

面向预测性维修构建航空发动机综合监控和健康管理系统的

Constructing Aero Engine Integrated Monitoring and Health Management System Towards Predictive Maintenance

■ 黄劲东 / 中国航发研究院

状态监控和健康管理在发动机机队管理中扮演着重要角色，也是航空发动机服务保障体系工程技术服务域的核心建设内容。

航空发动机因其结构复杂且工作环境恶劣，日常运行也容易受航路上结冰、暴雨、鸟击、侧风、沙尘等难以预知的异常事件影响，会不可避免地发生性能退化和故障。因此，航空发动机进入服役后的外场维护是其安全可靠运行的重要保障。传统上，发动机外场服务保障主要采用“多、勤、细”的定期维修方式来减少故障发生率，但耗费资源多、效率低下、成本高昂，严重影响装备的完好率和出勤率。随着对航空发动机整机和部件失效模式、失效规律以及部件、系统可靠性和维修性认识的不断深入，发动机的使用维修理念也在不断发展，维修策略从早期的定时维修发展到以可靠性为中心的预防性维修（RCM），并朝着基于状态的预测性维修转变。

基于状态的维修

基于状态的维修（CBM）是一项战略性的维修策略，目的是通过对装备内部植入的传感器或外部检测设备中获得的状态信息进行实时或近实时的监控，只在装备存在维修需求时实

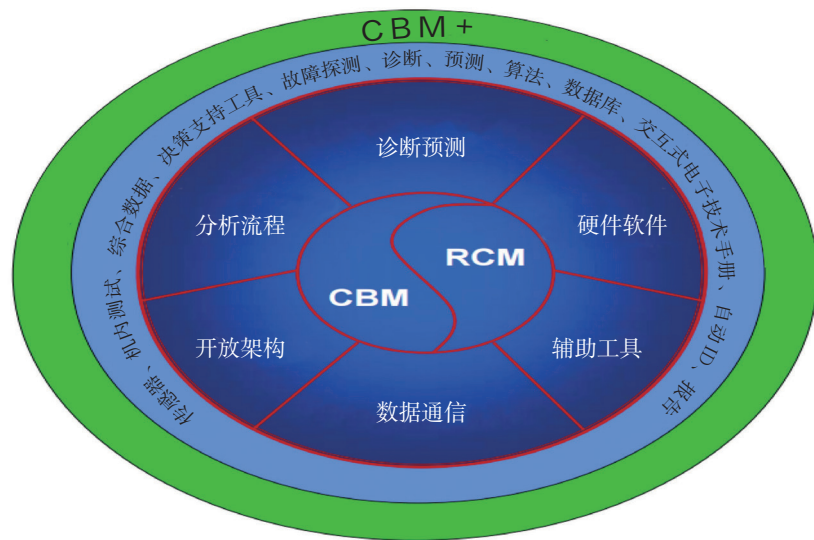


图1 美国国防部RCM和CBM+的相互关系

施维修。其思想来源于民机的视情维修，于1998年由美国海军提出，之后被美国国防部正式采纳并在各军兵种推广，并在2008年升版到CBM+。

CBM+并非 是RCM的简单替代，二者有着非常紧密的内在联系。RCM是在充分开展失效模式影响及危害性分析（FMEACA）的基础上，形成预防性（或计划）维修方案，解决“修什么、何时修、谁来修”的问题，并在使用中不断修正、完善，促进设计改进。而CBM+

则利用装备产生的数据，追踪其有代表性的性能、可靠性等指标，发现异常并告警，进行故障诊断、评估健康状态，预测趋势和可能出现的故障，采取有针对性的维修措施恢复和保持装备的功能和可靠性。所以，RCM是CBM+的基础，CBM+则为实现RCM故障管理策略提供先进、高效的方法、标准和工具。显然，RCM和CBM互相影响、互相促进，是预防性维修与预测性维修的结合，如图1所示。

美国海军是CBM的发起者和倡导者，在H-1直升机主减速器CBM+项目中，通过在主减速器上加装传感器和开发监控系统，在一年半的时间内避免了22台主减速器由于套筒、碎屑等故障导致的非计划返厂和多起紧急迫降严重事故。美国空军于2020年专门成立空军快速维修办公室，推进B-1、KC-135、C-5、C-130和F-15等主战机型应用CBM+，计划于2030年覆盖全部机型。

CBM+ 对状态监控和健康管理的需求

维修方式的演变对发动机的监控提出了很高的要求，及时、准确、完整地掌握发动机的状态，开展故障预测和健康管理成为机队管理最核心的内容，由此催生了发动机健康管理(EHM)技术及相关系统的研发。

系统的构成和主要功能

状态监控和健康管理系统的构成，如

图2所示。机载系统和地面系统通过便携式维修辅助装置串联，各系统均随发动机同步研发、同时部署。其中，机载系统具有高实时性、快速反应、模型精度较高但相对简单等特点；地面系统接收来自机载系统的飞行性能数据，同时利用发动机交付试车数据、外场使用维修数据，对发动机进行状态监控和趋势分析，从中探测异常、发出警告，并借助各种复杂、精准、智能的数学模型和算法开展发动机健康状态评估、性能退化和故障诊断/预测，避免微小异常发展为大的故障和事故，从而有效提高装备使用的安全性和可靠性，为科学规划发动机下发、制定合理的维修策略提供决策依据。

CBM + 的开放体系架构

地面系统承载了状态监控和健康管理相当数量的重要任务。但是，美国海军在实施CBM+的初期，由于缺乏统一、开放的架构和标准，

不同公司或专业机构开发的应用系统开放性、互操作性和互换性较差，信息共享和数据交换困难，重复开发费用和维护成本高昂。2001年，美国海军痛下决心，通过军民两用科技项目(DUST)资助了由波音公司等企业牵头、高校和科研机构参与的团队，共同开发了基于状态维修的开放体系框架和标准(OSA-CBM)，用于规范系统设计和数据信息交换，降低开发设计成本。OSA-CBM由7层组成，包括数据获取层(DA)、数据处理层(DM)、状态监测层(SD)、健康评估层(HA)、故障预测层(PA)、决策支持层(AG)和表示层(PM)，不同层之间数据接口、层次接口和通信协议统一定义，支持不同层次模块的互操作性和互换性。

发动机地面综合监控和健康管理系统的开发

借鉴OSA-CBM开放性架构及标准，结合当前国内技术发展现实情况，开展地面系统设计。

系统总体架构

根据现有技术水平和应用需求情况，搭建由数据获取、数据处理、综合监控、状态评估、运行决策共5层组成的系统总体架构，如图3所示。原架构第三层状态监控改为综合监控，把监控范围从以气路性能监控为主扩展为可靠性、振动、滑油、孔探监控等。图3中箭头表示系统数据流向，可以逐层由低向高流动，即从第一层通过传感器和其他方式收集数据开始，流向各个不同功能的中间层模块处理，最后传送到决策支持模块进行运行决策；也可以由低层流动到最高层，直接展示结果。

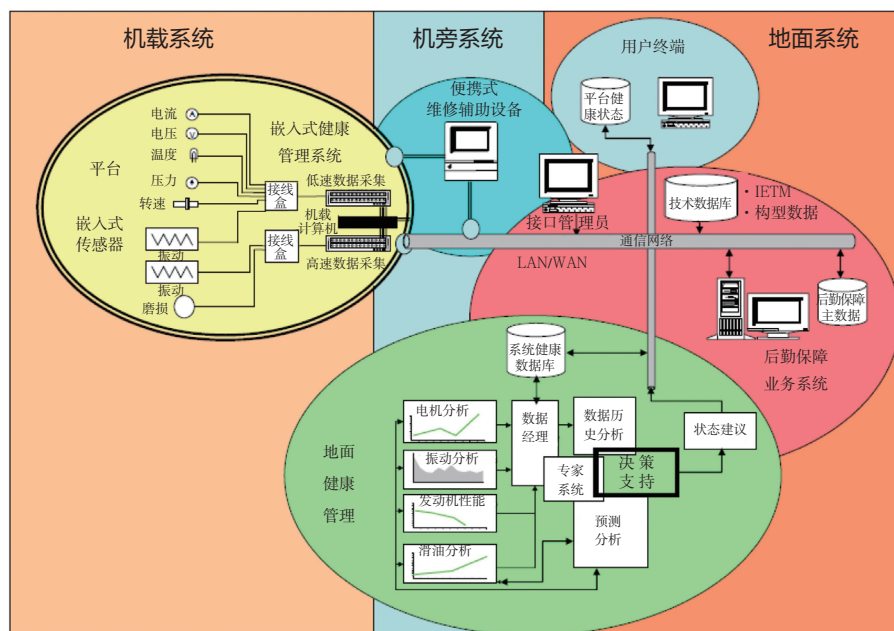


图2 CBM+ 顶层架构中的状态监控和健康管理系统的架构

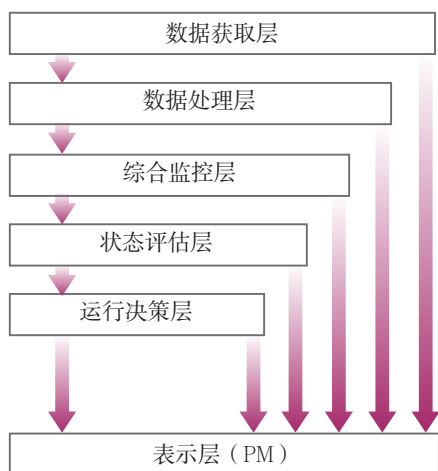


图3 系统数据流向

主要业务功能分解

根据系统总体架构设计，除数据获取和处理部分外，本系统的三个业务功能层还可进一步分解，主要业务子功能模块如图4所示。后续随着技术的发展和数据、经验的积累，还将有更多的故障诊断和失效分析等模型、算法的加入，不断丰富监控和评估功能。

状态监控和健康管理关键技术

状态监控和健康管理涉及众多发动

机相关专业和关键技术，仅选取其中4项加以说明。

可靠性监控指标体系及其参数警戒值的建立和调整

发动机的固有可靠性由研发决定，但受运行环境、任务剖面和性能退化的影响，使用中的预防性维修只是维持或恢复其固有可靠性水平，然而不恰当维修或缺乏维修将会降低其使用可靠性。因此，必须通过建立完善的可靠性管理体系来持续监控其可靠性状况。

可靠性监控涉及两项关键技术：一是可靠性监控指标体系的建立，即根据发动机的特点、实际使用环境和任务需求，确定各类型发动机可靠性监控量化指标体系，满足数量有限、可度量、可追溯、可验证的要求；二是可靠性监控指标参数警戒值的建立与调整，对被监控的可靠性参数指标设定警戒值，及时发现可靠性指标统计结果与警戒值的偏离，触发告警，每个参数警戒值均基于各异常事件的发生率，利用统计分析的方法得到，同时针对数据波动的特点进行滚动平均，在一定时期内动态调整。

基于发动机个性化模型的性能监控和状态评估技术

发动机气路性能监控包括在线采集和存储发动机传感器测量的飞行数据，下载到地面计算机后，以发动机总体性能基线模型为基础，根据采集参数与模型参数两者偏差实现气路性能的异常检测和故障告警，并开展趋势分析、状态评估和故障诊断，如图5所示。

上述工作流程中有如下关键环节。

一是确定发动机监控性能参数或状态特征参数组合。新交付的批产/修理发动机整机性能参数在一定范围呈现随机的分散特征，对外场使用的性能裕度具有重要的影响。因此，通过非相似状态下发动机性能的修正、样本数据的预处理、参数估计及相关性分析，建立每种参数的分布特征，确定具有统计学意义的发动机状态特征参数组合。

二是建立个性化发动机性能基线模型。性能参数偏差 Δy 必须准确且能正确反应变化趋势，才能得到高质量的监测和诊断结果，前提是：传感器测量的飞行参数应准确、充分；发动机性能基线模型准确；

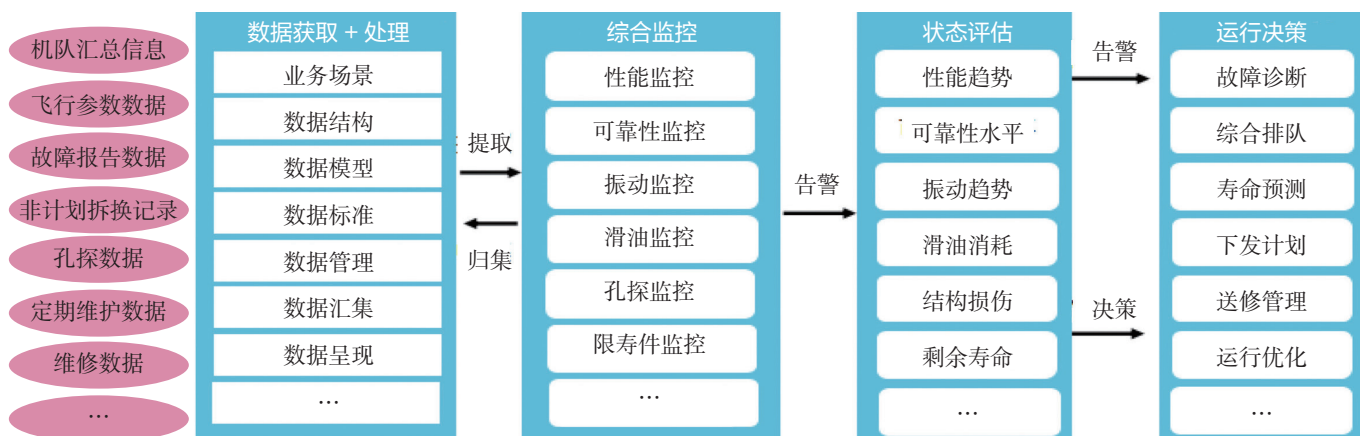


图4 主要业务功能分解

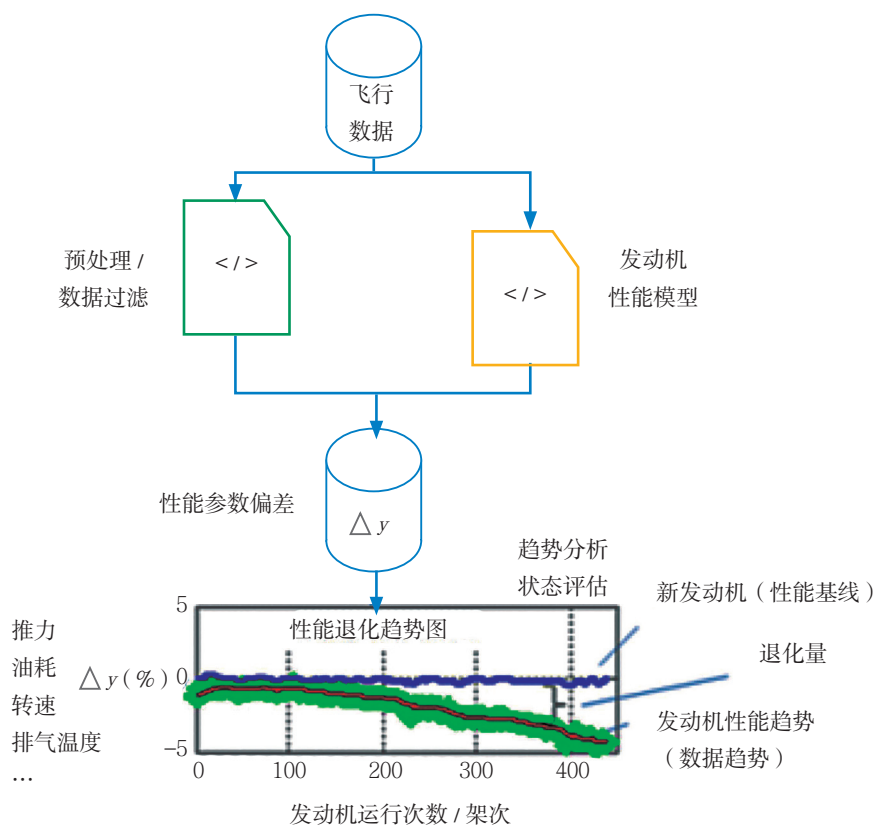


图5 地面系统性能监控/评估流程

数据预处理方法能有效处理噪声和数据点突变、数据趋势突变等异常。其中，发动机性能基线模型不能简单采用标准性能模型，必须考虑每一台发动机出厂时零件制造/装配的误差，发动机的安装损失，以及使用过程中性能退化和任务剖面不同产生的影响，在标准模型基础上，结合发动机出厂检验试车数据和模型辨识方法开展模型修正，建立能表征单台发动机的个性化性能基线模型。

三是发动机外场气路性能监控和状态评估技术。气路性能监控关键是建立异常检测逻辑，具备区分 Δy 因性能退化产生的非故障渐进性能变化与可能有故障的快速性能变化的能力，确定监控告警的阈值是其中的一个难点。气路分析评估方

法包括基于模型的性能辨识和基于数据的性能辨识，或者将二者相结合，引入发动机自适应模型，自动跟踪发动机性能变化，估计发动机部件的性能降级量和发动机性能降级趋势。

高性能振动监测与故障诊断技术

航空发动机结构复杂、有高速旋转部件，其运行工况和运行环境复杂，呈现多元激励的特征，产生复杂的振动响应，直接影响发动机正常工作 and 使用寿命。在综合监控中与之对应的关键技术包括：发动机振动故障机理及频率特征技术，以及在多元信息融合、多种诊断方法融合等技术方向上发展诸如小波神经网络、分形神经网络等先进诊断方法，提高振动故障诊断准确度和预测精度；发动机振动早期微弱信号处理和特征提取技术，这些信

号具有非平稳、周期性特点，信噪比往往比较低，但包含丰富的故障信息，能帮助预判发动机的工作状态和健康水平。目前采用常规的检测方法（如幅值域分析、傅里叶变换、相关分析等）无法识别，必须利用近代电子学和信号处理方法（如小波域双谱分析、盲源分离、维格纳-威利（Wigner-Ville）分布、短时傅里叶变换和高阶统计量分析等），准确检测出淹没于强噪声中的微弱故障信号，达到预判故障、提高诊断准确率的目的。

基于OSA-CBM的系统开放体系架构技术

地面系统涉及发动机总体性能、可靠性、振动、结构、测试、系统辨识、信号处理、软件架构、数据库、人工智能、大数据挖掘等众多专业领域，监控数十个发动机等产品型号，处理海量数据，开发难度大、时间跨度长。随着需求的变化和技术的发展需要不断更新升级，如果仍然沿用传统的单体架构模型和“单独系统+单独技术+单独服务器+单独数据库+单独机柜+后期编写接口对接”孤岛式系统建设和部署模式，无法在全行业实现有效的数据、算法和知识经验共享，无法灵活应对各单位产品技术基础参差不齐和故障诊断预测业务需求不断增长现状，造成系统臃肿、大量重复开发和部署，研发和运维成本大幅增加。

而OSA-CBM开放体系架构正是解决上述问题的关键技术，主要体现在以下几个方面。

一是采用分层体系架构设计。使用统一建模语言（UML）定义了每层（模块）的结构，以及不同层

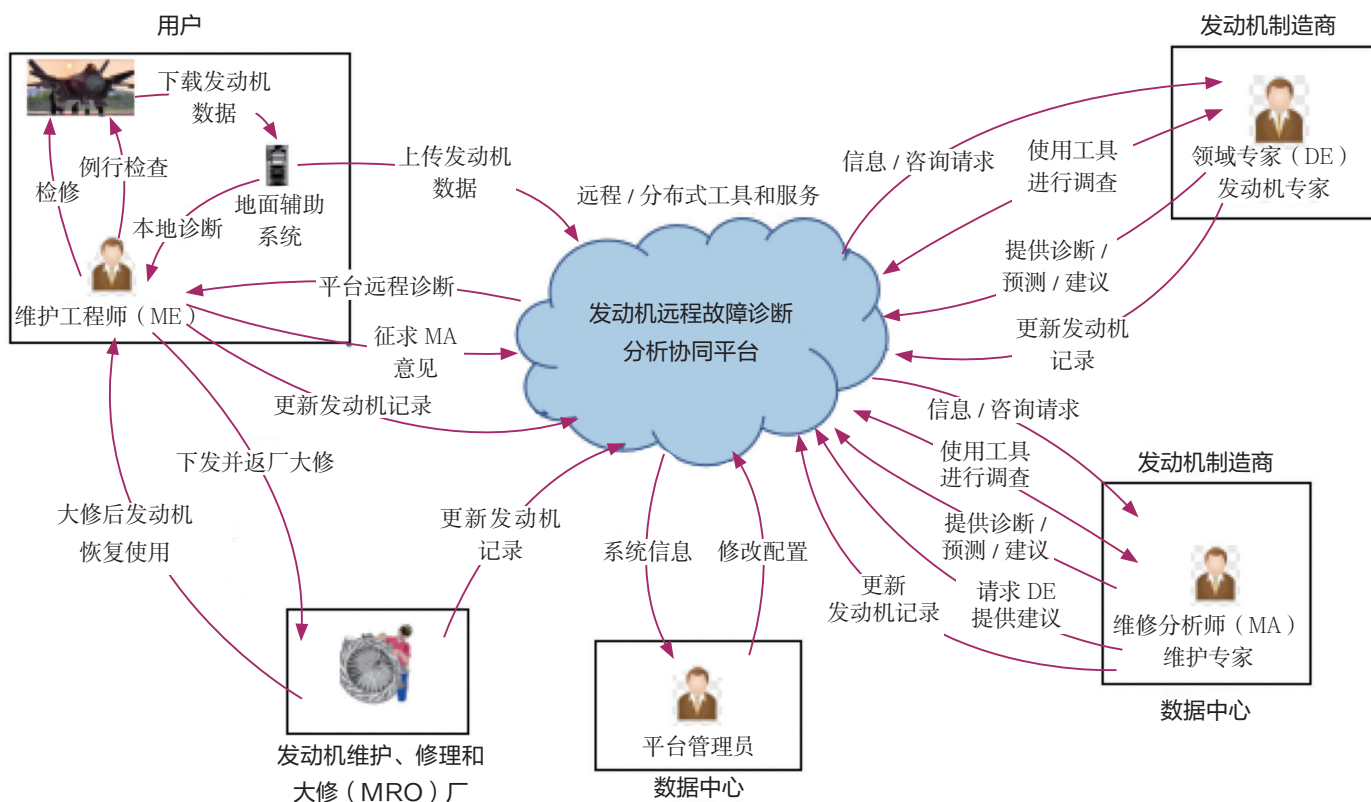


图6 发动机远程故障诊断分析协同平台

之间的数据接口和通信协议，各层与外部系统之间的数据交换格式，以保证系统内部不同层次功能模块的互操作性和相同功能模块的互换性，保证与外部系统的集成性。在实际应用场景中，由于算法和发动机模型采用模块化设计并解耦，数据采用标准格式传输，不同型号发动机只需更换发动机模型而无须重建系统，先进算法也可以独立替换和升级，这也正是组件化（一般是动态链接库）设计理念的具体体现，使系统基础架构具有跨平台、跨语言、跨协议的能力，通用性和可扩展性增强。

二是采用标准化和开放性设计。OSA-CBM从软件系统设计上对系统的功能、体系结构、数据结构、数据交换、数据存储、数据共享、功能模块重用以及集成等多方面进行

规范，并将上述信息全部公开，使功能开发商可以更加聚焦专业能力提升、自由选择参与程度，从而节省开发成本，提高功能模块的可移植性、开放性、可靠性和可集成性。

三是基于网络服务的柔性平台设计。一方面，地面系统的柔性体现在其并非由标准定义的所有组件构成，而是根据需求和技术现状，自由裁剪、柔性组合形成监控和诊断系统，具有相当的灵活性；另一方面，网络服务技术支持监控、诊断和预测等不同功能的系统组件分别部署在不同的地域，并通过标准的数据接口、协议和服务松散耦合在一起，形成网络化的柔性平台，支撑全行业专业功能模块异地协同使用、资源异地共享。在这种方式下，参与各方只做自己擅长的工作，充分发挥各自在不同领域的技术优势，

使平台向专业化协同方向发展，而发动机远程故障诊断也可以在这一网络架构支撑下运转，如图6所示。

结束语

基于状态的预测性维修是世界航空发动机维修模式的发展趋势，该维修模式的实现对航空发动机状态监控和健康管理提出了新的要求，研究其总体架构、功能分解和关键技术将对发动机行业相关系统的建设有所裨益。同时，高质量的数据是开展外场综合监控和健康管理的前提，因此外场服务保障数据治理将是后续的研究重点，以期为CBM+实施奠定坚实的数据基础。

航空动力

（黄劲东，中国航发研究院副院长，研究员，主要从事航空发动机试验测试、服务保障技术和发展战略研究）