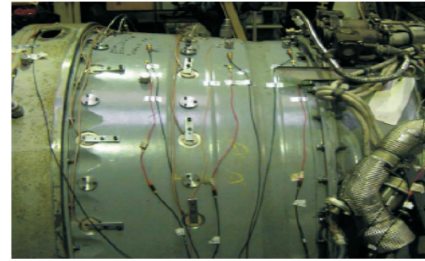
表 2 为该公司参与的发动机及试车台测试项目,测试内容主要包括转子叶片高/低周疲劳、裂纹、振动、外来物损伤等健康状态监测^[87]。

表 2 Hood Technology 参与的主要发动机及试车台测试项目^[87]

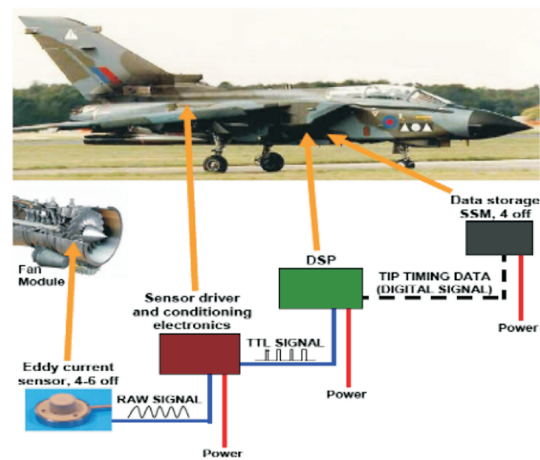
Tab. 2 The main engine and test bench test projects participated by Hood Technology^[87]

发动机型号	试验测试内容	传感器类型
PW-F100	NAVAIR, FOD 外来物损伤, 叶片共振	电容/光学
TF-39 Fan	NAVAIR, 低周疲劳测量	电容
Various rotors	高周疲劳激励及旋转测试	电容/涡流/光学
F110 Fan	NAVAIR, 低周疲劳	电容
FJ-22 Fan	Williams International	涡流
F405-RR-401	RR/NAVAIR, 减小喘振, 监测 LPC 和 HPC	涡流/电容
F-110 turbine	NAVAIR, 低周疲劳 LCF, 高温 650℃	电容/涡流/光学
TF41	NAVAIR, FAA, LCF 低周疲劳	涡流/电容
EJ22, FJ33, FJ44	高周疲劳, 压气机振动监测	光学
Spin pits	DARPA, GE, PW, 低周疲劳裂纹监测	涡流/光学
SSME	高周疲劳振动监测	涡流
XTE77/SE	ONR, GE, 高周疲劳监测	光学
FJ44	NAVAIR, 高压涡轮长期健康状态监测	涡流/光学
RR F136	NAVAIR, RR, 高周疲劳振动监测	涡流/光学

近年来,学者们提出了基于发动机转子叶片叶尖定时原理的非接触叶尖振动测量方法,美国在 F100-PW-100 发动机已应用基于非接触叶尖振动测量的外物撞击监测识别系统,并将其功能集成到发动机健康监测系统 (PHM) 中,对发动机健康状态进行实时监测^[88]。为实时监测外物撞击对发动机转子叶片健康状态造成的损伤,降低发动机在寿命周期内的维护费用,防止潜在部件失效和寿命折损,英国国防公司 QinetiQ 于 2008 年在斯贝 RB168-101 发动机上开展了大量的基于非接触叶尖振动测量系统的外物撞击试验,并于 2010 年在如图 12 所示的一台装有的 RB199 发动机的 Tornado F3 飞机上开展了外物撞击飞行验证试验^[89-90]。



(a) RB168 发动机风扇机匣布置的电涡流传感器



(b) Tornado F3-RB199 外物撞击监测系统飞行原理图

图 12 发动机外物撞击监测系统可靠性飞行试验^[89]

Fig. 12 Reliability flight test schematic diagram of aero-engine foreign object impact monitoring system^[89]

国内学者基于叶尖定时原理开展转子叶片非接触振动测量设备研制及数据处理方法研究,并将其应用于发动机转子状态监测与故障诊断。学者们建立了叶尖定时测振系统模型,提出了叶片振动多传感器参数辨识方法,并通过试验验证叶尖振动算法的可行性与有效性^[91-92]。刘美茹等^[93-94]采用基于叶尖定时原理的转子非接触振动测量方法完成了叶

片裂纹故障识别、涡轮叶片振动监测。户东方等^[95]采用基于叶尖定时方法开展了涡轮叶片动应力场的重构,实现了叶盘叶片寿命预测与健康状态监测。图 13 为所建立的数字孪生驱动的涡轮叶盘寿命预测及健康管理框架^[95]。

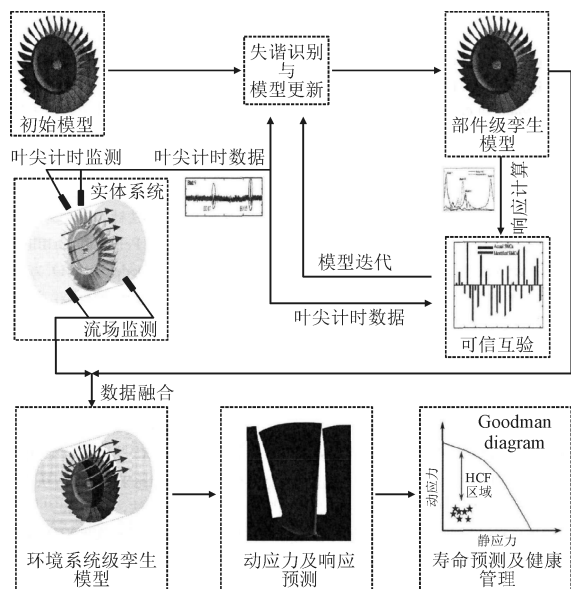


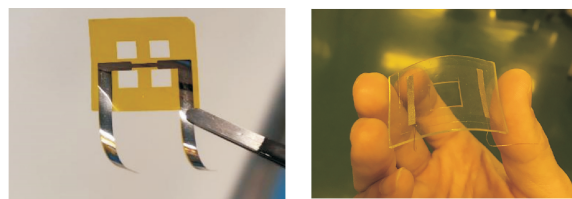
图 13 基于非接触振动的涡轮叶盘寿命预测及健康管理^[95]

Fig. 13 Life prediction and health management of turbine blade disk based on non-contact vibration^[95]

3.5 柔性传感技术

柔性传感器是一种能够在一定范围内感知并测量外界某种物理量或化学量的装置,其可在不影响被测对象的情况下实现对目标的检测和监测。与传统的刚性传感器相比,柔性传感器具有柔韧性好、可弯曲、可折叠、质量轻、易于集成等优点,能够适应各种复杂的环境和形状。柔性振动传感器是一种可以测量振动或形变的传感器,通常由柔软、可弯曲的材料制成,可以贴合在各种不规则表面上,具有良好的适应性和可靠性。柔性振动传感器的优点包括柔韧性好、质量轻、成本低、易于集成等,为各种应用提供了更加可靠和精确的测量手段^[96]。

柔性振动传感器的基本原理是将振动或形变转换为电信号。图 14 为柔性振动传感器实物图,以及柔性振动传感器应用于航空发动机典型部件结构参数的测量,该柔性振动传感器通过共形贴敷在转子轴、叶片等典型结构表面,通过实时感知部件的振动、应力等参数变化来实现典型部件的健康状态监测。



(a) 柔性振动传感器实物



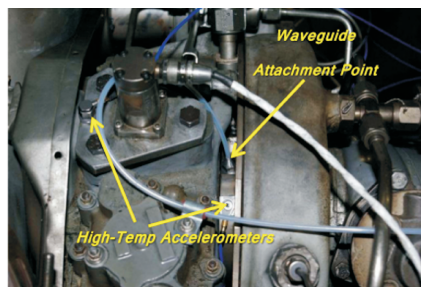
(b) 发动机部件结构参数共形贴敷测量

图 14 柔性振动传感器在发动机健康状态监测中的应用

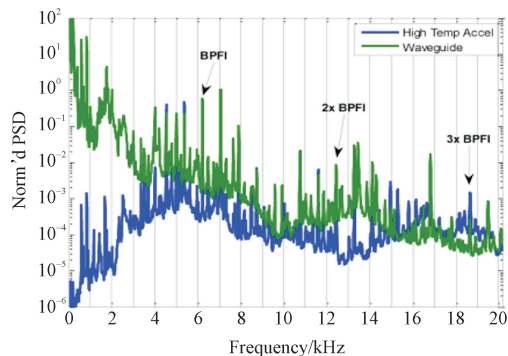
Fig. 14 Application of flexible vibration sensor in aero-engine health monitoring

3.6 其他先进传感技术

机械波导方法已被证明可用于发动机主轴轴承的健康状态监测,LARSEN 等^[97]在 T63 发动机上改装波导和高温振动加速度传感器,并对发动机轴承缺陷所产生的信号进行测量与对比分析,验证机械波导传感器的测量能力(图 15)。



(a) T63 发动机波导和高温振动加速度传感器



(b) 发动机轴承内圈缺陷传感器频谱

图 15 基于机械波导法的发动机轴承缺陷测量与诊断^[97]

Fig. 15 Measurement and diagnosis of engine bearing defects based on mechanical waveguide method^[97]

英国的 BAE 研究中心开发了一种基于雷达信号采集的发动机健康监测系统(EHDUR),其可以检

测并将异物碎片分为损伤性和非损伤性,并且可以直接测量单个叶片的振动,从而提供叶片出现问题的早期警示^[98]。通过 EHDUR 发动机健康监测系统,在斯贝 101 发动机上开展了外来物损伤及转子叶片健康状态监测试验,该系统能够检测出所有损伤性外来物撞击事件,并能正确分类 82% 的外来物,图 16 为试验装置及 EHDUR 系统检测与分析结果^[99]。

刘建勋等^[100]针对航空发动机叶片疲劳断裂问题,提出用 X 射线衍射分析方法对发动机压气机叶片进行残余应力测试,分析叶片表面不同部位残余应力随工作寿命和损伤的变化规律,实现了叶片结构健康状态监测。

通过分析总结,得到如表 3 所示的不同先进传感技术的对比,根据不同技术的应用成熟度,通过该表格能够快速确定适用于发动机不同部件结构参数测量的传感器类型。

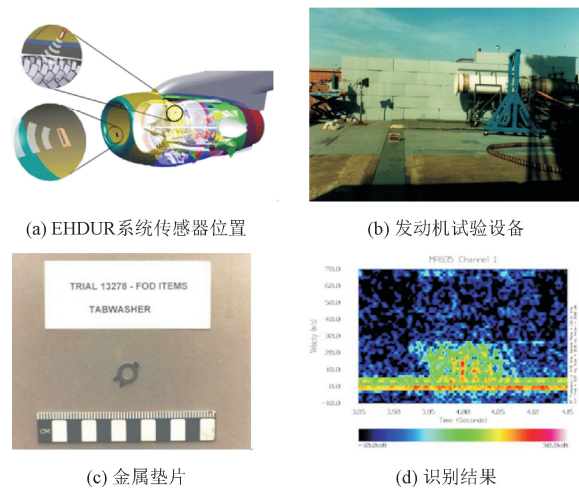
表 3 不同先进传感技术对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of different advanced sensing technologies

传感器类型	核心测量参数	典型适用部件	优势	局限性	技术成熟度
应变计	静/动应变(应力、载荷)	发动机挂架、支板、转子盘轴及叶片等	技术成熟,价格低廉;精度高,频率响应好;安装相对简单,种类繁多	点式测量,监测范围有限;需要粘贴/焊接,安装工艺影响大;易受干扰,信号衰减;耐久性差	高,是载荷谱测量和疲劳寿命监测标准。
光纤传感器(以 FBG 为例)	应变、温度、振动	复合材料结构、高温区域、机匣等结构的分布式监测	抗干扰,安全;绝对测量,无需重复标定;可实现准分布式测量;耐腐蚀,寿命长;适用于极端环境	系统成本高;数据处理复杂;动态响应性能不如压电传感器;安装、熔接需专业技能	高(复合材料监测);中(热端部件监测)
MEMS 传感器	振动(加速度)、角速度、倾角	轴承、齿轮、机匣、支板等、以及需要大量布设传感器区域	体积小、质量轻、功耗低;成本低,易于大规模部署;集成度高;可靠性高,抗过载能力强	精度和灵敏度通常低于传统高精度传感器;工作温度范围相对较窄;高频特性差	高(低临界振动监测);中(主承力结构监测)
非接触振动传感器(激光测振)	振动速度/位移	旋转部件(发动机转子叶片、齿轮)、高温部件、轻质结构	不改变被测物体质量,无附加影响;高空间分辨率,可全场扫描;适用恶劣环境下;测量频率范围极宽	价格极其昂贵;需要光路通达,在封闭结构内使用困难;对表面反射率和环境扰动敏感	中(机载系统);高(地面试验设备)
柔性传感器	大曲率表面的应变、压力、温度	机匣、轴等大曲率结构表面、管路等轻质结构化、复杂表面	可贴合复杂曲面,不影响气动外形;自身柔韧,不易损坏;可实现大面积、分布式感知	成熟度低,用于前沿研究长期稳定性和可靠性有待验证;信号输出可能受弯曲变形本身的影响;封装和连接技术难	低,处于实验室研发和原理验证阶段。
机械波导传感器	声波信号传播特性(时间、幅频变化)	机匣、管路等结构	对大范围区域敏感;对内部损伤敏感;可实现主动传感和被动传感	对信号处理要求高;对结构几何形状敏感,易产生干扰;需粘贴压电元件激励/接收	中,在管道监测中应用;低航空领域
雷达	距离、位移、材料介电特性	发动机进气道外来物监测	非接触,有一定穿透能力;可进行快速扫描成像;对水分侵入、脱黏等缺陷敏感	分辨率与频率相关,高分辨率需高频,穿透力下降;对金属结构穿透能力差;系统复杂,数据处理和成像算法复杂	低(机载系统);高(地面无损检测)

4 结构健康状态监测系统及方法

航空发动机是飞机上最复杂的部件,其发生故障的原因十分复杂,可分为结构强度、性能和附件系

图 16 垫片异物撞击试验及 EHDUR 检测结果^[99]Fig. 16 Gasket foreign body impact aero-engine test and EHDUR test results^[99]

统故障^[101-102]。在开展航空发动机的结构健康监测过程中,通过先进传感和监测系统获取结构温度、振动、应变、噪声等参数,同时,针对不同参数的特征选取对应的处理方法提取参数的特征,为后续构建结构健康监测、故障诊断与趋势预测模型奠定基础,进

而实现可靠的结构健康状态评估^[103]。图17为飞行试验中的发动机机构PHM系统结构图。

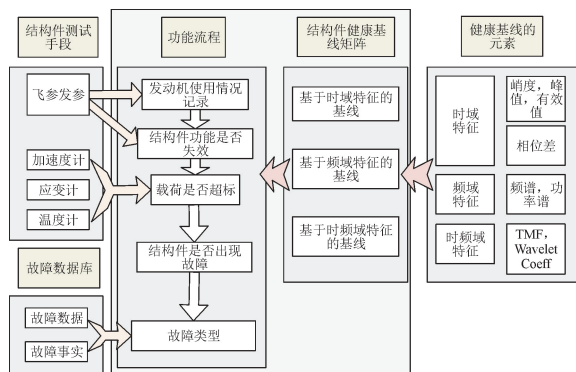


图17 发动机结构健康管理结构示意图

Fig. 17 Aero-engine SHM system structure diagram

4.1 结构健康状态监测系统

4.1.1 结构应变监测系统

20世纪90年代,美国在F110系列发动机上开展了转子叶片振动特性研究^[104]。为了详细研究叶

片的振动特性,欧洲对EJ200发动机压气机叶片动应力进行了飞行实测;美国在配装波音757-200飞机的发动机适航取证试飞中,开展叶片动应力测量,并积累了大量试验数据及经验,转子叶片的振动应力必须参照振动应力准则^[105]。参考国外航空发动机的设计、研制、台架试验、试飞验证与列装定型经验,分析发现发动机转子叶片动应力测量是其设计验证与改进、寿命与可靠性评估的重要依据,同时也是发动机安全监测、故障诊断的重要手段。

彭春雷等^[106]设计了发动机弹支应力监测系统,实现了高速转子系统碰磨监测与故障诊断。屈玉池等^[107]提出了一种航空螺旋桨叶片的叶根振动应力监测方法并通过飞行试验验证,克服了应变直接监测法中信号的传输困难。陶冶等^[108]建立了发动机转子叶片结构应变监测系统,并通过无线近距遥测实现了发动机转子叶片的振动特性飞行实测与飞行过程中安全监测。图18为转子叶片的应力遥测系统^[108]。

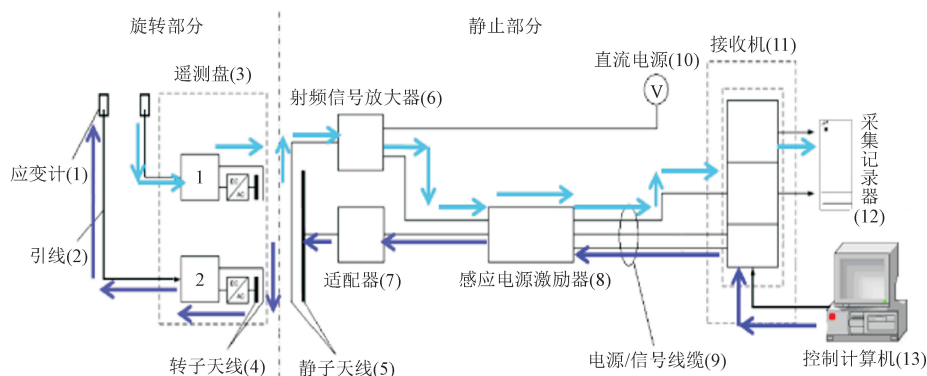


图18 发动机动应力飞行实测遥测监控系统结构^[108]

Fig. 18 Structure of telemetry monitoring system for aero-engine dynamic stress flight measurement^[108]

4.1.2 结构振动监测系统

航空发动机状态监控的主要方法包括气路性能监控、机械性能监控(滑油和振动监控)和无损探伤等,振动监控主要通过发动机机载振动监控系统来监测转子高、低压基频或倍频的振动分量与包含高、低压基频的一定频带范围内的总量^[109]。

统计分析国内航空发动机故障,其结构强度故障约占总故障的60%~70%,而部分故障信息会体现在振动特征参数中^[110]。高速旋转的航空发动机振动信号所包含的幅值、频率、相位等能够反应转子在工作过程中的状态,利用振动信号特征来分析发动机的磨损以及损伤可以及时发现潜在隐患,有利于降低航空发动机的故障率、降低维修成本,通过对

航空发动机的振动监控,可以评估航空发动机的工作状态,对提高综合维修水平和提高飞行安全性具有重要的意义^[102,111]。

F117发动机机载发动机检测系统(airborne thrust engine diagnostics system, ATEDS),可实现振动数据的自动收集、处理、监测^[112]。WATSON等^[113]开发的振动监测系统可实现航空发动机振动实时监测。随后,BORJA等^[114]开发了燃气涡轮发动机监测系统。NAIRAC等^[115]实现QUICK机载监测系统开发,融合振动数据与瞬时性能信息,能够实现连续监测振动信号。NAIRAC等^[116]开发了航空发动机故障检测系统,通过发动机的振动数据确定其故障状态,实现故障原因判别。

国内研究机构在航空发动机监测诊断等方面也开展了深入研究。唐锡宽等^[117]研制数据采集、信号处理以及故障诊断系统,并在发动机机架试验中进行监测和故障诊断验证。张永峰^[118]开发了一套发动机振动监测系统,采用基于小波与短时傅立叶变换方法对非稳态振动信号进行趋势分析。金艳^[119]开发了振动故障诊断系统,用于航空发动机状态监测与故障诊断。周俊等^[120-121]设计了航空发动机振动监测与故障诊断系统的软硬件总体结构。图19为振动监测系统的总体结构与算法功能原理示意图,该振动监测系统实现了发动机振动故障诊断。

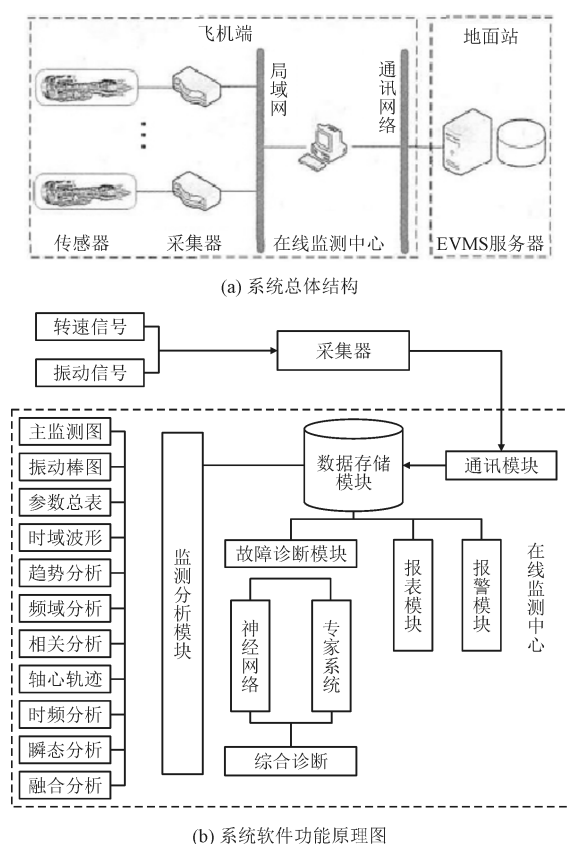


图19 发动机振动监测系统

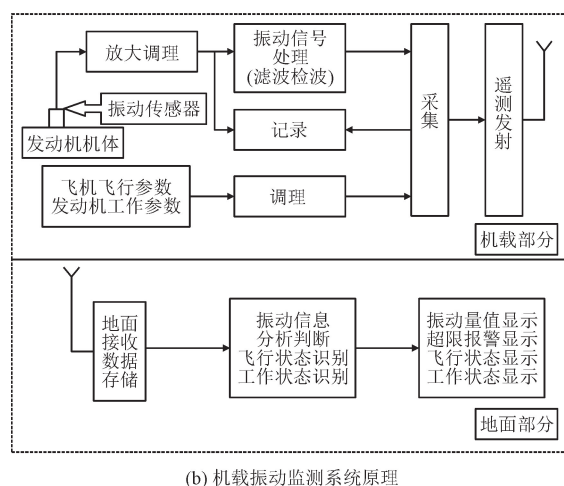
Fig. 19 Aero-engine vibration monitoring system

中国飞行试验研究院在发动机机载结构振动实时监测方面开展了深入研究,并已有部分振动监测系统应用于飞行实测。图20为发动机振动监测系统飞行实测原理图,该系统通过发动机高低压转子转速跟随测量,实现32路振动信号的测量、分析(基频、倍频的分量、总量计算)、遥测、回放等功能,并能够进行超限判别,若振动超限生成报告并报警,实现实时监视。同时,张洋等^[122]采用蓝牙技术对直升机振动监测系统无线组网,实现了机械部件结构的振

动数据无线监测。



(a) DSCC-23A2型机载振动监测系统



(b) 机载振动监测系统原理

图20 发动机飞行机载振动监测系统

Fig. 20 Aero-engine flight airborne vibration monitoring system

4.1.3 结构变形测量系统

目前,最常用非接触式方法测量叶片变形的是光学法,有激光散斑与全息干涉法、机器视觉方法等^[123]。数字图像相关法、标志点法以及轮廓提取法等是机器视觉测量的主要方法^[124-125]。其中,数字图像相关法无需构建隔振平台,主要采用控制检测点的范围与密度实现物体的全场变形测量,而且具有较高的精度^[126]。

数字图像相关法采用恢复编码在物体变形前后图像中形貌数据获得变形位移信息,具有全局测量、非接触式、高精度等优点,被广泛使用于实际工程中的非接触式全场变形与应变测量,在欧盟的AIM(先进的飞行测量技术)项目中应用数字图像相关技术对飞行状态下VUT100眼镜蛇飞机螺旋桨变形测量,相似地面试验条件下的空客A320配装的IAE V2527发动机最大连续推力状态下风扇叶片变形测量(图21)^[127-128]。

哈尔滨工业大学的武慧林等^[129-130]建立了基于多目视觉数字图像相关技术的测量系统,提出了旋转叶片闪频法的测量方案,实现了转子叶片表面的

位移和应变场准确测量。由于数字图像相关技术的测量速度、数据量、数据处理速度等因素限制,目前还无法实现发动机风扇转子长时间运行的叶片结构变形实时监测;但随着计算机技术与数据、图像处理算法的不断发展,这种方法在发动机转子叶片结构变形监测与故障诊断方面有着广阔的发展前景。

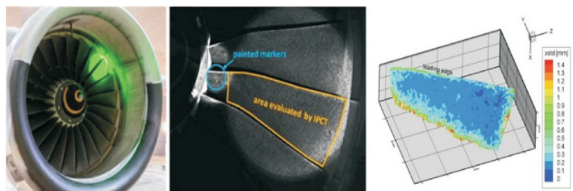


图 21 基于 DIC 技术测量的发动机风扇叶片变形测量^[127]

Fig. 21 Deformation measurement of engine fan blade based on DIC technology^[127]

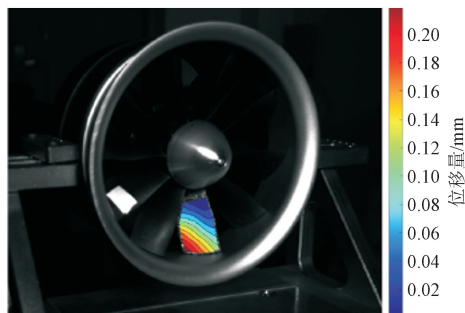
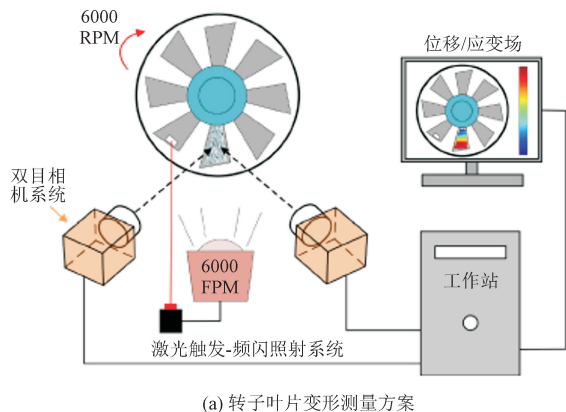


图 22 基于多目视觉数字图像的发动机叶片变形测量^[129]

Fig. 22 Deformation measurement of engine blade based on multi-vision digital image^[129]

4.1.4 声发射监测系统

声发射(acoustic emission, AE)是指材料内部的应变能以弹性波的形式进行释放的现象,或称之为应力波发射,材料内部的应变能是由于其在力作用下发生变形或裂纹损伤^[131]。

金属材料在发生变形的过程中会产生声发射现象^[132]。声发射物理方法是材料损伤监测的全新重

要手段;在发动机轴承周围改装声发射传感器,提取滚动轴承故障特征信息,能够实现对发动机轴承健康状态监测与故障诊断^[133]。

突发型声发射信号参数有幅度、能量计数、上升与持续时间、事件与振铃计数等;连续型声发射信号有平均信号与有效值电压电平、振铃计数;参数分析有列表显示、关联与历程图、单参数分析法等^[134-135]。TANDON 等^[136]在不同转速、缺陷类型、载荷条件下,采用共振型传感器对滚动轴承外圈故障的声发射进行测量与分析,实现全工况滚动轴承故障诊断。ELMALEEH 等^[137]为了实现故障轴承的状态监测,构建了旋转机械模拟故障检测试验系统,并对不同轴承故障时域信号进行特征分析。

邹申奥^[138]提出了应用声发射技术对发动机健康状态进行监测,利用幅值、信号强度、有效值电压、平均信号电平等声发射参数可有效地识别发动机进气失稳状态。张治衡^[139]针对叶片疲劳问题,采用声发射技术实现了裂纹扩展状态监测与剩余疲劳寿命预测。张强^[140]采用声发射方法与振动信号比对法,对发动机主轴承的典型故障进行分析,实现了航空发动机主轴承故障的可靠诊断。张帅等^[141]采用基于声学测量的方法实现发动机外来物撞击事件检测识别。

4.2 结构故障特征提取方法

通过分析航空发动机整机结构、工作状态及环境下的振动机理模型,分析提取故障特征,实现数据采集处理、故障特征提取与模式识别、预测性能衰退等^[142-145]。由于航空发动机的结构复杂,其运行工况和运行环境复杂,呈现多元激励的特征,且振动传感器通常布置在机匣外侧,采集振动信号特征复杂,故障特征较为复杂,开展典型故障特征识别及特征提取方法研究,能够建立故障类型与特征相互关联关系。图 23 为不同机械故障特征提取方法分类。

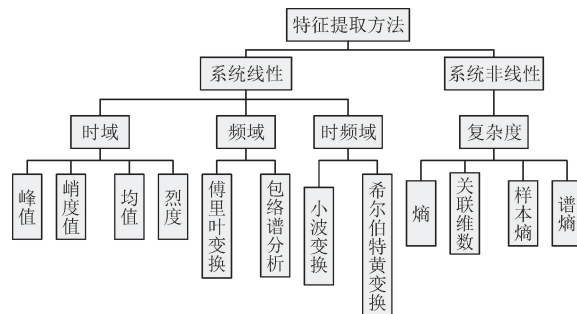


图 23 发动机机械故障特征提取方法分类

Fig. 23 Aero-engine mechanical fault feature extraction method based on signal parameter difference statistical method to distinguish engine structure health

康状态, DYER 等^[146]针对轴承的健康状态检测问题, 提出基于冲击脉冲计数方法的检测变化方法。ALFREDSON 等^[147-149]相继提出将均方根(RMS)、峰值、波峰因子和峭度等时域参数指标用于轴承结构健康状态趋势预测参数。仅通过时域参数特征往往难以准确定位故障型及原因^[150]。杨洪柏等^[151]采用基于时域特征参数集轮廓图的方法, 主要分析聚类性强的特征, 能够提高故障识别率。

目前常用功率谱法、倒谱法和共振解调法等来进行频域特征提取, 这些算法是基于傅里叶变换的, 基本原理是把时域波形换算到频域中, 提取与故障相关的频域特征^[152]。BOGERT^[153]为了实现对周期性冲击特征放大提取, 提出了基于功率谱法的倒频谱分析法。HARTING^[154]提出了基于共振解调分析的方法, 实现了共振信号中故障频率解调。ABBOUD 等^[155]针对轴承故障特征提取准确性问题, 提出基于共振解调的改进平方包络谱分析方法。

时域、频域特征提取方法对处理稳态信号具有良好的应用效果, 但无法实现瞬态信号的特征提取, 进而发展了能够表征瞬态信号的短时傅里叶变换^[156]、经验小波变换^[157]、Wigner-Ville 分布^[158]等时频域特征提取方法。针对非线性系统信号的特征提取问题, 国内外学者发展了熵理论。随着熵理论提出, 越来越多的学者将该理论用到不同的领域, 包括将熵理论应用到对机械设备的振动监测中。唐学来^[159]采用基于排列熵的理论方法试实现了航空发动机轴承故障诊断。

随着计算机技术的迅猛发展, 将飞行试验和服役中产生的海量、多源、异构数据(振动、应力温度、压力、转速、声学等)转化为对发动机结构健康状态的深度认知和前瞻性预测具备了可行性。通过聚类分析、回归算法、数据融合等人工智能算法对海量原始数据进行清洗和整理, 处理数据缺失、异常值、噪声等问题, 将不同频率、不同时间戳的传感器数据进行同步和关联^[160]。数据特征提取是连接原始数据和智能模型的桥梁, 是模式学习和机器学习的核心内容, 采用基于深度学习的自动特征提取方法能够避免复杂、依赖专家知识的手工特征设计, 让模型从原始数据中自动学习最有效的特征表示; 通过循环神经网络方法可从提取的大量特征中, 筛选出与目标(如故障类型)最相关的特征子集, 降低维度, 避免“维度灾难”; 例如, 通过智能学习发动机在完整飞行循环中的性能衰退趋势, 实现剩余寿命预

测^[161-163]。在航空发动机结构健康管理系统中, AI 技术将形成一个协同系统, 数据挖掘技术清洗数据和探索分析; 模式识别和机器学习从数据中自动学习和提取模式, 构建强大的诊断和预测模型; 专家系统将人类的先验知识形式化, 与数据驱动模型相互校验、补充, 提高系统的可解释性和可靠性; 深度学习等先进技术, 正推动特征提取和模型构建向更自动化、更精准的方向发展; 最终构建一个不断进化的“专家大脑”, 其既能从海量数据中学习, 又能深刻理解发动机的物理机理, 融入人类专家的智慧, 从而实现精准、可靠、自主的健康管理^[164-165]。

4.3 发动机结构健康状态评估方法

通过结构健康状态评估可迅速而准确地确定故障部位和严重程度, 提升维修决策能力, 提高飞机的利用率, 确保飞行可靠与安全, 故航空发动机健康评估有着重要意义^[166]。图 24 为所构建的发动机结构健康监测和评估方案, 通过发动机的部件、整机台架与飞行试验数据实现结构状态数据的采集与处理, 构建对应的健康/故障状态数据库、给定健康/故障状态判定推理方法, 最终实现发动机结构状态的监测和评估。

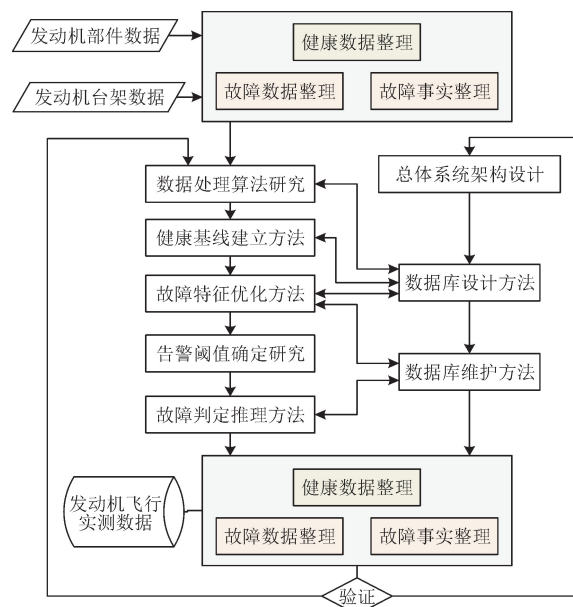


图 24 发动机结构健康监测和评估方案

Fig. 24 Aero-engine SHM and evaluation scheme

结构健康状态的评估方式主要包括评估装备的健康状态等级与健康度两种, 前者即基于装备状态参数分析, 进而确定其维修与可靠性水平, 目前健康状态等级分类无标准可依, 评估结果差异性大、准确度缺乏有效的验证^[167]。健康度评估是基于发动机

典型参数、工作环境等综合分析得到,对典型结构健康程度量化^[168]。发动机结构健康状态能够通过健康度的方法准确反映,亦可将健康度转换为故障率,便于准确进行健康状态趋势预测、故障诊断与维修决策^[169]。

图25为航空发动机转子系统结构健康评估模型,采用基于观测器模型的健康基线构建方法,获取系统在健康状态下的残差数据,并对残差数据提取时域特征;利用健康状态下的各个特征点构建马氏空间,即为发动机转子系统在正常工作状况下的健康基线。进行发动机结构系统健康状态评估时,利用观测器获取待评估数据残差,并提取特征组成特征序列,之后开展距离测度,计算当前状态与健康基线间的马氏距离并归一化为健康度^[170-171],即为发动机系统健康状态评估结果。对于发动机不同的评估数据利用匹配矩阵进行工况识别,从而切换不同的健康评估模型进行评估。宋登巍等^[172]针对航空液压系统的健康状态评估问题,通过实例验证了与前文描述的相同系统健康状态评估方案,建立了基于广义回归神经网络(GRNN)的观测器,并利用健康状态数据构建健康基线,利用观测器获取时域残差并构建特征序列,计算当前状态与健康基线的马氏距离并归一化为健康度,通过匹配矩阵实现变工况健康评估。

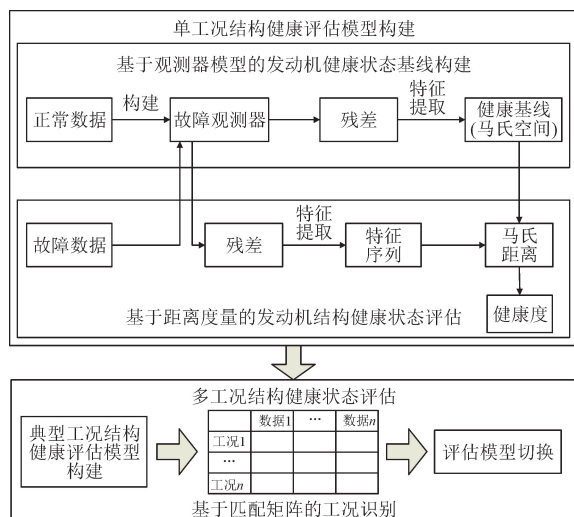


图25 航空发动机系统结构健康评估模型构架

Fig. 25 Aero-engine system structural health assessment model framework

航空发动机在设计生产、装配、调试及使用过程中具有多种不可控的因素,使得个体之间出现不同程度的结构特性差异,针对多台发动机进行统计建立的系统结构健康评估评估模型,不一定适用于存

在个体差异的单台发动机的健康状态评估。根据历史数据建立健康基线和故障特征库,结合飞机和发动机其他飞行参数与结构类测量数据在健康特征和故障特征进行比对和匹配,进而实现发动机结构故障诊断和健康状态监测与评估。

5 结 论

本研究分析发动机健康状态监测与评估技术对于推进系统与飞行器健康、稳定、安全运行,提高装备执行任务完成率、降低全寿命周期的费效比的必要性;系统分析航空发动机结构健康状态监测与评估研究的先进传感技术、监测系统与方法、典型故障特征提取方法与健康状态评估方法等的研究进展。对于发动机结构健康状态监测与评估技术未来的发展,具有一定的借鉴意义。

目前航空发动机结构健康监测技术已取得一定进步,先进传感技术、故障诊断方法、健康状态监测技术等在一些发动机型号中已应用于飞行试验中,受发动机服役指标高、飞行剖面多、使用环境复杂等因素影响,考虑到发动机的高可靠性、低费效比、易维护与稳定安全等要求,发动机结构健康监测与评估技术仍存在很多挑战。

1) 航空发动机在飞行试验或服役中的结构的参数测量传感器存在测试参数类型、测点数量与位置有限、可靠性差等问题;在实际飞行中,由于使用与安装环境所限,发动机部分测点位置的传感器存在损坏无法维护或无法定期检定等问题。针对发动机在高温、高转速、高负荷等极端环境下的结构健康监测需求,需进行耐极端环境的新型传感原理与材料研究,开展面向极端环境的内生传感与耐久性设计、结构与传感器一体化制造,攻克传感技术在发动机最严酷环境下的高可靠性和长寿命难题;针对发动机结构参数测点与位置有限问题,需从物理传感到信息感知的范式转变,研究采用基于软测量与物理信息的虚拟传感,用算法虚拟传感器,突破物理测点位置的限制,实现对不可测参数的间接高精度测量;同时,可开展基于数字孪生的稀疏传感与自适应诊断,采用数字孪生驱动的最优测点布局与传感器自诊断使测量系统具备自感知、自诊断能力,从被动采集走向主动优化。

2) 由于长期缺乏足够多的、完整的发动机全寿命周期数据验模和修模,物理模型的准确性受限,内

在模型精度和数据积累上存在明显差距,目前的研究更多是数据驱动的算法;而航空发动机结构健康状态监测与评估的模型需依靠大量的飞行实测数据训练,模型预测与评估的准确性较低,如何建立基于有限架次飞行数据训练的高精度预测与评估模型是未来发展的趋势;现有的发动机结构状态监测与故障诊断等多基于单参数或单类型参数分析研究,而发动机结构的大多数状态或故障不能通过单一参数分析进行准确描述,多传感器参数测量与多参数数据融合诊断及新型融合算法是未来发展的趋势;未来发展的新型融合算法包括基于深度学习的多模态融合算法、结合物理模型与数据驱动的融合算法、面向小样本和不确定性的融合算法、面向实时性与边缘计算的轻量化融合算法等。

3) 人工智能算法(机器学习、数据挖掘、模式识别、专家系统)、数字孪生、边缘智能、云边协同等前沿技术的未来将在发动机结构健康状态监测与评估中深度融合和应用拓展。数字孪生是实现预测性维护和自主健康管理的终极目标,其未来发展依赖于多物理场建模、实时仿真和数据集成技术的突破。边缘智能与云边协同未来能够解决机载环境下带宽、计算资源和实时性的矛盾,是构建规模化、自适应健康管理系统的基礎。通过融合机器学习、数据挖掘等 AI 算法,能够从航空发动机的海量数据中构建智能化的健康管理系统,而数字孪生作为核心载体,在云边协同架构的支持下,结合坚实的数据安全屏障,将最终实现发动机结构健康的精准感知、精确认知、精准预测和精准决策,可实现航空发动机飞行试验或服役中产生的海量数据的大数据分析与特征提取,构建不同类型或不同台次发动机结构健康状态基线,实现飞行中发动机结构参数的实时监控、趋势预测与状态评估,显著提升飞行安全和运营效率,是航空发动机飞行安全保障领域的一个重要发展趋势。

参考文献:

- [1] 马丽斌. 借鉴美国经验发展我国的健康管理事业[J]. 中国药业, 2007, 16(8): 14-15.
MA Libin. Draw on the experience of the U. S to develop China's health management industry[J]. China pharmaceuticals, 2007, 16(8): 14-15(in Chinese).
- [2] 穆彤娜, 张雪胭, 于洪敏. 装备健康管理的内涵与发展[J]. 装备学院学报, 2012, 23(5): 10-13.
MU Tongna, ZHANG Xueyan, YU Hongmin. Connotation and development of equipment health management[J]. Journal of Academy of Equipment, 2012, 23(5): 10-13(in Chinese).
- [3] HEATON A, FAN I S, LAWSON C, et al. Integrated vehicle health management and unmanned aviation[J]. PHM Society European Conference, 2012, 1(1): 1378.
- [4] 姜彩虹, 孙志岩, 王曦. 航空发动机预测健康管理系统设计的关键技术[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2589-2594.
JIANG Caihong, SUN Zhiyan, WANG Xi. Critical technologies for aero-engine prognostics and health management systems development[J]. Journal of aerospace power, 2009, 24(11): 2589-2594(in Chinese).
- [5] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [6] MERCER C R, SIMON D L, HUNTER G W, et al. Fundamental technology development for gas-turbine engine health management [EB/OL]. (2007-05-08) [2025-01-05]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20070022364>.
- [7] 陈雪峰, 王诗彬, 杨志勃, 等. 航空发动机健康管理研究进展及展望[J]. 中国科学(技术科学), 2025, 55(8): 1255-1280.
CHEN Xuefeng, WANG Shibin, YANG Zhibo, et al. Aeroengine health management: progress and future trends[J]. Scientia Sinica (technologica), 2025, 55(8): 1255-1280(in Chinese).
- [8] 徐康发. 多机协同空战智能决策与评估方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [9] FOX J J, GLASS B J. Impact of integrated vehicle health management (IVHM) technologies on ground operations for reusable launch vehicles (RLVs) and spacecraft[C]//2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 179-186.
- [10] 中国人民解放军总装备部. 装备综合保障通用要求: GJB 3872A—2022[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部出版, 2023.
- [11] 赵鉴, 梁志君. 从 F-35 项目来看 PHM 的应用与效益[J]. 价值工程, 2012, 31(6): 298.
ZHAO Jian, LIANG Zhijun. The PHM application and efficiency from the items F-35[J]. Value engineering, 2012, 31(6): 298(in Chinese).
- [12] BYER B, HESS A, FILA L. Writing a convincing cost benefit analysis to substantiate autonomic logistics[C]//2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 3095-3103.
- [13] WILLIAMS Z. Benefits of IVHM; an analytical approach[C]//2006 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-9.
- [14] 蔡光耀, 高晶, 苗学问. 航空发动机健康管理系统发展现状及其指标体系研究[J]. 测控技术, 2016, 35(4): 1-5.
CAI Guangyao, GAO Jing, MIAO Xuewen. Current situation and indexes of prognostics and health management system for aero-engines[J]. Measurement & control technology, 2016, 35(4): 1-5(in Chinese).
- [15] ASHOK N S, ROBERT W M, CLAUDIA M. Integrated vehicle health management[R]. 2009.
- [16] VICHARE N M, PECHT M G. Prognostics and health management of electronics[J]. IEEE transactions on components and packaging

- technologies, 2006, 29(1): 222-229.
- [17] VACHTSEVANOS G, LEWIS F, ROEMER M, et al. Fault diagnosis and prognosis performance metrics [M]//VACHTSEVANOS G, LEWIS F, ROEMER M. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems, et al. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006: 355-399.
- [18] 孔祥天. 涡扇发动机在线健康诊断技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [19] WORSFOLD M, ASSEMAN P. TATEM's contribution to a future health managed enterprise (Overview, context and emerging operational needs) [C]//2008 IET Seminar on Aircraft Health Management for New Operational and Enterprise Solutions. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-9.
- [20] KOOP W. The integrated high performance turbine engine technology program [Z]//BE97-7175. [S. l.]: [s. n.], 1997.
- [21] LITT J S, SIMON D L, MEYER C, et al. NASA aviation safety program: aircraft engine health management data mining tools roadmap [C]//Proceedings Volume 4057, Data Mining and Knowledge Discovery: Theory, Tools, and Technology II. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2000: 292-298.
- [22] ZUNIGA F A, MACLISE D C, ROMANO D J, et al. Integrated systems health management for exploration systems [C]//1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: AIAA 2005-2586.
- [23] FIGUEROA F, HOLLAND R, SCHMALZEL J, et al. ISHM implementation for constellation systems [C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-4410.
- [24] CLEVELAND G P, TRAMMEL C. An integrated health and usage monitoring system for the SH-60B helicopter [C]//Proceedings Annual Forum of the American Helicopter Society. [S. l.]: [s. n.], 1996: 1767-1787.
- [25] TEAL M L. Health and usage monitoring on the international CH-47D [C]//Proceedings of the American Helicopter Society 53rd Annual Forum. [S. l.]: [s. n.], 1997.
- [26] POWRIE H, NOVIS A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM [C]//2006 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-8.
- [27] POWRIE H. IDMS and EDMS performance during gem engine ingestion tests' smiths internal report [Z]//SHL1490. [S. l.]: [s. n.], 2001.
- [28] 唐民锋. 从 F-135 发动机技术特征展望军用航空发动机维修保障模式的发展趋势 [J]. 航空维修与工程, 2015(10): 41-44. TANG Minfeng. Look forward to the trends of military aircraft engine maintenance support mode from the technical characteristics of F-135 aero-engine [J]. Aviation maintenance & engineering, 2015(10): 41-44 (in Chinese).
- [29] 曾声奎, MICHAEL G P, 吴际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632. ZENG Shengkui, MICHAEL G P, WU Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies [J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632 (in Chinese).
- [30] GILMORE D R. Assessment of augmented electronic fuel controls for modular engine diagnostics and condition monitoring [M]. [S. l.]: [s. n.], 1978.
- [31] DEMOTT L R. TF41-A-2/A7E inflight engine condition monitoring system /IECMS) [C]//Aircraft Systems and Technology Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1978: AIAA 1978-1472.
- [32] DOANE P M, KINLEY W R. F/A-18A inflight engine condition monitoring system (IECMS) [C]//19th Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1983: AIAA 1983-1237.
- [33] 鲁峰. 航空发动机故障诊断的融合技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [34] SPETH R H, SCOTT B C, LOUIS M St, et al. F15/F100 engine diagnostic system [C]//15th Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1979: AIAA 1979-1201.
- [35] 范作民, 孙春林, 林兆福. 发动机故障诊断的主因子模型 [J]. 航空学报, 1993, 14(12): B595. FAN Zuomin, SUN Chunlin, LIN Zhaofu. Primary factor model for jet engine fault diagnosis [J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 1993, 14(12): B595 (in Chinese).
- [36] 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 Jin. A condition monitoring and fault diagnosis system for civil aeroengines [J]. Journal of aerospace power, 1994, 9(4): 339-343 (in Chinese).
- [37] 钟诗胜, 崔智全, 付旭云. Rolls-Royce 发动机基线挖掘方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2265-2270. ZHONG Shisheng, CUI Zhiqian, FU Xuyun. Baseline mining method of RR's engine [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2010, 16(10): 2265-2270 (in Chinese).
- [38] 宋云雪, 张科星, 史永胜. 基于多元线性回归的发动机性能参数预测 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 427-431. SONG Yunxue, ZHANG Kexing, SHI Yongsheng. Research on aeroengine performance parameters forecast based on multiple linear regression forecasting method [J]. Journal of aerospace power, 2009, 24(2): 427-431 (in Chinese).
- [39] 李永平, 陈闵叶, 张兴媛. 民航发动机的性能参数选择及其排队规则 [J]. 上海工程技术大学学报, 2006, 20(2): 108-111. LI Yongping, CHEN Minye, ZHANG Xingyuan. Parameter selection and queue rules research of civil aviation engine performance [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2006, 20(2): 108-111 (in Chinese).
- [40] WANG J R, HUANG D W, SU Y Y, et al. Aeroengine health assessment using a web-based grey analytic hierarchy process [C]//2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 411-414.
- [41] 王帅, 康力平. 航空发动机综合权值排队系统的建立与应用 [J]. 中国民航学院学报, 2004, 22(增刊1): 157-160. WANG Shuai, KANG Liping. Establishment and application of the comprehensive weight queuing system for aero engines [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2004, 22(S1): 157-160 (in Chinese).

- [42] WANG H W, GAO J, LIU Z Y. Maintenance decision based on data fusion of aero engines[J]. Mathematical problems in engineering, 2013, 2013(1): 628792.
- [43] 杨圣. 先进传感技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- [44] 张仕明. 结构应变监测的无线传感器网络系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [45] 沈观林. 应变电测与传感器技术的新发展及应用[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 87-91.
SHEN Guanlin. New developments of strain gauge measurement and transducer technique and applications in all kinds of engineers and domains[J]. China measurement & test, 2011, 37(2): 87-91 (in Chinese).
- [46] TEGTMEIER F L. Strain gauge based microsensor for stress analysis in building structures[J]. Measurement, 2008, 41(10): 1144-1151.
- [47] 尹福炎. 电阻应变片发展历史的回顾——纪念电阻应变片诞生70周年(1938-2008)[J]. 衡器, 2009, 38(4): 46-52.
YIN Fuyan. The review of electronic resistance strain gage development history——commemorate electronic resistance strain gage has been for 70 years[J]. Weighing instrument, 2009, 38(4): 46-52 (in Chinese).
- [48] 张旭. 高温应变计敏感栅结构参数优化及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2023.
- [49] SCHEUREN W J, CALDWELL K A, GOODMAN G A, et al. Joint strike fighter prognostics and health management [C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, VA, USA; AIAA, 1998; AIAA 1998-3710.
- [50] SHIOYA T, STRONGE W J. A study on foreign object damage of rotating fan blades [M]//KAWATA K, SHIOIRI J. Macro- and Micro-Mechanics of High Velocity Deformation and Fracture. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 1987: 327-336.
- [51] 房剑锋. 基于机匣应变的航空发动机碰摩故障识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 22-28.
FANG Jianfeng. Aero-engine rub-impact fault identification based on casing strain in flight[J]. Journal of Air Force Engineering University (natural science edition), 2019, 20(3): 22-28 (in Chinese).
- [52] 陶冶, 张帅. 基于叶片应变测量的航空发动机风扇外物撞击监测识别[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1286-1291.
TAO Ye, ZHANG Shuai. Foreign object impact monitoring and identification of aero engine fan based on blade strain measurement [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(3): 1286-1291 (in Chinese).
- [53] 许艳芝, 雷晓波, 文敏, 等. 某发动机喷管构件高温载荷测量[J]. 机械强度, 2019, 41(3): 696-701.
XU Yanzhi, LEI Xiaobo, WEN Min, et al. High temperature load measurement for nozzle component of a certain aero-engine[J]. Journal of mechanical strength, 2019, 41(3): 696-701 (in Chinese).
- [54] 邵飞, 杨宁, 孙维, 等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 95-103.
- SHAO Fei, YANG Ning, SUN Wei, et al. Research on spacecraft structural health monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Spacecraft engineering, 2018, 27(2): 95-103 (in Chinese).
- [55] 周祖德, 谭跃刚, 刘明尧, 等. 机械系统光纤光栅分布动态监测与诊断的现状与发展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 55-69.
ZHOU Zude, TAN Yuegang, LIU Mingyao, et al. Actualities and development on dynamic monitoring and diagnosis with distributed fiber Bragg grating in mechanical systems[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(19): 55-69 (in Chinese).
- [56] 冯昆鹏. 基于四芯锥形相移光纤光栅的三维微尺度传感方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [57] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication[J]. Applied physics letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [58] GARBOS R, MOUYOS W. X-33/RLV system health management/vehicle health management [C]//39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Reston, VA, USA; AIAA, 1998; AIAA 1998-1928.
- [59] PAYNE F P. Photorefractive gratings in single-mode optical fibres [J]. Electronics letters, 1989, 25(8): 498-499.
- [60] 袁紫衣. 基于分布式光纤传感技术的压力管路裂纹识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [61] 邹东伯. 分布式光纤振动传感系统技术的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [62] 陈晓梅, 李新良, 曾吾, 等. 用纤内 Bragg 光栅进行动态应变测量的研究[J]. 航空计测技术, 2002, 22(6): 3-7.
CHEN Xiaomei, LI Xinliang, ZENG Wu, et al. Investigation of fiber Bragg grating for dynamic strain measurement [J]. Aviation metrology & measurement technology, 2002, 22(6): 3-7 (in Chinese).
- [63] 张承, 周雷, 胡伟. 航空发动机用光纤叶片振动传感探头的研制[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 217-220.
ZHANG Cheng, ZHOU Lei, HU Wei. Development of the optical fiber blade vibration sensing probe for aero-engine[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011, 6(2): 217-220 (in Chinese).
- [64] 李恒春. 基于光纤光栅的高温涡轮叶片变形重构研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [65] SABOL S M, SUBRAMANBIAN R, KULKARNI A A. Apparatus and method of monitoring operating of a gas turbine; US, 82359 B2 [P]. 2009-09-01.
- [66] BEHBAHANI A R. Need for robust sensors for inherently fail-safe gas turbine engine controls, monitoring, and prognostics [C]//Proceedings of the International Instrumentation Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [67] 闫晓军, 张锴, 伍晓明. MEMS 技术在智能航空发动机中的应用研究现状及前景[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1210-1217.
YAN Xiaojun, ZHANG Kai, WU Xiaoming. Opportunities and challenges of MEMS technology in the environment of intelligent

- aero-engines[J]. Journal of aerospace power, 2012, 27(6): 1210-1217 (in Chinese).
- [68] 赵力, 李根梓. MEMS 产业发展趋势与标准化战略研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2025(3): 1-7.
ZHAO Li, LI Genzi. Research on the development trend and standardization strategy of MEMS industry [J]. Machinery industry standardization & quality, 2025(3): 1-7 (in Chinese).
- [69] 张丁尹. MEMS 传感器在汽车电子控制系统中的应用[J]. 汽车与新动力, 2023, 6(3): 19-21.
ZHANG Dingyin. The application of MEMS sensors in automotive electronic control systems [J]. Automobile and new powertrain, 2023, 6(3): 19-21 (in Chinese).
- [70] 王金涛, 刘飞, 曹慧通, 等. 硅谐振式 MEMS 加速度计的研究进展及未来展望[J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(2): 71-87.
WANG Jintao, LIU Fei, CAO Huitong, et al. Research status and development trend of silicon resonant MEMS accelerometer [J]. Journal of functional materials and devices, 2025, 31(2): 71-87 (in Chinese).
- [71] WOIKE M R, ABDUL-AZIZ A, BENCIC T J. A microwave blade tip clearance sensor for propulsion health monitoring [C]//AIAA Infotech@ Aerospace 2010. Reston, VA, USA: AIAA, 2010: AIAA 2010-3308.
- [72] DUCLOUX O, VIARD R, TALBI A, et al. A magnetically actuated, high momentum rate MEMS pulsed microjet for active flow control [J]. Journal of micromechanics and microengineering, 2009, 19(11): 115031.
- [73] SPARKS D, SMITH R, CRUZ V, et al. Dynamic and kinematic viscosity measurements with a resonating microtube [J]. Sensors and actuators a: physical, 2009, 149(1): 38-41.
- [74] GRAUER F, FILIPOVIC D, PFOERTNER H. Application of MEMS in turbomachinery [C]//RTO AVT Symposium on Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies. [S. l.]: [s. n.], 2007.
- [75] 吴倩, 王武, 王民慧. 基于 MEMS 麦克风的发动机状态监测系统[J]. 电子世界, 2018(5): 132-133.
WU Qian, WANG Wu, WANG Minhui. Engine condition monitoring system based on MEMS microphones [J]. Electronics world, 2018(5): 132-133 (in Chinese).
- [76] SADLER D J, AHN C H. On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection [J]. Sensors and actuators a: physical, 2001, 91(3): 340-345.
- [77] AZEVEDO R G, JONES D G, JOG A V, et al. A SiC MEMS resonant strain sensor for harsh environment applications [J]. IEEE sensors journal, 2007, 7(4): 568-576.
- [78] AMINI R, GAYDADJIEV G, GILL E. Smart power management for an onboard wireless sensors and actuators network [C]//AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: AIAA 2009-6815.
- [79] ZIMDARS A L, BOSE P. Optimal control of wireless sensor networks for structural health monitoring [C]//AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2004: AIAA 2004-6460.
- [80] HUDAK S J, LANNING B R. The influence of uncertainty in usage and fatigue damage sensing on turbine engine prognosis [R]. Warrendale, Pennsylvania: Materials Damage Prognosis, 2005.
- [81] 罗杨. 光纤叶尖定时传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [82] 王萍. 叶尖定时方法在国外航空发动机叶片振动测量中的应用综述[J]. 航空科学技术, 2013(6): 5-9.
WANG Ping. Application review of blade tip timing method for foreign aero-engine blade vibration measurement [J]. Aeronautical science & technology, 2013(6): 5-9 (in Chinese).
- [83] 刘杰坤, 马修水, 马懿. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
LIU Jiekun, MA Xiushui, MA Xie. Review of laser doppler vibrometer [J]. Laser journal, 2014, 35(12): 1-5 (in Chinese).
- [84] MOREAU A, BORZA D, NISTEA I. Full-field vibration measurement by time-average speckle interferometry and by doppler vibrometry — a comparison [J]. Strain, 2008, 44(5): 386-397.
- [85] RUSSHARD P. Development of a blade tip timing based engine health monitoring system [D]. Manchester: The University of Manchester, 2010.
- [86] 王宇华, 段发阶, 叶声华, 等. 旋转叶片振动测量新的技术方案研究[J]. 仪表技术与传感器, 2002(2): 44-46.
WANG Yuhua, DUAN Fajie, YE Shenghua, et al. New technology investigation of rotor blades vibration measurement [J]. Instrument technique and sensor, 2002(2): 44-46 (in Chinese).
- [87] Hood Technology Corporation. Overview of blade vibration monitoring capabilities [R]. 2010.
- [88] VON FLOTOW A, MERCADAL M, TAPPERT P. Health monitoring and prognostics of blades and disks with blade tip sensors [C]//2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8484). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 433-440.
- [89] CARDWELL D N, CHANA K S, RUSSHARD P. The use of eddy current sensors for the measurement of rotor blade tip timing: sensor development and engine testing [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2008: 179-189.
- [90] CARDWELL D N, CHANA K S, GILBOY M T. The development and testing of a gas turbine engine foreign object damage (FOD) detection system [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2010: 331-342.
- [91] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [92] 段发阶, 牛广越, 周琦, 等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 74-100.
DUAN Fajie, NIU Guangyue, ZHOU Qi, et al. A review of online blade tip clearance measurement technologies for aeroengines [J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2022, 43(9): 74-100 (in Chinese).
- [93] 刘美茹, 朱靖, 滕光蓉, 等. 非接触旋转叶片振动测量系统在转子叶片裂纹故障试验中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(2): 45-48.
LIU Meiru, ZHU Jing, TENG Guangrong, et al. Non-contact rota-

- ting blade vibration measurement system in rotor blade crack fault test[J]. Gas turbine experiment and research, 2015, 28(2): 45-48 (in Chinese).
- [94] 刘美茹, 郜伟强, 卫靖澜, 等. 叶尖定时在压气机转子叶片裂纹故障排除中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2023, 36(1): 23-29.
- LIU Meiru, GAO Weiqiang, WEI Jinglan, et al. Application of tip timing in fault elimination of compressor rotor blade cracks[J]. Gas turbine experiment and research, 2023, 36(1): 23-29 (in Chinese).
- [95] 户东方. 涡轮叶片动应力场重构关键技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [96] GUPTA S, NAVARAJ W T, LORENZELLI L, et al. Ultra-thin chips for high-performance flexible electronics[J]. NPJ flexible electronics, 2018, 2(1): 8.
- [97] LARSEN C, BRANCH N. Broadband waveguide vibration sensor for turbine bearing health monitoring[C]//2013 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-12.
- [98] SHEPHARD D, WRIGHT B, RICHARDS G. Engine health diagnostics using radar[C]//Evaluation, Control and Prevention of High Cycle Fatigue in Gas Turbine Engines for Land, Sea and Air Vehicles. Neuilly-sur-Seine, France: STO, 2005: 4-1-4-6.
- [99] HEIMES F, SHEPHARD D, WRIGHT B, et al. Recent progress with the engine health diagnostics using radar system[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-4584.
- [100] 刘建勋, 魏东, 刘成武, 等. 航空发动机叶片残余应力监测及安全评定研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(11): 2877-2879.
- LIU Jianxun, WEI Dong, LIU Chengwu, et al. Surface residual stress test for aero-engine blade and its safety assessment[J]. Science technology and engineering, 2009, 9(11): 2877-2879 (in Chinese).
- [101] 宋辉, 李昌平, 李晓明, 等. 航空发动机健康评估研究[J]. 国防技术基础, 2010(11): 28-33.
- SONG Hui, LI Changping, LI Xiaoming, et al. Survey on aircraft engine health assessment[J]. Technology foundation of national defence, 2010(11): 28-33 (in Chinese).
- [102] 赵鸣宇. 基于 Altium Designer 的航空发动机振动监测硬件系统的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [103] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 269-292.
- FANG Fang, ZHENG Hui, WANG Yu, et al. Mechanical structural health monitoring: a review[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(16): 269-292 (in Chinese).
- [104] CHAN C J, LEVIN D E, TALLAROVIC J M. A fan aeromechanical flight test investigation on the F110 engines[C]//Annual Symposium Proceedings. Society of Flight Test Engineers. [S. l.]: [s. n.], 1996: I. 1. 1-I. 1. 24.
- [105] OLNEY C D, COLLURA J V. A limited in-flight evaluation of the constant current loop strain measurement method[EB/OL]. (1997-08-01)[2025-02-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970026974>.
- [106] 彭春雷, 张萍. 基于弹支应力监测的高速转子系统碰摩故障诊断[C]//2017年航空智能装备与试验测试技术峰会暨学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2017: 162-164, 167.
- [107] 屈玉池, 刘军仓, 张永峰, 等. 叶片振动应力的叶根振动监测法及实现技术[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 44-49.
- QU Yuchi, LIU Juncang, ZHANG Yongfeng, et al. Blade-root vibration monitoring method for blade vibration stress monitoring and its implementation techniques[J]. Journal of aerospace power, 2008, 23(1): 44-49 (in Chinese).
- [108] 陶冶, 田琳, 解梦涛, 等. 大涵道比涡扇发动机风扇叶片动应力测量试飞[J]. 航空发动机, 2017, 43(3): 68-73.
- TAO Ye, TIAN Lin, XIE Mengtao, et al. Flight test on fan-blade vibration stress of high bypass ratio turbofan engine[J]. Aero-engine, 2017, 43(3): 68-73 (in Chinese).
- [109] 陈潮龙. 某型航空发动机整机振动故障诊断系统设计[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
- [110] 孙海东, 傅强. 航空发动机振动监测研究[J]. 机械设计与制造, 2007(2): 127-129.
- SUN Haidong, FU Qiang. Research on vibration monitoring of aero-engine[J]. Machinery design & manufacture, 2007(2): 127-129 (in Chinese).
- [111] 吕跃刚, 关晓慧, 刘俊承. 某型试车台 PXI 振动监测系统设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2010(9): 342-344.
- LÜ Yuegang, GUAN Xiaohui, LIU Juncheng. Design and realization of monitoring system for aeroengine vibration[J]. Computer engineering and applications, 2010(9): 342-344 (in Chinese).
- [112] GRABILL P, SEALE J, BROTHERTON T. aTEDS: airborne turbine engine diagnostic system[C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 3563-3570.
- [113] WATSON M, SHELDON J, AMIN S, et al. A comprehensive high frequency vibration monitoring system for incipient fault detection and isolation of gears, bearings and shafts/couplings in turbine engines and accessories[C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2007: 885-894.
- [114] United Technologies Corporation. Turbine engine monitoring system; US 9,097,122 B2[P]. 2015-08-04.
- [115] NAIRAC A, TOWNSEND N, CARR R, et al. A system for the analysis of jet engine vibration data[J]. Integrated computer-aided engineering, 1999, 6(1): 53-66.
- [116] Inha-Industry Partnership Institute. System for fault detection and diagnosis of aircraft engine and method thereof; US 8,930,120 B2[P]. 2015-01-06.
- [117] 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): 169-173.
- TANG Xikuan, LIU Qingrui, YANG Wei, et al. Development of a high-speed data sampling and signal analysis system[J]. Journal of aerospace power, 1994, 9(2): 169-173 (in Chinese).
- [118] 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.
- [119] 金艳. 某型航空发动机整机振动故障诊断技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.

- [120] 周俊. 航空发动机振动监测与故障诊断系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [121] 周俊, 刘峻华, 杨涛, 等. 航空发动机在线振动监测系统的开发[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3599-3602.
ZHOU Jun, LIU Junhua, YANG Tao, et al. Development of aero-engine online vibration monitoring system[J]. Computer measurement & control, 2015, 23(11): 3599-3602(in Chinese).
- [122] 张洋, 李兆龙. 直升机振动无线监测技术[J]. 中国科技信息, 2018(3): 26-27.
ZHANG Yang, LI Zhaolong. Wireless monitoring technology for helicopter vibration[J]. China science and technology information, 2018(3): 26-27(in Chinese).
- [123] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 150-153.
LUO Shengbin, SONG Chunhua, WEI Xingping, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology[J]. Machine tool & hydraulics, 2013, 41(23): 150-153(in Chinese).
- [124] 周婷. 基于数字图像的风机叶片变形高速测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 13-18.
- [125] 左承林, 马军, 岳廷瑞, 等. 基于双目立体视觉的直升机旋翼桨叶位移变形测量方法[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 87-95.
ZUO Chenglin, MA Jun, YUE Tingrui, et al. Displacement and deformation measurements of helicopter rotor blades based on binocular stereo vision[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2020, 34(1): 87-95(in Chinese).
- [126] 张顺庆, 高晨家, 张龙. 数字图像相关技术在应力应变测量中的发展与最新应用[J]. 影像科学与光化学, 2017, 35(2): 193-198.
ZHANG Shunqing, GAO Chenjia, ZHANG Long. The development and latest applications of digital image correlation in stress and strain measurement[J]. Imaging science and photochemistry, 2017, 35(2): 193-198(in Chinese).
- [127] BODEN F, LAWSON N, JENTINK H W, et al. Advanced in-flight measurement techniques[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 45-49.
- [128] KIRMSE T, MARING S, EBEL P B, et al. Fan blade deformation measurements on the DLR airbus A320-ATRA by means of IPCT as part of the ground test campaign in the frame of the DLR-project SAMURAI[C]//New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X. Cham: Springer International Publishing, 2016: 629-638.
- [129] 武慧林. 基于多目视觉数字图像相关法的航空发动机叶片变形测量方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [130] 余镇江. 基于数字图像相关法的航空发动机叶片三维变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [131] 张勇, 周昀芸, 王博, 等. 基于声发射信号的铝合金点焊裂纹神经网络监测[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 1-7.
ZHANG Yong, ZHOU Yunyun, WANG Bo, et al. Neural network monitoring of aluminum alloy spot welding crack based on acoustic Emission Signal[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(16): 1-7(in Chinese).
- [132] DROUILLARD T F. Acoustic emission: the first half century[M]. [S. l.]: Presented at International Acoustic Emission Symposium, 1994.
- [133] OHTSU M. Acoustic emission testing[M]. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [134] 马恒儒, 陶春虎. 声发射检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [135] 胡昌洋, 杨钢锋, 黄振峰, 等. 声发射技术及其在检测中的应用[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(6): 1-3.
HU Changyang, YANG Gangfeng, HUANG Zhenfeng, et al. AE technology and application in the test[J]. Metrology & measurement technique, 2008, 35(6): 1-3(in Chinese).
- [136] TANDON N, NAKRA B C. Defect detection of rolling element bearings by acoustic emission method[J]. Journal of acoustic emission, 1990, 9(1): 25-28.
- [137] ELMALEE H M A, SAAD N. Development of acoustic emission diagnostic system for condition monitoring of rotating machines[C]//2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1049-1054.
- [138] 邹申奥. 基于声发射技术的发动机在线状态监测识别方法[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [139] 张治衡. 基于声发射技术的航空发动机叶片损伤监测预示方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [140] 张强. 基于声发射的航空发动机主轴轴承故障诊断技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014.
- [141] 张帅, 牛宏伟. 基于声学测量的航空发动机风扇外物撞击监测识别[C]//第六届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2023: 1360-1366.
- [142] 王洪伟, 陈果, 陈立波, 等. 一种航空发动机滚动轴承磨损故障监测技术[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2256-2263.
WANG Hongwei, CHEN Guo, CHEN Libo, et al. A fault monitoring technique for wear of aero-engine rolling bearing[J]. Journal of aerospace power, 2014, 29(9): 2256-2263.
- [143] 孙志航. 发动机中介轴承故障信号特征提取技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [144] 李淑芸, 高轩, 郑修鹏, 等. 基于有限测点信息的管路振动载荷识别方法研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1049-1056.
LI Shuyun, GAO Xuan, ZHENG Xiupeng, et al. Identification method of pipeline vibration loads with limited measurement information[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1049-1056(in Chinese).
- [145] 李益萱, 李凯翔, 白春玉, 等. 民用客机的振动传递路径试验及分析[J]. 应用力学学报, 2024, 42(6): 1237-1245.
LI Yixuan, LI Kaixiang, BAI Chunyu, et al. Vibration transfer path test and analysis of the passenger aircraft[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 42(6): 1237-1245(in Chinese).
- [146] DYER D, STEWART R M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis[J]. Journal of mechanical design, 1978, 100(2): 229-235.
- [147] ALFREDSON R J, MATHEW J. Time domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings[J]. The institution

- of engineers australia, mechanical engineering transactions, 1985, 10:102-107.
- [148] MARTIN H R, HONARVAR F. Application of statistical moments to bearing failure detection[J]. Applied acoustics, 1995, 44(1): 67-77.
- [149] SERRIDGE M. What makes vibration condition monitoring reliable[J]. Noise and vibration worldwide, 1991, 22:17-24.
- [150] 辜志强, 林月叠. 基于改进 LMD 和综合特征指标的滚动轴承故障诊断[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(2):145-150.
- GU Zhiqiang, LIN Yuedie. Fault diagnosis of rolling bearing based on improved LMD and comprehensive characteristic index[J]. Journal of Hefei University of Technology(natural science), 2021, 44(2):145-150(in Chinese).
- [151] 杨洪柏, 张宏利, 刘树林. 时域统计特征可视化优选方法及其滚动轴承故障诊断应用[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(8):123-126.
- YANG Hongbai, ZHANG Hongli, LIU Shulin. A visual optimal selection method of time statistical feature and its application to rolling bearing fault diagnosis[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2017, 46(8):123-126(in Chinese).
- [152] 李业政. 航空发动机附件齿轮箱滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 北京:北京化工大学, 2022.
- [153] BOGERT B P. The frequency analysis of time series for echoes: cepstrum pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe crackling[J]. Time series analysis, 1963, 15:209-243.
- [154] HARTING D R. Demodulated resonance analysis-a powerful incipient failure detection technique[J]. ISA transactions, 1978, 17(1):35-40.
- [155] ABBOUD D, ANTONI J, SIEG-ZIEBA S, et al. Envelope analysis of rotating machine vibrations in variable speed conditions: a comprehensive treatment[J]. Mechanical systems and signal processing, 2017, 84, Part A:200-226.
- [156] MATEO C, TALAVERA J A. Short-time Fourier transform with the window size fixed in the frequency domain[J]. Digital signal processing, 2018, 77:13-21.
- [157] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE transactions on signal processing, 2013, 61(16):3999-4010.
- [158] BORGHESEANI P, PENNACCHI P, RICCI R, et al. Testing second order cyclostationarity in the squared envelope spectrum of non-white vibration signals[J]. Mechanical systems and signal processing, 2013, 40(1):38-55.
- [159] 唐学来. 基于排列熵在航空轴承故障诊断中的应用及有限元分析[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2018.
- [160] 陆超, 李晓瑜, 孙婧博. 基于 IoTDB 的航空发动机试验数据清洗与升维方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2023, 36(3):38-42.
- LU Chao, LI Xiaoyu, SUN Jingbo. Aero-engine test data cleaning and dimension increasing methods based on IoTDB[J]. Gas turbine experiment and research, 2023, 36(3):38-42(in Chinese).
- [161] 阳为民, 袁野, 张清宇. 基于大数据与机器学习的航空发动机故障诊断技术研究[J]. 内燃机与配件, 2025(11):103-105.
- YANG Weimin, YUAN Ye, ZHANG Qingyu. Research on aircraft engine fault diagnosis technology based on big data and machine learning[J]. Internal combustion engine & parts, 2025(11):103-105(in Chinese).
- [162] 毕得铨. 基于深度学习的航空发动机健康状态评估和剩余有效使用寿命研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2025.
- [163] 李兴球. 航空发动机健康信息深度融合与智能诊断方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2022.
- [164] 丁简. 基于灰色相似多尺度匹配的航空发动机剩余寿命预测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2024.
- [165] 李思雨, 程中华, 岳光, 等. 基于数字孪生的航空发动机故障预测与健康管理工作研究综述[J]. 兵工自动化, 2025, 44(9):6-12.
- LI Siyu, CHENG Zhonghua, YUE Guang, et al. Review of aero-engine fault prognostics and health management technology based on digital twin[J]. Ordnance industry automation, 2025, 44(9):6-12(in Chinese).
- [166] 宋辉, 李晓明, 宋文波. 航空发动机健康评估技术综述[J]. 航空发动机, 2011, 37(2):58-62.
- SONG Hui, LI Xiaoming, SONG Wenbo. Review on aeroengine health assessment technology[J]. Aeroengine, 2011, 37(2):58-62(in Chinese).
- [167] 周林, 赵杰, 冯广飞. 装备故障预测与健康管理工作[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
- [168] 王亮, 吕卫民, 李伟, 等. 复杂系统健康状态评估技术现状及发展[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4):830-832.
- WANG Liang, LÜ Weimin, LI Wei, et al. Status and perspectives of health condition assessment for complex system[J]. Computer measurement & control, 2013, 21(4):830-832(in Chinese).
- [169] 黄山山, 祝唯, 王亚东, 等. 基于负载率和健康状态的高压 XLPE 电缆可靠性评估模型[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24):42-49.
- HUANG Shanshan, ZHU Wei, WANG Yadong, et al. Development of high voltage XLPE cable reliability assessment model based on load rate and health status[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2017, 54(24):42-49(in Chinese).
- [170] 赵丽琴, 刘昶, 曹明生, 等. 复杂装备健康度评估方法研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11):1-7.
- ZHAO Liqin, LIU Chang, CAO Mingsheng, et al. Review of health assessment methods for complex equipment[J]. Computer measurement & control, 2021, 29(11):1-7(in Chinese).
- [171] 李加兴. 齿轮箱振动信号特征提取与健康评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
- [172] 宋登巍, 吕琛, 齐乐, 等. 基于健康基线和马氏距离的液压系统变工况健康评估[J]. 系统仿真技术, 2017, 13(3):201-208.
- SONG Dengwei, LÜ Chen, QI Le, et al. Performance assessment of hydraulic system based on health baselines and mahalanobis distance in variable conditions[J]. System simulation technology, 2017, 13(3):201-208(in Chinese).

(编辑 黄崇亚 张璐)