

文章编号: 1672-1497(2009)06-0001-06

故障预测与健康管理技术的应用与发展

冯辅周, 司爱威, 邢伟, 江鹏程

(装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072)

摘要: 基于故障预测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 系统框架, 分析了 PHM 技术在装备维修保障中的重要意义, 概述了 PHM 技术的发展过程及应用现状, 重点讨论了当前故障预测与健康管理所采用的关键技术, 包括先进传感器技术、数据传输技术、数据挖掘与信息融合技术、健康评估与故障预测技术、智能推理与决策支持技术等, 最后展望了 PHM 技术的发展趋势。

关键词: 故障预测; 健康管理; 故障诊断

中图分类号: TP206⁺.3 **文献标志码:** A

Applications and Development of Multifunction Prognostics and Health Management Technologies

FENG Fu-zhou, SI Ai-wei, XING Wei, JIANG Peng-cheng

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Based on the frame of Prognostics and Health Management (PHM) system, this paper analyses the significance of PHM technologies in equipment maintenance support, summarizes the development and current status of PHM technologies, emphatically discusses the key technologies of the present PHM, such as advanced sensor technology, data transmission technology, data mining and information fusion technology, health evaluation and fault prognostic technology, intelligent reasoning and decision support technology. Finally, this paper points out the developing trend of PHM technologies.

Key words: fault prognostics; health management; fault diagnosis

1 概述

随着信息技术和自动化技术的快速发展, 各种大型复杂系统的集成度和复杂度越来越高, 系统的维修保障问题日益突出, 寻求一种既便捷可靠又经济高效的保障方式成为相关领域专家竞相研究的热点。故障预测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 技术就是在这一背景下应运而生并不断壮大发展的, 基于该技术的 PHM 系统已在航空航天、国防以及工业等领域逐步得到应用, 初步显露出其巨大的发展潜力和应用前景。

PHM 是指利用尽可能少的传感器来采集系统的各种数据信息, 借助各种智能推理算法来评估系

统自身的健康状态, 在系统故障发生前对其故障进行预测, 并结合各种可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施以实现系统的视情维修^[1]。PHM 系统的体系结构主要由 7 部分构成: 数据采集模块、数据预处理模块、状态监测模块、健康评估模块、预测模块、决策支持模块和人机接口模块。体系结构中的各部分没有明显的界限, 且存在着大量数据信息的交叉反馈^[2]。

PHM 技术对装备的维修保障具有重要意义, 主要表现在以下几个方面。

1) PHM 技术是推动装备维修制度改革、实行视情维修的必要手段。现行大部分装备的维修方式还一直沿用事后维修和定期强制维修, 这就带来了一

收稿日期: 2009-10-27

基金项目: 军队科研计划项目

作者简介: 冯辅周 (1971-) 男, 教授, 博士。

系列问题。事后维修、不坏不修,这种方式隐含着较大的安全隐患;定期强制维修、好坏都修,往往造成盲目修理或失修现象。而基于 PHM 的视情维修方式可以很好地解决这些问题。

2) 发展 PHM 技术是提高维修效率和战备完好率、降低维修保障费用的迫切需要。PHM 系统可依靠其强大的状态监控和故障预测能力,事先做出维修决策,减少维修次数,缩短维修时间,提高装备的维修保障效率和战备完好率。同时,通过减少备件、保障设备以及维修人力等保障资源需求,可降低维修保障费用,提高经济效益。

3) 应用 PHM 系统是降低风险和提高任务成功率的有力保障。通过对装备状态的健康评估,实时掌握其运行状况,及时处理存在的问题,可极大地降低执行任务过程中故障引起的风险,提高遂行任务的能力。

4) PHM 系统是实现统一调度资源和各部门协同保障的高效平台。在健康评估和故障预测的基础上,通过 PHM 系统中的决策支持系统可协同各个相关部门,优化资源配置,简化工作流程,解决传统维修保障模式“小而散”和保障效率低下的问题。

2 PHM 技术的发展历程

PHM 技术的发展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^[3]。根据 PHM 技术的发展和演变,可从以下 5 个阶段概括其发展过程。

2.1 可靠性分析阶段

PHM 技术的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代和 60 年代。第二次世界大战期间,许多复杂系统(如航空电子设备、通信系统以及武器系统)暴露出低下的可靠性水平,这种问题的日益突出加上随后着手实施的各类太空研究计划驱动了最初的可靠性理论的诞生。在此阶段,人们采用传统的数据采集技术获取系统的可靠性数据进行可靠性分析,在此基础上不断改进和完善系统的设计,以提高系统的性能,满足系统在极端的环境和使用条件下的可靠性要求。可靠性分析阶段是 PHM 技术起步的萌芽阶段。

2.2 故障分析阶段

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的故障机率也在增加,迫使人们在 20 世纪 70 年代研

究新的方法来监视系统状态,预防异常属性,出现了机上关键故障响应方法。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。故障预测技术可利用物理模型或智能模型综合采集到的各种数据信息,评估和预测系统及部件未来的状态,并对其剩余使用寿命进行估计。故障预测能力是 PHM 系统的显著特征,标志着 PHM 技术的发展已初露端倪。

2.3 系统监控阶段

20 世纪 90 年代初期,“飞行器健康监控(Vehicle Health Monitoring VHM)”一词在美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration 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”。“健康”一词首次被用来描述机械系统的技术状态。该阶段的主要特征是:人们可以利用较为先进的传感器技术、数据传输技术和数据处理技术实时监控系统的工作状态,为保障系统的安全运行提供了可靠支持。这一阶段的发展为 PHM 技术迈向实用化奠定了基础。

2.4 系统健康管理阶段

在提出健康监控理论后不久,人们发现: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”,把健康监控和维修决策统一到了一起,丰富了 PHM 技术。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。这一阶段也预示着 PHM 技术的快速发展并走向成熟。

2.5 综合系统故障预测与健康管理阶段

20 世纪 90 年代中后期, NASA 引入了“综合系统健康管理(Integrated System Health Management ISHM)”的概念。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。至此, PHM 技术已发展成为一个完整的体系。

20 世纪 90 年代末,随着美军重大项目——F-35 联合攻击机(Joint Strike Fighter JSF)项目的启动,为 PHM 技术的进一步发展带来了契机。进入 21 世纪,在国内外学者的共同努力和政府的支持

下, 各领域的 PHM 系统相继问世, 推动着 PHM 技术日益成熟并向实用化方向发展。

3 PHM 技术的应用现状

3.1 国外 PHM 技术的应用现状

F35 自主式保障系统采用的 PHM 系统目前正在研制和完善过程中, 代表了美军目前视情维修技术 (Condition Based Maintenance, CBM) 所能达到的最高水平, 并计划用于 2008 年以后的第 2 批次飞机中。PHM 相关技术已在军事和民用领域得到广泛应用, 并取得了显著的成效。

目前, 美国、英国、加拿大、荷兰、新加坡、南非和以色列等国已将 PHM 技术应用到直升机上, 出现了称作“健康与使用监控系统” (Health and Usage Monitoring System, HUMS) 的集成应用平台。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^[4]。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%, 陆军已向装备了 HUMS 的飞机颁发了适航证和维修许可证。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) 组合系统, 2011 年前交付使用^[3]。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开始应用。

美国各军种研究开发的与 HUMS 和 PHM 类似的技术还有: 海军的综合状态评估系统 (Integrated Condition Assessment System, ICAS)、陆军的诊断改进计划 (Army Diagnosis Improvement Plan, ADIP)、B2 轰炸机、“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 (Integrated Vehicle Health Management, IHM) 系统等^[5]。

除了在军事领域的成功应用外, PHM 技术还在航空航天、民用飞机、汽车、核电站和大型水坝等民用领域获得广泛应用, 成为名副其实的军民两用技术。波音公司已将 PHM 技术应用到民用航空领域, 称作“飞机状态管理” (Aircraft Health Management, 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 等飞机上得到大量应用,

提高了飞行安全和航班运营效率。2006 年, 这套系统的应用进一步扩大, 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% 的因航班延误及取消而导致的费用。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。美国航空无线电通信公司与 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” (Aircraft Condition Analysis and Management System, 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^[6]。

随着现代数字技术、微电子技术的迅速发展, 现代武器装备中大量采用了复杂的先进电子设备, 这同时给测试、维修和保障工作带来了严重问题和负担。特别是各种微型电路的应用, 使电子设备的故障监测和预测成为影响战备完好性、使用和保障费用的重要因素, 引起了美英等国军方的普遍关注。由于电子产品本身故障的特点, 电子产品的 PHM 问题尤为困难。如: 由于电子产品中的缺陷可能是微米甚至纳米尺寸级, 电子产品中的故障相对更难于检测。而且由于电子失效机理繁多, 单一器件失效率较低, 电子产品的 PHM 优势不如在其机械系统中明显。目前国外在对电子产品进行 PHM 的应用和研究方面主要取得了以下成果: 波音公司的 AHM、JSF 以及 IHM 等系统中都不同程度地采用监测那些能够反映电子产品故障或健康状态的性能 (特征) 参数 (如电流、电压和电阻等) 来监测电子产品的健康状态^[7-9]; 美国马里兰大学 CALCE 中心以故障物理方法为基础, 对电子产品的 PHM 技术进行了大量深入研究工作, 并得到了初步应用和验证^[10-13], 该方法是指在已知电子产品故障物理 (Physics of Failure, PoF) 模型的基础上, 通过监测产品的使用环境条件 (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电子产品的健康状态; 美国的 Ridgetop 公司还提出了在电子产品内部内置“故障标尺”的方法, 来预测实际被监测产品的剩余寿命^[14]。

3.2 国内 PHM 技术的应用现状

从 20 世纪 50 年代起, 中国就与世界其他国家

一起涉足 PHM 这一新兴领域。但是由于工业基础薄弱等问题,一直发展缓慢。自 20 世纪 80 年代以来,我国政府大力发展状态监测、故障预测及可靠性维修等 PHM 相关技术的研究,并将其列入国家“863”发展计划。由北京航空航天大学、清华大学、上海交通大学、西北工业大学和哈尔滨工业大学等国家重点大学及相关科研院所承担科研项目开展研究工作。其中北航可靠性工程研究所较早地开展了 PHM 系统方法和技术应用方面的相关研究,在飞行器(飞机、无人机、航天器)领域开展相关算法、智能模型和管理调度等方向的探索性研究,以神经网络及其混合模型、时间序列分析等的应用案例居多,由于各类方法各有其优点及局限性,各种案例研究正在不断尝试、扩展和深入^[15]。我国在 PHM 方面的早期应用主要在民航系统,主要是应用了飞机或发动机的性能状态监控软件系统,但与硬件系统贯穿在一起的整套解决方案的可应用成果较少。

国内军方也在各个领域对 PHM 技术进行了理论探索和深入研究。其中:空军工程大学的张亮等^[16]针对我军新一代作战飞机的技术特点及其维修保障需求,对机载 PHM 系统体系结构的各种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;海军航空工程学院的何献武等^[17]对 PHM 技术应用于反舰导弹维修保障中的有效性和可行性进行了研究,并设计了反舰导弹武器系统 PHM 系统结构及反舰导弹维修保障中的传感器网络结构;空军雷达学院的王晗中等^[18]为克服传统维修保障方式的缺陷并适应现代雷达装备维修保障的发展需求,构建了基于 PHM 的雷达装备维修保障系统;解放军炮兵学院的彭乐林等^[19]根据无人机系统故障特点建立了系统设备拓扑结构,并构建了无人机 PHM 系统逻辑体系结构。

虽然国内外各种 PHM 系统已逐步开始得到应用,但还远没有达到工程实用化的程度。如:目前还仅是在部分关键的系统和部件中应用,而系统集成应用能力很弱;大部分系统的故障预测与健康管理体系脱节,没有充分发挥 PHM 系统的优势。并且对大多数系统尤其是电子产品的故障机理了解还不深入,有些还仅仅是故障的检测,还不具备故障预测的能力。此外,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。

4 PHM 的关键技术

4.1 先进的传感器技术

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等。这些传感器比传统的传感器能力更强,更容易实现故障症候的探测,从而使得检测技术敏感性更强,这些传感器已在结构健康监控系统中得到广泛应用。

目前,对这些传感器的研究主要从两方面展开:一方面是对传感器性能进行优化研究,包括提高传感器器件的精度、稳定性、复用性和方向性等;另一方面是研究如何减小传感器的尺寸,以便于同工程结构集成。

此外,PHM 还大量采用了新型微机电系统(Micro ElectroMechanical Systems, MEMS),MEMS 技术促进了传感器的进一步小型化,同时极大地降低了功耗(一般可降到 $40 \sim 500 \mu\text{W}$)和用于无线通信的成本。小型化使基于 MEMS 技术的传感器可以应用于传统传感器所不能应用的场合,这样就使 PHM 系统的小型化成为可能。如:Lockheed Martin 公司与其合作商在为美国陆军的导弹系统开发先进导弹远程监测系统的项目中,将 MEMS 加速度计、湿度传感器以及环境温度传感器综合设计为一个可进行无线数据传输的 MEMS 传感器模块。各种振动、湿度和温度数据可以通过蜂窝电话进行远程传输^[20]。又如: Honeywell 公司已经研制开发了一系列基于 MEMS 的传感器,这些传感器可以将多种参数的测量综合到单一的 MEMS 装置上,如将振动传感器、温度传感器、压力、应变以及加速度传感器等集成到一起^[21]。

4.2 嵌入式测试诊断技术

近年来,作为监控装备技术状态的重要技术之一的嵌入式测试诊断技术也得到了长足的发展,以此技术为基础的嵌入式系统已在航空、舰船、火炮和车辆等领域得到广泛应用^[22-25]。

嵌入式系统是以应用系统为中心,软硬件可以裁减,满足应用系统对速度、安全、功能以及成本要求的特殊计算机系统^[26]。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等 4 部分组成,用于实现测试、管理和控制等功

能, 可对装备的工作状况进行定期或连续的监测, 并具有检测、诊断和隔离故障的能力。为更好地部署和应用嵌入式系统, 并成功应用于 PHM 系统, 要求必须在装备研制初期对其可测试性设计予以充分考虑。对于电子系统, 要广泛应用机内测试或机内测试设备 (BIT/BITE); 对于机械系统, 要安装在线的传感器监测设备, 并预留好监测所需要的测试部位和接口。

4.3 数据传输技术

传感器采集到的各种数据信息需要通过一定的方式传输到 PHM 系统中的其他部分。目前主要有两种数据传输方式, 即有线传输和无线传输。

有线数据传输是通过各种有线数据总线和各种网络 (如 Internet Ethernet LAN (Local Area Network) 等) 进行数据的传输。目前这方面的技术较为成熟, 并且大多都有各种通讯标准和网络协议 (如 TCP/IP UDP/IP 等) 可以遵循。有线数据传输的一般过程是: 首先通过各种线缆将传感器的数据采集并存储在部件级的监测系统中; 然后通过特定的有线网络将部件级的监测数据传输到中央级存储和监测处理系统。

随着射频尤其是蓝牙以及蜂窝电话等技术的发展, 已有部分研究开始考虑在 PHM 系统中通过无线传输的方式进行数据传输^[27]。无线数据传输系统由一系列的分布式布置的传感器组件构成, 这些组件通过组件内部的无线调制解调器进行数据通讯。传感器组件一般由微处理器、无线传输器、数据采集电路、执行器、电池组以及参数传感器等几部分构成, 组件本身具有独立的数据采集和处理能力。另外, 黄伟等人^[28]设计了一种通过给不同采集点嵌入唯一名称代码来实现点对多点的数据传输的方法, 为电子产品 PHM 技术的实现提供了一种无线数据采集系统原型。

4.4 数据挖掘与信息融合技术

在 PHM 系统采集到各种数据之后, 就要对数据进行相应的处理以获取有用的信息, 为后续的健康评估和故障预测提供可靠的数据支持。数据挖掘和信息融合技术作为新兴的数据处理技术, 与传统的技术相比有明显的优势, 因此很快被引入到 PHM 系统中。

所谓数据挖掘, 就是从数据库中抽取隐含的、以前未知的、具有潜在应用价值的信息过程。用于 PHM 系统数据挖掘的信息源主要是各种传感器采

集的数据, 在对数据进行预处理的基础上利用各种算法挖掘其隐藏的信息, 并利用可视化和知识表达技术, 向 PHM 系统用户展示所挖掘出的相关知识。现在比较常用的数据挖掘方法包括粗糙集理论、遗传算法和支持向量机等。

信息融合是指在一定准则下对多传感器的信息进行自动分析和综合, 从而完成所需的决策和评估的信息处理过程。在 PHM 系统中信息融合的过程, 就是以最高效的融合方式把尽可能多的信息 (包括传感器采集的数据、环境信息、历史数据和维修记录等) 通过各种智能算法融合到一起, 得到综合的评价结果。与传统数据处理方法相比, 信息融合技术考虑问题更全面, 得到的结果更可靠。人工神经网络、D-S 证据理论和贝叶斯推理等都是常用的信息融合方法。

4.5 健康评估与故障预测技术

健康评估和故障预测是 PHM 系统的核心部分, 在某种意义上它们都是一种推理过程, 在实际构建 PHM 系统时往往要根据系统的实际情况采用一种或多种技术和方法。

系统的健康状态表现为从正常到性能下降直至功能失效的过程, 该过程被称为系统健康退化过程。因此, 健康评估是指当前状态偏离正常状态的程度 (即故障级别)。健康评估的过程则是根据状态监测所获得的信息, 结合设备的结构特性和运行信息及历次维修记录, 对已经发生或者可能发生的故障进行诊断、分析和预报, 以确定故障的类别、部位、程度和原因, 提出维修对策, 最终使设备恢复到正常状态。应用先进的状态监测和故障诊断技术, 不仅可以发现早期故障, 避免恶性事故的发生, 还可以从根本上解决设备定期维修中的维修不足和过剩维修的问题。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^[29]。

PHM 系统显著的特征就是具有故障预测的能力。故障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、早先的试验数据和历史经验等, 并借助各种推理技术, 如数学物理模型和人工智能技术等, 评估部件或系统的剩余使用寿命, 预计其未来的健康状态。在 PHM 系统中广泛应用的故障预测算法主要有基于特征进化统计趋势的预测、基于人工智能的预测和基于物理模型的预测等^[30-32]。

4.6 智能推理与决策支持技术

HIM系统的一个重要功能就是实现最后的“管理”，即在健康评估和故障预测的基础上，结合各种可利用的资源，提供一系列的维修保障决策以实现系统的视情维修。为达到这一目的，就要建立 PHM系统的维修保障决策支持系统。利用该系统进行维修决策的自动生成、维修资源的统一调配以及各相关单位的协同保障等，可极大地提高保障的效率和精确度。建立决策支持系统的主要技术有专家系统、仿真技术和多 Agent技术等^[33-35]。

5 PHM技术展望

HIM技术的发展在部件级和系统级两个层次、在机械产品和电子产品两个领域经历了不同的发展历程。当前 HIM技术的发展体现在以系统级集成应用为牵引，逐渐提高故障诊断与预测精度、扩展健康监控的应用对象范围等方面。

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。目前，我国国防科技工业对 PHM技术有着强烈的需求。借鉴和吸收国外的先进经验，研究 HIM关键技术可为我国新一代武器装备的研制提供基础技术储备，并奠定工程应用基础，更好地促进我国国防工业的快速发展。笔者认为应从以下 5 个方面努力。

1) 开发先进的传感器技术。传感器的开发应向高精度、高可靠性、低能耗，严酷环境适应性好、成本低廉，集成化、小型化等方面发展。

2) 开展从部件到系统、从电子到机械的失效机理分析研究，更准确地根据环境条件和系统运行状况等建立预测模型，更准确地描述故障随时间发展的趋势。

3) 结合传感器技术的发展，开发新的信号处理技术，不断寻求高信噪比的健康监控途径，提高故障预测和探测能力、性能评估能力，降低虚警率。

4) 研究混合及智能数据融合、推理技术和方法，以准确分析各种传感器数据，加强经验数据与故障注入数据的积累，提高诊断与预测的置信度。

5) 在完善 PHM系统本身功能的同时，研究 HIM系统性能评价标准及验证方法。针对 HIM系统故障预测的不确定性，进行风险收益分析。通过费效比的不断优化，实现不确定性的保障决策。

针对所研究领域，笔者将以装甲装备为对象，在深入研究其机械系统的退化模型和失效机理的基础

上，选用先进的 HIM技术，初步构建装甲装备 PHM系统平台，为装甲装备维修保障提供新的思路。

参考文献:

- [1] Hess A. The Joint Strike Fighter (JSF) HIM Concept: Potential Impact on Aging Aircraft Problems [J]. IEEE 2002 6: 3021—3026
- [2] 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 26(2): 12—16
- [3] 张宝珍. 预测与健康管理工作的发展及应用 [J]. 测控技术, 2008 27(2): 5—7
- [4] Land J E. HUMS: the Benefits Past, Present and Future [J]. IEEE 2001 6: 3083—3094
- [5] Oshun S. Integrated Vehicle Health Management for Aerospace Platforms [J]. IEEE 2001 5(3): 21—24
- [6] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008 16(5): 591—594
- [7] Hess A. Filali L. Prognostics from the Need to Reality from the Fleet Users and PHM System Designer/Developers Perspectives [J]. IEEE 2002 6: 2791—2797
- [8] Powrie H, Novis A. Gas Path Debris Monitoring for F-35 Joint Strike Fighter Propulsion System HIM [J]. IEEE 2006 8: 1759—1763
- [9] Viçare N M, Pecht M G. Prognostics and Health Management of Electronics [J]. IEEE 2006 29(1): 222—229
- [10] Lal P, Kam M N, Rahin M K. Prognostics and Health Management of Electronic Packaging [J]. IEEE 2006 29(3): 666—677
- [11] Shetty V, Rogers K, Das D. Remaining Life Assessment of Shuttle Remote Manipulator System End Effector Electronics Unit [J]. IEEE 2002 8: 2987—2991
- [12] Kelkar N, Dasgupta A, Pecht M et al. Smart Electronic Systems for Condition-based Health Management [J]. Quality and Reliability Engineering International 1997 13: 3—7
- [13] Wilkinson C, Humphrey D. Prognostic and Health Management for Avionics [J]. IEEE 2004 5: 3435—3447
- [14] Nickerson B, Lal R. Development of a Smart Wireless Networkable Sensor for Aircraft Engine Health Management [J]. IEEE 2001 7: 3255—3262
- [15] Zhang S N, Kang R, He X F et al. China's Efforts in Prognostics and Health Management [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology 2008 31(2): 509—518
- [16] 张亮, 张凤鸣, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理工作 (PHM) 系统的体系结构 [J]. 空军工程大学学报, 2008 9(2): 7—11
- [17] 何献武, 曾振建, 贾慧, 等. HIM技术在反舰导弹维修保障中的传感器网络应用研究 [J]. 仪器仪表用户, 2007 14(2): 11—13
- [18] 王晗中, 杨江平, 王世华. 基于 HIM的雷达装备维修保障研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008 19(4): 83—86

(下转第 15 页)

4 结论

将“任务/过程”的概念与 DEFO 建模工具结合起来建立作战飞机寿命周期过程模型, 不仅有着模型简单、结构清楚等优点, 而且其信息表达更加全面, 任务或者子任务之间的组织关系更加清楚, 能够体现作战飞机寿命周期过程的特点, 满足作战飞机寿命周期费用预测与控制的要求。“任务/过程”的概念重点强调信息的全面性, 有利于作战飞机寿命周期费用的过程控制, 但同时也加大了信息获取的难度, 如完成某任务所需的作业类型, 单位作业完成的时间等。因此, 要实现作战飞机寿命周期费用过程控制的目标, 在建立过程模型的基础上, 还应该逐步建立相应的数据库, 并在如何获取信息的方法上做进一步研究。

参考文献:

[1] 解放. 并行工程中产品开发过程的工作流管理研究 [D]. 南

京: 南京航空航天大学, 2002.

- [2] 郭春明. 基于作业成本法的产品生命周期成本估算研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [3] 周峰. 产品设计过程的建模、仿真及优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [4] 刘晓东. 装备寿命周期费用分析与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] 程培培. 面向全生命周期 BOM 的航空武器装备质量管理模式研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [6] 倪明. 基于层次理论的 DEFO 方法研究及其在物流信息化复杂系统中应用 [J]. 四川大学学报, 2007 5(39): 68—72.
- [7] Smith R P, Morrow J A. Product Development Process Modeling [J]. Design Studies, 1999 20(3): 237—261.
- [8] Bao H P. Cost Estimation of Composites Manufacturing Processes Through Process Cost Analysis Database (PCAD) [R]. USA: NASA Langley Research Center, 1997.
- [9] Jiang Z, Cheng K, Harrison D K. A Concurrent Engineering Approach to the Development of a Scroll Compressor [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000 107(22): 194—200.

(责任编辑: 戚琼华)

(上接第 6 页)

- [19] 彭乐林, 罗华, 马飒飒. 无人机故障预测及健康管理系統结构设计 [J]. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2009(1): 20—21.
- [20] David E, Ofir B, Yael N. Analytical Approach and Numerical Lines Method for Pull in Hyper-surface Extraction of Electrostatic Actuators with Multiple Uncoupled Voltage Sources [J]. MEMS, 2003 12(5): 681—691.
- [21] Martin V B, Nabeel A R. Foundations for Low-loss fiber Gradient-index Lens Pair Coupling With the Self-focusing Mechanism [J]. Applied Optics, 2003 42(3): 550—565.
- [22] 姚宗信, 梁大开, 李明. 基于模糊逻辑的嵌入式飞机大气数据传感器测量位置优化设计 [J]. 计量学报, 2004 25(3): 257—261.
- [23] 贾慧, 胥辉旗, 屈清林. 基于 PHM 的舰船装备维修保障研究 [J]. 仪器仪表用户, 2006 13(3): 8—10.
- [24] 段修生, 单甘霖, 高庆. 炮兵射击指挥系统嵌入式测试平台设计 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007 39(5): 269—271.
- [25] 曾锐利, 肖云魁. 基于 CAN 总线技术的汽车 ECU 设计 [J]. 仪器仪表学报, 2008 29(4): 496—499.
- [26] 危淑敏, 苗克坚. 基于 QNX 的实时嵌入式测试系统设计 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004 30(11): 1408—1411.

- [27] Nickerson B, Lalit R. Development of a Smart Wireless Networkable Sensor for Aircraft Engine Health Management [J]. IEEE, 2001 7: 3255—3262.
- [28] 黄伟, 何晶靖, 张叔农, 等. 一种无线环境参数采集系统原型构建 [J]. 测控技术, 2007 10(26): 4—7.
- [29] 曾声奎, Pecht M 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 26(5): 626—632.
- [30] Byington C S, Romer M J, Galje T. Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems for Improved Condition-based Maintenance [J]. IEEE, 2002 6: 2815—2824.
- [31] Brotherton T. Prognosis of Faults in Gas Turbine Engines [J]. IEEE, 2000 6: 163—171.
- [32] Romer M J, Kacprzynski G J, Orsagh R F. Assessment of Data and Knowledge Fusion Strategies for Prognostics and Health Management [J]. IEEE, 2001 6: 2979—2988.
- [33] 黄金国, 臧铁钢, 张淑猛, 等. 智能维修决策支持系统的研究 [J]. 机械工程师, 2003(12): 6—8.
- [34] 徐选华, 陈晓红. 基于 MultiAgent 的决策支持系统模型管理研究 [J]. 计算机工程与应用, 2005(13): 194—196.
- [35] 刘宇宏, 胡基平, 施朝健, 等. 船舶避碰多 Agent 决策支持系统的设计 [J]. 中国航海, 2006(4): 82—89.

(责任编辑: 尚彩娟)