

## 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用

张宝珍

(中国航空工业发展研究中心, 北京 100012)

**摘要:** 随着系统复杂性、综合化、智能化程度的不断增加, 系统的“五性”和寿命周期费用问题越来越受到人们的重视; 近10年来, 综合的故障诊断、预测与健康管理 (PHM) 技术已经作为欧美等国提高复杂系统“五性”和降低系统寿命周期费用的关键使能技术。回顾了 PHM 技术的发展演变过程, 重点介绍了 PHM 技术在外国军事、民用和学术研究领域的应用现状, 并给出了 PHM 在 F-35 战斗机上的典型应用案例, 最后探讨了 PHM 技术的发展趋势。

**关键词:** BIT; 故障诊断; 综合诊断; 综合的故障诊断; 预测与健康管理 (PHM)

Development and Applications of Integrated Diagnostics, Prognostics  
and Health Management Technologies of Abroad

Zhang Baozhen

(Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100012, China)

**Abstract:** As systems are getting more and more complex and integrated and intelligent, people pay more attention to their "Five-Abilities" (including Reliability, Maintainability, Testability, Supportability and Safety) and Life Cycle Cost (LCC) problems. For recent ten years, integrated fault diagnostics, prognostics and health management (PHM) technologies have become the key enablers for foreign developed countries to improve complex systems' "Five-Abilities" and reduce their LCC. This paper reviewed PHM's evolution process; introduced their applications in foreign military, commercial and academic research areas, in addition illustrated an typical case about F-35 Joint Strike Fighter PHM system; and at last discussed some development trends about PHM technologies.

**Key words:** built-in-test (BIT); fault diagnosis; integrated diagnostics; integrated fault diagnostics; prognostics and health management (PHM)

## 0 引言

随着现代武器装备复杂性、综合化、智能化程度的不断提高, 为了以更经济有效的方式满足现代战争联合作战和网络中心战等新型作战模式对武器作战效能和敏捷、准确和经济的持续保障能力的需求, 综合的故障诊断、预测与健康管理 (PHM) 技术获得美英等军事强国越来越多的重视和应用。PHM 是对武器系统传统使用的机内测试 (BIT) 和状态 (健康) 监控能力的进一步拓展, 这种发展的主要技术要素是从状态监控向健康管理的转变, 这种转变引入了预测能力, 借助这种能力识别和管理故障的发生、规划维修和供应保障, 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 (CBM) 和自主式保障。

所谓预测, 即预计性诊断部件或系统完成其功能的状态, 包括确定部件的残余寿命或正常工作的时间长度; 所谓健康管理, 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决策的能力。PHM 代表了一种方法的转变, 即从传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测, 反应性的通信转向主动性的 3Rs (即在准确的时间对准确的部位采取正确的维修活动)。PHM 重点是利用先进的传感器的集成, 并借助各种算法和智能模型来诊断、预测、监控和管理飞机的状

态。这一技术的实现将使传统的事后维修或定期维修被基于状态的维修 (CBM, 亦称视情维修) 所取代。

PHM 技术早在 2000 年就被列入美国国防部威胁减少局的《军用关键技术》报告中, 国防部最新的防务采办文件将嵌入式诊断和预测技术视为降低总拥有费用和实现最佳战备完好性的基础, 进一步明确确立了 PHM 技术在实现美军武器装备战备完好性和经济可承受性方面的重要地位。目前, PHM 已成为美国国防部采购武器系统的一项要求。

## 1 预测与健康管理技术的发展

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, 到主动预防, 再到事先预测和综合规划管理。PHM 技术是在传统的状态 (健康) 监控和故障诊断技术基础上发展起来的。随着系统和设备性能和复杂性的增加以及信息技术的发展, PHM 技术的发展经历了由外部测试到机内测试 (BIT) → 测试性成为一门独立的学科 → 综合诊断的提出与发展 → 预测与健康管理 (PHM) 系统的形成等的发展演变过程。在应用产品层次上, 从过去的部件和分系统级发展到现在的覆盖整个平台各个主要分系统的系统集成级; 在机械产品和电子产品等领域经历了不同的发展历程, 并最终汇聚形成一种综合的故障诊断、预测与健康管理系统。

1.1 由外部测试到机内测试<sup>[1]</sup>

早期的系统比较简单, 由彼此独立的模拟系统构成, 其故障诊断主要采用人工测试, 维修测试人员的经验和水平起着重要作用。航电系统为分立式结构, 依靠人工在地面上利用专用

收稿日期: 2008-01-26; 修回日期: 2008-02-21。

作者简介: 张宝珍 (1967-), 女, 研究员, 主要从事武器装备可靠性、维修性、保障性以及试验与测试技术的情报研究工作。

中华测控网  
chinamca.com

或通用测试设备检测和隔离飞机中的问题（外部测试）。外部测试设备需要和被测对象连接，获取其状态信息之后才能进行测试和诊断。有些重要的系统和设备，如飞机上的各系统和设备，操作人员需要实时了解其运行状态，如有故障能及时采取措施，所以需要被测系统本身具有一定的自测试能力，这就产生了嵌入式的机内测试（BIT）。BIT 最初是为了警告飞行员有重要部件出了关键故障，后来又成为支持机械师查找故障的助手。早期的 BIT 只是检测几个主要参数，由人工判断是否为故障，故障隔离则由外部测试设备来完成。后来，由于技术的进步，系统和设备复杂程度增加，检测故障也更困难，因而要求有更强的 BIT 能力。部件的小型化，特别是计算机技术的广泛应用，为 BIT 发展提供了有利条件，机内测试能力得到了迅速提高，并出现了能够自动检测和隔离故障的机内测试设备（BITE）。

### 1.2 测试性成为一门独立学科

随着外部测试和机内测试的发展就产生了测试性设计问题。对于复杂的系统和设备，其故障诊断需要综合运用机内测试和外部测试能力才能实现最佳的诊断能力。而要进行机内测试，必须首先把 BIT/BITE 设计到被测系统中去；要进行外部测试，被测系统要能够方便地与外部测试设备连接，以提供充分的状态信息。因此，需要对被测系统进行测试性设计。1985 年，美国国防部颁布了军用标准《电子系统和设备的测试性大纲》（MIL-STD-2165），把测试性作为与可靠性、维修性同等重要的产品设计要求，规定了电子系统和设备各研制阶段应实施的测试性设计、分析与验证要求及实施方法，标志着测试性成为一门与可靠性、维修性并列的独立学科。

### 1.3 综合诊断的提出与发展<sup>[2]</sup>

20 世纪七八十年代，复杂装备在使用中暴露出测试性差、故障诊断时间长、BIT 虚警率高、使用与保障费用高、维修人力不足等各种问题，引起美英等国军方和工业部门的重视。美军及工业界分别针对自动测试设备（ATE）、技术资料、BIT 及测试性等各诊断要素相继独立地采取了很多措施，力图解决这些使用与保障问题，结果不理想。经过深入研究发现，问题的根源在于各诊断要素彼此独立工作，缺少综合；而且除测试性和 BIT 外，其它诊断要素都是在主装备设计基本完成后才开始设计的。从解决现役装备保障问题的角度出发，美国国防部颁布军用标准和国防部指令，强调采用“综合后勤保障”的途径来有效解决武器装备的保障问题。在此过程中，“诊断”问题成为贯彻综合后勤保障的瓶颈。美国原安全工业协会（现在的国防工业协会 NDIA）于 1983 年首先提出了“综合诊断”的设想，对构成武器装备诊断能力的各要素进行综合，并获得了美国军方的认可和大力提倡。

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，使武器装备诊断能力达到最佳的结构化设计和管理过程。其目的是以最少的费用最有效地检测、隔离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。综合诊断的实施必须从装备设计开始，并贯穿于其寿命周期的各个阶段。综合诊断实施的基本途径在于“综合”，即通过有效的组织和配置使各组成单元成为一个整体协同地起作用，具体包括各诊断要素的综合、各维修级别的综合和寿命

周期各阶段的综合三方面的内容。

美国国防部从 20 世纪 80 年代中期开始相继实施了一系列综合诊断研究计划，并于 1991 年 4 月颁布了军用标准《综合诊断》（MIL-STD-1814），把综合诊断作为提高新一代武器系统的诊断能力和战备完好性，降低使用与保障费用的一种有效途径。综合诊断策略在 20 世纪 80 年代中后期开始研制的新一代装备（空军 F-22、海军的攻击核潜艇 SSN-21、陆军的主战坦克 M1A2 等）及在研的 F-35（JSF）飞机上得到应用。20 世纪 90 年代以后，英、法等欧洲发达国家及俄罗斯也效法美国的做法，提倡在武器装备中通过采用类似综合诊断系统方案的综合维修系统来实现最大的故障检测和隔离能力，以提高武器装备的战备完好性，降低寿命周期费用。冷战结束后，随着美军军费的缩减以及老龄武器装备的日渐增多，美军方和工业界都认识到，影响综合诊断推广应用的主要障碍是缺少一个针对综合诊断的开放系统方法。于是，在 1999 年，美国国防部办公厅（OSD）启动了“综合诊断开放系统方法演示验证”（OSAIDD）研究计划，探讨统一的、通用的综合诊断功能实现方法的可行性，以降低费用，增加互用性，加快引入新技术。该项目通过对军、民领域内具有不同测试和诊断特征的 10 个典型案例的深入研究和演示验证，最终提出一种基于信息的综合诊断开放式体系结构，并制定了实施路线图。

美国工业界和学术界也积极开展综合诊断研究活动。比如，美国国防工业协会 NDIA（原美国安全工业协会）多年来一直致力于综合诊断的研究和推广，综合诊断这个概念就是该协会首先提出的。近些年来，NDIA 系统工程委员会开展了嵌入式诊断方法研究；研究和提出通过综合诊断和改进 BIT 来降低虚警率的具体措施建议；并受 JSF 项目委托，开展了电子预测能力和数据需求研讨和研究；为改善机械系统的诊断和预测能力，美“联合大学综合诊断研究中心”，针对机械故障机理、无损检测技术、机械状态监控方法等展开广泛研究。

### 1.4 预测与健康管理系统形成

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，综合诊断系统向测试、监控、诊断、预测和维修管理一体化方向发展，并从最初侧重考虑电子系统扩展到电子、机械、结构、动力等各种主要分系统都考虑到，形成综合的诊断、预测与健康管理系统时机已经成熟。总的来说，PHM 系统是在需求牵引、技术推动下，并借助 JSF 项目的研制契机而诞生的。

随着系统复杂性、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，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。以往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；另一方面，大容量存储、高速传输和处理、信息融合、MEMS、网络等信息技术和高新技术的迅速发展，意味着允许在机上实时完成更多的数据存储和处理功能，消除过多依赖地面站来处理信息的需要，为 PHM 能力创造了条件；加之，20 世纪 90 年代中期启动的 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

提供了自主式保障方案，借此机遇诞生了比较完善的、高水平的 PHM 系统。

2 预测与健康管理技术的应用

近年来，PHM 之类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。

2.1 PHM 在军事领域得到广泛应用

为 F-35 开发的 PHM 系统目前正在研制和成熟过程中，PHM 能力计划在 2008 年以后的第 2 批次飞机中引入。但 PHM 相关技术已在军事和民用领域得到广泛应用，并取得了令人瞩目的成效。

目前 PHM 技术已广泛应用于英、美、加拿大、荷兰、新加坡、南非、以色列等国的直升机上，出现了称作“健康与使用监控系统”（HUMS）的集成应用平台。其中，美国国防部新一代 HUMS——JAHUMS 具有全面的 PHM 能力和开放、灵活的系统结构。迄今，美陆军的直升机已有 180 多架安装了 HUMS 系统，包括 AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰和 CH-47 支奴干。安装了 HUMS 系统的美国陆军直升机战备完好性提高了 10%。陆军已向装备 HUMS 的飞机颁发了适航证或维修许可证，并批准在全部 750 架“阿帕奇”直升机上安装 HUMS。英国国防部也与史密斯航宇公司达成协议，为 70 架未来山猫直升机开发一种状态与使用监测系统和机舱语音与飞行数据记录仪（HUMS/CVFDR）组合能力，交付时间于 2011 年开始。

美国各军种及其他机构也开展了与 PHM/HUMS 类似的技术发展项目，如美国空军研究实验室提出的综合系统健康管理（ISHM）系统方案；海军的综合状态评估系统（ICAS）和预测增强诊断系统（PEDS）项目；陆军的诊断改进计划（ADIP）、嵌入式诊断和预测同步（EDAPS）计划等。而 F-35 JSF 所采用的 PHM 系统代表了美军目前基于状态的维修（CBM）技术所能达到的最高水平。

2.2 PHM 在民用领域的应用

除了在军事领域的应用之外，PHM 还在民用飞机、汽车、桥梁、核电站、大型水坝等民用领域获得广泛应用，成为 21 世纪名符其实的军民两用技术。其中，PHM 技术在民用航空领域的应用尤其突出。比如，波音公司已将 PHM 应用到民用航空领域，称作“飞机状态管理”（AHM）系统，已在日本航空公司、新加坡航空公司、法国航空公司、美利坚航空公司等 15 家国际民航客运和货运公司的 B777、B747-400、A320、A330 和 A340 等飞机上得到大量采用。据估计，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，并支持机队长期可靠性计划的实现。

美国航空无线电通信公司（ARINC）与 NASA 兰利研究中心合作，开发了与 PHM 类似的“飞机状态分析与管理”（ACAMS），可以广泛应用于军、民飞机领域，其功能在 NASA 的 B757 飞机上成功地进

行了飞行试验演示验证，该套系统已申请了美国专利。

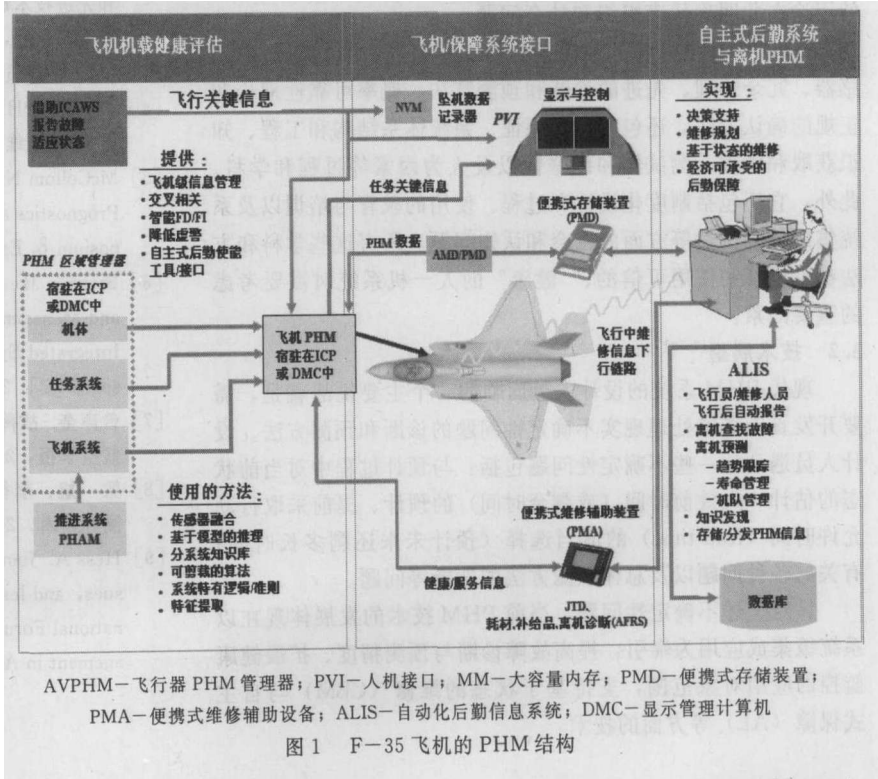
NASA 第 2 代可重用运载器已采用了航天器综合健康管理（IVHM）系统；NASA 已选定 QSI 公司开发的综合系统健康管理（ISHM）方案对航天飞机进行健康监控、诊断推理和最优化故，以求降低危及航天任务安全的系统故障；NASA 已初步拟定了未来 10 年的飞行器综合健康管理（IVHM）技术计划，作为其航空安全项目的一个重要组成部分。

2.3 电子预测成为倍受关注的主题

近年来，有关 PHM 技术的学术交流活动也非常活跃。NASA 举办了首届国际宇航“综合系统健康工程和管理”（ISHEM）（航天领域的 PHM）论坛，将其作为一门新的学科推出；美国圣地亚国家实验室与美国能源部、国防部、工业界和学术界合作建立了预测与健康（PHM）创优中心（COE），支持 PHM 技术开发和技术试验和确认；马里兰大学成立预测与健康（PHM）联合中心，致力于电子预测与管理方法的研究和培训；美国、欧洲和日本都纷纷召开 PHM 研讨会，而这些会议的共同热门话题就是电子预测技术。人们普遍认为，电子预测技术目前虽然远未达到成熟，尚不能进入应用，但它代表了 PHM 未来的一种重要发展趋势。

2.4 典型应用案例——F-35 联合攻击机的 PHM 系统<sup>[3-4,9]</sup>

F-35（JSF）飞机采用的 PHM 系统是一种软件密集型系统，它在一定程度上涉及到飞机的每一要素。其结构特点是：采用分层智能推理结构，综合多个设计层次上的多种类型的推理机软件，便于从部件级到整个系统级综合应用故障诊断和预测技术。F-35 飞机的 PHM 系统是由 JSF 机上和机下部分构成的一体化系统，如图 1 所示，F-35 的机载 PHM 系统分三个层次：最底层是分布在飞机各分系统部件（称作成员系统）中的软、硬件监控程序（传感器或机内测试/机内测试设备（BIT/BITE））；中间层为区域管理器；顶层为飞机平台管理器。最底层作为识别故障的信息源，借助传感器、BIT/BITE、模型等检测故障，将有关信息直接提交给中间层的区



域管理器。各区域管理器具有信号处理、信息融合和区域推理机的功能,是连续监控飞机相应分系统运行状况的实时执行机构。JSF 的机载 PHM 结构包括飞机系统、任务系统、机体、推进系统等几种区域管理器软件模块,除推进系统管理器外,其他区域管理器软件都宿驻在综合核心处理机(ICP)或管理计算机(DMC)中。各区域管理器将区域故障信息经过整理后传送给更高层的飞机管理器软件模块。飞机管理器也宿驻在 ICP 中,通过对所有系统的故障信息的相互关联,确认并隔离故障,最终形成维修信息和供飞行员使用的知识信息,传给地面的 ALIS,ALIS 据此来判断飞机的安全性,安排飞行任务,实施技术状态管理,更新飞机的状态记录,调整使用计划,生成维修工作项目,以及分析整个机群的状况。上述区域管理器和飞机管理器利用基于模型的推理、神经网络和模糊逻辑等 AI 技术开发的诊断推理、预测推理和异常推理等三种推理机制,能够更好地消除虚警,并正确隔离故障。

据估计,通过采用 PHM 技术和自主式保障系统,可使飞机的故障不能复现(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了 50%以上而且使用寿命达 8000h。

### 3 预测与健康管理技术的发展

#### 3.1 新学科的诞生<sup>[6]</sup>

PHM 技术并没有停住向前发展的步伐。到 21 世纪初,并将“综合系统健康工程和管理”(ISHEM)作为一门新的学科推出。

综合系统健康工程和管理(ISHEM)定义为,系统的设计、分析、制造、验证和使用中所采用的、防止故障和(或)最大限度地减少故障影响的过程、方法和技术。ISHEM 旨在将大量独立的相关学科和技术整合起来,使人们所使用的日益复杂的系统和功能拥有更多成功的机会。ISHEM 中的“工程”一词在此指经典的技术方面的问题;而“管理”一词按其通常的用途在此明确代表组织和社会问题。

ISHEM 新学科除了包括经典的工程问题,诸如先进的传感器、冗余管理、先进的诊断和预测算法、概率可靠性理论和正规的确认方法,还包括质量保证、系统体系结构和工程、知识获取和管理、测试性和维修性以及人为因素等过程和学科。此外,它还包括制度化设计和过程、使用的教育与培训以及系统集成经济性等方面的社会和认知问题。所有这些学科和方法都是设计和使用可信的、“健康”的人—机系统时需要考虑的重要因素。

#### 3.2 技术展望<sup>[7-9]</sup>

现代 PHM 系统的设计人员面临的一个主要挑战就是,需要开发真正能够处理现实不确定性问题的诊断和预测方法。设计人员遇到的一些不确定性问题包括:与预计过程中对当前状态的估计、失效前时间(或剩余时间)的预计、提前采取行动允许时间(lead time)的适当选择(预计未来还剩多长时间)有关的各种问题以及总体预测方法的选择等问题。

针对上述不确定性问题,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,支持基于状态的维修(CBM)与自主式保障(AL)等方面的技术。

在 PHM 系统集成应用方面,体现在:(1)如何采用并行工程的原则,与被监控产品设计同步,进行 PHM 的框架设计与细节设计?(2)针对不确定性问题,如何制订合理的 PHM 定量要求?(3)针对对象数据获取困难的问题,如何开发有效的仿真验证系统,并综合运用实际工况数据、故障注入或加速试验数据以及模型仿真数据经验,开展 PHM 的定量性能评价与验证?(4)针对故障预测的不确定性,如何进行风险—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,体现在:(1)研究混合故障预测算法及智能数据融合技术,加强经验数据与故障注入数据的积累,提高诊断与预测置信度;(2)不断寻求高信噪比的健康监控途径;(3)研究灵巧、健壮的先进传感器和传感器布局问题,提高数据源阶段的精度。

在扩展应用对象范围方面,体现在向电子产品故障预测的扩展。(1)如何与故障预测技术相结合,提升 BIT 能力,减少 CND,降低虚警率?(2)如何实现寿命消耗监控(LCM)不确定性的定量评价?(3)如何把 LCM 与故障征兆(Precursor)技术相结合,提高 LCM 的置信度等等。

### 4 结束语

PHM 已成为国外新一代武器装备实现基于状态的维修(CBM)和自主式保障的一项核心技术,是 21 世纪提高复杂系统“五性”(可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性)和降低寿命周期费用的一项非常有前途的军民两用技术。目前,欧美等国非常重视该技术的开发、成熟和在军、民系统中的推广应用,并已取得了显著成效。本文对此做了概括介绍,希望引起我国有关部门和科研、开发机构的高度关注。

#### 参考文献:

- [1] 田仲,石君友.系统测试性设计分析与验证[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [2] 张宝珍,曾天翔,等.国外军工产品试验、测试与评价管理体系和先进技术研究[R].国防科技情报研究报告, HY2004-005.
- [3] 张宝珍,编,译. PHM——JSF 自主式保障方案关键的使能技术[J].装备质量,2005,(12):15-34.
- [4] 张宝珍. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术[J].航空维修与工程,2005,(6):20-22.
- [5] McCollom N. F-35 Joint Strike Fighter Autonomic Logistics and Prognostics and Health Management [A]. DoD Maintenance Symposium & Exhibition Presentations [C]. 2006.
- [6] Stephen B. Johnson. Introduction to System Health Engineering and Management in Aerospace [A]. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace [C]. 2005. Napa, California, USA.
- [7] 曾声奎.故障预测与健康(PHM)技术的现状与发展[J].航空学报,2005,(5):626-631.
- [8] 梁旭,李行善,等.支持视情维修的故障预测技术研究[J].测控技术,2007,(6):5-8,14.
- [9] Hess A. Joint Strike Fighter — real prognostics—challenges, issues, and lessons learned: chasing the big “P” [A]. First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace [C]. California, Napa, 2005.