

航空器预测与健康管理

苗学问 蔡光耀 何 田 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

航空器预测与健康管理

苗学问 蔡光耀 何 田 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

PHM 系统一般应具备故障检测、故障隔离、增强诊断、性能检测、故障预测、健康管理、部件寿命追踪等能力。目前,各大航空制造商的 PHM 技术还仅限于研究和小规模的应用阶段,仅在部分关键的系统和部件中得以应用。但在可以预见的将来,由于在节省人力、物力、时间等方面具有无可比拟的优势,PHM 技术必将在飞行器以及航天、航海、化工等领域得到广泛应用。本书以航空器应用为背景,对 PHM 的发展、关键技术以及设计、验证方法进行了较为全面的叙述,对于从事可靠性、保障、维修以及设计等方面学习和研究的各类人员,包括相关专业本科生、研究生和工程技术人员,都有借鉴价值。

图书在版编目(CIP)数据

航空器预测与健康管理的苗学问,蔡光耀,何田编

著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5124-1830-1

I. ①航… II. ①苗… ②蔡… ③何… III. ①航空器—维修 IV. ①V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 156197 号

版权所有,侵权必究。

航空器预测与健康管理的苗学问,蔡光耀,何田编著

苗学问 蔡光耀 何田 编著

责任编辑 蔡喆

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:10.75 字数:275 千字

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷 印数:1 000 册

ISBN 978-7-5124-1830-1 定价:49.00 元

本书编委

(按姓氏笔画)

王 红	尹树悦	司 勇	何 田
苗学问	高 晶	钱征文	蔡光耀

前 言

随着各种大型复杂系统性能的不断提高以及复杂性的不断增加,系统的可靠性、故障诊断和预测以及维修保障等问题越来越受到人们的重视。目前,多数系统的维修仍以定期维护为主,而航空航天、国防、各军种以及其他工业部门越来越难以承受如此巨大的财力、物力和人力耗费。美国从 20 世纪 90 年代中期开始,在进行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。例如联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)项目,就明确提出“经济可承受性”是其四大目标之一。在这种背景下,催生了预测与健康管理系统(Prognostics and Health Management, PHM)的概念。PHM 是指利用各类传感器拾取系统的信息,借助各种信号处理技术来诊断、评估系统的健康状态,并对故障进行预测,为系统的运行、维护、保障等提出建议。PHM 系统一般应具备故障检测、故障隔离、增强诊断、性能检测、故障预测、健康管理、部件寿命追踪等能力。目前,各大航空制造商的 PHM 技术还仅限于研究和小规模的应用阶段,仅在部分关键的系统和部件中得以应用。但在可以预见的将来,由于在节省人力、物力、时间等方面具有无可比拟的优势,PHM 技术必将在飞行器中得到广泛应用。因此,这也是作者撰写这样一本有关 PHM 系统书的原因。

本书的研究与编撰是个艰苦的探索过程。一方面是因为 PHM 系统及技术的积累还很薄弱,对其内涵和规律特征的认识还在不断深化之中;另一方面是因为 PHM 技术应用还在不断拓展并探索完善之中。在任建军高工等本领域专家的悉心指导和全程把关下,作者通过专题研究、集智攻关,最终完成了这本专著的撰写。应该说这是一部系统研究飞行器 PHM 的内涵、关键技术及系统集成的学科专著,可供装备机关、装备论证科研以及其他国防科技等人员阅读。

全书共 8 章。第 1 章为绪论,简要概述 PHM 系统的概念、内涵及其发展历程;第 2 章简要阐述典型先进战斗机及其发动机的 PHM 系统,并分析其构架及特征;第 3 章系统分析 PHM 在信号拾取、数据处理、特征融合、智能诊断与预测及系统集成等方面的关键技术;第 4 章系统分析 PHM 系统的各种诊断方法;第 5 章回顾了故障预测面临的重要挑战,并介绍了其理论和基本概念,最后给出了应用实例;第 6 章根据 PHM 系统能力的参数描述需求,提出 PHM 系统指标参数,构建 PHM 系统指标参数体系;第 7 章阐述了与技术经济分析相关的主要方法以及核查及验证(Verification and Validation, V&V)的方法,并介绍 Impact 等公司的 PHM 设计及验证工具;第 8 章介绍了 PHM 系统要求与性能验证的各种基本方法,进而分析了各种方法的优、缺点。

本书在编写过程中参考了诸多书籍与文献,在此,谨向参考文献的作者致以

诚挚的谢意。同时,本书吸纳了国内外、军内外许多专家学者的理论研究成果,为本书的学术价值和理论高度的提升起到了明显作用,在本书付梓之际,我们对这些成果的创造者表示钦佩,并对这些成果为本书提供参考和引用深表谢意。

PHM 发展至今,很多理论尚不成熟,加之编者的能力和水平有限,又是在繁忙的日常工作中抽挤时间完成本书的撰写,书中不妥之处,敬祈读者批评指正。

编 者

2015 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 从测试性到 PHM	1
1.2 PHM 的目标及技术内涵	3
1.2.1 PHM 的目标	3
1.2.2 PHM 实现目标的技术途径	6
1.2.3 PHM 的技术内涵	8
1.3 PHM 的功能要素	9
1.4 PHM 技术的发展历程	10
第 2 章 典型飞机和发动机的 PHM 系统	16
2.1 F-35 飞机自主式保障和 PHM 系统	16
2.1.1 F-35 飞机自主保障系统	16
2.1.2 F-35 飞机 PHM 系统	17
2.2 EF-2000 欧洲多用途战斗机的健康监测系统	19
2.3 先进航空发动机 PHM 系统	21
2.3.1 F117 发动机的 PHM 系统	22
2.3.2 F119 发动机的诊断与健康管理系统(DHM)系统	23
2.3.3 F-35/F135 的 PHM 系统	25
2.3.4 EJ200 发动机的综合健康监测系统	26
2.4 先进航空器典型健康管理系统构架及特征	27
2.4.1 典型系统构架	27
2.4.2 典型结构特征	29
第 3 章 PHM 的关键技术	31
3.1 PHM 的关键功能要素	31
3.2 先进的传感器和非传统检测技术	34
3.2.1 部分先进传感器	35
3.2.2 数据传输技术	37
3.3 数据处理和特征提取技术	38
3.4 故障诊断技术	39
3.4.1 故障知识库及推理规则	39
3.4.2 信息融合故障诊断技术研究	40
3.4.3 智能诊断技术	41

3.5 预测技术·····	42
3.6 PHM 系统集成技术·····	43
第4章 PHM 系统的故障诊断方法·····	45
4.1 故障诊断的基本概念·····	45
4.2 基于历史数据的诊断方法·····	47
4.2.1 统计的历史数据分类和聚类方法·····	48
4.2.2 故障分类与决策·····	51
4.2.3 基于数据驱动的故障诊断实例·····	54
4.3 基于动态系统模型的故障诊断方法·····	59
4.3.1 卡尔曼滤波器·····	60
4.3.2 递推最小二乘参数估计·····	62
4.4 基于物理模型的诊断方法·····	64
4.4.1 疲劳和裂纹扩展模型·····	64
4.4.2 有限元分析用于基于模型的故障诊断·····	65
4.5 其他故障诊断方法·····	67
4.5.1 统计变化检测·····	67
4.5.2 贝叶斯网络·····	68
4.5.3 隐形马尔科夫模型·····	68
第5章 PHM 系统的预测方法·····	69
5.1 预测的作用及方法分类·····	69
5.2 基于模型的预测方法·····	70
5.2.1 基于物理学的疲劳模型·····	71
5.2.2 基于模型辨识的方法·····	72
5.3 基于概率的预测方法·····	73
5.3.1 贝叶斯概率理论·····	73
5.3.2 威布尔模型——故障时间分析·····	74
5.3.3 剩余使用寿命的概率密度函数·····	75
5.4 基于神经网络的预测技术·····	76
5.4.1 神经网络·····	77
5.4.2 置信预测神经网络·····	78
5.5 基于 BP 神经网络的轴承寿命预测案例·····	79
5.5.1 轴承的全寿命试验装置·····	79
5.5.2 状态寿命评估模型概述·····	80
5.5.3 BP 网络的原理·····	82
5.5.4 BP 网络的改进应用方法·····	83
5.5.5 基于 BP 网络的状态寿命评估模型·····	86
5.5.6 BP 神经网络评估模型的应用·····	94

第 6 章 基于保障能力需求的 PHM 系统指标体系	97
6.1 引 言	97
6.2 保障能力需求分析	98
6.2.1 快速出动作战能力对保障能力的需求	98
6.2.2 机动作战能力对保障能力的需求	98
6.2.3 高强度出动能力对保障能力的需求	98
6.2.4 复杂作战任务能力对保障能力的需求	98
6.2.5 复杂战场环境适应能力对保障能力的需求	98
6.3 自主保障系统运作流程规划	99
6.3.1 保障能力分解	99
6.3.2 基于机动部署任务的自主保障系统运作流程	99
6.3.3 基于战时作战任务的自主保障系统运作流程	100
6.4 PHM 系统能力需求及指标参数体系研究	102
6.4.1 故障检测/隔离类指标	102
6.4.2 预测性指标	107
6.4.3 其他/综合度量	111
6.5 指标参数体系	112
第 7 章 PHM 系统的设计方法	114
7.1 引 言	114
7.2 PHM 系统框架设计	114
7.3 PHM 系统的试验方案	117
7.4 性能评估	118
7.4.1 PHM 系统的验证	119
7.4.2 性能指标	119
7.4.3 V&V 方法	120
7.5 Impact 公司的 PHM 设计工具	121
7.5.1 FMECA 与健康管理的	122
7.5.2 健康管理系统设计方法	122
7.5.3 健康管理系统设计工具的技术结构	123
7.5.4 健康管理设计优化	127
7.5.5 协同设计环境	127
7.6 推进系统 ACM 试验台	128
7.6.1 推进系统 ACM 试验台系统描述	128
7.6.2 涡扇发动机案例研究	132
7.6.3 演示验证与仿真结果	137
7.7 F-35/F135 PHM 的研制和验证工具——综合诊断虚拟试验台	140
7.7.1 先进攻击综合诊断体系结构	140

7.7.2 自主式保障系统的设计方法	141
7.7.3 综合诊断虚拟试验台的功能	142
第8章 PHM 系统能力的验证与确认方法	144
8.1 验证与确认方法	144
8.1.1 使用演示验证	144
8.1.2 加速试验	144
8.1.3 分 析	145
8.1.4 建模与仿真	145
8.2 预测系统的验证应用	145
8.2.1 方 案	145
8.2.2 评 估	146
8.2.3 演示验证	146
8.2.4 制 造	147
8.2.5 使 用	147
8.2.6 报废处置	147
英文缩写语表	149
参考文献	154

第1章 绪论

1.1 从测试性到 PHM

航空器是指在大气层中飞行的飞行器,包括飞机、飞艇、直升机、滑翔机等。航空器在军事、民用和科学研究等领域应用广泛,可以说是人类目前不可或缺的工具之一。为了使航空器更好地为人类服务,人们一直在关注大型或重要的航空器的安全性和经济性,例如大型飞机、直升机。在航空器中,飞机的使用数量占各类航空器总数的 97% 以上。因此,在本书中,主要选择飞机为说明对象,有时也以直升机为说明对象。

对于航空器而言,维修维护的成本在其全寿命周期成本中占据了重要部分。就民用飞机而言,其使用维护成本一般占航空公司飞机总运营成本的 18% 左右,每年用于飞机维修的花费达数十亿美元。对于军用飞机而言,维修保障的费用往往高于采购费用。因此,对于飞机这样的大型复杂系统,需要具备快速准确地定位故障源的能力,及时制定维修决策,增加机队运行时间,才能进一步降低维护成本。对飞机进行故障的检测和诊断,及时掌握整个系统的状况,是一项非常关键的工作。几十年来,在多个学科融合交叉的基础上,故障诊断技术得到了广泛和深入的研究,各类诊断方法不断涌现,应用也越来越广泛。目前,故障诊断技术可诊断飞机系统内的故障状态,并可根据不同的策略隔离故障源并评估故障严重程度,为维修维护提供准确的依据。

对于早期飞机,在其设计时没有或较少考虑到故障诊断的要素。大多数故障监控和诊断系统都是不得不在设计之后额外配备。这种传统的事后追加的方式在针对飞机这样的大规模、技术复杂性高的系统时,将导致故障诊断性能不高并产生大量测试资源耗费等问题。于是人们意识到与其在飞机使用过程中追加故障诊断子系统,不如在设计阶段就着手予以解决,这就是飞机测试性技术的思想来源。测试性(Testability)又称可测试性,始于 20 世纪 60 年代,于 70 年代在国外受到重视并得到迅速发展,它是指产品能被及时、准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降)并隔离其内部故障的一种设计特性。测试性技术的发展经历了“由外部测试到机内测试”、“由机内测试到综合诊断”和“由综合诊断到预测与健康管管理”三个阶段。在测试对象上,实现了从电子领域到机电、机械领域的拓展;在产品层次上,经历了从部件、分系统级发展到覆盖全机的系统集成。这一演变过程反映了人们认识和利用自然规律的一个典型过程,即从对故障的被动反应,到主动预防,再到事先预测和综合管理。

(1) 外部测试到机内测试

早期飞机的系统比较简单,人们依靠外部测试,即人工在地面上利用通用或专用测试设备,实现飞机故障的检测和隔离。外部测试通常是借助自动测试设备(ATE)或自动测试系统(ATS)完成。ATE 是与 UUT 分离的测试设备,用于自动完成对被测单元(UUT)故障诊断、功能参数分析及性能评价。ATE 主要用于中继级和基地级维修。随着飞机的系统越来越复杂,故障模式越来越多,为了便于故障时能及时采取措施,运行人员对实时了解飞机上重要系

统和设备的运行状态的需求越来越强烈。这种需求产生了嵌入式的机内测试(BIT)。BIT最初是用于警告飞行员有重要系统或设备出了关键故障,后来逐步成为机械师查找故障的助手。而计算机技术的应用,使机内测试能力得到了迅速提高,由早期的仅检测几个主要参数、由人工判断是否为故障的状况,发展到现阶段的自动检测和隔离故障。

(2) 机内测试到综合诊断

BIT没有从根本上解决装备故障诊断问题。20世纪70至80年代,复杂装备在使用中暴露出测试性差、诊断时间长、虚警率高、使用保障费用高等问题,“诊断”成为了综合保障的瓶颈。美英等国军方和工业界为了解决该问题,分别针对自动测试设备(ATE)、技术资料、BIT等各诊断要素进行了深入的研究,采取了很多措施,但结果并不理想。通过这些研究发现问题的根源在于各诊断要素缺少综合,而且除BIT外,其他诊断要素没有随主装备并行设计,而是在主装备设计基本完成后才开始设计的。针对这种情况,美国国防工业协会(the National Defense Industrial Association, NDIA,即原安全工业协会)于1983年首先提出了“综合诊断”的设想,并获得美国军方的认可和大力提倡。

综合诊断不是一项新技术或技术组合,也不是一个产品,而是一种系统工程过程。综合诊断通过考虑和综合BIT、地面自动和人工测试、维修辅助手段、技术资料、训练等构成诊断能力的所有要素,达到以最少的费用最有效地检测、隔离装备的已知或预期发生的所有故障。美国国防部于1991年4月颁布了军用标准MIL-STD-1814《综合诊断》,把综合诊断作为提高装备系统诊断能力和战备完好性、降低保障费用的一种有效途径。综合诊断策略在F-22飞机、海军的核潜艇SSN-21、陆军的主战坦克M1A2等装备研制中得到贯彻。

(3) 综合诊断到PHM系统

20世纪90年代以来,随着装备系统性、信息化和综合化程度大幅度提高,装备维修保障工作重点已由传统的以机械修复为主的模式,逐步转变为以信息的获取、处理和传输并做出维修决策为主的模式,系统的可靠性、故障诊断和预测以及维修保障等问题越来越受到人们的重视。以往的事后维修和定时维修已经无法很好地满足现代战争对装备保障的要求。而航空航天、国防、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。因此,美国在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。在这种情况下,作为一项战略性的装备保障策略,美军引入了在民用领域的基于状态的维修(Condition Based Maintenance, CBM),其目的是对装备状态进行实时或近实时的监控,根据装备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,这需要借助于PHM技术来实现。PHM概念成形于20世纪90年代末,是由美国在联合攻击JSF开发计划中提出,以实现“经济可承受性”,进而发展起来的一种用于复杂电子系统或关键系统的状态感知、故障预测、健康评估及维修决策支持的综合诊断、预测及保障管理技术。PHM与传统的脱节式“检测—诊断—维修”方式相比,是一种允许在产品或系统的真实应用条件下对其可靠性进行评估的方法。健康监控和故障预测是指利用传感器采集系统的数据信息,借助各种数据处理技术来诊断系统自身的健康状态,并在系统故障发生前对故障进行预测。PHM系统一般应具备故障检测、故障隔离、增强诊断、性能检测、故障预测、健康管理、部件寿命追踪等能力。国外新型军用飞机如F-22、F-35、EF-2000战斗机及其发动机都不同程度地采用了预测与健康管理技术,在提高飞行安全、减少维修人力、增加出动架次率、实现基于状态的维修和自主式保障方面发挥着重要作用。

2000 年 7 月,作为一种能降低系统的使用和保障成本、提高系统安全性和可用性的综合性技术,PHM 技术被列入美国国防部《军用关键技术》报告中。在装备型号中,PHM 技术也得到了广泛应用,包括美国的 SH-60 直升机的使用 and 状态管理系统(Health Usage and Monitoring Systems, HUMS)波音公司在民航领域的飞机健康管理(Airplane Health Management, AHM)系统、美国海军的综合状态评估系统(Integrated Condition Assessment System, ICAS)、陆军的嵌入式诊断和预测(Embed Diagnostics/Embed Prognostics, ED/EP)。20 世纪 90 年代中期,美军在启动的联合攻击战斗机(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,并因此提出实施自主式保障方案,借此机遇诞生了目前最为完善的、高水平的 PHM 系统。JSF 项目 PHM 系统的分阶段目标包括:集成系统结构(构建架构)、高级诊断(提升测试诊断效能)和预测(预报失效并逐步与控制系统综合)。

综上所述,测试性技术发展及能力演变情况如表 1-1 所示。

表 1-1 测试性技术能力演变

发展阶段	特 征	能 力
外部测试	在地面上,利用人工采用专用或通用测试设备完成测试	
机内测试	采用嵌入式机内测试	基于定义的离散阈值实现对设备故障或性能衰退的判断
综合诊断	测试诊断设计是装备系统工程中的一个组成部分	• 数据和诊断模型在综合诊断系统内共享 • 在不同子系统之间追踪引起失效的根源故障
PHM 系统	集成系统结构	依据装备系统使用保障和安全性需求,确定最优的软、硬件结构,实现所有测试诊断信息共享
	高级诊断	• 在部件失效前得知其性能正在衰退 • 监测异常、间歇故障等,降低重测合格率
	预测	• 预报子系统、部件失效,提供维修决策支持 • 测试诊断信息与装备控制系统进行综合

1.2 PHM 的目标及技术内涵

1.2.1 PHM 的目标

随着飞机和航空发动机系统越来越复杂、昂贵,人们对精确的故障诊断和实时预测能力的需求日益迫切。故障诊断与预测技术已有很长的发展历史,而发展专业化、先进的故障诊断和预测要求的主要目的就是为了满足后勤保障方面新的、革命性的变革。这些自主后勤保障概念有很多称谓,例如 CBM、基于性能的后勤保障(Performance Based Logistics, PBL)及自主后勤保障。所有这些概念都是以 PHM 技术作为关键的实现因素。

PHM 在复杂系统的维修和保障领域中会带来质的改变,这种改变可以用“金丝雀”理论来说明。如图 1-1 所示:以前,矿工采用“旧”的方法,用金丝雀检测矿井安全,例如有限监视和扩展监视的方法,在矿井中放一只金丝雀并定期观察,如果鸟死了,就可以判断井中的空气变质;如果采用 PHM 这种“新”方法,则可通过持续监测金丝雀的“健康状况”而非“是否死

亡”,就能得到更早的有关井下空气开始变质的提示。新方法通过判断空气早期变质迹象并预测金丝雀剩余寿命,从而改进了井下维修和健康的模式与能力,并使金丝雀具备重复使用的价值。

状态监测的变化

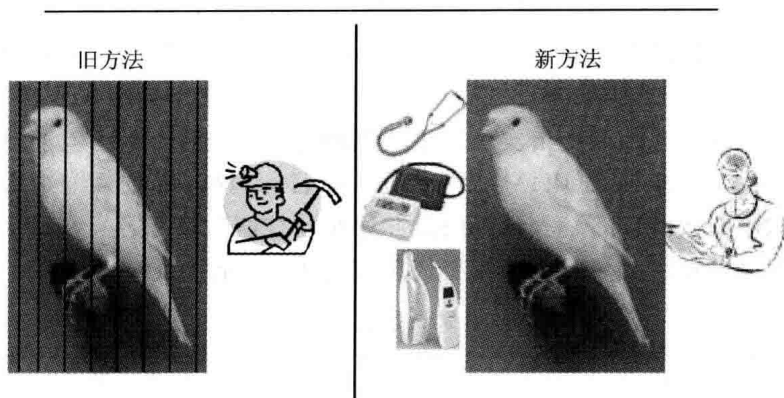


图 1-1 金丝雀检测矿井安全

飞机诊断技术经过几十年的发展,对用户来说,实现高级的诊断能力是可行的。这一能力的提升可通过使用更多的机上数据来实现,从而解决了在地面基站可能发生的数据丢失、漏判和误判问题。另外,目前高度数字化的飞机有大量的可用信息,因此在故障诊断时可以充分发掘这些数据。通过适当的数据处理方法,将这些数据转化为信息,可以将很多和飞机健康有关的特征,用全新的方式推断出来。这些信息被转化为管理飞机健康的知识后,有利于进行更好的决策。诊断能力的提高会逐渐扩展出更多的内容以及预测需求,例如,监控和预测将要出现的失效。这样,可以在飞机功能失效之前发现故障,从而不仅使任务可靠性得到很大提高,也能更好地安排维修安排来减少飞机停机时间,有效降低寿命周期的成本。基于这一思想,如今很多飞机的“诊断系统”都具备了一定程度的预测能力。

对于飞机用户或者维护人员而言,会有很多迫切的需求,例如提高出动架次率与飞机可用性、很低的测试“不能复现率”(Can Not Duplicate, CND)和故障重测合格率(Retest OK, RTOK)、最小或无定期检验要求、较小的备件要求、快速转场时间、最大使用寿命以及准确的部件使用寿命跟踪、无虚警等。图 1-2 描述了其中一部分需求以及其他一些机组需求。实际上维修人员最需要实现的,是希望能准确地预测未来健康状况并预测问题,在出现重大事故前预见问题并采取必要的维修措施。让维修人员提前了解维护计划和必需的维修事件,便于采取最佳的维修策略,使得维修活动更有效、更经济。

综合具备这些能力,不仅可使维修活动和维修任务更加有预见性,还能预测未来的健康状况,促进基于性能的后勤保障理念和新模式维修概念的发展。

后勤保障任务的完成、突发事件处置费用的降低、任务可靠性的提高、预期成本的降低,都需要飞机或系统的可靠性和维修性有实质性的提升。一个现代的综合性预测和健康管理系统需要与后勤信息系统有机结合,从而实现:① 供应链管理系统及时准确地提供必需的替换零件;② 有计划地安排和执行必须完成的维修任务;③ 维修人员的培训。PHM 对于预防重大事故的发生,提高航空器系统的安全性,减少经济损失,降低系统的维护费用,保障重大工程项

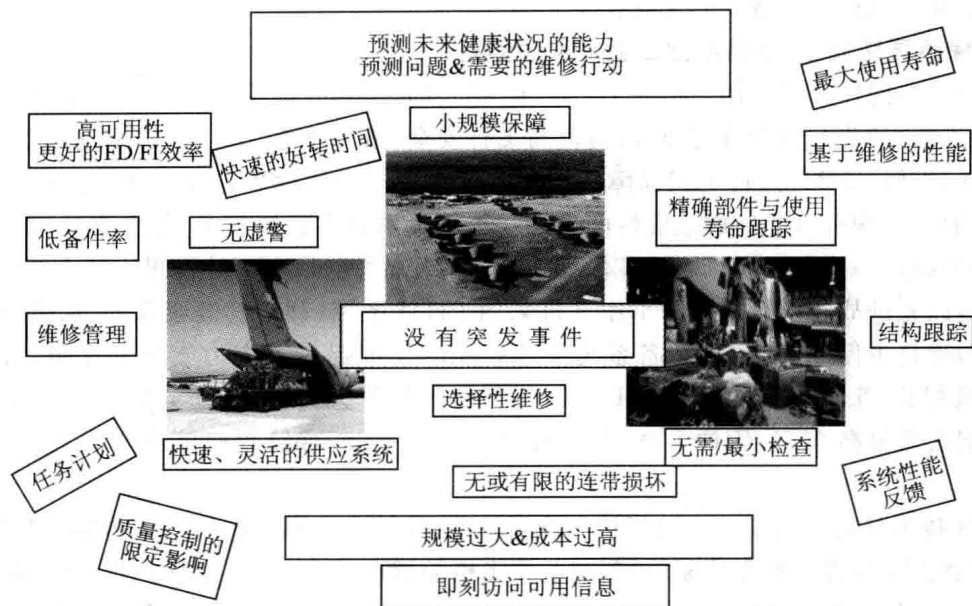


图 1-2 机队使用者的需求

目的建设具有重要的研究意义、应用价值和广阔的应用前景。主要体现在以下四个方面：

(1) 减少经济损失、预防重大事故发生

飞行器的失效和事故往往会造成不同程度的经济损失和社会影响。美国发生的两次震惊世界的航天飞机重大事故都主要是因为结构材料缺陷引起的。在航空领域,美国全国运输安全委员会统计的 1982 年到 2001 年在美国注册的 7571 架飞机的事故数据表明,52%的事故与飞机系统有关,36%由推进系统组件引起,其余 10%则是由机身失效引起。飞行器的健康监测和管理技术的应用可实现飞行器系统的在线或离线的状态监测,及时预报系统可能出现的故障隐患,减少系统事故,提高系统运行的安全性。

(2) 实现视情维护,大幅降低维护费用

对于航空器的服役来讲,维护成本占总成本的比重很大。例如:2001 年公布的一组数据显示,美国在复杂武器装备的全寿命周期费用中,使用和维护费用是总费用的 72%;根据美国在运载火箭 X-34 和 X-37 研制过程中统计数据表明,为保证航天飞机执行任务的成功,每个任务期内要耗费 400 万美元以及 200 人左右的工作小组来进行预防性维护工作,而全球民航在飞机后勤保障上的花费每年约 310 亿美元。目前,在国际上,航空器系统的维护思想正在发生重要变革,其维护已从定期检测维护逐步过渡到视情维护,也就是根据系统实际状态的需要进行维护,从而降低维护成本。航空器的健康监测与管理技术是实现视情维护的关键技术。

(3) 保障重大工程建设、实现工业现代化的需要

航空航天工程是我国目前正在重点发展的高新技术领域,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中已确定载人航天与探月工程和大型飞机工程为重大专项技术。我国的大型民用飞机最终会在世界的航空舞台上与美国的波音(Boeing)公司和欧洲的空客(Airbus)公司展开激烈的竞争。飞机的安全性和维护性是赢得这场竞争的重要因素。另外,我国正在研制的新一代作战飞机的经济可承受性和保障性也是其关键特征中的两项特征。可见,在我国大飞机项目和新一代作战飞机的研制中,航空器的健康监测与管理技术是解决航空

器安全性、降低维护保障费用的关键技术之一。

(4) 保障国防安全、推动航空工业发展的需要

如前所述,国外新型军用飞机如 F-22、F-35、EF-2000 战斗机及其发动机都不同程度地采用了诊断/预测与健康管理技术,对提高飞行安全、减少维修人力、增加出动架次率、实现基于状态的维修(CBM)和自主式保障发挥着重要作用。现代战争是比效率、比保障的战争,任何战机的延误均有可能造成颠覆性的后果。军用飞机具有系统复杂、任务多样、环境多变、成本高昂等特点,对“高效能、低费用”保障性设计和装备“两成两力”建设提出了全新挑战。为应对挑战,以先进战斗机为代表的军用飞机采用 PHM 系统,利用其健康管理、保障决策支持等能力,构建自主保障系统,为装备系统保障效能的发挥提供了有力支撑和保障。例如,与 F-16 飞机相比,采用 PHM 系统的 F-35 飞机保障效能大幅提高:任务可靠性提高 50% 以上,出动架次率提高 25%,维护人员/人力减少 20%~40%,保障规模缩小 50%,使用保障费用减少 50%。

PHM 技术是综合诊断技术的延续和最新发展,其技术内涵是利用先进传感器的集成,并借助各种算法和智能模型来诊断、预测和监控飞机的健康状态,给出最优的保障策略,以最小的投入获得最佳的机群健康状态。从设计角度而言,PHM 系统通过信息集成,实现飞机系统可靠性、维修性、测试性和保障性综合最优;从维修保障策略和保障管理的角度而言,PHM 系统基于飞机状态触发保障活动,推动传统的维修保障模式(事后和定时维修为主、反应式保障)向视情维修和自主式保障转变,可大大减少部队的维护工作量,提高维护效率;在经济性上,采用 PHM 系统可用研制、测试和试验阶段的较少投资,获取未来使用阶段的更大效益,提高装备经济可承受性。此外,应用 PHM 系统又可牵引健康管理、保障规划等专业技术发展,推动可靠性系统工程技术体系进步。图 1-3 反映了国防和航空领域不同层面上 PHM 的需求和巨大效益。

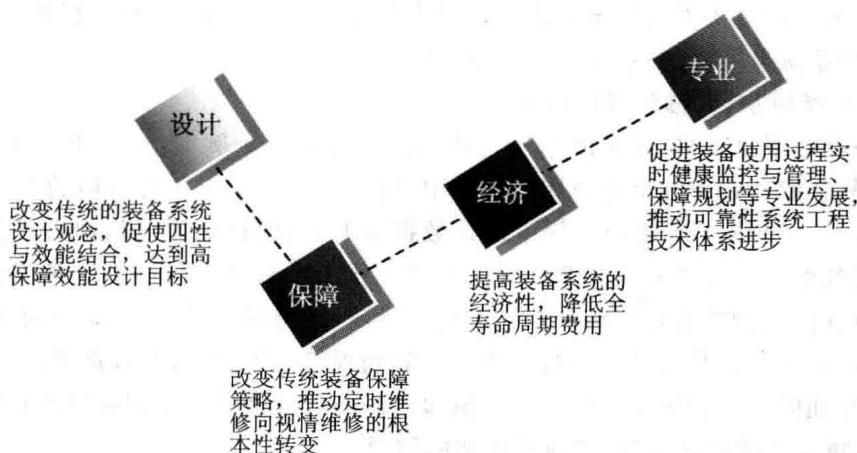


图 1-3 PHM 对我国航空发展的作用

1.2.2 PHM 实现目标的技术途径

从历史观点上说,预测技术不仅仅是科学技术,还具有一定的魔幻色彩。本质上,预测功能从根本上提高了 PHM 的故障诊断能力,使之在故障诊断、隔离、分类及趋势分析方面大有

改进,但改进程度还依赖于故障诊断系统的品质。

从操作人员、维修人员或者后勤人员及用户的观点来考虑,预测与诊断的区别在于:预测能够在设备寿命结束之前或者故障发生之前执行合适的维修工作。因此 PHM 的预测功能保证了在故障事件发生前有充足的时间进行有效的维修。

如何选取预测方法是 PHM 的重要环节。本质上,任何能够有效提供预测的方法都能满足用户需求。因此预测方法可以很简单,也可能很复杂。例如简单的性能退化趋势法,更传统的使用寿命预测,基于物理模型、传感器驱动、故障萌生的增广模型及其他方法。

当前综合 PHM 系统包括了很多功能。尽管这些实用的功能都很先进、准确,但其中大部分是通过诊断系统发展演变而来的。结合健康管理的基本原理,PHM 系统使用这些实用的功能来互相补充,使得其功能更为强大,更利于提高维护的效益。

尽管在 PHM 系统的发展中,针对某个特定平台,大部分实用功能会并行发展并互相补充,然而实际中的预测、预报却表现出一种新的、艰难的、有时“冒险”的技术性能。

为了理解预测的作用,我们必须了解诊断和预测能力之间的关系。清楚早期的故障及其发展历程就是了解两者之间关系的途径之一。图 1-4 展示了因故障导致失效的发展历程。该历程开始于一个新的功能正常元件,随后经历一段潜在故障发展的时间,并在持续使用状态下,达到元件或系统失效状态后仍然继续运行中,造成系统毁坏并导致灾难性后果的发生。

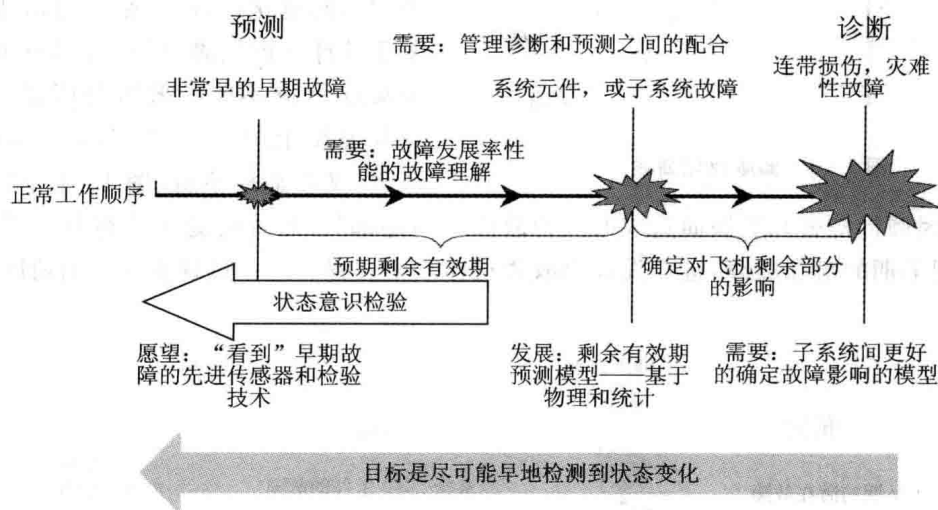


图 1-4 故障失效发展历程

传统诊断主要应用于系统、部件的初始检测,以及子系统或复杂系统灾难性的故障诊断。目前,尽管诊断技术能检测更早期的潜在故障,但为了最大程度地提高系统或子系统元器件寿命,获得最佳经济性,通常会推迟维修直到潜在故障发生的可能性增大,却未发生实际失效之前进行,预测的技术范围为相当早的时期的潜在故障和实际系统或元件失效状态之间的区域。

如果操作者能发现潜在故障存在,并希望系统和/或元件可以继续运行,此时需要掌握器件的剩余寿命以确保安全完成任务。这是实际预测的具体应用,能够为具体系统或元件准确地预测剩余使用寿命。

为了确保能够准确预测剩余寿命,在预测工具箱里需要有很多方法。在当前的诊断中,有时是利用传感器提供足够多的预测状态信息输入,而有时则需要采用先进的传感器或其他早