

Research on Architecture and Key Technology of Fault Prognostics and Health Management for Equipment*

Ziyuan Qi^{1,2}, Jinqiu Zhang¹, Chao Ma³

¹Postdoctoral flow station of Armament science and technology, Academy of Armored Forces Engineering, AAFE, Beijing

²Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, OEC, Shijiazhuang

³Troop No.75134 of PLA, Chongzuo

Email: jxyqzy@126.com

Received: Sep. 10th, 2013; revised: Sep. 30th, 2013; accepted: Oct. 9th, 2013

Copyright © 2013 Ziyuan Qi et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Fault prognostics and health management (PHM) technology is an innovative solution for the complex equipment system which is convenient to test and repair in the diagnosis and it is the key technology to achieve economic affordability. Combining the advantage of PHM technology in reducing equipment maintenance costs, on the basis of discussing the concept and connotation of PHM technology, this paper establishes and analyzes open architecture framework which contains seven modules for PHM system. Also, PHM technology research and application are summarized with the focus on the implementation method and key technology for equipment PHM, including the sensor and signal processing technology, fault diagnosis, condition monitoring technology, health & performance evaluation technology, condition forecasting technology, intelligent decision technology and health management technology, etc. Finally, the characteristics and development trend of PHM technology are summarized.

Keywords: Fault Diagnosis; Maintain; Prognostics and Health Management

装备故障预测与健康管理体系结构及其关键技术研究*

齐子元^{1,2}, 张进秋¹, 马朝³

¹装甲兵工程学院兵器科学与技术流动站, 北京

²军械工程学院火炮工程系, 石家庄

³中国人民解放军 75134 部队, 崇左

Email: jxyqzy@126.com

收稿日期: 2013 年 9 月 10 日; 修回日期: 2013 年 9 月 30 日; 录用日期: 2013 年 10 月 9 日

摘要: 故障预测和健康管理 (PHM) 技术是复杂的装备系统采用的便于测试和维修诊断的一种革新方案, 是实现其经济可承受性的关键技术, 本文结合 PHM 技术在降低装备保障维修费用方面的明显优势, 在深入探讨了 PHM 技术的概念和内涵的基础上, 建立了 PHM 系统的开放式体系结构框架, 并对框架中包含的七个模块进行了分析; 概述了 PHM 技术的研究和应用现状, 重点研究了实现装备故障预测与健康管理的關鍵技术和主要实现方法, 包括传感器与信号处理技术、故障诊断与状态监测技术、健康性能评估技术、状态预测技术和智能决策和健康管理技术等, 最后总结了 PHM 技术的特点和发展趋势。

关键词: 故障诊断; 维修; 预测与健康管理

*基金项目: 军械工程学院科学研究基金资助项目(YJJXM11010)。

1. 引言

随着现代科学技术的发展,装备正朝着复杂化、综合化和智能化的方向发展,系统的可靠性、故障诊断和状态预测以及维修保障等问题越来越受到人们的重视^[1]。目前,我军在维修方式上长期以来一直沿用前苏联的定期维修制度,随着大型复杂武器装备不断装备部队,装备保障将面临提高装备安全性、可靠性和降低维护费用的巨大压力,因此,必须使传统的维修方式向新的维修方式进行转变。

视情维修(Condition-based Maintenance, CBM)也称为基于状态的维修,是一种以装备实际状态和发展趋势为基础的维修方式,根据对装备当前和将来状态的正确和可靠的预测来安排维修活动,能够最大限度地降低维修成本,减少装备损坏,保证装备运行状态良好,延长使用寿命,具有很好的应用前景^[2]。要想实行视情维修,前提之一是要求系统具有对自身的故障进行预测和健康状态进行管理的能力。而故障预测与健康管理(PHM)是实现预知维护的一项新兴技术,这将有助于大型民用机械设备以及重要军事装备的状态分析、判别及预测研究,对于促进维修方式的改进和维修制度的变革,提高设备现代化管理水平都具有十分重要的意义。

本文针对装备故障预测与健康管理实现的需要,在 PHM 开放式体系结构框架的基础上,重点对装备故障预测与健康管理实现的关键技术进行了研究。

2. 故障预测与健康管理(PHM)概况

随着各种大型复杂系统性能的不断f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人们的重视。因此采用新技术、新手段实现装备的维护和维修成为提高装备作战性能、节约维护费用的重要途径。系统的维修方式经历了3个阶段的转变,即反应性维修、预防性维修和预计性维修(又称视情维修)。由于视情维修(CBM)具有后勤保障规模小,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而具有很好的前景。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,可以实现“经济可承受性”目标,由此,21世纪初,美国军方提出了针对新一代武器系统的先进测试、维修和管理

技术,即故障预测与健康管理(Prognostic and Health Management, PHM)^[3-5]。

预测和健康管理(PHM)是指利用尽可能少的传感器采集系统的各类数据信息,借助各种推理算法来估计系统自身的健康状况,在系统故障发生前对其故障能尽早监测且能有效预测之,并结合各种信息资源提供一系列的维修保障措施以实现系统的视情维修。故障预测与健康管理(PHM)技术作为实现武器装备基于状态的维修(CBM)、自主式保障、感知与响应后勤等新思想、新方案的关键技术,受到美英等军事强国的高度重视和推广应用。实际上,国外工业部门与国防部门对该技术已经应用在机械和电子产品领域中,PHM 技术已成为国外科技研发的重要发展趋势。PHM 系统正在成为新一代的飞机/直升机、武器系统、舰船和车辆等系统设计和使用中的一个重要组成部分。研究和发故障预测与健康管理技术,不仅可减少或避免设备在使用过程中发生重大恶性事故,同时对于改革现行的装备维护维修制度也具有重要作用^[6]。

3. 故障预测与健康管理(PHM)技术的应用现状

PHM 技术是综合利用现代信息技术、人工智能技术的最新研究成果而提出的一种全新的管理健康状态的解决方案。它包括两层含义,一是故障预测;二是健康管理。故障预测是针对部件预兆或初发的故障状态或附属元件的失效状态,提供早期的检测和隔离能力,并且进行管理和预报的技术和手段。健康管理是根据诊断或预测信息、可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策。该技术进一步将已经及时定位的具有潜在故障的部件的相关信息进行选择报告、辅助决策和进行信息管理,提高维修保障的自动化程度,减少由于故障引起的各项费用,降低风险,提高武器装备的作战能力。PHM 技术在装备维修保障中的应用代表了一种方法和思想的转变,即从传统的基于传感器的诊断转向智能系统的预测,反应式的通信转向先导式的 3Rs (即在准确的时间对准确的部位采取正确的维修活动),它极大地促进了视情维修取代事后维修和预防性维修的进程^[7]。

美国早在 1998 年就提出了 PHM 的概念,它要求

对系统故障可预测并具有对系统的健康状况进行管理的能力, 其将 PHM 技术应用在陆军装备的直升机上, 形成了健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)^[8]。2001 年, 联合攻击机(Joint Strike Fighter, JSF)将 PHM 和自主式后勤(Autonomic Logistics, AL)作为两大关键技术。其中, JSF-PHM 系统是一个从原材料技术到软件体系结构, 到开放系统的整合, 推动了在故障预测上的创新, 是一个智能管理过程。20 世纪 90 年代末期, 美军重大项目 F235 联合攻击机(JSF)项目的启动, 标志着预测与健康管理体系的诞生^[3-5]。2000 年 7 月, 美国国防部威胁减少局将 PHM 技术列入《军用关键技术》报告中, 国防部最新的防务采办文件进一步明确了 PHM 技术在实现美军战备完好性和经济可承受方面的重要地位。在国防部门, 开发应用的有飞机状态监测系统、发动机监测、综合诊断预测系统以及海军的综合状态评估系统等。

我国在开展机械故障诊断技术研究的同时, 也意识到了预测技术的重要性。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006~2020 年)将重大产品和重大设施寿命预测技术, 作为前沿技术进行重点支持, “863”计划先进制造技术领域将重大产品和重大设施寿命预测技术作为专题之一。虽然国内对 PHM 技术的理论研究及其应用近年来有一些初步成果, 这些成果也主要应用在民航, 如 COMPASS, ECM, ADEPT 等, 主要是飞机或发动机的性能状态监控的软件系统, 但功能很有限, PHM 核心技术的研究更谈不上成熟, 其研究水平还远远落后于国外, 有许多的问题需要作进一步的研究。

综上所述, 故障预测与健康管理体系(PHM)是实现预知维护的一项新兴技术, 这将有助于大型民用机械装备以及重要军事装备的状态分析、判别及预测研究, 对于促进维修方式的改进和维修制度的变革, 提高设备现代化管理水平都具有十分重要的意义。

4. PHM 开放式体系结构框架

PHM 采用开放式体系结构, 其核心是利用先进传感器的集成, 借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理系统的健康状况, 是机内测试能力和状态监控技术的进一步拓展。视情维修的开放体系结构(open

system architecture for condition-based maintenance, OSA-CBM)综合了 PHM 系统共同的设计思想以及应用技术和方法, 可用于指导实际构建应用于机械、电子和结构等领域的各种具体类型的 PHM 系统^[9]。基于 PHM 的 OSA-CBM 开放式体系结构框架见图 1 所示, 它主要由数据采集和传输、数据处理、状态监测、健康评估、故障预测、自动推理决策和人机接口等七部分组成^[10]。体系结构中各部分没有明显的界限, 且在有着大量数据信息的交叉反馈。

1) 数据采集和传输模块。该模块为 PHM 系统提供了访问数字传感器数据的接口, 也可表示为软件界面与灵敏传感器交互。通过利用各种传感器采集系统的相关参数信息, 为 PHM 系统提供数据基础, 并且还具数据转换以及数据传输等功能。

2) 数据处理模块。该模块利用信号处理技术处理来自传感器以及其它数据处理模块信号和数据, 并将数据处理成后继的状态监测、健康评估和故障预测等部分处理要求的格式。输出结果包括经过滤、压缩后的传感器数据, 频谱数据以及其它特征数据等。

3) 状态监测模块。该模块主要是将来自传感器、数据处理以及其它状态监测模块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, 可根据预定的各种参数指标极限值或阈值来提供故障报警能力, 实现实时的状态监控与诊断。

4) 健康评估模块。该模块通过接受来自不同状态监测模块以及其它健康评估模块的数据。运用健康评估技术评估被监测系统(或是分系统、部件等)的健康状态(如是否有参数退化现象等), 可以产生故障诊断记录并确定故障发生的可能性。

5) 故障预测模块。该模块可综合利用前述各部分的数据信息, 可根据装备当前的健康状态预测被监测系统未来的健康状态, 或评估装备剩余使用寿命(Remaining Useful Life, RUL)。

6) 自动推动决策模块。该模块接受来自状态监测、健康评估和故障预测部分的数据, 产生更换、维修活动等建议, 可在被监测系统发生故障之前适宜时机采取维修措施。同时对维修保障的过程、维修保障的行为、备品备件的供应等进行有效的管理。

7) 人机交互模块。该层是显示健康评估、预测评估或决策支持建议以及报警的人机界面, 应该具备报

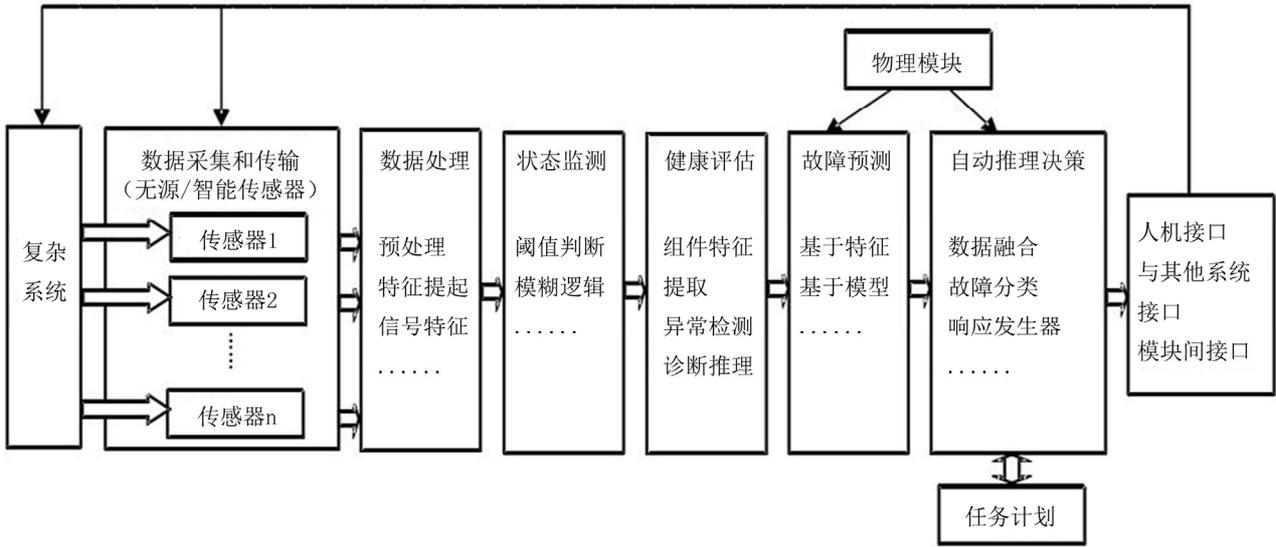


Figure 1. Open architecture framework of PHM
图 1. PHM 开放式体系结构框架

告异常状态将在什么时间出现的能力。

5. 装备故障预测与健康管理的实现的关键技术

要实现基于 PHM 的装备故障预测与健康管理的实现，就必须从 PHM 关键技术出发，在装备研制过程中充分考虑这些技术，使得装备系统具备比较完善的性能。PHM 主要是利用先进的传感器(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)来预测、监控和管理装备的状态。基于 PHM 的装备故障预测与健康管理的实现关键技术主要包括：传感器与信号处理技术、故障诊断与状态监测技术、健康性能评估技术、状态预测技术和智能决策和健康管理技术等，如图 2 所示。

5.1. 传感器与信号处理技术

PHM 对传感器技术的要求是：小、轻、容易与系统上预处理单元联网，能够适应恶劣的工作条件和环境，不易受电磁干扰的影响等。其常用的先进测试传感器有光纤传感器、无线传感器、虚拟传感器、智能传感器和压电传感器以及新型微机电系统(MEMS)等^[11]。目前，对这些传感器的研究主要从三方面展开：一是对传感器性能进行优化；二是研究如何减小传感



Figure 2. Key technology of fault prognostics and health management for equipment
图 2. 装备故障预测与健康管理的实现关键技术

器的尺寸，便于集成；三是传感器的优化配置，通过构建一个最佳的传感器结构(数量或类型、位置)，以期获得传感器成本与系统指定监测性能指标之间的最佳平衡。

信号处理技术根据不同的目的进行选择，此研究主要体现在预处理技术、特征提取技术特征选择技术三个方面。预处理技术是为了去除在信号中的噪声干扰，特征提取技术是为了进行故障识别和故障隔离，特征选择技术是为了剔除不必要冗余的特征信号，找出最佳的特征组合。通常采用数据挖掘与信息融合技术对数据进行处理融合，以便对装备系统状态的确定获得更为准确的结论。

5.2. 故障诊断与状态监测技术

在装备的设计阶段，根据测试用例分析结果，确定装备的测点布局，根据测点布局的结果，采用基于 PHM 技术的故障诊断分析，以确定出测点与故障现象矩阵，生成诊断知识库，为实时的状态监控系统提供后台数据库，同时装备的实时的状态监控与故障诊断

系统能读取装备各测试点的输出信息,将该测试点输出信息与后台数据库进行匹配,以确定装备的故障单元,并通过数据传输系统与记载告警系统相连,实现实时的状态监控与诊断。对此部分的研究主要是分类器的设计与优化,包括神经网络、支持向量机或相关向量机分类器设计以及利用改进的遗传算法、粒子群算法或免疫算法对分类器相关参数优化。

5.3. 健康评估技术

健康评估是指当前状态偏离正常状态的程度(即故障级别)。健康评估通过对比系统健康状态的数据和维修的历史数据,对系统的健康状态进行评估。它不同于传统的、单一的故障诊断方法,它以先进的状态监视手段、可靠的评价方法、完整的运行数据来判断发动机当前实际健康状况,并进行科学的故障诊断和隔离以判断故障的部位、严重程度、发展趋势,识别故障的早期征兆,提高诊断准确性降低虚警率。它还扩展了故障诊断功能,不仅辨识系统当前健康状态,而且能根据系统故障传播特性评估系统未来的传播趋势。各种健康评估方法既包括简单的“阈值”判断方法,也包括基于规则、案例和模型等的推理算法。

5.4. 状态预测技术

PHM 系统显著的特征就是具有状态预测的能力,状态预测技术是 PHM 的核心技术之一。一般包括系统的故障预测和寿命预测两个方面。状态预测是指综合利用各种数据信息如监测的参数、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态。状态预测主要包括故障、系统安全、剩余寿命、可靠性、维修、后勤采购预测等。现有的状态预测技术大致可以分为三个层次,如图 3 所示。

5.5. 智能决策与管理技术

通过接受来自状态监测、健康评估和故障预测部分的数据,产生更换、维修活动等建议,可在被监测系统发生故障之前适宜时机采取维修措施。同时,对维修保障的过程、维修保障的行为、备品备件的供应和装备健康状态等进行有效的管理。此部分在 PHM 中广泛采用人工智能技术实现,包括专家系统(基于模

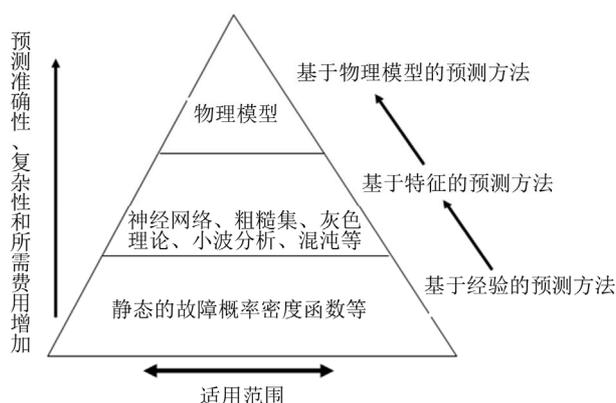


Figure 3. Three levels of condition prognostics technology
图 3. 状态预测技术的三个层次

型的推理、基于案例的推理、基于规则的推理)、神经网络、模糊逻辑和遗传算法等。

6. 结束语

PHM 技术作为实现武器装备基于状态的维修、自主式保障、感知与响应后勤等新思想、新方案的关键核心技术,也是 21 世纪提高复杂系统“五性”(可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性)和降低寿命周期费用的一项非常有前途的军民两用技术。PHM 发展经历了故障诊断、故障预测、系统集成三个阶段。当前技术的发展体现在以系统级集成应用为牵引,提高故障诊断与预测精度、扩展健康监控的应用对象范围。虽然各种 PHM 系统已逐步开始得到应用,但还没有达到工程实用化的程度。在故障检测和故障预测的基础,如何正确有效地评估系统的健康状态,并做出优化的维修决策等都需要大量的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] 孙博,康锐,谢劲松 (2007) 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述. *系统工程与电子技术*, **10**, 1762-1767
- [2] 韩东 (2010) 基于数据驱动的故障预测方法及应用研究. 学位论文, 军械工程学院, 石家庄.
- [3] Hess A. and Fila, L. (2002) The joint strike fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, **6**, 3021-3026.
- [4] Hess, A. and Fila, L. (2002) Prognostics, from the need to reality from the fleet users and PHM system designer/developers perspectives. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, **6**, 2791-2797.
- [5] Malley, M.E. (2001) Methodology for simulating the joint strike fighter's (JSF) prognostics and health management system. Master's Thesis, Air Force Institute of Technology, Dayton.
- [6] 许丽佳 (2009) 电子系统的故障预测与健康管理体系研究. 学位论文, 电子科技大学, 成都.

- [7] 刘志花 (2010) 无人机故障预测与健康管理技术研究. 学位论文, 北京化工大学, 北京.
- [8] Aaseng, G. and Gorclon, B. (2001) Blue Print of an Integrated Vehicle Health Management System: The 20th Conference on Digital Avionics Systems. *Orlando ALR International*, **1**, 14-18
- [9] 张亮, 张凤鸣, 李俊涛等 (2008) 机载预测与健康管理(PHM)系统的体系结构. *空军工程大学学报*, **2**, 6-9
- [10] 唐磊, 周斌, 李南 (2011) 舰用发动机健康管理开放式系统架构. *舰船科学技术*, **6**, 76-80
- [11] 冯辅周, 司爱威, 邢伟等 (2009) 故障预测与健康管理技术的应用与发展. *装甲兵工程学院学报*, **6**, 1-6.