



电子产品故障预测与健康管理的 应用构架与实践

● ● ● Prognostics and Health Management of Electronic Products:
Application Framework and Practice

● 孔学东 恩云飞 陆裕东 等著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

电子产品故障预测与健康管理的 ——应用构架与实践

孔学东 恩云飞 陆裕东 等著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

故障预测与健康管理 (PHM) 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。本书主要针对我国航空航天领域PHM技术的应用需求, 以航空系统中的电子设备故障预测与健康管理为案例, 讲述故障预测与健康管理技术在航空电子系统中的技术架构和具体的技术应用, 对提升国内重大装备研制过程中的可靠性保障技术具有参考价值。

本书可作为普通高等院校电子技术、可靠性工程、飞行器设计、过程控制等专业的研究生课程用书, 也可作为军工科研院所和产品单位的可靠性设计和保障指导用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子产品故障预测与健康管理: 应用构架与实践/孔学东等著. —北京: 电子工业出版社, 2013.11
ISBN 978-7-121-21768-5

I. ①电… II. ①孔… III. ①电子设备—故障—预测—研究 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 277628 号



策划编辑: 余 义

责任编辑: 余 义

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13 字数: 333 千字

印 次: 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

电子设备/系统可靠、安全运行，要求实时监控其工作状态和可靠性状况，及时进行故障诊断和预测，以便系统能在预计的寿命周期内完成预期的功能，并在此基础上准确地定位退化或故障部位，及时地进行必要的维修或更换。故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management, PHM）正是达到上述保障目标的技术方法，能够在设备/系统使用中自动完成故障检测、预测、隔离和监控，及时进行故障影响评价、故障报告和预警状态监控管理的功能，完成故障预测及维修和维修保障决策等健康管理功能的技术系统可称为 PHM 系统。PHM 作为高端装备可靠性、维修性保障体系的发展方向，是提高设备系统安全性和可用性、提高性价比的有效技术途径。

近几年，PHM 相关技术在国内从故障诊断检测向故障预测与健康管理发展，逐步形成新的技术热点。但是，国内 PHM 技术的发展应关注以下几个问题：

（1）国外 PHM 技术研究起步较早，经过长期的基础性研究工作积累，研究重点已逐步从概念和基础理论技术研究转向针对复杂系统的工程应用研究。在国内，PHM 技术研究起步较晚，研究基础和经验与国外差距较大。因此，在 PHM 技术的研究思路中应该注意技术发展的规律性，开展电子设备/系统 PHM 技术顶层设计研究的同时，应将故障预测技术的研究重点放在基础部件（电子元器件、模块/组件）的故障预测技术方法和工程实现上。

（2）国内 PHM 技术目前仍偏重于理论和系统概念研究；在工程应用方面，机械产品的失效机理比较清晰，多年来国内外已形成一些共性的故障预测技术方法；而电子产品因材料/结构复杂，故障模式和故障机理繁多，对故障相关参数的监测也更为困难和复杂，因此，国内机械产品的研究案例相对较多，而电子产品的研究案例很少。

（3）电子产品 PHM 技术工程应用需要通过大量的案例研究来提炼一些可复用的共性 PHM 技术，形成一批共性技术方案。目前，国内在电子产品上虽然有一些具体的研究案例，但共性技术提炼和形成不同领域的工程应用 PHM 共性技术方案还远远不够。

（4）开展电子产品 PHM 技术研究时，由于惯性的研究思维或缺少对电子产品元器件和模块/组件失效机理的研究基础，研究案例中较多地仅考虑敏感参数的监测而忽略了与失效物理模型的技术融合。

长久以来，不管是航空电子装备还是其他电子装备/系统，对装备运行期间发生故障的处理方式，还停留在测试、隔离、报故等初级的系统管理上，没有上升到对系统整机健康状态的评估与管理。从 PHM 技术的提出到广泛工程应用的实现，无疑还需要大量的基础性研究工作。通过基础性研究工作和工程应用经验的积累，逐步将 PHM 技术应用到装备设计、研发、生产、使用、维修/维护全寿命周期，必将对目前的装备保障方式产生革命性和智能化的技术变革。

本书是在可靠性物理及其应用技术重点实验室 PHM 技术团队承担科技部相关科研项目的技术成果基础上，并参考了国内外 PHM 技术文献而撰写。本书针对目前国内 PHM 技术研究现状，着眼于电子设备/系统 PHM 技术研究的工程应用需求，重点介绍电子装备中关键元器

件、模块/组件的 PHM 技术原理、流程、实现方法和应用案例，并为电子设备/系统的 PHM 技术设计提供 PHM 技术架构和方法。本书同时对 PHM 技术过程中的数据分析和处理做了专门论述，介绍了几类常用的数据挖掘算法原理和用途。本书还针对电子产品基于数据驱动和基于失效物理模型的两种 PHM 共性技术方法，介绍了针对电子产品 PHM 关键技术自主开发的基于失效物理模型的 PHM 软件平台和数据挖掘软件工具箱的原理和应用。

读者可以通过本书从理论到实践、从应用技术架构到具体的关键技术了解 PHM 技术；也可以从构成电子产品的元器件、模块/组件到设备/系统的 PHM 技术工程应用思路和方法去看 PHM 技术的工程实践。希望本书的出版对有关技术人员和工程管理者有所帮助。

本书共分为 7 章，由孔学东、恩云飞负责全书构架策划和组织撰写，第 1、2 章由王力纬、陆裕东执笔，第 3 章由陈义强执笔，第 4 章由史峥宇、尧彬、赖灿雄、肖庆中执笔，第 5 章由周振威执笔，第 6 章由林晓玲、朱亮标、麦海荣、蒋海苏执笔，第 7 章主要由国内外参考文献中提出的 PHM 技术发展问题经 PHM 技术团队归纳编写，以上各章由陆裕东、王力纬和林晓玲负责初稿审校，全书由孔学东、陆裕东负责统稿和审校定稿。在该书编写过程中，得到了领导和相关同事的大力支持，电子工业出版社余义编辑对本书编辑和出版提供了大量宝贵建议和帮助，此外，本书应用了部分其他研究者的研究成果（见参考文献），在此一并表示衷心的感谢。

由于著者的经验和知识有限，书中难免有不妥之处，恳请读者提出宝贵意见，进行批评指正。

著 者

2013 年 12 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 故障预测与健康管理技术概述	1
1.1 故障诊断、预测与健康管理技术的发展历史和演变	1
1.2 PHM 技术方法论	3
1.2.1 PHM 技术	3
1.2.2 故障预测的研究方法	5
1.3 PHM 技术国外发展现状	7
1.4 PHM 技术国内发展现状	8
1.5 PHM 技术的应用领域	10
1.6 PHM 技术标准	11
参考文献	13
第 2 章 面向应用的 PHM 技术架构	18
2.1 PHM 技术架构	18
2.1.1 PHM 实施的主要技术途径	18
2.1.2 PHM 总体技术架构及其应用指南	19
2.2 电子产品敏感参数的选择	22
2.2.1 敏感参数的选择方法	22
2.2.2 电子产品常用敏感参数	24
2.3 敏感参数的获取与传感器	24
2.3.1 敏感参数的获取方法	24
2.3.2 商业化传感器的选择	25
2.3.3 BIT 的原理与实现	27
2.3.4 专用传感器的原理与实现	28
2.4 PHM 技术的实施方法	29
2.4.1 故障监控与预警方法	29
2.4.2 基于失效物理模型的方法	30
2.4.3 基于数据驱动的方法	32
2.4.4 基于融合的方法	33
2.5 健康监测的信息融合、推理与决策	35
2.5.1 信息融合	35
2.5.2 推理	37
2.5.3 维修/维护决策	38
参考文献	38

第 3 章 集成电路可靠性机理分析及 PHM 技术实现	40
3.1 集成电路可靠性保障方法及 PHM 技术	40
3.1.1 集成电路可靠性	40
3.1.2 集成电路的可靠性保证	41
3.1.3 保障集成电路可靠性的 PHM 技术概念	42
3.1.4 保障集成电路可靠性的 PHM 技术路线	44
3.2 集成电路的失效模式及失效机理	45
3.2.1 集成电路的主要失效模式	46
3.2.2 集成电路的主要失效机理	48
3.3 集成电路关键失效机理的 PHM 技术方案	57
3.3.1 HCI 失效的 PHM 方案	57
3.3.2 TDDDB 失效的 PHM 方案	58
3.3.3 NBTI 失效的 PHM 方案	59
3.3.4 辐照导致阈值电压漂移失效的 PHM 方案	60
3.3.5 ESD 失效的 PHM 方案	60
3.3.6 EM 失效的 PHM 方案	61
3.4 集成电路 EM 失效的 PHM 技术案例	62
3.4.1 基于两级运放过零比较器的集成电路 EM 失效预警电路设计	62
3.4.2 基于全差分过零比较器的集成电路 EM 失效预警电路设计	65
3.4.3 集成电路 EM 失效预警电路流片、封装、测试方案与平台搭建	68
3.4.4 集成电路 EM 失效预警电路测试及结果分析	70
参考文献	72
第 4 章 模块组件 PHM 技术实现及其案例	76
4.1 模块组件关键失效模式和失效机理	76
4.1.1 电阻器的主要失效模式、失效机理及预防措施	76
4.1.2 电容器的主要失效模式、失效机理及预防措施	77
4.1.3 分立器件的主要失效模式及失效机理	79
4.1.4 互连焊点主要失效模式及失效机理	82
4.2 模块组件的 PHM 技术	84
4.2.1 模块组件的可靠性	84
4.2.2 模块组件 PHM 技术概念	84
4.2.3 模块组件 PHM 技术路线	85
4.3 模块组件 PHM 技术案例研究	86
4.3.1 基于滤波电容的开关电源 PHM 技术案例研究	86
4.3.2 基于光耦合器的开关电源 PHM 技术案例研究	95
4.3.3 基于镜像的焊点 PHM 技术案例研究	105
4.3.4 基于 FPGA 的焊点 PHM 技术案例研究	113
4.3.5 高频应用下焊点 PHM 技术案例研究	118

4.3.6	GPS 接收器模块 PHM 技术案例	122
	参考文献	125
第 5 章	数据挖掘技术在 PHM 的应用	128
5.1	特征提取技术	128
5.1.1	主成分分析	128
5.1.2	互信息	130
5.2	状态评估技术	131
5.2.1	马氏距离	131
5.2.2	秩和检验	133
5.2.3	神经网络	133
5.3	性能预测技术	135
5.3.1	卡尔曼滤波	135
5.3.2	灰色模型	136
5.3.3	自回归模型	138
5.3.4	自回归滑动平均模型	139
5.3.5	神经网络	142
5.4	故障诊断技术	143
5.4.1	朴素贝叶斯	143
5.4.2	自组织映射	145
5.5	数据挖掘算法在 PHM 技术中的应用——光电耦合器件案例	146
	参考文献	148
第 6 章	PHM 技术软件平台的开发和应用	149
6.1	PHM 技术软件平台的需求概述	149
6.2	基于失效物理的 PHM 系统开发及应用	151
6.2.1	软件体系结构	151
6.2.2	寿命预计分析模式	153
6.2.3	寿命预计分布模式	154
6.2.4	属性值误差模拟	157
6.2.5	寿命预计分析	158
6.2.6	软件应用示例	166
6.3	基于数据挖掘的 PHM 工具箱的开发及应用	174
6.3.1	特征提取算法	174
6.3.2	健康评估算法	176
6.3.3	状态预测算法	178
6.3.4	故障诊断算法	182
	参考文献	186
第 7 章	PHM 技术发展与挑战	188
7.1	PHM 技术发展面临的健康管理技术难题	188

7.2 电子产品 PHM 技术应用的几个具体问题..... 190
参考文献..... 190
附录 A 术语表..... 192
附录 B 图索引..... 194
附录 C 表索引..... 198
附录 D 案例索引..... 199

第 1 章 故障预测与健康管理工作概述

1.1 故障诊断、预测与健康管理工作的发展历史和演变

故障预测与健康管理工作 (Prognostic and Health Management, PHM), 顾名思义, 包含两层含义: 一是故障预测, 即预先诊断部件或系统完成其功能的状态, 确定部件正常工作的时间长度; 二是健康管理, 即根据诊断/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。

健康管理的基本思想起源于健康监测, 最早应用在 20 世纪 70 年代中期美国 A-7E 飞机的发动机监测中。从飞行器综合健康管理 (Integrated Vehicle Health Management, IVHM)^[1]、综合系统健康管理 (Intergrated System Health Management, ISHM)^[1]、故障预测与健康管理的出现, 到飞机健康管理 (Airplane Health Management, AHM) 和飞机状态分析与管理系统 (Aircraft Condition Analysis and Management System, ACAMS) 等理论与系统技术的出现和应用, 复杂系统的健康管理技术不断发展, 近年来其功能已经从风险监测和故障预防, 发展到精确风险控制、风险决策和集成优化的高度。例如, 美国国防部提出的增强视情维修 (CBM+)、欧洲 12 个国家完成的新维修概念的技术与技能 (Technologies and Techniques for New Maintenance Concepts, TATEM) 等, 这些都对复杂系统健康管理中的可靠性评估和寿命预测技术提出了更高的要求。

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。

在 20 世纪 50 年代和 60 年代, 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、系统试验及质量方法的诞生。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的故障概率也在增加, 迫使人们在 20 世纪 70 年代创造出新的方法来监视系统状态, 预防异常属性, 从而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 (TQC) 是一种基于过程的质量与可靠性保证方法, 同时, 软件工程师也创造了更为复杂的软件测试技术来检测软件设计缺陷。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“健康状态”。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的过程。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-35 (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 ISHM。在 NASA 术语中使用“综合 (Intergrated)”一词的动机在于：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、综合的考虑。通过强调从系统的角度考虑问题，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。

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 技术的快速发展带来了契机。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 系统是对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见表 1-1^[24]。

表 1-1 PHM/ISHM 技术演变过程

年度	美国国防部	NASA	简述
20 世纪 50 年代	<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 	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、系统试验及质量方法的诞生
20 世纪 60 年代	<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 	
20 世纪 70 年代	<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 	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概率也在增加，迫使研究人员创造出新的系统监视方法，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
20 世纪 80 年代	<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 	全面质量管理：一种基于过程的质量与可靠性保证方法，同时，软件工程师创造了更复杂的软件测试技术来检测软件设计缺陷
20 世纪 90 年代	<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 	“飞行器健康监控 (VHM)”在 NASA 研究机构内盛行，美国国防部在同一时期提出了“综合诊断”
21 世纪初期	<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 	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 (PHM) 技术的诞生带来了契机

1.2 PHM 技术方法论

1.2.1 PHM 技术

PHM 是一种全面的故障检测、隔离、预测及健康管理的技术，它的引入不仅仅是为了消除故障，更是为了了解和预报故障何时可能发生，使得系统在尚未完全发生故障之前人们就能依据系统的当前健康状况决定何时维修，从而实现自助式保障及降低使用和保障费用的目标。

传统维修活动一般使用两种方法：预防维修（Preventive Maintenance, PM）和故障维修（Corrective Maintenance, CM）。预防维修包括基于时间的定期例行维修，用于预防意外事件发生带来的失效。这种方式降低了设备维修费用，但采用这种方法的维护费用却是最高。相反地，故障维修是在设备失效后进行维修。这种方法避免了不必要的维护，但也意味着所有设备都会发生失效，并且设备故障一定会出现。这两种方法都伴随着巨大的维护费用或者巨大的风险和维修费用。在这两种极端方法之间的方法有视情维修（Condition Based Maintenance, CBM）。CBM 是基于设备当前状态评估是否需要而进行的维修。这种维修策略的理想状态是：在一个错误刚刚呈现出来，但还未导致设备失效时进行维修，这样既避免了不必要的维护，也避免了意外的设备失效和停机，最大程度地降低了维修和维护费用，如图 1-1 所示。PHM 技术的出现与应用大大促进了 CBM 的发展。

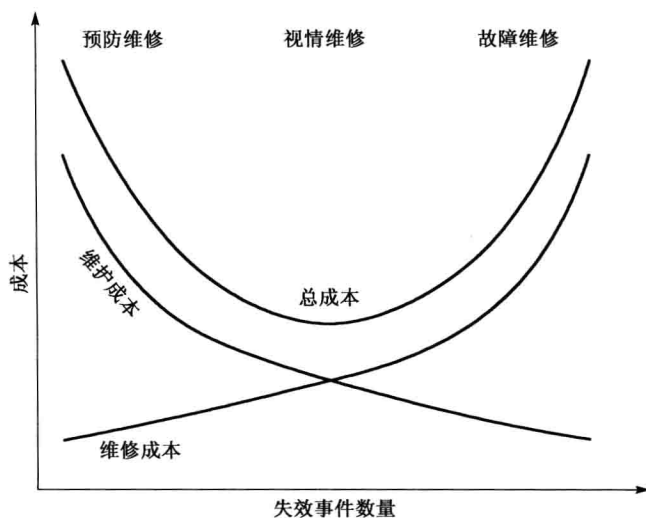


图 1-1 预防和维修费用图

PHM 代表的是一种方法的转变，即从传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测。PHM 技术是在系统有异常征兆而其工作状态仍然处于可以接受的工作范围时，判断未来时刻故障是否发生。它除了判断故障有无以外，还要判断故障的类型，以便于事先采取合理的维修、维护措施来预防系统完全故障的发生，因此 PHM 还应当包含故障定位和隔离及故障诊断的部分内容。它研究的对象是故障发生的征兆，因此就要求对微小的故障信息有足够的分辨灵敏度，能检测和识别出系统的早期故障。同时，由于它所研究的故障征兆幅值一般都很小，易混杂在系统的噪声中，因此相比故障检测其对鲁棒性的要求也更高。PHM 采用开放系统的

结构，利用先进传感器的集成，借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理系统的健康状况，是机内测试能力和状态监控技术的进一步拓展。电子系统的 PHM 体系结构如图 1-2 所示。PHM 主要由数据预处理和实时状态监测、健康管理、状态预测、模块级故障诊断、元器件级故障诊断、人机接口等组成。通常要求 PHM 具有以下能力：①测试能力；②传感器、部件和分系统级有关数据的采集能力；③借助系统模型、确证、关联和信息融合技术，精确地检测和隔离系统、部件或子单元的故障或失效状态的能力；④预测即将发生的故障，并估计部件剩余寿命的能力；⑤系统状态管理的能力。

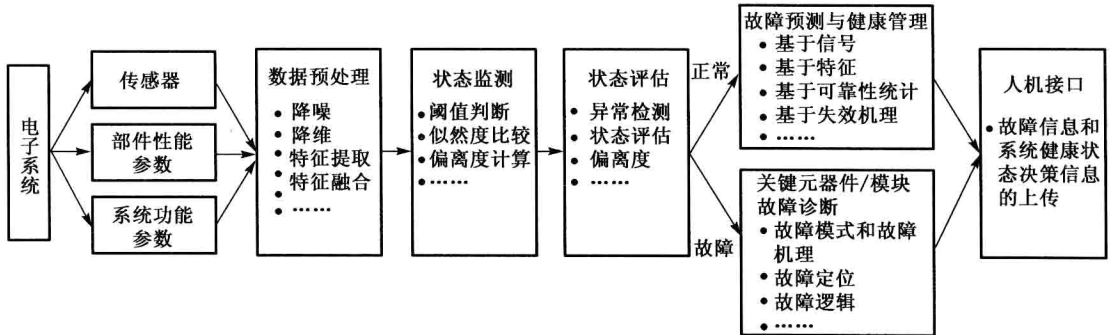


图 1-2 电子系统的 PHM 体系结构

从图 1-2 可知，PHM 的主要研究内容包括：

(1) 当前系统处于其健康退化过程中的哪一种健康状况，是正常态、性能下降态或某一功能失效态；估计当前的状态偏离正常态的程度大小，这属于状态监测与健康管理，用于解决“是否维修”。

(2) 依据当前系统的健康状况决定是否维修。若维修，需要判断系统是由于何种故障模式引起其健康水平的下降，并能对故障模块或元器件尽早检测与识别，以免系统完全故障的发生，这属于早期故障模块或元器件的诊断与识别，用于解决“故障是什么”。

(3) 若不维修，则继续监测系统当前状态并能够预测，即研究未来时间（下一次任务之内）系统是否能正常完成其功能，并根据过去和现有的状态预测出未来某时间的状态，从而可以提前预警，这属于状态预测，用于解决“何时会故障”。当电子系统的健康状况逐渐下降到一定程度时，虽然它还尚能工作，但依据其健康状况需要停机维修（即视情维修），这样就能避免电子系统发生完全故障后才维修，同时也避免了电子系统还在正常的情况下就进行过早的维修。在视情维修情况下，此时的电子系统尚未发生完全故障，其故障元器件或故障模块还处于早期故障阶段，需要通过一定的诊断推理，找出导致系统性能下降的故障模块或早期故障元器件并替换之，从而实现故障预测，做到真正意义上的视情维修。对于简单电子系统可以直接定位到早期故障元器件；对于复杂电子系统，在实际中不可能直接建立起庞大的系统元器件级的完整故障模式库，因此可先定位到子模块级，再采取相同的方法定位到故障元器件。

从上面的分析可知，PHM 的关键技术主要包括：

(1) 状态监测与健康管理技术。要求利用先进的传感器获得尽可能精确的电子系统运行状态信息，通过设计更先进的数据分析技术来获得对电子系统健康状况的精确估计。

(2) 诊断技术。对系统进行维修时，如何定位出故障模块或元器件是非常重要的。由于

此时的故障程度还不足以使系统完全失效，因此大多属于早期故障状态，设计先进的特征提取技术和具有良好性能的分类技术、方法就显得尤其重要。

(3) 预测技术。当系统、分系统或部件可能出现小缺陷或早期故障，或逐渐降级到不能以最佳性能完成其功能的某一点时，选取相关检测方式，设计预测系统（如预警电路等）来检测这些小缺陷、早期故障或降级水平，做到防患于未然。一般又分为系统的状态预测和寿命预测两类。

(4) 信息融合技术。多传感器数据融合是指对由两个或更多传感器组成的具有协同的、互补的和竞争性质的传感器阵列进行智能处理，其目的就是以尽量高效率的诊断方法将各自的信息综合起来，以便对电子系统状态的确定获得更为准确的结论。

(5) 人工智能技术。PHM 中广泛采用人工智能技术，包括专家系统（基于模型的推理、基于案例的推理、基于规则的推理）、神经网络、模糊逻辑和遗传算法等，通过它们的智能推理获得对系统状态的准确监控和故障诊断。

1.2.2 故障预测的研究方法

PHM 的一般方法如图 1-3 所示。图中虚线框内的要素，包括设计数据、生命周期预期值、故障模式、机理、影响分析（FMMEA）及失效物理（PoF）模型等都是获得可靠性（虚拟寿命）估算所需考虑的因素。根据虚拟寿命估算，就有可能对重要的故障模式和故障机理划分优先级。现有的传感器数据、总线监控数据及维护和检测记录都可用于识别异常情况及参数。基于这些信息，可确定 PHM 的监控参数和传感器位置。

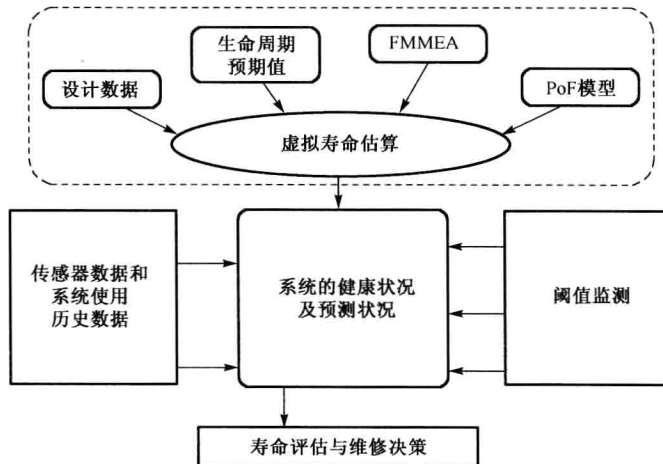


图 1-3 PHM 方法概念示意图

我们可以根据收集到的运行和环境数据来估算产品的健康状态，还可以根据 PoF 模型来计算损坏以获得剩余寿命数据。这样，PHM 信息便可用于维修预测和决策，从而最大限度地降低生命周期成本，提高可用性或其他实用功能。

目前，电子系统 PHM 中不同的预测研究方法有四种：①基于保险和预警装置的方法；②基于故障预兆监控与推理的方法；③基于失效物理（PoF）模型的方法；④基于数据驱动的方法。另外，常用于电子系统 PHM 的一种方法是将基于数据驱动算法与信息融合方法④和 PoF 模型方法③结合在一起，或基于方法③支持方法①的设计和支撑方法②的推理分析。

1. 基于保险和预警装置的方法

保险和预警装置等可扩展设备是保护建筑和电力系统的传统方法。保险丝和电路断路器都可以用于保护电子产品。电路中的保险丝可保护零件免受瞬态电压或过功耗的损害，保护电源不受短路零件影响。在部分产品中还可以加入自检测电路来感应异常情况并进行适当调节，以恢复正常状态或激活交换方式来补偿故障。保险装置就是借鉴了这一原理。

基于设计预警装置的原理，预测和健康监控通过安装于实际产品中或处于实际产品同样应力环境（同位）的预警装置并利用其特别的耗损故障机制，同样可用于提供故障早期警告。

2. 基于故障预兆监控与推理的方法

故障预兆是指针对即将到来的故障而显示出的一种数据事件或趋势。预兆暗示通常表现为可测量变量的改变，且这种变量与后续的故障相关联。例如，电源输出电压的变化可能预示着由于反馈调整器和光隔离器电路的损坏而即将发生故障，这样，就可以使用所测量变量间的因果关系来预测故障，这些变量可与后续故障相关联。

实施基于故障预兆的 PHM 技术方案的第一步是选择需要监控的生命周期参数。这些参数可基于以下影响重大的因素确定：对安全性至关重要的因素、很可能导致灾难性故障的因素、对完成任务极为关键的因素或者会造成长时间停机的因素。此外，也可以根据过去对重要参数的了解、类似产品的现场故障数据及质量测试来选择参数。同样，还可以使用 FMMEA 等更为系统的方法来确定需要监控的参数。

3. 基于失效物理（PoF）模型的方法

失效物理方法（PoF）是利用产品的生命周期载荷和失效机理知识来评估产品可靠性。PoF 方法基于对设备、产品或系统的潜在失效机理和失效位置进行识别。失效机理是指潜在失效位置上应力与变化的关系。该方法可为评估新材料、结构和技术建立一个科学基础，从而前瞻性地评估可靠性。

基于 PoF 的预测可在系统的实际应用条件下评估和预测其可靠性。它将传感器数据与模型相结合，确定模型的参数，建立趋势变化比较曲线。该模型能够实时识别在相同环境条件下产品状态与预期正常运行状态（即系统的“健康状态”）相比的偏离或降级，并可以预测产品未来的可靠性状态。

4. 基于融合方法的故障预测与健康管理

PoF 方法利用产品生命周期载荷条件、几何及材料性质的相关知识来确定基于潜在故障机理的模型，并估计其剩余载荷寿命（RUL）。数据驱动的诊断方法利用当前或历史数据，从统计和概率的角度来估计剩余寿命，在产品的运行和环境数据中检测产品的异常、趋势或模式，以确定产品的健康状态，因此该方法往往需要对环境和运行载荷及产品参数进行实时监控。

这两种方法一直单独用于 PHM 实施，但每种方法都有其各自的优势和局限性。PHM 融合方法就是将数据驱动方法和 PoF 方法结合进行预测，以利用各自的优势来实现 PHM 系统的目标，以克服采用单独的某种方法存在的局限性。数据驱动方法能够提供异常诊断功能，而 PoF 方法则有助于确定数据异常所对应的失效机理及其故障根源，并提供系统参数的阈值和故障定义，从而支持 RUL 预测。

1.3 PHM 技术国外发展现状

随着现代化武器装备复杂性、综合化、智能化程度的不断提高,为了更经济、更有效地满足现代战争如联合作战等新型作战模式对武器作战效能及敏捷、准确和经济等持续保障能力的需求,集成的故障预测与健康管理工作获得美英等军事强国越来越多的重视和应用。

自 20 世纪 90 年代末以来,随着信息技术突飞猛进的发展和广泛应用,集成诊断系统向测试、监控、诊断、预测和维修管理一体化方向发展,形成集成的诊断、预测与健康管理工作系统的时机已经成熟。以往常用的事后维修和定期维修已经无法很好地满足现代战争和武器装备对装备保障的要求,在这种情况下,美军 20 世纪 90 年代末引入民用领域的 CBM 作为一项战略性的装备保障策略,其目的是对装备状态进行实时的或近实时的监控,根据装备的实际状态确定最佳维修时机,以提高装备的可用度和任务可靠性,这些需要借助 PHM 技术来实现^[4];另一方面,大容量存储、高速传输和处理、信息融合、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、传感网络等信息技术和高新技术的迅速发展,意味着允许装备在线实时完成更多的数据存储和处理功能,以避免过多依赖事后离线来处理信息,为 PHM 的产生创造了条件。美军于 20 世纪 90 年代中期启动联合攻击机 (Joint Strike Fighter, JSF) 项目,提出了经济承受性、杀伤力、生存性和保障性四大支柱目标,并因此提出了自主式保障方案,借此机遇诞生了 PHM 系统^[5]。

在 PHM 技术方面,美国 NASA 是权威的研究机构,它从 20 世纪 80 年代到 90 年代就开始进行火箭推进器的健康管理^[6],如 NASA 的 Lewis 研究中心采用油液光谱分析的火箭发动机状态管理系统 HMS,目的是为了改善可重复使用的火箭发动机的安全性与两次飞行任务间的维修管理水平。进入 21 世纪后,在新一代发射技术计划的带动下,一个由多个研究中心组成的联合团队应运而生(见表 1-2),致力于进行综合系统健康管理(Integrated Systems Health Management, ISHM)研究^[7]。这些研究机构,于 2005 年主办了 ISHEM (Integrated System Health Engineering and Management) 论坛,讨论航空航天方面的健康管理研究理论与技术^[8]。ISHM 已不是一个新的概念,从航空航天领域的 Boeing777 和火星漫游者,到汽车和核电设施,大量类似系统得到了广泛应用。但是由于系统应用的目的、任务、环境等方面的不同,也造成了健康管理理论使用的程度、自动化水平和功能的千差万别。

表 1-2 参与 ISHM 的研究中心及其专长

研究中心	专长的主要领域
艾姆斯研究中心 (Ames Research Center, ARC)	ISHM 技术研发的领先者,先进监测与诊断、人为因素、热防护系统健康管理、系统工程
德莱顿飞行研究中心 (Dryden Flight Research Center, DFRC)	光纤传感器测试、航空飞行测试
格伦研究中心 (Glenn Research Center, GRC)	动力与执行器、推进器健康管理、传感器技术
喷气推进器实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)	传感器技术、先进监测与诊断、机器人
约翰逊航天中心 (Johnson Space Center, JSC)	任务、飞行操控
肯尼迪航天中心 (Kennedy Space Center, KSC)	地面与发射操控、运输器维护
兰利研究中心 (Langley Research Center, LRC)	机体与结构、光纤传感器技术
马歇尔航天飞行中心 (Marshall Space Flight Center, MSFC)	推进器系统、航电、飞行力学、健康管理传感器技术、系统工程
斯坦尼斯航天中心 (Stennis Space Center, SSC)	推进器/发动机健康管理、火箭测试台