

航空发动机健康管理及其标准分析

Analysis of Aero Engine Health Management & Its Standards

■ 王伟生 肖金彪/中国航发动研所

航空发动机健康管理 (EHM) 是指最大限度地利用航空发动机不同的数据资源, 对发动机的故障进行诊断、健康状态进行预报, 从而增强飞行任务的安全性、可靠性, 提高发动机的使用效率, 减少发动机的使用维护费用和维修时间。

航空发动机健康管理发展过程

航空发动机健康管理 (EHM) 系统经历了从状态监视、故障诊断到预测与健康管理的逐步发展和完善过程。

民用航空发动机健康管理系统的

美国在20世纪60年代末开始研究航空发动机状态监视和故障诊断系统, 20世纪70年代开始在民用航空发动机上应用并取得成功, 提高了飞行安全和航班运营效率。电子技术和计算机技术的迅速发展, 也大大促进了航空发动机的状态监视和故障诊断技术的发展。

到21世纪初, 欧美等国在波音787、空客A380项目中提出并实施了预测与健康概念, 标志着航空发动机的视情维修和安全性、维修性与经济性监视已进入了一个新的阶段。GE公司的GENx发动机和罗罗公司的遄达900发动机所应用的健康管理系统是现代EHM系统的典型代表, 由机载部分与地面部分共同组成。该健康管理系统功能高度集成, 机载部分首次采用在发动机上安装的方式并借助飞机通信寻址和报告系统, 实现基于Web的远程

监控与诊断, 这些特征也是近几年EHM系统的主流发展方向。

军用航空发动机健康管理系统的

GE公司1969年开始研制的T700-GE-700和T700-GE-701涡轴发动机已能进行基本的状态监视, 完成一些重要部位的故障诊断。T700-GE-701C发动机的控制系统由数字电子控制器 (DECU) 和机械液压装置 (HMU) 组成, 并配置一个历史记录仪, 其健康监视功能主要由DECU及历史记录仪实现。此外, GE公司在1979年开始为F404-GE-400涡扇发动机设计的机载发动机状态监视系统 (IECMS) 是一个实时的发动机监视系统。20世纪80年代随着发动机和计算机技术的发展, 发动机监视系统日益成为一种标准配置。

普惠公司自1982年开始发展F100-PW-200发动机的状态监视系统, 到1987年该系统实现了与飞机综合与后勤数据库的兼容, 系统继续得到扩大和改进。美国空军的发动机健康监视系统可管理所有类型的军用发动机, 其扩展型增加了发动机参数趋势分析, 并向全世界100个空军基地提供发动机诊断和趋势分析功

能软件。

20世纪80年代末90年代初, 欧洲四国开始联合研制先进双转子加力式涡扇发动机EJ200, 该发动机的设计要求中除了强调高推重比和低耗油率之外, 特别强调高可靠性、耐久性和维修性以及全生命周期费用的降低, 因此对EJ200发动机提出了状态监视和故障诊断能力的要求。事实上, EJ200发动机具有的状态监视功能已经比较完善, 但其功能并非由EHM系统单独实现, 而是集成在全权限数字式电子控制 (FADEC) 系统中, 由FADEC系统实现状态监控和故障诊断功能。

作为美国第四代战斗机F-22的配套动力, 普惠公司为F119发动机研制了诊断与健康管理系统 (DHM) 系统, 该系统除具有状态监视功能外, 还具有比较完善的故障诊断能力, 只是还没有达到足够的诊断精度, 也未规定明确的考核指标。

F135发动机是在F119发动机的基础上发展而来, 除了具备完善的状态监视和故障诊断能力外, 还提出了故障预测的要求, 并且也具备了一定的预测能力。预测是EHM系统区别于以往发动机监视诊断系统

的显著特征之一。为此，普惠公司投入了大量资源，开发了新型传感器和诊断软件，形成了比较完善的健康管理系统和配套的考核指标体系。EHM技术在F135发动机研制中得到充分应用，代表了美军目前基于状态的维修（CBM）技术所能达到的最高水平。

航空发动机健康管理标准体系分析

技术标准是实践经验的总结，同时又是规范发动机健康管理工作的技术依据。美国汽车工程师协会(SAE)航空航天推进系统健康管理技术委员会组织编制了航空燃气涡轮发动机健康管理方法的系列标准。

航空发动机通用规范中有关健康管理的规定

从20世纪50年代开始，美国编制了航空发动机通用规范(MIL-E-5007、8593)，经过历次修订、换版，直到2011年发布了JSSG-2007C《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》，见图1。自MIL-E-5007D开始提出发

动机状态监视的相关规定，随着该领域技术的不断发展和应用经验的逐步积累，在JSGS-87231A中提出了发动机监视系统(EMS)的概念，在JSSG-2007A中发展成为发动机健康监视系统(EHMS)，在JSSG-2007B中进一步扩展为推进与动力系统健康监视系统(PPHMS)。

从美国的航空发动机通用规范的发展历史来看，均对发动机健康监视系统提出了不同程度的要求并逐步完善。由于航空发动机在设计、制造、试验和使用等方面都取得了长足的进步，通用规范也在不断修改和更新，其技术要求和试验验证发生了很大变化，也体现了对产品的各项基本技术要求，使产品设计、制造、试验、使用等工作有章可循。通用规范是发动机型号研制工作的指导性文件和研制依据，也是使用方验收发动机的重要验收依据。根据各具体型号的特点，通过对通用规范的剪裁，便可形成具体的航空发动机型号规范。

在我国的航空发动机通用规范

GJB 241A—2010《航空涡喷和涡扇发动机通用规范》和GJB 242A—2018《航空涡桨和涡轴发动机通用规范》修订过程中，均在原有机载发动机状态监视系统要求的基础上，明确了应具备超限报警、振动分析、性能恶化趋势分析等故障分析、检测和预警功能。

SAE有关发动机健康管理方法标准

为了指导航空燃气涡轮发动机的状态监视、故障诊断及健康管理系统的的设计、使用和维修，SAE航空航天理事会推进系统分部下设的航空航天推进系统健康管理技术委员会(E-32)发布了31项关于航空燃气涡轮发动机健康管理的系列标准。

1981年,SAE发布了ARP 1587《航空燃气涡轮发动机监视系统指南》，当时的电子技术还处于高速发展阶段，实际应用的产品还比较落后，计算机运算速度还很低，输入输出设备还很笨重。ARP 1587对航空发动机健康管理系统的要求也是基于当时的技术水平提出的，远远落后于现在的健康管理技术水平。2007年,E-32修订出版了ARP 1587B《航空燃气涡轮发动机健康管理系统的指南》，其中对航空发动机健康管理系统的要求是基于现代先进的电子和计算机技术水平提出的。ARP 1587B给出了关于EHM系统最顶层的观点，介绍了EHM系统的整体结构以及概述、效益和能力，并提供了有参考价值的实例，展示了EHM系统可能的设计选择，定义了一个广义的EHM结构。

由于新式的发动机健康监视系统可包括预测诊断能力，即根据探测到的发动机工作条件的变化预见何处发

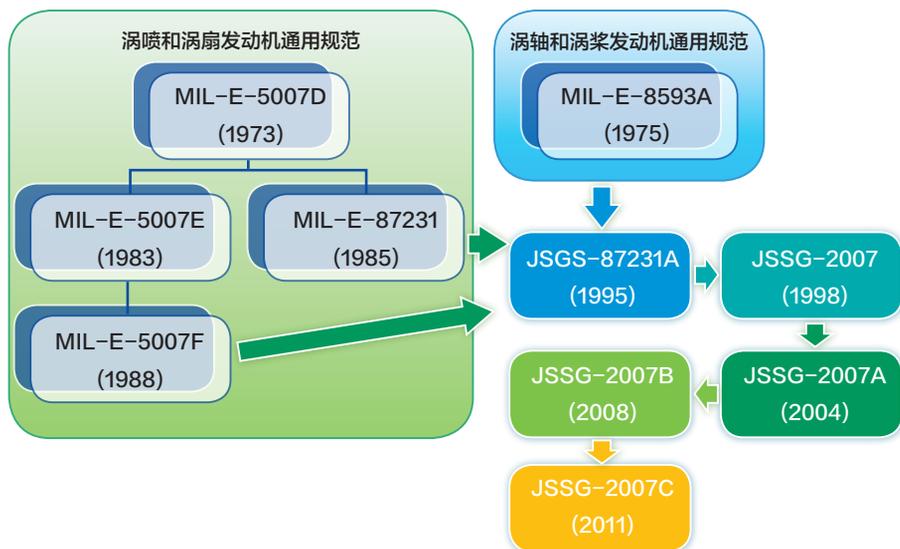


图1 通用规范发展历程

生故障，AIR 5871《燃气涡轮发动机预测》的编制满足了这方面的最新需求，是ARP 1587B的配套标准。

2008年颁布的AIR 4061B《典型发动机健康管理系统的功能与飞机系统集成指南》则为EHM系统的功能与飞机系统（包括其主动力和其他辅助动力单元（APU））的集成提供了最好的实行准则。AIR 4061B提供了典型EHM功能集成的概述，提出了与不同飞机集成时的一些系统变化，给出了涉及集成的总体考虑建议。通过展示EHM参数矩阵介绍了典型的EHM系统可能涉及的典型参数类型，提出了信号和数据处理与检索的认识，并提出了典型EHM参数的功能要求，详细描述了军用和商用方面的实施。

发动机健康管理（EHM）系统的组成

按照SAE ARP 1587B《航空燃气涡轮发动机健康管理系统的指南》的描述，EHM系统包括4个重要组成部分：征兆、诊断、预测和规定措施，其功能结构如图2所示。

征兆

EHM的第一个要素是“征兆”，阐明EHM第一阶段的工作，就是要了解当前情况并能识别出异常征兆。

识别“征兆”可以结合以下两个步骤：第一步就是综合每个部件使用和损伤的历史记录来评估当前情况；第二步是通过监测某一部件的特性或输出参数来判断，包括监视振动水平、磨损屑末。通过建立数据模型进行数据分析，并结合使用经验来判定该状态是否正常。

诊断

EHM的第二个要素是“诊断”，

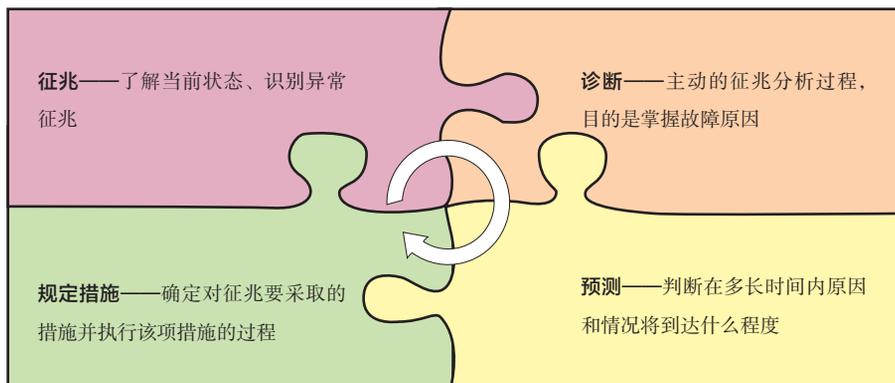


图2 EHM的构成要素

它是征兆分析过程，目的是掌握故障原因。由于当前状态诊断存在不确定性，还需进行故障追踪和隔离技术来判断潜在的故障原因。故障原因越复杂，要找到根本原因所进行的分析就越多。此外，如果一个故障征兆需要特殊的诊断工作，也就意味着该故障很复杂并且预测很困难，为此应将各种问题通过故障模式影响及危害性分析（FMECA）进行判断。

预测

EHM的第三个要素是“判断在多长时间将达到什么程度”。实质上就是预测哪里正在发生恶化，或者何时会发生什么故障或者失效现象。这也说明有必要确认在发动机运行时，它是否会对飞机安全完成任务的能力产生关键影响。例如，在涡轮或者压气机叶片允许的损伤容限内，预测工作就是确认叶片可以在下一个计划中的孔探针检查之前持续工作。未来的目标就是做出越来越多的精确预测，减少对规定时间的手工检查和检测的依赖。

规定措施

EHM的最后也是最关键的一个要素是“决定要怎么处理这个故障

征兆的一个过程”。如果该征兆是由一个特定的故障引起的，处理方式就是已经事先规定好的。与诊断过程相似，规定处理过程也可以被分为不同等级。对于一台发动机来说，处理结果可能是一个单纯的维护决定，也可能是更换一个部件或者整台发动机。另一方面就是追踪处理措施的完成情况，确定采取的措施已经消除了故障征兆，确认诊断或加强了预测。

结束语

航空发动机结构复杂，工作环境恶劣、状态多变，属于故障多发系统。通过对关键部件进行连续监测，能及早地发现故障前兆，从而增加飞行的安全性。通过状态监测和故障诊断，可以选择正确的维护方法，减少无故障的检查，从而减少维护费用。随着健康管理系统的技术发展，相关的标准要求也逐渐向故障诊断和预测延伸，以满足实际需求，进而推动和引导健康管理系统的改进完善。

航空动力

（王伟生，中国航发研研所，研究员，主要从事标准规范技术研究）