

航空发动机全生命周期健康管理技术发展分析

Development Analysis to Aero Engine Life Cycle Health Management Technology

■ 范满意 / 中国航发研究院

随着航空发动机功能结构越来越复杂，以及用户对发动机的安全性、可靠性的要求越来越高，健康管理系统成为先进航空发动机的重要组成部分，该技术的成熟与工程化应用对航空发动机的全生命周期具有显著的提升作用。

航空发动机结构复杂、工作环境恶劣，主要工作零部件承受着较高的离心负荷、气动负荷以及振动交变负荷等，同时还受到外来物的冲击，以及风沙、潮湿、盐雾的侵蚀，引起发动机的性能下降、疲劳损伤增多，甚至产生叶片断裂、轮盘破损等危及发动机及飞机安全的事故。据统计，发动机一次返厂大修需要数百万元人民币的费用支出，给企业带来巨大的经济损失。为了确保飞行安全，业界从20世纪60年代开始对航空发动机开展健康状态的监测，逐步发展到现在的发动机健康管理系统，如图1所示。例如，F135发动机应用健康管理技术后，排故时间从F119发动机的20 min缩短到15 min，比现役的F110、F100等发动机排故时间缩短94%，显著提高了发动机维修性和装备可用率。可见，发动机健康管理系统已成为提高装备完好率，降低维护成本，实现自主后勤和智能维护等新型维修保障模式的主要支撑技术。

航空发动机健康管理技术概述

航空发动机健康管理是指通过机载

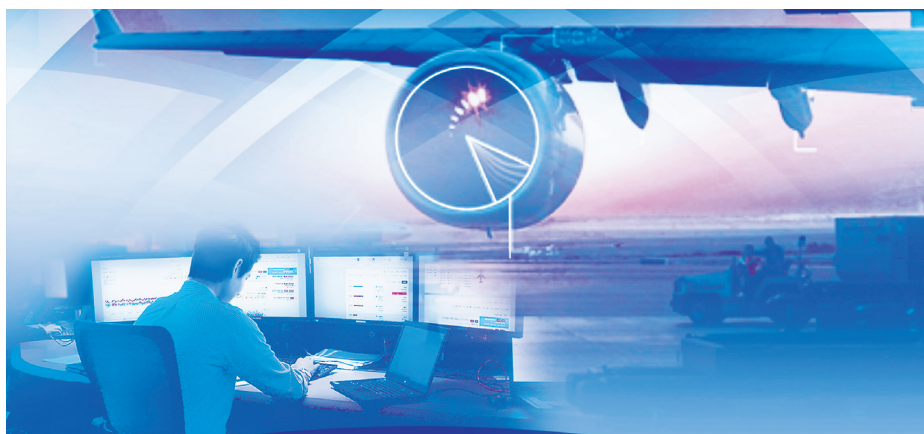


图1 航空发动机健康管理系统

系统和非机载系统中的传感、采集、处理、分析等手段，提供航空发动机气路、滑油、振动、寿命等方面的实时或近实时信息，实现状态监测、故障诊断、趋势分析和寿命管理等功能，从而提醒用户注意可能影响安全运行的状况，有针对性地安排检查维修、排除异常故障、改进功能性能、预测备件需求，进而提高航空发动机和飞机的安全性、可靠性与维修性。

健康管理系统的功能

健康管理的主要功能包括状态监视、故障诊断、趋势分析、寿命管理和使用维护，如图2所示。

状态监视功能是分析机载实时

获取的发动机参数，对参数与机载发动机模型对比分析，判断参数是否存在超限和异常增量特征，将判

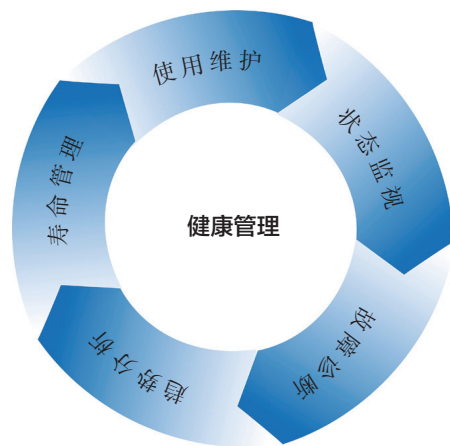


图2 发动机健康管理的功能

断结果记录在机载事件报告中，飞行结束后将报告发送给地面系统，指导维护人员开展相关检查和维护工作。

故障诊断及预测功能一般是由机载和地面故障诊断算法共同实现。机载故障诊断模块通过特征提取算法对参数实时分析，提取超限特征和增量异常特征，并将参数异常特征与部件、系统故障模式的参数权值进行实时匹配，计算故障概率，生成机载故障报告。在飞行结束后，地面系统将根据下载的机载数据，采用基于发动机数学模型诊断算法、智能故障诊断算法（神经网络、支持向量机）或基于历史数据的故障诊断算法（贝叶斯故障诊断网络）等算法，进行综合诊断分析，预测故障发生的时间和概率，得到的结论与机载诊断结果进行对比分析，当结论一致时，输出维修报告指导维护人员操作；当结论不一致时，进行人工辅助分析确定故障结论，并对机载或地面故障诊断软件进行升级和优化。

趋势分析通常分为短时趋势分析和长期趋势分析两种。短时趋势分析算法实时判断参数异常增量特征，为机载状态监测和故障诊断提供数据分析结果。长期趋势分析主要是侧重于发动机性能参数分析，在机载系统中，通过趋势分析参数提取算法，提取特定条件下的性能参数，并记录趋势数据。在地面系统中，按架次和时间绘制趋势数据图，与发动机模型进行对比，分析发动机衰减状况，为地面维修和保障资源规划提供依据。

寿命管理功能在机载状态下实现发动机日历寿命累计、统计发动

机一类/二类循环，生成寿命统计报告。这些结果将在飞行结束后传输给地面，在地面健康管理系统中根据发动机时寿件清单，采用雨流计数法或低周循环疲劳寿命消耗模型等算法，对发动机关键和重要件剩余寿命进行计算，生成寿命消耗报告，并根据寿命消耗速率，预计维护时间，为发动机维护准备提供支持。

使用维护是基于状态监视、故障诊断、趋势分析、寿命管理等功能，提升对发动机的状态感知能力，并在此基础上做好零备件的管理以及发动机维修计划的更新迭代，达到视情维修的目的。

健康管理与发动机全生命周期的关系

健康管理在发动机使用维护阶段发挥非常重要的作用，但是作为一门新兴的技术，健康管理技术难题的攻克需要在发动机论证、研制、使用的各阶段开展，健康管理 with 发动机设计、加工、装配、试验、使用、维护之间关系的如图3所示。

健康管理技术的阶段性应用

健康管理技术是一种多领域的综合性技术，涉及发动机的多个专业，需要跨专业的技术人员协同努力才能实现发动机使用维护方式的变革与技术成熟突破，健康管理技术的应用大致可以划分为3个阶段：第一阶段是健康管理 with 发动机检测技术交叉验证、相互促进的阶段，健康管理的监测结果需要与发动机孔探、滑油离线分析、荧光检测、无损检测等测试手段对比分析，提高健康管理对发动机异常的灵敏度，同时降低由于信号传输、发动机状态多变等带来的虚警，提升发动机感知与监测效率；第二阶段是健康管理技术与发动机设计、加工、装配、试验的相互作用阶段，该阶段除了继续开展健康管理监视算法的验证和优化，重点是故障诊断功能的成熟与优化，健康管理的诊断结果可以为发动机设计、加工、装配、试验工作的检查分析提供参考性指导，与此同时，发动机设计、加工、装

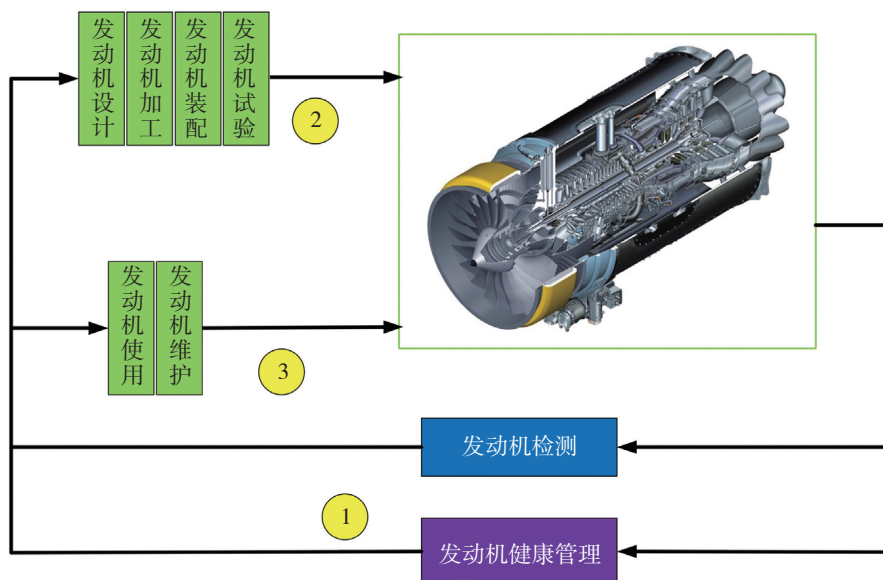


图3 健康管理与发动机研制及使用等的逻辑关系

配、试验的检查结果也可以反过来验证发动机故障诊断的结果，发动机试验过程中发动机异常信息的记录也可以作为发动机健康管理算法的开发或验证的输入，从而促进健康管理中故障诊断算法的成熟；第三阶段是健康管理与发动机使用维护的相互作用阶段，该阶段主要是促进趋势分析以及寿命管理功能的成熟与优化，并开展实际工程条件下的发动机健康管理功能算法的验证，同时完成发动机使用维护措施的改进升级。

健康管理技术发展面临的问题

健康管理技术目前已有60多年的发展历程，在军用航空发动机、民用航空发动机及燃气轮机应用较为普遍，效果显著。我国在最近十几年开展了众多健康管理技术的研究，在基于机载自适应模型的故障诊断、基于频谱分析的故障诊断、滑油的状态评估，以及基于人工智能的健康管理技术研究方面取得了较多的基础理论成果，基于民用航空发动机需求开发了航空发动机健康管理与维修决策支持系统，但是与国际先进水平相比，技术成熟度及应用广度仍有不少差距，健康管理技术的发展及应用还面临以下问题。

一是健康管理功能算法的开发缺少统一的平台和规范，影响算法的测试和应用。当前健康管理功能算法的开发分散在各个科研院所，算法的开发接口和平台不统一，导致健康管理功能算法与验证平台的适用性存在风险。

二是发动机故障模式的产生发展规律还未完全掌握。发动机故障

的发生有其必然原因，可能是设计、材料、加工、装配、使用、维护中的一种，也有可能是多种因素综合的结果，有些是突变型故障，有些可能是缓变型故障，故障的产生发展时间有长有短，但是仅依靠一个专业是无法全面掌握发动机故障的演化规律，大大影响了健康管理技术的应用。

三是发动机故障的独特性与故障诊断的统一性存在矛盾。故障的发生往往是在某一台发动机某一转速状态下发生，因此，故障带有单台发动机的独特性和转速状态的特性，而故障诊断作为健康管理的一项重要功能，希望适用于多台发动机多个转速状态，甚至适用于发动机全包线的多个状态，因此存在着发动机故障的独特性和故障诊断功能的统一性的矛盾。

四是发动机健康管理功能算法的自动更新学习机制构建的问题。健康管理系统本身的使用维护任务繁重是制约健康管理技术推广应用的重要因素之一，尽量减少健康管理系统本身的维护任务和时间，提升对发动机的保障水平是健康管理功能算法开发过程中需要考虑的问题。

五是寿命管理算法的验证与机载应用问题。当前寿命管理算法验证成本高、主要依靠仿真结果验证，技术成熟度有限，同时寿命管理算法如何能在机载环境下高效地开展的工作，实现发动机寿命消耗的快速评估也是需要重点突破的。

健康管理技术发展展望

鉴于我国航空发动机健康管理技术的发展现状及面临的问题，在后续的发展中可重点加强以下方面的建设。

一是建立统一的开放式健康管理技术开发平台。以工业部门牵头，构建统一的开放式健康管理技术开发平台，提供标准化的输入输出接口与程序规范，加快健康管理技术在发动机各型号的测试应用。

二是针对故障模式的演化规律开展多专业联合攻关。结合发动机性能、结构强度、机械、试验、气动等多个专业开展发动机试验数据分析，相互印证，获取发动机故障的产生原因、发展过程中的表现、相互之间的影响，为健康管理系统的工程化应用奠定坚实的理论基础。

三是加强新感知技术的研究。加强进出口工质传感器、叶尖间隙传感器、高压脉动传感器、声信息传感器、超高频振动传感器等先进测量手段的研究，扩充健康管理的信息来源，加强相关监测诊断技术的研究。同时开展新寿命测试手段的研究，支持寿命管理算法的验证。

四是加强故障预案构建。结合发动机的故障案例，构建发动机故障预案库，加强健康管理对发动机设计、材料、加工、装配、试验、使用、维护的支撑作用。

结束语

健康管理技术作为一门新的综合性技术，涉及发动机的多个方面及全生命周期，在夯实相关技术基础的同时，突破故障演化规律挖掘、新型感知等关键技术，必将提高发动机整体的安全性和可靠性，减少发动机非故障维修时间，提升发动机的完好率。

航空动力

（范满意，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机控制及健康管理技术研究）