

军用航空发动机气路故障诊断技术进展

李大为^{1,2}, 王奕首¹, 李 军², 谢业平², 张博文², 夏迺豪²

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建厦门 361005; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 随着航空发动机健康管理系统中气路故障诊断技术的日趋进步, 从提高飞行安全性及降低视情维修成本的角度出发, 越来越多的军用航空发动机在研发过程中更聚焦于气路故障诊断设计。为了提升发动机工作安全性, 系统梳理了国内外军用航空发动机气路故障诊断技术的发展历程, 并按 4 个阶段对技术特征进行总结归纳。核心研究了基于数学模型、数据驱动和信息融合的气路故障诊断的一般方法和各自方法的优缺点, 并提出了军用航空发动机气路故障诊断的关键技术, 针对先进军用变循环发动机的特点和需求, 给出了军用发动机气路故障诊断设计工程上应分阶段实施、利用机载实时模型开展不可测参数与可测参数关联研究、加强模式转换等过渡态气路故障诊断设计、辩证地处理控制系统和健康管理系统的功能分配关系等, 可供中国未来开展自适应循环发动机的气路故障诊断设计时参考。

关键词: 气路故障诊断; 健康管理; 军用航空发动机; 自适应循环发动机

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.06.001

Review on Gas Path Fault Diagnosis Technology for Military Aeroengine

LI Da-wei^{1,2}, WANG Yi-shou¹, LI Jun², XIE Ye-ping², ZHANG Bo-wen², XIA Er-hao²

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361000, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: With the advancement of gas path fault diagnosis technology in the aeroengine health management system, more and more military aeroengines focus on gas path fault diagnosis design in the development process from the perspective of improving flight safety and reducing condition-based maintenance cost. To enhance the safety of engine operation, this paper systematically reviews the evolution of gas path fault diagnosis technology for military aeroengines at home and abroad and summarizes the technical characteristics in four stages. The research focuses on the general methods and their pros & cons of model-based gas path fault diagnosis, data-driven gas path fault diagnosis, and information fusion gas path fault diagnosis. Key technologies of gas path fault diagnosis for military aeroengines are proposed, and the development trends are discussed, including conducting research on the correlation between unmeasurable parameters and measurable parameters using onboard real-time models, strengthening gas path fault diagnosis design in a transient state such as mode conversion, and rationally handling the function allocation relationship between the control system and the health management system. At the same time, in response to the characteristics and requirements of advanced military variable-cycle engines, suggestions for phased implementation of gas path fault diagnosis design during engineering development are provided. It can provide references for China's future development of gas path fault diagnosis design for adaptive cycle engines.

Key words: gas path fault diagnosis; health management; military aeroengine; adaptive cycle engine

0 引言

军用航空发动机是复杂的热力旋转机械系统, 具有“4高”混合的运行环境特点, 即工作温度高、压力高、转速高和工作应力高。与民用发动机相比, 军用发动机具有工作参数范围宽及工作参数变化剧烈等

特点, 因此, 发动机性能和结构件极易出现各种退化和故障, 需要适当监控, 以提前发现故障或故障趋势, 并发出告警及采用维修处置措施, 从而保障飞行安全。因此, 故障诊断、预测和健康管理(Prognosis & Health Management, PHM)技术应运而生, 可提高发动机安全性、维修性, 实现发动机适情维修。通过及时

收稿日期: 2024-06-11 基金项目: 国家级研究项目资助

作者简介: 李大为(1981), 男, 在读博士研究生, 自然科学研究员。

引用格式: 李大为, 王奕首, 李军, 等. 军用航空发动机气路故障诊断技术进展[J]. 航空发动机, 2024, 50(6): 1-12. LI Dawei, WANG Yishou, LI Jun, et al. Review on gas path fault diagnosis technology for military aeroengine[J]. Aeroengine, 2024, 50(6): 1-12.

维修间接避免发动机故障换件,从而降低发动机的运行成本^[1-3]。发动机故障类别从不同维度出发有多种划分。按照寿命周期维度,存在短期的突变故障和长期衰退磨损故障^[4];按照发动机设计专业维度,则存在气路流道故障、振动故障、滑油故障和疲劳故障等^[5]。据统计,85%以上发动机故障是由气路流道引起的^[6],因此,气路故障诊断是发动机健康管理(Engine Health Management, EHM)系统的最核心、最重要的组成部分。同时,军用发动机由于受到隐身、推重比等特有需求导致的结构尺寸等限制,可安装的测试传感器数量有限,而测试参数工作范围较大(飞行包线往往比民机的大),对机载传感器可靠性要求更高,增大了发动机气路故障诊断设计难度,因此,更应该加强对发动机气路故障诊断设计研究。本文的气路故障诊断指的是航空发动机结构件包含最多、负荷环境最恶劣的主流道气路,不包括滑油、振动等系统的故障诊断。

在20世纪60年代,Urban首先开展了气路分析工作^[7],随后T700^[8]、F404-GE-400^[9]、F100^[10]、F119^[11-12]、EJ200^[13]、AL-41F1S^[14]、F135^[15-16]等军用发动机先后增加了气路故障诊断设计,主要根据设计经验及数学模型实现了少数单稳态工况的气路故障诊断功能,而缺少对于过渡态、全寿命周期的气路故障诊断。鲁峰等^[17-18]、张丽^[19]开展了数据驱动、信息融合等先进气路故障诊断方法研究,但工程化实现仍不理想。

本文梳理了国内外军用航空发动机健康管理系统中气路故障诊断设计发展历程,归纳总结军用航空发动机气路故障诊断设计的一般方法和关键技术,并针对工程化不足的现状,结合先进军用自适应变循环发动机特点,给出了气路诊断设计工程化建议。

1 气路故障诊断历程及现状

1.1 气路故障诊断相关标准简述

早期的气路故障诊断一般表现为发动机控制系统的监控功能,发动机维护也是预设好的定期维护。随着健康管理技术的发展及视情维护等需求,气路故障诊断逐渐从控制系统中独立出来,成为健康管理系统中的重要组成部分和研究热点,并建立专门用于气路故障诊断及存储的调节器,研究目标侧重于提高发动机安全性、降低维护和运营成本^[20-21]。民用航空发动机由于注重运营成本因素,更早地研究气路故障诊

断及健康管理并进行验证,目前已形成较为全面的健康管理或气路故障诊断相关标准,如SAE AIR 5120A-2016^[22]、ISO 13374^[23]等。相比之下,军用航空发动机健康管理或气路故障诊断标准暂未见公开发表,仅是从安全性监控角度在测试系统章节提出了相应要求,如MIL-E-5007E^[24]、JSGS-87231A^[25]、JSSG-2007A^[26]、GJB 241A-2010^[27]、GJB 242A-2018^[28]等相应的测试章节。目前,军用航空发动机健康管理系统缺少与发动机设计、制造、全寿命周期的运维之间的协同设计,随着发动机对经济成本因素的关注,面向视情维护的气路故障诊断也愈受重视,研究越来越深入。从公开资料来看,F35联合攻击机、阵风战斗机、T-50飞机、P-8A多任务预警机、UCAV无人机、C-130运输机、UH-60“黑鹰”直升机等飞机均开展了发动机健康管理中的气路故障诊断设计和验证研究^[14],后续应建立相关军用发动机健康管理气路故障诊断的标准,如气路故障级别标准、性能趋势预测标准、寿命预测标准、性能模型建立标准等工程型号中亟需解决的标准。

1.2 军用航空发动机气路故障诊断技术发展历程

1967年,Urban开创了气路分析法^[7],将发动机非线性故障模型简化为线性数学模型,提出故障影响系数矩阵诊断方法。同时期,RR公司设计的MK202发动机实现了滑油系统的相关参数监测^[7],这是航空发动机首次将故障诊断概念融入发动机设计过程中。

20世纪70年代,随着发动机装机传感器数量的增多,例如发动机排气温度、主燃油流量等主流道的测试参数,可用于故障诊断的监控参数越来越多。美国GE公司设计的T700发动机通过控制系统实现了发动机个别状态监视,可以完成少数部件系统的单参数故障诊断。T700发动机的控制系统由电子控制单元(Digital Electronic Control Device Unit, DECDU)和液压机械装置(Hydrodynamic Mechanical Unit, HMU)组成,可以实现部分性能参数的监控功能,同时增加了1个数据记录设备^[8]。1979年,GE公司设计的F404-GE-400涡扇发动机在控制系统中通过10个相关参数的测试和检查,可以实现发动机监视和寿命跟踪功能^[9]。综上所述,此时期的健康监测功能是由控制系统完成,监测主要是对发动机个别可测的工作参数极值进行判断,数据记录设备记录的数据在离线状态下并未被利用分析。

20世纪80年代,随着数字式电子控制器技术的突飞猛进,采用数字调节器开展发动机全状态参数监控得到推广。英国整合前期开发的状态监控系统(Engine Unit Monitoring System, EUMS)和低循环疲劳计数器(Low Cycle Fatigue Counter, LCFC)升级成为面向发动机机群的寿命状态监视诊断系统,对发动机关键件进行监控^[8]。1982年,美国PW公司在F100发动机控制系统中集成了数字电子控制器,其中电路板中特别设置发动机诊断单元(Engine Diagnostic Unit, EDU),通过37个信号实现了状态监视功能,F100发动机气路诊断监测参数^[9-10]如图1所示。俄罗斯在米-8直升机的TB2-117A等发动机平台上将故障诊断与发电机性能进行关联;RD-33、AL-31F发动机在模拟式综合调节器(控制器)上也实现了发动机状态监视和告警功能^[14],具体包括发动机气路性能、滑油系统、燃油系统的相关诊断。综上所述,此时期的气路故障诊断仍仅是由控制系统电子控制器完成,但已经出现独立诊断的电子控制单元模块,但记录的数据仍未从时间维度串联起来进行应用,控制器也无实时计算的数学模型。

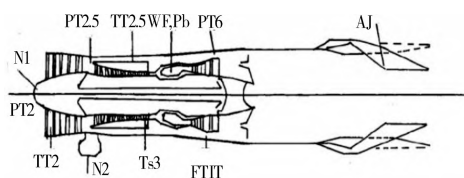


图1 F100发动机气路诊断监测参数

20世纪90年代,气路故障诊断技术得到了跨越式发展,美国先进联合攻击机F22配装的F119发动机

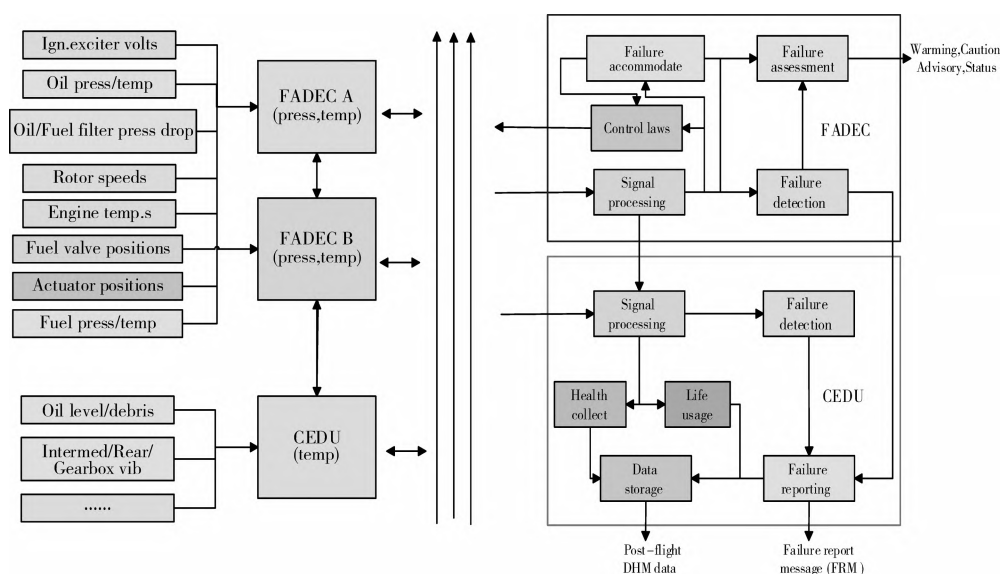


图2 F119发动机气路故障诊断架构

在设计时,正式提出健康管理气路故障诊断概念,其气路诊断功能由控制系统(Full Authority Digital Engine Control, FADEC)和健康管理诊断单元(Comprehensive Engine Diagnostic Unit, CEDU)共同实现,硬件分为机载实时系统和地面支撑保障系统。机载实时系统内置性能计算模型(STORM模型),可以实现发动机参数监控、故障诊断及隔离等功能,同时可以向飞行员发送告警信号、向地面维护人员发送维护建议信息。CEDU可以实时诊断发动机起飞和巡航稳态的健康诊断,可以自动记录故障前、中、后的快照数据,F119发动机气路故障诊断架构如图2^[12,14]所示。EJ200发动机健康管理系统分为机载实时系统和地面支撑保障系统,前者可以记录发动机稳态特征参数,同时可以实时计算发动机推力修正量;后者对空中存储的数据进行更详细的分析,包括用于故障预测的性能退化趋势分析和寿命预测等。EJ200发动机气路故障诊断逻辑如图3^[13]所示。配装T-50歼击机的AL-41F1S(也称117S)发动机是在AL-31F发动机基础上采用数字式电子调节器(控制器),并升级了故障诊断功能,可以实现性能、振动、寿命的诊断^[14]。综上所述,此时期的气路诊断已经专门设置了电子调节器(CEDU)进行逻辑诊断,同时测试参数数量也有大幅度增加,发动机设置了实时计算的数学模型,可以实现根据某一具体飞行状态进行实时的气路故障诊断。同时,设置了地面离线系统,可对发动机历史数据进行分析,实现了全生命周期的性能预测功能。

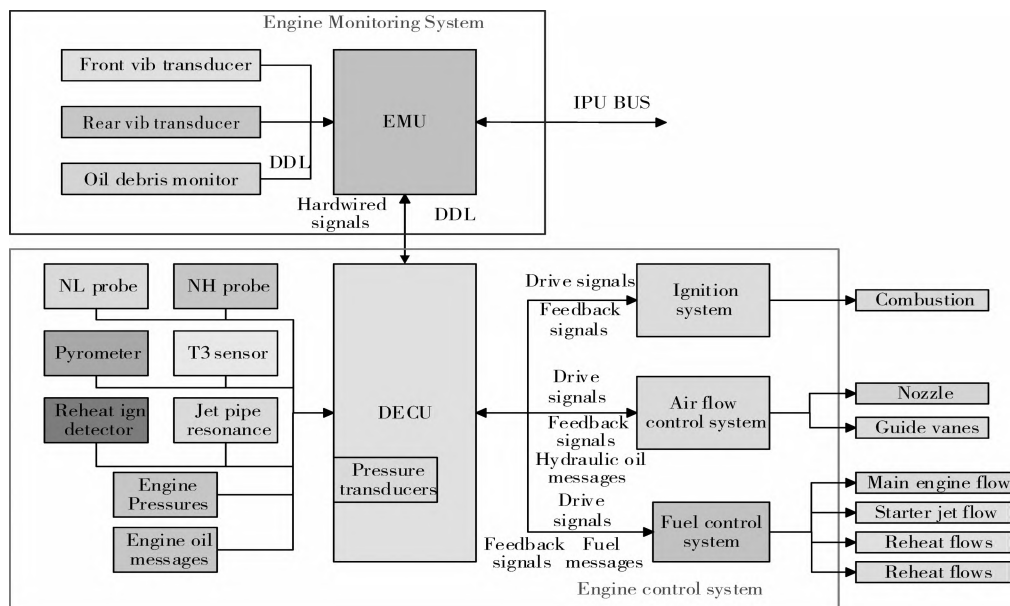


图3 EJ200发动机气路故障诊断逻辑

21 世纪,代表气路故障诊断技术最高水平的发动机为PW公司的F135发动机,其PHM系统沿用了F119发动机的架构,由双FADEC和CEDU组成。汉胜公司新研发了进气碎屑检测系统(Ingested Debris Monitoring System, IDMS)和排气碎屑检测系统(Exhaust Debris Monitoring System, EDMS),专门用于气路监控。F35飞机气路故障诊断硬件配置如图4所示。同时,将机载实时系统内置性能计算模型(ESTORM模型)进行了升级,可以根据发动机飞行中的故障进行性能自适应工作状态的调节,并可以将数据实时传送到基地的地面系统,实现了基于状态的维修(Condition Based Maintenance, CBM)^[15]。NASA开发了基于传感数据层、特征层和决策层3层信息融合

的故障诊断算法,并应用于F117发动机的PHM系统^[16]。GE公司开发了基于特征级提取和融合的智能算法,并应用于F136发动机,实现了故障检测和寿命预测功能^[4]。综上所述,此时期的气路故障诊断系统架构参照上个时期基本未发生太大变化,主要是软件算法随着大数据、智能技术发展得到了提高。同时,针对与常规构型不同的新研部件(如升力风扇、偏转喷管)对使用场景的要求(近地面进排气需求),开发专门的气路故障诊断单元和测试,但并未对过渡态等典型状态进行诊断。

与国外相比,中国在发动机健康管理系统中的气路诊断技术起步较晚,其中自主研发的现役航空发动机,通过控制系统可以实现发动机重要参数的监控和

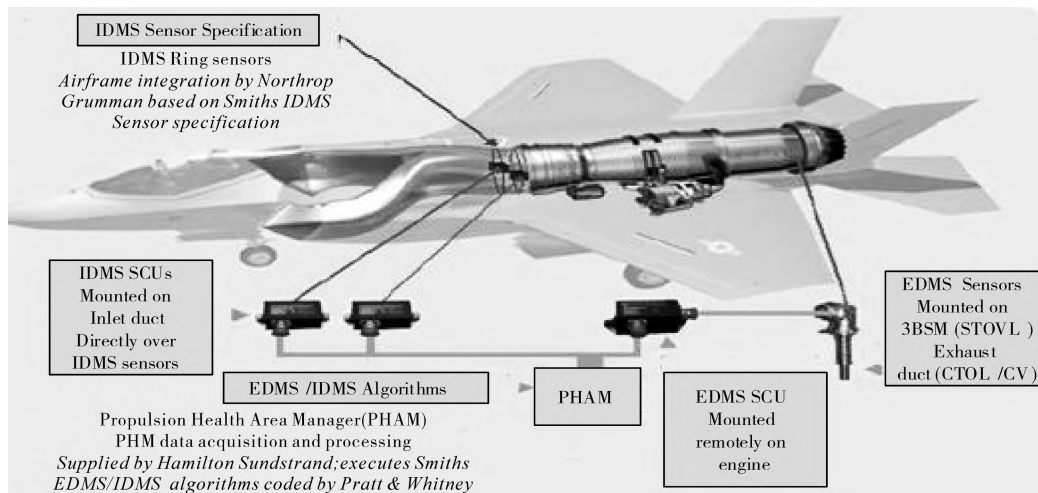


图4 F35飞机气路故障诊断硬件配置

定期的维护保障,尚不具备故障诊断及隔离功能。但结合相关先进发动机研制工作,已开展了气路故障诊断关键技术的工程化研究^[21-22]。

1.3 小结

通过前文梳理不难看出,军用航空发动机气路故障诊断技术已由控制系统中单一模块简单监视逐步扩展到基于专用处理器的按状态实时计算与监控。从单参数监控逐步扩展到多参数联合故障诊断,再到全生命周期故障诊断。每个阶段工程项目都有典型的技术特征。本文按 4 个阶段进行技术特征总结划分,具体的气路故障诊断技术发展历程如图 5 所示。从图中可见,萌芽阶段(第 1 阶段):气路故障诊断技术特征归纳为在控制系统中具备单一超限参数的诊断功能;成长阶段(第 2 阶段):在控制系统中设置专门模块进行多参数的联合运算,监控发动机参数全包线范围极值,从而实现关键系统的故障诊断;初步成形阶段(第 3 阶段):气路故障诊断分为机载和地面系统,并设置单独处理器实现更为复杂的多参数联合实时运算,可以具体识别单一飞行状态并进行更精准的诊断,地面系统实现了全生命周期内的性能及寿命预测;发展成熟阶段(第 4 阶段):在机载和地面系统框架不变的基础上,诊断和预测算法融入了更多大数据分析和智能融合算法,升级了专门用于诊断的计算模型,并可实现多个稳定状态的诊断和预测,同时针对不同于常规构型的部件进行有针对性的设置故障诊断单元(如升力风扇和偏转喷管工作环境的监控要求),并将诊断信息通知给飞行员及地面维护人员。

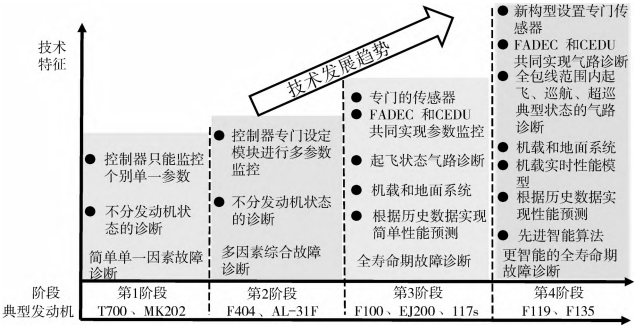


图 5 气路故障诊断技术发展历程

2 气路故障诊断及关键技术

2.1 气路故障诊断方法

气路故障诊断是利用发动机可测参数或基于测试参数的计算结果与所谓的“健康状态标准”进行对

比,从而判断发动机运行状态或未来运行状态可能出现的故障,并将故障定位到可隔离更换的部件,便于第一时间采取相应的维修措施,降低故障发生的可能性,同时也可降低维护成本。气路故障诊断机理如图 6 所示。从图中可见,航空发动机故障产生原因包括外物侵入、气动热烧蚀、使用磨损等多种因素,可归纳为短期作用因素和长期作用因素 2 类。这将直接导致发动机结构件或结构件间尺寸发生变化,进而导致发动机性能退化,这些性能变化将在发动机可测参数上显性化表示,设计人员根据故障诊断判据与测试参数变化进行比较,实现基于状态的维修。

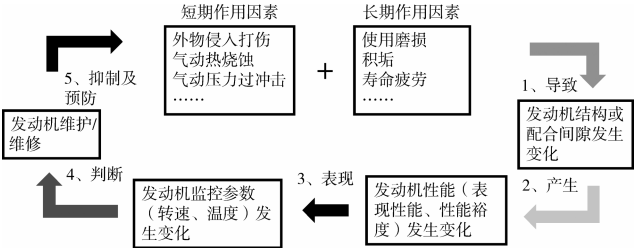


图 6 气路故障诊断机理

在整个气路故障诊断过程中,可以用 5 个环节进行概括(图 6)。依据测试参数对象、对比的“健康标准”^[29-30]、诊断算法^[31]、过程方式^[32]等不同维度,气路故障诊断方法也有多种划分,气路故障诊断方法分类见表 1,其中也有交叉重合的部分,随着大数据、数字孪生技术的发展,越来越多的人工智能算法融入发动机数学模型和数据分析模型中,信息融合技术逐步工程化成熟。本文倾向按照“健康标准”产生方式将气路故障诊断方法分为 3 类,即基于数学模型的气路故障诊断、基于数据驱动的气路故障诊断,以及基于信息融合的气路故障诊断。

表 1 气路故障诊断方法分类

种类	划分依据	气路故障诊断方法
传统故障诊断 ^[31]	检查过程方式	外观检查、故障树诊断、故障矩阵诊断
现代故障诊断 ^[32]	故障诊断算法	基于模型、信号、知识、智能化的诊断
气路故障诊断 ^[33]	健康标准产生方式	基于模型、数据、信息融合的诊断

2.1.1 基于数学模型的气路故障诊断

基于数学模型的气路故障诊断方法是指将航空发动机用数学模型进行表达,将发动机测试参数与数学模型计算结果进行对比,从而判断气路故障是否发生。数学模型可分为线性模型和非线性模型。其中,

线性模型又进一步分为参数估计和状态估计2种,基本原理是把发动机状态或参数用线性模型进行表达,同时采用参数辨识方法计算健康标准,应用较多的是卡尔曼滤波法。陈大光等^[34]采用基于线性模型的小偏差法建立了初期发动机故障诊断模型,实现了故障识别。范作民等^[35-36]从故障因子及线性分段方面深入研究了线性模型,表明计算精度和收敛时间均达到了不错的效果。非线性模型是将发动机状态用非线性模型进行表达(常见的是发动机部件建模法),对测试参数与模型计算结果进行比较。当差值在置信区间内时,则求解最优解,再选出差值最小的那组解,从而判断故障发生的概率,应用较多的是扩展卡尔曼滤波法、增强的卡尔曼滤波法。由于发动机是典型的非线性系统,因此,该方法生成的健康标准更为准确,但计算速度和计算结果存储对硬件的要求较线性系统更高,也限制了机载系统实时计算的应用。1995年,Cranfield大学Urban等^[37]开发了Pythia软件,实现了发动机非线性气路故障诊断。时至今日,为了大幅缩短诊断时间,仍然有学者探索更具针对性的非线性模型算法设计,如基于变权重的最小二乘法、基于Sigma点卡尔曼滤波、数学模型与粒子群和BP神经网络等算法融合^[38-39]。

2.1.2 基于数据驱动的气路故障诊断

由于发动机是典型的非线性系统,其制造公差、性能衰减和传感器测试误差等因素都会对数学模型计算结果产生较大影响,因此,很难用准确的数学模型来精准的表达发动机全生命周期气路性能参数演变。基于数据驱动的故障诊断方法可以一定程度上解决该问题,它不需要准确的数学模型,只需利用专家经验和已发生的故障数据进行训练和学习,就可以以较高的准确率实现发动机气路故障诊断。常用的

方法包括人工神经网络法、机器学习、多元统计分析、专家系统方法、模糊推理方法、支持向量机和极限学习法等。鲁峰等^[38-39]、Zhou等^[40-42]分别建立基于数据驱动的故障诊断模型,实现了故障预测。张光明^[43]采用共轭梯度法和比例共轭梯度法,解决了神经网络容易陷入局部最小值的问题。任茹菲^[44]提出了基于数据驱动的主元分析算法,有效地解决了测试不确定性。

2.1.3 基于信息融合的气路故障诊断

信息融合的工作原理是利用多个传感器观测信息,把多个传感器在时间或空间上的冗余或互补信息进行组合或融合,获得被测对象的一致性解释或描述,是信息综合处理过程。常用的融合包括数据融合、特征融合、决策融合等方式^[45-46]。目前用于航空发动机气路故障诊断的信息融合方法主要有贝叶斯融合、DS证据融合、智能融合、模糊融合、集成融合等^[47-49],数学工具包括概率论、推理网络、模糊理论和神经网络等^[50-52]。尹晓静^[33]建立了多种基于置信规则的发动机气路故障健康状态评估模型,有效地解决了模型的准确性问题。鲁峰^[18]以模型和数据为基础,提出在数据链路的决策层构建蜕化参数模糊化的D-S,有效地解决了建模误差和噪声、样本导致的测量误差高等问题。李大为等^[52]、鲁峰^[53]对发动机数据格式及规范化进行了相应研究。赵姝帆等^[54]、王奕首等^[55]分别在基于数据的基础上结合先进优化算法,使模型的计算精度显著提高、计算时间显著缩短。

2.1.4 小结

基于数学模型诊断、基于数据驱动诊断都有各自的优缺点,没有哪种方法拥有绝对的优势。气路故障诊断方法优缺点对比见表2。基于信息融合的诊断可以通过设置数据层、特征层、决策层不同层级的估

表2 气路故障诊断方法优缺点对比

诊断算法	优点	缺点	应用场景
基于数学模型诊断	可以进行定性和定量的故障诊断;模型复杂度较低,计算时间较短。	需要准确的数学模型(模型需考虑测量噪声和传感器偏差等);需要大量的试验数据进行验证。	适用于相对成熟发动机的机载实时诊断。
基于数据驱动诊断	可以处理传感器噪声和测量偏差;能够使用数量有限的测量参数以及测量参数和性能参数之间的关系进行故障诊断。	需要大量的数据样本及训练时间进行训练;容易出现局部最优解且需要人工干预;计算速度较慢、计算周期较长。	适用于相对成熟发动机后期地面离线系统(拥有大量故障数据)。
基于信息融合诊断	可以提高多源数据的准确性;可以降低数据的不确定性;计算速度和精度均适中。	需要可靠的专家经验;需要一定的试验数据进行验证。	适用于先进发动机采用特征级提取和融合研制过程。

计分析融合,改善多源测试数据的冗余性,提高数据间互补性,并融合数学模型和数据驱动的权重决策,实现对发动机的气路故障诊断,从而降低气路故障诊断的虚警率和漏检率,提高诊断精度。越来越多的学者和工程设计人员投入精力开展信息融合的故障诊断技术研究,同时F135和F136等先进军用发动机PHM系统中均应用了信息融合诊断技术。因此,未来趋势将是基于模型和数据的信息融合的气路故障诊断^[56-58]。

2.2 气路诊断关键技术

从第2.1节中可见,工程型号上无论采用何种方

法进行气路故障诊断,都可用数据采集(Data Acquisition, DA)、数据处理(Data Manipulation, DM)、状态检测(State Detection, SD)确认、健康评估(Health Assessment, HA)确认、预测评估(Prognostic Assessment, PA)确认、维修建议(Maintenance Recommendation, MR)6个典型过程进行描述,气路故障诊断处理过程如图7所示。在各典型过程中包含传感器设计、模型建立、数据处理算法等不同维度的技术,综合上述国内外气路故障诊断分析及先进发动机需求,从工程化角度提出如下关键技术。

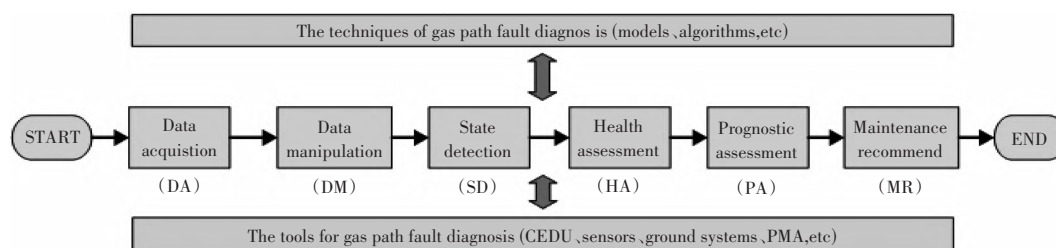


图7 气路故障诊断处理过程

2.2.1 增加过渡态故障诊断

现有的气路故障方法大多是先识别发动机稳态工作的状态,然后采取不同的算法对发动机进行气路故障诊断,但对于过渡态过程诊断却研究较少。对于先进的军用航空发动机来说,由于高机动性要求,过渡态工作过程在飞行任务中占有较大比例;对于变循环发动机,流路几何面积调节更是增加过渡态过程复杂性。同时,对于发动机油门角度不变时,随着高度、表速不断变化,发动机工作点处于非稳态工作。上述过程中发动机转速、温度、压力等参数均随时间剧烈变化,产生故障的可能性才是最大的。因此,对于军用航空发动机来说,典型过渡态气路故障诊断是不可或缺的。例如:全包线范围内包含加减速、遭遇加减速、加力接通/切断、变循环模式转换等多种形式,如何在全包线范围内开展发动机过渡态状态识别及挑选过渡态过程故障特征参数(如时间、转速升高率、加速油量等)作为健康标准判据评估亟需解决;另一方面,对于过渡态过程中大惯性介质、小时间常数等建模及过渡态测试数据的小波分析等算法处理也是未来研究的重点^[59-61]。

2.2.2 建立综合“健康标准”

精准的发动机数学模型是制定发动机健康标准的最关键因素,除了自身精准的气动热力学数学模型

外,还应考虑2种因素:(1)随时间变化的全寿命期发动机性能变化,即性能衰减;(2)由于生产制造产生的发动机个体差异表现出来的性能差异及测试环境误差。对于变循环发动机来说,由于可调变量增多,对性能状态影响更大。上述2种因素又相互作用影响发动机数学模型的准确性。为此,从工程角度可以采取热力模型+试验特性录取的方法来解决。一方面,可通过鉴定过程试验数据来修正性能衰减模型的准确性。另一方面,当技术鉴定后,新发动机出厂装机后可进行典型状态性能录取,建立个体发动机性能基线数据,在每一台基线数据模型基础上进行故障诊断判据设计,消除测试偏差等带来的影响,从而建立更加精准的气路诊断健康标准。

2.2.3 发展基于信息融合的算法

基于数学模型和基于数据驱动的气路诊断方法发展到一定程度均有其局限性。随着军用发动机技术不断进步,发动机工作温度、压力、应力、过载范围不断增大,发动机部件之间及部件与系统之间相互耦合越来越紧密,大大增加了发动机数学模型的复杂程度。此外,基于数据驱动的气路诊断过度依赖已有故障数据和专家经验,对于未发生过的故障却无法准确判断。综合上述2方面的特点,应大力发展基于信息融合的气路故障诊断。一方面,可以使诊断方法具有

较好的原理可解释性,通过专家经验与数学模型的结合,更好地反映发动机的物理性质,增加诊断结果的可信度;另一方面,数据信息的融合丰富了诊断系统的数据集,提高了获取信息的综合能力,为测量参数有限条件下的航空发动机气路故障诊断提供了支撑。

3 发展趋势

军用航空发动机经过近70年的发展,伴随着相关学科技术的不断进步,推重比、涡轮前温度、单位推力等性能指标逐步提高,未来先进发动机涡轮前温度预计将达到2200 K甚至更高。但涡轮叶片材料及冷却技术仍赶不上整机指标的增长速度。为了充分发挥涡喷、涡扇发动机等基本构型发动机的优势潜力,变循环发动机应运而生,从美国公布6代机选型动力XA100和XA101来看,未来先进军用航空发动机大概率是自适应变循环发动机,RR公司、土耳其和日本等的相关公司也相继开展了变循环发动机研制^[62]。未来军用变循环航空发动机气路故障诊断设计在工程型号上可以从以下几方面进行。

3.1 气路故障诊断设计工程化分阶段实施

对于变循环发动机而言,系统的复杂度不再是常规涡扇发动机与涡喷发动机叠加那样简单,因此,很难获得准确的数学模型。从国外公开资料来看,需要针对核心机驱动风扇、涵道引射器及变几何低压涡轮等部件有针对性的建立模型和特性研究,如涵道引射器特性表现形式(涵道比、压比、换算转速等关系)开展研究,方便发动机热力模型计算精准及收敛速度。参考F135发动机对新研部件的设计经验,变循环发动机应针对核心机驱动风扇、涵道引射器等新构型部件及容易出现故障的关键件,在考虑具体使用场景的条件下开展监控测试及故障针对算法研究,如变循环模式转换过程中代表涵道比参数变化的特征参数研究。由于在发动机研发阶段,无法获得足够已验的样本数据进行数据训练,因此,在气路故障诊断工程设计应分前后期2个阶段开展,前期以型号设计的稳态、过渡态计算模型为主,建立“热力模型+试验特性”录取的综合健康标准,开展气路故障诊断判据及阈值的训练;后期当发动机已验证数据积累到一定程度,则重点开展“基于模型+数据”的信息融合气路故障诊断设计,并将此技术路线固化在发动机技术状态管理中。

3.2 机载系统中不可测参数与可测参数特征关联

军用发动机由于质量及安装尺寸的限制,无法根据原始需求有针对性的安排测试传感器,同时由于涡轮叶片、加力燃烧室等高温高压工作且容易出现故障部件更需要测试参数进行监控。因此,需要借助机载模型实时计算结果间接判断易出现故障部件的工作情况。在全包线范围内,需要依据不同发动机典型状态,开展可测参数与不可测参数特征映射关联研究,通过敏感度分析找到可测参数与不可测参数强关联关系,利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)等理论建立气路故障判据,如利用涡轮出口温度、燃油流量、转速等组合参数计算式间接判断涡轮工作参数等方法。

3.3 开展过渡态气路故障诊断设计

针对军用航空发动机过渡态占比高的特点,在模式转换过程易回流、失速,加减速过程中发动机气动稳定性不足,加力通断过程中压力脉动、振荡燃烧等故障频发场景,开展典型过渡态状态判据设计。针对可测参数,开展状态特征参数应考虑过渡态测试传感器延时影响,同时应加大过渡态模型精细化建设,开展动态仿真算法平衡方程优化,动态过程部件特性的插值计算、容腔设定计算等技术研究。此外,还应根据不同测试范围热电偶惯性差异,开展过渡态过程测试信号的补偿、小波分析等处理方法研究,从而提高过渡态过程参数测试的准确性和及时性。

3.4 辩证处理FADEC与CEDU的功能分配

美国F119和F135发动机气路故障诊断是由FADEC与CEDU共同实现的,其中,FADEC主要实现控制规律及部分故障诊断后重构处理功能;而CEDU则实现部分数据处理、故障诊断、信息报告生成、数据存储等功能。目前,二者之间并无绝对功能界限划分,也无相关理论或标准指导工程设计。考虑到先进军机普遍设置机载模型,根据传感器测试数据实时进行计算,FADEC与CEDU任何1个处理器均能实现控制、故障诊断等功能。为避免工程项目上功能设置重复、节省空间和质量的综合考虑,可对CEDU和FADEC进行功能分工。FADEC只负责发动机的控制(包括故障后的重构控制),CEDU只负责故障诊断和趋势预测,同时将诊断结果实时发送给FADEC,进行故障重构控制,实现二者之间无功能上的交叉。

3.5 加强协同设计

军用发动机在外场服役过程中,经过清洗、单元体更换等维护后,性能水平会一定程度得到提高,本应在机载模型中应得到体现,特别是定量影响的数学模型,但目前暂未见相关公开资料指导工程型号开展研发,也未见相关使用维护机载模型。因此,急需在航空发动机数学模型中开展适情维护数字化建设,特别是机载模型需结合发动机制造、装配过程的数据,如:(1)发动机清洗叶片后,压缩部件效率提高具体数值;(2)某外场可更换单元新件状态与一定工作时数后状态参数理论的变化情况,是否需要外场发动机动态工作校准等方面。随着国家数字工程的实施,更有必要在工程项目气路故障架构设计中考虑适情维护数字化协同设计。

3.6 加强工程应用转换

从上述分析可见,基于信息融合的气路故障诊断已开展了较为广泛的理论研究,虽取得了一定的基础理论研究成果,但普遍存在理论与工程应用脱节,缺乏工程数据支持和试验验证等缺陷。融合诊断需要以基于模型和基于数据的方法为基础,进行传感数据级、数据特征级和决策级等不同层级的融合,扩大传感器获取数据范围,提高测试结果可靠性,降低信息的不确定性,改善置信度,提高决策能力。基于融合算法的气路故障诊断如图8所示。在气路故障诊断设计时,需要系统地进行需求分析,针对工程变循环发动机应根据表征部件性能、功能的强关联参数进行传感器数据选择,结合数学模型的实时计算能力安排特征参数运算,并且结合大量工程数据对算法进行反复的迭代修正和测试,充分考虑发动机设计与使用过程中的不确定性因素。

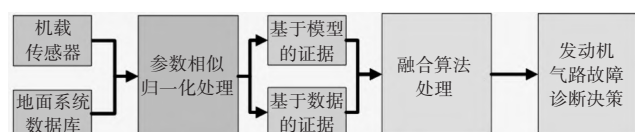


图8 基于融合算法的气路故障诊断

4 结束语

目前中国大部分军用航空发动机的气路故障诊断仍停留在基于知识或经验的诊断,对未发生过的故障具有很大的局限性。随着大数据、数字孪生技术的发展,基于模型、数据信息融合的算法将是未来的发

展方向。同时,随着健康管理系统的成熟,CEDU与FADEC的功能划分将逐步清晰,CEDU负责发动机机载和离线系统的故障诊断和预测,同时将诊断结果发送给FADEC;FADEC则更加专注发动机寻优控制及重构等功能。拥有先进气路故障诊断技术的发动机,一定会大幅提高发动机的安全性和维护成本。

参考文献:

- [1] 李少尘,陈敏,胡金涛,等.航空燃气涡轮发动机气路故障诊断进展[J].航空发动机,2022,48(2):33-49.
LI Shaochen, CHEN Min, HU Jintao, et al. A review of research progress on aircraft gas turbine engines gas path fault diagnosis[J]. Aeroengine, 2022, 48(2): 33-49. (in Chinese)
- [2] 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 I:气路、机械和FADEC系统故障诊断与预测[J].航空学报,2022,43(9):2,9-41.
CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Current status, challenges and opportunities of civil aero-engine diagnostics & health management I: Diagnosis and prognosis of engine gas path, mechanical and FADEC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 2, 9-41. (in Chinese)
- [3] 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 II: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):42-81.
CAO Ming, WANG Peng, ZUO Hongfu, 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): 42-81. (in Chinese)
- [4] 黄金泉,王启航,鲁峰.航空发动机气路故障诊断研究现状与展望[J].南京航空航天大学学报,2020,52(4):507-522.
HUANG Jinquan, WANG Qihang, LU Feng. Research status and prospect of gas path fault diagnosis for aeroengine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 52(4): 507-522. (in Chinese)
- [5] 尉询楷,李应红.航空发动机状态监控与诊断现状及发展趋势[J].控制工程,2007,14(增刊3):88-91,100.
WEI Xunkai, LI Yinghong. State and trends of aero-engine condition monitoring and fault diagnosis[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(suppl.3): 88-91, 100. (in Chinese)
- [6] Cerri G, Chennaoui L, Giovannelli A, et al. Gas path analysis and gas turbine re-mapping[C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York: ASME, 2011: 98-106.
- [7] 韩建军,张华,张瑞,等.航空发动机健康管理系统技术与标准发展综述[J].航空标准化与质量,2013(3):5-8.
HAN Jianjun, ZHANG Hua, ZHANG Rui, et al. Development of aero engine health management system technology and standards[J]. Aero-

- nautic Standardization & Quality, 2013(3):5-8. (in Chinese)
- [8] 祝青钰, 蒋觉义. 飞机健康管理标准研究综述[J]. 航空标准化与质量, 2021(6):9-12.
- ZHU Qingyu, JIANG Jueyi. Review of research on aircraft health management standards[J]. Standardization Research, 2021(6):9-12. (in Chinese).
- [9] Tikka J, Salonen T. Practical experience of neural network based fatigue life monitoring[C]//8th ICAF Symposium. Helsinki: ICAF, 2015:16-21.
- [10] Denney G. F16 jet engine trending and diagnostics with neural networks[J]. Application of Neural Networks IV, 1965, 3:419-422.
- [11] Garcia W, Bair R. F-22 force management: overcoming challenges to maintain a robust usage tracking program[C]//2006 USAF ASIP Conference. San Antonio: USAF, 2006:1-10.
- [12] Budrow B. System analysis and integration of diagnostics and health management for the F119-PW-100[R]. AIAA-98-3535.
- [13] Hörl F, Richter K. Monitoring the EJ200 engine[C]//Submitted for the proceedings of the 18th symposium, Aircraft Integrated Monitoring Systems. Berlin: Journal of engines, 1995:168-170.
- [14] 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, 2014:27-37, 29-33.
- WEI Xunkai, YANG Li, LIU Fang, et al. Aeroengine prognostics and health management[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014:27-37, 29-33. (in Chinese).
- [15] Honor P, Ari N. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM[C]//IEEE Aerospace Conference Proceeding 2006. New York: IEEE Press, 2006:155-161.
- [16] Volponi A. Data fusion for enhanced aircraft engine prognostics and health management[R]. NASA-CR-2005-214055.
- [17] 鲁峰, 黄金泉. 基于ESVR信息融合的航空发动机故障诊断研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6):982-989.
- LU Feng, HUANG Jinquan. Fault diagnosis for aero-engine based on ESVR information fusion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6):982-989. (in Chinese)
- [18] 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.
- LU Feng. Aeroengine fault diagnostics based on fusion technique[D]. Nanjing: Nanjing University of aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [19] 张丽. 基于数据的航空发动机气路故障诊断研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- ZHANG Li. Fault diagnosis of aero-engine based on data-driven technology[D]. Bei Jing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [20] 李一波, 张光明, 蒋丽英. 航空发动机气路故障诊断技术研究现状[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(3):10-15.
- LI Yibo, ZHANG Guangming, JIANG Liying. Research status of aero-engine gas path fault diagnosis technology[J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(3):10-15. (in Chinese)
- [21] Tikka J, Salonen T. Practical experience of neural network based fatigue life monitoring[C]//8th ICAF Symposium. Helsinki: ICAF, 2015:16-21.
- [22] SAE International. Engine monitoring system reliability and validity: SAE AIR 5120A-2016[S]. Washington D.C.: SAE International, 2016:6-23.
- [23] Copyright international organization for standardization. Condition monitoring and diagnostics of machines—data processing, communication and presentation—part3: communication: ISO 13374-3[S]. Switzerland: International Standard, 2012:1-8.
- [24] The Department of the USA Navy. Engine aircraft, turbjet and turbofan general specification for: MIL-E-005007E[S]. Washington D.C.: The Department of the USA Navy, 1983:165-187.
- [25] US Department of Defense. Joint services guide specification: JSGS-87231A[S]. Washington D.C.: US Department of Defense, 1995:8-9.
- [26] US Department of Defense. Department of defense joint service specification guide engines, aircraft, turbine: JSSG-2007A[S]. Washington D.C.: US Department of Defense, 1998:17-19.
- [27] 程卫华, 杨士杰, 魏德明, 等. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241A-2010[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2010:42-44.
- CHENG Weihua, YANG Shijie, WEI Deming, et al. Engine, aircraft, turbojet and turbofan, general specification: GJB 241A-2010[S]. Beijing: Armaments Department of Central Military Commission, 2010:42-44. (in Chinese)
- [28] 易军, 单晓明, 何峻, 等. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB242A-2018[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2018:42-44.
- YI Jun, SHAN Xiaoming, HE Jun, et al. Engine, aircraft turboprop and turboshaft engine: GJB 242A-2018[S]. Beijing: Armaments Department of Central Military Commission, 2018:42-44. (in Chinese)
- [29] 王晓峰, 毛德强, 冯尚聪. 现代故障诊断技术研究综述[J]. 中国测试, 2013, 39(6):93-98.
- WANG Xiaofeng, MAO Deqiang, FENG Shangcong. Review on modern fault diagnosis technologies[J]. China Measurement and Test, 2013, 39(6):93-98. (in Chinese)
- [30] 缙林峰, 马静, 郑华, 等. 航空发动机控制系统故障诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2022:6-8.
- GOU Linfeng, MA Jing, ZHENG Hua, et al. Aero engine control system fault diagnosis [M]. Beijing: Science press, 2022:6-8. (in Chinese)
- [31] 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, 2012:18-19.
- DENG Ming, JIN Yezhuang. Aero engine fault diagnosis[M]. BeiJing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012:18-19. (in Chinese)
- [32] 上海航空测控技术研究所. 航空故障诊断与健康管理技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013:12-25.
- Shanghai Institute of Aeronautical Measurement and Control Technology. Aviation fault diagnosis and health management technology[M].

- BeiJing: Aviation Industry Press, 2013: 12-25. (in Chinese)
- [33] 尹晓静. 基于半定量信息的复杂机电系统健康评估及预测方法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
- YIN Xiaojing. Health estimation and prognostics for complex electro-mechanical system based on semi-quantitative information[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [34] 陈大光. 燃气涡轮发动机的状态监控与故障诊断[J]. 航空学报, 1989, 10(6): 225-236.
- CHEN Daguang. Gas turbine engine condition monitoring and fault diagnostics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1989, 10(6): 225-236. (in Chinese)
- [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): 588-595.
- FAN Zuomin, SUN Chunlin, LIN Zhaofu. Primary factor model for jet engine fault diagnosis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(12): 588-595. (in Chinese)
- [36] 杨庆材. 基于多模型的船用燃气轮机气路故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- YANG Qingcai. Research on multiple model-based gas path fault diagnosis for marine gas turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [37] Urban L A, Volponi A J. Mathematical methods for relative engine performance diagnostics[J]. Transaction Journal of Aerospace, 1992, 101: 58-68.
- [38] 鲁峰, 黄金泉, 孔祥天. 基于变权重最小二乘法的发动机气路故障诊断[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2376-2381.
- LU Feng, HUANG Jinquan, KONG Xiangtian. Gas-path fault diagnosis for aeroengine based on variable weighted least squares[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2376-2381. (in Chinese)
- [39] 刘硕硕, 戚万领, 王志涛, 等. 基于平衡流形展开模型的航空发动机健康参数估计[J]. 航空发动机, 2022, 48(4): 414-420.
- LIU Shuoshuo, QI Wanling, WANG Zhitao, et al. Estimation of aeroengine health parameters based on equilibrium manifold expansion model[J]. Aeroengine, 2022, 48(4): 414-420. (in Chinese)
- [40] Zhou H, Huang J, Lu F. Reduced kernel recursive least squares algorithm for aeroengine degradation prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 95: 446-467.
- [41] Zhou H, Huang J, Lu F. Echo state kernel recursive least squares algorithm for machine condition prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 111: 68-86.
- [42] Zhou H, Huang J, Lu F. Parsimonious kernel recursive least squares algorithm for aeroengine health diagnosis[J]. IEEE Access, 2018, 6: 74687-74698.
- [43] 张光明. 航空发动机气路故障诊断技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2010.
- ZHANG Guangming. Research on aero engine gas path fault diagnosis technology[D]. Shenyang: Shenyang institute of aeronautical engineering, 2010. (in Chinese)
- [44] 任茹菲. 燃气轮机预测与健康管理的不关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- REN Rufe. Research on key technologies of gas turbine prognostics and health management[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [45] 刘同明, 夏祖勋, 谢洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998, 10-37.
- LIU Tongming, XIA Zuxun, XIE Hongcheng. Data fusion technology and its application[M]. BeiJing: National Defense Industry Press, 1998, 10-37. (in Chinese)
- [46] 鲁峰, 黄金泉. 基于ESVR信息融合的航空发动机故障诊断研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 982-989.
- LU Feng, HUANG Jinquan. Fault diagnosis for aero-engine based on ESVR information fusion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6): 982-989. (in Chinese)
- [47] 温迪. 基于D-S证据理论的航空发动机气路故障信息融合与FMECA分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- WEN Di. Gas path fault information fusion of aero-engine based on D-S evidence theory and FMECA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [48] Lu F, Jiang C, Huang J, et al. A novel data hierarchical fusion method for gas turbine engine performance fault diagnosis[J]. Energies, 2016, 9(10): 928.
- [49] William J S, Kimberly A C, Geoffrey A G. Joint strike fighter prognostics & health management[R]. AIAA-98-35476.
- [50] Ramesh R, Bruce C W, Matthew S. Evolution of propulsion controls and health monitoring at Pratt and Whitney[R]. AIAA-2003-2645.
- [51] Engel S, Gilmartin B, Bongort K, et al. Prognostics, the real issues associated with predicting life remaining[C]//IEEE Conference. New York: IEEE Press, 2000: 1528-1533.
- [52] 李大为, 王军, 王晨, 等. 大数据技术在航空发动机研发领域的应用探索[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 33-37.
- LI Dawei, WANG Jun, WANG Chen, et al. Application exploration of big data technology in aeroengine research and development[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 33-37. (in Chinese)
- [53] 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.
- LU Feng. Aeroengine fault diagnostics based on fusion technique[D]. Nanjing: Nanjing University of aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [54] 赵姝帆, 李本威, 宋汉强, 等. 基于K-均值聚类与粒子群核极限学习机的推力估计器设计[J]. 推进技术, 2019, 40(2): 259-266.
- ZHAO Shufan, LI Benwei, SONG Hanqiang, et al. Thrust estimator design based on K-means clustering and particle swarm optimization kernel extreme learning machine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(2): 259-266. (in Chinese)
- [55] 王奕首, 余映红, 卿新林, 等. 基于KPCA和DBN的航空发动机排气温度基线模型[J]. 航空发动机, 2020, 46(1): 54-60.

- WANG Yishou, YU YingLin, QING Xinlin, et al. Aero engine exhaust temperature baseline model based on KPCA and DBN[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 54–60. (in Chinese).
- [56] 胡锦涛. 燃气轮机系统监控与气路故障诊断[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- HU Jincai. The monitoring and path fault diagnosis of gas turbine system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [57] Groenstedt T. Least squares based transient nonlinear gas path analysis [R]. ASME-GT2005-68717.
- [58] Li Y G. A gas turbine diagnostic approach with transient measurements [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2003, 217(2): 169–177.
- [59] Simmons J C, Danai K. In-flight isolation of degraded engine components by shape comparison of transient outputs[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(6): 679–681.
- [60] 李大为, 李家瑞, 李锋, 等. 航空发动机高原起动性能改善措施[J]. 航空发动机, 2020, 46(2): 47–50.
- LI Dawei, LI Jiarui, LI Feng, et al. Improvement measures of aeroengine starting performance in plateau[J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 47–50. (in Chinese)
- [61] James R M, Kourosh D. Measurement selection for engine transients by parameter signatures[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(12): 1201–1210.
- [62] 郝旺, 刘永泉, 王占学, 等. 美国自适应循环发动机的发展历程[J]. 推进技术, 2024, 45(6): 6–25.
- HAO Wang, LIU Yongquan, WANG Zhanxue, et al. Development process of adaptive cycle engine in the united states [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(6): 6–25. (in Chinese)
- (编辑: 兰海青, 孙明霞)