

PHM 技术国内外发展情况综述

吕琛^{1,2}, 马剑^{1,2}, 王自力^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘要: 随着现代武器装备复杂化、综合化、智能化程度的不断提高, 传统的故障诊断技术难以适应新的需求。为了满足信息化战争对武器装备作战效能和快捷、精准、持续保障的要求, 20 世纪 90 年代中期, PHM (故障预测与健康管理) 技术应运而生。从发展概况、应用成效、PHM 验证评价、典型案例分析及发展规划 5 个方面总结了国外 PHM 技术发展的应用成效; 并对国内 PHM 技术的基础理论、工程技术与应用方面的发展状况进行了总结; 通过对比国内外 PHM 技术的发展应用现状, 总结分析了目前国内 PHM 技术发展现状与国外先进水平之间的差距以及未来发展的借鉴启示。

关键词: 故障预测与健康管理; 国内外现状; 验证评价; 差距分析; 借鉴启示

A State of the Art Review on PHM Technology

Lü Chen^{1,2}, Ma Jian^{1,2}, Wang Zili^{1,2}

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

2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As the modern weaponry is becoming more complex, integrated and intelligent, the traditional fault diagnosis methods are difficult to meet the new needs. To economically and effectively meet the requirements of information war, such as the operational effectiveness of weaponry, and quick, accurate, continuous support, PHM (Prognosis and Health Management) emerged in the mid-1990s. In this paper, the applications and developments of PHM technology abroad are summarized from the aspects of general situation, application effects, PHM verification and evaluation, typical case analysis and development program. And we also make a summary in terms of the fundamental theory, engineering technologies, and applications of PHM technology in China. By comparing the current development and application situation of PHM technology in China and abroad, the gap between our development and international advanced level is analyzed, and the lessons and enlightenments for future developments are summarized.

Keywords: prognosis and health management; state of art; verification and evaluation; gap analysis; lessons and enlightenments.

0 引言

现代武器装备复杂性、综合化、智能化程度不断提高, 为了以更经济有效的方式满足信息化战争对武器装备作战效能和快捷、精确、持续保障的要求, 20 世纪 90 年代中期, PHM (prognostics and health management) 技术应运而生, 随即得到了美英等军事强国的高度重视。PHM 技术是指采用传感器信息、专家知识及维修保障信息, 借助各种智能算法与推理模型实

现武器装备运行状态的监测、预测、判别以及管理, 实现低虚警率的故障检测与隔离, 并最终实现智能任务规划及基于设备状态 (历史、当前及未来状态) 的智能维护, 以取代传统基于事件的事后维修或基于时间的定期检修^[1]。当前, PHM 技术已成为现代武器装备实现自主式后勤 (automatic logistics, AL) 和降低全寿命周期费用的关键核心技术。

PHM 技术实现了武器装备管理方法从健康监测向健康管

理 (容错控制与冗余管理、自愈调控、智能维修辅助决策、智能任务规划等) 的转变, 从对当前健康状态的故障检测与诊断转向对未来健康状态的预测, 从被动性的反应性维修活动转向主动性、先导性的维修活动, 从而实现在准确的时间对准确的部位采取准确的维修活动^[2]。PHM 技术的主要功能如图 1 所示, 主要包括关键系统/部件的实时状态监控 (传感器监测参数与性能指标等参数的监测)、故障判别 (故障检测与隔离)、健康预测 (包括性能趋势、使用寿命及故障的预测)、辅助决策 (包括维修与任务的辅助决策) 和资源管理 (包括备件备件、保障设备等维修保障资源管理)、信息按需传输 (包括故障选择性报告、信息压缩传输等) 与管理等方面。

1 国外 PHM 技术发展情况

1.1 发展概况

随着系统和设备复杂性的增加以及信息技术的发展, 国外 PHM 技术的发展, 经历了外部测试, 机内测试 (BIT, Built-in Test)、智能 BIT、综合诊断、PHM 共 5 个阶段^[1]。与此同时, 维修决策技术的发展也经历了事后维修、周期预防性维护、状态维护 (CBM, condition based maintenance)、智能维护 (在 CBM 的基础上, 更多考虑设备未来的健康状态)^[3]。PHM 技术在产品应用层次上, 从过去的部件与分系统级, 发

收稿日期: 2016-02-28; 修回日期: 2016-04-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (51575021, 51105019); 国防技术基础 (Z1320113B002)。

作者简介: 吕琛 (1974-), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事故障预测与健康健康管理方向的研究。

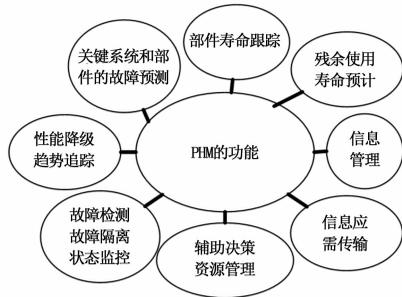


图 1 PHM 技术与应用范围

展到覆盖整个平台各个主要分系统的系统集成级；PHM 技术在产品应用层面上，从电子产品扩展至机构与结构、机电产品等领域。通过逐步完善，PHM 目前已形成了包含精简化、智能化、同步化、标准化、持续化的技术方法体系^[4]，制定了包含数据采集与传输、数据处理（状态监测、健康评估、预测诊断）、决策支持、综合信息管理功能的技术结构，并形成了相对完善的技术标准体系，以及技术转化应用与技术集成机制。

目前，PHM 技术已经得到美英等军事强国的深度研究与推广应用，并正在成为新一代飞机、舰船和车辆等武器装备研制阶段与使用阶段的重要组成部分。代表性的 PHM 相关系统包括：F-35 飞机 PHM 系统、直升机健康与使用监控系统（HUMS）、波音公司的飞机状态管理系统（AHM）、NASA 飞行器综合健康管理（IVHM）、美国海军综合状态评估系统（ICAS）以及预测增强诊断系统（PEDS）^[2]。

1.2 应用成效

国外 PHM 技术应用情况如表 1 所示，欧美各国的 PHM 技术应用范围覆盖各类先进武器装备，而且数量众多。在 PHM 技术的实施效果方面，F-35 飞机最为显著，采用 PHM

表 1 PHM 技术在国际军事领域的应用情况

类别	PHM 系统	应用情况
航天器	IVHM ISHM	X34 超高速飞行器、X37 空天飞机、B-2，全球鹰、NASA 第 2 代可重复使用运载器
固定翼飞机	PHM HUMS	F-35、F-22、B-2、“全球鹰”、无人作战飞机（UCAV）、“鹰”教练机、C-130、C-17、RQ-7A/B “影子” 200 战术无人机系统、P-8A、AMRAAM 导弹系统、阵风战斗机、EF-2000
直升机	HUMS JAHUMS	AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰、CH-47 支奴干、RAH-66 科曼奇、EH-101、Bell-206、欧洲的“虎式”直升机、NH-90、AS350 松鼠、战地侦察直升机（BRH）、水面作战海上旋翼机（SCMR）、AH264、山猫直升机
船舶	ICAS PEDS	“华盛顿”号、“林肯”号、“星座”号、“里根”号、“提康德罗加”号航母 “宙斯盾”导弹巡洋舰、“阿利·伯克”级驱逐舰、“佩里”号导弹护卫舰 英国机敏级攻击型核潜艇、澳大利亚皇家海军科林斯级潜艇、加拿大维多利亚级潜艇、荷兰 1400 吨“海鳍”级潜艇。

技术后飞机的故障不可复现率减少 82%，维修人力减少 20%~40%，后勤规模减小 50%，出动架次率提高 25%，飞机的使用与保障费用比过去的机种减少了 50% 以上，而使用寿命达 8 000 飞行小时^[2]。统计数据充分证明了 PHM 在降低维修保障成本，提高武器装备安全性、可用度与完好性，确保任务成功性，提升作战效能方面的重要作用^[5-6]。

1.3 PHM 验证评价

验证评价是确认 PHM 设计结果是否达到设计要求，从而对设计完善和改进提出反馈的重要手段，是 PHM 设计开发、成熟化及部署应用的关键环节^[7-8]。美国已公开的 PHM 验证系统如表 2 所示。最有代表性的是 F-35 飞机 PHM 验证与评估虚拟测试台，采用全数字仿真技术的验证环境及标准化 PHM 指标体系。在对 PHM 系统故障检测、诊断、失效过程的预测能力定量评价时，采用可配置的评价指标体系，通过 OSA-CBM 的通用 PHM 服务接口模块，与飞机各供应商提供的各层次算法模型交联，最终实现有效的验证评价^[7,9-11]。

表 2 国外已公开的 PHM 相关验证系统

开发商	验证系统	现状
Impact 公司、佐治亚理工学院	PHM 验证与评估虚拟测试台 ^[7,9]	用于 F-35 验证 PHM 技术方法的能力。F-35 系统供应商联合促成此平台，为设计提供反馈信息及建议。
Impact 公司、Sikorsky 航空、佩恩实验室	波音公司 RI-TA HUMS 的度量评估工具（MET）	该工具用于评估检测相应算法的适用性。MET 利用带有注入故障数据的原型数据库进行验证。
佐治亚理工学院	PEDS 系统 V&V 工具	利用大量数据，采用蒙特卡罗模拟法，产生足够的统计基准来评估诊断和预测算法的性能。对 PEDS 各主要模块单独进行验证评价。
NASA Ames 研究中心	先进诊断预测测试台 A-DAPT ^[7,12-13]	针对航天电源系统及飞行控制作动系统进行半实物仿真验证，对可能造成安全威胁的故障采用仿真模拟；基于局域网的分布式架构，可实现人在回路的测试。
NASA Ames 研究中心	Livingstone 符号模型及导航器模型检验	用于对基于模型诊断推理的验证。可嵌入到真实的 IVHM 开发环境，以论证和评估可能带给关键软件结构的影响。
NASA、诺斯罗普格鲁曼公司	TA-5 IVHM 虚拟测试台（IVTB）	IVTB 将用于第二代可复用运载器风险降低计划飞行测试中所有综合健康管理实验的集成和验证。
波音公司、史密斯航宇公司、华盛顿大学	波音健康管理工程环境 HMEE ^[8,14]	OSA-CBM 的开放式结构，端到端的飞机健康管理测试环境，可实现半实物仿真，光纤网连接地理分布的多测试平台，机载对象和健康管理子系统/系统的联合运行

国外 PHM 验证评价系统特点及趋势如下:

1) 丰富的故障数据库: 包含仿真故障注入数据、试验台故障注入数据、武器装备测试数据及实际运行数据等。半实物仿真以及全数字仿真是未来发展趋势。

2) 针对 PHM 全流程: 从数据采集、数据处理、辅助决策及信息管理等多个层次, 对传感器及数据采集系统、故障诊断与预测算法模型、推理模型、辅助决策模型等功能模块进行验证。

3) 可模拟用户操作, 实现人在回路的测试。

4) 标准化、可配置的验证评价指标体系: 评价指标覆盖面广, 包括误差、稳定性、重复性、可靠性、不确定性等方面。

5) 端到端测试环境, 验证过程可跟踪复现。

6) 分布式、网络化的开发式软硬件架构, 符合 OSA-CBM 的通用 PHM 服务接口, 多地理位置供应商 PHM 联合验证。

1.4 发展规划

在分析 NASA 和美国空军 PHM 相关技术规划的基础上, 以航空航天装备为例, 国外未来的 PHM 技术发展规划可总结为 3 个技术层次 (如图 2 所示)。从失效物理、数据分析、传感器等基础技术研究, 到子系统级的监测、诊断、预测和失效缓解技术研究, 再到机体结构、机载系统和推进系统等 PHM 设计, 最后实现对全机的故障预测与健康管理的。该技术发展规划主要针对 3 个重点领域 (综合飞行健康评估与管理、飞行环境风险检测与管理、PHM 系统综合集成技术)、七个任务方向 (机体结构、推进系统、机载系统、环境风险检测与管理、PHM 体系结构、PHM 能力验证、系统集成与评价) 展开^[15-17]。

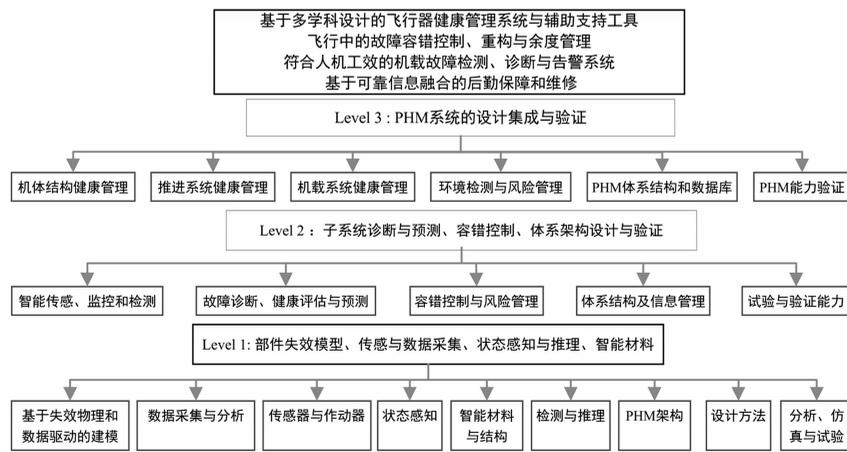


图 2 PHM 技术层次

2 国内 PHM 技术发展状况

2.1 基础理论

我国在 PHM 系统设计与验证基础理论与方法研究方面起步较晚, 研究基础比较薄弱。“十五”

以来, 国内相关院所主要在航空航天装备领域开展了一系列的 PHM 系统设计基础研究工作, 并结合型号技术攻关, 边研究边验证、迭代完善、双线并行, 取得了一定的成果。目前, 已初步构建了一套典型机电、电子、结构类产品的健康表

征、健康度量与演化规律挖掘的方法体系, 形成了相关的诊断与预测模型设计方法。PHM 验证基础研究方面, “十二五”期间开展了一定的 PHM 系统验证与评价、试验验证系统设计等技术方法研究, 并形成了相关演示系统与辅助工具。

2.2 工程技术

结合装备使用和维修保障情况, 我国在航空、航天、船舶、兵器等领域正逐步开展相关工程技术研究。在 PHM 系统能力与需求分析基础上, 从物理结构、综合诊断、信息处理以及功能结构等方面进行了 PHM 体系架构与集成的初步研究; 与此同时, 也开展了 PHM 系统参数指标体系、标准规范等研究。在上述研究基础之上, 开发了相应的结构健康监测智能传感器、结构健康监测集成验证平台、机电 PHM 原型系统与案例库、系统测试性设计分析工具、嵌入式智能诊断原型系统, 以辅助开展 PHM 系统设计。

2.3 工程应用

我国在装备 PHM 系统工程应用方面, 已远落后于国外发达国家先进水平, 目前 PHM 技术尚未开展全面工程转化应用。在航空领域, 围绕型号技术攻关, 针对飞控作动器系统、旋转作动器驱动装置、液压能源系统、附件机匣、供电系统、航电处理机、金属/复合材料机体结构等开展了测试性设计与验证、诊断与性能衰退预测等技术研究及相关验证。在航天领域, 目前卫星电源系统主要开展太阳电池阵、蓄电池与控制器的在轨状态监测、性能退化预测、运行管理与延寿; 载人航天也针对部分关键系统开展了状态监测与故障容错控制。在船舶领域, 针对主机与辅机系统关键设备 (柴油机、泵类设备、调距桨装置、舰面系统等), 主要开展状态监测、故障诊断、运行与辅助维修决策等技术应用。在兵器领域, 针对发射车开展了网络环境下的车载状态监测与辅助维修指导、监测中心增强诊断、任务与维修辅助决策工程应用。

3 国内外 PHM 技术差距分析

PHM 技术在国内相对来说还是一个比较新颖的概念, 研究起步较晚。虽然开展了大量工作, 并取得了显著的研究成果, 但前期主要是跟踪国外工程应用, 在相关基础理论与技术、系统综合集成等方面的研究还较少。具体表现在:

1) 在 PHM 系统集成与使能技术方面。国外已开展了大量的相关研究和应用工作^[18-21], 国内仅是跟踪国外的工程应用, 设计方面相对落后, PHM 系统集成与使能工具设计相关研究较少, 尚无具体工程应用案例, 亟待进一步深入研究。

2) 在复杂系统健康管理方面, 国外已开展了大量的基于 PHM 的维修决策研究工作; 同时, 国外已在自愈材料、智能结构方面开展了大量的研究, 部分技术已有应用。国内装备仍以周期性预防维护为主, 基于 PHM 的装备任务规划与维修策略研究工作较少; 我国在装备自愈研究方面开展较晚, 自愈材料与智能结构研究方面以理论研究为主, 而应用研究较少。

3) 在复杂系统健康诊断与预测方面, 国内外在此方面研究差距不大, 某些方向已达到国际先进水平。在方法研究上,

国内外均开展基于故障物理、数据驱动、模型、专家知识的诊断与预测技术研究。但是,在技术成熟度上与应用广度上,国外领先国内。尤其在应用于 PHM 的新型智能传感器技术及装置研发上,国外已远领先于国内。

4) 在 PHM 能力试验验证方面,国外已开展了大量研究工作,国内在 PHM 设计验证方面,也开展了初步的研究工作,但目前还没有成熟的 PHM 体系综合建模、试验验证与能力评价技术方法体系,相关验证辅助工具与平台成果还较少。

4 PHM 发展与应用建议

综合以上差距与不足,通过分析国外发展经验,国内 PHM 技术研究可以重点从以下几个方面开展。

1) 在 PHM 技术发展规划方面。借鉴 NASA 和美国空军的 PHM 发展规划,我国航空、航天、船舶与兵器领域也必须制定循序渐进的技术发展计划,如:从基础的失效物理、零部件的基础研究,到子系统级的监测、诊断、预测和容错控制技术研究,再到机身、机载系统和推进系统等 PHM 设计,最后实现全机的 PHM。

2) 在 PHM 基础理论与技术方面。在 PHM 基础理论与技术方面需要解决以下几个问题:一是如何针对故障诊断与预测的需求,开展新型智能传感器攻关?二是如何针对不同部件、设备、系统层次,准确地度量系统的健康状态,挖掘系统健康演化规律?三是针对故障预测的不确定性,如何提高预测的有效性与准确性?四是如何有效实现的复杂系统的维修优化决策、健康自愈与控制,实现健康管理?

3) 在 PHM 工程应用方面。一是在系统集成应用方面,如何采用并行工程原理,将 PHM 与被监控产品设计同步,实现 PHM 系统协同设计;二是如何进行 PHM 的诊断预测能力认知、功能仿真试验验证、以及定量性能评价。

5 结论

作为现代武器装备实现自主式后勤 (automatic logistics, AL) 和降低全寿命周期费用的关键核心技术,PHM 技术正逐渐受到国内外研究机构的广泛关注。本文总结了国外 PHM 技术发展的应用成效与发展状况,分析了国内外技术差距,并在此基础上给出了 PHM 发展与应用建议。综合上述总结与分析,依据 PHM 技术综合多学科专业的特点,我国 PHM 技术的发展建议总结为以下几点:

1) 遵循技术自身发展规律和我国 PHM 技术现状,制定科学化的顶层技术路线图和技术里程碑。

2) 紧跟技术发展潮流,积极借鉴当前流行的大数据分析、云计算、自主系统、信息物理系统、微机电系统等软硬件信息处理与技术手段,强化 PHM 关键技术基础。

3) 依据系统工程原理,在 PHM 技术与系统的设计一开发一应用过程中,逐步提升我国 PHM 体系综合建模、协同设计与验证评价能力,并形成一套标准化、开放化接口的协同设计工具与一体化学验证平台。

参考文献:

[1] 张宝珍,曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术 [J]. 航空维修与工程, 2005 (6): 20-23.
[2] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理系统的发展及应用 [J].

计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 591-594.

[3] 周晓军. 生产系统智能维护决策及优化技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
[4] Lee J, Liao L, Lapira E, et al. Informatics Platform for Designing and Deploying e-Manufacturing Systems [J]. Collaborative Design & Planning for Digital Manufacturing, 2009: 1-35.
[5] Ferrell B L. JSF prognostics and health management [A]. Aerospace Conference, 1999. Proceedings. 1999 IEEE [C]. IEEE, 1999.
[6] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [military aircraft] [A]. Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE [C]. IEEE, 2002: 6-2815-6-2824.
[7] 代京, 刘浩, 于劲松, 等. 飞行器健康管理系统验证与评估技术研究 [J]. 电子测量技术, 2012, 35 (8): 1-10.
[8] 景博, 杨洲, 张劼, 等. 故障预测与健康管理系统验证与确认方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (21): 23-27.
[9] Dzakowic J, Valentine G S. advanced techniques for the verification and validation of prognostics & health management capabilities [A]. Proceedings of the 60th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach [C]. Virginia, 2006.
[10] Byington C, Roemer M, Kalgren P, et al. Verification and validation of diagnostic/prognostic algorithms [C]. MFPT, 2005
[11] Aguilar R, Chuong L, Santi L, et al. Real-time simulation for verification of diagnostic and prognostic algorithms [A]. AIAA Joint Propulsion Conference [C]. July 2005.
[12] Roemer J M, Dzakowic J, Orsagh R F, et al. Validation and verification of prognostic and health management technologies [A]. Proc. of IEEE Aerospace Conference [C]. 2005: 3941-3947.
[13] Poll S, Patterson-John A, Camisa J, et al. Advanced diagnostics and prognostics test bed [A]. Proceedings of the 18th International Workshop on Principles of Diagnosis [C]. 2007: 178-185.
[14] Keller K, Wiegand D, Swearingen K, et al. An Architecture To Implement Integrated Vehicle Health Management Systems [A]. Autotestcon Proceedings IEEE Systems Readiness Technology Conference [C]. 2001: 2-15.
[15] Hess A, Calvello G, Dabney T. PHM a key enabler for the JSF autonomous logistics support concept [A]. Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE [C]. IEEE, 2004 (6): 3543-3550.
[16] 邢晨光, 张宝珍. 飞行器综合健康管理技术途径 [A]. 2008 年航空试验测试技术峰会论文集 [C]. 2008: 232-236.
[17] Belcastro C M. Aviation safety program integrated vehicle health management technical plan summary [R]. NASA, 2008-04.
[18] 王绪智, 张宝珍. 国外 PHM 技术的发展动态及经验教训 [A]. 2010 年航空试验测试技术峰会论文集 [C]. 2010: 216-219.
[19] Hess A, Calvello G, Frith P. Challenges, issues, and lessons learned chasing the "Big P". Real predictive prognostics. Part 1 [A]. Aerospace Conference, 2005 IEEE [C]. IEEE, 2005: 3610-3619.
[20] Byington C S, MJR P E, Hess A J. Programmatic and Technical PHM Development Challenges in Forward Fit Applications [A]. IEEE Autotestcon [C]. 2005