

基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述

洪 晟¹, 陶文辉¹, 路君里², 周 正¹, 杨洪旗¹

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191; 2. 船舶系统工程部, 北京 100094)

摘要: 故障预测与管理技术 (Prognostics and Health Management, PHM) 是现代武器装备实现新型自主式后勤保障的关键技术, 能够实现故障检测、诊断、预测、状态评估以及综合决策的功能, 能够降低维修、使用和保障费用, 提高战备完好率、任务成功率以及安全性和可用性; 对 PHM 方法技术发展、作用以及国内外发展现状进行了详细的介绍和总结, 并针对导弹维修保障中 PHM 方法的应用进行了调研, 提出导弹维修保障综合 PHM 的基本概念、体系构建方法以及存在的技术难点, 最后进行了展望和总结。

关键词: 预测与健康; 故障诊断; 导弹武器

Maintenance and Supportability of the Missile Weapon Systems Based on Prognostic and Health Management

Hong Sheng¹, Tao Wenhui¹, Lu Junli², Zhou Zheng¹, Yang Hongqi¹

(1. School of Reliability and System Engineering, BUAA, Beijing 100191, China;

2. China State Shipbuilding Corporation, Beijing 100094, China)

Abstract: Prognostic and Health Management (PHM) system is a key technique as a new type maintenance mode for the Autonomic Logistics (AL) support system, PHM technology can realize the function of fault detection, diagnosis, prediction, state assessment and integrated decision-making. Meanwhile, it can reduce the cost of maintenance use and security and improve readiness states, task success rate, safety and availability. This paper briefly demonstrates the function, evolution and the current status of PHM both in China and abroad. And it discusses PHM applications in the missile weapon systems by proposing the concept, the method of system construction and the existing technical difficulties of the integrated PHM. In the end, it gives the conclusion and the expectation.

Key words: prognostic and health management; diagnosis; missile weapon

0 引言

由于各种武器系统战术性能的不断提高以及复杂性的不断增加, 系统的测试性、故障诊断以及维修保障等问题越来越受到人们的重视^[1]。视情维修由于具有后勤保障规模小、经济可承受性好、高效率以及可避免重大安全事故等显著优势而具有很好的前景。视情维修要求对系统的故障可进行预测并具有对系统的健康状态进行管理的能力, 由此产生了故障预测与健康管理 (PHM, prognostic and health management) 的概念^[2]。目前, 随着世界上计算机技术、传感器技术和各种新型材料的不断进步, PHM 在航空器的结构和引擎方面和民用飞机的应用已经初步彰显成效, 采用 PHM 技术的导弹维修保障也正在蓬勃发展。

当前的导弹维修保障主要可分为修复性维修和预防性维修两种方式。从故障测试定位的角度来说, 维修都是反应式的而非先导式的, 即出现故障以后才能做出反应。这种保障方式不能预测保障物资、人员或训练的需求, 而且需要对导弹进行重复的、定期的测试, 容易造成设备损伤从而降低装备固有可靠性。而且反应式维修需要储备大量的备件、保障设备和人员, 在出现故障时, 由于缺乏准备而不能及时修复, 影响任务的执

行^[3-6]。系统采用先进的故障预测与状态管理技术, 是一种实时、智能化的装备保障网络系统, 由于系统依靠预测和诊断系统的综合报告自动做出决策大部分诊断工作已自动完成, 维修人员仅需完成最后的部件拆卸、更换等简单的维修工作, 从而最大程度地减少了不正确维修活动, 并降低了保障响应要求、提高导弹维修保障能力和维修质量^[3]。

1 PHM 技术的概述

1.1 PHM 的发展

PHM 技术的发展大致经历了由外部测试到机内测试, 进而独立出来成为一门学科, 然后便是综合诊断的提出与应用, 最后便是发展到现在的预测与健康管理 (PHM) 技术^[1]。在航空航天、国防军事以及工业各领域中应用的不同类型的 PHM 系统, 其体现的基本思想是一致的, 区别主要表现在不同领域其具体应用的技术和方法的不同。

1.2 PHM 的主要作用

工程应用及技术分析表明, PHM 技术有以下三个主要作用^[7]:

- (1) 通过减少备件、保障设备、维修人力等保障资源需求, 降低维修保障费用;
- (2) 通过减少维修, 特别是计划外维修次数, 缩短维修时间, 提高战备完好率;
- (3) 通过健康感知, 减少任务过程中故障引起的风险, 提高任务成功率。

PHM 技术将弥补现有监控与诊断理论和技术、特别是故

收稿日期:2011-12-31; 修回日期:2012-02-10。

基金项目:工信部中央高校“唯实”基金项目(YWF-11-03-Q-063)。

作者简介:洪 晟(1981-),男,江西人,硕士生导师,主要从电子产品测试性、故障预测与健康管理等方向的研究。

障预测能力的不足, 提供具有普遍意义的早期故障智能预示的理论和技术, 为装备应急控制和智能测试、健康管理提供准确、可靠的依据, 满足复杂装备快速测试、技术保障的迫切需要。

1.3 PHM 技术国内外现状

目前, PHM 系统正在从美国第 4 代战机中的应用转向到导弹、轮船、汽车、消费类电子和医疗设备等系统设计和使用中^[8-10]。如果能做到对导弹的故障预测, 就能实时监测导弹的状态, 做到对导弹的健康管理。

近年来, 国外有关 PHM 技术的学术研究和应用研究也非常活跃。美国的马里兰大学所属的先进生命周期工程中心成立了故障预测与健康管理局, 深入开展了 PHM 技术方面的研究, 并为多家知名企业、研究院所以及各军兵种提高培训与技术解决方案; 佐治亚理工大学电子与计算机工程学院针对太空飞机的推进系统深入开展 PHM 技术, 构建了基于模型仿真的测试平台, 能够对太空飞机的推进系统进行故障诊断和健康管理; 如 Impact Technology、Honeywell 等许多国际著名企业也都开展了 PHM 理论、技术、软件或者应用解决方案等方面的研究; NASA 举办了首届国际宇航“综合系统健康工程和管理”(ISHEM, 航天领域的 PHM) 论坛, 将其作为一门新的学科推出。美国、欧洲和日本都纷纷召开 PHM 研讨会, 而这些会议的共同热门话题就是健康管理和预测技术^[11]。

在国内, 也有学者开展了相关内容的研究, 比较有代表性的有: 中国航空信息中心曾天翔研究员等对 PHM 概念进行了分析和梳理; 哈尔滨工业大学彭宇教授等对 PHM 体系结构、方法、相关标准进行了综述和分析; 北京航空航天大学谢劲松等人对 PHM 进行了较多跟踪研究, 研究设计了一套 PHM 系统硬件验证平台, 通过基于失效物理的数据处理和故障诊断单元实时地分析健康状态对于采集到的异常信号进行初步的故障诊断^[9-12]; 中航一集团 634 研究所的“故障预测与状态管理技术研究”, 经过 4 年多的研究, 在航空系统 PHM 体系结构、故障特征提取、故障诊断算法等方面取得了一些成果; 国防科技大学在航天动力系统地面试验实时状态监控、系统状态微弱信号检测等方面开展了较为深入的研究^[11]。虽然国内对于 PHM 的研究才刚刚起步, 但是发展势头强劲。PHM 系统在中国的运用情况呈现逐年上升的趋势, 如图 1 所示^[13]。

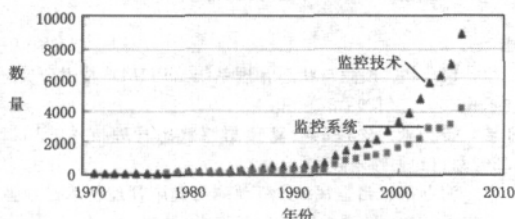


图 1 我国运用 PHM 技术的机构的数目

2 采用综合 PHM 技术的导弹维修保障体制

对于导弹采用综合 PHM 方法, 使用“综合”的动机就在于, 解决将“系统级”与各个不同分系统分割开来的问题。以往各个分系统都是在各自学科领域内处理各自的故障问题, 没有从系统的角度加以全面、综合地考虑。通过强调从系统角度考虑问题, 有助于将导弹维修保障成为一种新的系统问题, 代替过去将注意力放在分系统上。

导弹通常由战斗部（弹头）、弹体结构系统、动力装置推进系统和制导系统等部分组成。采用综合 PHM 技术的导弹维修保障体制主要包含以下两个方面^[14]: 基于性能（特征）参数的监测、基于故障物理模型的剩余寿命预测。

(1) 基于性能（特征）参数的监测: 通过监测那些能够反映导弹内部电子产品故障或健康状态的性能（特征）参数如电流、电压、电阻等来监测电子产品的健康状态^[15]。目前采用这种方法的系统有很多, 如波音公司的 AHM, JSF 以及 IVHM 等系统中都不同程度地采用了该方法^[16]。

(2) 基于故障物理模型的剩余寿命预测: 在已知电子产品故障物理 (Physics of Failure, POF) 模型的基础上, 通过监测导弹的使用环境条件如温度、振动等参数信息, 进而根据损伤累积模型预测产品的剩余寿命来监测导弹内部电子产品的健康状态^[17]。在这方面, 美国马里兰大学 CALCE 中心以故障物理方法为基础进行了大量研究工作^[18]。

3 导弹综合 PHM 的体系构建

PHM 系统一般应具备故障检测、故障隔离、增强的诊断、性能检测、故障预测、健康管理及部件寿命追踪等能力, 可分为 4 个层次: 数据采集、数据整理和分析、状态监测与故障预测和趋势分析、维修和保障决策^[19]。

3.1 数据采集

利用各种类型的传感器探测、采集被检系统的相关参数信息, 将收集到的参数信息进行有效转换以及传输等。

3.2 数据整理和分析

接收来自传感器以及其它数据处理单元的信号和数据信息, 将数据信息处理成后续部件可以处理的有效形式。该部分输出结果包括经过滤波、压缩简化后的传感器有效数据, 频谱特性数据以及其它特征数据等。

3.3 状态监测与故障预测和趋势分析

状态监测接受来自传感器、数据处理以及其它状态监测模块的数据。其功能主要是将这些数据同预定的失效判据等比较能力来进行监测系统当前的状态, 并且可根据预定的各种参数指标极限值/阈值来提供故障报警, 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。

故障预测和趋势分析能力是 PHM 系统的显著特征之一。该部件由两部分组成, 可综合利用前述各部分的数据信息, 评估和预测被监测系统未来的健康状态, 并做出判断, 建议、决策采取相应的措施。该部件可以在被监测系统发生故障之前的适宜时机采取维修措施。该部分实现了 PHM 系统管理的能力, 是另一显著特征之一。

3.4 体系框架的构建

基于综合 PHM 技术的导弹维修保障主要包含在线 PHM 和离线 PHM 两种维修保障方式。综合导弹 PHM 的实施系统组成如图 2 所示。

在线 PHM 系统主要完成信号采集、在线状态实时监测、故障初步诊断以及数据通讯和存储。可实现对振动、转速、扭矩以及 BIT 总线等多种参数的采集与预处理等; 可实现状态参数的实时监测、超限报警和故障的初步诊断; 同时提供标准接口与外部其他系统链接。离线 PHM 进行导弹飞行后处理, 对导弹健康管理的结论进行综合、判别和决策, 实现增强的故障诊断、故障预测和状态管理等功能。

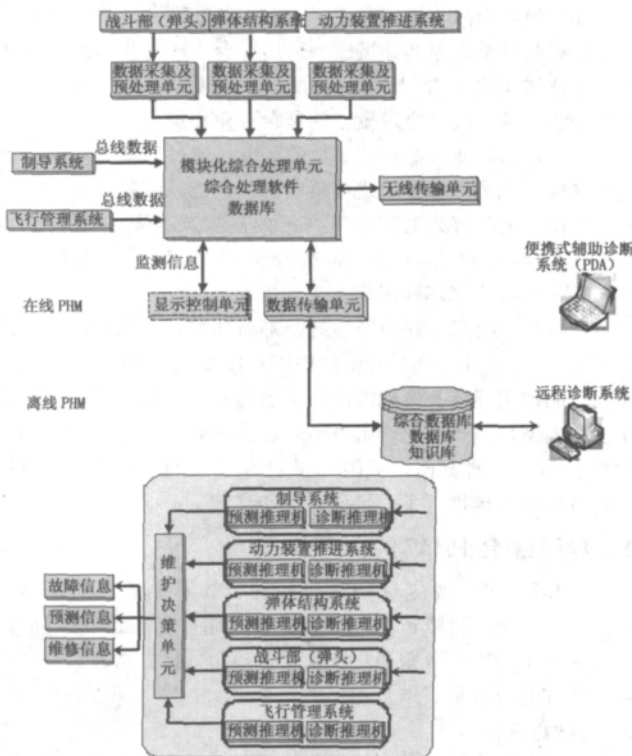


图2 导弹综合PHM的实施系统组成

4 导弹综合PHM的体系构建关键技术难点

4.1 导弹综合系统集成

综合PHM系统主要由在线PHM系统和离线PHM系统的两个分系统组成。两个分系统的功能划分、成本效益分析、分系统之间的相互协作机制、数据流程、数据通讯的标准、数据接口、数据库等都是关系到整个综合PHM系统完整、高效、经济的重要组成部分。

4.2 诊断与预测技术

故障诊断与预测是健康管理的核心技术，目前形成了一些比较成熟的诊断和预测技术（如基于模型、基于规则、基于数据等诊断和预测方法），但还存在故障诊断不够全面、故障发生发展和传播的机理不明确、虚警率高、系统级故障关联不明确、预测准确性低、寿命周期成本利用率低等问题。在现有的技术水平上，需要加深对故障的理解和认识，建立准确的有关故障发生、发展和传播的数学模型，建立一种诊断和预测的架构。下面以基于失效物理模型的方法关键技术方面进行详细论述。

在现有的技术水平上，需要进一步对失效物理法进行研究，积累完善失效物理模型，加深对故障机理及模型的理解。这些模型一般表示了导弹某种特定故障机理下的寿命同环境条件、工作条件以及自身几何、材料等参数之间的函数关系^[20]。因此，通过监测环境参数的实际情况可预测产品的损伤，再利用损伤累积理论可进一步预测当前的剩余寿命，而实现对导弹的健康状态进行监测的目标^[21]。

4.3 数据融合技术

一些针对将BIT用于故障识别和诊断的研究表明，BIT易于产生故障错误警告，可导致昂贵而不必要的导弹设备更换。BIT技术仍在发展，降低错误故障指示的发生是其重要方向。研究数据融合技术，提高诊断与预测置信度。

数据融合是对多个信息的综合与提炼，得出更深层、更准确可靠的结论，可有效提高BIT诊断与预测的精度。从信号提取、故障检测、诊断和预测、状态评估、决策支持等各个阶段都需要广泛使用数据融合，数据融合在传感器级、特征级、决策级等多个等级上进行，实现对对象的多层次、多角度、多参数的检测和诊断以及预测、决策命令的综合智能化。

目前信息融合算法研究包括数据层融合、特征层融合和知识层融合。其中，数据层融合可采用算术平均法和加权平均法等；特征层融合可采用的方法有模糊推理、神经网络等；知识层融合可供采用的方法有Bayes推理、Dempster Shafer证据理论、模糊集理论、专家系统等^[21-22]。

5 发展趋势

目前国外PHM技术已经从方案设计阶段发展到工程验证阶段，其应用遍及航空、航天、工业过程、核电站等大型复杂系统领域，国内对于PHM的研究刚刚起步，还需要广大的科研工作者做进一步深入的研究。国内外的研究和发展现状表明，故障预测技术仍然存在很多需要解决的问题，主要表现在：（1）导弹有很多故障模式，而每种故障模式可能需要不同建模理论和分析技术；（2）与导弹故障相关的有些参数难以检测；（3）实际故障往往由多种因素引起，难以精确建模。

综合PHM技术在导弹健康管理中的应用，可有效弥补当前的预防性维修和修复性维修保障方式存在的不足。采用的实时、智能化的导弹装备保障网络系统由于依靠预测和诊断系统的综合报告自动做出决策，大部分诊断工作已自动完成，维修人员仅需完成最后的部件拆卸、更换等简单的维修工作，从而最大程度地减少会造成设备损伤的维修活动，并降低了保障响应要求、提高了导弹维修保障能力和维修质量。其未来发展趋势主要表现在：（1）从单一方法预测向混合方法预测发展，将多种不同的故障预测算法有机结合，进一步提高预测系统的综合性能，是故障预测发展的必然趋势；（2）从基于数据回归向基于物理失效融合方向发展，将失效物理与其他技术融合可以完备描述故障历程和过程的动态变化；（3）从被动不确定性分析到主动控制方向发展，采用动态更新技术补偿不确定性影响，可以提高预测精度；（4）从故障预测到基于预测的综合保障方向发展，获得PHM系统可靠性、维修性和保障性的一体化评价，从而实现导弹的综合效能分析和评估。

参考文献：

- [1] 徐 萍, 康 锐. 预测与状态管理系统 (PHM) 技术研究 [J]. 测控技术, 2004, (12): 58-60.
- [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] 胡 冬, 谢劲松, 吕卫民. 故障预测与健康管理技术在导弹武器系统中的应用 [J]. 导弹与航天运载技术, 2010, (4): 24-30.
- [4] 王 施, 王荣桥, 陈志英, 等. 航空发动机健康管理综述 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, (1): 51-58.
- [5] 张泽奇, 刘晓方, 陈 曦, 等. 基于PHM的导弹状态管理研究 [J]. 信息技术, 2010, (7): 107-109.
- [6] 杨立峰, 王 亮, 冯佳晨. 基于PHM技术的导弹维修保障 [J]. 海军航空工程学院学报. 2010 (4): 447-450.
- [7] 张 亮, 张凤鸣, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理 (PHM) 系统的体系结构 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2008, (2): 6-9.

(下转第 868 页)

$$M_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

下面,另取 8 组故障程度为重度的振动数据,对上述规则和结论进行验证,如表 3、表 4。运用上述推理机制,对这 8 组数据进行推理,结果如表 5。

表 3 8 组重度故障数据

样本	各 IMF 能量占总能量比重值				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
F_1	0.4765	0.223	0.1797	0.0598	0.0609
F_2	0.4714	0.2167	0.2083	0.0403	0.0633
F_3	0.4455	0.217	0.2028	0.0541	0.0806
F_4	0.4497	0.2227	0.2105	0.0415	0.0756
F_5	0.4432	0.2267	0.1852	0.0566	0.0882
F_6	0.4538	0.2196	0.2105	0.0531	0.0631
F_7	0.4706	0.2308	0.2143	0.0431	0.0412
F_8	0.4644	0.2062	0.2042	0.0537	0.0716

从检测结果可以看出,对 8 组故障中的 6 组可以给出正确判定,剩余 2 组判定发生地概率为 0.5,符合复合故障的特性。因此,构建的基于概率 Petri 网的故障检测推理机制是有效的。

表 4 8 组重度故障数据条件属性表

故障样本	条件属性					实际故障
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	
U_1	6	5	4	2	2	重度
U_2	6	5	5	1	2	重度
U_3	6	5	5	2	2	重度
U_4	7	5	5	1	2	重度
U_5	6	5	4	2	2	重度
U_6	6	5	5	2	2	重度
U_7	6	5	5	1	1	重度
U_8	6	5	5	2	2	重度

表 5 8 组重度故障数据推理结果

故障样本	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8
检测概率	0.5	1	1	1	0.5	1	1	1

4 结束语

笔者提出将基于粗糙概率 Petri 网的故障推理机制,已应用于面向在轨服务的目标航天器故障检测中,并以与在轨故障数据具有极大类比性的地面振动实际故障数据为例,对上述故障检测方法进行了验证,验证结果良好。

参考文献:

- [1] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 韩光臣,孙树栋,司书宾,等. 基于模糊概率 Petri 网系统的故障诊断仿真研究 [J]. 计算机集成制造系统,2006,12(4):520-525.
- [3] 黄志武,黄玉,等. 模糊 Petri 网在 8K 电力动车 LCU 故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制,2008,16(5):629-631.
- [4] 赵梨丰,王振芬,张晓亮. 基于经验模式分解的希尔伯特变换包络提取在机械故障诊断中的应用 [J]. 青岛海洋大学学报,2002,32(6):965-970.
- [5] 孙海军,蒋东翔,钱立军等. 基于粗糙集理论的旋转机械故障诊断方法 [J]. 动力工程,2004,24(1):73-77.
- [6] 王国胤. Rough 集理论与知识获取 [M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [16] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制,2008,16(5):591-594.
- [17] Vian J L. Aerospace and electronic systems prognostic health management [Z]. 2008:89-90.
- [18] 翟庆刚,童中翔,陈新,等. 数字化维修关键技术研究 [J]. 中国科技信息,2005,(24):14.
- [19] Lall P, Bhat C, Hande M, et al. Latent damage assessment and prognostication of residual life in airborne lead-free electronics under thermo-mechanical loads [Z]. 2008:1-12.
- [20] Vian J L. Aerospace and electronic systems prognostic health management [Z]. 2008:89-90.
- [21] Baybutt M A M C. Improving digital system diagnostics through prognostic and health management (PHM) technology [Z]. IEEE: Autotestcon, 2007 IEEE, 2007:537-546.
- [22] Torres M, Bogatin E. Signal integrity parameters for health monitoring of digital electronics [Z]. 2008:1-6.

~~~~~

(上接第 864 页)

- [8] 曾声奎, Pecht Michael G, 吴际. 故障预测与健康管理 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, (5): 626-632.
- [9] 胡海峰, 胡葛庆, 秦国军. 故障预测与健康管理 (PHM) 现状与发展浅析 [Z]. 昆明, 2006.
- [10] 傅雷. 故障预测与健康管理技术浅述 [Z]. 乌鲁木齐, 2007.
- [11] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.
- [12] 何丽靖, 谢劲松, 吕端, 等. 健康监控和故障预测的机载硬件平台设计 [A]. 中国航空学会 2007 年学术年会 [C]. 2007.
- [13] Shunong Z, Rui K, Xiaofei H, et al. China's Efforts in Prognostics and Health Management [J]. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on. 2008, 31(2): 509-518.
- [14] 张叔农, 谢劲松, 康锐. 电子产品健康监控和故障预测技术框架 [J]. 测控技术, 2007, (2): 12-16.
- [15] 孙博, 康锐, 张叔农. 基于特征参数趋势进化的故障诊断和预测方法 [J]. 航空学报, 2008(2): 393-398.