

# 航空发动机健康管理系统发展现状及其指标体系研究

蔡光耀, 高 晶, 苗学问

(空军装备研究院, 北京 100076)

**摘要:**简述了航空发动机故障检测与诊断的发展历程,表明预测与健康管理系统(PHM)是实现先进发动机的必备功能。在分析典型先进航空发动机预测与健康管理系统(EPHM)系统的基础上,详细阐述了EPHM的需求,并基于需求系统梳理了EPHM系统的指标体系。最后对我国航空发动机健康管理的研究提出了几点展望。

**关键词:**预测与健康管理系统;航空发动机;指标;发展历程

中图分类号:V23 文献标识码:A 文章编号:1000-8829(2016)04-0001-05

## Current Situation and Indexes of Prognostics and Health Management System for Aero-Engines

CAI Guang-yao, GAO Jing, MIAO Xue-wen

(Air Force Equipment Academy, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The development process of detection and diagnosis technologies for aero-engines is reviewed, it reveals that engine prognostics and health management (EPHM) system is the essential unit of advanced aero-engines. Then, the user's requirements of EPHM are extracted by analyzing the typical advanced foreign EPHMs. Subsequently, the index system of EPHM is obtained from user's requirements. Finally, several suggestions for the research and design of EPHM are presented.

**Key words:** prognostics and health management; aero-engine; index; development process

现代航空发动机结构复杂,工作状态恶劣、多变,属于故障多发系统。传统的定期维修方式不但耗费资源、效率低下,而且费用居高不下。例如美国国防部每年用于采购发动机的费用为13亿美元左右,而维护现有发动机的费用却在35亿美元左右<sup>[1]</sup>。最近发展起来的视情维修具有规模小、效率高、经济可承受性好以及可避免重大灾难性事故等显著优势,非常适合航空发动机这样的大型复杂系统的维修保障。而视情维修的前提之一是系统具有对自身的故障进行预测和健康状态管理的能力。因此预测与健康管理系统(PHM, prognostics and health management)的概念被提出来,以实现“经济可承受性”<sup>[2]</sup>。PHM是指利用传感器获取系

统的数据信息,借助分层的智能推理机软件,利用较少传感器甚至不使用特殊传感器,来预测、诊断并隔离飞机上的故障。引入PHM不是为了直接消除故障,而是评估系统自身的健康状态,在系统故障发生前进行预测,并结合可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施建议以实现系统的视情维修<sup>[2-4]</sup>。

发动机预测与健康管理系统(EPHM, engine prognostics and health management)系统是PHM技术在航空发动机上的应用,是传统发动机状态监控能力的拓展。它采用先进传感器的集成,并借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理发动机的健康状态。EPHM技术是航空发动机维修思想从经验型的“预防为主”向“以可靠性为中心”的方向转变的重要前提条件,是推动航空发动机维修方式从单纯的定时维修方式转向视情维修为主,定时维修、视情维修和状态监控等维修方式相结合的必要手段<sup>[5]</sup>。目前,EPHM技术在国外现役发动机中得到了广泛应用,并成为新研军、民用发动机的必备功能系统。工程应用及技术分析表明,EPHM

收稿日期:2014-09-24

**作者简介:**蔡光耀(1980—),男,硕士,工程师,研究方向为装备保障论证;高晶(1980—),博士,工程师,主要研究方向为装备可靠性论证;苗学问(1977—),男,博士,高级工程师,研究方向为装备保障论。

技术可以显著降低发动机全寿命周期费用,提高发动机的安全性、可靠性、维修性、测试性和保障性,进而提高飞机的战备完好率和任务成功率。

EPHM作为一种先进的系统,其研究和实施将对我国航空发动机的发展起到积极的推动作用。然而,在国内 EPHM 还是一个新事物,对 EPHM 系统的论证和设计都还不成熟,也未形成明确的指标体系。鉴于此,本文对航空发动机健康管理与发展历程进行了总结,阐述了 EPHM 的功能需求,梳理了发动机健康管理系统的指标体系,并对我国航空发动机健康管理的研究提出了几点展望。

## 1 EPHM 的发展历程

国外在 20 世纪 60 年代末即开始研究开发航空发动机状态监视和故障诊断综合系统,70 年代开始在民用发动机上应用,并取得成功,70 年代后期战斗机发动机也开始装备状态监视和故障诊断系统。总体上讲,国外状态监控与故障诊断技术和发动机健康管理技术的发展经历了由简单向复杂、由低级向高级、由离线诊断向实时监控、由单一向综合化的过程,大致经历了 4 个发展阶段:

第一个阶段是 70 年代初的有限监视系统,此阶段的特点是测量参数较少,且需人工记录,功能有限。当时为保证民用航空发动机可靠性和安全性产生了较好的作用,但是这种系统对于工作应力很大和工作状态变化很大的军用发动机,监控效果不够理想。

第二个阶段是 80 年代中期的扩展监视系统,与前一阶段相比增强了故障诊断能力,可将故障准确地隔离到发动机部件和子系统,能够定量分析部件和发动机性能的衰退程度。这一阶段的数据记录更为精确,而且根据数据分析方法的需要,可以在一个起落中采集更多的数据信息;这一阶段的数据分析方法也应用了更多的概率统计模型,例如在故障诊断方面,在概率统计模型的基础上,利用了专家系统方法,这些技术的利用使得故障报警更为及时,故障诊断更为准确。

第三个阶段从 90 年代开始,民用发动机在之前的基础上发展起来了智能维护系统。此时的状态监控和故障诊断系统功能较以前大大增强。智能维护属于预测性维护,根据设备的维护需求对设备的性能衰退趋势进行监测、评估和预测,并按需制定维护计划,以防止它们因故障而失效。由于人工智能、机器学习等技术的发展,这一阶段的另一个显著的特点是在数据分析的方法和手段上综合应用了更多的新技术。

第四阶段跟随四代机的发展,先进战斗机及其发动机由状态监控和故障诊断技术进一步向预测和健康管理技术方向发展,形成真正的 EPHM 系统。实时

化、智能化、综合化和网络化是 EPHM 技术研究发展的特点。EPHM 技术的研究与发展主要集中在 4 个领域,即系统划分、系统体系结构、EPHM 功能性和算法途径。广泛认可的一种对 EPHM 系统的划分包括两个分系统:机上或嵌入式分系统;机下或地面分系统。EPHM 包括 4 个功能领域:气路分析和性能趋势跟踪;滑油和碎屑监控;振动监控;使用和寿命监控。EPHM 技术的发展将促使未来的 EMS 发展成为与飞机电子系统、发动机全权限数字电子控制系统(FADEC)一体化设计的综合系统,其监控和故障诊断的功能进一步增强,可在机载状态下把故障隔离到航线更换项目。

## 2 典型航空发动机的健康管理系统的实例

### 2.1 F117 发动机的 EPHM 系统

研究中的 C17-T1 型飞机的 F117 发动机 EPHM 系统,由 NASA 格林研究中心、Dryden 研究中心、Pratt & Whitney 公司及其他几个公司联合研制。在开始阶段,以 Edwards 空军基地的 C17-T1 型飞机为平台,进行推进控制与健康管理的(PCHM, propulsion control and health management)技术的验证。结合控制系统和 EPHM 系统来提高飞行的安全性。F117 的 PCHM 框架如图 1 所示。其中诊断与控制在校载系统中实现,而健康评估则由地面系统来完成<sup>[6]</sup>。在该项目中,验证了与 EPHM 相关的传感器技术、诊断和预测算法、控制和诊断的集成技术等。PCHM 项目证实了 EPHM 技术在提高发动机安全性、降低发动机/飞机运行成本,并且提高飞机的可用性方面的潜在价值。

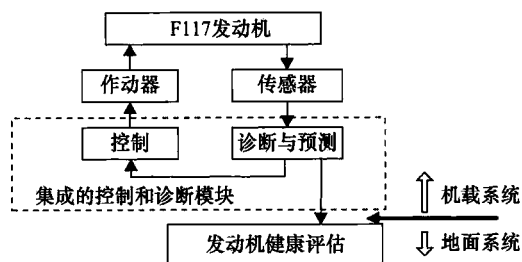


图 1 F117 发动机 PCHM 功能结构图

### 2.2 F119 发动机的诊断与健康管理系统(DHM)系统<sup>[7]</sup>

F119-PW-100 燃气涡轮发动机是为美国第四代战斗机 F-22 配装的发动机,它采用的 DHM 系统尚不具备预测能力,还不是真正意义上的 EPHM 系统。F119 发动机 DHM 系统与控制系统结为一体,其系统硬件由控制系统电子设备和各种诊断传感器构成(如图 2 所示)。其中,控制系统电子设备包括两个全权限数字发动机控制(FADEC)装置和一个综合发动机诊断装置(CEDU)。FADEC 在检测到一个发动机故障事件时,评估和调节该故障并与 CEDU 通信。CEDU 记录

故障及其发生时间属性,并将这些记录存储在 CEDU 的内存中,当飞机返回基地时,可以将这些信息提供给发动机维修人员使用。

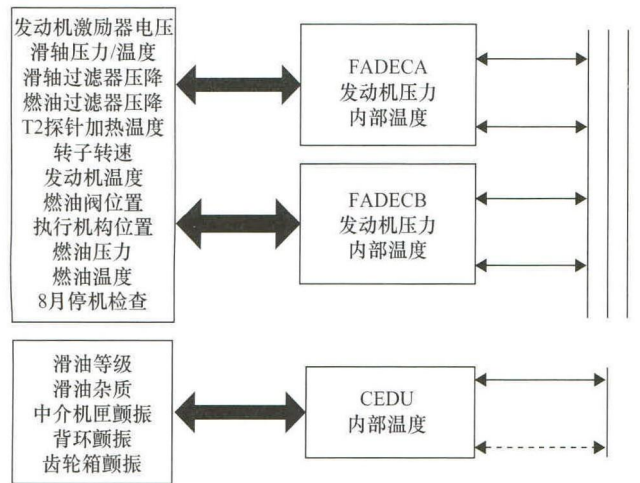


图2 F119 发动机控制与监控系统

2.3 F-35/F135 的 PHM 系统

F-35 联合攻击机 (JSF) 研制时的构想是:研制和生产一种经济上可承受的下一代攻击战斗机武器系统并实现全球保障。该构想的实现是建立在杀伤力、生存性、保障性/部署性和经济承受性四大方案支柱之上。这四大支柱为 JSF 武器系统的设计和研制确立了基础。其中,经济承受性(即降低下一代战斗机的研制、生产和拥有费用)是 JSF 项目采办过程的核心支柱,也是美军及其盟军关注的焦点。经权衡研究发现,为满足经济承受性、保障性、部署性要求,实现自主式保障,必须使用 PHM 系统。

F-35 (JSF) 飞机采用的 PHM 系统复杂,它在一定程度上涉及到飞机的所有单元。为了便于从部件级到整个系统级综合应用故障诊断和预测技术,PHM 系统由机载和地面部分组成,并构成采用分层推理结构的一体化系统。JSF 的机载 PHM 系统包括飞机子系统、任务子系统、机体子系统、推进子系统等几种区域管理器软件单元。其中推进系统区域推理机(相当于 EPHM)监测发动机和升力风扇健康状态,它驻留在全权限数字式电子控制装置(即 FADEC)中,接受各类传感器发来的信息,包括:发动机吸入屑末、滑油状况、发动机应力、轴承健康信息、静电式滑油屑末等信息,以及先进寿命算法和部件状况监测系统传来的信息,并进行融合和推理处理(如图3所示)。

推进系统管理单元将区域故障信息经过整理后发送给飞行器区域管理器。飞机管理单元通过对所有系统的故障信息的相互关联,确认并隔离故障,最终形成维修信息和供飞机维修人员使用的知识信息,传给地面的自主式后勤信息系统 (ALIS)。ALIS 根据包括发

动机健康信息在内的各类信息来评估和预测飞机的安全性,并据此安排飞行、管理及维修等任务<sup>[7]</sup>。

通过上面的介绍可知 F135 发动机的 PHM 系统和 F119 发动机的 DHM 系统的主要区别在于具有寿命预测功能,是真正意义上的 EPHM 系统。F135 之所以具有寿命预测功能,是因为在 F-35/F135 项目的发动机健康管理系统中选择了一组发动机子系统传感器,包括用于气路碎屑监测的吞咽式监测系统 (IDMS) 和发动机损伤监测系统 (EDMS)。

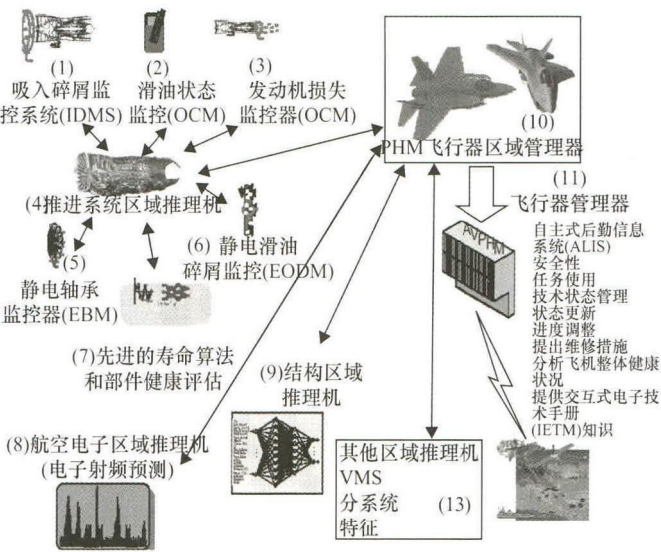


图3 F135 的 EPHM 系统

3 EPHM 的指标体系

3.1 EPHM 系统需求分析

(1) 总体目标。

从以上的实例分析可以看出,EPHM 的总体目标是:在保证安全性、帮助飞机完成预定任务的情况下实现较低保障成本,从而使得先进航空发动机的全寿命周期具有较佳的经济性。然而,EPHM 的研制和部署也是需要成本的。由此可见,在进行 EPHM 系统性能论证时,首先要论证 EPHM 应当取得何种效益,并据此进行研制的合理规划。因此,EPHM 总价值指标是首要的。

(2) 研制过程控制。

从典型 EPHM 的发展历程看,EPHM 系统有由简单到复杂、由状态检测到寿命管理的发展阶段。国内在进行 EPHM 论证时,对 EPHM 既要有高的先进性起点要求,又要兼顾国内当前的技术基础。因此,对研制时的技术成熟度和适用标准要有充分的论证。就标准而言,目前我国航空发动机型号研制中,健康管理系统的应用研究尚在起步阶段,存在诸多技术难点和关键技术,急需借鉴国外先进研制经验和标准规范的指导,以推动关键技术突破。

### (3) 信息化程度。

EPHM 的性能要更加强大,则功能自动化能力就要愈强<sup>[8]</sup>。如果 EPHM 要进行自动化的转变,则要求整个 EPHM 系统不断地改进和升级。然而,对不断改进或升级的要求都与对项目费用的限制或适航性要求相冲突。对于缺乏研究经验的国内 EPHM 而言,如何选取功能自动化程度,既要考虑先进性,又要与中国国情相吻合。

### (4) 关键要素能力。

EPHM 系统一般需要 4 个基本功能单元构成:状态监控、诊断、预测和任务规划<sup>[9]</sup>。这 4 个功能单元涉及的学科较多、技术广泛,需要进行关键技术分析,对这 4 个要素中主要技术能力提出具体和详细的指标。

### (5) 通用要求。

EPHM 也是一个具体的军用装备,它的设计和使用也需要满足相应的军用装备标准。

## 3.2 EPHM 需求到指标参数体系的转化

### (1) 总体目标的转化。

EPHM 的目标是要在保证安全和完成任务的情况下,获得更好的经济效益或降低保障成本。然而,任何效益都不是免费得到的,实施 EPHM 必然产生费用。在进行 EPHM 系统性能分析时,要保证 EPHM 系统所带来的效益高于其实施费用。EPHM 产生的费用主要包括以下部分:EPHM 系统建设和运行的费用,EPHM 成功预警后的相关处理费用,错误诊断引起的费用和 EPHM 误隔离影响造成的费用。因此,EPHM 系统的费效比是直接考评该系统是否值得研究或使用的一个重要指标。

EPHM 系统的费效比计算可以参考一般的 PHM 系统费效比模型<sup>[10-11]</sup>。

### (2) 研制过程控制。

与国外相比,我国在发动机健康管理技术水平和标准规范上都存在很大的差距。主要体现在以下几个方面<sup>[12]</sup>:一是而我国尚无具体的 EPHM 研制规范;二是目前国内制定的通用规范对系统要求不足,对新型涡扇、涡轴发动机健康管理系统的研制指导作用针对性不强;三是现行标准仍停留在发动机监视系统的水平,远远落后于当今以 SAE ARP 1587B 为代表的系列新技术规范<sup>[9]</sup>,不再适用于基于现代先进技术的 EPHM 研发。鉴于这种情况,如何引用、裁剪、制定当前 EPHM 研制所需的指导标准或规范,关系到 EPHM 的研制过程和最终综合性能。因此,在 EPHM 的论证阶段,必须要对系统研制标准进行明确的规定。根据我国发动机的研制现状,可以适当裁剪来制定当前 EPHM 研制所需的指导标准或规范。例如可参考 SAE ARP 1587B 为代表的系列新技术规范。SAE ARP

1587B 系列标准为 2008 年颁布,裁剪该标准来指导设计 EPHM 系统基本是可以接受。如何根据我国国情进行某些细节的裁剪,还需要做许多的研究工作。

### (3) 信息化程度。

EPHM 系统涉及过去和当前的参与发动机及其零部件健康管理的数据和信息处理,包括收集、处理、显示、评估和发布,通过人工处理和分析或高度自动化处理,如何优化这些功能,提高效率并节省成本,是反映一个 EPHM 性能和价值的重要因素,需要在系统论证时提出具体指标。

(4) EPHM 系统的关键功能要素(关键技术能力)指标。

EPHM 系统一般需要 4 个基本功能单元构成<sup>[9]</sup>,但在 EPHM 的各项功能要素中,故障诊断和预测最为关键。

诊断用于检测故障症状和确定根本原因。诊断的底线是以及时准确的方式检测、隔离故障,并有足够的分辨率识别出特定故障部件。诊断分为检测和隔离两类,每类都包含响应时间、准确度、灵敏度/分辨率和鲁棒性等要求。

对故障诊断而言,需要考察以下能力:

- ① 系统总体的故障检测能力,即故障检测率;
- ② 当故障发生后,检测故障的时间,即平均故障检测时间与最大故障检测时间等;
- ③ 典型故障发生后,能够检测到的概率,即单点故障检测率,根据故障的危害程度提出不同的指标值,对于灾难性故障的单点故障检测率目标要求是 100%;
- ④ 在规定的工作时间内,发生的虚警数多少,即虚警率。

对于 EPHM 而言,不但要诊断出故障的存在,还要隔离出故障的位置。因此,还需要考察故障隔离能力:

- ① 有多少故障能够被有效隔离,即故障隔离率;
- ② 当检测到故障发生后,隔离快慢的要求,即平均故障隔离时间与最大故障隔离时间;
- ③ 故障隔离算法正确性的要求,即隔离分类率;
- ④ 故障定位的不确定性,即最大模糊数据。

预测是尽可能准确、提前地预测部件或消耗品的剩余寿命,从而帮助完成后勤管理、维修规划、告警和机群范围内的规划。因此,预测能力决定了 EPHM 的总体效能。就预测能力而言,可分为以下 4 类:

- ① 预测的准确性。准确性是一种对失效时间的点估计和实际失效时间接近程度的度量,利用预测的误差范围可以有效证明 EPHM 系统预测的准确能力。误差指标包括:平均误差、平均绝对误差、方差绝对误

差、平均绝对值相对误差、方差相对误差及相关性系数6个度量指标。

② 预测的精确性,即精确性标尺,度量预测结果落入的预测区间的狭窄性。

③ 预测结果对预测输入扰动的敏感程度,即健壮性标尺,说明预测结果对预测输入扰动的敏感程度。目前主要度量指标包括:Brier评分和敏感性。

④ 预测的快慢,即计算性能标尺。评估预测算法的计算性能是非常重要的,尤其对于监控实时性来说尤为重要。这里以平均预测时间和最大预测时间为度量指标。

在对这些关键功能提出指标时,必须提出具体、详细的诊断与预测指标。

#### (5) EPHM 通用指标。

EPHM 作为一个航空设备,必然要满足系统通用规范,包括系统的功能、性能、硬件与软件设计、机载分系统的电磁兼容性、环境适应性、互换性以及系统试验验证和评估验证要求等技术要素。据此可牵引出 EPHM 的通用指标。

## 4 总结与展望

EPHM 技术经历了故障诊断、寿命预测、系统集成三个日益完善的阶段,现已成为国外新一代武器装备研制和实现自主式保障的一项核心技术。EPHM 也是我军新一代作战飞机故障诊断体系的发展方向,对提高飞机安全性能、提高维修保障效率、降低寿命周期费用、提高战斗力将起到重要作用。针对国内先进航空发动机 PHM 系统成熟度较低的问题,本文全面、系统地分析 EPHM 系统发展历程、现状和系统指标体系进行了分析,结论如下:

① 通过对航空发动机健康管理系统发展历程、现状及典型军用先进发动机 EPHM 的分析,表明 EPHM 是实现先进发动机的必备功能。

② 采用基于 EPHM 需求的论证思想,对 EPHM 系统的典型功能需求和效益进行分析,从总体指标、关键能力指标和通用系统指标等方面阐述了 EPHM 系统指标体系。

然而,EPHM 的研究对象是涉及到材料、结构、气动热力、控制等多个学科的一个复杂的系统,虽然本文对 EPHM 进行研究和总结,但还存在有待进一步研究和探讨的问题。从现有认识来看,主要有以下几个方面:

① EPHM 指标体系的权衡方法。本文虽然论述了具体的 EPHM 指标,但由于系统的复杂性,指标之间的相互联系、相互影响的规律还有待进一步探讨,如何进行指标的多参数、多目标优化也值得进一步研究。

② EPHM 系统的论证程序,可直接应用于在研或以后的 EPHM 论证工作,以提高论证的效率和保证论证的准确性。

③ EPHM 系统评估、验证方法研究。EPHM 技术在国内的研究和发展都处于起步阶段,对 EPHM 验证的研究甚少,从 EPHM 的提出到实现,今后无疑还要做大量深入的技术研究和开发工作。目前还需要建立合理有效的 EPHM 系统评估与验证指标体系,为 EPHM 系统评估与验证工作的开展提供依据。

#### 参考文献:

- [1] Merecr C R, Simon D L, Hunter G W, et al. Fundamental technology development for gas-turbine engine health management[R]. NASA-TM-2007-0022364, 2007.
- [2] 张宝珍,曾天翔. PHM:实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术[J]. 航空维修与工程, 2005(6):20-23.
- [3] 徐萍,康锐. 预测与状态管理系统(PHM)技术研究[J]. 测控技术, 2004, 23(12):58-60.
- [4] 宋辉,李晓明,宋文波. 航空发动机健康评估技术综述[J]. 航空发动机, 2011, 37(2):58-62.
- [5] 王施,王荣桥,陈志英,等. 航空发动机健康管理综述[J]. 燃涡轮试验与研究, 2009, 22(1):51-58.
- [6] Simon D L, Garg S, Venti M. Propulsion control and health management (PCHM) technology for flight test on the C-17 T-1 aircraft[R]. NASA/TM-2004-213303, 2004.
- [7] 张宝珍,王萍. 预测与健康管理系统(PHM)技术在国外新一代战斗机发动机中的应用[J]. 测控技术, 2008, 27(增刊):212-217.
- [8] Wade R A. A need-focused approach to air force engine health management research[C]//IEEE Aerospace Conference. 2005:1-13.
- [9] SAE-ARP-1587B-2007, Aircraft gas turbine engine health management system guide[S]. 2007.
- [10] Leao B P, Fitzgibbon K T, Puttini L C, et al. Cost-benefit analysis methodology for PHM applied to legacy commercial aircraft[C]//IEEE Aerospace Conference. 2008:1-13.
- [11] 何厚伯,赵建民,郝茂森,等. PHM 系统中的费效模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(1):129-132.
- [12] 于宏军,韩建军,张华,等. 航空发动机健康管理系统标准探讨[J]. 航空标准化与质量, 2012(4):9-11.

□

欢迎订阅 2016 年《测控技术》

欢迎发布广告信息

● 订阅代号:82-533

● 定价:18.00 元/期