

预测与健康管理技术的发展及应用

张宝珍

(中国航空工业发展研究中心, 北京 100012)

摘要:回顾了故障诊断、预测与健康管理 (PHM) 技术的发展演变历程, 考察了 PHM 技术在国外军事、民用和学术研究领域的应用现状, 最后展望了 PHM 技术的未来发展方向。

关键词:故障诊断; 预测与健康管理 (PHM); 发展; 应用

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2008)02-0005-03

Evolution and Application of PHM Technologies

ZHANG Bao-zhen

(Aviation Industry Development Research Center Beijing 100012, China)

Abstract: Firstly, the evolution of fault diagnostics, prognostics and health management (PHM-related) technologies are reviewed, then the applications of PHM-like technologies in the military, commercial and academic research areas are explored, and lastly, the development directions of PHM technologies in the future are prospected.

Key words: fault diagnostics, prognostic and health management (PHM); development applications

预测和健康管理 (PHM) 系统正在成为新一代复杂武器系统设计和使用中的一个组成部分。所谓预测, 即预先诊断部件或系统完成其功能的状态, 包括确定部件的残余寿命或正常工作的时间长度; 所谓健康管理, 是根据诊断、预测信息、可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策的能力。PHM 代表了一种方法的转变, 即从传统的基于传感器 (或 BIT/BITE) 的诊断转向基于智能系统的预测, 从反应性的通信转向在准确时间对准确的部位进行准确维修的主动积极的活动。PHM 重点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、诊断、监控和管理飞机的状态。这一技术的实现将使原来由事件主宰的维修 (即事后维修) 或时间相关的维修 (即定期维修) 由基于状态的维修 (CBM) 所取代。

1 PHM 技术的演变过程

PHM 技术的演变过程是人们认识和利用自然规律过程的一个典型反映, 即从对故障和异常事件的被动反应, 到主动预防, 再到事先预测和综合规划管理。PHM 技术的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代和 60 年代。当时, 航空航天领域极端的环境和使用条件驱动了最初的可靠性理论、环境试验和系统试验以及质量方法的诞生。随着宇航系统复杂性的增加, 由设计不充分、制造误差、维修差错和非计划事件等各种原因导致故障的机率也在增加, 迫使人们在 70 年代创造出新的方法来监视系统状

态, 预防异常属性, 导致机上关键故障响应方法的出现, 如故障保护和冗余管理。随后出现了诊断故障源和故障原因的技术, 并最终带来了故障预测方法的诞生。流行于 20 世纪 80 年代后期和 90 年代早期的全面质量管理是一种基于过程的可靠性改进方法, 同时软件工程师创造了更复杂的技术来检测和测试软件设计缺陷。20 世纪 90 年代初期, “飞行器健康监控 (VHM)” 一词在 NASA 研究机构内部盛行, 它是指, 适当地选择和使用传感器和软件来监测太空交通工具的“健康”。工程师们不久发现, VHM 这个术语存在两方面不足。首先, 仅仅监控是不够的, 真正的问题是根据所监控的参数采取什么措施。“管理” 一词不久就代替了“监控”, 来指这一更活跃的实践。其次, 考虑到飞行器仅仅是复杂的人-机系统的一个方面, “系统” 一词很快代替了“飞行器”, 因此, 到 20 世纪 90 年代中期, “系统健康管理” 成为涉及该主题的最通用的词语。美国国防部在同一时期产生了一套涉及类似主题的过程, 但冠以“综合诊断” 的名称。综合诊断通常定义为通过考虑和综合测试性、自动和人工测试、维修辅助手段、技术信息、人员和培训等构成诊断能力的所有要素, 使装备诊断能力达到最佳的结构化设计和管理过程。其目的是以最少的费用最有效地检测、隔离武器装备内已知的或预期发生的所有故障, 以满足装备任务要求。综合诊断从 20 世纪 80 年代后期至 90 年代在美国国防部和三军中盛行, 并在美军新一代武器装备如 F-22 战斗机、F-135 (JSF)、M1A2 主战坦克和 SSN-21 攻击核潜艇研制中得到采用。此后不久, NASA 引入了类似的术语, 即“综合系统健康管理” (ISHM)。在 NASA 术语中使用“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其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 ISHM 限定为一种新的系统问题, 代替过去将注意力放在分系统上。

收稿日期: 2007-07-12

作者简介: 张宝珍 (1967-), 女, 研究员, 硕士, 主要从事“五性” (可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性) 和试验与测试专业的情报研究。

20世纪 90年代末,随着美军重大项目 F-35联合攻击机(JSF)项目的启动,为预测与健康管理的诞生带来了契机。PHM是JSF项目实现经济承受性、保障性和生存性目标的一个关键所在。JSF的PHM系统是当前飞机上使用的机内测试(BIT)和状态监控的发展,这种发展的主要技术要素是从状态(健康)监控向状态(健康)管理的转变,这种转变引入了故障预测能力,借助这种能力从整个系统(平台)的角度来识别和管理故障的发生。其目的是减少维修人力、增加出动架次率、实现自主式保障。美国国防部和NASA在PHM/ISHM相关技术方面的演变过程如表1所示。

表 1 DoD和NASA通向PHM/ISHM的技术演变过程

	DoD	NASA
1950s	<ul style="list-style-type: none">• 可靠性分析• 系统试验与评价• 质量方法	<ul style="list-style-type: none">• 可靠性分析• 系统试验与评价
1960s	<ul style="list-style-type: none">• 建模• 故障分析	<ul style="list-style-type: none">• 建模与仿真• 故障分析• 数据的遥测• 系统工程
1970s	<ul style="list-style-type: none">• 系统监控• 以可靠性为中心的维修• 系统工程• 机内测试(BIT)	<ul style="list-style-type: none">• 系统监控• 机上故障保护• 冗余管理• 拜占庭计算机故障理论
1980s	<ul style="list-style-type: none">• 扩展BIT• 数据总线和数字处理• 发动机健康监控• 全面质量管理	<ul style="list-style-type: none">• 扩展BIT• 数据总线和数字处理
1990s	<ul style="list-style-type: none">• 综合诊断• 飞行数据记录	<ul style="list-style-type: none">• 诊断• 飞行器健康监控• 飞行器健康管理• 系统健康管理
2000s	<ul style="list-style-type: none">• 预测• 综合飞行器健康监控• 综合飞行器健康管理	<ul style="list-style-type: none">• 综合系统健康监控• 综合系统健康工程和管理

2 PHM技术的应用现状

近年来,随着计算机技术、人工智能技术、微电子技术和机电技术等信息技术的飞速发展和系统复杂化、综合化水平的提高,武器装备的嵌入式诊断技术正在从过去单纯的电子/航电设备BIT和结构/机械设备的状态监控向覆盖武器装备所有重要系统和关键部件的机载预测与健康管理的(PHM)方向发展演变。近年来,PHM之类技术受到各国军方和工业界的广泛关注,各方都在积极采取各种方式加速这类军民两用技术的开发和利用。

(1)PHM在军事领域得到广泛应用且成效显著。

F-35自主式保障系统所采用的PHM技术目前正在研制和成熟过程中,PHM能力计划在2008年以后的第2批次飞机中引入。但PHM相关技术已在军事和民用领域得到广泛应用,并取得了令人瞩目的成效。

目前PHM技术已广泛应用于英、美、加拿大、荷兰、新加坡、南非、以色列等国的直升机上,称为健康与使用监控系统(HUMS)。其中,美国国防部新一代HUMS——JAHUMS具有全面的PHM能力和开放、灵活的系统结构。迄今,美陆军的直升

机已有180多架安装了HUMS系统,包括AH-64阿帕奇、UH-60黑鹰和CH-47支奴干。据美国《今日防务》2006年4月21日报道,安装了HUMS系统的美国陆军直升机任务完备率提高了10%。陆军已向装备HUMS的飞机颁发了适航证或维修许可证。2007年3月,美国陆军又授予智能自动化公司合同,将其新开发的超级HUMS引入美陆军的RQ-7A/B“阴影”200战术无人机系统中。此外,美陆军已批准在全部750架“阿帕奇”直升机上安装HUMS。英国国防部也与史密斯航宇公司达成协议,为70架未来山猫直升机开发一种状态与使用监测系统和机舱声音与飞行数据记录仪(HUMS/CVFDR)组合能力,交付时间于2011年开始。这些HUMS应用系统将装到英国陆军的40架战地侦察直升机(BRH)和英国皇家海军的30架水面作战海上旋翼机(SCMR)。另外,史密斯航宇公司也将为韩国直升机项目(KHP)提供价值超过2000万美元的直升机HUMS系统。

HUMS不但应用于直升机上,在阵风、鹰等战斗机和C-130大力神运输机等固定翼飞机上也已经应用。2006年,波音公司选择泰瑞达公司作为美国海军P-8A多任务海上飞机开发并提供与HUMS类似的飞机健康监测系统(AHMS)。

美国各军种与HUMS和PHM类似的技术开发项目如海军的综合状态评估系统(ICAS)、陆军的诊断改进计划(ADIP)、B-2轰炸机和全球鹰无人机和NASA第2代可重复使用运载器的飞行器综合健康管理(IVHM)系统等。20世纪90年代末,随着美军重大项目F-35联合攻击机(JSF)项目的启动,为PHM技术的全面发展和完善带来了契机。JSF所采用的PHM系统代表了美军目前基于状态的维修(CBM)技术所能达到的最高水平。

(2)PHM应用提高飞行安全和航班运营效率,让民航永葆“健康”。

PHM技术在民用领域也得到推广应用。例如,波音公司已将PHM应用到民用航空领域,称作“飞机状态管理”(AHM)系统,已在法国航空公司、美利坚航空公司、日本航空公司和新加坡航空公司的B777、B747-400、A320、A330和A340飞机上得到大量采用,提高了飞行安全和航班运营效率。2006年这套系统进一步扩大应用于国泰航空公司、阿联酋航空公司和新西兰航空公司。据波音的初步估计,通过使用AHM可使航空公司节省约25%的因航班延误和取消而导致的费用。此外,AHM通过帮助航空公司识别重复出现的故障和发展趋势,支持机队长期可靠性计划的实现。

航空无线电通信公司(ARINC)公司与NASA兰利研究中心合作,研制了与PHM类似的“飞机状态分析与管理”(ACAMS),其功能在NASA的B757飞机上成功地进行了飞行试验演示验证,该套系统已申请了美国专利。

NASA正在考虑采用Qualtech系统公司开发的综合系统健康管理(ISHM)方案对航天飞机进行健康监控、诊断推理和最优查故,以求降低危及航天任务安全的系统故障。

(3)PHM研发及学术交流活动非常活跃,电子预测成为倍受关注的主题。

随着PHM技术在军事和民用领域的广泛应用,世界各国对PHM技术的兴趣日渐浓厚。近年来,有关PHM技术的研发和学术交流活动非常活跃。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;美国圣地亚国家实验室与美国能源部、国

防部、工业界和学术界合作建立了预测与健康管理 (PHM) 创优中心 (COE), 支持 PHM 技术开发和技术试验和确认; 马里兰大学成立预测与健康管理联合会, 致力于电子预测与管理方法的研究和培训; 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电子预测技术。人们普遍认为, 电子预测技术目前虽然远未达到成熟, 尚不能进入应用, 但它代表了 PHM 未来的一种重要发展趋势。

总之, PHM 已成为国外新一代武器装备研制和实现自主式保障的一项核心技术, 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。

3 PHM 技术的发展

(1) 新学科的诞生。

PHM 技术并没有停住向前发展的步伐。到 21 世纪初, 特别是由于 2003 年发生了哥伦比亚号航天飞机事故, 使 NASA 和 DoD 认识到故障经常源于负责操纵复杂系统的组织内部的各种文化问题。2005 年 11 月, NASA 组织举办了首届国际宇航“综合系统健康工程和管理”论坛, 论坛组委会决定在综合系统健康管理 (ISHM) (NASA 领域的 PHM) 的名称中增加“工程”一词, 旨在将预防和减弱故障问题的技术问题与社会问题加以区分, 并将“综合系统健康工程和管理” (ISHEM) 作为一门新的学科推出。

综合系统健康工程和管理 (ISHEM) 定义为, 用来设计、分析、制造、验证和使用一个系统, 以防止故障和 (或) 最大限度地减少故障的影响的过程、方法和技术。ISHEM 旨在将大量独立的相关学科和技术整合起来, 使人们所使用的日益复杂的系统和功能拥有更多成功的机会。ISHEM 中的“工程”一词在此指经典的技术方面的问题; 而“管理”一词按其通常的用途在此明确代表组织和社会问题。重要的是使飞行器健康管理 (VHM) 专家理解这一新的定义, 并认识到“管理”一词除具有其常规的“主动性”含义外, 现在还包括系统健康的社会和认知方面的内容。

ISHEM 新学科除了包括经典的工程问题, 诸如先进的传感器、冗余管理、先进的诊断和预测算法、概率可靠性理论和正规的确认方法, 还包括质量保证、系统体系结构和工程、知识获取和管理、测试性和维修性以及人为因素等过程和学科。此外, 它还包括制度化设计和过程、使用的教育与培训以及系统集成在经济性等方面的社会和认知问题。所有这些学科和方法都是设计和使用可信的、“健康”的人-机系统时需要考虑的重要因素。

(2) 技术展望。

PHM 技术的发展经历了状态 (健康) 监控和故障诊断、故障预测、系统集成 3 个日益完善的阶段, 在部件级和系统级两个层次、在机械产品和电子产品等领域经历了不同的发展历程。当前 PHM 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, 支持基于状态的维修 (CBM) 与自主式保障 (AL) 等方面。

在 PHM 系统集成应用方面, 体现在:

①如何采用并行工程的原则, 与被监控产品设计同步, 进行 PHM 的框架设计与细节设计?

②如何进行 PHM 的定量性能评价与验证?

③针对故障预测的不确定性, 如何进行风险-收益分析, 实现容忍不确定性的保障决策?

在提高故障诊断与预测精度方面, 体现在:

①研究混合及智能数据融合技术, 加强经验数据与故障注入数据的积累, 提高诊断与预测置信度;

②不断寻求高信噪比的健康监控途径。

③研究灵巧、健壮的先导传感器和传感器布局问题, 提高数据源阶段的精度。

在扩展应用对象范围方面, 体现在向电子产品故障预测的扩展。

①如何与故障预测技术相结合, 提升 BIT 能力, 减少 CND, 降低虚警率?

②如何实现寿命消耗监控 (LCM) 不确定性的定量评价?

③如何把 LCM 与故障征兆 (precursor) 技术相结合, 提高 LCM 的置信度等。

参考文献:

- [1] Johnson S B. Introduction to system health engineering and management in aerospace [R]. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace Napa California USA, 2005-11.
- [2] Andrew Hess Leo Filz. Prognostics from the need to reality from the fleet users and PHM system designer/developers perspectives [A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2002.
- [3] Byington C S Roemer M J & Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [A]. IEEE Aerospace Conference [C]. 2002.
- [4] Hess A. The joint strike fighter (JSF) prognostics and health management [A]. NDIA 4th Annual Systems Engineering Conference [C]. 2001-10.
- [5] Scheuren W. Safety & the military aircraft joint strike fighter prognostics & health management [R]. AIAA 98-3710, 1998.
- [6] 曾声奎, 等. 故障预测与健康管理 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5).
- [7] 张宝珍, 曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济承受性目标的关键使能技术 [J]. 航空维修与工程, 2005, (6).

□

欢迎登录测控技术杂志网站

www.mct.com.cn

(测控在线)

探寻测控科技前沿动态,
了解测控行业实用新品,
发布测控领域供求信息,
挖掘测控技术珍藏文章。

测控在线网站全面收录测控行业的最新资讯, 为您提供中国测试、测量与控制的信息交流平台。