

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J1803323

关于故障预测与健康管理技术的几点认识^{*}

年夫顺

(中国电子科技集团有限公司第四十一研究所 电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

摘要:介绍了故障预测与健康管理技术(PHM)基本概念与内涵,回顾了国外飞机发动机、固定翼飞机、直升机、航天飞行器、舰船、车辆和轨道交通等设备 PHM 技术发展历程及发展现状,分析了我国 PHM 技术的发展现状及存在的问题,预测了未来发展方向和应用领域。梳理了故障预测与健康管理技术体系架构,介绍了故障模型、状态监测、数据处理、综合诊断、健康管理、维修决策和后勤支援信息系统等关键技术,最后给出了我国发展 PHM 技术的意见和建议。

关键词: 飞行器;故障诊断;故障预测;健康管理;维修保障

中图分类号: TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4099

Viewpoints about the prognostic and health management

Nian Fushun

(The Key Laboratory of Electronic Test & Measurement Technology of the 41st Institute of China
Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: This paper introduces the basic concept and content of the prognostic and health management (PHM), and briefly reviews the overseas development history and current development status of the PHM in airplane engine, helicopter, fixed wing aircraft, spacecraft, naval vessel, vehicle and railway transport, and etc. The current development situation and problems of domestic research on the PHM is analyzed and the development direction is expected. The architecture of the PHM is summarized and the key technologies are described for fault model, condition monitoring, data processing, comprehensive diagnosis, health management, maintenance decision and logistic support information system. Finally some opinions and suggestions for promotion of the PHM in China are presented.

Keywords: aircraft; fault diagnosis; prognostic; health management; maintenance support

0 引言

故障预测与健康管理(prognostic and health management, PHM)技术是利用大量状态监测数据和信息,借助各种故障模型和人工智能算法,监测、诊断、预测和管理设备健康状态的技术,通过预测故障隐患和可靠工作寿命,提高设备安全性,最大限度地降低故障影响,避免机毁人亡重大事故发生;通过科学评估设备健康状态,自动生成设备维修规划和维修策略,提高设备的维修保障效率,降低维修保障费用。最终目的是实现从“事后维修”和“定期维修”到“视情维修”和“基于状态的维

修”的转变,实现设备自主保障。

PHM 技术代表了一种维护策略和概念上的转变,从传统基于传感器的故障诊断转变为基于智能系统的故障预测和监控,建立机内与机外一体的、前方与后方一体的、数据畅通的信息系统,人工智能算法和大数据的应用,增强了设备可靠工作的预测能力,借助 PHM 故障预测能力,可识别和管理故障发生、规划维修和供应保障^[1-2]。PHM 技术主要目的是提高系统安全性、完好性和任务成功性,降低使用与保障费用^[3],从而以较少的投入,实现基于状态的维护和自主式保障,为在准确的时间、对准确的部位、进行准确而主动的维修保障与控制活动提供了技术基础。

收稿日期:2018-03 Received Date: 2018-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61727804)项目资助

1 作用与地位

航空与航天飞行器、舰船、装甲车辆以及工业领域大型机电设备都属于复杂系统,基于复杂系统可靠性、安全性、经济性考虑,PHM 技术得到越来越多的重视和应用。PHM 技术已成功地应用于固定翼飞机、直升机和无人机等航空飞行器,航空飞行器因其造价高和保障费用高昂,重复使用飞行频次高,易发生机毁人亡的重大事故,对安全性和可保障性等具有很高的要求,对 PHM 技术需求极为迫切。其次是卫星、飞船和空间站等航天飞行器长期无人值守,要求具有状态监测、故障诊断和预测等能力,进一步实现系统的自主修复和长期高可靠运行。装甲车辆、汽车、火车等陆地各种车辆,以及水面舰船和水下潜航器等设备,对安全性要求及需求的迫切程度都低于航空与航天飞行器,但从提高设备维护保障能力、降低保障费用的角度看,也需要适度发展 PHM 技术。风力、水力和火力发电设备,以及桥梁、隧道、游乐设施等基础设施,都需要用现代信息化手段来提升安全性,用现代智能化方法来实现科学管理,降低维护维修保障费用,PHM 技术具有广阔的发展前景和巨大的市场潜力。

1.1 PHM 技术是改变传统维修保障方式的新理念

我国现行的三级维修保障方式,采用故障修复和定时维修两种方式,设备一旦出现故障,往往采取停机修复,所有的维修保障措施都是基于故障的被动补救措施;而对于定期维修,不论设备实际工作状态好坏,按照既定的维修时间和维修策略,定期地进行日常维护以及小修、中修和大修,存在着维修时间长、维修成本高、针对性差等问题。采用 PHM 技术之后,可以改变传统的维修保障方式,用先进的维修保障理念来提高设备的维修保障效率,实现从“事后维修”到“视情维修”的转变,从“定期维修”到“基于状态的维修”的转变,使设备维修保障方式向更科学、更有效的方向发展。

1.2 PHM 技术是提高设备安全性的重要手段

随着现代航空航天飞行器、舰船、车辆等设备的信息化程度不断提高,设备的复杂程度越来越高,发生故障的概率也越来越大,故障隔离定位和修复越来越困难,特别是航空和航天飞行器,一旦发生故障,将造成机毁人亡的重大事故。传统的地面检测、定期维修、事后修复的维修保障方式,不能提前预知设备使用寿命,不能第一时间获知故障发生概率,不能提前采取故障规避措施,已不能满足现代机电一体化复杂设备的发展需要,严重影响了设备的可用性,降低了设备的作战效能。PHM 技术可以预测重要和关键的零部件的可靠工作寿命,通过状态监测可以提前发现异常状态,科学评估设备健康状态,预测故

障发生概率,对提高设备安全性、避免重大事故发生有重要意义。国外对 PHM 技术跟踪研究表明,自从 20 世纪 90 年代以来,随着设备健康监测系统的应用,有效增强了设备的可靠性,平均故障间隔时间(MTBF)有了较大幅度的增长,事故率呈明显下降趋势。

1.3 PHM 技术是提高设备完好性的重要手段

目前航空航天飞行器、舰船和车辆等复杂设备完好性指标的统计分析,主要考虑设备是否存在显性故障、能否投入实际使用两个重要因素,而设备存在的故障隐患、关键性能指标下降的软故障、可靠工作的剩余寿命等重要因素严重制约了设备的完好性,但传统的设备完好性统计方法都无法考虑这些因素。设备 PHM 技术可以实时监测设备的运行状态,通过运行状态可以揭示故障隐患,监视关键性能指标是否下降,预测剩余寿命,可以准确地反映设备健康状态,更加全面真实地反映设备的完好特性。PHM 技术的实施,更深层次地揭示设备隐含的故障预兆,对提高设备完好性和作战效能都有十分重要的意义。

1.4 PHM 技术是降低维修保障成本的重要手段

据有关数据统计,大型设备维修保障费用约占全寿命周期费用的 24%,为了提高大型设备的维修保障水平,通常需配置大量的先进测试仪器和自动测试系统,在提高测试保障能力的同时,增加了维修保障人员和维修保障费用,降低了设备的机动性,而且维修保障仪器和测试系统的保障问题也凸现出来。PHM 技术的应用,测试与设备更加合理地融为一体,把一些机外测试保障能力转移到机内,使设备的使用人员和维修保障人员更加了解设备的健康状态,故障自主隔离能力进一步增强,维修保障策略自动生成,改变了传统的维修保障模式,装备维修保障仪器设备数量和规模大大减少,可有效地减少设备维修保障所需的仪器和系统、备品备件、人力及其培训等费用,从而降低设备全寿命周期的保障费用。

1.5 PHM 技术是实现自主保障的重要手段

现阶段我国设备维修保障工作主要依赖于设备研制单位,设备出现故障后,往往需要设备研制人员到现场实地维修保障,而且这种情况极为普遍。设备自主保障能力弱,与现代化设备的试验验证、运用维护、维修保障的需要极不相称。PHM 技术的应用,可以显著地改善设备的自主保障能力,不仅可以及时发现故障隐患,还可以预测关键零部件的可靠工作寿命,使装备维修保障由“事后保障”向“预知保障”,由“全面保障”向“定点保障”,由“被动保障”向“主动保障”转变,做到“兵马未动,保障先行”,在不增加一兵一卒的情况下,有效地提升了设备使用单位的自主保障能力。

2 国外 PHM 技术发展现状及应用

PHM 技术是从设备的可靠性分析、测试性设计和故障诊断技术逐步发展并演变过来的,经历了 20 世纪 50 年代的可靠性分析、60 年代的质量分析、70 年代的状态监控、80 年代以可靠性为中心的设备维修、90 年代的综合诊断,形成了现在的故障预测与健康管理技术体系。国外 PHM 技术研究主要集中于美国和英国等西方国家,美国和英国 PHM 技术研究起步早,技术基础较好,处于世界领先地位。PHM 技术已成为设备智能化发展的重要标志,广泛地应用于航空、航天、船舶、车辆以及大型工业设备等领域,并且在不同的应用领域,呈现出不同的技术特点和重点研究方向。

2.1 战斗机 PHM 发展现状

从提高飞机安全性角度出发,20 世纪 70 年代,嵌入式测试(BIT)实现了机内自检,用于 F/A-18 A/B 飞机,但早期虚警率很高,后来采用智能 BIT 技术,使虚警率大幅下降,故障覆盖率大幅上升。20 世纪 80 年代,智能 BIT 成功地用于航空发动机,实现了对航空发动机的状态监测,包括 GE 公司涡轴发动机 T700 状态监控系统 and F100 发动机监控系统。20 世纪 90 年代,美军第四代战斗机 F-22 采用了故障诊断与健康管理系统,实现了对航空发动机 F419 的状态监控,成为当时最先进的智能状态监视和故障诊断系统。21 世纪初,美军引入了基于状态的维护保障理念,通过对装备运行状态实施监测,根据实际状态确定最佳维修时机,以提高装备可用度和任务可靠性。

美国和英国等国家合作开发 F-35 联合攻击战斗机项目时,从飞机安全性和经济可承受性角度出发,提出了故障预测与健康管理的具体要求,并把状态监测范围从发动机扩大到机体结构、机电系统和机载电子设备,除状态监测与故障诊断功能外,增加了对飞机机体结构、发动机、机电系统故障预测与健康功能,构建了从关键零件、部件、模块到系统级状态监测体系,建立在关键零部件故障模式充分了解的基础上,开发了智能故障诊断和故障预测软件,通过对状态监测数据的融合、挖掘和分析,能够快速隔离故障、预测故障隐患和剩余寿命,PHM 技术在 F-35 飞机上实现了工程化应用。

美军 F-35 第四代战斗机首次使用 PHM,开发了覆盖飞机机体结构、动力传动系统、飞行控制系统、机电系统和机载电子设备的 PHM 系统,构建了机载 PHM 以及地面 PHM 系统体系架构,完善了 PHM 技术体系和应用体系,成为当今功能最完善、技术水平最高的故障预测与健康管理系统。PHM 技术在美军 F-35 上取得了巨大成功,成为全世界关注的焦点^[4-6],并引领了 PHM 技术发展。

美国空军提出的自主式后勤保障概念,一种先导式

保障,通过 PHM 系统对自身健康状况进行管理,实时预测装备各部件剩余寿命,并自动生成维修决策。针对 F-35 战斗机,构建了自主后勤信息系统(autonomic logistics information system, ALIS),通过联合分布式信息系统(joint distribution information system, JDIS),使机载 PHM 系统与地面维修检测网络紧密结合,形成了连接空中和地面的分布式网络化综合后勤保障体系,整个后勤保障系统有效运转,使维修保障信息可以实时地到达保障系统的任何地方。飞机在执行任务过程中,机载 PHM 应用嵌入式软件和传感器,实现状态监测、信息融合、特征提取、基于模型的故障推理、高水平验证、故障预测、健康管理,提供专门故障检测、隔离与预测的推理管理器,通过飞机上的通信链路与地面自动后勤供应系统紧密铰链。飞机在空中飞行时,机内故障诊断及预测系统自动将故障信息下传至地面,地面后勤保障系统准备好相应备件,飞机着陆后立即换上好的 LRU 或 LRM,从而大大提高了飞机的出勤率,提高飞行的安全性,减少全寿命周期的维修成本和费用。PHM 系统的成功应用,使美军 F-35 战斗机实现了自主式保障,提高了经济承受性。

2.2 民用飞机健康管理系统(AHM)发展现状

民用飞机对安全性有极高的要求,其次是降低运行成本和维修费用。民用飞机是一个很典型的复杂系统,由动力系统、飞控系统、航电系统等多个相对独立的系统组成,而各个系统又包含了多个子系统,每个子系统又由大量的部件和组件组成。民用飞机接口复杂,飞机上有模拟量、数字量和开关量,以及磁信号、低频信号、高频信号和光信号等各种信号类型,各个系统采用标准的 Arinc429 和 CAN 等总线接口,实现各系统之间各种信号的同步传输。民用飞机空地数据链路数据传输速率有限,民用飞机使用空地数据链与地面进行数据传输,而空地数据链带宽一般仅为 2.4 KB/s,严重制约了健康管理系统的的天数据传输。机载系统性能受限,考虑到运营成本问题,民用飞机要求机载设备重量轻、占用空间尽量小,就使机载系统的设备计算能力和存储容量受到限制。

最初民航飞机只有机内测试,依靠各系统和设备自身的电路和程序完成故障诊断与隔离。直到 20 世纪 90 年代,波音 777 飞机上首次使用了机载维护系统,将飞机上所有系统的故障信息集中采集与处理,并实现了故障的检测、定位、隔离等功能。进入 21 世纪,航空公司对飞机的安全性、维护性和经济性都提出了更高的要求,使得飞机的健康管理应运而生。

目前世界上两大飞机公司为争夺全球飞机市场,投入巨资开发飞机健康管理系统,并作为一大卖点,运用到新飞机上。美国波音公司开发了 AHM 系统,欧洲空客公司开发了飞机维护分析系统(AIRMAN),巴西航空公司开发了飞机健康分析和诊断系统(AHEAD),加拿大庞巴迪

公司开发了飞机故障诊断解决方案(ADS),用以帮助与民用飞机相关的维修、工程和飞行运行人员最有效地工作,提高效率与赢利能力。各个公司推出的健康管理系统名称各异,但目的和实质内容基本一致,为方便起见,把民用飞机健康管理系统简称为 AHM, AHM 是 PHM 技术在民用航空器上的具体应用^[7-8]。

民用飞机 AHM 主要由机载健康管理系统、地空通信系统和地面健康管理系统 3 部分组成,通过远程收集飞机数据,实现飞机数据的实时显示,地面系统人员通过对飞机数据的综合分析,准确判断飞机的健康状态,对那些可能影响飞机签派放行的故障,提早发现、找出原因、并给出最佳解决方案,从而优化排故维修工作,提高排故效率,达到提高飞机利用率,缩短飞机延误时间,减少飞机计划维修,降低运行成本,降低全寿命周期运营成本。

民用飞机 AHM 主要通过实时获取并评估机载各系统或子系统的工作状态数据,并与飞行员显示系统相关联。地面健康管理系统由地面监控管理、智能诊断、维修专家和远程客户终端等模块组成,对于机上监测系统无法处理的疑难复杂故障,可通过地空通信系统将故障信息传输到地面诊断监控中心,或借助于高级智能诊断系统和远程专家,对故障做出快速准确判断与处理。地空通信系统连接机载和地面健康管理系统,通过空地通信系统实现数据传输,空地数据传输的方式有两种,航后传输和实时传输,航后传输是指机载健康管理系统采集了状态数据,在飞机着陆之后再数据发送给地面系统,实时传输是指机载健康管理系统将采集到的状态数据实时地发送给地面,一般使用空地数据链的通信方式。

机载健康管理系统与地面健康管理系统有明确的任务分工,民用飞机空地通信带宽和机载设备性能受到限制,不能将所有的健康管理任务分配到机载系统。因此采用机载系统与地面系统分工协作的方式完成健康管理功能。机载系统完成参数采集,采用效率高、占用计算机资源少的算法,处理关键参数,并将处理结果通过空地数据链发送到地面系统。同时在机载设备上存储大量的非关键数据,在飞机落地后供地面系统用于健康评估与预测飞机运行状态。既可以最大限度满足实时监控要求,又可以避免所有数据实时传输造成的高昂代价。

AHM 经过几十年迅猛发展,在民用航空领域取得了突破性进展,构建了基于空地双向数据通信系统的实时监控与健康管理系统,实时收集飞机的状态信息,及时获取飞机健康状态,并对飞机的全寿命周期内的健康状态进行有效管理,提高了航空公司飞行安全余度和整体运行品质,同时提高了维修质量、降低了维修成本,为机队长期可靠性运营提供有力的支持。

2.3 直升机健康与使用监测系统(HUMS)发展现状

直升飞机的事故率和严重故障率都远高于固定翼飞

机,动力传动系统的故障或失效是造成直升机故障的主要因素。为了提高直升机的安全性,英国和美国多家公司针对军用和民用直升机动力传动系统,开发研制了健康与使用监控系统, HUMS 系统相当于直升机的 PHM 系统,实现了直升机飞参记录以及动力传动系统的状态监控、早期故障诊断及报警等功能。经过几十年的不断发展, HUMS 已成功地应用于直升机,并取得了巨大成功。

20 世纪 80 年代英国 Stewart Hughes 公司研制了 HUMS,并于 1991 年商业化应用于北海石油公司,成为第一代 HUMS。20 世纪 90 年代,英国国防部委托 Smiths 公司为“支努干”和“海王”直升机研制了通用型 HUMS,由机载和地面两个子系统组成,实现了飞行员语音和飞行数据记录仪数据的有效融合,成为第二代 HUMS。在第二代 HUMS 的基础上,增强了状态监测功能和原始数据存储量,提高了直升机飞行健康状态的评估能力,形成了第三代 HUMS,并成功地应用于英国皇家海军和空军“灰背隼”和“支努干”直升机。

20 世纪 90 年代,美国开始重视直升机 HUMS 系统发展,一些大公司与科研机构合作,助推了 HUMS 系统发展到第四代,诊断功能基本覆盖全机核心分系统。美国海军与古德里奇公司合作,开发了综合机械诊断与健康管理系统(IMD-HUMS),飞行过程中收集状态信息,飞行结束时将数据传送给地面计算机系统作处理与分析,并据此确定应采取的维修活动,显著改进维修规划,改善了机队战备完好性,使飞机使用性能达到最佳。IMD-HUMS 系统解决了“黑鹰”直升机疲劳寿命跟踪问题。“黑鹰”直升机 HUMS 主要功能如下:1)实时监控直升机健康与使用状态,显著提高飞行安全性和可靠性,避免事故发生;2)使定期维修变为视情维修,充分发挥部件潜力,简化维修过程,大幅减少直升机不定期维修和大修费用,降低后勤维护工作强度;3)自动指出故障类型、故障部位与故障程度,降低对维修人员维修经验、水平要求,提高直升机战备完好性与环境适应性。

直升机 HUMS 已在美国陆军 AH-64D 长弓阿帕奇武装直升机、OH-58D 轻型武装侦察直升机、CH-47D 中型运输直升机、MH-60T 黑鹰直升机等数千架不同种类的军用和民用直升机中得到推广应用,实现了飞参记录、使用监控、状态监控和早期故障诊断及报警功能。HUMS 在直升机上成功应用,解决了旋翼机械故障频发、故障不可预知的难题,提高了旋翼飞机安全性。HUMS 用于直升机故障预测与疲劳寿命跟踪,能够有效地提供故障信息并启动维修规划,实现了减少机械故障、避免机毁人亡重大事故的最初目的。现在则更多地关注降低使用维护成本,提高了直升机出勤率和任务完成率。HUMS 未来发展重点是故障预测,直升机故障预测技术尚需不断完善和熟化。

2.4 航天飞行器综合健康管理(IVHM)发展现状

最近几十年,空间科技竞争日益加剧,航天飞行活动不断增长,开发和利用空间技术已上升为国家发展战略,军用和民用商业航天活动异常活跃。航天科技快速发展,一方面要求减少航天器飞行的风险性,安全可靠地完成任务;另一方面要求削减操作和维护成本,提高其竞争力。航天飞行器的安全性、可靠性和经济性等越来越成为发展航天科技无法回避的现实问题。航天飞行任务是非常复杂的系统工程,实际上更是高风险任务,需要先进技术和严密的管理来执行发射及飞行任务。

为了减少航天飞行任务的风险和损失,美国等西方国家从20世纪50年代就开始航天飞行器故障诊断技术研究。从原来各分系统独立的故障诊断专家系统,向集系统状态监测、故障诊断和故障修复一体的飞行器综合健康管理(IVHM)方向发展^[9]。IVHM嵌入飞行器管理系统,集成和应用了先进的软件、传感器、智能诊断、数字通信、系统集成等技术,将飞行器各分系统故障监测、故障诊断、影响评估、故障预测和后勤保障等集成为飞行器健康状况综合管理系统,从系统级实现对飞行器健康评估与控制、信息收集与辅助决策管理,帮助操作人员完成飞行任务、减小风险和危害,提升飞行器航天管理系统的智能化水平。

美国航空航天局开发的IVHM是现代PHM技术在航天飞行器当中的具体应用,是PHM在航天领域的代名词。IVHM对航天飞行器进行状态监测和分析、故障诊断和预测,减少航天飞行器运行过程的各类意外风险,并用系统的故障分析方法替代各个不同分系统相对孤立的故障分析方法,强调从系统角度考虑问题,用系统工程方法,解决航天飞行器故障分析问题,提高了故障诊断的准确度。IVHM对监视参数、运行状态、当前环境、早先试验数据等各种数据信息进行综合利用,评估部件、分系统或系统的剩余使用寿命,预计未来健康状态,具有故障预测能力,最终目标是改进测试性和故障隔离能力,提高系统安全性和可靠性,降低寿命周期费用。

2.5 舰船综合状态评估系统(ICAS)发展现状

PHM技术在舰船的应用,提高了舰船的可靠性、抗毁性,增强了战备完好性,降低了全寿期周期成本。20世纪90年代,美国海军实施的ICAS系统能够通过监测、诊断、健康评估和管理,减少舰船意外故障和潜在损伤,改进系统可用性。与传统的手动收集分析数据相比,节省了大量的时间,为夺得战场先机创造了条件,避免了非预期的故障,降低了灾难性故障和潜在的二次设备损伤的发生,降低了非必要的“开盖检查”和定时维修,为故障分析、专家系统预警、列装舰船的远程协助、以可靠性为中心的维修分析提供了数据。美国海军ICAS已列装于从950吨扫雷舰到10万吨级核动力航母的所有现役

舰船的一级、二级系统上,累计用于100多艘舰船,在提升装备效能和任务完成能力方面取得了显著效果。

ICAS分为舰上、岸基和数据传输链路3个分系统。舰上分系统采集舰船及舰载设备状态数据,通过传输链路将状态监测数据从舰上分系统发送到岸基分系统,岸基分系统根据状态监测数据评估舰船健康状态,诊断并隔离故障,预测故障隐患和剩余寿命,并及时生成维修计划,并给出维修建议,再通过传输链路发回舰上分系统。ICAS通过性能监控、数据挖掘、故障预测和健康评估,可有效地提升舰船装备战斗力和战备完好性。

2.6 车辆健康管理系统(VHMS)发展现状

VHMS系统是提高车辆战斗力和效费比、降低全寿命周期费用的重要手段^[10]。美国陆军以重型旅战斗队为对象实施了VHMS计划,为主战坦克和步兵战车研制车辆健康诊断系统,通过VHMS来监控、探测、隔离车辆中柴油发动机、传动装置、差速器、电源部件等现场可更换单元(LRU)故障,以提高装甲车辆的作战可用性,通过主动管理平台和健康状态监测,最大程度地提高装备战备完好率,提高故障诊断及预测能力,延长车队正常运行时间,促进维修体系从三级维修向二级维修转变,实现重型旅战斗队数字化、减少重型旅战斗队测试设备,降低不定期后勤对整体后勤和作战任务能力的影响,减少整体维修保障负担。美国陆军以轻型战术车辆为对象实施智能车辆健康管理系统(IVHMS),通过IVHMS监测液压系统、电力系统、机械系统等车辆关键分系统的故障,为了降低集成风险和全寿命周期费用,所有电子部件都采用商用货架产品,大幅度降低了美国陆军轻型战术车维修成本,通过及时发现故障车辆,保障了士兵生命安全和车辆战备完好率。

综上所述,美国和英国等国家已在PHM领域形成了比较成熟的体系架构,突破了不少PHM的重要关键技术,对于机体结构、动力传动和机电系统PHM技术研究,美国已取得了显著进展,技术已逐步成熟并开始走向工程应用,目前已经进入应用验证阶段,涌现出众多应用型系统和产品,已在航空航天飞行器、舰船、装甲车辆等大型装备当中得到推广应用,并且逐步推广应用于民用车辆、轨道交通、电力(风力、水力和火力发电设备和输变电设备)、桥梁、隧道、大型游乐设施等工业和民用基础设施。但是由于PHM技术研究涉及领域众多,目前仍有许多关键技术尚未完全成熟,对于电子设备,其故障机理和失效模型还有待深化研究,电子设备PHM技术现阶段以状态监测与故障检测为主,还难以实现故障预测能力,是未来PHM技术需要重点突破的应用领域。欧盟和美国都通过制定和实施完整的PHM技术发展计划,积极采取措施加速PHM技术发展,并逐步实现PHM各项关键技术熟化与应用。

3 我国 PHM 技术发展现状及存在问题

我国航空飞行器(包括军用飞机、民航飞机、直升机和无人机)和航天飞行器都提出了明确的 PHM 技术发展需求,有力地推动了我国 PHM 技术发展。但我国 PHM 技术发展还处于跟踪研究阶段,研究对象主要集中于航空与航天飞行器。目前我国大型装备和基础设施普遍采用了实时状态监测技术,解决了故障诊断与故障预测的数据源头问题,基于状态监测数据的故障诊断技术开始发挥作用,而故障预测技术主要集中于轴承、齿轮、液压泵、发动机叶片等关键部件,取得了一些研究成果,并在部分设备上得到了局部验证。对于大型装备和复杂系统,系统性故障预测技术尚未达到实用阶段,部分研究成果已在飞机和直升机等大型装备上得到应用验证,为 PHM 工程实施积累了一定经验。

3.1 我国 PHM 技术发展现状

20 世纪 70 年代以前,我国一直沿用传统的经验维修办法,用维修检测人员的经验来确定检查时间和内容,按照定期维修规定的时间和内容实施维修检测,早期故障诊断主要依靠维修人员的观察、触摸、听声音等感受,来判断设备运行状态并确定故障位置。20 世纪 70 年代我国开始采用传感器来监测设备运行状态,并辅助于基于原位检测和无损探伤的故障诊断,实施了以材料机械性能检测和寿命分析为重点的维修改革,使飞机 70% 检查项目实现了原位检测,定检工时缩短一半。20 世纪 80~90 年代,随着故障诊断、神经网络、模糊推理和智能诊断方法的不断发展,在飞机动力、飞控、电传操纵、起落构件和供电电源等系统实施了状态监测,依据状态监测数据实施故障隔离与定位,故障诊断与维修效果明显改善。进入 21 世纪之后,航空飞行器使用更加完善的状态检测系统,人工智能算法大量用于故障诊断与故障预测,并有不少智能化与综合化测试系统和便携式维修检测设备投入实际应用,使状态监测和故障诊断能力大幅提升,少数关键零部件也实施了故障预测。目前我国故障预测与健康管理体系研究已进入第四个五年规划,在故障预测体系架构、故障模型、故障预测方法、PHM 系统集成等方面都取得了一些研究成果,不少研究成果已经得到不同程度的工程应用。

1) 状态监测与嵌入式测试技术日趋成熟

随着芯片物理集成度的不断提高,片上系统(SOC)逐渐成为嵌入式系统的核心硬件,同时嵌入式操作系统已成熟,为状态监测技术奠定了技术基础。经过四个五年计划的发展,在国家有关计划的支持下,状态监测与嵌入式测试技术取得了重要进展,引入智能传感和智能化嵌入式测试技术之后,克服了早期虚警率高的痼疾,进一

步增强了状态感知能力,使状态监测功能更加丰富、资源占有率更低、可靠性更高。

状态监测技术与便携式维修检测设备、自动测试与故障诊断系统的配套使用,构建了与维修保障体系相适应的机内测试、原位测试、离位测试等层次化的测试装备体系。种种迹象表明,机外测试能力(基层级测试仪器、中继级和基地级测试系统)正不断地转移到机内嵌入式测试,并成为装备内部状态监测、故障诊断与故障预测的关键核心。

针对雷达、移动通信、卫星导航与卫星通信等电子设备嵌入式测试与测试性设计验证评估的需要,重点突破芯片级、电路板级、微波模块级和系统级嵌入式测试与测试性设计验证评估技术,构建层次化的装备状态信息获取与评估技术体系结构,使芯片级、电路板级和微波模块级嵌入式测试开发环境与验证评估平台达到实用化水平,系统级测试性设计开发环境与验证评估平台工程化水平进一步提高,具备推广应用的条件和基础。

测试性设计与仿真软件已达到实用化,并且在重点装备测试性设计当中得到推广应用。自主开发的系统级可测试性设计软件平台,成功地应用于相控阵雷达测试性设计,完成了相控阵雷达嵌入式测试与测试性设计验证评估技术的综合集成,进一步提升雷达嵌入式测试与测试性设计及验证评估技术工程化和实用化水平,达到了用户提出的雷达测试性指标要求,故障隔离率比以往提高 10% 以上,软件性能不低于国外同类软件,具备推广应用条件。

2) 故障诊断技术已有较好发展基础

随着信息化技术不断发展,不论是武器装备还是民用设备,信息化程度都有大幅提升,复杂程度呈指数增长。经过几个五年计划的发展,在国家有关计划的支持下,故障诊断技术取得重要进展。

在电路板故障诊断方面,一般组合逻辑和时序电路的数字电路故障诊断方法已成熟,含有大规模数字集成电路(CPU、DSP、FPGA 和存储器)的数字电路故障诊断有一定技术基础,数字电路故障仿真软件取得重要进展,在实用化方面仍需完善;模拟电路、数模混合电路和微波电路故障诊断技术尚处于算法研究阶段,关键技术尚未突破,要达到实用化还需要若干年的持续攻关。

在系统级故障诊断方面,构建了层次化的故障诊断体系架构,依赖于层次化的状态监测体系,初步实现了从芯片、部件、模块到整机系统的状态监测数据的上传与控制命令的下达,形成了基于人工智能诊断算法的故障推理机制,故障隔离可以定位于现场可更换单元或内场可更换单元。

在机外故障诊断方面,基于交互式电子维修手册的

故障诊断关键技术取得突破,与机内嵌入式测试技术配合使用,在交互式电子维修手册的指导下,实现了系统级故障诊断,可进一步隔离故障到现场可更换单元,甚至隔离故障到内场可更换单元,显著地提高了设备的完好性和出勤率,降低了维护与维修保障费用。

在重点装备示范验证方面,针对雷达、移动通信、卫星导航等电子设备故障诊断需要,研究复杂电子系统故障模式分析与综合诊断方法,重点突破电路板、微波模块和系统级故障诊断技术,使高速数字电路板、模拟电路板、微波多功能模块故障诊断达到实用化,系统级故障诊断技术得到工程应用。

在综合诊断方面,针对武器装备全寿命周期技术保障的要求,开展了设备信息、工程信息、测试信息和故障诊断信息综合集成技术研究,突破了综合诊断系统技术,完成了全寿命周期综合诊断系统架构的构建,打通了连接研制、生产、使用单位的综合信息通道,为实现从设计、试验、生产到使用和维修的全寿命周期纵向测试集成奠定了技术基础,可充分利用装备全寿命周期各阶段测试和诊断资源,降低使用与维修保障费用,综合诊断技术有望解决装备系统级故障诊断问题,并且是未来发展方向。

3) 故障预测技术日益完善

为了实现装备保障模式由被动反应式保障向主动预防式保障的转变,在过去的几个五年发展计划当中,PHM技术都是作为发展重点,除了重点资助关键核心零部件故障模式和故障机理研究外,还加强了机体结构、动力传动系统、机电系统、电源系统等设备系统级故障预测与健康管理系统体系架构的研究,构建了智能化与网络化的实时故障诊断与故障预测系统,在执行任务同时,实现了故障监测、预测和保障方案实时决策任务。

针对军用和民航飞机、直升机、无人机和卫星等装备自主维修保障的需要,突破了大型装备平台运行状态信息获取与信息融合、故障预测与健康管理等关键技术,完成了关键零部件的故障模式识别与故障仿真、故障传播机理、故障演化规律、故障关键特征参数提取等技术研究,搭建了液压系统故障预测模拟试验台,完成了直升机关键部件设计验证。装备故障预测与健康管理技术开发与验证工具达到实用化,为故障预测与健康保障奠定了技术基础。

故障预测技术发展方兴未艾,机体结构、机械动力传动与机电系统故障预测与健康保障技术日益完善,但电子设备故障预测理论和技术仍是研究难点,未来在国家有关研究计划当中,仍需加大电子设备故障预测技术研究力度,希望取得重大突破和重要进展。

3.2 我国 PHM 技术发展存在的主要问题

目前我国航空和航天飞行器 PHM 技术已经取得了一些研究成果,并在部分设备上得到了局部验证,一些大

型装备实施了 PHM 工程,积累了一定经验。但综合各方面情况看,我国 PHM 技术基础还比较薄弱,研究对象覆盖面较窄,研究方法主要以仿真建模为主,基于试验数据的建模方法研究深度不够,在构建状态监测体系、故障预测模型、信息融合与数据挖掘等方面还缺乏实践经验,离大范围工程应用还有较大差距,难以满足大型设备和重点工程对 PHM 技术的需求。主要存在以下几个问题。

1) 对 PHM 作用地位与应用范围的认识还存在误区

早期 PHM 都是用于动力传动系统,类似于发动机、直升机旋翼、液压系统等具有连续变化规律的耗损机构,通过传感器获得工作状态,通过监测状态参数发展变化,预测使用寿命,以及可能发生的故障。随着 PHM 在国外的成功应用,PHM 似乎成了嵌入式测试、故障诊断与故障预测的代名词,似乎成了现代设备维修保障的“灵丹妙药”,在宣传与认识方面有夸大和炒作的成分。我国不少科研与工程应用单位对 PHM 技术的复杂性认识不足,趋于表面化和简单化,实际情况与理想相去甚远,目前对规律性很强的机械传动系统故障预测仍存在较大技术风险,而对于电子设备根本谈不上故障预测,只能实现状态监测和健康保障功能。

2) 对关键零部件失效模型和数据积累不够

关键零部件失效模型与故障机理是 PHM 的基础,由于设备种类较多,系统构成极为复杂,不同零部件故障机理和失效模型相差很大,复杂系统故障演变规律难以掌握,目前对失效模型和故障机理的研究只是“冰山一角”,任重而道远。现阶段不少单位都把精力用于 PHM 体系结构研究与系统集成上,只关注系统级 PHM 问题,只注重于数据应用,却忽视了数据来源与积累。只有少数单位关注模块级和零部件级 PHM 问题,脚踏实地做零部件级 PHM 问题研究,主要是因为零部件故障模式与机理研究需要大量的经费投入和长期的试验数据积累。很多关键零部件的故障模式和故障机理尚未探明,就匆忙建立系统级 PHM,类似于“在沙滩上建高楼大厦”,缺乏坚实的基础。

3) 设备状态监测手段较差

状态监测是实现 PHM 技术的前提,是装备健康管理的“温度计”和“报警器”,是装备故障预测的“触发器”,是故障预测的“初始值”。非电量传感器是状态监测的关键器件,涉及的品种多,要求的指标高,我国现有传感器不论是数量还是质量上都难以满足 PHM 发展需要,尚未引起相关专业的关注和重视。测试性设计是设备状态监测的重要保障,在用设备测试性水平较低,在研设备测试性水平也有待于进一步提高,必须引起足够重视。如果没有完善的状态监测作为支撑,就有可能漏过不易察觉的故障隐患,故障诊断与故障预测难以实现,甚至出现漏报和误报情况。

4) 缺乏 PHM 技术集成与验证经验

PHM 系统是一个复杂的系统工程,对于不同系统以及同一系统不同设备或部件,PHM 技术所面临的问题、故障诊断与预测方法也千差万别,必须用系统工程的方法来解决 PHM 的工程应用问题。目前我国对复杂系统 PHM 技术攻关、故障演化规律研究、故障模型验证等工作还有待加强,对于 PHM 技术与指标验证,特别是模型构建和模型验证工作,需要大量的试验支撑,必须扎实做好验证工作,为系统集成积累经验。目前我国 PHM 技术集成试验与验证工作投入严重不足,特别是大型设备和重点工程,整机单位往往把集成重点放到技术指标的实现上,留给 PHM 系统集成的时间较少,甚至缺少必要的试验条件和验证环境。如果不能充分地掌握故障发生机理和演变规律,不能充分地验证关键零部件与模块级、设备级、系统级 PHM 技术和方法,就难以实现 PHM 技术与设备的有效融合。

4 未来 PHM 技术发展趋势及应用预测

目前 PHM 技术尚处于发展的初级阶段,主要解决状态监测和系统级故障诊断问题,构建了层次化状态监测体系和层次化的故障诊断架构,但系统级故障预测技术尚未完全掌握,正处于关键核心部件故障预测技术研究阶段,基本掌握了全寿命周期的健康管理方式方法,未来 PHM 技术发展向夯实基础、构建体系方向发展。目前 PHM 技术已应用于军用飞机、民航飞机、直升机和无人机等航空飞行器,未来发展将进一步拓展应用领域到航天飞行器^[9]、舰船、装甲车辆^[10]、导弹、轨道交通^[11-13]、电力系统(风力、水力和火力发电设备、输变电设备)^[14-20]、工业机床、隧道、桥梁等工业领域,以及大型游乐设施,未来应用潜力巨大。

4.1 未来 PHM 技术发展趋势

依据 PHM 技术的任务与使命,参考 PHM 技术发展路线,从状态监测、故障诊断、故障预测与健康管理 4 个方面预测未来 PHM 技术发展趋势,如图 1 所示。

1) 重点构建完善的状态监测技术体系,主要解决状态监测优化设计与状态感知传感器最优布设问题,未来 5~10 年,将建成基于智能传感网络的状态监测技术体系,状态监测传感器及数据采集硬件将实现标准化、系列化、模块化发展,状态监测优化设计软件与集成软件平台将达到实用化,状态监测系统集成将采用即插即用的任意组合模式,为故障诊断和故障预测奠定技术基础。

2) 重点发展基于人工智能的故障诊断技术,主要解决故障隔离与定位的准确性、故障诊断覆盖性等问题,未来 5~10 年,充分利用状态监测大数据,利用人工智能研究成果,故障诊断算法标准化和程序化,实现多算法联合

诊断与智能诊断,提高故障诊断技术水平,实现故障自诊断与自修复。

3) 重点发展基于人工智能的故障预测技术,主要解决故障预测与剩余寿命预测的难题,未来 5~10 年,利用大量实验数据,借助人工智能科研成果,通过自学习准确掌握故障演化规律,结合状态监测数据,实现退化性故障准确预测,并有望解决随机性故障的准确预测难题。

4) 重点发展基于状态的健康管理技术,主要解决设备健康状态评估难题,未来 5~10 年,不但能实施设备的“病态”准确诊断,而且还可以提前预测设备是否处于“亚健康”状态,改变传统的维修保障模式,根据装备实际状态来确定维修检测计划,实现从定期维修、事后维修到基于状态的维修和视情维修的转变,最终实现自主管理、自主维修与自主保障。

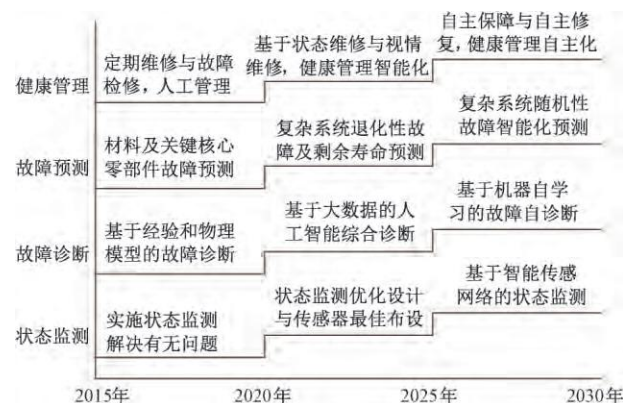


图1 未来 PHM 技术发展预测

Fig. 1 Future development on the PHM

4.2 未来 PHM 技术应用前景预测

现阶段 PHM 技术主要应用于航空航天领域,重点解决飞机、直升机、卫星和飞船等安全性问题,防止重大事故发生,关注的重点是安全性问题。随着 PHM 技术与普及,未来应用领域更加广泛,从航空航天和军事领域逐步拓展到民用技术领域,除了关注安全性问题,还要关注运行成本和经济指标,未来民用领域 PHM 技术应用潜力巨大,按照机体结构、动力传动系统、机电系统和电子系统 4 个方面,分别对 PHM 技术应用前景进行了预测与分析,如图 2 所示。

1) 重点发展基于金属材料的机体结构故障预测技术,重点解决航空与航天装备故障预测问题,并将科研成果逐步推广至舰船、潜艇和装甲车辆等武器装备,在未来 5~10 年,PHM 技术将从航空航天和军事装备领域,进入工业系统和重要基础设施领域,主要包括压力容器、轨道交通、隧道、桥梁、大型游乐设施等基础设施,机体结构 PHM 研究的材料也从金属材料拓展到复合材料,以及其他材料和结构形式。

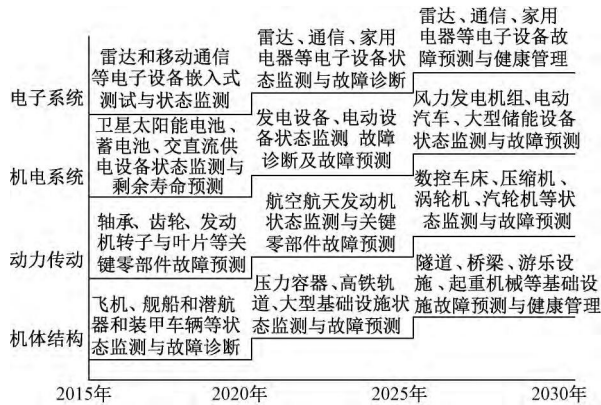


图2 未来 PHM 技术应用前景预测

Fig. 2 Future application prospect on the PHM

2) 重点发展以机械装备为主的动力传动系统 PHM 技术,应用领域从现在的轴承、齿轮、发动机转子与叶片等关键零件,拓展到整个发动机、涡轮机、汽轮机、压缩机等动力传统系统的故障预测与健康管理,未来 5~10 年,动力传动系统将具有完善的状态监测体系,实现故障自主定位和故障提前预警。

3) 重点发展机电一体化系统 PHM 技术,应用领域将从航天器太阳能电池、蓄电池、大功率交直流供电设备,逐步推展到发电设备和电动设备,在未来 5~10 年,风力发电、水力发电和火力发电、电动汽车、大型储能设备、精密机械加工设备等机电设备将全面采用 PHM 技术,实现故障自主诊断、故障隐患提前预知和可靠寿命准确预测。

4) 重点发展电子系统故障诊断技术,电子系统故障模式、故障机理、故障演化规律等基础理论尚未完全掌握,故障预测缺乏必要的理论基础,未来 5~10 年,电子系统状态监测与故障诊断技术将达到实用化,并在工程应用当中全面展开,但电子系统故障预测技术应用前景仍不明朗,存在较大风险,首先必须解决电子系统故障能否预测的问题,电子系统故障是否有规律可循,取决于未来电子系统故障预测技术的研究进展和技术成熟度。

5 体系架构与发展重点

故障预测与健康管理技术以设备故障机理和失效模型为基础,以先进的传感技术为状态监测和信息获取手段,充分利用大数据和人工智能研究成果,研究故障诊断与预测方法,实现设备故障和可靠工作剩余寿命预测,科学评价设备健康状态。

5.1 体系架构

PHM 技术主要有状态监测、故障诊断和故障预测 3 个不同的层级,如图 3 所示。随着层级的提升,可有效

地提高设备的安全性和自主保障能力,降低设备的维修保障费用和事故率。

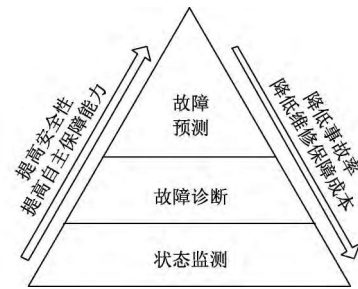


图3 故障预测与健康管理技术层级

Fig. 3 The hierarchy chart of the PHM

对于不同的应用领域和不同的设备,对 PHM 技术的需求不完全一样,状态监测是基本需求,是故障诊断与故障预测的基础,为故障诊断与故障预测提供必要的状态信息。故障诊断是利用状态监测数据来隔离故障、分析故障原因,为快速查找故障和修复故障服务,建立在 PHM 之上的故障诊断不同于传统的故障诊断方法,前提是设备必须具有良好的状态监测能力。故障预测不仅需要状态监测数据,还需要故障演化机理和故障失效模式的支撑,故障预测与剩余寿命预测的准确程度取决于对设备故障模式全面分析程度和故障演化机理的掌握程度。不论是状态监测,还是故障诊断与故障预测,都是为设备健康状态科学管理服务的,最终实现设备维修保障服务现代化。

故障预测与健康管理系统是一个复杂系统^[21-23],概括起来主要由故障建模、状态监测、数据处理、综合诊断、健康管理、维修决策等关键技术组成,故障预测与健康管理技术体系架构如图 4 所示。

PHM 系统是一个典型的信息系统,或者是一个典型的数据交换与数据应用系统,状态监测相当于 PHM 系统的“神经”感知系统,是数据源头,信息和数据相当于 PHM 系统流动的“血液”,所有的工作都是在综合信息自主保障系统的支撑下来完成的。综合信息自主保障系统连接机内 PHM 系统和机外 PHM 支持系统,机内 PHM 主要包括状态监测、故障诊断和故障自主推理等内容,机外 PHM 支持系统主要包括机外测试仪器设备、决策诊断数据库、维修决策与健康管理中心等。机内 PHM 与机外 PHM 系统相互支撑,共享数据与信息,提升故障诊断与故障预测能力和水平。

综合信息自主保障系统使设备使用单位及时了解设备运行状态,辅助设备故障诊断与故障预测,辅助设备维修管理,同时及时反馈故障信息,使设备研制单位能够及时了解设备运行状态,利用反馈信息,统计故障数据,涉及普遍性共性问题及时召回及时处理,及时改进设备设计,形成设备供应商与使用单位的信息闭环与信息共享。

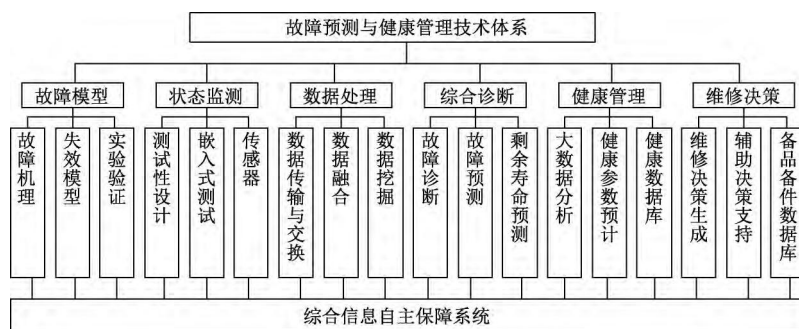


图4 故障预测与健康管理技术体系

Fig.4 The technical architecture of the PHM

5.2 关键技术与研究重点

故障预测与健康管理技术涉及材料失效机理、故障模型等基础理论研究,高性能传感与状态监测、数据库与信息系统集成等关键技术攻关,数据预处理、机器自学习、故障诊断与故障预测等基础算法研究,以及与应用背景关联性极强的健康状态评估与维修保障策划等统筹管理方法研究。

1) 故障建模技术

故障建模是实现故障预测与剩余寿命预测的关键,故障模型的准确程度决定了故障预测的准确度,主要解决故障“是什么”、“产生机理”和“演化规律”等问题。重点解决装备关键零件、部件、组件和模块的故障建模问题^[24-26],研究基础零部件故障机理与失效模型,通过试验验证与数据积累,获得基础零部件可靠工作的寿命曲线^[27-29];研究系统级故障传播、演化与发展规律,建立系统级故障诊断与预测模型,为复杂系统故障预测与剩余寿命预计奠定理论与方法基础。

2) 状态监测与测试性设计技术

研究设备运行状态监测点最优布设问题,以最少的资源、最低的成本、最成熟的技术,准确获得设备完备的实时运行数据,主要解决“怎么测”和“测什么”的问题。主要利用非电量传感器及信号调理技术,获取机体结构、动力传动、机电系统等实际运行状态的实时监测数据;以及利用电子系统嵌入式测试技术,建立芯片级、电路板级、模块级、设备级和系统级层次化^[30-31]的嵌入式测试技术体系,获取电子设备实际运行状态的监测数据,为设备的故障诊断、健康管理和维修决策提供真实有效的数据支撑。

3) 数据融合与数据挖掘技术

研究状态监测数据预处理技术,对传感器和嵌入式测试数据进行数字化处理,主要解决“数据格式统一”、“数据交换”与“数据融合”等问题。重点研究模数转换、噪声抑制、滤波、压缩等技术;研究数据融合和数据挖掘方法,以标准化的数据格式进行数据交换与数据存储,实

现从“数据”到“信息”的过滤。对于机械和动力传动系统,收集来自机体结构、推进系统、机电系统等大量传感器的数据,对大量的传感器监测数据进行处理和分析,以一种标准化的信息格式,实现信息获取和信息融合;对于电子系统,收集来自电路板与模块、设备、分系统和系统的嵌入式测试(BIT)数据,以一种标准化的格式,建立层次化的BIT信息数据库,为故障诊断、故障预测和健康管理提供必要的信息支援。

4) 故障诊断与预测技术

故障诊断以设备失效模型和故障失效机理分析为基础,利用状态监测数据,借助于智能诊断算法,对已出现故障的设备进行诊断,为故障隔离与故障检修奠定基础,解决“故障定位”问题。故障预测依据状态监测数据和故障模型,对各种数据和信息资源进行综合分析,通过基于模型的、基于特征的、基于知识的故障预测方法,预测设备未来可能发生故障的部位和概率,预测设备剩余工作寿命,解决“故障隐患预判”和“可靠性工作时间预估”问题,为维修决策提供支撑。对于机体结构、机械动力传动系统和机电系统,可实现系统级状态监测与故障诊断,以及关键零部件故障预测和剩余寿命预测。而对于电子系统,目前只能实现状态监测和故障诊断,故障预测与剩余寿命预测理论尚不成熟,必须解决关键核心器件故障失效模型问题^[32-40],电子设备才有可能实现故障预测。不论是机体结构、机械传动系统、机电系统,还是电子系统,系统级故障预测难度都非常大。

5) 健康状态管理技术

收集来自状态监测的设备运行状态数据并存储记录,研究监测数据变化和走势,评估设备实际运行状况,建立设备全寿命周期健康档案,为设备维修保障决策提供依据。健康管理依据监测数据与故障模型,对各种数据和信息进行综合分析,挖掘和提炼隐藏在大量状态监测数据和以往维修检测数据当中反映设备健康状态的各种信息,对设备健康状态进行评估,为维修决策提供支撑。

6) 维修保障策划与自动生成技术

根据设备状态监测数据和健康状态,采用基于状态的维修和视情维修理念,适时启动设备维修保障计划,主要解决维修保障计划和维修保障方案的自动生成问题,使设备维修保障更加及时、准确、安全、可靠和有效。PHM生成维修决策,并主导设备维修活动,依据故障预测和健康管理的评估结果,自动启动设备维修检测计划,科学合理地安排设备维修检测活动,科学有序地组织设备维修检测工作,主要解决“怎么维修”的问题,快速恢复原有工作状态。

7) 综合信息自主保障系统技术

建立连接设备机内状态监测、故障诊断与预测、健康管理,机外原位测试与诊断、专家支持库、备品备件库、设备研制生产工厂、设备使用单位的高速数据交换网络,共享各种数据资源,高效调动数据为设备维护保障服务,使设备后勤支援保障数据与保障信息畅通无阻,主要解决“数据交换”和“信息流动”的问题,为PHM实施提供网络和信息支撑。

6 措施与建议

PHM技术工程应用可以分成3个不同的层级:1) 状态监测,具备完备的测试性设计和良好的状态监测能力,实现基于状态监测数据的健康状态管理,属于基本要求;2) 故障诊断,利用状态监测数据实现故障主动隔离与健康状态自评估,属于中级要求;3) 故障预测与剩余寿命预测,利用状态监测数据与故障失效模型,揭示故障隐患,预测剩余工作寿命,属于高级要求。目前我国大部分设备还处于状态监测层级,离真正的故障预测还有相当大的差距。实际上,故障预测与健康管理系统是一个多学科融合的系统工程,涉及数学、物理学、化学、材料学、机械学、电工学、电子学等多个相关学科,必须用系统工程方法,通过联合攻关才能实现PHM最终目标。我国现阶段PHM技术发展必须面对现实,加强顶层谋划,从基础做起,以大型装备和重点工程需求为牵引,产学研用相结合,理论研究与工程实践相结合,推动PHM技术协调发展,促进PHM技术工程应用。为此建议:

6.1 加强PHM技术顶层设计与统筹规划

坚持“需求牵引与技术推动”相结合的发展原则,紧密围绕重点工程建设和重点项目发展对PHM技术的实际需求,借鉴国外PHM技术发展的成功经验,跟踪国外PHM技术发展,科学谋划我国PHM技术发展。PHM技术走军民融合发展之路,组织大工程大项目总体单位、设备研制单位和关键零部件研制单位,开展PHM技术顶层谋划工作,共同制定发展计划,构建PHM核心技术体系,完善相关技术标准,选准重点,逐

层突破,逐级发展。建议针对航空航天飞行器、舰船、车辆、轨道交通、电力、工业应用和大型基础设施等对PHM的需求,梳理PHM技术共性需求和个性需求,制定PHM技术发展规划,统一组织联合攻关,按照零件、部件、模块、设备、分系统、系统顺序,有序推进PHM技术发展,采用“先机电设备后电子设备”和“先状态监测与健康管理的故障诊断与故障预测”的发展思路,统一组织PHM技术发展与工程应用。

6.2 加强PHM技术基础研究

针对我国PHM技术基础薄弱的现实情况,坚持“打牢基础与拓展能力”相结合的发展原则,从零件、部件、组件和模块等设备基本构成要素入手,搞清故障机理,构建失效模型,再向设备、分系统和大系统扎实推进。建议在国家有关重大专项和重点专项中安排PHM技术研究,适当的时候建议安排“故障预测与健康管理技术”重点专项,加强研究与试验条件建设,强化设备状态监测、故障失效模型、数据挖掘与数据融合、故障诊断与预测方法、维修保障辅助决策等PHM共性基础技术研究与验证,充分利用人工智能和大数据的科研成果,提升PHM技术水平,夯实PHM技术可持续发展和工程应用的基础。

6.3 加强PHM技术集成验证与示范应用

坚持“研用结合与以用促研”的发展原则,以大型设备和重点工程PHM技术应用为牵引,加强用研双方有机结合,构建产学研用相结合的协同创新机制,合理分工,以用促研,扎实推进PHM技术发展与工程应用。建议以我国国产发动机、民航飞机、大型运输机、战斗机、直升机和无人机等航空飞行器为应用对象,组织相关重点工程和重大项目的总体单位、设备研制单位和关键零部件研制单位开展联合攻关,开展PHM技术演示验证工作,对我国PHM技术进行系统集成,做好PHM技术示范工程,为PHM技术在航天飞行器、舰船、汽车、高铁、电力等领域推广应用积累经验,并逐步拓展应用领域与范围。

参考文献

- [1] GINART A, BARIAS I, GOLDIN J, et al. Automated feature selection for embeddable prognostic and health monitoring (PHM) architectures [C]. IEEE Autotestcon, 2006: 195-201.
- [2] 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.
PENG Y, LIU D T, PENG X Y. A review: Prognostics and health management [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9
- [3] WANG W, PECHT M. Economic analysis of canary-

- based prognostics and health management [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (7) : 3077-3089.
- [4] 张宝珍,王萍,尤晨宇. 国外飞机预测与健康管理系统发展计划综述 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6) : 1-7.
ZHANG B ZH, WANG P, YOU CH Y. Overview of oversea prognostics and health management technologies development projects [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24 (6) : 1-7.
- [5] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理系统关键技术 [J]. 航空学报, 2014, 35 (6) : 1459-1472.
WANG SH P. Prognostics and health management key technology of aircraft airborne system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (6) : 1-7.
- [6] 李兴旺,汪慧云,沈勇,等. 飞机综合健康管理系统的 应用与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4) : 1069-1072.
LI X W, WANG H Y, SHEN Y, et al. Application and development of integrated vehicle health management system in aviation field [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23 (4) : 1069-1072.
- [7] 曹全新,杨融,刘子尧. 民用飞机健康管理技术研究 [J]. 航空电子技术, 2014, 45 (4) : 15-19.
CAO Q X, YANG R, LIU Z R. Prognostics and health management technical study for civil aircraft [J]. Avionics Technology, 2014, 45 (4) : 1069-1072.
- [8] 孙贤明,樊晓光,丛伟. 综合航电系统故障处理机制研究 [J]. 测试技术, 2016, 35 (10) : 146-149.
SUN X M, FAN X G, CONG W. Research on fault disposal mechanism of integrated modular avionics [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35 (10) : 146-149.
- [9] 李权,周兴社. 基于测控数据挖掘的航天器故障诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3) : 500-503.
LI Q, ZHOU X SH. Spacecraft fault diagnosis technology based on measurement and control data mining [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19 (3) : 500-503.
- [10] 程延伟,吕强,谢永成,等. 装甲车辆电源系统智能故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6) : 1410-1412, 1419.
CHEN Y W, LV Q, XIE Y CH, et al. Research on intelligent fault diagnosis method of armored vehicles power system [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19 (6) : 1410-1412, 1419.
- [11] 周晨程,李军. 城轨车辆电气柜故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10) : 23-26.
ZHOU CH CH, LI J. Method of electrical cabinet for urban rail vehicles [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25 (10) : 23-26.
- [12] 张永春. 机车制动系统实时监测与故障诊断专家系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (10) : 2615-2617.
ZHANG Y CH. Real-time monitoring and fault diagnosis expert system for locomotive braking system [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21 (10) : 2615-2617.
- [13] EKER O F, CAMCI F, GUCLU A, et al. A simple state based pognostic model for railway turnout systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (5) : 1718-1726.
- [14] 瞿昱,赖旭,朱建林. 网络化水电机组在线状态监测与故障诊断系统 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (1) : 68-71.
QU ZH, LAI X, ZHU J L. A network system of hydroelectric generating set on-line state monitoring and fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (1) : 68-71.
- [15] 杨苹,吴捷. 火电厂锅炉常见故障的数据挖掘诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 28 (7) : 696-701.
YANG P, WU J. Fault diagnosis for boilers in thermal power plant by data mining [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 28 (7) : 696-701.
- [16] 曹志彤,陈宏平,何国光. 电机故障诊断支持向量机 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (6) : 738-741.
CAO ZH T, CHEN H P, HE G G. Support vector machine for fault diagnosis of the rotor broken bars of IM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (6) : 738-741.
- [17] 项建新. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (6) : 568-571.
XIANG J X. A study of fault diagnosis in power transformer based on rough set theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24 (6) : 568-571.
- [18] 郑玉芳,马松龄. 基于电流分析法的电动机故障诊断虚拟仪器系统的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3) : 512-514.

- ZHENG Y F, MA S L. Development and research on virtual instrument system of motor's fault diagnosis based on current analysis [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(3): 512-514.
- [19] 陈铸华, 李晓. 电力系统故障诊断的多智能体粒子群化算法 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(8): 1753-1755, 1758.
- CHEN ZH H, LI X. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for power fault section estimation [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(8): 1753-1755, 1758.
- [20] 薛寒, 谢利理, 叶留义. 基于模糊推理的电机故障诊断专家系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 8-10.
- XUE H, XIE L L, YE L Y. Study of fuzzy fault diagnosis expert system in motor system [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(1): 8-10.
- [21] 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.
- ZHAO B ZH. Development and applications of integrated diagnostics, prognostics and health management technologies of abroad [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(5): 591-594.
- [22] 马飒飒, 陈国顺, 方兴桥. 复杂装备故障预测与健康管理系统初探 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 1-4.
- MA S S, CHEN G SH, FANG X Q. Research on prognostic and health management system of complex equipment [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(1): 1-4.
- [23] 邓宁, 宋森森, 羿昌宇, 等. 软件无线电系统综合诊断平台设计与实现 [J], 电子测量与仪器学报, 2016, 29(6): 968-974.
- DENG N, SONG S S, YI CH Y, et al. Design and implementation of a comprehensive diagnostic platform for software radio system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 29(6): 968-974.
- [24] 刘磊, 龙兵, 刘震. 两种多故障诊断算法的性能比较研究 [J], 电子测量与仪器学报, 2011, 25(1): 75-80.
- LIU L, LONG B, LIU ZH. Research on performance comparison of MFD algorithms [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(1): 75-80.
- [25] 马岚, 王厚军. 基于输出电压和电源电流协同分析的故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1872-1878.
- MA L, WANG H J. Fault diagnosis method based on output voltage and supply current collaborative analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1872-1878.
- [26] 谭天乐, 李平, 宋执环. 基于粗糙集的逻辑故障树方法及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(1): 18-22, 89.
- TAN T L, LI P, SONG ZH H. Rough set-based logical fault tree and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(1): 18-22, 89.
- [27] 景博, 杨洲, 张劼, 等. 故障预测与健康管理系统的验证与确认方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 23-27.
- JING B, YANG ZH, ZHANG J, et al. Review on validation and verification methods of PHM system [J]. Computer Engineering and Application, 2011, 47(21): 23-27.
- [28] 冯春庭, 李敏. 航空装备预测与健康管理系统的验证方法概述 [J]. 测试技术, 2017, 36(5): 139-143.
- FENG CH T, LI M. Overview on verification method of aviation equipment prognostic and health management [J]. Measurement & Testing Technology, 2017, 36(5): 139-143.
- [29] 邵帅, 刘柳, 钟季龙. 综合电子产品故障物理模型仿真分析与试验验证 [J]. 测试技术, 2016, 35(11): 141-145.
- SHAO SH, LIU L, ZHONG J L. Simulation Analysis and experimental verification on fault physics model electronic products [J]. Measurement & Testing Technology, 2016, 35(11): 141-145.
- [30] 谢永成, 董今朝, 李光升, 等. 机内测试技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 550-553.
- XIE Y CH, DONG J ZH, LI G SH, et al. Study of built-in test [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(3): 550-553.
- [31] 刘葆华. 电子装备层次化故障诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 297-299, 311.
- LIU B H. Research on technology of hierarchical fault diagnosis on electronic equipment [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(2): 297-299, 311.
- [32] CHUNG K H, SHEPHERD P R, EBERHARDT F, et al. Hierarchical fault diagnosis of analog integrated

- circuits [J]. IEEE Transaction on Circuit and System-I: Fundamental Theory and Application, 2001, 48 (8): 921-929.
- [33] 张登峰,王执铨,孙金生,等. 基于概率粗集理论的电路故障知识提取方法 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (5): 600-603.
- ZHANG D F, WANG ZH Q, SUN J SH, et al. Approach of fault diagnostic knowledge extraction based on probability rough sets [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (5): 600-603.
- [34] VICHARE N M, PECHT M. Prognostics and health management of electronics [J]. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, 2006, 29 (1): 209-222.
- [35] 金瑜,陈光踬,刘红. 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (9): 1600-1604.
- JIN Y, CHEN G J, LIU H. Fault diagnosis of analog circuit based on wavelet neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28 (9): 1600-1604.
- [36] VASAN A S S, LONG B, PECHT M. Diagnostics and prognostics method for analog electronic circuits [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (11): 5277-5291.
- [37] ZHOU J Y, TIAN S L, YANG C L, et al. Test generation algorithm for fault detection of analog circuits based on extreme learning machine [J]. Computational intelligence and Neuroscience, 2014, doi: 10.1155/2014/740838.
- [38] 兰京川,谢燕,谢永乐,等. 基于噪声估计的模拟电路故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (2): 203-210.
- LAN J CH, XIE Y, XIE Y L, et al. Analog circuit fault diagnosis method based on noise estimation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (2): 203-210.
- [39] 李旻,王彩利,龙兵,等. 多特征故障字典及其在模拟电路可测性分析中应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (3): 368-374.
- LI M, WANG C L, LONG B, et al. Multi-feature fault dictionary and its application in testability analysis for analog circuits [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (3): 368-374.
- [40] 龙兵,王彩利,高媛,等. 基于多特征模型模拟电路可测性指标分析方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (4): 914-919.
- LONG B, WANG C L, GAO Y, et al. A Testability index analysis method for analog circuits based on multi-feature model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (4): 914-919.

作者简介



年夫顺, 分别在 1983 年和 1989 年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位, 现为中国电子科技集团有限公司测试仪器首席科学家、中国电子科技集团有限公司第 41 研究所电子测试技术重点实验室主任, 主要研究方向为微波毫米波与太赫兹测试仪器和自动测试系统。

E-mail: nfwxmnk825@163.com

Nian Fushun received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Xian Jiaotong University in 1983 and 1989, respectively. Now he is the test and measurement instruments in China Electronics Technology Group Corporation, the director of Science and Technology on Electronics Test & Measurement Laboratory of the 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interests include microwave millimeterwave and terahertz test and measurement instruments and automatic test system.