

# 航空发动机健康管理系统的功能架构

## Function Architecture of Engine Health Management System

■ 李军 杨旭 / 中国航发动力所

健康管理技术不仅能够对发动机的各个截面的状态进行监测和故障诊断，同时具有趋势预测和发动机全生命周期管理的功能。发动机健康管理技术实现了从传统的定期维修方式到视情维修乃至预测维修的转变，成为发动机安全性、可靠性的必要保障措施。

航空发动机状态监视和故障诊断系统的研究始于20世纪60年代末，70年代开始在民用发动机上应用，并成功地提高了飞行安全和航班运营效率。波音777、波音747-400、A320、A330等机型都配备了飞机健康管理（Aircraft Health Management, AHM）系统，均具有发动机健康管理（Engine Health Management, EHM）功能；目前波音787、A380配装的GENx、遛达900等发动机均配备了独立的发动机健康管理系统。从使用效果来看，民用飞机（如波音747、波音777等机型）采用的健康管理技术可降低20%的维修成本，可使航空公司节省约25%的因航班延误或取消而导致的费用。

### 发动机健康管理系统需求分析

#### 健康管理系统定义及作用

健康管理系统起源于状态监控系统，由早期的重点参数监测和回放功能转变为现在的实时状态监测、故障诊断、趋势分析、寿命管理与维修决策支持等功能。

发动机健康管理是指通过获取发动机相关数据信息，对发动机整机、各系统和部件进行综合监测分析，评估发动机的健康状态并提出维修建议，以实现发动机的视情维修。

健康管理系统重点是将各种算法和智能模型以及先进的传感器集成在一起，用于预测、诊断、监控和管理发动机状态，以实现维修思想和维修策略的转变：一是维修思想从以预防为主向以可靠性为中心进行转变，由传统的基于传感器的故障诊断向基于智能系统的预测发动机状态的转变；二是维修策略从定时维修向视情维修转变，由事后维修和定期维修向基于状态的视情维修及预测维修转换。

#### 健康管理系统需求分析

发动机的性能在不断提升，结构日益复杂，对发动机的可靠性和维修性提出了更高的要求。实际上，不论发动机的设计、材料和工艺水平，还是使用、维修的管理水平都不能保证发动机在使用中不出现故障。因此，用户对发动机的供应方

提出了健康管理的需求。

健康管理系统的主要目标是发动机的安全性、可靠性和维修性，健康管理系统是发动机从定期维修向视情维修转变和零部件视情生产的基础。

从使用目标角度，配备发动机健康管理系统应该达到以下目标：有效提高发动机的安全性和可靠性；延长发动机使用寿命；提高发动机的使用效率；降低维修成本；具备支持维修编制计划和安排维修日程。

从功能角度出发，健康管理系统在设计时提出了以下需求：航空发动机在工作状态下能够对发动机各个截面、各个工作状态进行实时监控，及时发现异常或失效情况；健康管理系统应能够对发动机异常和失效进行分析，对未来可能发生的故障进行提前预警并给出分析信息；健康管理系统应对发动机各部分机械结构的情况进行记录和监控，便于视情维修的实现；健康管理系统应具备对发动机性能进行评估的功能，为机务人员提供维修建议。

### 典型的军用发动机健康管

## 理系统

### F119发动机健康管理系统

F119发动机的健康管理系统主要通过独立的发动机健康管理监测单元与电子控制器共同实现发动机的故障监测、隔离等功能，配合地面保障设备具备实现发动机的趋势分析与维修保障的功能。

F119发动机机载健康管理系统通过STORM模型，实现气路性能监测、振动监测、滑油监测和寿命管理等功能。机载健康管理系统具备检测、诊断发动机故障的功能，能够在线统计关键部件的寿命使用情况，存储健康管理数据和维修所需数据。当出现异常时，能够向飞行员发送不同等级的告警信息。

地面系统主要由地面保障设备对机载数据进行二次分析，完成关键部件的寿命管理，并针对故障或异常进行维修处置。

### EJ200发动机健康管理系统

欧洲EJ200发动机的EHM系统采用的也是机载系统和地面支持系统的结构方案，如图1所示。机上主要功能为机内自检测、故障检测、寿命消耗计算和存储记录；地面支持保障系统（如图2所示）则完成性能关键参数趋势分析、详细的故障诊断和隔离、寿命管理、发动机机群管理以及后勤规划等。

### F135发动机健康管理系统

F135发动机配装的健康管理系统被认为是美国基于状态维修技术的最高水平。F135发动机健康管理系统由机载智能实时监控系统和地面飞机综合管理系统组成，通过先进传感器和智能诊断算法实现准确

检测隔离故障功能，在诊断预测基础上具备维修决策和资源管理等功能。

## 航空发动机健康管理系统功能架构

发动机健康管理系统能够对发动机状态进行实时监控，自动定位已发

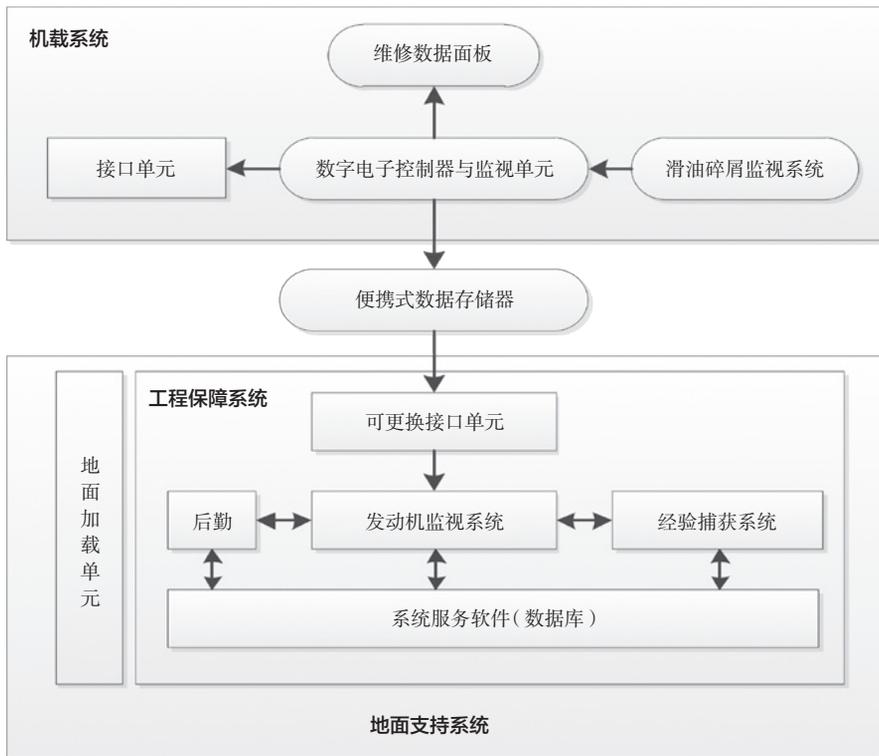


图1 EJ200发动机健康管理系统功能与架构

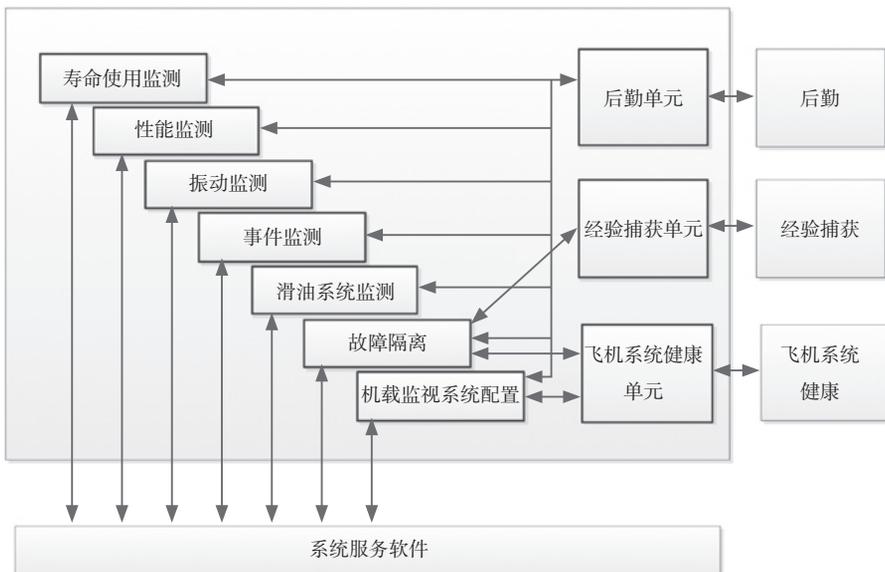


图2 EJ200地面EHM系统功能

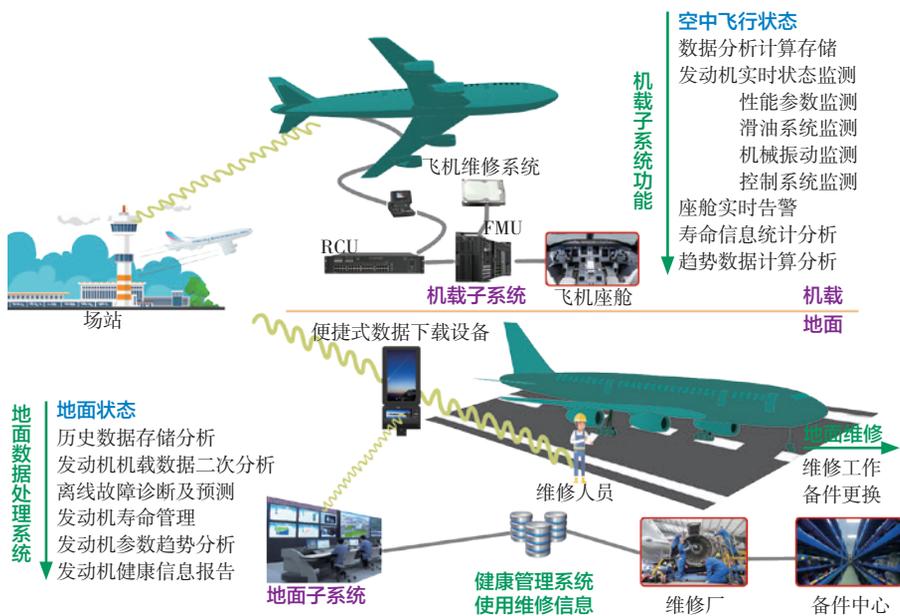


图3 健康管理信息系统使用模式

生故障的部附件并预测潜在的故障，自动提交诊断和预测报告给飞机综合管理系统，提供维修提示；逐步实现视情维修，减少发动机定检及维修次数，减少维修人员工作量、备件数量及停机时间，从而减少维修费用；最终提高发动机可靠性、维修性和保障性。

健康管理信息系统通常由机载子系统和地面子系统组成。通过获取飞机、发动机相关数据信息，采用机载和地面健康管理算法相结合的方式，实现发动机状态监视、故障诊断及预测、趋势分析、寿命管理功能，机载系统为飞行员提供告警信息，地面系统为地面维修人员提供维修建议，为维修保障提供规划。

机载子系统一般由机载监测单元、专用传感器、发动机电缆和机载健康管理软件等组成。通过对发动机数据的采集、处理、分析和记录，实现对发动机状态实时监测、故障

诊断和寿命统计分析等功能。

地面子系统一般由地面数据处理计算机、数据管理中心和地面健康管理软件组成。通过对机载系统记录数据的进一步处理，实现故障诊断、趋势预测和寿命管理(包括关键件、重要件、成附件)功能，并生成发动机健康状态报告，指导发动机的使用和维修。

### 健康管理信息系统功能

健康管理信息系统一般具备状态监测、故障诊断、趋势分析、寿命管理、使用维修等功能。

#### 状态监测功能

健康管理信息系统通过机载状态监视功能，分析实时获取的发动机参数，对参数与机载发动机模型或门限值进行对比分析，判断参数是否存在超限和异常增量特征，并根据监测结果生成事件报告。一般包括性能监测、滑油系统监测、振动监测、

控制系统监测。

#### 故障诊断功能

故障诊断功能一般是由机载和地面故障诊断算法共同实现。机载故障诊断功能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，输出维修报告以指导维修人员的操作。

#### 趋势分析功能

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，分析发动机性能衰减状况，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年寿命累计、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，预计维修时间，为发动机维修准备工作提供支持。

### 使用维修功能

在地面系统中，将机载和地面各种健康管理分析算法生成的信息进行融合，生成综合检查、维护和修理综合报告，评估发动机的健康状态，提出维修建议，并通过网络发送给维修厂、备件中心等部门，进行维修前的准备。同时，健康管理地面分系统还根据发动机健康状况，对发动机进行维修排队，为飞机换发、发动机维修提供支持，从而保证发动机安全可靠的运行，提高维修效率，提高飞机出勤率。

## 健康管理系统关键技术

健康管理系统不仅涉及发动机的多个学科，而且包含很多方面的技术，如传感器、数据管理、各种建模方法和算法、信息融合、预测技术等。

### 滑油状态在线检测技术

航空发动机主轴承在苛刻的载荷、转速和温度下工作。通常，轴承部件在10~100h内就能从初始裂纹迅速发展为灾难性失效，有时这个过程仅为几个小时。而且，主轴承的失效往往会对发动机引起二次损伤。因此，需要对轴承剥落的金属屑末进行连续监视，以提前探测失效的发生，保证发动机的安全。因此，滑油金属屑末检测传感器、滑油成分监测传感器以及监测技术成为健康管理系统重要传感器和关键技术之一。

### 进出口工质检测传感器技术

航空发动机经常会吸入各种物

体，大部分是无损伤的（如昆虫和叶子），有些则是有损伤的（如石头和铆钉）。因此设置一个探测吞咽物体的系统是非常重要的，它能够识别无损伤和有损伤屑末。利用进出口工质检测传感器在线监测进出口是否存在异物，可以预测吸入的后果。该传感器可以提高发动机运行安全。

### 气路故障诊断技术

发动机气路的失效或故障大多数都会在发动机气路的气动热力参数和性能参数上有所反映，发动机气路状态监视、故障诊断及性能趋势分析是通过利用所测得的发动机气动热力参数、性能参数和几何可调部件的位置参数，从热力性能角度出发，分析发动机运行所处的工作状态、发动机故障发生的位置和原因以及对发动机气路性能的影响。

### 寿命管理技术

计算发动机零部件的寿命消耗，即建立一个合适的反映零件所承载荷和零件应力关系的寿命消耗数学模型进行寿命使用监测。随着每一次飞行参数测量和处理，计算零件的寿命消耗，得到其每一次飞行的寿命消耗百分数。零部件消耗寿命计算的主要过程是通过数据采集得到飞行剖面，经过实时的数据处理，得到监视零件和部位的载荷和应力，再通过模型计算零件的寿命消耗百分数。

寿命消耗计算模型是寿命管理技术的核心。根据发动机结构和强度设计准则要求及发动机设计信息，建立发动机低周疲劳消耗模型、蠕变寿命消耗模型等，并结合发动机的材料特性精确计算发动机关键部

件的使用消耗寿命。

### 信息融合技术

发动机数据信息从多方面获得，包括传感器的测量、控制系统产生的故障代码、维修历史记录和组件模型等，这些数据信息之间存在非常复杂的关联关系。要对发动机达到较为准确的故障诊断和预测，就必须对健康管理系统中种类繁多的发动机数据进行有效的数据融合管理。

## 结束语

健康管理系统已在多型发动机上得到了应用，其发展趋势体现在以下几个方面：一是智能化，从简单检查/监视向智能检测、诊断、预诊方向发展；二是综合化，从简单监视向机载—地面网络综合监视、保障方向发展；三是实时化，从事后检查向实时监视、诊断、预诊、视情维修和预测维修方向发展；四是通用化，从针对单一型号的系统架构到开放系统构架、通用软硬件模块方向发展。

健康管理技术是随航空发动机的结构、工艺、材料、传感器技术等科学技术的发展而发展起来的一门多学科融合的技术，是飞机安全保障的一部分。健康管理系统能够提升发动机在线监测、诊断水平，提升发动机维修效率，保障发动机的安全、稳定和可靠地运行，并指导维修工作。健康管理技术是实现发动机视情维修的重要措施，是未来发展的必然趋势。

航空动力

（李军，中国航发动力所，研究员，从事航空发动机控制系统设计、健康管理研究）