JIZAI PHM XITONG CHUANGANQI YOUHUA PEIZHI FANGFA JI YINGYONG

机载 PHM 系统传感器优化配置方法及应用

李颖晖 朱喜华 袁国强 李 勐 ◆ 著

国防科技大学出版社
National University of Defense Technology Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

机载 PHM 系统传感器优化配置方法及应用

李颖晖　朱喜华　袁国强　李　勐　著

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目（CIP）数据

机载 PHM 系统传感器优化配置方法及应用/李颖晖等著．—长沙：国防科技大学出版社，2018.12
ISBN 978-7-5673-0535-9

Ⅰ.①机… Ⅱ.①李… Ⅲ.①机载设备—传感器—优化配置—研究
Ⅳ.①V217

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 237734 号

国防科技大学出版社出版发行
电话：(0731)84572640 邮政编码：410073
责任编辑：罗 燕 责任校对：袁 媛
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装
*
开本：710×1000 1/16 印张：12.5 字数：242 千
2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数：1-800 册
ISBN 978-7-5673-0535-9
定价：35.00 元

前　言

随着科学技术的突飞猛进，航空航天、工业应用和国防等各领域中大型复杂系统的性能不断提高，其复杂度和集成度也越来越高，维修保障问题日益突出，传统的事前保障及事后保障模式已不能满足现代故障诊断任务的需求，系统的可靠性及维修保障等问题越来越受到各国科研及工程技术人员的重视。在这一背景需求下，从可靠性、安全性和经济性等方面考虑，一种综合的故障检测、诊断、隔离、预测及健康管理技术——故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management，PHM）应运而生并不断发展，在航空航天和国防等领域逐步得到应用和发展，并显露出巨大的发展潜力和应用前景。

故障检测、诊断和预测等 PHM 系统功能的实现依赖于各种先进的算法和传感器所采集到的状态参数，合理的传感器选择、布局、安装和优化对信息的准确获取起着决定性作用，而且故障诊断和预测等性能在很大程度上也取决于算法运行所用数据的全面性和准确性，即与系统所安装传感器的类型、数量和位置密切相关。因此，一个高效的 PHM 系统不仅需要成熟先进的故障诊断及预测等各种算法，而且需要一个相应的优化的传感器配置。然而通过查阅文献发现，人们对 PHM 技术的研究基本都是默认传感器已经配置好且是最优状态，而把关注重点放在如何提高故障诊断和故障预测等各种算法的性能及其性能的改进上，传感器优化配置这一基础性问题却没有得到应有的重视。目前，以故障诊断为目的的传感器选择/配置研究，大多是定性分析，没有做具体深入的定量研究，不能为用于故障诊断的传感器优化配置提供系统的理论指导。此外，目前用于故障诊断的传感器优化配置只是作为一个开环问题来研究，没有把故障诊断及预测性能进行反馈构成闭环，以改进或验证传感器优化配置的效果。

机载系统包含众多的子系统，故障模式众多且相互影响，要对其应用 PHM 技术就需要安装数量庞大的传感器监控系统的各类参数，然而由于经济、技术和空间限制等原因，并非所有的参数都能安装传感器进行测量，而且传感器的可靠性也不能保证，因而传感器能否最优地配置对 PHM 系统功能的有效实现具有至关重要的作用。测量变量选择不同，获得信息的充分程度可能完全不一样，从理论上讲，传感器数量越多所获取的系统状态信息就越完整，故障诊断效果也会越好，然而随着传感器数量的增加，系统所需相应设备也会增加，大大增加系统的复杂性并降低其可靠性，而传感器数目冗余和测试点选择不当会对系统自身的性能产生一定的负面影响。因此，在满足系统测试性和诊断性等指标要求的条件下，研究机载 PHM 系统传感器优化配置的理论和方法，选择给系统最关键的参数配置合适数量的传感器以对其运行状况进行监测，是 PHM 系统的一项关键技术，对其进行系统深入的研究具有十分重要的理论意义及工程实用价值。

本书从定性描述和定量计算两个方面全面阐述了 PHM 系统传感器优化配置的相关理论和方法，包括 PHM 系统的传感器选择方法、PHM 系统传感器配置的建模及求解算法、基于传感器优化配置的故障诊断，传感器自身故障的诊断，传感器优化配置在机载 EHA 系统中的应用，以及机电作动系统的故障诊断、故障预测和健康状态评估等内容，基本涵盖了 PHM 领域相关的内容，可为从事 PHM 相关工作的广大教学科研人员、科技工作者和相关工程技术人员提供有益的参考和借鉴。

尽管作者力求使本书能更好地满足读者的要求，但因内容涉及面宽，作者知识水平受限，缺点和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第一章　绪　论

§1.1　PHM 的内涵、功能和关键技术 ……（1）
§1.1.1　PHM 的内涵和功能 ……（1）
§1.1.2　PHM 的关键技术 ……（4）
§1.2　PHM 的研究现状和发展趋势 ……（6）
§1.2.1　PHM 的研究现状 ……（6）
§1.2.2　PHM 的发展趋势 ……（7）
§1.3　传感器优化配置的研究现状……（8）
§1.4　本书内容及结构……（14）

第二章　PHM 系统传感器选择方法

§2.1　PHM 系统传感器选择的总体思路 ……（17）
§2.2　扩展式故障模式影响及危害分析……（18）
§2.2.1　aFMECA 方法描述 ……（19）
§2.2.2　aFMECA 在 PHM 中的应用 ……（20）
§2.3　PHM 系统传感器选择的考虑因素 ……（22）
§2.4　传感器选用的一般原则……（27）
§2.5　本章小结……（29）

第三章　PHM 系统传感器配置的建模及求解

§3.1　PHM 系统传感器优化配置体系结构设计 ……（30）
§3.2　传感器与系统故障模式关系的描述……（32）

§3.3 传感器的故障检测能力分析……（34）
§3.4 PHM 系统传感器配置模型的建立 ……（38）
§3.4.1 目标函数……（38）
§3.4.2 约束条件……（39）
§3.5 PHM 系统传感器优化配置模型的求解算法 ……（42）
§3.5.1 粒子群算法的基本原理……（43）
§3.5.2 粒子群算法的收敛性分析 ……（44）
§3.5.3 粒子群算法的改进策略……（49）
§3.5.4 改进粒子群算法的收敛性分析……（51）
§3.5.5 改进粒子群算法性能检验……（52）
§3.6 仿真应用……（56）
§3.7 本章小结……（59）

第四章 基于传感器优化配置及非线性观测器的故障诊断

§4.1 线性矩阵不等式及 Schur 补引理 ……（61）
§4.2 基于观测器的故障诊断方法的基本原理……（63）
§4.2.1 残差生成……（63）
§4.2.2 残差评价……（65）
§4.3 基于传感器优化配置的故障诊断问题描述……（66）
§4.4 鲁棒故障检测观测器的设计……（68）
§4.5 算法步骤及仿真应用……（76）
§4.5.1 算法步骤……（76）
§4.5.2 仿真应用……（78）
§4.6 本章小结……（86）

第五章 基于自适应 KPCA 的传感器故障诊断

§5.1 传感器的故障类型及其测量模型……（87）
§5.2 基于主元分析的故障诊断原理……（91）
§5.2.1 PCA 的算法原理 ……（92）
§5.2.2 基于 PCA 的故障检测及隔离 ……（93）
§5.3 基于自适应 KPCA 的传感器故障诊断……（95）

§5.3.1 KPCA 的算法原理 …… (95)
§5.3.2 改进标准化处理 …… (97)
§5.3.3 自适应核函数的确定 …… (98)
§5.3.4 基于自适应 KPCA 的故障检测及隔离 …… (99)
§5.4 仿真应用 …… (102)
§5.5 本章小结 …… (110)

第六章 传感器优化配置在机载 EHA 系统中的应用

§6.1 EHA 系统的结构原理及数学模型 …… (111)
§6.1.1 EHA 的结构原理 …… (111)
§6.1.2 EHA 的数学模型 …… (112)
§6.2 EHA 系统的传感器配置优化设计 …… (118)
§6.3 基于传感器优化配置和非线性观测器的 EHA 系统故障诊断 …… (121)
§6.4 基于自适应 KPCA 的 EHA 系统传感器故障诊断 …… (129)
§6.5 本章小结 …… (133)

第七章 基于经验模式分解的机电作动系统故障诊断

§7.1 机电作动系统简介 …… (134)
§7.1.1 机电作动系统结构原理及功能描述 …… (134)
§7.1.2 机电作动系统扩展式故障模式影响及危害分析 …… (136)
§7.2 非平稳信号处理方法简介 …… (139)
§7.3 EMD 的基本理论及算法 …… (142)
§7.3.1 瞬时频率和本征模函数 …… (142)
§7.3.2 基于 EMD 的 HHT 变换 …… (144)
§7.4 EMD 算法的改进 …… (145)
§7.4.1 端点效应的处理 …… (146)
§7.4.2 局部均值的求解 …… (147)
§7.5 基于改进 EMD 算法的机电作动系统故障特征提取 …… (149)
§7.5.1 基于改进 EMD 算法的故障信号预处理 …… (149)
§7.5.2 基于改进 EMD 算法的故障信号时频分析 …… (150)

§7.5.3 本征模能量特征向量提取……（153）
§7.6 本章小节……（154）

第八章 机电作动系统故障预测及健康状态评估

§8.1 预测技术简介……（155）
§8.1.1 参数模型预测法……（155）
§8.1.2 非参数模型预测法……（156）
§8.2 灰色预测理论……（157）
§8.3 支持向量机……（161）
§8.3.1 支持向量机的基本理论……（161）
§8.3.2 最小二乘支持向量机(LS-SVM) ……（164）
§8.4 基于灰色－最小二乘支持向量机的机电作动系统故障预测
……（165）
§8.5 基于 EMD 奇异值熵的机电作动系统健康状态评估 ……（169）
§8.5.1 信号的奇异值分解……（169）
§8.5.2 信息熵理论……（170）
§8.5.3 健康指数……（171）
§8.6 本章小结……（174）

结 语……（175）

参考文献 ……（179）

第一章 绪 论

§1.1 PHM 的内涵、功能和关键技术

§1.1.1 PHM 的内涵和功能

PHM 是指利用尽可能少的传感器采集系统各种必要的状态信息(如温度、压力、流量、湿度、电压和电流等),借助各种先进算法(傅里叶变换、小波分析、D-S 证据理论等)和智能模型(神经网络、模糊逻辑和专家系统等)来对系统的健康状况进行监控、预测和管理,是机内测试(BIT)能力和状态监控技术的进一步延伸和拓展。PHM 是一种综合的故障检测、隔离、预测和健康管理的技术,它的引入不仅仅是为了消除故障,更是为了了解和预测何时可能发生故障,使得人们在系统尚未发生完全故障之前就能依据系统当前的健康状况决定何时维修,从而实现自主式保障、降低使用和保障费用等目标[1]。

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,从反应式的通信转向在准确时间对准确部位进行准确维修的先导式活动;也代表一种维护策略和概念的转变,实现了从传统基于传感器的诊断向基于智能系统的预测的转变,从而为在准确的时间对准确的部位进行准确而主动的维护活动提供技术基础[2]。PHM 在不同领域中的应用技术和方法不尽相同,但其基本思想是类似的,视情维修的开放体系结构(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM)综合了这些 PHM 系统共同的设计思想、应用技术和方法,如图 1.1 所示。

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内时,判断未来某时刻故障是否发生。它除了判断有无故障以外,还要判断故障的类型,以便事先采取合理的补救措施预防系统的完全故障。因此 PHM 还包含故障定位和隔离以及故障诊断等内容。PHM 研究的对象是故障发生的征兆,因此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,它所研究的故障征兆幅值一般都很小,容易混杂在系统的噪声中,

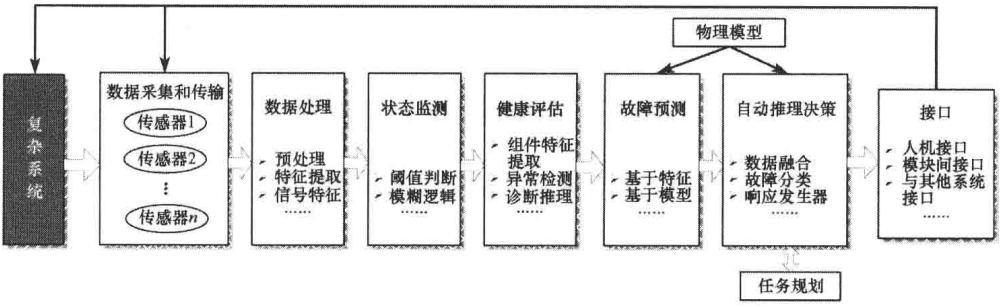

图 1.1　视情维修的开放体系结构

因此它相比故障检测对鲁棒性的要求也更高。

PHM 采用开放系统结构，其核心是利用先进传感器的集成，借助各种算法（如快速傅里叶变换、离散傅里叶变换等）和智能模型（如专家系统、神经网络、模糊逻辑等）来预测、监控和管理系统的健康状况，是机内测试能力（BIT）和状态监控技术的进一步拓展[3-6]。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、元件级故障诊断、人机接口等组成。新一代飞机的 PHM 系统主要分为机载实时诊断与预测、飞机状态报告和记录、地面诊断及自主式后勤三个部分，如图 1.2 所示。以飞机为例，通常情况其 PHM 系统应具有以下功能[7]。

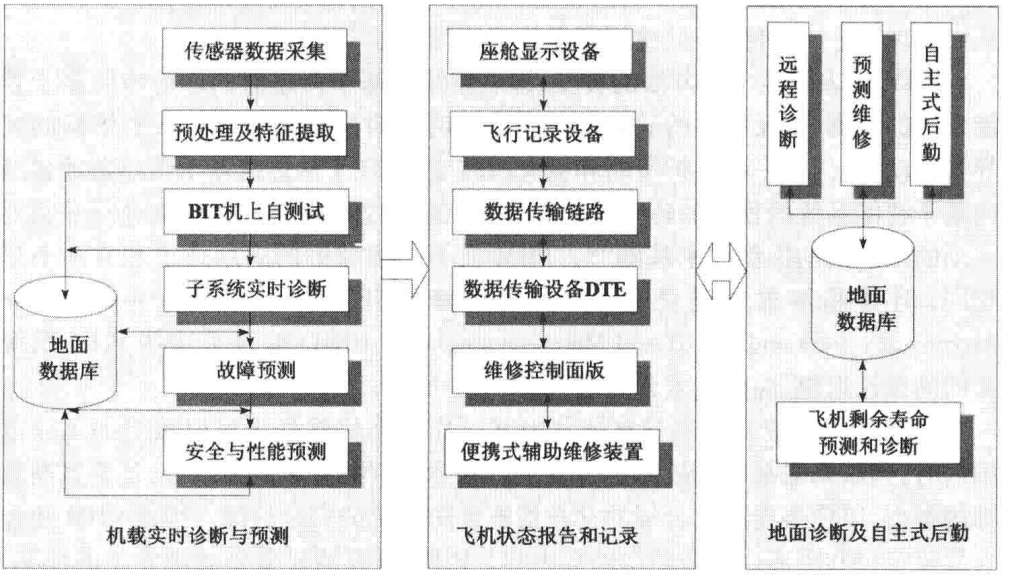

图 1.2　新一代飞机的 PHM 体系结构

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(1)子系统实时状态监测与诊断

通过传感器对飞机系统中的部件、子系统的状态进行实时采集,实现系统的故障机上自测试和诊断。

(2)系统实时故障诊断

通过系统模型、推理、相关和信息融合在 BIT 结果的基础上进行进一步诊断,增强子系统和系统的诊断能力。将故障定位到外场可更换模块,给出模块的故障情况(正常、故障、可疑、未知),并根据系统情况实现系统重构。

(3)故障预测

故障预测的目的是尽可能早地检测系统发生的状态变化,实现诊断和预测,防止故障的升级,保证系统的安全性。

故障发展的时间特性分为三个阶段:第一阶段表现为元部件性能发生变化,出现早期故障特征;第二阶段发展为系统、部件或子部件故障;第三阶段发展为系统部件的二次损伤导致灾难性故障。要实现故障的预测预报,在第一阶段需要用先进的传感器和检测技术检测早期的初始故障;在第二阶段需要进行诊断和预测,了解故障发展的速率特性;在第三阶段需要有效的基于物理的和统计的剩余寿命预测模型,以及确定故障对系统影响的模型。

(4)飞行安全和系统性能预测

根据飞机系统实时故障诊断和预测结果,对飞行安全和系统性能进行预测,并及时向飞行员提供显示和报警信息,辅助飞行员决策。

(5)数据传输链路

为了将机载状态实时监测、诊断和预测信息及时反馈给地面远程诊断和维修保证系统,需要解决空中和地面之间的数据传输问题,同时需要解决其信息传输的保密性问题。

(6)地面远程故障诊断

以机载实时诊断和预测结果为基础,同时结合维修信息和专家知识等,实现融合诊断,对空中诊断结果中的未知故障和可疑模块进行进一步诊断,为维修和保障系统提供信息。

(7)预测维修

根据实时诊断和预测结果以及地面远程诊断结果,安排维修计划。预测维修就是根据对飞机系统的故障诊断和预测结果信息、维修历史信息、维修过程信息以及任务规划信息的综合情况,进行维修需求预测,做出维修计划安排,包括维修过程所需的零部件、人员、设备以及维修技术等。其中,对飞机系统所进行的实时和远程故障诊断及故障预测是基础,预测模型和方法是关键。

(8)自主式后勤

根据实时诊断、预测结果、地面远程诊断结果和维修计划来预测保障需求,如备件需求、库存预测、订单预测等。

(9)综合诊断数据库

综合诊断数据库用来对 BIT 信息、系统实时诊断结果信息、故障预测信息、远程诊断结果信息、维修信息、后勤保障信息以及系统的模型信息、地面测试信息、飞行员反馈信息、系统设计信息等进行管理。为包括空中诊断、地面诊断、维修、保障等在内的综合故障诊断过程的所有环节提供信息共享。

(10)交互式辅助维修及训练

在综合诊断数据库信息的基础上,实现交互式辅助维修和维修过程的技术培训,可进行维修过程的指导和信息记录,以及模拟真实故障及其维修过程,进行维修人员的自适应训练。

§1.1.2 PHM 的关键技术

PHM 的关键技术主要包括以下几个方面[8]。

(1) 先进的传感器和嵌入式测试诊断技术

PHM 要求传感器体积小、重量轻,能够适应复杂的工作环境,有良好的抗电磁干扰能力等。例如光纤传感器、无线传感器等就属于常用的先进测试传感器。这些传感器的性能比传统传感器更为优越,从而为 PHM 功能的实现提供更为准确的数据。嵌入式系统是一种软硬件可以裁减的特殊计算机系统,用于实现测试、控制和管理等,能够对设备的状况进行监测,并具有检测、诊断和隔离故障的能力。为更好地将嵌入式系统应用于 PHM 技术之中,在装备研制初期就要充分考虑其可测试性设计[9]。

(2) 预测技术

预测是指对故障的征兆进行检测和监控,并对设备的剩余使用寿命进行不间断地预计。当被监控对象可能出现早期故障、微小故障,或系统性能逐渐降级到不能完成其功能时,设计预测系统来检测被监控对象出现的早期故障、微小故障或系统的性能降级,并及时采取措施进行处理。

(3) 信息融合技术

信息融合是为获得更准确的推论结果而采取的协作或竞争方式,其最终目的是为了提高故障预测推理和健康评估的准确性,并确定推理结果的置信度,一般分为三个层次的数据融合:第一层次是直接根据传感器采集到的数据进行融合以提取特征信息;第二层次是将提取到的特征信息作进一步融合,提取出可用

于故障诊断的信息;最高层次信息融合是将基于经验的信息(如历史故障率)与基于信号的信息进行融合。

(4) 数据仓库和数据挖掘技术

数据仓库用于存储海量信息,可对有用信息进行分类和提取,从而为具体的应用提供决策支持,数据挖掘技术则是用于从海量数据中自动地提取变化、关联、模式和有意义的结构,其改善模型可应用于 PHM 中。

(5) 接口技术

PHM 技术的广泛应用是系统或设备研发的必然趋势,即使在同一个系统或设备的内部也可能会出现不同级别的 PHM 系统。这就要求 PHM 系统的体系结构是开放性的,即具有"即插即用"的功能,既可以对其进行不断的更新或加入新的模块,又可以与其他系统进行信息交换或集成。PHM 系统的接口技术包括以下几个方面[10]:PHM 系统内部不同的模块之间,各子模块与 PHM 系统之间,部件级 PHM 与系统级 PHM 之间,PHM 系统与其他计划、库存、决策支持以及维修系统的接口之间,人 - 机接口等。

(6) 智能推理与决策支持技术

PHM 系统的终极目的是实现"管理",结合各种可利用的资源,根据故障预测和健康评估的结果,为操作人员提供有关维修保障决策的信息,最终实现系统的视情维修。为此,就要建立 PHM 系统的维修保障决策支持系统,并基于该系统对维修资源进行统一调配,自动生成维修决策信息等。建立决策支持系统的主要技术有仿真技术、专家系统和多 Agent 技术等[9]。

(7)传感器优化配置技术

PHM 是一门包含故障诊断、预测和健康管理的综合技术,而故障诊断、预测等功能的实现不仅依赖于各种先进的算法,也离不开传感器所采集的状态参数。参数的全面性和准确性对于 PHM 系统功能的实现具有重要的影响,合理的传感器选择和配置对信息的准确获取起着决定性作用。安装的传感器数量越多,获得的系统状态信息越详尽,但过多的传感器反而会增加系统的复杂性,并降低其可靠性。如何给系统最关键的变量(参数)配置合适数量的传感器是一个复杂的系统性问题,是 PHM 系统的关键技术之一,也是本书的主要研究内容。

§1.2 PHM 的研究现状和发展趋势

§1.2.1 PHM 的研究现状

航天领域是 PHM 的发源地，早在 20 世纪 70 年代，美国就提出了航天器综合健康管理(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)的概念。美国军方于 1998 年首次提出 PHM 技术的概念，它要求能够预测系统的故障并对系统的健康状况进行管理，首先应用在陆军装备的直升机上。目前，在美国、英国、新加坡和以色列等国的直升机上已广泛应用了 PHM 技术，并演变成健康与使用监控系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)的集成应用平台。美国国防部门和各军种先后开发出飞机状态监测系统(Aircraft Condition Monitoring System, ACMS)、综合诊断预测系统(Integrated Diagnosistics and Prognostics System, IDPS)、发动机监测系统(Engine Monitoring System, EMS)和海军的综合状态评估系统(Integrated Condition Assesment System, ICAS)等大量使用 PHM 技术的系统[9]。其中，美军 F-35 JSF 上的 PHM 系统是最高水平的应用，代表了基于状态的维修(Condition-Based Maintenance, CBM)应用的最高水平。目前，PHM 技术已成为美国国防部武器采购的一项基本要求。

在民航飞机、桥梁、汽车和核电站等民用领域 PHM 也获得了广泛的应用，名副其实地成为一种军民两用技术，在民用航空领域 PHM 的应用尤为突出。据波音公司初步估计，使用飞机状态管理(Aircraft Health Management, AHM)系统可使航空公司节省约 25% 因航班延误或取消而导致的费用，并提高飞行安全和航班运营效率[11]。美国国家航空航天局(NASA)兰利研究中心与美国航空无线电通信公司(ARINC)开展合作，开发了飞机状态分析与管理系统(Aircraft Condition Analysis and Management System, ACAMS)，该系统在 NASA 的 B757 飞机上进行了飞行试验，并已申请美国专利。

近年来，与 PHM 技术相关的学术交流活动也非常活跃，Honeywell、Impact Technologies 等国际知名企业都相继开展了 PHM 理论、技术、软件以及应用方面的研究。国际宇航"综合系统健康工程和管理"(航天领域的 PHM)被 NASA 作为一门新的学科推出；美国圣地亚国家实验室与美国国防部、能源部和学术界等单位合作，建立了预测与健康管理创优中心，用于支持 PHM 技术的开发、试验及确认；马里兰大学成立了预测与健康管理联合会，致力于电子预测与管理方法的研究和培训；美国、欧洲和日本也相继召开关于电子预测技术的 PHM 研讨会；

IEEE Reliability Society、IEEE Aerospace and Electronic System Society 以及其他 PHM 协会、组织等每年都定期召开国际会议、技术讨论会或专项技术交流会，积极探索和推动 PHM 技术的发展[12]。

国内在 PHM 方面也开展了较为广泛的研究工作，其中北航可靠性工程研究所的工作开展得较早，但由于起步较晚，加上国外对该技术进行了严密的封锁等原因，国内的研究缺乏系统、深层次的规划和探索，与我国新一代飞机研制的迫切需求还相差较远。PHM 研究主要集中在航空航天、船舶和兵器等复杂高技术装备领域，以高校和研究院所为主体，主要集中于体系结构、关键技术、智能诊断和预测算法，以及测试性和诊断性等方面的研究。虽然在三代机的设计中进行了积极的尝试，但是总体的应用研究规模和水平仍然相对落后，各机构的研究能力和水平参差不齐，行业或技术领域专业研究组织薄弱[12]。可以说，国内 PHM 的研究目前仍处于起步和探索阶段。

§1.2.2 PHM 的发展趋势

PHM 技术的发展经历了故障诊断、故障预测、系统集成三个日益完善的阶段。当前，PHM 技术的发展体现在以系统级集成应用为牵引，提高故障诊断与预测的精度，扩展健康监控的应用对象范围，以及支持基于状态的维修(CBM)和自助式保障(AL)的发展[13]。

在 PHM 系统集成应用方面，主要体现在以下几个方面：采用并行工程的原则，与被监控对象同步进行 PHM 的框架和细节设计；定量地对 PHM 的性能进行评价与验证；针对故障预测的不确定性，进行风险 - 收益分析，实现容忍不确定性的保障决策。在提高故障诊断与预测精度方面，主要体现在：研究混合故障预测算法和智能数据融合技术，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，不断寻求高信噪比的健康监控途径；研究灵巧、鲁棒性强的先进传感器和传感器布局，提高数据源阶段的精度。在扩展应用对象范围方面，主要体现在：向电子产品故障预测的扩展，即与故障预测技术相结合，提升 BIT 能力，减少不能复现(CND)故障，降低虚警率(FA)；实现寿命消耗监控(LCM)不确定性的定量评价，并与故障征兆技术相结合，提高寿命消耗监控的置信度等。

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。PHM 成为国外新一代先进飞机研制和实现自主式保障的一项核心技术，是 21 世纪提高复杂系统可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性和降低寿命周期费用的一项非常有前途的军民两用技术。

§1.3 传感器优化配置的研究现状

传感器最优配置问题的研究最早出现在 20 世纪 70 年代，主要集中在控制领域，用于确定可控/被控变量以达到系统的控制目标，以及状态估计、数据调和、可靠性分析等[14]，其最终目的是为系统的控制提供充足的信息。可控变量的选择主要根据系统的要求确定[15]，具体包括：①非自我调节变量；②涉及环境和设备安全的关键变量；③表征系统性能的关键变量；④与其他可控变量关系密切；⑤有明显的静态和动态特性。Lambert 最早研究了传感器的最优配置问题[16]，根据故障树分析方法确定最优的传感器安装位置。文献[17]研究了流程网络的传感器网络设计问题，通过图论的方法确保重要变量的可观测性。Madron 利用生成树(Spanning Tree)的方法获得使线性系统成本最低、测量精度最大的传感器配置，通过 Gauss-Jordan 消除法寻找需要测量的最少变量数，在确保系统可观测性的同时使传感器成本最小化，并通过校验生成树到初始结构的距离得到次优解[18]。文献[19]提出了一种改进的生成树算法，在提高搜索效率的同时得到问题的最优解。Giraud 等研究了过程数据融合、移动机器人视觉系统等自动任务系统的传感器优选问题[20]。文献[21]研究了反馈控制的传感器优化配置问题。Al-Shehabi 和 Newman 根据跟轨迹原理研究了传感器的最优位置，并将其用于航空飞行器的反馈控制[22]。Chen 和 Li 研究了机器人侦查视觉导航的传感器优化配置技术[23]。NASA 航行器变体项目计划中的部分内容就是确定主动控制部件(如压电作动器)的最优数量及其布置问题。在该项目中，Padula 和 Kincaid 对以往传感器/作动器的优化配置问题进行了回顾，总结了不同应用领域中传感器/作动器优化配置的研究情况[24]。

在目标跟踪、故障检测和可靠性分析等领域也有传感器最优配置的研究。这些研究主要用于系统的故障检测和诊断，其目标是寻找满足系统的故障检测和诊断性能的传感器组，要求对系统各部件发生的故障都具有检测能力，并能准确识别所发生的故障类型而不发生误判。文献[25]基于对变量冗余度和系统模型的结构分析，以确保传感器的故障检测和隔离为目标，用周期矩阵分析和混合整数规划的方法求解传感器的优化配置问题。Bagajewicz 等对用于故障检测和隔离(Fault Detection and Isolation, FDI)的传感器配置研究情况进行了回顾和总结，指出基于模型的 FDI 仍然是一个开放性的问题[26]，之后相继有学者在该领域做了不少的研究工作[31-37]。文献[32]提出了一种基于传感器递增策略的配置方法，该方法从结构角度分析系统的物理模型，并且考虑了系统的故障诊断

需要全本请访问 www.ertongbook.com