

美军 F-35 战斗机 PHM 体系结构分析

朱 斌, 陈 龙, 强 毅, 程 鲤

(中国国防科技信息中心, 北京 100142)

摘要: 为借鉴国外状态预测与健康管理 (PHM) 技术的发展经验, 促进大型平台实现从状态监控向健康管理过渡, 文章回顾了美军 PHM 技术的发展概况, 分析了 F-35 战斗机 PHM 的体系结构组成以及各模块的主要功能, 总结了 F-35 战斗机 PHM 的工作流程, 介绍了 F-35 战斗机 PHM 系统的发展现状及存在的主要问题, 提出了对发展 PHM 技术的认识, 为从事 PHM 技术工作者提供一些参考。

关键词: F-35 战斗机; 状态预测与健康管理系统; 体系结构

Analysis on PHM Architecture of US F-35 Fighter

Zhu Bin, Chen Long, Qiang Tao, Cheng Li

(China Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China)

Abstract: Prognostic and Health Management (PHM) system is the core maintenance support system on F-35, the new generation fighter of US air force, designed for reducing maintenance cost and resource requirements. This paper overviews the development of PHM technology, analyzes PHM architecture of F-35, including the functions of major modules, summarizes the procedure of PHM system, introduces current situation of PHM system of F-35 and major problems, puts forward some thinkings on the development of PHM, provides reference for researchers on PHM technology.

Keywords: F-35; prognostic and health management; architecture

0 引言

为解决现有飞机维修保障负担过重、保障规模过大、保障费用在装备全寿命周期费用中所占比例过高等问题, 美军在 F-35 战斗机研制之初就强调其保障效能和经济可承受性, 并提出了一种创新保障方案——自主式保障 (AL)^[1], 以实现其经济可承受的保障设想。其中, 状态预测与健康管理系统 (PHM) 是自主式保障系统的三大核心系统之一, 可在飞机飞行过程中实时收集、监控系统 and 部件状态信息, 对状态异常部件进行故障检测、诊断与隔离, 预测关键部件的剩余寿命, 并将关键的状态信息实时传输给地面维修保障部门, 使维修备件可以提前运至基地, 使地面维修人员可以开展快捷高效的维修保障^[2]。

1 美军 PHM 技术发展历程

20 世纪 80 年代以来, 电子信息设备在军机上所占的比重越来越大。一方面, 电子设备与机械设备的故障规律有明显不同, 传统的定时拆卸更换手段已无法奏效; 另一方面, 机内测试、综合诊断技术的发展也为实现故障自动检测与隔离提供了可能。因此, 外军装备维修工作和技术发展的重点开始从传统的以故障修复为主, 转变为以信息获取、处理和传输并做出维修管理决策为主。

状态预测与健康管理系统技术的发展, 经历了由外部测试→机内测试→测试性设计→综合诊断→PHM 的演变过程。在应用对象上, 从过去的部件和分系统级, 发展到覆盖整个平台、各主要分系统的系统集成级。20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 美军和 NASA 分别启动了相关的研究项目, 军用直升机领域

称为状态与使用管理系统, 航天领域和民用飞机领域称为综合飞行器状态管理, 美海军称为综合状态评估系统, 美陆军称为陆军诊断改进计划等^[3], 上述技术均为 PHM 技术的发展奠定了基础。

1993 年, 美空军正式启动“联合攻击战斗机” (JSF, 后命名为 F-35) 计划, 在立项之初就突出强调保障性, 要求 F-35 使用与保障费用比过去机种减少 50%。在 F-35 作战要求文件规定的 6 项关键性能参数中有 3 项与保障直接相关, 包括出动架次率、维修保障规模、任务可靠度。F-35 战斗机项目成为 PHM 技术发展的里程碑, 目前已被美国空军确定为新研航空装备的主要保障思想。

2 F-35 战斗机 PHM 的主要功能与工作流程

2.1 主要功能与优势

PHM 系统的基本功能包括: 1) 诊断, 采用了基于分层模型的推理程序, 可准确检测隔离故障, 同时有效减少虚警。2) 健康管理, 在诊断预测信息、可用的资源和作战使用要求的基础上, 明智、准确地做出维修决策。三是预测, 对装备实际状态开展评估, 包括预测与确定使用寿命和剩余寿命。

与传统维修系统相比, PHM 系统更好地满足了信息化战争对维修保障时效性和精确性的需求。其优势包括: 1) 故障通报及时, 维修时效性高。能将大多数故障实时检测和隔离出来, 预测即将发生的故障以及部件剩余寿命, 在着陆前就能自动完成所需备件的订购, 并提前将相关信息通知维修人员, 着陆后无需等待就能立刻开展维修保障工作。2) 故障诊断准确, 自动化程度高。机载系统可自动诊断并做出维修决策, 在飞机着陆前自动完成大多数测试诊断工作, 缩短了地面诊断时间, 减少了故障诊断错误率, 提高了维修效率。3) 保障需求降低, 经济可承受性高。系统自动化和智能化水平高, 具有强大的自保障能力, 降低了对外部保障人员以及备件、保障设备等资源

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-09-16。

作者简介: 朱 斌 (1981-), 男, 山东滕州人, 主要从事外军装备维修保障方向的研究。

的需求。

2.2 工作流程分析

F-35 战斗机 PHM 工作流程是：首先在组件、分系统、系统 3 个层次对采集的状态信息进行处理，将状态信息实时或非实时传输到装备外部 PHM 系统，后者将判断是否需要以及何时需要维修，并在得到维修管理人员的批准后自动申请备件、保障设备并在必要时对维修人员安排相应训练，最后由合格的维修人员在便携式维修辅助设备的协助下完成维修工作^[4]。

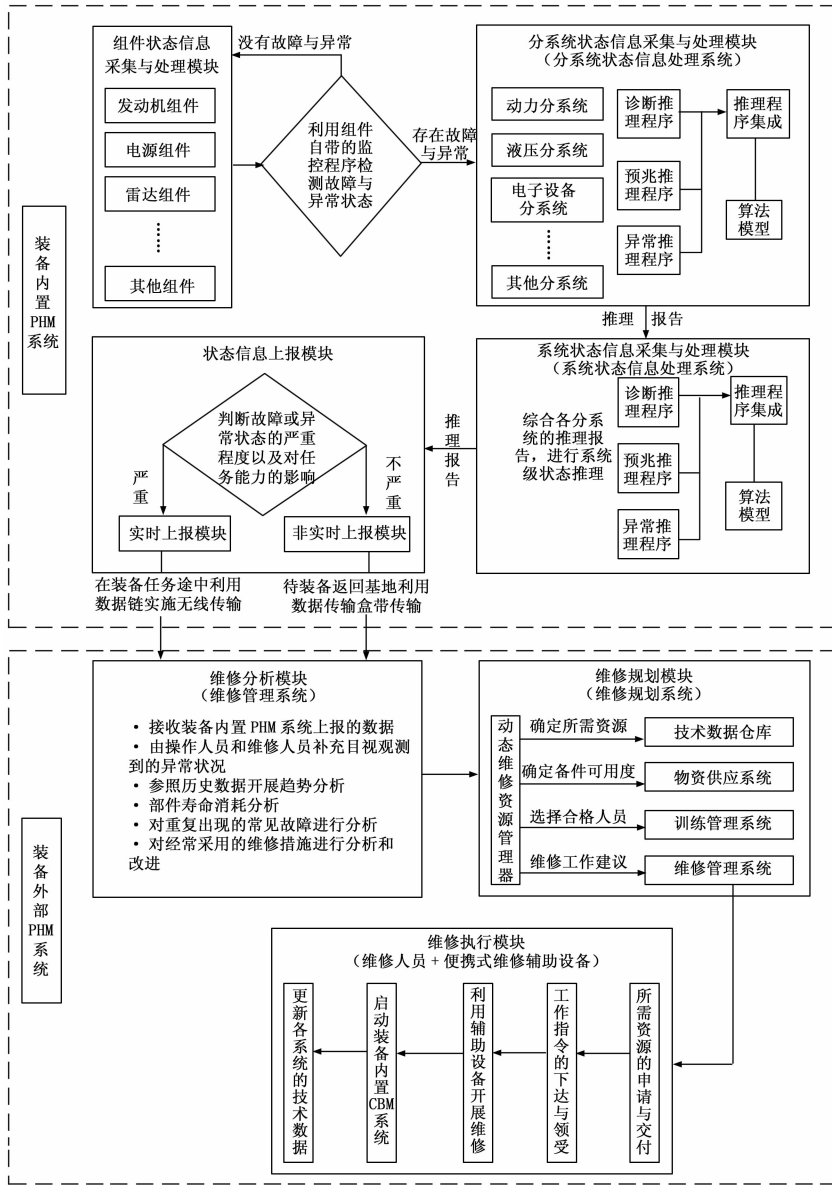


图 1 F-35 战斗机 PHM 工作流程图

3 F-35 战斗机 PHM 体系结构

F-35 战斗机 PHM 系统由组件/分系统/系统三级状态信息采集与处理模块、状态信息上报模块、维修分析模块、维修规划模块以及维修执行模块组成，其中，前 4 个模块属于装备内置功能模块，在飞行过程中运行，后 3 个模块属于装备外部功能模块，在飞机返场后运行。

3.1 三级状态信息采集与处理模块

组件状态信息采集与处理模块主要从组件各传感器上采集状态数据，并通过自带的状态监控程序自动检测出可能会对装备的任务能力和飞行安全产生影响的故障或异常状态，对其进行隔离并将相关信息上报到下一模块。分系统状态信息处理模块接收来自上一模块的信息，通过 3 种类型的推理程序对分系统的整体状态信息进行推理。其中，诊断推理程序用于确定故障原因、模式以及可能产生的影响，预测推理程序用于判断向

某种已知的故障状态发展的情况及潜在影响，异常推理程序识别原来没有遇到的或数据库中未记录的异常状态。系统状态信息处理模块接收来自上一模块的信息，对各分系统的异常状态以及可能存在的故障信息进行集成、分析和处理^[5]。

3.2 状态信息上报模块

在系统状态信息处理模块完成各组件、分系统及系统的状态采集与处理后，最终将形成状态信息报告并传输至状态信息上报模块。根据故障严重程度，通过两种方式上报数据。

关键信息实时上报。由于无线传输链路的带宽有限，只有对当前或近期的任务产生影响的故障才会通过数据链实时上报给装备驻地系统。

非关键信息任务后上报。装备返回驻地后要两类信息传输到维修规划模块：1) 在装备执行任务过程中记录的所有状态信息，通过可移动数据传输盒带等手段传输到驻地 PHM 系统。2) 能够直接观察得到的故障信息，由维修人员以补充报告的形式传输到装备驻地 PHM 系统。

3.3 维修分析模块

在从装备上下载了状态数据并补充了操作人员与维修人员的观察结果后，装备驻地系统中的维修分析模块将运行分析算法，开展分析。从维修分析模块开始，装备外部（即装备驻地）的 PHM 系统开始运行^[6]。维修分析模块的主要功能包括以下几个方面。

趋势分析。分析状态参数的发展趋势，确定系统可能存在的故障，在装备状态基础上提出对任务关键部件和寿命有限的部件实施维修的建议。如果分析显示存在不利趋势，需立即采取行动，则向维修规划模块提供状态报告。如果分析显示与正常的操作参数存在很大差异，且无法确定如何进行维修，则向维修规划模块报告异常状况。

常见故障分析。定期或不定期对储存装备各种技术数据的数据库提供的技术数据以及相关的维修状态数据进行查询，找出重复出现的常见故障以及以往采取的维修措施，并将该信息提供给维修规划模块和相关维修人员，以便在出现重复故障时参考。

常用维修措施分析。定期或不定期对数据库提供的技术数

据以及维修管理系统提供的维修状态数据进行查询, 找出经常采取的同一维修措施以及相关的故障信息, 分析针对故障采取的维修措施是否合理, 如不合理则对其进行改进。

3.4 维修规划模块

维修规划模块的主要功能是确定维修任务要求, 从数据库获取必要的维修任务信息与所需资源信息, 以协调维修日程安排。任务信息包括维修工作细节、所需的设备与专用工具等信息^[7]。

确定备件是否可用。为作好日程协调的准备工作, 维修规划模块将登录物资供应系统获取备件可用度信息, 包括最快的交付时间、预计的费用、备件来源、目前的位置和优先等级等。如果某个备件暂时无法提供, 物资供应系统就会提供备选方案来满足紧急需求。

选择合格维修人员。根据维修任务要求, 向训练管理系统提出申请, 训练管理系统将查询本地的电子训练数据, 以确定哪些维修人员的技术熟练程度处于执行维修任务所需的熟练程度范围内。

确定保障设备是否可用。维修规划模块将向维修管理系统申请保障设备可用度信息。维修管理系统会确定保障设备的可用度, 并提供选择方案, 以满足紧急任务的需要。

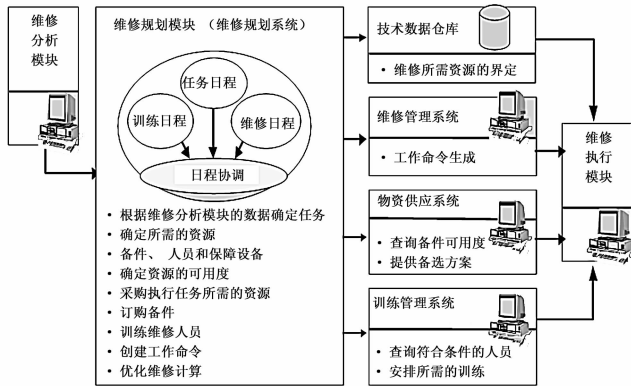


图 2 维修规划模块工作流程

3.5 维修执行模块

在接到维修规划模块的维修规划数据后, 维修执行模块就会立即进行资源、人员的协调, 正式启动维修工作^[8]。该模块主要任务包括以下几部分。

备件的申请与交付。向物资供应系统申请备件, 申请信息一般包括: 工作命令号、备件号、备件的商业和政府代码、所需数量和交付时间, 以及优先级 (如任务关键备件、紧急但不是任务关键备件, 非紧急备件等)。在接到备件订单后, 物资供应系统负责确保将备件运送到所需地点, 并向维修规划模块提供备件交付过程的相关信息 (状态和位置), 包括交付日期的变更信息等。

工作命令的批准与生成。当维修规划模块确定维修任务应该开始 (如备件已经运到, 维修人员准备就绪) 时, 向维修管理人员提出开始工作的建议, 并提供相关的信息, 如维修工作内容、维修人员等等。在得到批准后, 维修规划模块将更新维修管理系统的任务状态信息, 包括估计的完成时间、需要的备件和已分配的备件, 以及维修人员的指派等。

利用便携式维修辅助设备开展维修。所有维修信息都会下载到维修人员的便携式维修辅助设备上, 包括完成维修任务的

详细步骤。维修人员将根据工作指令开展维修, 并将相关信息记录到便携式维修辅助设备上, 主要包括武器和备件安装、功能测试、配置变更以及维修人员签名等信息。

启动装备内置 PHM 系统。在维修过程中, 维修人员将通过便携式维修辅助设备启动装备内置 PHM 系统的各项功能, 主要包括: 1) 通过便携式维修辅助设备启动装备系统的整机检查。2) 在测试或故障探测、排除过程中, 从便携式维修辅助设备启动装备内置系统的测试功能。3) 当维修活动有损于故障系统的其他功能时, 确定是否实施维修活动。

维修任务完成。对于在装备上完成的所有维修工作, 相关的信息通过便携式维修辅助设备传送到维修管理系统、训练管理系统以及数据库中, 以对相关信息进行更新, 为下一次维修提供便利。

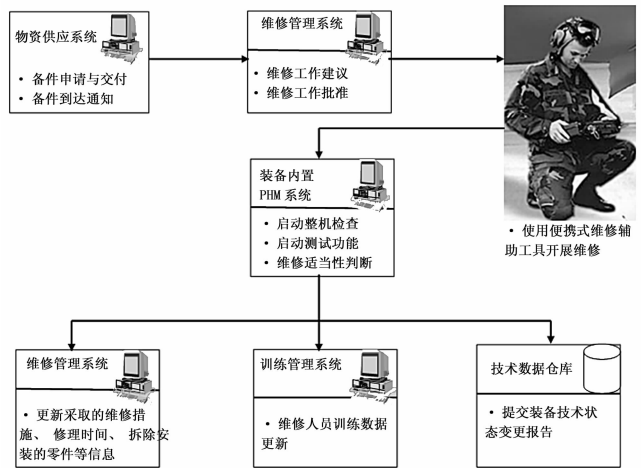


图 3 维修执行模块工作流程

4 F-35 战斗机 PHM 进展情况及存在问题

2007 年, F-35 战斗机的研制商洛·马公司开通了试运行版的自主式保障系统, 验证了包括 PHM 在内的系统主要功能。2012 年 9 月 10 日至 11 月 14 日, 美军在埃格林空军基地对 F-35A 战斗机开展了为期 65 天的作战鉴定飞行试验, 期间发现 PHM 并没有完全实现预想的目标, 具体包括几个方面。

1) 数据下载时间很长。现阶段 PHM 系统只能使用便携式存储设备从飞机上下载维修数据, 且系统只允许一个用户在一台计算机上单账户登陆, 用户在等待下载期间无法利用多个存储设备同时下载数据, 整个过程平均耗时 82.5 分钟, 加上后续的维修工作, 难以保障飞机在一天内完成两个架次的飞行。而且鉴定期间的飞机维修数据下载量很少, 未来飞机安装了各类任务系统、传感器、武器系统之后, 数据下载量将大幅增加, 这一过程持续时间将显著延长。

2) 系统在高峰时期反应速度慢^[9]。埃格林空军基地的网络基础设施符合要求, 但用户访问量仍然对系统反应时间造成严重影响。系统设计上允许一个中队最多同时有 100 名用户访问, 但鉴定期间, 埃格林空军基地的用户大约有 700~800 人。正常情况下, 第 33 战斗机联队有 40~50 名用户同时访问自主式保障信息系统, 但在交换班的高峰时期, 有 70~80 名用户同时访问, 这导致系统反应速度严重变慢。

(下转第 7 页)

5 结论

针对石化工业生产过程中有害气体泄漏, 现场作业人员安全监护问题, 提出了一种基于 STM32F103 和 GPRS 网络的气体泄漏安全监护系统, 给出了系统结构、个体安全检测仪器软硬件设计、安全监护管理软件设计, 并且进行了仪器功能测试和安全监护功能测试。实验结果表明: 该系统有害气体浓度检测精度高、定位精确、无线传输范围广、实用性强、运行稳定, 可应用于石化气体个体安全防护、事故应急处置、危险场所作业安全监护等领域。

参考文献:

- [1] 吴 迪, 黄润风, 柯燕燕, 等. 基于无线传感器网络的空气污染实时监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1756 - 1758.

(上接第 3 页)

3) 系统部分功能模块出现周期性崩溃现象。鉴定期间, 系统的硬件故障很少发生, 且只出现在备份系统上, 但系统的一些应用软件出现了周期性的崩溃现象, 有个别模块每个月要崩溃约 10 分钟, 需要重启系统。

4) 结束维修任务困难^[10]。每完成一项维修任务都需要多重的数字签名。鉴定期间, 有一项大的维修任务包含了 18 个分任务, 每个任务完成前都需要签名, 即便是最常见的任务(如飞机加油)也需要由 3 个人在系统中分别签名才能完成。鉴定期间, 发生过因维修任务未签完, 自主式保障系统不能释放飞机, 导致飞机起飞推迟的事故。

5 总结与展望

从目前的情况看, PHM 在一定程度上代表了 21 世纪装备保障的发展方向, 但实现起来涉及到大量基础设施的建设、先进技术的开发、各种资源的整合以及技术人员的培训等问题, 在管理和技术方面都面临着很大的挑战, 即使是美军也难以在短时间内完全解决上述问题。因此, F-35 战斗机正式列装后, 能否完全实现理想的所有功能目前还是未知数。但可以肯定的是, 一旦状态预测与健康管理得以实现和推广, 必将带来美军装备保障能力的整体飞跃。从美军实践和 PHM 技术发展看, 实现 PHM 必须重视两方面工作。

1) PHM 技术研究必须从部件做起。PHM 是一个复杂的系统工程, 从应用对象上看, PHM 涉及装备的机体结构、动力系统、电子系统等系统级、分系统级、部件级各个层次, 不同对象所面临的问题与故障预测方法差别很大; 从关键技术上看, PHM 涉及状态监测、故障诊断、故障预测、健康管理、辅助决策等内容, 需要突破状态监测、数据融合与挖掘、特征参数提取、故障模式识别、建模与验证等众多关键技术, 每一个环节都非常重要。因此, PHM 技术研究必须从基础的部件做起, 掌握故障演变规律, 逐级向分系统级和系统级延伸。

2) PHM 必需重视基础的状态监测。状态监测是 PHM 核心技术之一, 是装备健康管理的“温度计”和“报警器”, 是

- [2] 冯省利. 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范的应用体会 [J]. 石油化工自动化, 2012, 48 (3): 16 - 20.
- [3] 工作场所有毒有害气体检测报警的法规和技术要求 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20 (2): 121 - 127.
- [4] 金琴芳. 对集中工业区废气安全监测预警系统的研建 [J]. 环境研究与监测, 2013 (6): 11 - 13.
- [5] 程松柏, 陈国华. 石化装置泄漏易发性预测方法应用研究 [J]. 灾害学, 2008, 23 (2): 106 - 111.
- [6] 马莹莹, 张少龙, 杜暖男. ARM-Linux 平台下的传感器阵列毒气监测系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2957 - 2959.
- [7] 任 哲. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] GB3836. 爆炸性环境用防爆电气设备 [S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2010.

装备故障预测的“触发器”, 是故障预测的“初始值”, 是 PHM 不可或缺的重要组成部分。状态监测涉及装备可测试性设计, 特别是涉及装备当中是否预埋传感器问题, 以及如何合理设置传感器等问题, 必须引起足够重视。如果没有完善的状态监测作为支撑, 就有可能漏过不易察觉的故障隐患。

参考文献:

- [1] Andrew Hess, Giulio Calvello. PHM the Key Enabler for the Joint Strike Fighter (JSF) Autonomic Logistics Support Concept [A]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2004: 3544 - 3545.
- [2] Hess A. The Joint Strike Fighter Prognostic and Health Management [Z]. JSF Program Office.
- [3] US Department of Defense. CBM_DoD_Guidebook [Z]. 2008: 6 - 14.
- [4] Philip L. Dussault. Creating a Closed Loop Environment for Condition Based Maintenance Plus (CBM+) and Prognostics Health Management [A]. 2007 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2007: 327 - 331.
- [5] Carl S. Byington. A Model-Based Approach to Prognostics and Health Management for Flight Control Actuators [A]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2004: 3551 - 3562.
- [6] Boeing Company Team One. Maintenance Execution, JSF Engineering and Manufacturing proposal Volume III, Affordability [Z]. 2005: 263 - 266.
- [7] Boeing Company Team One. PHM maintenance planning, JSF Engineering and Manufacturing proposal Volume III, Affordability [Z]. 2005: 267 - 268.
- [8] Boeing Company Team One. Maintenance mission completion, JSF Engineering and Manufacturing proposal Volume III, Affordability [Z]. 2005: 269 - 272.
- [9] Director, Operational Test and Evaluation. F-35A operational test and evaluation report [R]. 2012. 12: 49 - 51.
- [10] Director, Operational Test and Evaluation. F-35A operational test and evaluation report [R]. 2012. 12: 57 - 58.