

复杂装备故障预测 与健康管理技术

FUZA ZHUANGBEI GUZHANG YUCE
YU JIANKANG GUANLI JISHU

邵新杰 曹立军 田广 刘金华 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014012909

F406.4
04

复杂装备故障预测 与健康管理技术

邵新杰 曹立军 田广 刘金华 著



F406.4
04

国防工业出版社

·北京·



北航

C1699820

80821010

图书在版编目(CIP)数据

复杂装备故障预测与健康管理技术 / 邵新杰等著.
—北京:国防工业出版社,2013.12
ISBN 978-7-118-09141-0

I. ①复... II. ①邵... III. ①机电设备-故障
诊断 ②机电设备-设备管理 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309239 号



※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 10 字数 171 千字
2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

复杂装备在现代化工业中发挥着重要作用。一旦装备发生故障或健康状态劣化,则会严重影响生产效能和工作效率。因此,为了减少装备故障引发的严重的安全性和可靠性后果、缩短停机时间、降低维修费用、提高工作效率,复杂装备系统的“健康”问题越来越引起关注。

目前,为了预防装备故障发生或防止装备健康状态进一步劣化,定期维修是应用最普遍的一种预防性维修。定期维修适用于已知寿命分布规律且确有耗损期的装备或部件,这种维修方式在一定程度上预防了故障的发生,便于安排维修工作和组织备件存储与供应,但它不能充分利用装备的寿命,容易产生维修不足和维修过剩等情况。研究表明,大多数装备的运行寿命与其发生故障可能性之间的相关性越来越少,传统的定期维修方法已不能满足对装备实施精确维修的需求。

针对这些情况,基于状态的维修(Condition Based Maintenance, CBM)开始得到研究与应用,其后勤保障规模小、效率高、预知性好等优势开始显露头角,美军统计资料表明,如果投资1万~2万美元用于状态维修,每年将节省5万美元的费用。日本企业实施CBM后,设备故障率减少了大约75%,维修费用降低了25%~50%。CBM的研究与应用,同时推动了以CBM为基础的故障预测与健康管理(Prognostic and Health Management, PHM)技术的研究与发展。

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(事后维修),到主动预防(定期维修),再到事先预测(视情维修)和维修规划管理(信息化维修),其主要目的是降低使用与保障费用,提高装备系统安全性、战备完好性和任务成功性,实现基于状态的维修和自主式保障。PHM的两个主要功能是故障预测与健康状态管理。故障预测功能可预测故障发生的时间与部位,并确定设备剩余寿命,在发生灾难性事故之前能够及时预知,并采取必要的预防维修措施;健康状态管理则是根据诊

断/预测信息、可用维修资源和使用需求对维修活动作出的适当决策。

当前,在技术推动和现代设备管理理论发展的双重作用下,装备 PHM 技术的重要性大大增加。装备 PHM 是一种新型的维修与管理方式,它通过感知并充分使用状态监测与监控信息,对装备的工作状态、可靠性、寿命和故障进行预测,融合维修、使用和环境信息,结合规范的装备管理方法和业务流程,对维修活动进行科学规划和合理优化,对影响装备健康状态和剩余寿命的技术、管理和人为因素进行全过程控制。其重要基础是装备管理、基于状态的维修(CBM)、故障预测与健康管理(PHM)。但是,有效的装备故障预测与健康管理的范围,而是深入到装备的规范化、科学化和智能化管理之中,并且从传统的以“修”为主的思路转变到“修”“管”结合、重视“管理”的思路上来。

随着科学技术的快速发展,复杂装备在功能和性能提高的同时,由于组成环节和影响因素的增加,装备“健康”问题越来越复杂,也带来了装备可靠性、安全性、可用性和经济性等方面的一系列难题。本书是在提炼和吸收作者多年装备技术保障研究成果的基础上撰写而成的,以复杂装备为研究对象,在探讨装备故障预测与健康理论的基础上,重点研究复杂装备 PHM 技术、故障预测技术、电子装备 PHM 技术、健康管理技术、健康评估技术和 PHM 系统应用等内容,期望达到提高装备任务成功率、降低维修保障费用、缩短维修任务周期等目标,推动装备健康管理理论在复杂装备维修保障中的应用,有重要的现实意义和显著的军事、经济效益。

本书分为 8 章。第 1 章在总结 PHM 技术产生与发展历程和综述国内外研究现状的基础上,分析了在装备全寿命周期内实施 PHM 的必要性,并对目前存在的主要问题进行了分析。第 2 章剖析了 PHM 基本概念、主要功能、技术框架及关键技术,确定了本书的研究内容。第 3 章总结了复杂装备故障预测的特点,概括了基于数据驱动的预测方法、基于人工智能的预测方法、基于物理模型的预测方法、组合预测方法和电子装备故障预测方法,并指出现有预测方法用于故障预测存在的不足。第 4 章介绍了虚拟样机技术和基于虚拟样机的协同仿真技术,将虚拟样机技术引入故障预测领域,提出基于虚拟样机的预测知识获取机制。第 5 章在综述基于 HMM 的电子装备健康管理基础上,指出了电子装备故障预测的难点,总结了电子装备故障预测流程和状态特征分析与提取方

法,介绍了基于自回归模型、支持向量机和神经网络的电子装备故障预测方法。第6章构建了复杂装备健康管理体系,描述了复杂装备健康管理的基本内容,分析了多源数据融合和维修策略的选择,强调在复杂装备管理中实施全员全程健康管理的思想。第7章系统地研究了复杂装备状态评估的基本活动与理论机制,剖析了相关的基本概念与内涵,总结了健康状态量化过程与一般流程,介绍了常用的评估方法。第8章以无人机和轮式车辆 PHM 系统为例,说明了 PHM 系统的总体结构和关键技术,展望了 PHM 技术的发展趋势。

本书在撰写过程中参阅了许多参考文献,在此表示诚挚的谢意! 鉴于作者知识水平有限,书中不足之处在所难免,殷切希望读者指正!

著 者

2013 年 2 月

1.1 复杂装备健康管理的内涵和 PHM 的起源	1
1.2 PHM 的构成要素	2
1.2.1 国外研究进展	2
1.2.2 国内研究进展	3
1.4 设备健康存在的主要问题	12
第2章 PHM 基本理论	14
2.1 PHM 基本概念	14
2.1.1 基于状态的健康	14
2.1.2 故障预测与健康管理	15
2.1.3 以可靠性为中心的维修	15
2.2 PHM 主要功能	19
2.3 PHM 数学模型	20
2.4 PHM 关键技术	21
2.4.1 数据收集和可靠度应用技术	22
2.4.2 数据融合技术	23
2.4.3 故障预测技术	24
2.4.4 状态监测、健康评估和故障预测方法	24
2.4.5 信息融合和新的管理决策技术	25
2.4.6 接口技术	25
2.4.7 维修决策技术	25

目 录

第 1 章 PHM 技术概述	1
1.1 装备故障预测与健康管理技术的产生与发展	2
1.2 装备全寿命周期内实施 PHM 的必要性分析	4
1.3 PHM 的研究现状	4
1.3.1 国外的研究现状	5
1.3.2 国内的研究现状	9
1.4 现有技术存在的问题	12
第 2 章 PHM 基本理论	14
2.1 PHM 基本概念	14
2.1.1 基于状态的维修	14
2.1.2 故障预测与健康管理	15
2.1.3 以可靠性为中心的维修	15
2.2 PHM 主要功能	19
2.3 PHM 技术框架	20
2.4 PHM 关键技术	22
2.4.1 数据采集和传感器应用技术	22
2.4.2 数据传输技术	24
2.4.3 数据预处理技术	24
2.4.4 状态监测、健康评估和故障预测方法	24
2.4.5 数据融合和自动推理决策技术	25
2.4.6 接口技术	25
2.4.7 维修决策技术	25

第3章 故障预测基本理论	27
3.1 复杂装备故障预测的特点	28
3.1.1 复杂装备故障发生的特点	28
3.1.2 复杂装备故障的分类	29
3.2 基于数据驱动的预测方法	31
3.3 基于人工智能的预测方法	32
3.4 基于物理模型的预测方法	33
3.5 组合预测方法	33
3.6 电子装备故障预测	34
3.7 现有预测方法用于故障预测存在的不足	35
第4章 基于虚拟样机的故障预测技术	37
4.1 虚拟样机技术	37
4.2 基于虚拟样机的协同仿真技术	39
4.3 基于虚拟样机的预测知识获取机制	47
4.4 基于虚拟样机的故障仿真与预测技术	48
4.5 故障注入技术	50
4.6 VV&A 验证	55
第5章 电子装备 PHM 技术	57
5.1 基于 HMM 的电子装备健康管理研究	57
5.1.1 HMM 基本理论	58
5.1.2 电子装备 HMM 基本结构	63
5.1.3 基于 HMM 的健康管理原理	65
5.2 电子装备故障预测的难点	67
5.3 电子装备故障预测流程	68
5.4 电子装备状态特征的分析与提取	69
5.5 电子装备故障预测方法	72
5.5.1 基于自回归模型的故障预测方法	72

5.5.2	基于支持向量机的故障预测方法	74
5.5.3	基于神经网络的故障预测方法	75
第6章	复杂装备健康管理技术	77
6.1	复杂装备健康管理基本内容	77
6.1.1	基于SSM的复杂装备健康管理问题分析	77
6.1.2	复杂装备健康管理基本活动的CATWOE分析	79
6.1.3	复杂装备健康管理基本活动的概念模型	80
6.2	复杂装备故障预测与健康管理中的多源数据融合	81
6.2.1	故障状态信息	82
6.2.2	异常现象信息	82
6.2.3	使用环境信息	85
6.2.4	多源信息融合	85
6.3	复杂装备健康管理中维修策略的选择	87
6.3.1	按装备分类选择维修策略	87
6.3.2	按故障模式特征选择维修策略	88
6.4	复杂装备全员全程健康管理	89
6.4.1	装备全员全程健康管理的基本特性	90
6.4.2	装备全员全程健康管理的实施过程	91
第7章	复杂装备健康状态评估技术	94
7.1	装备健康状态评估的基本概念与内涵	96
7.2	装备技术状态与健康状态	98
7.3	健康状态评估的量化	100
7.4	健康状态评估的一般流程	101
7.4.1	健康状态评估准备阶段	101
7.4.2	健康状态评估实施阶段	111
7.4.3	健康状态评估分析与反馈阶段	113
7.5	常用的评估方法分析	113
7.5.1	健康状态评估的分类	114

7.5.2	常用的评估方法	115
7.6	基于灰色理论的健康状态评估技术	119
7.6.1	健康状态灰色聚类的基本原理	119
7.6.2	白化权函数的确定	120
7.7	复杂装备剩余寿命预测技术	122
7.7.1	常用的剩余寿命预测方法	124
7.7.2	基于状态信息的剩余寿命预测方法	126
第8章	PHM 系统应用	131
8.1	无人机 PHM 系统	131
8.1.1	总体结构	131
8.1.2	关键技术	133
8.2	轮式车辆 PHM 系统	134
8.2.1	总体结构	134
8.2.2	关键技术	135
8.2.3	主要功能	136
8.2.4	硬件系统	137
8.2.5	软件系统	137
8.3	PHM 技术发展趋势	139
参考文献	141

第 1 章 PHM 技术概述

随着各种大型复杂装备性能的不不断提高及系统组成的复杂性的不断增加,各种信息技术和智能技术被广泛应用其中,使复杂装备的可靠性、维修性、故障预测与诊断及维修保障等问题日渐突出。复杂装备在现代化工业中发挥着重要作用。一旦装备发生故障或健康状态劣化,则会严重影响生产效率。因此,为了减少装备故障引发的严重的安全性和可靠性后果,缩短停机时间,降低维修费用,提高工作效率,复杂装备系统的“健康”问题越来越引起关注。随着装备管理部门对复杂机电装备安全性、可靠性和经济性要求的不断提高,人们迫切需要实时监控装备的工作状态并了解其可靠性状况,准确评估装备的性能,并在此基础上准确定位、诊断并预测装备潜在故障或性能退化部位,及时进行必要的维修或替换,保证装备能够在预期寿命范围内完成特定功能,保障装备安全、可靠地运行。

同时,现代装备的采购费用和使用与保障(O&S)费用日益庞大,经济可承受性成为一个不可回避的问题。据美军统计数据显示,在武器装备的全寿命周期费用中,使用与保障费用占到了总费用的72%。据美国在X-34和X-37运载火箭研制过程中的统计数据表明,为保证航天飞机执行任务的成功,每个任务期内要耗费400万美元通过200人左右的工作小组来进行预防性维修工作。航空航天、国防部门、各军种以及其他各工业部门越来越不能承受如此巨大的财力、物力和人力耗费。美国20世纪90年代中期进行的国防采办改革及后继的相关大型项目研究中均将“经济可承受性”列为重点考虑因素。如目前由美国、英国以及其他国家军方合作开发的联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)项目中就明确提出“经济可承受性”是其四大目标之一。与使用保障费用相比,维修保障费用在技术上更具有可压缩性。故障预测与健康管理(Prognostic and Health Management, PHM)、基于状态的维修(CBM)、货架产品(COTS)、自主保障(AL)等都是压缩维修保障费用的重要手段。

装备健康管理源自于机内测试(Built In Test, BIT)和装备健康监测(Vehicle Health Monitoring, VHM)技术。随着监控技术的发展,健康监测理论从状态监控变为健康管理,出现了PHM、综合系统健康管理(Integrated System Health Management, ISHM)、健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System,

HUMS)等概念。近几年,美国国防部在 CBM 的基础上又提出了增强型 CBM (CBM plus, CBM +)的概念,进一步统一了 CBM、可靠性管理、自动保障与维修,目标是将装备系统的健康管理能力,以及装备投入使用后的状态监测、维修决策、寿命预测、后勤保障、成本控制等,进行一体化的统筹规划和设计。我国制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,以及“863”计划先进制造技术领域都将重大设备和产品的健康管理和寿命预测技术,作为前沿技术进行重点支持。

作为适应 21 世纪高技术战争的自主保障系统的重要基础,PHM 系统正在引起越来越多的重视。大量 PHM 技术应用于国防、航空和民用领域,PHM 可显著降低维修、使用和维护保障费用,提高复杂装备的可靠性和战斗力。PHM 关键技术研究及系统应用对维修保障向着信息化、智能化和数字化方向发展具有深远的影响。

当前,在技术推动和现代设备管理理论发展的双重作用下,装备故障预测与健康管理的的重要性大大增加,其基础是装备管理、CBM 和 PHM。但是,有效的装备故障预测与健康管理的不仅仅局限于状态监测和维修的范围,而是深入到装备的规范化、科学化和智能化管理之中,并且从传统的以“修”为主的思路转变到“修”“管”结合、重视“管理”的思路上来。

本书以复杂机电装备为研究对象,在探讨装备故障预测与健康管理理论的基础上,重点研究装备健康管理的体系结构、理论机制与关键技术方法等内容,期望达到提高装备任务成功率、降低全寿命周期维修保障费用、缩短维修任务周期等目标,推动装备故障预测与健康管理理论在复杂装备中的应用。

1.1 装备故障预测与健康管理技术的产生与发展

装备故障预测与健康管理技术是伴随着维修理论的发展而逐步发展成熟的。维修理论发展到现在,大致经历了修复性维修、预防性维修、CBM 三个重要的阶段。修复性维修完全不考虑装备的状态,当装备发生故障后才进行维修。定期维修是预防性维修的一种主要形式,在预防性维修工作类型中,操作人员监控项目已经暗含有状态评估的思想,只不过是“看、听、闻、摸”等简单的手段来确定装备的状态。定期维修容易造成“维修不足”或“维修过剩”。状态监测是一种掌握装备在使用过程中的状态,确定其整体或局部正常或异常的技术。状态监测对装备状态的划分采用简单的“阈值”法,即在“阈值”以内不作处理或加强监控,超过“阈值”就进行维修。阈值诊断法虽然简单方便,但由于测量方法上的不完善以及测量误差的存在,有可能出

现如下两类错误:一是误报,增加不必要的维修工作及造成资源浪费;二是漏报,引起装备的严重损坏,造成巨大的损失。真正开始重视装备的健康管理则是在 CBM 出现以后。

CBM 是在 20 世纪末随着状态监测和故障诊断技术的不断进步而逐渐发展起来的,它是建立在对装备状态实时或近实时评估基础上的一种维修方式。CBM 的核心思想是在有需要维修的明显征兆时才进行维修。显然,装备的状态评估正是确定这个明显征兆的重要手段。实现装备的精确化维修,必然要对装备的状态做出正确的评估,其评估结果是进行装备状态维修的重要依据。在先进技术推动和现代维修理论发展的双重作用下,状态评估技术从无到有、从简单到复杂迅速发展;另一方面,状态评估技术的发展也推动了维修理论的进步,特别是极大地促进了 CBM 理论的丰富完善。这时的健康管理主要是对装备的技术状态进行的评估与管理。

PHM 技术是美国军方最早提出并逐步发展起来的,PHM 使美国武器系统传统机内测试(BIST)和健康状态的监控能力进一步增强,实现了从武器状态监控到健康管理的转变,借助故障预测和健康管理系统识别并管理故障的发生、规划维修和决策保障,以此降低使用和维护费用。PHM 是指利用尽可能少的传感器采集系统的各种数据信息,借助各种智能推理算法(如物理模型、神经网络、数据融合、模糊逻辑、专家系统等)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。统计资料表明,日本某企业实施以状态评估为基础的状态维修后,设备故障率减少了大约 75%,维修费用降低了 25% ~ 50%;英国 2000 个大型工厂采用基于状态的维修后,在准确评估设备状态的基础上实施维修活动,每年可节省维修费用高达 3 亿英镑。此外,应用状态评估技术可以降低设备的非计划停机次数,节约维修资源,提高设备的可靠性和可用度。

随着状态维修与视情管理研究的深入以及在工程实践中的广泛应用,人们发现在某些情况下,仅仅了解装备的技术状态是不够的。近年来相继出现的 CBM +、PHM 等理论,它们关注的焦点已经从装备的技术状态转变到装备的健康状态,健康管理越来越为广大研究人员所接受。由于状态维修具有后勤保障规模小、经济可承受性好、自动化、高效率以及可避免重大灾难性事故等显著优势,因此具有很好的前景。状态维修要求系统自身具有对其故障进行预测并对其健康状态进行管理的能力,可以实现“经济可承受性”的目标,也由此产生了 PHM 的概念。在美国、英国联合攻击机项目 F-35 上应用的健康状态评估等 PHM 技术措施,可使故障不能复现(CND)率减少 82%,使维修人力减少 20% ~

40%,后勤规模减小50%,出动架次率提高25%,使飞机的使用与保障费用比过去的机种减少50%以上,使用寿命达8000飞行小时。

1.2 装备全寿命周期内实施 PHM 的必要性分析

实施 PHM 是复杂装备形成保障能力的关键环节之一,需要在装备论证、设计生产和验证定型阶段就实施 PHM,其必要性主要体现在:

(1) 在项目论证和设计阶段引入 PHM,是装备可测性设计中的重要组成部分。如何将状态信号引出、传感器的安装与校验、实现设备的可测性和可维修性设计是复杂装备维修保障中的重要内容。如何将状态监测信息引出并存储与传输、当传感器等状态监测器件发生失效时如何方便地拆卸与更换,都是在该阶段就应该考虑的问题。

(2) 在设计生产阶段引入 PHM,可充分考虑传感器等状态监测器件的覆盖范围及安装环境设计,以在最小经济代价条件下实现故障监控与故障报警,提高系统的可靠性与安全性。另一方面为了减少风险而引入 PHM,会同时增加硬件开销。如何使这两个方面达到最优匹配状态,也是设计过程中的难点问题。最后的设计目标必须能最低程度限制硬件设施的增加,最高程度覆盖系统全部故障模式,满足系统安全性和可靠性的要求。

(3) 在验证定型阶段引入 PHM,可为其智能诊断与预测系统提供必要的故障征兆数据。大量的健康和故障模式数据在系统验证阶段不断积累,将使 PHM 中的人工智能系统得到充分的训练数据,从而能够为系统提供更加准确的故障预测与健康状态评估结果。分析验证、加速验证和实际运行验证等过程是个不断发现缺陷和改进设计的过程。在该过程中加入 PHM,一些故障模式的相关征兆数据就会被采集存储下来,作为 PHM 中故障预测的推理诊断模型的训练数据。千万不要忽视这些数据的积累,对于大型复杂装备而言,一旦安装运行,其高可靠性设计要求、安全冗余的设计裕度和预防性维修方式使系统工作环境下的故障数据少之又少,并且绝对不允许利用故障注入方式得到典型故障的征兆数据。此时,装备开发验证阶段和试验阶段得到的故障数据就变得十分重要了。

1.3 PHM 的研究现状

由于故障预测与健康管理在提高系统安全性、经济性方面具有巨大的潜力,世界各国在国防、航空、航天等领域的复杂系统研制过程中都不遗余力地进

行相应的健康管理关键技术研究。健康管理的概念提出以后,许多学术研究组织提出了自己的健康管理框架和技术结构,并迅速在军用电子产品上实现了突破,得到了应用。

从20世纪70年代起,故障诊断、故障预测、CBM、健康管理等系统逐渐在工程中开始应用。20世纪70年代中期的A-7E飞机的发动机监控系统(EMS)成为PHM早期的典型案例。在其后几十年的发展过程中,电子产品机内测试(BIT)、发动机健康监控(EHM)、结构件健康监控(SHM)、齿轮箱、液压系统健康监控等具体领域问题的PHM技术得到了发展,出现了健康与使用监控系统(HUMS)、集成状态评估系统(ICAS)、装备诊断与预计工具(ADAPT)等集成应用平台,故障诊断、使用监测与维修保障系统连接是这些平台具有的典型特征,但故障预测能力和系统集成应用能力很弱或没有。例如,ICAS正在提升其故障预测能力、开放式系统集成能力,以更好地满足系统级集成应用的需求。

1.3.1 国外的研究现状

1970年,英国人丹尼斯·巴克斯提出了设备工程(Device Engineering)的概念。由设备工程演化而来的设备管理,是指以设备为研究对象,追求设备综合效率与寿命周期费用的经济性,应用一系列理论、方法,通过一系列技术、经济、组织措施,对设备的物质运动和价值运动进行全过程(从规划、设计、制造、选型、购置、安装、使用、维修、改选、报废直至更新)的科学管理。

从20世纪60年代至今,设备管理理论迅速发展,出现了设备综合工程学、5S设备管理、全员生产维修、以可靠性为中心的维修管理、基于状态的维修管理、健康管理与绿色维护等。5S设备管理中的“5S”是Seiri(整理)、Seiton(整顿)、Seiso(清扫)、Seikeetsu(清洁)和Shilsuke(素养)这5个词的缩写,即开展以整理、整顿、清扫、清洁和素养为内容的管理活动。全员生产维修(Total Productive Maintenance, TPM)是对生产维修和设备综合工程学的发展,建立以设备使用寿命为对象的生产维修系统,要求凡涉及设备使用寿命全过程的所有部门以及这些部门的有关人员,包括最高领导层和第一线工人都要加入TPM体系,旨在通过提高人员的素质和设备的性能,来提升企业的素质,从而最大限度地提高设备综合效率,实现企业的最佳经济效益。以可靠性为中心的维修管理是指通过优化设备的使用、维修、改进、更新等环节,以最低的费用实现设备的期望值,其维修策略建立在故障模式、故障影响和故障后果上,是一种将预防维修、预知维修和主动维修等结合起来的总体维修模式。

CBM的产生可以追溯到20世纪40年代末期,当时格兰德河(Rio Grande)

铁路部门首次认识到监测润滑油中金属元素的浓度对于确定内燃机车的运行状况以及预测其元件故障十分有效,并取得了突出的经济效益。在 20 世纪 50—60 年代,国外从状态监控技术起步,开展了大量的 CBM 研究和应用工作。状态监控技术的不断完善提高了设备可用度,降低了生产线的非计划停机次数及时间,目前已广泛应用于机械、化工、冶金、汽车及电力等行业,取得了巨大的经济效益。

随着设备自动化和复杂程度增加,提高关键设备的有效性和维修性至关重要,传统维修方式日益暴露出其局限性,设备的故障后果、停机损失、维修费用日益被人们重视和关注,迫切需要随时掌握设备的技术状态,以保证其发挥应有的功能和效能。因此,国外更加重视 CBM 理论及应用研究。

例如,为了提高飞行的安全性,美国在 B747 和 DC9 等大型客机上成功地应用了飞行器数据综合系统,通过采集、记录、分析处理大量飞行中的信息来判断飞机各部位的故障并能发出排除故障的指令。加拿大多伦多大学的 A. K. Jardine 和 V. Makis 教授组建了 CBM 实验室,推出了软件包 EXAKT: The CBM Optimizer,该软件采用了比例故障率模型描述系统状态,基于费用目标进行维修决策,现已在机械、运输、加工等行业得到了比较广泛的应用。J. M. Wetzer 和 G. J. Cliteur 研究了对变压器、转换器、电缆等电力设施进行 CBM 的诊断措施。A. G. Starr 针对并非所有部件都适合采用 CBM 的问题,提出了一种结构性方法用于选择 CBM。Jay Lee 等开发出 IMS Watchdog Agent TM 工具箱,对企业关键设备(齿轮箱、轴承等)进行 CBM 决策。

针对 CBM 普遍存在的问题,如理论概念、体系结构、基本框架、关键技术等,国外 50 多家工业机构发起成立了机械信息管理开放系统联盟(Machinery Information Management Open System Alliance, MIMOSA),制定和发布了 CBM 开放系统结构(Open System Architecture for Condition Based Maintenance, OSA - CBM),逐步完善以达到能够应用于实际的目的。

在军事领域,美军从企业的研究和应用中受到启发,开始在军用装备维修上探索并应用 CBM。目前,CBM 是美国国防部大力推行的维修策略,在美国各军兵种的一些装备中都推广采用了 CBM 技术。美军的“黑鹰”直升机装备了状态与使用监控系统;G. William Nickerson 和 Christopher P. Nemarich 介绍了海军舰艇上应用 CBM 的一些研究情况。Jeffrey N. Schoess 针对美国空军和海军的装备特性提出需要改进传感器的接口以灵活获取数据,提出了 CBM 分布式的体系结构。美国海岸警卫队在装备中应用 RCM 时,提出了采用 CBM 技术(包括振动监测、热成像、发动机电路分析、激光校准、流量监测、管道视频检测、超声检测等)的要求。

随着 CBM 在军事领域的进一步推广应用,2001 年美国国防部维修技术高级指导小组 (Maintenance Technology Senior Steering Group, MTSSG) 为提高武器装备全寿命可用度和战备完好率、优化新武器系统维修决策和综合保障过程,以及如何对在役武器系统有效地应用改进技术,开展了 CBM + (Condition Based Maintenance Plus) 项目。MTSSG 联合空军、海军、海军陆战队、陆军、国防部后勤局对 CBM 多方面的问题进行了研究,包括通用概念和定义、当前需求和获取过程、成熟技术的应用、维修保障决策过程和综合集成、资源分析和体制研究等。CBM + 建立在 CBM 的基础上,并对其进行了扩展,增加了能够改进维修和后勤实践的技术、工具、过程方法和程序。美军于 2004 年 11 月 29 日颁布了“CBM + 实施规划”。美陆军希望尽快在航空和导弹中广泛落实 CBM +,计划到 2015 年完成向 CBM + 的转变。统计分析显示,仅在未来的“阿帕奇”直升机的 10 个部件上实施 CBM +,每年就可以为陆军节约 41494 个维修工时。各国一些企业在维修实践中逐渐摸索着设备健康管理的模式。

对设备而言,健康管理的意义在于节能、减修和延寿。健康管理要把握时机,做到“三早”(早诊断、早发现、早维修)、“两适时”(适时平衡调整、适时微损微修)。健康管理主要是将维修管理的阶段提前,除了对传统维修模式的恰当应用外,企业提出健康管理的概念,目的是防止劣化,采取的重要维修模式是主动和靠前维护。

在航天领域中,20 世纪 70 年代提出了航天器综合健康管理(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)的概念,并将其逐步应用于航天器的维修保障工作中。20 世纪 90 年代初,随着航天飞行器系统复杂性的日益增加和信息化程度的提高,为解决航天器的维修问题,PHM 被美国航空航天局(NASA)用于飞行器健康监控,即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”。到 20 世纪 90 年代中期,系统健康管理成为涉及 PHM 的最通用的词语。此后不久,NASA 引入了类似的术语,即“综合系统健康管理”(Integrated System Health Management, ISHM)。

PHM 不仅有机上故障诊断与测试能力,而且可以预测故障、评估故障后果与影响,进行维修规划,实现自主式保障。PHM 主要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、监控和管理飞机的健康状态。

美国对 PHM 技术的研究发展历程见表 1-1。