

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.001

# 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究\*

景博 徐光跃 黄以锋 焦晓璇 梁威  
(空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038)

**摘要:**在研究故障预测与健康管理(PHM)技术体系构建、数据采集与运用、系统状态监测与故障预测、验证评估等发展现状的基础上,结合新阶段装备 PHM 工程应用现状,从装备测试性设计与验证、多源故障信息交互与管理、寿命预测与维修支持、验证评估及标准制定等方面分析军用飞机 PHM 技术面临的瓶颈问题,并指出应重点开展包括测试性试验技术、智能信息处理与融合技术、航空装备与信息标准化管理技术、数据挖掘与平台构建技术等方面的研究,最后对我国 PHM 技术的发展给出思考与建议。

**关键词:** PHM;信息融合;数据挖掘;测试性;航空编码;云计算;超算平台;验证评估

**中图分类号:** TP277      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 590.6099

## Recent advances analysis and new problems research on PHM technology of military aircraft

Jing Bo Xu Guangyue Huang Yifeng Jiao Xiaoxuan Liang Wei

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:**The recent system construction, data acquisition and application, system status monitoring and fault prediction, verification and validation of the PHM technology are summarized. Then, according to the current engineering application of equipment PHM technology, the development and application bottlenecks of military aircraft PHM technology are analyzed from the aspects of equipment test design and verification, multi-source fault information acquisition, interaction and management, remaining service life prediction and maintenance decision of aviation parts, verification and validation and standard development. And it is pointed out that the research on the technologies of testability demonstration, intelligent information processing and fusion, standardized management of aviation equipment and information, data mining and platform construction and so on should be carried out. Finally, some research ideas and development trends of domestic PHM are given.

**Keywords:** prognostics and health management; information fusion; data mining; testability; aviation code; cloud computing; super computing platform; verification and validation

## 1 引言

随着战场时空的急剧压缩,装备先进性、复杂性大大提高,故障预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)技术已成为支撑装备实现高效保障、自主健康管理的关键技术<sup>[1-2]</sup>。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》明确指出,重大产品

和重大设施寿命预测技术是提高运行可靠性、安全性、可维护性的关键技术。

PHM 技术能够通过即时监测来获取系统的技术状况,预测功能性故障并作必要的预防维修,从而缩短维修时间,降低飞机全寿命周期维护保障费用,提高系统的可靠性和安全性,能够为未来战机实现快速、准确的维修保障提供有力支撑<sup>[3]</sup>。近年来,国内外科研机构都致力于 PHM 相关理论及关键技术的研究,取得大量成果,使得

PHM 技术的发展进入了新的阶段。然而,现有的数据获取、处理与传输能力、故障诊断与预测能力、信息管理及利用能力、保障资源调度能力制约了军用飞机 PHM 技术的发展和运用。分析梳理军用飞机 PHM 技术的发展瓶颈,在核心技术方面寻求突破,能够推动我国在 PHM 技术研究及军用飞机维修保障能力建设方面获得跨越式发展。

本文综述了 PHM 技术研究内容及发展现状,并结合装备 PHM 系统实际工程应用,分析梳理了军用飞机 PHM 技术发展及应用过程所面临的瓶颈问题,并给出了研究思考和发展建议。

## 2 PHM 技术内涵及发展现状

### 2.1 PHM 技术内涵

PHM 技术,包括两层含义:1)故障预测,即预先诊

断部件或系统完成其功能的状态,确定部件正常工作的时间长度;2)健康管理,即根据诊断、预测信息、可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策。PHM 系统的优势包括:故障诊断自动化程度高,准确性、时效性好;能够实现故障预测,降低维修成本,提高装备实时可靠性等。

### 2.2 PHM 研究内容及进展

PHM 技术不仅是一种先进的测试、维修技术,更是一种全面的故障诊断、故障隔离、故障预测及状态管理技术。其在先进军用飞机上的应用有直升机 HUMS 系统,歼击机 PHM 系统等,系统结构如图 1、2 所示。军用飞机 PHM 系统通常由两大部分组成,即数据采集与传输部分、健康监控与故障预测部分,如图 3 所示。其研究内容主要包括以下几个方面。

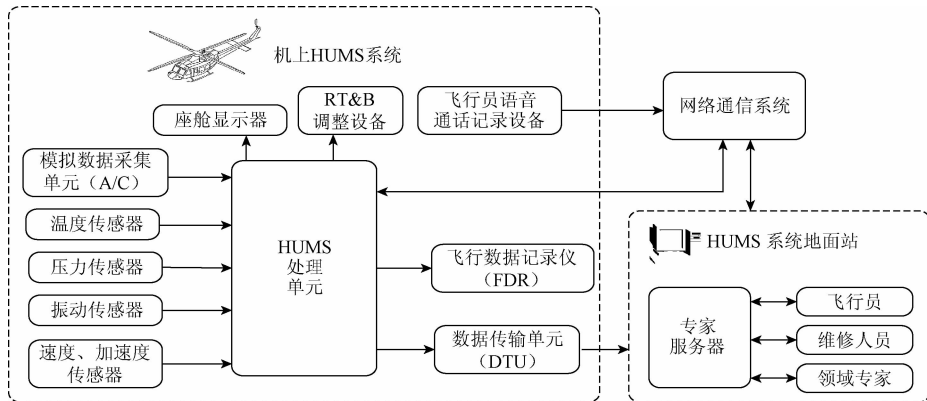


图 1 先进直升机 HUMS 系统结构

Fig. 1 Structure of advanced helicopter HUMS system

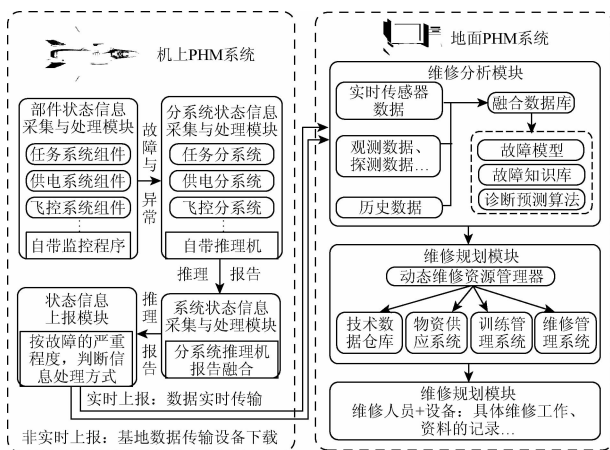


图 2 先进歼击机 PHM 系统工作流程

Fig. 2 Workflow chart of advanced fighter PHM system

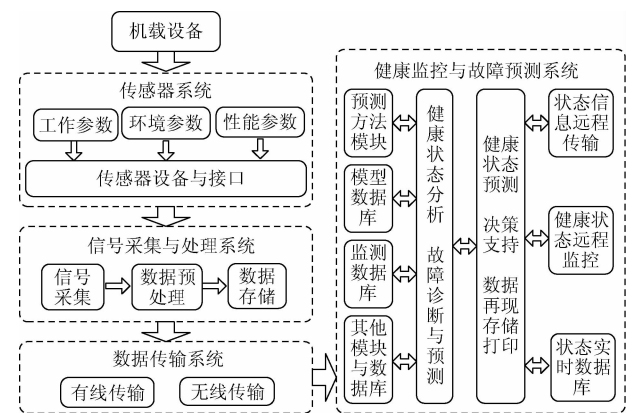


图 3 军用飞机 PHM 系统

Fig. 3 Schematic diagram of military aircraft PHM system

### 2.2.1 PHM 体系构建

PHM 体系构建的研究内容包括 PHM 系统的设计思

想、组成要素、应用技术和方法。设计合理的 PHM 体系结构,能够将各分系统有效联合,为整个系统功能实现提供支撑。并且,PHM 体系结构设计也能帮助研发人员明

确系统整体情况,为 PHM 系统的搭建与建模提供理论支撑。

在飞机 PHM 整体结构理论研究方面,Zhang 等人<sup>[4]</sup>以 F-10 为研究对象,设计实现 PHM 系统功能的体系架构,详细论述 8 个组成子系统;Wang 等人<sup>[5]</sup>给出了基于空地一体化管理的大飞机 PHM 的原型系统结构及软硬件设计方案,讨论了未来大飞机 PHM 系统研制面临的主要问题;景博等人<sup>[6]</sup>详细论述了实现 PHM 功能的信息物理融合系统(CPS)架构,分析了 CPS 在工业领域及航空航天领域的应用现状及瓶颈问题。对于特定系统的研究,Azam 等人<sup>[7]</sup>给出了机电作动系统的 PHM 架构,并搭建机电作动系统测试及验证平台,以实现脱机故障检测与鉴定、故障根源诊断、部件退化状态识别及退化趋势预测等功能;邓森等人<sup>[8]</sup>依据航空电子系统的故障模式与机理,结合测试性设计分析理论,提出了一种基于测试性的电子系统综合诊断与故障预测系统架构。为研究数据对 PHM 系统构建的影响,Di 等人<sup>[9]</sup>提出了基于数据仓库的 PHM 架构,将数据管理技术与 MIMOSA(machinery information management open systems alliance)技术相结合,通过存储信息处理、在线数据分析、数据挖掘过程,实现系统健康状态的有效评估,从而提供良好的决策支持;Tan 等人<sup>[10]</sup>开发了基于可测性设计的 PHM 系统架构,分析了测试数据对系统功能实现的影响,给出了测试性建模的新方法,并在组件级对故障进行诊断和分析。

### 2.2.2 数据采集与传感器应用

合理构建采集系统,获取表征部件状态的参数,是 PHM 系统工作的数据基础,更是实现装备 PHM 的第一步。其中,传感器技术的应用最为关键,它将直接影响 PHM 系统的运行结果。目前关于传感器技术的研究主要有两个方面:1)对单个传感器技术的革新,包括监测性能的提升、环境适用性的增强、尺寸的缩小及能耗的降低等;2)优化传感器网络布局,以提高传感器的计算协作能力和健壮性。

在数据采集系统构建方面,Vohnout 等人<sup>[11]</sup>指出先进传感器技术与智能推理算法是监测机电系统累积疲劳损伤的核心技术,分析说明将微电子机械系统数据记录器安装于关键系统,对提高数据保真度,支撑 PHM 技术的实现具有重要作用。在传感器应用技术研究方面,Hu 等人<sup>[12]</sup>综述了 PHM 技术的基本原理及其在装备维修保障中的地位及作用,着重强调了传感器技术在 PHM 系统中的关键地位。

### 2.2.3 数据传输

传感器采集到的数据信息需要通过一定的方式传输到 PHM 系统中的其他部分。目前主要有两种传输方式,即有线传输和无线传输,数据信息通过传输设备、介质,按照通信标准、网络协议进行发送与接收。

在数据传输技术研究方面,Kroculick 等人<sup>[13]</sup>以增强型基于状态维修(CBM+)的数据传输方式为研究对象,总结了端到端通信架构发展的瓶颈问题,并给出解决方案;Tambe 等人<sup>[14]</sup>重点介绍了基于分布式体系结构的数据分发服务(DDS)的航空电子传感器健康评估的方法与步骤,并进行了实例验证。

### 2.2.4 数据预处理、状态监测、健康评估、故障预测及推理决策

对原始数据进行预处理,使数据格式满足后继处理的要求,同时也便于传输的存储,其过程一般包括数模转换、去噪、滤波、压缩、信号自相关等。状态监测、健康评估、故障预测和推理决策是 PHM 系统的核心部分,在某种意义上它们都是一种推理过程,在构建 PHM 系统时往往要根据系统的实际情况采用一种或多种技术和方法。状态监测和健康评估方法除了简单的阈值判断,还包括基于数据、基于模型、基于经验的推理算法。故障预测和推理决策是指综合利用各种数据信息,如监测参数、使用状况、当前的环境和工作条件、早先的试验数据、历史经验等,并借助各种推理技术,如数学物理模型、人工智能等,评估部件或系统的剩余使用寿命,预计其未来的健康状况,并结合技术人员技术水平、备件状况等实际保障能力,制定科学的维修决策。

数据预处理、状态监测、健康评估、故障预测和推理决策方面的研究主要包括信号处理方法、诊断预测及推理决策算法、模型的改进与创新。Bechhoefer 等人<sup>[15]</sup>介绍了嵌入式 PHM 技术常用的分析算法,主要有时间同步平均法(TSA)、快速傅里叶变换法(FFT)和轴承包络分析法(BEA),并分析了每种算法的适用范围;Wu 等人<sup>[16]</sup>提出了基于剩余寿命预测信息的人工神经网络优化算法,该方法能够有效找到对应于最低维护成本的最佳故障概率阈值;李梦妍等人<sup>[17]</sup>运用灰色模型和进化神经网络对装备性能参数预测展开研究,以某型雷达为实验对象,验证了组合预测模型的精度和泛化能力。孙强等人<sup>[18]</sup>综述了基于不确定性的故障预测方法的关键问题,依据不确定性特点将故障预测方法分为基于随机性、模糊性、灰性及混合不确定性 4 类,重点探讨了基于区间不确定性的故障预测方法的可行性。Siddiqui 等人<sup>[19]</sup>提出了一种对飞机部件进行实时频率估计进化傅里叶变换算法,该方法能够估计频率初值,有效提取参考系,减少计算量,且具备较高精确度;Watson 等人<sup>[20]</sup>建立了发动机机电作动器(EMA)的物理分析模型,搭建了实物仿真平台,并运用 LDA、QDA 和 SVM 等系统级推理分类技术,隔离了严重故障模式。

### 2.2.5 验证评估

验证评估作为 PHM 的重要环节,是决定 PHM 系统能否有效运行的基础,对于提高 PHM 系统的成熟度,进

而提高武器装备的固有可靠性和使用安全性,以及降低系统的全寿命周期费用具有重要意义。

关于 PHM 验证评估的研究, Hou 等人<sup>[21]</sup>提出一种对 PHM 系统的诊断及预测能力进行全面验证的方法,包含 5 个步骤:参数选择、示例数据库构建、样本处理、综合验证、结果评估; Yang 等人<sup>[22]</sup>针对 PHM 系统的功能设计进行验证,建立了面向应用的指标系统模型,并通过层次分析法和模糊综合评价法衡量 PHM 系统性能指标。彭宇等人<sup>[23]</sup>从数据驱动方法的适应性、算法或模型选择的研究及算法运行的实际性能对 PHM 验证与评估的发展现状进行综述。

### 3 军用飞机 PHM 问题研究

装备作战需求推动了军用飞机 PHM 技术的飞速发展,新理念、新技术、新架构为 PHM 技术的应用提供新的支撑,其发展进入到新的阶段。然而,受当前 PHM 核心技术研究及装备维修保障能力发展的限制,军用飞机 PHM 技术的发展与应用仍存在大量瓶颈问题,主要体现在以下方面。

#### 3.1 装备测试性设计与验证

装备 PHM 系统的建立离不开可测性技术的支持。可测性(Testability)也称测试性,是系统或设备能及时并准确确定其状态(工作、不工作或性能下降)并隔离内部故障的一种设计特性。采用测试性设计技术对装备产品设计原型进行虚拟测试和验证评估,能够排除可能的设计缺陷并提高测试性指标。而且,测试性技术还可以缩短装备产品研制、试验和评价的周期,降低产品的研制费用,提高产品的可用性指标。

目前,测试性试验与验证工作大多仅靠定型阶段的

外场验证,时间短、样本少,难以充分暴露各种故障模式,不得不大量依赖经验和外部设备进行故障诊断和隔离,增加了保障时间。而且,自动测试设备对故障的检测和隔离能力较弱,故障检测率、隔离率及虚警率的评估值都未能达到规定要求。与此同时,受产品技术条件、进度和费用等因素的限制,难以对发现的所有测试性缺陷进行有效的改进,综合导致实际装备的测试性水平低于要求值。因此,需要在装备研制过程中提高产品的测试性水平。

在产品设计与研制、验收与定型过程中,开展科学有效的测试性验证试验和综合评价对发现测试性设计缺陷,实现测试性增长,判定产品测试性指标,提供科学评价依据具有重要意义。产品的测试性验证,包括选择试验用例、故障注入、试验产品的检测与监控、形成试验报告与结论,具体实施过程如图 4 所示,主控计算机中装有控制软件、监控软件及评估软件等,完成信息的处理与整个系统功能的实现。

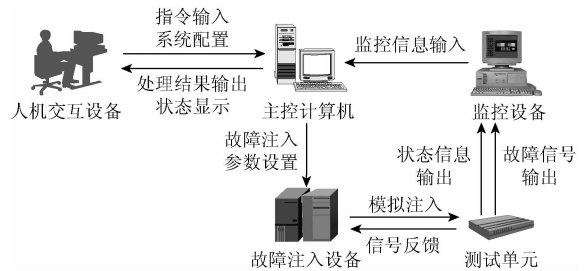


图 4 测试性验证试验的实施过程

Fig. 4 Implementation process of testability verification test

完整的测试性试验系统应当集成测试性评估软件、故障注入器、监控设备、测试设备等,整个技术体系结构如图 5 所示。

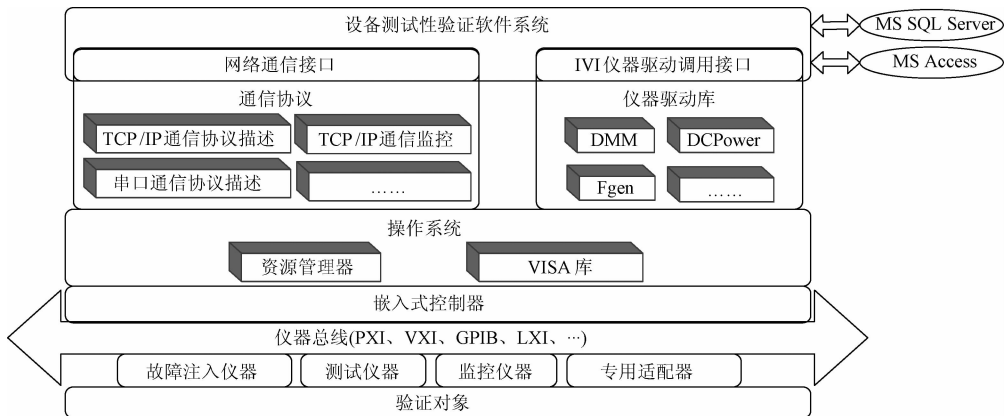


图 5 测试性验证与评估平台的技术体系结构

Fig. 5 Technology architecture of testability verification and validation platform

#### 3.2 多源故障信息获取

军用飞机 PHM 数据源包括机载部件状态实时信息、

维修保障历史数据、故障知识库等。PHM 系统的故障诊断、推理决策要综合利用多源信息,实现数据的融合

利用。

军用飞机机载部件状态数据的获取面临的瓶颈问题主要体现在传感器技术方面:1)机载传感器本身性能达不到信息准确感知的要求,对于一般系统而言,传感器自身存在偏差和漂移,造成监测精度降低,并且,当前一些机械系统的物理量还无法直接测得<sup>[24]</sup>;2)机载传感器布局比较落后,传统有线传感器网络布线和维护成本较高,无线传感器网络(WSNs)推动了PHM技术的工程化应用,但传感器数量与良好的检测能力的矛盾难以解决,存在网络拓扑及布局困难的问题。历史数据及故障知识库等信息的获取与综合利用的困难主要体现在数据记录格式及标准不统一,综合处理系统匮乏,信息融合利用困难等方面。

多源信息获取研究是一个逐步深入的过程,其未来发展方向主要包括如下两点。

1)具备“海计算”能力的智能传感器。未来传感器应当将各种数据挖掘智能算法融入微处理器中,同时加强智能传感器间的信息交互,实现基础信息的融合处理,在传感器层就完成初步的协同感知与判断决策。

2)信息融合技术。PHM推理预测系统最终实现必然要综合来自对象系统多源信息,要把这些信息融合成有用的、有关系统健康的知识。

### 3.3 维修保障信息交互

装备PHM技术的应用依赖于数据信息的交互及运用,其准确性及传递效率直接决定PHM技术的性能。当前,飞机信息处理系统中存储了大量的部件状态数据、诊断信息及故障预测信息,但在实际应用中,机上PHM系统、地面PHM系统、保障信息系统、维修决策系统、备件管理系统缺乏实时的信息交互。一方面,无法形成密集的知识管理体系,基于故障库和知识库的自动故障诊断与预测能力较弱;另一方面,难以将飞机实时状态与后勤保障状态相关联,实现“视情维修”。另外,军用信息传输网络建设落后,飞机与地面基站、基站与基站之间信息传递速度慢、延时严重、失真程度高,综合导致战机、维修保障中心、航材仓储未实现一体化,保障反应迟缓。

维修保障信息交互能力的建设,首先要对信息的格式进行规范,这是实现信息交互、有效管理的前提;其次,要加强信息处理系统的性能,以及提高系统准确性、实时性;最重要的是要加强信息传输基础设施的建设。

### 3.4 航空部件及故障信息管理

当前的军用飞机机载部件及配套保障设备唯一性辨识能力的建设还不完善,难以对单个部件进行全寿命周期的状态跟踪,无法形成科学的管理体系。而且,故障信息大多记录于文本,信息描述包含文本、数字、符号等,主观性较强,没有统一的规范,阻碍了信息的梳理分析。

数据的格式统一、表示规范是信息高速交换、有效提取、高效处理的前提。信息编码技术在社会各行业信息管理工程中得到广泛应用,军用飞机航空部件及故障信息管理可以利用编码技术,实现信息记录标准化、状态信息电子化、故障信息通用化。这样不仅便于装机成品与软件基本信息与故障信息的存储、查询、修改与显示,而且有利于各专业机务人员快速掌握故障要素,利于排故同时可对其全寿命周期内的健康状态进行监控与跟踪,实时记录产品的使用、维护、送修情况,最终达到对数据库中存储的故障数据进行分析与挖掘,实现产品数据的趋势预测、故障预警与剩余使用寿命预测的目标。航空部件及故障信息编码与管理研究包含三个方面。

1)编码字典建立:制定部附件唯一性编码字典:可以依据机载部件、维修保障设备的承制单位、物品码、序号、零组件信息生成能够确定部附件唯一性的编码。故障编码的制定:对故障数据进行故障模式分类、标准化表示,将工作单元编码和故障模式编码进行组合,对部件故障进行精确描述。

2)信息识别系统构建:信息识别系统旨在对规范编码信息进行快速提取、输出与自动化识别,是连接信息与处理系统的桥梁。受射频识别技术发展限制,当前我国可以重点研究条码技术在机载部附件及配套维修设备管理中的应用。

3)信息管理系统构建:构建信息管理系统,就可根据部附件的唯一编码,完成试飞阶段、服役阶段以及维修阶段等多个部件的信息采集与分析,有效规范、更新及维护故障代码,构建飞机全寿命信息数据库,实现对所有机载部附件、机件故障、机件维修、单一机件使用全过程技术指标等全寿命数据管理。

### 3.5 航空数据挖掘及平台构建

航空数据规模庞大,复杂度高,价值密度低,具备“大数据”特点<sup>[25]</sup>,对其实现有效挖掘的难点如下。

#### 1)数据挖掘方法

基于纯数据驱动的数据挖掘方法:存在部分故障模式无法区分,故障演化过程难以描述的情况,而且在缺乏故障失效知识体系的情况下,难以对剩余寿命进行预测。基于模型的方法:对复杂部件或系统难以适用,而且,针对非线性动态系统,传统模型难以直接对其系统内部各因素、内部与外部关联机理进行准确描述。基于知识经验的方法:对复杂系统而言,运行机理复杂,参数、结构随时可变,故障预测推理结果会存在大量不确定性,与此同时,其受不确定性(信号干扰、野值点影响、参数时变、采样数据丢失等)影响较大。

对于数据挖掘理论的研究,融合方法是必然趋势,从上面分析可以看出,单一方法的精确性得不到保障,多种算法、多种方法结合的融合诊断、预测方法是必然趋势。

### 2) 数据挖掘平台

民航领域对航空数据管理与应用系统的研究较为超前,且大多集中于通用性平台建设。而对于军用飞机,系统状态信息包含测试、试验与监测数据,呈现多源性、异

构性特点,体量巨大,价值密度低。军用飞机数据挖掘系统的研究,一方面,可以构建具备云计算功能的信息处理系统用于航空数据的存储、管理、挖掘与应用,其功能结构设计如图 6 所示。

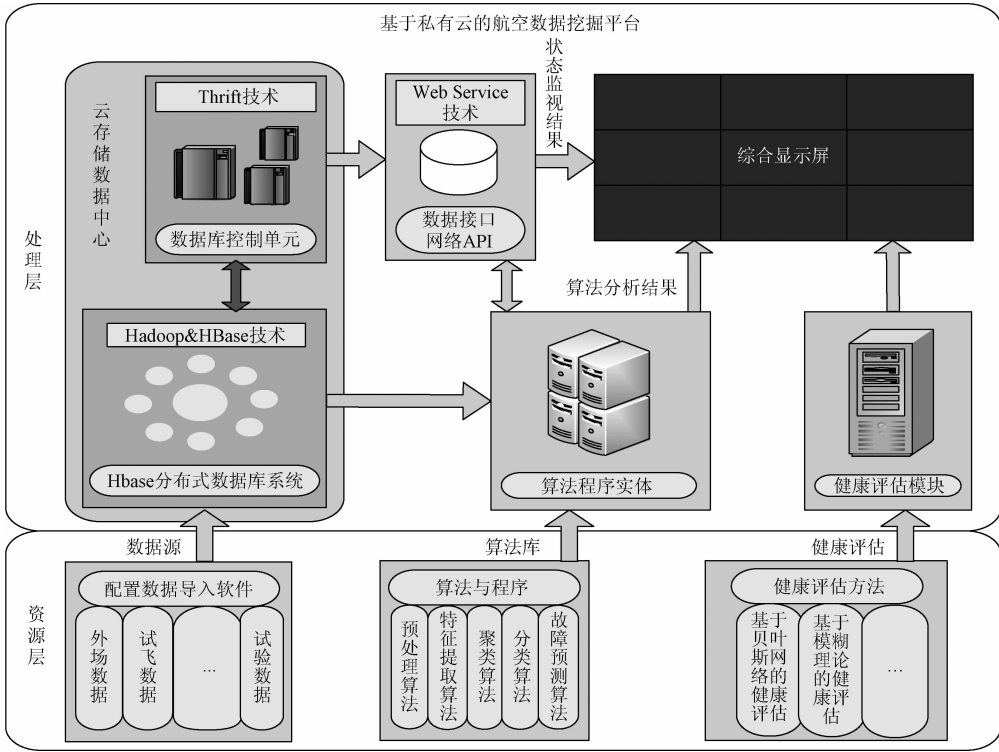


图 6 PHM 云平台功能结构

Fig. 6 Functional structure diagram of PHM cloud platform

另一方面,对于便携程度、低能耗、高运算能力要求较高的系统,则可以参考雷元武等人<sup>[26]</sup>及钱莹晶等人<sup>[27]</sup>研制的计算加速器,结合军用飞机 PHM 架构,以协处理加速计算技术为核心,DSP + FPGA 加速计算卡作为协处

理运算加速器,开发一种面向 PHM 的高性能嵌入式超算平台,为工程应用提供数据采集、挖掘、仿真、决策的一体化解决方案,提高 PHM 系统的技术成熟度。军用飞机 PHM 超算平台的体系架构如图 7 所示。

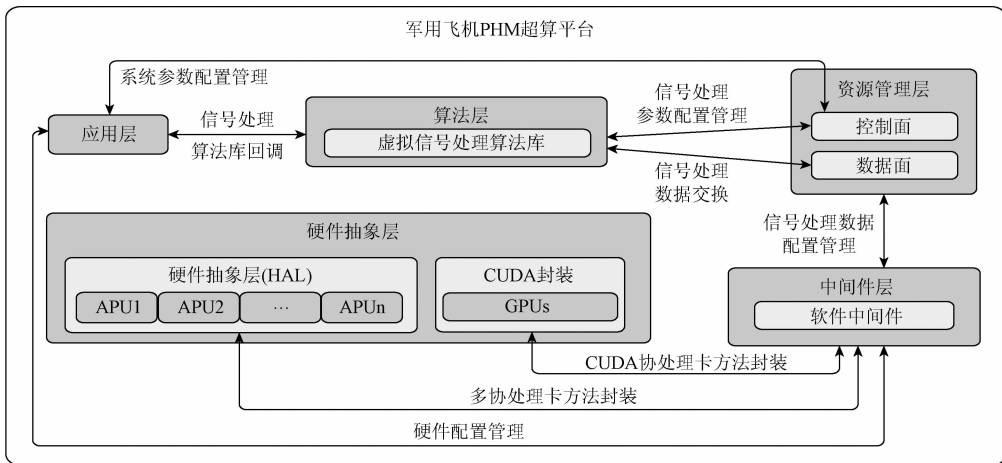


图 7 PHM 超算平台体系架构

Fig. 7 Architecture of PHM super computing platform

### 3.6 维修策略制定

军用飞机 PHM 理论与技术发展的最终目的是提高维修保障能力建设,而当前的 PHM 理论与技术创新大多基于理论分析、仿真评估、试验验证,与军用飞机维修保障的实际情况结合不够紧密,导致装备 PHM 实际运用存在瓶颈,维修策略制定不科学,无法实现真正意义上的“视情维修”。

在实际的维修过程中,更为普遍的是维修不完全的情况<sup>[28]</sup>。当前维修决策制定与评估只考虑“修复如新”,并没有考虑“中间状态维修”和多次维修过程中部件的退化情况。而且,现役飞机的维修方式基本以换件为主,对于空间位置相对简单的故障件,只需进行拆卸、换件,但若故障件空间位置相对复杂,直接对其所属模块进行拆装则会出现以下问题:其他被拆部件可靠性会受到影响;模块中其他部件出现问题时,进行重复拆装会造成不必要的资源消耗。总的来说,就是没有综合考虑各部件状态健康状态的参数阈值和机会维修策略额度的使用,这些都对维修策略制定提出了更高的要求。

与此同时,PHM 技术的使用也会反作用于装备 PHM 的发展。大量 PHM 技术的应用,会导致故障数据减少,基于大量数据处理及知识融合的 PHM 方法不再适用。基于小子样数据的装备 PHM 技术已得到初步发展,但其推理决策模型通常假设系统状态已知,且用简单的整数表示,这样虽简化了模型的形式和求解过程,却造成了信息的丢失,导致装备 PHM 功能实现困难;对于复杂装备系统,一方面,系统中各部件的关联、部件关键程度的确定较为困难;另一方面,对于可能发生突发或劣化失效的部件,还难以对部件的关联性及其经济性综合考虑,无法采取针对性的维修方式。

这就要求军用飞机 PHM 系统应用前,在理论分析、仿真评估过程中要综合考虑装备与环境因素,使结果更贴近于实际,通过大量的试验进行验证,包括系统测试床的实验验证、半实物/实物仿真验证等。还应当综合考虑各种不确定性因素对系统功能实现的影响。而且,随着 PHM 技术的应用,要及时更新相关信息数据,采取科学有效的针对性维修方式。

总而言之,航空维修策略的制定,要以 PHM 系统运行结果为依据,综合考量包括故障严重性、故障对系统的影响程度、航空机件装配情况、后勤备件现状、维修保障能力(包括维修保障人员技术能力、配套保障设施配备情况等)建设现状、任务需求等,开展真正符合当前装备“实情”的“视情维修”。

### 3.7 验证评估

为了检验 PHM 的性能是否达到预期需求,必须对 PHM 系统进行验证评估。PHM 验证评估方法<sup>[29]</sup>包括:

基于分析的方法、基于仿真的方法和基于试验的方法。基于分析的验证评估方法主要针对难以进行仿真和试验的复杂系统,但却由于缺少模型和实物验证,其准确性和可信度较低,不确定性较高;基于仿真的验证评估方法能够通过经验数据不断修正仿真模型,提高故障定位和诊断的效率和准确度,但仿真的方法难以综合考虑 PHM 系统的实际运行环境和各种条件限制;试验验证最能反映 PHM 的实际使用情况,但实现难度较大,成本较高。

除此之外,PHM 验证评估的瓶颈还体现在以下两个方面:1) 现有的 PHM 方法大多针对特定系统,对系统退化机理与故障模式依赖程度较高,通用的验证评估方法和标准难以确立;2) PHM 技术的大量使用造成故障模式样本和故障验证环境缺乏,无法通过现实环境和条件对故障模式进行分析和验证。

对机载 PHM 系统的验证评估技术的研究,需重点关注以下方面。

1) PHM 系统体系结构及能力研究:了解 PHM 系统的体系结构,分析 PHM 系统的性能及能力,这是一切验证评估的基础。

2) PHM 系统验证技术与方法研究:包括 PHM 验证与确认体系结构研究、PHM 系统度量指标体系研究、PHM 系统评估方法研究及 PHM 系统验证方法研究等。

3) 系统故障诊断及预测模型的验证:包括飞机关键系统失效机理研究、基于失效物理的关键系统失效分析模型研究、关键系统失效特征参量分析与确定、关键系统健康评估与故障预测技术与试飞验证等。

### 3.8 标准制定

制定 PHM 相关标准,能够提高互操作性,从而减少成本,最大程度地避免重复性工作。现今,PHM 的标准化问题已经成为制约 PHM 技术应用的主要瓶颈。国外在 PHM 子系统和关键技术标准制定方面已经取得了一些成果<sup>[30]</sup>。国内研究还处于跟踪探索阶段,故障数据的获取处理不够完善,没有形成成熟的部件状态知识体系,而且工程经验较为缺乏,直接阻碍 PHM 标准的起草和制定。

飞机 PHM 标准的研究内容及注意事项主要包括:构建系统的 PHM 标准,要从技术内涵、设计流程、信息流程和物理结构上充分考虑 PHM 系统的内涵和外延;特定装备 PHM 标准的制定,应与型号制定同时开展,形成系统分层逐步递进式 PHM 标准设计和性能规范;使用方应当参与 PHM 标准的制定与验证,结合 PHM 系统的直接使用情况,对 PHM 系统的标准制定提供相关指导。

## 4 思考及展望

PHM 技术能够支撑未来战机实现高效、准确的维修

保障,其应用受到国内外国防科研机构、学术研究机构、基层保障单位的广泛关注。本文以军用飞机 PHM 技术为对象,综述了 PHM 的主要研究内容及最新进展,着重分析新阶段军用飞机 PHM 技术在装备测试与验证、多源信息获取、信息交互、航空部件及故障信息管理、数据挖掘及平台构建、维修策略制定、验证评估及标准化制定过程中的发展及应用瓶颈,并给出了研究思路及发展建议,以期对我国飞机 PHM 技术发展起到一定借鉴作用。

未来 PHM 技术发展将逐步向智能化、网络化、综合化和标准化的方向发展。我国 PHM 技术的发展,应当充分借鉴国外研究成果,并立足自主创新,同时抓好 PHM 技术理论研究、技术革新、基础设施建设、人才软实力培养等方面工作,形成具有我国特色的、面向未来新一代装备的 PHM 技术体系。

## 参考文献

- [ 1 ] TSUI K L, CHEN N, ZHOU Q, et al. Prognostics and health management: A review on data driven approaches[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, DOI:10.1155/2015/793161.
- [ 2 ] ESTEVES M A M, NUNES E P. Prognostics health management: Perspectives in engineering systems reliability prognostics [C]. *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*, 2015: 2423-2431.
- [ 3 ] YANG L, WANG J, ZHANG G. Aviation PHM system research framework based on PHM big data center[C]. *International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, IEEE, 2016: 1-5.
- [ 4 ] ZHANG A, CUI L, ZHANG P. Advanced military aircraft of study on Condition-based Maintenance [C]. *2013 International Conference on Information Technology and Applications (ITA)*, IEEE, 2013: 462-465.
- [ 5 ] WANG J, ZHU EN, LV Z, et al. Study and realization of the prototype for the large aircraft's PHM [C]. *11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, IEEE, 2014: 3735-3740.
- [ 6 ] 景博, 周伟, 黄以锋, 等. 信息物理融合系统及其应用[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2014, 15(2):1-6.
- JING B, ZHOU W, HUANG Y F, et al. Research of cyber-physical systems and its application[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2014, 15(2): 1-6.
- [ 7 ] AZAM M, GHOSHAL S, BELL J, et al. Prognostics and health management (PHM) of electro mechanical actuation (EMA) systems for next-generation aircraft[C]. *AIAA Infotech @ Aerospace (I @ A) Conference*, 2013.
- [ 8 ] 邓森, 景博. 基于测试性的电子系统综合诊断与故障预测方法综述[J]. *控制与决策*, 2013, 28(5): 641-649.
- DENG S, JING B. Summary of integrated diagnostics and prognostics method based on testability for electronic system [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(5): 641-649.
- [ 9 ] DI J, GAO Z, ZHANG L. PHM framework design based on data warehouse[C]. *IEEE Conference on Prognostics and System Health Management (PHM)*, 2012: 1-5.
- [ 10 ] TAN X, QIU J, LIU G, et al. A novel approach of testability modeling and analysis for PHM systems based on failure evolution mechanism [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(3):766-776.
- [ 11 ] VOHNOUT S, ENGELMAN M, ENIKOV E. Miniature MEMS-based data recorder for prognostics and health management (PHM) [J]. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 2011, 14(4): 18-26.
- [ 12 ] HU N, ZHONG J, HE R, et al. Analysis of applying PHM in equipment maintenance [C]. *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 2013.
- [ 13 ] KROCULICK J. An end-to-end communications architecture for condition-based maintenance applications[C]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2014: 229-234.
- [ 14 ] TAMBE S U. An extensible architecture for avionics sensor health assessment using data distribution service[C]. *AIAA Infotech@ Aerospace*, 2013.
- [ 15 ] BECHHOEFER E, FANG A. Algorithms for embedded PHM[C]. *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2012: 1-8.
- [ 16 ] WU B, TIAN Z, CHEN M. Condition-based maintenance optimization using neural network-based health condition prediction [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2013, 29(8): 1151-1163.
- [ 17 ] 李梦妍, 于文震. 基于改进小波神经网络和灰色模型的装备性能参数预测 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39(3):18-22.
- LI M Y, YU W ZH. Prediction method of equipment performance parameter based on improved wavelet neural network and grey model [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(3): 18-22.
- [ 18 ] 孙强, 岳继光. 基于不确定性的故障预测方法综述[J]. *控制与决策*, 2014, 29(5): 769-778.
- SUN Q, YUE J G. Review on fault prognostic methods based on uncertainty [J]. *Control and Decision*, 2014,



- 29(5): 769-778.
- [19] SIDDIQUI A A, YUAN H, YANG Q H, et al. PHM for air craft power supply generators using real-time frequency estimation based on 3-line DFT[C]. Industrial Electronics and Applications, IEEE, 2011: 2548-2551.
- [20] WATSON M J, SMITH M J, KLODA J, et al. Prognostics and health management of aircraft engine EMA systems [C]. ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011:427-435.
- [21] HOU W, YAN J, YAO G. A comprehensive validation approach of PHM system's diagnosis and verification[C]. Prognostics and System Health Management Conference, IEEE, 2014:199-202.
- [22] YANG Z, JING B, ZHANG J, et al. Performance metrics assessment method on aircraft prognostics and health management[C]. International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation, IEEE Computer Society, 2013:799-802.
- [23] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.  
PENG Y, LIU D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 481-495.
- [24] 尉询楷, 朱纪洪, 陈良峰, 等. 航空发动机 PHM 中的数据挖掘机遇与挑战[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 88-93.  
WEI X K, ZHU J H, CHEN L F, et al. The opportunities and challenges of data mining in gas turbine engine prognostics and health management[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(4): 88-93.
- [25] FRANTIS P. Big data in the air force — Process, use and understand for safety[C]. Digital Avionics Systems Conference, IEEE, 2014.
- [26] 雷元武, 窦勇, 郭松. 基于 FPGA 的高精度科学计算加速器研究[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 112-122.  
LEI Y W, DOU Y, GUO S. High precision scientific computation accumulator on FPGA[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(1): 112-122.
- [27] 钱莹晶, 周群. Burg 频谱估计算法的硬件加速方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1382-1390.  
QIAN Y J, ZHOU Q. Research on hardware acceleration method for Burg spectrum estimation algorithm [J]. Journal of Electronic and Instrumentation, 2015, 29(9): 1382-1390.
- [28] 程志君, 杨征, 谭林. 基于机会策略的复杂系统视情维修决策模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 168-174.  
CHENG ZH J, YANG ZH, TAN L. Condition-based maintenance model of deteriorating complex system based on opportunistic policy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 168-174.
- [29] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 机载系统故障预测与健康管理系统验证与评估方法[J]. 测控技术, 2012, 31(3): 101-104.  
YANG ZH, JING B, ZHANG J, et al. Verification and evaluation method of airborne PHM system [J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(3): 101-104.
- [30] 景博, 汤巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1301-1307.  
JING B, TANG W, HUANG Y F, et al. Summary of PHM system standards [J]. Journal of Electronic and Instrumentation, 2014, 28(12): 1301-1307.

### 作者简介



景博, 1996 年于空军工程大学获得硕士学位, 2002 年于西北工业大学获得博士学位, 现为空军工程大学教授, 主要研究方向为故障预测与健康管理系统、测试性设计、传感器网络与信息融合。

E-mail: jingbo\_sensor@163.com

**Jing Bo** received M. Sc. from Air Force Engineering University in 1996 and Ph. D. from Northwestern Polytechnical University in 2002, respectively. Now she is a professor in Air Force Engineering University. Her main research interests include prognostics and health management, design for testability, sensor network and information fusion.



徐光跃, 2015 年于空军工程大学获得学士学位, 现为空军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为 PHM 技术的验证评估, 智能算法。

E-mail: 961493704@qq.com

**Xu Guangyue** received B. Sc. from Air Force Engineering University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Air Force Engineering University. His main research interest includes verification and validation of PHM and intelligent algorithms.