

# 故障预测与健康状态管理技术综述

郭阳明<sup>1</sup>, 蔡小斌<sup>1,2</sup>, 张宝珍<sup>3</sup>, 翟正军<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2. 中航一集团科技委, 北京 100068;

3. 中国航空工业发展研究中心, 北京 100068)

**摘要:** 故障预测和健康状态管理 (PHM) 技术是新一代武器系统的先进测试、维修和管理技术, 也是一种全面的故障检测、隔离和预测及状态管理技术, 正在成为新一代武器系统设计和使用中的一个重要组成部分; 论文首先综述了 PHM 技术的内涵、工作原理以及该技术的功能与作用, 然后对 PHM 技术涉及到的关键技术进行了详细的介绍, 最后展望了该技术的发展趋势以及对我国国防工业的借鉴意义。

**关键词:** 故障预测与健康状态管理; 测试; 维修; 管理

## Review of Prognostics and Health Management Technology

Guo Yangming<sup>1</sup>, Cai Xiaobin<sup>1,2</sup>, Zhang Baozhen<sup>3</sup>, Zhai Zhengjun<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Committee of Science and Technology, China Aviation Industry Corporation I, Beijing 100068, China;

3. Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100068, China)

**Abstract** Prognostics and health management (PHM) technology is not only an advanced technology of test, maintenance and management for new generation of weapon system, but also an all-round technology of fault detection, isolation and prognostic and health management. PHM technology is becoming one of the most important parts of design and usage of new generation of weapon system. An overview of connotation, working principle and function of PHM technologies are given first, and then we introduce the key technologies related to PHM in detail. Lastly we prospect the development directions of PHM technology in the future and point out significance to the development of national defence industry.

**Key words:** prognostics and health management; test; maintenance; management

## 0 引言

现役武器装备在使用中普遍存在着虚警率较高, 能复现率、台检可工作率、重检合格率较低等问题, 导致其诊断和修复时间过长, 备件和测试设备以及计划维修次数过多, 使武器装备使用和保障费用大大超出采购成本<sup>[1-2]</sup>。同时, 各国国防预算又不同程度地缩减, 因此, 经济承受性成为各国军方关注的焦点。在这样的背景下, 美国军方提出了针对新一代武器系统的先进测试、维修和管理技术——预测与健康状态管理 (prognostics and health management, PHM)。

PHM 是一种全面故障检测、隔离和预测及健康管理技术<sup>[3]</sup>。它的引入不是为了直接消除故障, 而是为了了解和预报故障何时可能发生; 或在出现始料未及的故障时触发一种简单

的维修活动, 从而实现自助式保障, 降低使用和保障费用的目标。

PHM 技术采用先进的传感器, 借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理武器系统的工作状态。该技术最大程度地利用传统的故障特征检测技术, 并综合先进的软件建模, 来获得虚警率几乎为零的精确故障检测和隔离结果。PHM 技术的应用能够显著提高对复杂系统的工作状态的了解, 进而提高复杂武器系统的任务可靠性和安全性。

预测和健康管理正在成为新型复杂武器系统设计和使用中的一个组成部分。本文对 PHM 的内涵、工作原理、功能与作用, 以及 PHM 涉及的关键技术进行了详细的论述和分析。

## 1 PHM 的内涵

PHM 系统采用开放系统结构, 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) 和智能模型 (如专家系统、神经网络、模糊逻辑等) 来预测、监控和管理武器系统的健康状态, 是 BIT 测试和状态监控技术的进一步拓展<sup>[4-8]</sup>。

故障预测, 即预计诊断部件或系统完成其功能的结果, 预计部件的性能下降或临近故障情况, 包括确定部件的残余寿命或保持正常工作的时间长度, 便于维修人员根据其实际状况来更换部件; 状态管理则是根据诊断/预测信息、可用资源和使用需求, 对维修活动做出适当的规划和决策<sup>[9-10]</sup>。

PHM 代表了一种方法的转变, 即从传统的基于传感器的

收稿日期: 2007-12-09; 修回日期: 2008-01-21。

基金项目: 国防“十一五”基础研究 (B2720060300); 航空科学基金资助项目 (2007ZD53040); 西北工业大学青年科技创新基金资助项目 (W016231); 西北工业大学研究生创业种子基金资助项目 (Z200753)。

作者简介: 郭阳明 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事计算机测控、故障诊断与预测、智能信息处理等方向的研究。

蔡小斌 (1957-), 教授, 博导, 中航一集团科技委副秘书长, 兼任国家国防科技工业局基础科研计划试验与测试技术专家组组长, 中国航空学会测试分会副主任委员, 曾获得国家科技进步奖二等奖一次, 航空航天部科技进步奖一等奖一次, 二等奖一次, 航空工业总公司科技进步奖二等奖一次, 三等奖一次, 陕西省优秀教师, 航空航天部优秀教师, 陕西省劳动模范, 主要从事测试技术方向的研究。

诊断转向基于智能系统的预测,反应式的通信转向在准确时间对准确的部位进行准确维修的先导式活动<sup>[11]</sup>。其目的是减少维修人力、增加出动架次、实现自主式保障。美国F-35联合攻击机(joint strike fighter, JSF)的PHM方案<sup>[12]</sup>如图1所示。

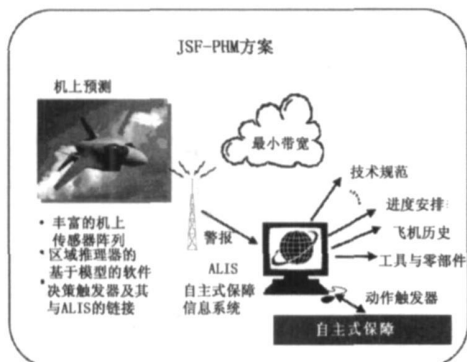


图1 JSF的PHM方案

该技术的实现将使由事件主宰的维修(即事后维修)或时间相关的维修(即定期维修)被基于状态的维修(即视情维修)所取代<sup>[13-14]</sup>。

## 2 PHM的工作原理

F-35联合攻击战斗机的PHM用于机载信息的监控、存储、传送以及故障的预测与诊断,是一种综合运用由多种诊断和预测技术构成的部件、分系统和系统级状态监控策略的一体化建模结构。它采用基于人工智能的方法,将来自传感器或BIT的数据传给事先已构造和训练好的智能推理机软件,智能推理机利用基于模型的推理、神经网络和模糊逻辑之类的智能数学模型来模仿物理系统的工作状态,对各个分系统和整个系统即将发生的故障进行检测和隔离,并根据部件或分系统当前的诊断状态和现有使用数据来预计其未来的健康状况和故障模式。JSF PHM的工作原理如图2所示。

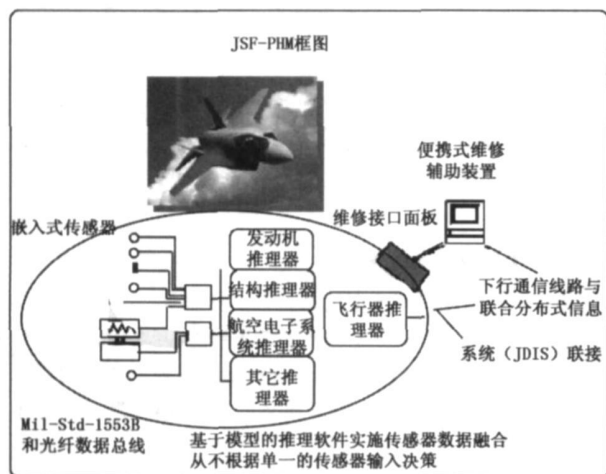


图2 JSF PHM的工作原理

PHM结构综合了机上和机下有关组元<sup>[15-16]</sup>,分为3个层次。最低层是分布在飞机各分系统部件中的软、硬件监控程序;中间层为区域管理器;顶层是飞机平台管理器。最底层作

为识别故障的信息源,将有关信息直接传送给中间层的区域管理器。机下PHM则包括区域管理器和平台管理器。机载PHM的结构体系如图3所示。

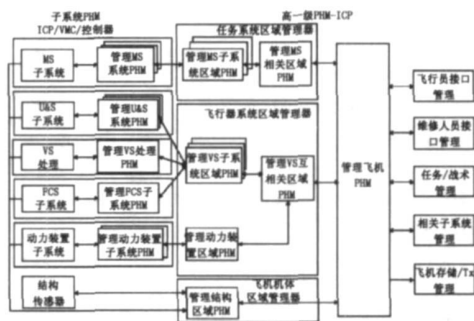


图3 机载PHM的结构体系

PHM采用的分层智能推理机构,在多个层次上采用多种类型的推理机,并利用更多判据查明原因,以便最大限度减少对单个传感器和算法的依赖,提高故障隔离的准确性,减少虚警。

在区域级和飞机平台级,机上和机下PHM都可完成以下类型的推理。

(1) 诊断推理:对监控的结果和其他输入进行评估,确定所报告故障的原因和影响。诊断推理机由一套算法组成,采用模型对故障的输入信息进行评估。这些模型可确定失效模式、监控信息和故障影响之间的关系。

(2) 预测推理:确定飞机正朝某种已知的故障状态发展及相关的潜在影响。在许多情况下,机上预测处理主要是收集数据,机下处理则是根据机队信息和趋势情况完成预测推理。

(3) 异常推理:通过识别原来未预料到的情况,帮助改进飞机设计。机上处理主要是检测异常情况和收集相关数据;机下处理则是判断所发现的异常是已知的故障状态,还是需要研究的新情况。

推理机信息管理器综合上述3种推理机的结果,形成报告,确定已检测出和预测出的故障及其对任务的影响。

## 3 PHM的功能

PHM技术的迅速发展导致了维修和保障模式从状态监控向状态管理的转变,JSF借助由这种转变引入的故障预测能力来识别和管理故障的发生。

JSF的PHM能诊断飞机自身的健康状况,确定飞机当前的任务能力;能在事故发生前预测故障,确定在何时以何种方式与格式将有关信息提供给维修人员,给出使飞机维修时间最少的解决办法。此外,利用预测和诊断技术,PHM还可以确定各分系统故障的根本原因及其对系统/部件的影响,从而实现对飞机部件进行基于状态的维修。PHM具有以下能力。

- (1) 测试性和机内测试(BIT)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、相关和信息融合技术,精确地检测和隔离系统、部件或子单元的故障和(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。

具体包括:①早期检测部件或子单元的故障症候和(或)初始故障状态,并根据材料的实际状况预计剩余使用寿命。②预计在部件初始故障状态向最终失效发展过程中的任一时间的剩余使用寿命。③积累飞行器限寿件的寿命消耗情况。

(5)在飞行器存在功能降级情况下,进行状态管理,保证最大程度地完成飞行系统任务的能力。具体包括:根据飞行器实际的和预计的材料状况进行维修、供应和其他后勤保障活动。

借助上述能力,PHM可完成的主要功能包括:故障检测/隔离/预测、剩余使用寿命预计、部件寿命跟踪、性能降级趋势跟踪、保证期跟踪、故障选择性报告(只通知需要驾驶员立即知道的信息,而将其余信息通报给维修人员)、辅助决策和资源管理、容错、信息融合和推理机以及信息管理(将准确的信息在准确的时间通报给准确的人员)。

## 4 PHM的关键技术

PHM连续监控JSF的使用、健康和安全的,其主要采用的关键技术可分为以下几类。

### 4.1 先进的传感器和非传统检测技术

JSF PHM对传感器技术的要求是小、轻、容易与机上预处理单元联网,能够适应飞行器的工作条件和环境,不易受电磁干扰的影响等<sup>[17-22]</sup>。其常用的先进测试传感器有光纤传感器、无线传感器、虚拟传感器、智能传感器、压电传感器等。这些传感器比传统的传感器能力更强,更容易实现故障症候的探测,从而使得检测技术敏感性更强。

目前,对这些传感器的研究主要从两方面展开,一是对传感器性能进行优化研究,包括提高传感器器件的精度、稳定性、复用性、方向性等,另一方面是研究如何减小传感器的尺寸,以便于同工程结构集成。

JSF PHM采用的非传统检测技术有用于检测轮盘裂纹的涡流叶尖传感器,用于检测轴承降级的静电磨损位置探测器,用于高频震动分析的叶片震动测量计等等。

此外,PHM还大量采用了新型微机电系统,并引进更先进的数据分析技术等。

### 4.2 预测技术

预测是检测和监控故障部件的先兆指示,并沿着故障到失效的时间线不断进行精确的剩余使用寿命预计。

当系统、分系统或部件可能出现小缺陷和(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,设计预测系统来检测这些小缺陷、早期故障或降级,并随着其严重性的增长,对其实施监控。PHM采用以下几种故障预测方法。

(1)基于经验的预测:当缺少分系统或部件的物理模型,并且没有足够的传感器来评估状态时,采用基于经验的预测模型。一般情况下,从传统系统收集失效或者检测数据,采用布尔分布或其它统计分布来拟合这些数据。应用基于经验的预测时,其关键是拥有一个自动化维修数据库。

(2)渐近式预测:渐近式预测方法依靠测量部件当前的近似状态(即特征)及其变化率,来获得性能降级或部件故障信息。它可以在经历条件失效的系统或分系统上实施。该方法对于预测系统的降级效果比较好,但需要获得充分的传感器信息,以评估系统或分系统的当前状况和测量中的不确定水平,

同时识别性能相关故障的参数条件。

(3)基于特征扩展的智能预测:已知故障/失效的“降级路径”随时间不断扩展,采用神经网络等AI技术对所测量/提取的这些“路径”的特征进行训练,神经网络将根据失效曲线与相关的特征量级自动调节加权和门限值。训练后的神经网络结构可以用于预计在相似工作条件下的不同试验的同样特征的进展情况。

(4)状态评估预测:基于卡尔曼滤波或其它各种不同跟踪过滤器的状态评估技术,也能作为一种预测技术使用。对于测量值或提取的一个特征,构造出状态向量,然后,利用状态转移方程来更新这些建立在模型基础上的状态,模型和测量结果之间的最小误差来预计未来特征属性。

(5)基于物理的预测:建立基于物理的随机模型,可用于评价多种不同类型的机械部件的剩余使用寿命分布。该分布是部件强度/应力的不确定性或某一特定故障条件的函数。利用该模型的结果来产生一种神经网络或基于概率的自主式系统,用于实时失效预测性预计。该预测模型的其它输入信息包括:诊断结果、当前的状态评估数据和工作剖面预计。这些知识性信息可以从多传感器数据融合并结合从数据挖掘过程获得的内场经验和维修信息产生。

### 4.3 信息融合技术

传统的信息/数据融合是指多传感器的信息/数据在一定准则下加以自动分析、综合以完成所需的决策和评估而进行的信息处理过程。

信息融合最早用于军事领域,定义为一个处理检测、互联、估计以及组合多源信息和数据的多层次多方面过程,以便获得准确的状态和身份估计、完整而及时的战场态势和威胁估计。信息融合蕴含了3个方面的含义。

(1)信息融合是在几个层次上完成对多源信息的处理过程,其中每一层次都表示不同级别的信息抽象。

(2)信息融合包括检测、互联、相关、估计以及信息组合。

(3)信息融合的结果包括较低层次上的状态和身份估计,以及较高层次上的整个战术态势估计。

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。协同传感器阵列是一些共同工作以产生一组新的诊断信息的传感器;互补传感器阵列生成某一问题的更完整的描述;竞争传感器阵列提供对同一物理现象彼此无关的测量结果,旨在改进可靠性。在传感器信号得到确认后,多传感器信息/数据融合的目标,是以尽量高效率的诊断方法将其各自的信息综合起来。

在设计多传感器融合系统时,PHM提出应考虑以下基本问题:(1)系统中传感器的类型、分辨率、准确率;(2)传感器的分布形式;(3)系统的通信能力和计算能力;(4)系统的设计目标;(5)系统的拓外结构(包括数据融合层次和通信结构)。

### 4.4 人工智能技术

PHM中广泛采用了人工智能技术,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。

专家系统是AI技术在实际应用中最成功的分支之一,它一般由知识库、数据库和推理机三部分组成。

基于规则的推理,即产生式系统,是根据领域专家的经验在知识库中建立许多规则。基于模型的推理采用一种经确认的物理模型来预计当前的状态,利用不同状态的历史信息作为向损伤检测程序及可能的纠正措施的输入。它在知识库中建立许多系统功能或性能异常/故障的模型,这些模型中包含该功能或性能异常模型的下一级部件,当系统发生故障时,假设一个故障模型及环境,并与系统的实际情况比较,以确定故障的原因。基于模型的推理是 PHM 设计方案的一个重要组成部分。该方法有以下特点:(1)提供直觉的、多层次建模。(2)固有的交叉检查,可以减少虚警。(3)多层次相关有助于故障隔离。部件与它们所支持的功能相联接;传感器与它们所监控的功能相联接。

人工神经网络也是 PHM 设计的一个重要组成。它是由大量简单人工神经元广泛互连而成的复杂网络,是对人脑神经网络在一定程度上的抽象、简化和模拟。其最主要的特征是:大规模并行处理,信息的分布式存储;高度的容错性和健壮性,自组织、自适应和自学习及实时处理等。由于神经网络具有处理复杂多模式及进行联想、推测和记忆的功能,特别适用于需要同时考虑多种因素和条件的、不精确和模糊的信息处理问题。

#### 4.5 数据仓库和数据挖掘技术

数据仓库完成海量信息的存储、有用信息的分类和提取,为应用提供决策支持。数据挖掘则是从数据中自动地抽取模式、关联、变化、异常和有意义的结构。数据挖掘在 PHM 中的价值在于可利用其改善模型。

JSF PHM 的数据仓库——自主式后勤信息系统 (Auto Logistics Information System, ALIS) 是指支持所有 F-35 后勤任务的自动化后勤信息系统,如维修、保障、培训和使用等。设计 ALIS 是为了提供全部信息资源的可视化。

ALIS 的工作过程是:由机上下载的故障数据、故障代码以及将要被替换的消耗品信息激发 ALIS,ALIS 确定问题的类型,根据存储的训练记录选定合适的维修人员,并启动从仓库中提取零部件的程序。

### 5 PHM 技术的应用现状

随着武器装备系统复杂化、综合化水平的提高,以及计算机技术、人工智能技术、微电子技术等信息技术的飞速发展,嵌入式诊断技术正在从过去单纯的电子/航电设备 BIT 和结构/机械设备的状态监控向覆盖武器装备所有重要系统和关键部件的机载预测与健康管理的 (PHM) 方向发展演变。因此,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。

PHM 技术首先在直升机上得到了应用,并具体演变成使用状态管理系统 (HUMS)。目前,HUMS 广泛应用于英、美、加拿大、以色列等国的大、中型民用和军用直升机领域。迄今,美陆军的 AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰等直升机已有 180 多架安装了 HUMS 系统,并将陆续全部安装;AH264、RAH266、“虎”、EH101、NH90、Bell 206、AS350 等军用直升机也都采用了 HUMS 系统。同时,阵风、鹰等战斗机和 C-130 大力神运输机等固定翼飞机上也已经采用 HUMS。美国智能自动化公司新开发的超级 HUMS2007 年 3 月被引入美陆军的 RQ-7A/B“阴影”200 战术无人机系统中。

目前,各国各军种均在进行针对具体应用的与 HUMS 和 PHM 类似的技术开发项目,如英国国防部与史密斯宇航公司达成协议,为未来山猫直升机开发状态与使用监测系统和机舱声音与飞行数据记录仪 (HUMS/CVFDR);韩国委托史密斯宇航公司为直升机项目 (KHP) 提供直升机 HUMS 系统;美国海军的综合状态评估系统 (ICAS)、陆军的诊断改进计划 (ADIP)、B-2 轰炸机和全球鹰无人机和 NASA 第 2 代可重复使用运载器的飞行器综合健康管理 (IVHM) 系统,海军 P-8A 多任务海上飞机的飞机健康监测系统 (AHMS) 等。

波音公司还将 PHM 应用到民用航空领域,称作“飞机状态管理” (AHM) 系统,已在法国航空公司、美利坚航空公司、日本航空公司、新加坡航空公司等多家航空公司的 B777、B747-400、A320、A330 和 A340 等飞机上大量采用。据波音的初步估计,通过使用 AHM 可使航空公司节省约 25% 的因航班延误和取消而导致的费用,提高了飞行安全和航班运营效率。

NASA 兰利研究中心与航空无线电通信公司 (ARINC) 公司合作研制的与 PHM 类似的“飞机状态分析与管理” (ACAMS),其功能在 B757 飞机上成功地进行了飞行试验演示验证。

### 6 展望与小结

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 已成为国外新一代武器装备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。

PHM 技术的发展经历了故障诊断、故障预测、系统集成 3 个日益完善的阶段。在部件级和系统级两个层次、在机械产品和电子产品两个领域经历了不同的发展历程。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精度、扩展健康监控的应用对象范围。

采用 PHM 是提高武器装备经济承受性、保障性和安全性的有效途径,是研制复杂武器装备必须掌握的关键技术之一。目前,我国国防科技工业对于 PHM 技术有着强烈的需求。借鉴和吸收国外的先进经验,提早研究 PHM 中的关键技术可为我国新一代武器装备特别是大飞机的研制提供基础技术储备,并奠定工程应用基础,更好地促进我国国防工业的快速发展。

#### 参考文献:

- [1] Hess A, Calvillo G, et al. PHM the key enabler for the joint strike fighter (JSF) autonomic logistics support concept [A]. Proceedings of the 58th Meeting of the Society for MFPT [C]. 2004, 4.
- [2] Hess A. The joint strike fighter (JSF) prognostics and health management [A]. JSF Program Office. NDIA 4th Annual Systems Engineering Conference [C]. 2001, 10.
- [3] 曾声奎, 吴 际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 626-632.
- [4] Hess A, Fila L. Prognostics, from the need to reality—from the fleet users and PHM system designer/developers Perspectives [A]. 2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2002.

(下转第 1219 页)

类问题的诊断系统之间也不能进行有效的信息交流和共享,造成了巨大的资源浪费。现在很多大型系统或设备由远程分布的不同类子系统组成,相应地,其诊断系统中的系统级诊断和各子诊断也需要诊断信息的传输交流。同时,由于故障源的不确定性和时发性,导致异地诊断和远程诊断的需求不断增加。随着网络的普及,通过局域网、因特网来传输诊断信息成为一种趋势,网络架构下的分布式多故障诊断成为新的研究热点<sup>[9]</sup>,因此,建立远程分布式跨平台综合智能诊断系统,可以实现异地多种专家系统对同一系统、设备的协同诊断以及多台设备共享同一诊断系统,提高诊断的成功率和效率,同时也有利于诊断案例的积累,以弥补单个诊断系统领域知识的不足,提高诊断的智能化水平。

(3) 实时诊断专家系统<sup>[10]</sup>。随着用户对系统可靠性、稳定性的要求不断提高,故障诊断技术已经由原来简单的对故障设备进行离线故障检测、隔离,发展为对系统、设备全寿命周期提供可靠性保障,主要包括基于传感器网络的健康状态在线检测,故障的早期预报以及故障发生后的在线实时定位与排除。这些都对未来故障诊断专家系统的实时性提出了很高的要求。

#### 参考文献

- [1] 吴明强, 李界红. 故障诊断专家系统综合智能推理技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (10): 932—934.
- [2] Miller L, Lewis D, Ronald De Hoff. XMAN II—a real time main-

tenance training aid [C]. Aerospace and Electronics Conference 1990: 1360—1364.

- [3] Li Y G. Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics [J]. Journal of Power and Energy, 2002: 363—377.
- [4] Frang P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge—based redundancy—a survey and some new results [J]. Automatic, 1990, 26 (3): 459—474.
- [5] Frank P M. Analytical and qualitative model—based fault diagnosis: a survey and some new results [J]. European Journal of Control, 1996, 2: 6—28.
- [6] Kay H. Robust identification using semiquantitative methods [A]. Proceedings of the IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes [C]. 1998, Oxford: Pergamon, 277—282.
- [7] Grove R F. Internet—based expert systems [J]. Expert Systems, 2000, 17 (3): 129—136.
- [8] Huntington D. Web—based expert systems are on the way: Java—based web delivery [A]. PC AI Intelligent Solutions for Desktop Computers [C]. 2000, 14 (6): 34—36.
- [9] Angeli C. Online expert systems for fault diagnosis in technical processes [J]. Expert Systems, 2008, 3: 115—132.
- [10] Yusong P, Veeke H P M, Lodewijks G. A simulation based expert system for process diagnosis [A]. Proceedings of the EURO-SIS 4th International Industrial Simulation Conference [C]. 2006, Ghent: Eurosia—ETI, 393—398.

(上接第 1216 页)

- [5] Smith G, Schroeder J B, Navarro S, etc. Development of a prognostics & health management capability for the joint strike fighter [A]. Autotestcon1997 [C]. 1997.
- [6] Johnson S B. Introduction to system health engineering and management in aerospace [A]. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace [C]. Napa, California, USA. 2005.
- [7] Haller K A, Anderson K. Smart Built—In—Test (BIT) [C]. IEEE 1985 AUTOTESTCON, 1985: 140—147.
- [8] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作的发展及应用 [A]. 国防科技工业试验与测试技术高层论坛文集 [C]. 2007: 36—42.
- [9] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition—based maintenance [C]. 2002 IEEE Aerospace Conference, 2000.
- [10] Scheuren W. Safety & The Military Aircraft Joint Strike Fighter Prognostics & Health Management [C]. AIAA 98—3710.
- [11] Gandy M, Line K. Joint Strike Fighter—Prognostics and Health Management (PHM) [Z]. Lockheed Martin Aeronautics, 2004.
- [12] Turbo machinery Prognostics and Health Management via Eddy Current Sensing: Current Developments [C]. 1999 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1999.
- [13] Kacprzyński G J, Hess A J. Health management system design: development, simulation and cost/benefit optimization [C]. 2002 IEEE Aerospace Conference, 2002.
- [14] Hess A, Fila L. Prognostics, from the need to reality—from the fleet users and PHM system designer/developers perspectives [A]. 2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2002.
- [15] Malley M E. A Methodology for simulating the joint strike fighter's (JSF) prognostics and health management system [Z]. Air Force Institute of Technology, 2001, 5.
- [16] Haller K A, Anderson K. Smart built—in—test (BIT) [A]. IEEE 1985 AUTOTESTCON [C]. 1985: 140—147.
- [17] Processer W H. Development of structural health management technology for aerospace vehicles [C]. NASA—2003—janaf—whp. 2003.
- [18] Boltryk P J. Intelligent sensors—a generic software approach [A]. Journal of Physics: Conference Series 15 [C]. 2005.
- [19] Oosterom M, Babuska R. Virtual sensor for fault detection and isolation in flight control system fuzzy modeling approach [C]. IEEE, 2000.
- [20] Hess A. The prognostic requirement for advanced sensors and non—traditional detection technologies [A]. DARPA/DSO Prognosis Bidder's Conference [C]. 2002, 9.
- [21] Gandy M. Wireless sensors for aiding aircraft health monitoring [Z]. Lockheed Martin Aeronautics Company, 2000.
- [22] Borinski J W, Meller S A. Aircraft health monitoring using optical fiber sensors [A]. Structure Health Monitoring Conference [C]. 2004.
- [23] Wilson A. Mems based corrosion and stress sensors for Non—Destructive Aircraft Evaluation [C]. Structure Health Monitoring Conference, 2004.