

多机种一体化故障预测与健康管理技术应用研究

毛海涛, 潘 华

(中国人民解放军92728部队, 上海 200436)

摘要: 基于故障预测与健康管理的自主式保障是新一代飞机和直升机设计的基本能力,是航空装备综合保障领域的重要变革。研究介绍了飞机PHM系统体系结构,划分出机载PHM系统和地面PHM系统,提出机载PHM系统采用分层智能推理机构,地面PHM系统宿驻在地面自主保障信息系统,并优化了PHM系统工作过程;根据现实与可能,提出了实用性的综合智能故障诊断方法和维修任务预测算法;从多机种一体化保障需要,提出了飞机多机种自主式保障设计关键技术和研究方向。

关键字: 一体化故障预测; 健康管理; 自主式保障; PHM系统

中图分类号: TN06-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2015)05-0046-05

Research on technology application of integrated fault prognostic and health management

MAO Hai-tao, PAN Hua

(Unit 92728 of PLA, Shanghai 200436, China)

Abstract: AL (autonomic logistics) based on PHM (prognostics and health management) is a basic capacity of the new generation airplane and helicopter, as well as an important revolution in the field of aviation equipment integrated logistic support. The structure of PHM system including on-board and off-line systems is introduced in this paper. The organization of intelligent hierarchy inference is adopted in on-board system. The off-line system is stationed in the ground AL information system. An utility method of intelligent fault diagnosis and an algorithm of maintenance task prediction are proposed. On the other hand, the key technology and research direction on the AL design of multi kind airplanes are put forward.

Keywords: integrated fault prognostic; health management; autonomic logistics; PHM system

0 引言

随着各种大型复杂系统性能的不断提高以及复杂性的不断增加,系统的可靠性、故障诊断和预测以及维修保障等问题越来越受到重视。目前,对于大型系统的维修仍以定期维护为主,采用多、勤、细来预防系统故障。这种方式不仅耗费资源,而且效率低下。为此,从20世纪90年代中期开始,美、英等国在国防采办改革及后续的相关大型装备项目研究中均将“经济可承受性”列为重点考虑因素。

由于视情维修要求系统自身具有对其故障进行预测并对其健康状态进行管理的能力,具有后勤规模小、经济可承受性好、自动化、高效率以及可避免重大灾难性事故等显著优势,可以实现“经济可承受性”的目标,也由此产生了自主式保障和故障预测与健康管理的概念。

目前在国外尤其是美国,在自主式保障领域已经开

展了广泛的研究,不同军种和不同行业中也广泛地开展了自主式保障相关的故障预测与健康管理研究和应用。比如在航空领域,由美国、英国以及其他国家军方合作开发的联合攻击战斗机JSF项目中的故障预测与健康管理系统(PHM),系统综合健康管理系统(ISHM)或飞机健康管理系统(AHM),美国空军试验室项目中的系统综合健康管理系统(ISHM)等。表1中总结了国外常见的一些预测与健康概念的应用情况。

联合攻击战斗机F-35(JSF),其故障预测与健康管理的(PHM)技术作为自主保障的核心技术,起到了重要作用。目前,PHM中的数据采集、故障诊断、预测等关键技术都已取得了重要进展。F-35采用的PHM系统是一种软件密集型系统,分为机上PHM(机载PHM)和机下PHM(离线PHM)两部分。机上PHM由飞机总师单位进行设计,预先安装在飞机机载环境中。机上PHM可以实现对单机关键部件的状态监控、故障诊断和预测。机下PHM基于专家系统进行全机及机群等更大范围的状态数据集成、性能指标集成、性能趋势分析、故障诊断、故障预测及剩余寿命预测,以保证实现全作战单位的维

修预测,为自主保障提供支持。其结构特点是采用分层智能推理结构,综合多个设计层次上的多种类型的推理机软件,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。F-35 飞机的 PHM 系统结构如图 1 所示。

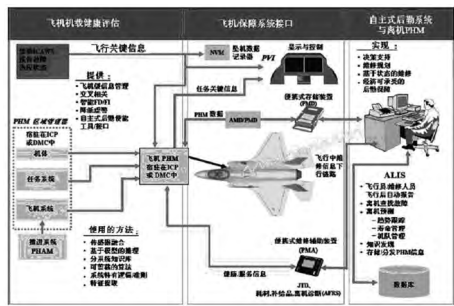


图1 F-35的PHM系统结构

表1 国外故障预测与健康管理应用

名称	说明	应用领域
PHM	故障预测与健康管理	诺斯格鲁曼等公司,用于F-35等平台上
IVHM	飞行器综合健康管理	NASA 开发已用于第二代可重用运载器
HUMS	健康与使用管理系统	应用于大中型直升机领域,如欧美研制的军用直升机 AH-64, RAH-66,“虎”
JAHUMS	联合先进的预测与状态管理	美 AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰和 CH-47 直升机
ACAMS	飞机状态分析与管理系统	美国 ARINC 公司与 NASA 兰利研究中心共同开发
EHM	发动机健康监控	英国罗尔斯罗伊斯公司等
IAHM	集成飞机健康管理	由波音公司牵头,在 F/A-18, C-17 和波音 737 平台中得到了验证
AEPSPHM	飞机电源系统预测和健康管理	美国空军研究实验室、波音和 Smiths 航空公司协作,进行飞机电源系统预测和健康管理

据美军估计,通过采用自主式保障系统可使飞机的故障不能复现率减少 82%,使维修人力减少 20%~40%,后勤规模减小 50%,出动架次率提高 25%,使飞机的使用与保障费用比过去的机种减少了 50% 以上,而且使用寿命达 8 000 h。

1 新型飞机 PHM 系统体系设计方法

飞机 PHM 利用尽可能少的传感器采集系统的各种数据信息,借助各种智能推理算法来评估飞机结构、推进、机电、管理、任务等系统自身的健康状态,在系统故障发生前对其故障进行预测,并结合各种可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施以实现飞机系统的视情维修。

1.1 飞机 PHM 系统体系结构

飞机 PHM 系统结构可以区分为广义和狭义两种:从广义上讲,飞机 PHM 系统是指为实现 PHM 目标的全部技术手段和系统的集成,不仅包括机载嵌入式诊断系统,还包括地面自主保障系统(实现维修管理决策支持功能);从狭义上来讲,实现自主保障的关键技术之一是要求飞机具备 PHM 系统,因此也可以将 PHM 系统理解为机载嵌入式诊断与预测系统。这里采用的是广义的概念。

飞机 PHM 系统顶层设计的原理是:当检测出故障时能够自动进行故障隔离,机载 PHM 系统无需人的干预,自动和无缝地完成更高级别的分析。通过系统设计,飞行员干预的需求将保持最少。故障检测和故障隔离数据尽可能快地地下传给地面,以便启动自主维修保障过程,使飞机恢复使用。

飞机 PHM 系统的体系结构主要包括两部分:机载 PHM 系统和多机种一体化地面 PHM 系统。如图 2 所示。

(1) 机载 PHM 系统

机载 PHM 系统采用分层智能推理机构,分为三个层次:最底层是分布在飞机各分系统最底层零部件(或器件)中的传感器或机内测试/机内测试设备(BIT/BITE),中间层是区域管理器,顶层是飞机管理器。最底层作为识别故障的信息源,借助传感器、模型等检测故障,但不做预测和故障隔离,将有关信息直接提交给中间层的区域管理器。各区域管理器(推进系统、结构、任务系统等)将区域故障信息经过信息处理和特征提取等整理后,传送给更高层的飞机管理器。飞机管理器通过对所有系统故障信息的相互关联,确认并隔离故障,包括状态监控、健康评估、故障预测、建议生成等处理过程,最终形成维修信息和供飞行员使用的知识信息,传给地面 PHM 系统。

(2) 地面 PHM 系统

地面 PHM 系统相当于离线的 PHM,宿驻在地面自主保障信息系统(ALIS)中。它采用与机载 PHM 系统类似的分层智能推理机构,接收通过维修下传链路、维修接口和便携式存储装置的机载 PHM 数据和其他相关数据,进行分析、判断飞机的安全性,调整使用计划,实施技术状态管理,更新飞机的状态记录,形成维修工作项目,以及分析整个机群的健康状况,并启动自主维修保障过程。

机载 PHM 和地面 PHM 系统共同构成飞机的 PHM 体系,共同确保对飞机故障的高效率和费用有效的维修,保障快速、直接地对飞机部件与结构寿命行使管理,以基于状态的维修取代传统的定期更换和检查。

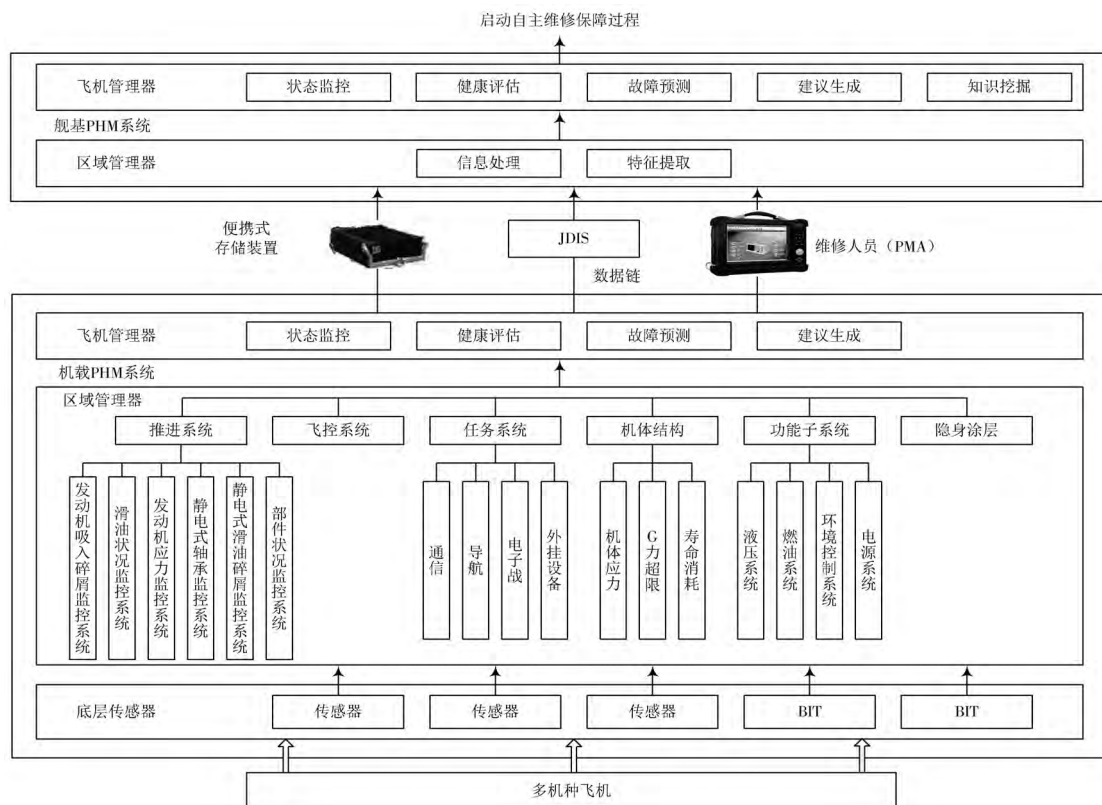


图2 飞机PHM系统体系结构

1.2 飞机PHM系统工作过程

PHM系统的一个显著特点是充分利用现有状态监控数据,尽量少地设置专用传感器,并通过分层推理机实现准确的故障诊断和寿命预测,这一过程是基于各种先进人工智能算法和信息融合技术。

PHM数据从最初发现飞机分系统中的一个故障,经过飞机结构,到自主保障(AL)系统,产生维修活动的整个过程。它将包括其确定根本原因的过程:从分系统识别故障;在机载知识库内做出系统级推理;利用交叉相关功能验证该故障;到地面PHM系统中的信息流显示维修人员如何处理该故障。

1.2.1 机载PHM系统工作过程

(1) 每个区域管理器都针对特定的飞机设备子系统或整机系统和任务系统进行持续不断地信号检测和分析。

(2) 区域管理器中的数据处理模块通过一些特征提取算法,把所获取的数据转换成状态监控、健康评估和预测层所需要的形式,这些信号特征能够以某一种形式表征系统/组件的健康。

(3) 飞机管理器中的状态监控模块接收来自传感器、信息处理以及其他状态监控模块的数据,完成与系统状态相关特征的计算和估计,即将获取的数据同预定的失效判据等进行比较来监测系统当前的状态,根据预

定的各种参数指标极限值/阈值来提供故障报警能力。

(4) 飞机管理器中的健康评估模块接收来自不同状态监控模块以及其他健康评估模块的数据,根据状态监控层的输出和历史的评估值,主要评估被监测的飞机系统、分系统或部件当前的健康状态,确定这些系统是否降级。如果系统的健康状态降级,该层会产生诊断信息,提示可能发生的故障。一个故障可能产生多个健康报告代码,只有那些被设定为根本原因的健康报告代码才传给飞行员用于显示,或传给机载系统用于维修下传。数据传给飞机存储装置/便携式存储装置存储起来。

(5) 飞机管理器中的故障预测模块综合前面各层的数据信息,评估和预测被监测飞机系统、子系统和部件未来的健康状态。主要功能是对系统、子系统或部件在工作应力下的剩余使用寿命进行估计。故障预测层可以报告系统的未来健康状态或者评估组件的剩余使用寿命。

1.2.2 地面PHM系统工作过程

(1) 从飞机便携式内存装置下载了PHM数据后,地面PHM系统将提取、存储和分发这些PHM数据。这些下载的数据将包括:飞机健康报告代码数据、飞机寿命部件性能数据、飞机性能数据、推进等系统PHM数据和结构疲劳数据等。这些数据用于向机下辅助跟踪和测量飞机部件健康的工具和过程提供输入。

(2) 提取的数据被分配给指定的数据库,以便能系统地应用本地的算法库进行分析和决策支持。这些数据库保存来自飞机的PHM、寿命消耗、结构、疲劳、推进系统和性能等文件。

(3) 地面PHM系统将来自不同平台以及相同平台上不同来源的PHM数据进行转换,通过数据访问接口加载到多机种一体化PHM数据仓库中,实现对飞机多机种PHM数据的同时处理。

(4) 地面PHM系统对飞机产生的数据进行处理,包括与飞机明显不一致性的比较。处理结果将是一组最低限度的工作单建议,再由维修管理部门将其转化为工作单。向用户提供一种决策支持机制,当出现影响安全的关键故障模式时,协助做出停飞决策;同样,当故障影响飞机当前分派的任务时,提供一种辅助用户的决策支持机制。

(5) 完成特定的损伤评估,确定修理飞机使其恢复能力所需的工作单;如果没有完成修理,机下任务保障环境决定哪些类型的任务不给以保障。

(6) 评估对后续任务的影响,并更新所有受影响的资产状态,完成维修进度安排。

2 飞机故障预测与健康管理主要关键技术

为了达到飞机PHM系统设计目标,需要实现PHM与自主保障信息系统的有效集成,需要重点研究:机上、机下PHM的故障诊断及预测技术,利用海量的历史数据(飞行数据、维修数据、故障数据等),采用多种工具、模型和算法,多角度全方位实现;维修预测技术,PHM健康管理的一个主要目标是根据采集的飞机状态数据进行故障诊断和可用时间预测,并根据诊断及预测结果安排维修工作;任务决策(保障计划生成)技术,从整个机群出发,将PHM系统和维修系统、训练系统、供应系统等业务系统充分整合,实现以任务为中心的自主保障;动态资源调度技术,在执行任务的过程中会遇到许多突发情况,需要第一时间监控到问题,并高效进行各类资源的协调使用,以及时完成任务。本文重点研究故障诊断及预测算法以及维修任务预测算法两项关键技术。

2.1 故障诊断及预测算法

2.1.1 综合智能故障诊断方法

新一代飞机故障诊断方法应是一个综合专家经验、数据融合、学习优化、IETM故障隔离、故障树、FMECA转换FTA等技术的综合智能故障诊断方法。其实现思想如图3所示。

飞机综合智能故障诊断方法不但对空地勤人员发现的故障和地面监测到的故障进行诊断,还可通过空地

数据链实时接收机上PHM记录的各项传感器参数、状态信息和警告提示信息进行故障的诊断。为了在最短的时间内得到故障诊断结果指导维修排故,飞机综合智能故障诊断方法首先采用案例匹配法进行故障诊断,若成功匹配则给出故障模式和推荐维修措施以完成诊断,输出诊断结果;若通过提供的特征参数和现象无法推导出故障模式或维修措施,则采用基于IETM的故障诊断方法进行故障诊断隔离,若通过IETM引导隔离出故障并给出了维修措施,则完成诊断;否则,就采用基于计算机系统的智能故障诊断方法。飞机的综合智能诊断流程如图4所示。

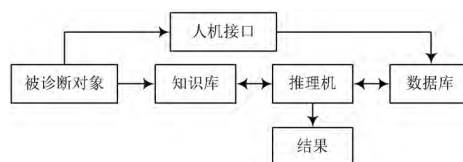


图3 新一代飞机故障诊断方法实现思想

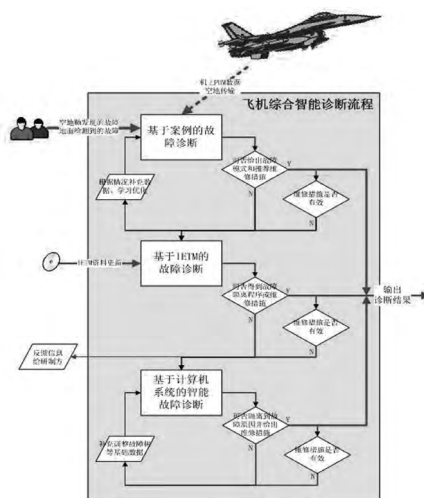


图4 飞机的综合智能诊断流程

2.1.2 故障预测算法

PHM中进行故障预测(重点是预测剩余可用时间)主要使用的方法包括贝叶斯评估方法、预测和统计方法以及基于计算机智能技术研发的人工智能工具及方法等。

2.2 维修任务预测算法

飞机未来将支持两类维修:预防性维修及修复性维修。其中预防性维修又分为传统的定时维修和基于状态的维修。PHM系统应提供方法实现对以上三种维修的维修决策,但维修决策是一项复杂的学科,必须要与资源状态、任务要求、故障危害度以及机群梯次使用综合考虑,才能给出准确的维修决策。维修决策分为两部分:一部分给出定时维修、PHM诊断故障的修复性维修、PHM预测出的基于状态维修的基本预测方法,另一部分把维修决策的结果放到整个任务决策中进一步分析

和权衡,给出整个机群的维修计划。在 IETM 中实现定义的各类 DM 可以解决如何维修的问题。

3 飞机多机种一体化自主式保障设计方向

基于故障预测与健康管理的飞机多机种一体化的自主式保障设计,是未来多机种保障的需要,建立高效获取、存储和处理大量来自多机型多种类型数据的先进方法,可以通过为多种飞机机上和机下生成的多种类型数据提供通用的数据存储、检索和处理方法来实现。针对多机种一体化自主式保障设计的需求和特点,需要开展以下技术的相关研究:

(1) 多机种自主式保障一体化结构设计

提出分层的飞机多机种自主式保障一体化的体系结构框架,包括数据转换层、接口层和业务层;研究并建立一套为应用于开发、管理、交换及使用等工程环节的飞机技术数据与事务数据的标准,建立共享的、通用的集成数据环境。

(2) 多机种自主式保障一体化数据存储设计

研究基于公用数据模型的飞机多机种自主式保障一体化数据表示技术,建立相应的一体化数据仓库,并对 CRIS 数据模型进行定制和增强;研究跨平台数据存储技术、跨平台数据转换技术,将来自不同数据源的 PHM 数据转换为舰基 PHM 系统可以识别的形式。

(3) 多机种自主式保障一体化数据访问和转换设计

研究飞机多机种自主式保障一体化数据访问技术,提供外部应用和人员到一体化数据仓库的访问接口;研究飞机多机种自主式保障一体化数据转换技术,对各种

类型的数据进行统一保存和管理。

(4) 基于多机种 PHM 一体化的诊断和预测设计

借鉴单机型 PHM 系统的方法研究成果,研究飞机多机种 PHM 系统一体化的可扩展、可复用的故障诊断、故障预测与剩余寿命预测以及系统级健康评估算法,实现扩展功能的算法管理平台。

4 结 语

本文从多机种一体化自主式保障需求出发,分析提出了新一代飞机 PHM 系统体系结构和分层智能推理架构,梳理优化了 PHM 系统工作过程,提出了飞机多机种自主式保障设计关键技术和研究方向。但目前在多型机开展一体化自主式保障研制过程中,还面临大量的理论与实践相结合的问题,需要开展进一步的研究和实践工作。

参 考 文 献

- [1] 木志高,胡海峰,胡莛庆.武器装备故障预测及健康管理系统设计[J].兵工自动化,2006(3):20-21.
- [2] 张宝珍,曾天翔.先进的故障预测与状态管理技术[J].测控技术,2003(11):4-6.
- [3] 龙兵,孙振明,姜兴渭.航天器集成健康管理系统研究[J].航天控制,2003(2):56-61.
- [4] 韩国泰.航空电子的故障预测与健康管理系统[J].航空电子技术,2009(1):30-38.
- [5] 时旺,孙宇锋,王自力.PHM 系统及其故障预测模型研究[J].火力与指挥控制,2009(10):29-32.
- [6] 马宁,吕琛.飞机故障预测与健康管理系统框架研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2009(z1):207-209.
- [7] 薛艳,赵利军,江浩,等.基于 BIT 的 PXI 总线导弹测试系统设计[J].计算机测量与控制,2010(6):1352-1354.
- [8] 薛艳,董今朝,李光升,等.机内测试技术综述[J].计算机测量与控制,2013(3):550-553.
- [9] 王丽娟.某战术导弹舵机系统 BIT 分析[J].航空兵器,2008(6):56-58.
- [10] 陈亮,曹兴冈.基于 PXI 总线的电子装备测试系统设计[J].科学技术与工程,2011,33(11):8243-8246.
- [11] 王永侃.控制舱综合测试仪的研制[D].上海:上海交通大学,2007.
- [12] 赵玉成,颜德田,于瑞涛.基于工控机的控制舱综合测试系统[J].电子测量技术,2009(2):159-162.
- [13] 李永军,胡昌林,胡文华,等.基于 CPLD 的某 BIT 系统研制[J].微计算机信息,2006(8):177-178.
- [14] 毋建宏.基于增量编码器的超低速估算方法研究[J].微电机,2011(1):17-20.
- [15] 胡彭伟,杨福兴,何玉珠.电子设备自动测试系统的环绕 BIT 设计[J].电子测量技术,2009(12):137-139.
- [16] 赵玉成.位标器线包综合测试系统设计[D].上海:上海交通大学,2009.
- [17] 胡文华,史林,薛东方.雷达智能 BIT 中整机性能监测系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2012(7):1883-1885.

作者简介:毛海涛(1980—),男,江苏靖江人,工程师。主要研究方向为航空综合保障。

(上接第 45 页)

作者简介:程 进(1987—),男,江苏徐州人,硕士。主要研究方向为电路与系统。

郑步生(1961—),男,江苏滨海人,副教授。主要研究方向为电路与系统、射频仿真。

阿 超(1987—),女,内蒙古呼伦贝尔人。主要研究方向为卫星通信。