

doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2014.03.001

引用格式: 黄鹤, 卢海涛. 综合化航空电子系统 PHM 应用与设计[J]. 电讯技术, 2014, 54(3): 245-250. [HUANG He, LU Hai-tao. Application and Design of PHM in Integrated Avionics System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(3): 245-250.]

综合化航空电子系统 PHM 应用与设计*

黄 鹤^{1**}, 卢海涛²

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 北京航空航天大学 系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 故障预测与健康管理(PHM)技术应用是保障电子系统任务完成成功率的重要手段和方法。对航空电子系统的 PHM 应用及设计思路进行了探讨, 提出了 PHM 系统功能关系及适合综合化航空电子系统的健康管理体系。对 PHM 工程实现的主要关键技术及解决方案进行了研究, 重点分析了基于测试性模型的多信号增强诊断方法, 以及基于马尔科夫和贝叶斯网络的健康评估方法, 对最终实现航空电子系统的 PHM 全面应用具有指导意义。

关键词: 综合化航电系统; 故障预测与健康管理; 增强诊断; 健康评估

中图分类号: V243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2014)03-0245-06

Application and Design of PHM in Integrated Avionics System

HUANG He¹, LU Hai-tao²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;
2. School of System Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Prognostics and Health Management(PHM) technical application is the critical method to guarantee the accomplishment of electronic systems to implement tasks. PHM application and design ideas in avionics system are analyzed, functional relations of PHM system and architecture of health management system suitable for integrated avionics system are proposed. The key technologies and solution to realize PHM application are researched. Test-model-based multi-signal enhanced diagnosis and health evaluation methods based on Markov-model and Bayesian networks are emphasized. The research in this paper can provide guidance for realizing full application of PHM in avionics systems.

Key words: integrated avionics system; prognostics and health management(PHM); enhanced diagnosis; health evaluation

1 引 言

现代武器装备的采购费用和使用与保障(O&S)费用日益庞大,经济可承受性成为一个不可回避的问题。据美军综合数据,在武器装备的全寿命周期费用中,使用与保障费用占到了总费用的72%^[1]。与使用保障费用相比,维修保障费用在技术上更具有可压缩性。基于状态的维修(CBM)、自主保障(AL)等都是压缩维修保障费用的重要手段。故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术是实现上述目标的关键技术,可在无需人工或者外部设备参与的情况下,利用先

进的传感器获取数据并借助各种模型和推理算法,来完成对系统健康状态的全方位实时监测、故障诊断、故障预测、故障隔离和重构^[2]。因此,PHM对推动作战飞机从“事后维修”、“定时维修”向“视情维修”的转变具有十分重要意义^[3]。航空系统应用PHM技术可进一步提高系统完成任务的可靠性、成功率和安全性。

目前,PHM技术在机电和结构系统中的研究较多,部分得到应用,而在机载航空电子系统应用研究上还是起步阶段。特别是综合化航电系统具有复杂

* 收稿日期: 2013-11-15; 修回日期: 2014-02-28 Received date: 2013-11-15; Revised date: 2014-02-28

** 通讯作者: hh2013hh@126.com Corresponding author: hh2013hh@126.com

度高、系统涉及部件多且具有多属性、非线性等特征,系统各模块、功能或子系统间耦合关系紧密,故障传递与影响复杂。电子系统故障的征兆参数变化不够明显或为突变信号,这些因素对 PHM 在航空电子系统中的应用提出了更高的要求。PHM 技术在航空电子系统的应用是新一代作战飞机故障诊断体系研究重点之一。随着航空电子系统向高度智能和高度综合方向的发展,机载航空电子 PHM 将是一个复杂的系统工程,必须要进行综合深入研究。

2 PHM 应用思路

机载航空电子系统 PHM 技术将在未来空战中起到重要作用。通过 PHM 技术的应用能够提升任务完成率和可靠性,同时在维修保养阶段能提高维修效率和全寿命周期费效比,降低后勤保障规模。

在起飞出航前,航空电子系统 PHM 进行加电或启动自测试,通过测试确定飞机系统状态,作为评估飞机完成任务的基础;根据实测和预测的故障信息评估系统的剩余能力,从而为飞机任务规划和决策提供依据。通过起飞出航阶段的 PHM 应用,能够提前科学评估飞机完成战斗任务的情况。

在巡航和交战阶段航空电子系统 PHM 对系统进行健康状态监控,实时诊断系统故障;对故障进行隔离和功能重构策略的生成,提供系统或飞行员进行战斗任务的决策;PHM 系统同时对故障后系统功能能力进行评估,支撑地面或飞行员进行下一阶段作战任务的决策规划或调整;在整个巡航与交战阶

段对相关信息进行存储,并在不影响飞机隐身和作战能力的前提下 PHM 系统可与地面进行健康信息交换;报送危重故障或健康状态信息供地面系统进行决策管理。

在战斗任务结束的返航阶段 PHM 系统主要向地面系统发送需进行维修更换的部件,以启动快速的后勤保障,实现系统的快速维修。这种自主的维护方式减少了对人员和设备的要求,提升了效率,保障了飞机系统的可用性、可部署性和维修性需要,实现了飞机系统的自主后勤保障,如图 1 所示。

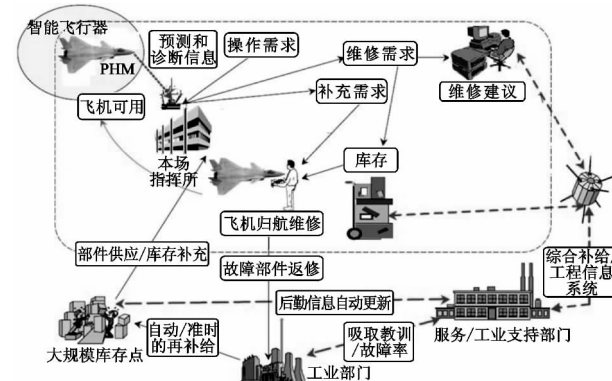


图 1 PHM 为基础建立的自主后勤保障系统流程示意图

Fig. 1 Illustration of autonomic logistics system based on PHM

3 航空电子系统 PHM 设计

3.1 总体层次设计

航空电子系统的 PHM 是整个飞机健康管理的一部分,其在飞机系统中的层次构架如图 2 所示。

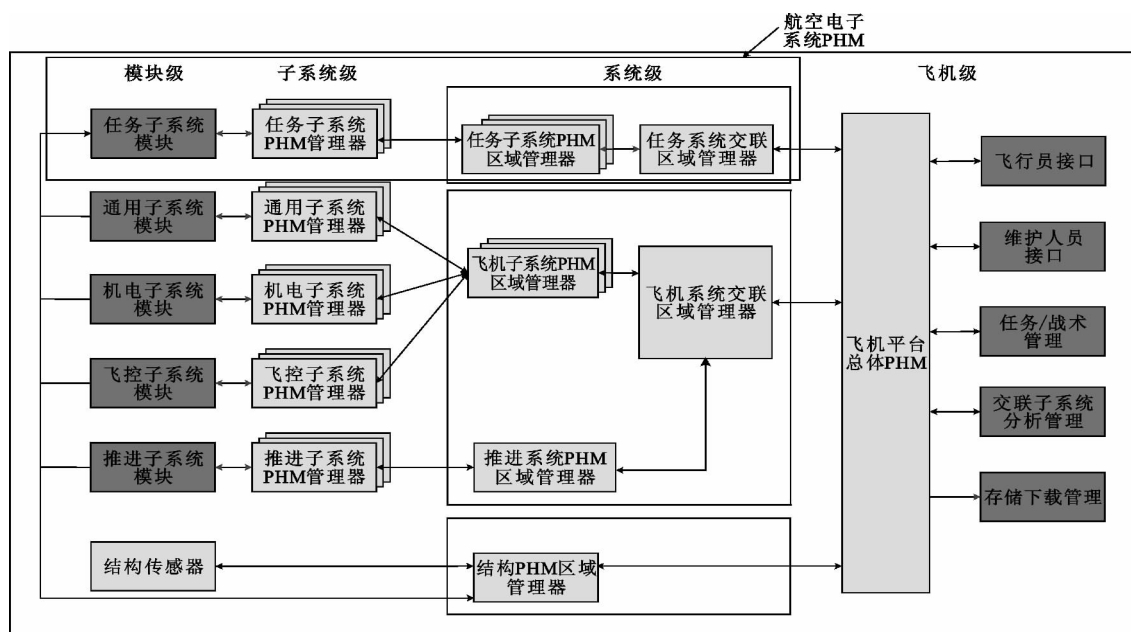


图 2 航空电子系统 PHM 在整个飞机系统中的层次与构架

Fig. 2 The hierarchy and architecture of avionics PHM in aircraft

航空电子系统的 PHM 采用分层融合式体系结构, 该结构实际上是一种集中式和分布式相结合的方式, 每个子系统在可能的较低级别考虑健康管理能力和集成融合问题。在较低的层次, 各个子系统收集、解释用于本子系统状态评估所有信号, 然后在较高的层次上将诊断/预测结果集中交由上一级健康管理进行记录和决策。它可在子系统级和系统级两个层次进行融合, 更加全面地利用了冗余层次状态信息, 从而更加有效地降低电子系统的虚警率。

基于功能层次化体系思想将航空电子系统 PHM 分为 3 个层次, 分别是模块级、子系统级和系统级, 层次构架如图 3 所示。采用分层诊断和推理技术可以提高故障诊断能力, 减少虚警。上层诊断管理器将下层测试的信息进行推理分析, 以给出更准确的诊断结果。模块级主要进行各类测试信息采集、上传、预留测试维护端口, 并可根据用户需求进行简单的故障处理, 如故障告警、故障隔离等。子系统级故障管理分为两种情况, 一种是对具有处理能力的子系统, 接收来自模块级的测试信息并进行故障诊断推理, 根据推理结果对功能模块进行初步故障诊断和隔离处理, 并将处理结果上传至系统级; 另一种是对没有处理运算能力的子系统, 接收来自模块级的测试信息并将信息上传至系统级进行处理。系统级健康管理接收来自分系统的测试信息, 并在核心处理机中进行诊断推理与预测, 对故障进行增强诊断。基于增强诊断结果和历史数据进行寿命预测和功能评估, 通过数据信息交换进行健康管理。

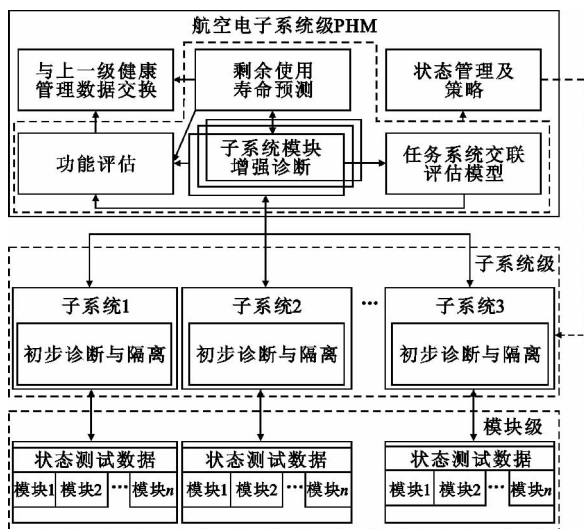


图 3 航空电子系统的 PHM 层次构架

Fig. 3 The hierarchy and architecture of avionics PHM system

3.2 系统级健康管理功能设计

在航空电子系统的 PHM 设计中, 系统级健康管理以测试性设计为基础, 采用分层诊断、综合推理技术提高系统故障诊断能力, 减少虚警。同时负责管理整个系统内的功能子系统、跨功能子系统、公共资源以及驻留在系统处理器上的系统软件的健康状态, 对系统任务能力状况进行监测评估。其接收来自子系统的初步健康诊断信息以及模块的测试信息, 利用诊断知识、系统相关性模型进行推理, 判断系统是否发生故障, 确定故障发生的准确位置, 滤除模块 BIT 虚警, 降低故障隔离模糊组的大小, 为系统控制管理提供支撑, 主要功能如下:

- (1) 实现系统的状态监控、诊断功能的数据采集和上报;
- (2) 通过基于模型的诊断推理, 消除系统内关联故障, 减小/过滤虚警, 实现功能子系统以及跨功能子系统资源、功能的增强故障诊断;
- (3) 管理系统的健康(寿命管理、电子标签、履历数据、资源状态)状况;
- (4) 实现对系统任务资源重构的支持, 管理系统/子系统的 BIT 测试;
- (5) 评价系统当前的剩余能力。

3.3 子系统级健康管理功能设计

子系统健康管理功能负责航空电子系统的组成物理资源, 如天线、射频信道以及驻留在系统处理器上的功能子系统软件的健康状况。同时实现对子系统内资源故障的初步检测和隔离。航空电子系统的 PHM 子系统级功能架构如图 4 所示。

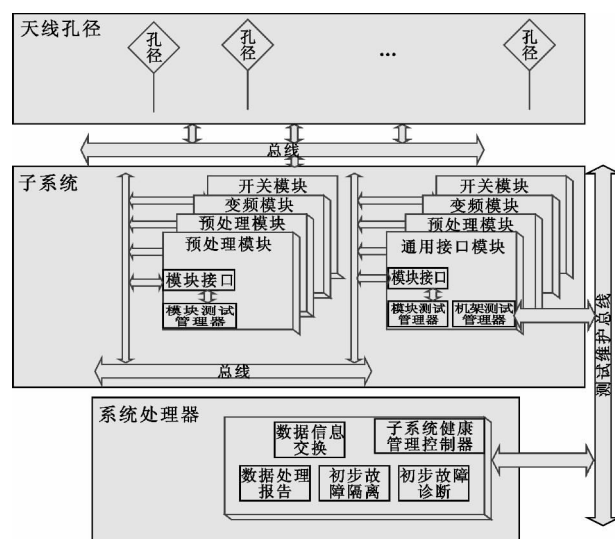


图 4 子系统健康管理硬件和功能架构

Fig. 4 Hardware and function architecture of subsystem health management

子系统级健康管理主要功能如下:

(1) 实现子系统及模块状态监控、诊断功能的数据采集和上报;

(2) 实现对功能子系统内天线、射频信道的初步故障检测、故障隔离;

(3) 实现功能子系统状态监控(如电压、电流、温度)、检测、隔离等的数据采集;

(4) 管理子系统及模块健康(如寿命管理、电子标签、履历数据、资源状态)状况,管理模块的 BIT 测试;

(5) 评价子系统当前的剩余能力。

3.4 模块级健康管理功能设计

模块级健康管理功能设计主要体现在模块测试和检查功能,通过在模块上设计嵌入式测试装置,对容易发生故障的位置设置信号监测点,对模块进行在线监测,判断系统中故障发生的原因和位置。可利用嵌入式测试装置对多路信号参数进行在线实时监测,其功能设计原理如图 5 所示。

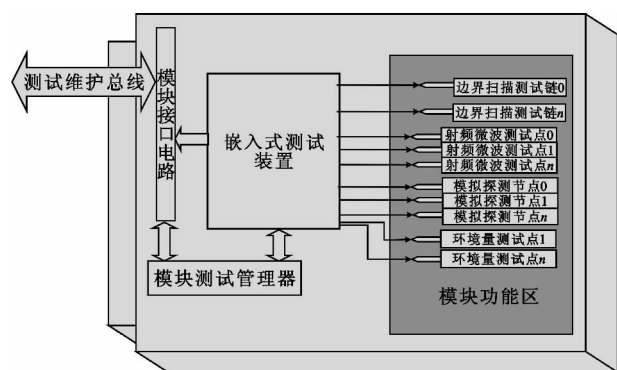


图 5 模块健康管理功能设计原理

Fig. 5 Principle of module health management function design

嵌入式测试装置根据模块功能特性,可配置如 CPU 单元、1149.1 主控器单元、协议转换单元和模拟电路控制与处理单元以及温度等传感器,完成对测试信息的存储与上传,具有统一串行数据总线与控制总线接口功能。模块应具有如下能力:

(1) 上电自检、周期测试或启动测试中的一种或多种能力;

(2) 测试数据初步处理与上报能力;

(3) 环境参量监测(如温度、振动或湿度等)能力;

(4) 模块内非关联故障的初步诊断能力。

4 PHM 关键技术

4.1 增强诊断技术

系统增强诊断设计是指利用诊断知识/模型进

行推理,判断系统是否发生故障并确定故障准确位置。滤除 BIT 虚警,降低故障隔离模糊组的大小。航空电子系统 PHM 的增强诊断技术中,采用相关性模型描述系统内部结构与信号流向的依赖关系,根据模型中各个模块与测试点的相互关系得出相关矩阵,在此基础上将系统的增强诊断分解为故障检测、故障定位、故障辨识 3 个阶段^[5]。综合利用基于信号处理的方法和基于知识库的故障诊断方法进行诊断。整个系统级诊断如图 6 所示。

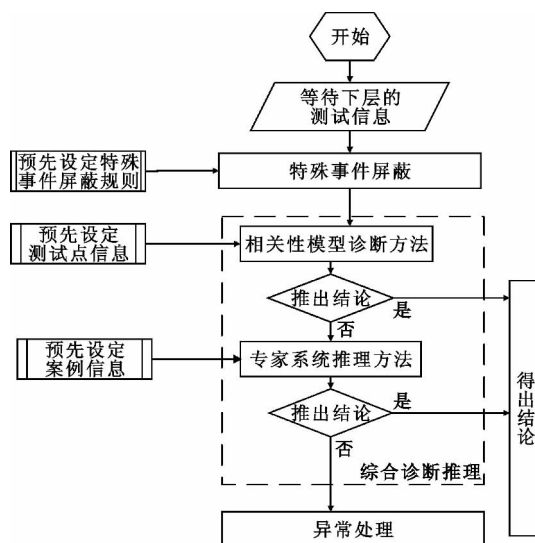


图 6 增强诊断流程

Fig. 6 Flowchart of enhanced diagnosis

目前,增强诊断方法主要有多信号相关性模型诊断方法、基于规则推理和案例推理等专家系统推理方法。通过综合推理策略及统一协调机制,可以提高诊断系统的故障诊断能力和诊断效率。

相关性模型诊断方法根据系统组成、交联关系建立诊断对象的模型,设置测试点,然后根据模型中各个模块与测试的关系得出相关性矩阵,该相关性矩阵能有效地表达各测试对系统各模块的检测关系,在此相关性矩阵基础上可以进行如下四方面工作:测试点阵静态分析与简化;优化选择故障检测用测试点;优化选择故障隔离用测试点;以一定规则建立故障树模型。

在进行诊断时,系统按照故障树方向进行诊断,若能检测到最终故障节点,系统就会按照已经设定好的故障节点得出答案;若找不到完全匹配的案例,系统就会进入专家系统推理。基于该方法形成的故障树模型进行故障检测、故障隔离,能以最少的测试

次数带来最高的准确性。

基于案例的专家系统的诊断推理一般包括案例的表示和检索等。故障案例的表示就是对故障尽可能进行详细地描述,包括故障原因、经过、特征和效果等,并把这些描述转化为不同的测试点特征信息描述,以测试点信息表的方式存储起来。案例的检索是根据一定的检索策略找到与待诊断故障相似的案例。一个诊断系统的案例越多,则其拥有的知识越丰富。

4.2 剩余能力评估

剩余能力评估是在增强诊断、故障隔离和系统重构的基础上,根据 FMECA 输入确定故障资源对上一级以及最终影响,结合系统现阶段的工作模式及未来将要装配工作模式,判断系统剩余能力的一种功能。剩余能力的表示可分为两种表示方法,第一种直接表示为功能性能参数的下降,例如雷达收发阵列部分单元故障后的探测距离能力等;第二种可表示为系统完成某功能的概率,即系统健康度等级。两种表示方法亦可对应,如雷达功能完好,探测距离越大其表示健康状态越好;随着故障单元增加,探测距离降低一定程度,健康状态下降,以此类推,直至完全故障。系统剩余能力健康度表示的状态变化如图 7 所示。

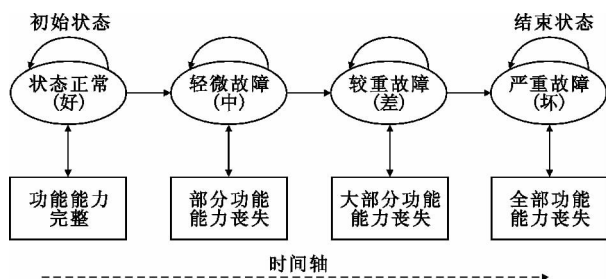


图 7 剩余能力与健康度状态变化

Fig. 7 State change of remaining capability and health degrees

剩余能力的评估计算通常以正常状态为基准,通过监测参数的实时监测,并利用数据模型进行计算,得到偏离正常状态的程度,从而表征其剩余能力。可采用的评估技术有基于马尔科夫模型(HMM)的剩余能力评估和基于贝叶斯网络的剩余能力评估两种。

4.2.1 基于 HMM 的剩余能力评估

采用 HMM 是实现航空电子系统基于表征参数的剩余能力评估方法之一,HMM 的剩余能力评估过程如图 8 所示。

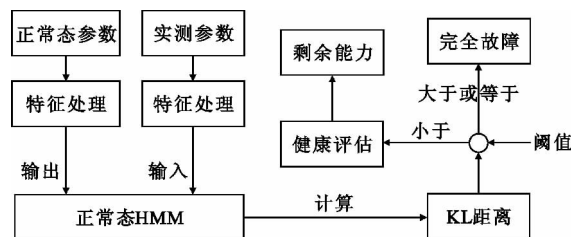


图 8 基于 HMM 的评估框图

Fig. 8 Block diagram of evaluation based on HMM

对于航空电子系统的剩余能力评估,首先对各功能模块进行划分并对其进行建模与仿真。对各功能模块参数的容差范围进行分析,目前只考虑单模块故障的参数监测与剩余能力评估。评估前需要训练一个 HMM 来代表正常状态,其余各中间状态所对应的观测序列送入模型,由此计算出似然概率并获得相应的与正常态的距离值,把微弱变化的早期故障过程转换为明显变化的该距离值来反映系统偏离正常态的程度^[6],并与给定的阈值比较,从而估计系统的剩余能力状况。

4.2.2 基于贝叶斯网络的剩余能力评估

通过确定电子系统网络结构,各故障样本集和各征兆样本集,初始化网络参数,给出各故障发生的先验概率,进行网络的推理、运算,最终得到电子系统发生各种故障的可能性大小,进而对系统健康和剩余能力状态进行评估,以在故障前进行维护和维修,避免系统完全故障^[7]。具体步骤设计如下:

(1) 依据电子系统的历史记录数据,区分开正常态和异常态的运行数据。对异常态数据又分为不同故障类型的数据,根据系统运行的历史记录,记下各故障类型;

(2) 故障样本集和故障征兆样本集组成用于网络模型学习的故障样本库。对于具有完整数据的故障样本数据库,贝叶斯网络采用最大后验估计方法来更新贝叶斯网络的各故障征兆节点变量的条件概率值。对于不完整数据的故障样本库,贝叶斯网络采用其他相关算法来更新贝叶斯网络的各故障征兆节点变量的条件概率值。增加学习样本的数量,会使各故障征兆节点变量的条件概率值更合理;

(3) 采集系统当前运行的数据并适当的特征提取,获得一个测试样本。根据各故障征兆节点所对应变量的取值规则,就可得到符合各故障征兆节点所对应变量的取值要求的数据。把它直接输入系统处理,贝叶斯网络就会采取一定的推论法则,计算出

电子系统发生各类故障的可能性大小,进而对健康和剩余能力状态进行评估。

5 结 论

本文对 PHM 技术在航空电子系统中的应用进行了研究,探讨了航空电子系统 PHM 在典型战斗场景中的作用,同时分析了电子系统的 PHM 构架以及相关关键技术,对最终实现航空电子系统的 PHM 全面应用具有指导意义。

参考文献:

- [1] 郭阳明,蔡小斌,张宝珍,等.故障预测与健康管理技术综述[J].计算机测量与控制,2008,16(9):1213-1219.
GUO Yang-ming, CAI Xiao-bin, ZHANG Bao-zhen, et al. Review of Prognostics and Health Management Technology [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(9): 1213-1219. (in Chinese)
- [2] 曾声奎, Pecht M G, 吴际.故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J].航空学报,2005,26(5):627-632.
ZENG Sheng-kui, Pecht M G, WU Ji. Status and Perspectives of Prognostic and Health Management Technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 627-632. (in Chinese)
- [3] 孙博,康锐,谢劲松.故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J].系统工程与电子技术,2007,29(10):1762-1767.
SUN Bo, KANG Rui, XIE Jin-song. Research and application of the prognostic and health management system [J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1762-1767. (in Chinese)
- [4] 石君友,纪超.扩展 FMECA 方法应用研究[J].测控技术,2011,30(5):110-114.

SHI Jun-you, JI Chao. Study on Enhanced FMECA Method Application [J]. Test and Control Technology, 2011, 30(5): 110-114. (in Chinese)

- [5] 钱彦岭.测试性建模技术及其应用研究[D].长沙:国防科技大学,2002:2-13.
QIAN Yan-ling. Testability Modeling Technology and Its Application Research [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002: 2-13. (in Chinese)
- [6] 许丽佳,龙兵,王厚军.混合训练的 DHMM 及其在发射机状态检测中的应用[J].电子与信息学报,2008,30(7):1661-1666.
XU Li-jia, LONG Bing, WANG Hou-jun. Hybrid Training DHMM and Its Application to Check Transmitter Power [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1661-1666. (in Chinese)
- [7] 许丽佳,王厚军,龙兵.贝叶斯网络在电子系统故障诊断中的应用研究[J].计算机工程与应用,2009,45(8):194-199.
XU Li-jia, WANG Hou-jun, LONG Bing. Study on fault diagnosis of electronic system using Bayesian network [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(8): 194-199. (in Chinese)

作者简介:



黄 鹤(1970—),男,四川巴中人,高级工程师,主要从事综合化航空电子系统的总体研究;

HUANG He was born in Bazhong, Sichuan Province in 1970. He is now a senior engineer. His research concerns integrated avionics.

Email: hh2013hh@126.com

卢海涛(1967—),男,北京航空航天大学系统工程学院博士研究生,主要研究方向为健康管理。

LU Hai-tao was born in 1967. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns health management.