

机载预测与健康管理 (PHM) 系统的体系结构

张 亮, 张凤鸣, 李俊涛, 李永宾

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:故障预测与健康管理 (Prognostics and Health Management PHM) 系统对于推动作战飞机从“事后维修”、“定时维修”向“视情维修”转变具有十分重要的意义。针对新一代作战飞机的技术特点以及在维修保障方面的需求,对机载 PHM 系统体系结构的 3 种备选方案进行了对比分析,提出了一种由模块/单元层 PHM、子系统级 PHM、区域级 PHM 和平台级 PHM 等 4 层集成的层次化体系结构,并着重从层次的划分、组成要素的功能描述、信息传输和外部逻辑等几个方面进行了论述。

关键词:作战飞机;机载 PHM;预测与健康管理;体系结构

中图分类号: V37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009—3516(2008)02—0006—04

为适应未来作战环境的需要,根据未来新一代战机的具体技术和新时期对维修保障的需求,研究新的故障诊断体系和技术方法是十分必要的^[1-2]。美军在联合攻击战斗机 JSF 提出的预测与健康管理 (Prognostics and Health Management PHM) 就是这样的技术^[3-5]。

PHM 是由机上部分 (简称机载 PHM) 和机下部分 (简称机下 PHM) 构成的一体化系统。其中,机载 PHM 是以提高系统可靠性、可用性和安全性为目的,可在无需人工或者外部设备参与的情况下,利用先进的传感器 (如涡流传感器、小功率无线综合微型传感器、无线微机电系统 MEMS) 的集成,并借助各种算法 (如 Gabor 变换、快速傅里叶变换、离散傅里叶变换) 和智能模型 (如专家系统、神经网络、模糊逻辑等),来完成飞机健康状态的全方位实时监测、故障检测和隔离以及故障预测,为实现系统重构提供信息,同时将健康状态信息提供给机下的自主式保障信息系统 (ALIS),从而实现预测维修和自主式维修保障^[3]。

1 机载 PHM 体系结构的备选方案

1.1 集中式体系结构

该结构是广泛应用于小型机载系统上的典型结构^[6]。PHM 信息处理核心是一个中央故障管理控制器或处理器,它收集、解释用于系统状态评估所有信号。在大型机载系统的设计中,这种设计复杂性的控制问题十分突出。随着系统检测部件与信号的急剧增加,系统信号的收集、分类和解释将变得十分复杂。系统复杂性的增加必然使 PHM 的执行效率下降。一般来说,这种体系结构只适用于系统规模较小、子系统较少的情况。

1.2 分布式体系结构

在该体系结构中,各子系统独立完成状态监控、故障检测和隔离等任务,并将子系统级的健康状态信息直接传递给位于座舱的综合显示控制部件^[6]。其优点是在子系统级上实现健康状态信息的获取、处理、再生与决策,没有高级别的健康状态信息处理,因此可有效降低系统级别的测试费用;缺点是各子系统的测试结果难以集成,从而无法有效利用健康状态信息之间的冗余信息,提高诊断/预测的可信程度。

* 收稿日期: 2007—08—30

作者简介:张 亮 (1982—),男,江西吉安人,博士生,主要从事智能信息处理、故障诊断等研究;

E-mail: zhangliang1@sina.com.cn

张凤鸣 (1963—),男,重庆梁平人,教授,博士生导师,主要从事信息系统工程与智能决策等研究。

1.3 分层融合式体系结构

分层融合式体系结构实际上是一种集中式和分布式相结合的方式,它在设计之初,就为每个子系统在可能的较低级别考虑 PHM 能力和集成融合问题,在较低的层次,各个子系统收集、解释用于本子系统状态评估所有信号,然后在较高的层次上将诊断 预测结果集中交由中央故障管理控制器进行记录和决策。它可在子系统级和系统级两个层次进行融合,更加全面地利用了冗余层次状态信息,从而能更加有效地降低系统虚警率问题^[6-8]。

对比上述 3 种备选方案,鉴于下一代战机高度智能、高度复杂的特点,分层融合式体系结构最适用于下一代战机机载 PHM 采用。

2 面向机载 PHM 的分层融合式体系结构

图 1 给出了机载 PHM 的体系结构。为了方便地论述机载 PHM 的体系结构,此处重点从逻辑上,不过多的涉及机载系统的实际物理拓扑结构,且只考虑 PHM 的 3 个关键能力:异常检测、故障诊断和故障预测。

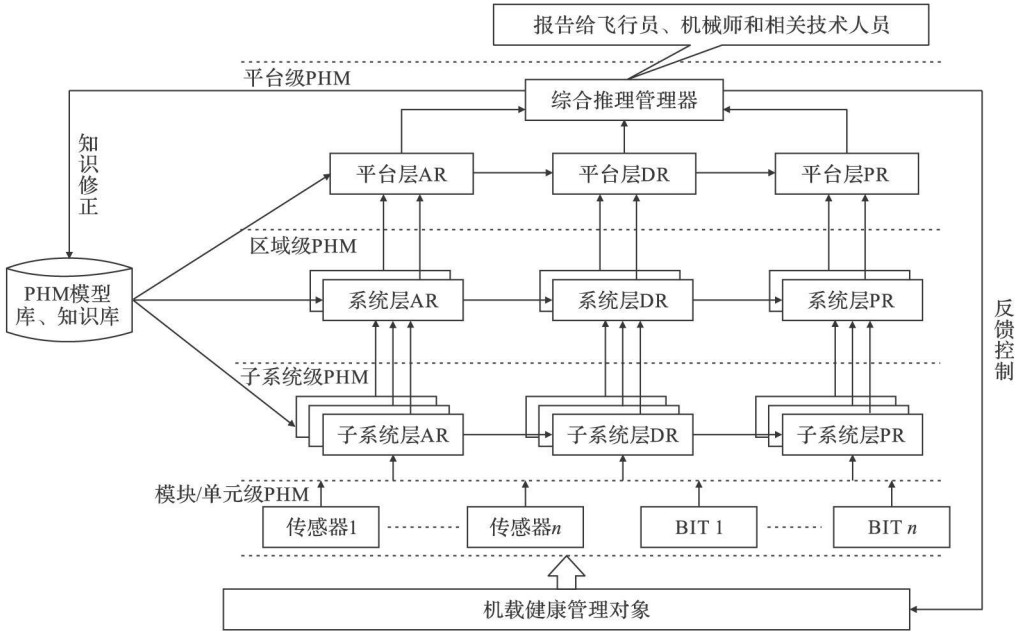


图 1 机载 PHM 的逻辑体系结构

Fig.1 Logic architecture of on-board PHM system

2.1 层次的划分

该体系结构实现了模块/单元层 PHM、子系统级 PHM、区域级 PHM 和平台级 PHM 等 4 层的集成。各个层次 PHM 之间提供独立的、标准的软 硬件接口形式。

系统各个层次的功能描述如下：

2.1.1 平台级 PHM

平台级 PHM 完成:获取整个飞机系统的健康状态及其变化趋势,并报告给相关的人员;在发生故障时,根据系统故障容错资源和能力,执行系统的缓慢降级重构,保证系统基本功能的执行;提供必要的信息交互接口,以便与机下 PHM 部分进行交互;将系统状态监测结果实时传送至地面维修保障系统,为地面维修保障人力与维修的调度提供及时的依据。

2.1.2 区域级 PHM

区域级 PHM 能够把来自不同子系统的数据或信息进行相关以解决各种数据的不一致性,确认并隔离故障,得到更加可靠的子系统的健康状态;同时区域级 PHM 也是诊断 预测模型库的宿主。

2.1.3 子系统级 PHM

子系统级 PHM 是各分系统 部件健康管理方案的实时执行机构,能够通过获取模块/单元层的数据和信息,并进行融合处理,实现子系统 部件异常检测、增强的故障诊断以及关键部件的寿命预测。

2.1.4 模块/单元层 PHM

模块层根据健康管理对象的不同分为两类:对于航空电子系统,模块设计有相应的自测试机制,满足子系统 PHM 对模块状态的可测性要求,这里 BIT 诊断具有尽可能高的故障检测率;对于非航电系统,主要通过嵌入于非航电系统各个单元的传感器完成状态信息的获取。

2.2 组成要素的功能描述

机载 PHM 系统主要由可扩展的三推理机系统和综合推理管理器组成^[9-10]。对于飞机上的每个分系统,采取 3 种分离的推理机,分别是异常检测推理机(AR)、故障诊断推理机(DR)和故障预测推理机(PR)。

2.2.1 异常检测推理机

异常检测推理机用于对异常行为进行分类。异常情况推理机收集非额定数据,以便用于以后对诊断或预测推理机进行更新。

2.2.2 故障诊断推理机

诊断推理机主要用于隔离故障和失效的诊断,它记录来自该分系统的各种不同的诊断输入,以确定故障的原因。该推理机的训练方法与现有飞机中的诊断推理机采用的方法相同。每个分系统的故障模式和影响分析的详细资料被编程输入到该推理机中。

2.2.3 故障预测推理机

故障预测推理机依靠来自该分系统的所有预测输入来预计分系统组成部件的剩余寿命。预测推理机的原理是,鉴于每个部件具有包括其变异性在内的额定寿命曲线,根据部件在寿命曲线上所处的位置,预测推理机就能确定该部件继续执行功能的时间长度。

2.2.4 综合推理管理器

一个有效的 PHM 系统的关键在于能够有效管理异常、诊断和预测信息,提供从外场可更换单元、子系统级到系统级的健康状态信息。IRM 正是实现 PHM 集成的关键所在。IRM 利用来自所有推理机的输入来最佳地表征系统的状态,确定故障发生可能的先后顺序,并推荐必要的维修措施,同时能够将诊断、预测信息报告给工程技术人员、维修人员和飞行员等。

2.3 信息的传输

从信息的传输来看,机载 PHM 的体系结构包括 3 种信息流:

纵向数据流:从模块/单元层获取传感器信息、BIT 信息,经过各个层次 PHM 的推理和分析,得到整个飞机系统的健康状态,并对系统中发生的故障进行及时处理。从模块/单元级 PHM 经过子系统级 PHM、区域级 PHM 到平台级 PHM,是一个从数据、信息到知识的流动过程。

横向数据流:在同一 PHM 处理层次上,对于一个特定的部件/子系统来说,对低一层传送的数据分别进行融合处理,完成异常检测、故障诊断和故障预测等分析。

反馈信息流:包括控制信息反馈流和知识信息反馈流。控制反馈使系统成为一个控制的闭环系统,实现系统的降级重构;知识反馈则使系统称为能够学习的闭环环境。

2.4 外部逻辑接口

机下 PHM 进一步完成故障隔离、预测和增强的状态及零部件寿命跟踪、趋势跟踪,机载 PHM 和机下 PHM 的功能和处理能力使 PHM 闭环策略实现了平衡。

机载 PHM 和机下 PHM 主要通过机载的测试维护操作接口、地面维修辅助设备的接口和空地数据链接等 3 类接口进行信息交互。

3 结束语

PHM 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。本文结合美军在 JSF 项目提出的 PHM 以及波音公司提出的综合飞行器健康管理(IVHM)总体方案,提出了面向机载 PHM 的层次化体系结构,并对其进行了初步研究。由于下一代战机高度智能、高度复杂,分层融合式体系结构最适用于下一代战机机载 PHM 采用。PHM 作为一个复杂的系统工程,必须在新机型号设计中就加以考虑,加之在国内研究还处于一个起步阶段,因此,从 PHM 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。

参考文献:

[1] 潘 泉, 景小宁. 美军新机的综合诊断技术及启示 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(2): 1—4.
PAN Quan JING Xiaoning The Integrated Diagnosis Technique for the New Operational Aircraft of American and the Enlightenment to Us[J]. Journal of Air Force Engineering University: Nature Science Edition, 2005, 6(2): 1—4. (in Chinese)

[2] 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.
XU Ping KANG Rui Research on Prognostic and Health Management (PHM) Technology[J]. Test and Control technique, 2004, 23, (12): 58—60. (in Chinese)

[3] 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, 22(11): 4—6.
ZHANG Baozhen ZENG Tianxiang Advanced Prognostics and Health Management Technology[J]. Test and Control technique, 2003, 22(11): 4—6. (in Chinese)

[4] Andy Hess. The Joint Strike Fighter (JSF) Prognostics and Health Management National Defense Industrial Association 4th Annual Systems Engineering Conference[EB/OL]. [2008—01—15]. <http://www.dtic.mil/ndia/2001sgstems/hess.pdf>.

[5] Hess A, Fila L. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM Concept Potential Impact on Aging Aircraft Problems Aerospace Conference Proceedings[C]. Piscataway: IEEE Inc, 2002, 3021—3026.

[6] 万 明. 面向第四代战斗机的机载自主式故障诊断方法研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2006.
WAN Ming Study of Autonomic Fault Diagnosis Method for Airborne System Orienting the Fourth Generation Operational Aircraft[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2006. (in Chinese)

[7] Aaseng G, Gordon B. Blueprint for An Integrated Vehicle Health Management System: The 20th Conference on Digital Avionics Systems[C]. Orlando: ALR International, 2001, 1: 14—18.

[8] Keller K, Wiegand D. An Architecture to Implement Integrated Vehicle Health Management Systems IEEE Systems Readiness Technology Conference[C]. Piscataway: IEEE Inc, 2001, 2—15.

[9] Przytula K W. Reasoning Framework for Diagnosis and Prognosis IEEE Aerospace Conference 2007[C]. Big Sky, Montana: [s. n.], 2007, 1—10.

[10] Hardman W, Hess A, Blunt D, et al. A USN Development Strategy and Demonstration Results for Propulsion and Mechanical Systems Diagnostics, Prognostics and Health Management; Proceedings of the 2000 IEEE Aerospace Conference [C]. Piscataway: IEEE Inc, 2001, 3059—3068.

(编辑: 姚树峰)

Research on On — board Prognostics and Health Management System Architecture for Operational Aircraft

ZHANG Liang ZHANG Feng — ming LI Jun — tao LI Yong — bin
(Engineering Institute Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The prognostics and health management (PHM) system is now playing an important role in promoting transition of the operational aircraft from run — to — failure scheduled preventive maintenance to condition — based maintenance. Considering technique characteristics and maintenance demand of the new generation operational aircraft, three different backup blue prints of on — board prognostics and health management system architectures are contrasted, and then a layered architecture is presented, which include vehicle level PHM, area level PHM, sub — system level PHM and module / component PHM. Finally, the division of hierarchy, function description of elements, information transmission and external logic are discussed.

Key words: operational aircraft; on — board; prognostics and health management; architecture