

综合航空电子系统故障诊断与健康管理工作发展

卢海涛, 王自力

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院可靠性与环境工程重点实验室, 北京 100191)

摘要: 故障诊断与健康管理工作(PHM)技术是提高系统可用性、维修效率和降低寿命周期成本的重要手段,已成为未来飞机航空电子系统的一项关键技术和重要目标之一。从航空电子系统和PHM技术的发展角度,总结了国内外PHM技术的发展现状,介绍了综合航空电子PHM系统OSA-CBM开放式体系架构,分析了综合航电PHM系统的关键技术,并对未来综合航空电子PHM技术的发展进行了探讨。

关键词: 综合航空电子系统; 故障诊断; 健康管理; 故障预测

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0060-06

Development Review of Integrated Avionics Prognostics and Health Management Technology

LU Hai-tao, WANG Zi-li

(Key Laboratory of Reliability and Environment Engineering, School of Reliability and System Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Prognostics and health management (PHM) technology is the main method for improving the system availability, maintenance efficiency and reducing the life-cycle cost, which has become a key technology and one of the important goals of future aircraft avionics system design. From the perspective of the development of avionics system and PHM technology, the development status of PHM technology is summarized. The OSA-CBM open architecture of integrated avionics PHM system is introduced, and analysis is given to the key technologies of PHM system. Finally, discussion is presented to the future development of the integrated avionics PHM technology.

Key words: integrated avionics system; fault diagnosis; health management; fault prediction

0 引言

综合航空电子系统是当今世界机载航空电子系统发展所达到的最高水平,在美军四代机F-22、F-35上综合航电系统所具备的特征和优势得到了充分的展现,这也成为我国先进战机综合航电系统设计研制工作的依据和参考^[1]。综合航空电子系统在信息技术发展的推动以及信息网络化作战需求的牵引下,其作用和地位日益突出,在飞机系统组成和生产成本中占有越来越大的比重,据国外统计,在歼击机、轰炸机等军用飞机的生产成本中航空电子设备所占的比例已经超过四成,而在预警机、侦察机和电子对抗飞机等专用飞机中,航空电子设备在生产成本中所占的比例更高,已

经超过一半。

在未来战争中,通信、导航、雷达、火力控制、电子对抗等航电设备对武器作战效能的影响越来越大,而需要航电系统辅助完成的任务也日益增多,因此,综合航电系统出现故障的风险不断增加,所造成的损失越来越大,相应的维护费用也与日俱增。据统计,在飞机全寿命周期中,航空电子系统的故障占到飞机系统总故障的40%以上,使用和保障费用占到总费用的70%以上。因此,不仅要追求综合航电系统的高性能,同时也要不断提高它的可靠性、可用性以及经济可承受性^[2]。

以上需求促进了故障预测与健康管理工作的发展和产生。故障诊断与健康管理工作(Prognostic and Health Management, PHM)技术基于传感器采集的航电系统数据,利用神经网络、专家系统等推理算法对航电系统的健康状况进行评估,并基于评估结果对将要发生的系统故障进行预测,根据可能发生的故障利用可用资源

提供一系列维修保障措施^[3]。

PHM 技术的实现代表了航电系统维修保障方法的一种转变,即从传统的基于故障的事后诊断、事后维修或定期维修转变为基于状态的故障预测维修(视情维修),可以在恰当的时间对将要发生故障的部件进行事前的维修,既可以防止故障发生影响系统使用,又可以避免为防止故障发生而进行过度维修,从而提高产品的可用性,减少保障费用。通过采用 PHM 技术,美国的联合攻击机(Joint Strike Fighter, JSF)项目的维修人力减少了 20%~40%,后勤规模缩小了 50%,飞机出动架次率提高了 25%,使用寿命长达 8000 飞行小时,PHM 技术有效地降低了飞机的使用与保障费用,提高了飞机系统的安全性、战备完好率和任务成功率^[4]。

目前,PHM 技术在国外得到了深入的研究,而我国新型飞机的研制对 PHM 技术也提出了迫切的需求。本文总结了 PHM 技术的国内外研究现状,介绍了综合航电 PHM 体系结构,分析了有关的关键技术,探讨了未来 PHM 技术的发展,以期为我国综合航空电子系统 PHM 技术的发展提供参考。

1 PHM 技术国内外应用与研究现状

近年来,随着技术的日新月异,航电系统不断向着综合化、复杂化、智能化的方向发展,航电系统故障诊断技术也不断进步,从单纯的航电设备机内监测和状态监控,发展演变为覆盖航电系统所有关键部件的机载 PHM。PHM 技术受到各国军方和工业界越来越多的关注,并在军事、民航等多个领域取得了令人瞩目的应用效果^[5]。

1.1 军事领域的应用情况

PHM 技术在美国、英国、法国等国的军用飞机上被称为健康与使用监控系统(Health and Using Monitor System, HUMS)。目前, HUMS 已经在“阵风”、“鹰”、C-130 等固定翼军用飞机上得到了广泛应用。2006 年,波音公司与泰瑞达公司达成协议,委托泰瑞达公司为美国海军 P-8A 飞机研制飞机健康监测系统(AHMS)。美军 F-35 飞机也采用 PHM 技术进行自主式保障,代表了美军目前 PHM 技术所能达到的最高水平,目前 F-35 飞机的 PHM 技术正在研制和成熟过程中,并将在后续批次飞机中引入。

除了固定翼飞机, PHM 技术在直升机、无人机上也已经得到了广泛的应用。美军的新一代 HUMS——JAHUMS 已经具备全面的 PHM 能力和开放、灵活的系统结构, JAHUMS 系统已经在美国陆军的 180 多架直升机得到应用,其中包括 AH-64“阿帕奇”、UH-60“黑鹰”和 CH-47“支奴干”,而且美陆军已批准在全部 750

架“阿帕奇”直升机上安装 HUMS。据报导,通过使用 JAHUMS 系统,美国陆军直升机的任务完备率得到了较大的提高。美国陆军已向其编制内装备 JAHUMS 的直升机颁发了适航证书和维修许可证书。2007 年 3 月,美国陆军将 HUMS 引入 RQ-7A/B“影子”200 战术无人机系统中。英国于 2011 年为未来“山猫”直升机装备了 HUMS 系统,该系统能够监测直升机的飞行和使用状态,还能够记录机舱内的声音和飞行数据,另外,该系统也将装备到陆军的战地侦察直升机和海军的海上旋翼机上^[6]。

另外,美国各军种的 PHM 技术开发项目还有:陆军的诊断改进计划(ADIP)、海军的综合状态评估系统(ICAS)、NASA 的可重复使用飞行器综合健康管理(IVHM)系统(也可用于 B-2 轰炸机和全球鹰无人机)等。

1.2 民用领域的应用情况

经过不断推广, PHM 技术在民用领域也得到广泛应用,其中波音公司研制的飞机状态管理(AHM)系统最为著名,美国、法国、日本等多国航空公司的多型民航客机通过使用这套系统,飞行安全和航班运营效率得到了提高。据波音公司统计,通过使用 AHM 系统,航空公司因航班延误或取消而产生的费用下降了约 25%, AHM 系统还能够识别频发故障和预测航电系统发展趋势,从而支持航空公司实现长期可靠运行^[7]。

NASA 与 ARINC 公司合作,成功研制了“飞机状态分析与管理系统(ACAMS)”,该系统与 PHM 系统类似,并在 B757 飞机上得到了演示验证。另外, NASA 将 Qualtech 公司开发的综合系统健康管理(ISHM)方案应用于航天飞机,对其健康状况进行监控,并能够对系统故障进行排查和诊断,从而降低航天飞机的系统故障。

1.3 理论研究情况

PHM 技术在军、民领域的广泛应用,以及由此所带来的巨大收益,使其得到了广泛的重视,并极大地促进了 PHM 技术的研究活动。NASA 通过举办国际宇航“综合系统健康工程和管理(ISHEM)”论坛,对航天领域的 PHM 技术进行研讨;美国圣地亚国家实验室专门成立了 PHM 创优中心(COE),支持 PHM 技术开发和试验确认;美国马里兰大学成立了预测与健康管理局,进行 PHM 技术研究和相关培训;另外,各种国际 PHM 技术研讨会也不断召开,其中电子系统故障预测技术是这些会议的一个共同热门话题。

1.4 国内研究情况

国内关于 PHM 技术的研究起步较晚,研究内容主要集中在概念、原理及局部支撑技术,尚无完整的系统投入使用,与国外存在很大的差距。理论研究方面,文

献[8]以人-机-环完整性认知模型为基础,对 PHM 技术进行了分类和综述;文献[9]构建了基于 OSA-CBM 的综合航电 PHM 系统框架结构,从可预测性设计、故障预测技术和健康管理技术 3 个方面分析了综合航电 PHM 系统的支撑技术;文献[10-13]分别对 PHM 技术在射频信道、雷达、惯导等航电设备中的应用进行了研究;文献[14]分析了新型传感器在 PHM 系统中的应用,并对有线和无线数据传输技术的应用进行了研究;文献[15]设计了一种飞机 PHM 系统框架,并运用物联网技术完成了自主保障系统的构建;文献[16]对 PHM 专家系统进行了研究;文献[17]构建了一种机载燃油管理系统半实物仿真平台,并对 PHM 性能评价指标进行了分类研究;文献[18]提出了一种由模块/单元层、子系统层、区域层和平台层等 4 层集成的 PHM 系统层次化体系结构;文献[19]提出了基于可用度模型的 PHM 方法,通过广义随机 Petri 网和连续马尔可夫链建立了计算模型;文献[20]建立了传感器优化配置模型,并采用扩展微粒子群优化算法对模型进行求解。

2 PHM 功能

通过对综合航空电子系统设计和使用过程的研究分析,PHM 系统的主要功能包括以下 4 点。

1) 状态监测和功能、性能测试。对监测的状态参数进行特征提取,通过数据融合,避免参数功能的重叠与缺失,完整、准确地描述航电系统的运行状态,所保存的状态监测和测试结果为航电系统的故障诊断、预测、健康管理提供支持。

2) 故障诊断定位。当航电系统出现故障时,PHM 能够迅速、准确地对故障进行定位,确定发生故障的部件,提供解决故障的方法并将相关信息保存起来,为航电系统的故障预测、健康状态管理提供支撑。

3) 故障预测。根据航电系统状态监测数据以及系统功能、性能测试结果,结合故障诊断定位信息,并借助一定的故障预测模型,对今后一段时间内可能出现的故障进行预测,并对故障的解决措施及保障信息提出建议。

4) 综合保障和健康状态管理。在预测到航电系统将要发生故障时,采用预先维修、保养的方法,将传统的事后维修转变为视情维修,在故障真正发生之前采取相应的保障措施,将被动反应转变为主动预防,实现航电系统的自主式保障。

3 综合航电 PHM 系统体系结构

综合航电系统是一个分布式实时网络系统,主要

包括传感器网络、综合核心处理机(Integrated Core Processor, ICP)、信息显示控制设备和航电系统总线等。

综合航电系统失效是指在约束条件下系统的设计功能不能正确地执行。引起失效的因素包括内因和外因两个方面:内因是指系统硬件和软件设计缺陷在系统运行过程中被激活所导致的系统失效;外因是指与航电系统存在耦合关系的其他机载系统、外部环境和操作人员的错误或影响所导致的系统内部状态的改变而造成的系统失效。综合航电系统失效又分为物理失效和功能失效两种类型:物理失效是指物理器件的损耗引发的性能下降和降级,属于永久性失效;功能失效是指当不存在部件的物理失效时系统出现功能丧失或状态错误。

由此可见,综合航电系统失效是一个系统健康状态随时间不断变化的过程,在体系结构的相同层级和不同层级间还存在错误状态的复制与传播,而由于资源相互交错、系统资源共享、功能高度耦合所造成的综合航电系统结构的高度复杂性,也使得航电系统故障传播途径呈现出多维化、复杂化的趋势,这给 PHM 带来较大困难。

综合航电 PHM 系统是由机载 PHM 和地面 PHM 构成的一体化系统。机载 PHM 可以在无需人工或者外部设备参与的情况下,对航电系统健康状态实时监测,并对系统故障进行预测,以及故障检测和隔离。

3.1 机载 PHM 结构

机载 PHM 体系结构通常包括 3 种:集中式、分布式、综合式。综合式体系结构将集中式和分布式体系结构相结合,各个子系统在较低的层次上收集、解释、融合用于本子系统状态评估的所有信号,实现对该子系统的健康管理,然后在较高的层次上将较低层次的健康管理结果进行集中,并交由上一级健康管理记录和决策。综合式体系结构通过在子系统级、系统级的两次融合,更加全面地评估系统状态,也能更加有效地降低航电系统的故障虚警率。

下一代战机具备高度智能、高度复杂的特点,其机载 PHM 系统适合采用分层融合式体系结构。基于状态维修的开放式系统架构(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM)是一种典型的分层融合式体系架构,它由波音公司牵头,来自工业、军事、商业制造、传感器技术等领域的 10 多个组织机构共同制定。该体系结构已经在美国海军舰船、飞机、民用车辆以及其他工业领域中得到初步应用和验证^[21]。本文参考 OSA-CBM 给出一种综合航空电子 PHM 系统结构,如图 1 所示。

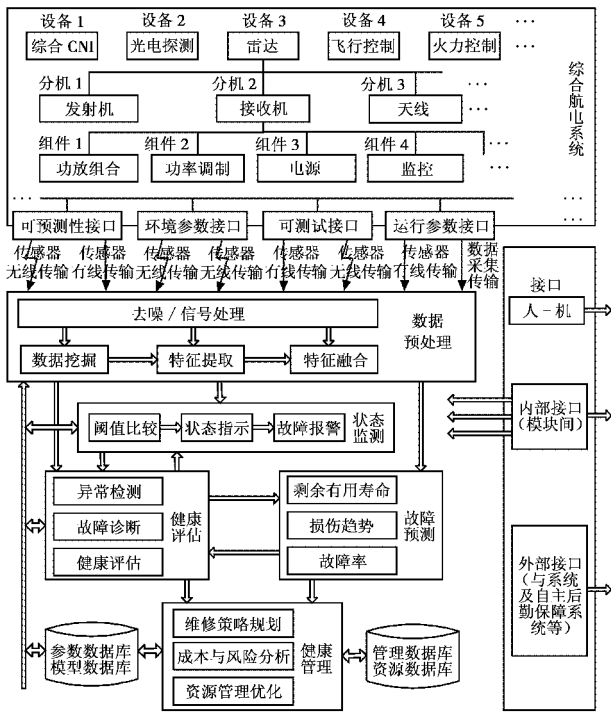


图 1 综合航电机载 PHM 系统体系结构

Fig. 1 Architecture of integrated avionics airborne PHM system

综合航电机载 PHM 系统体系结构由 7 个部分组成。

- 1) 数据采集层。数据采集层通过传感器采集航电系统状态监控与功能、性能测试所需的各种数据。
- 2) 数据处理层。数据采集层采集的数据以无线或有线的方 式传送到数据处理层,经过去噪、挖掘和融合处理,为后续应用提供可用数据。
- 3) 状态监测层。状态监测层根据任务需求对航电系统状态进行实时监控,并提供状态指示和异常报警。
- 4) 健康评估层。健康评估层根据状态监测层获得的状态信息对航电系统的当前健康状况进行评估。
- 5) 故障预测层。故障预测层根据系统健康评估结果对关键部件的剩余使用寿命、累计损伤趋势等进行预测,判断未来一段时间内的故障情况。
- 6) 健康管理层。健康管理层结合各种数据库信息及健康评估和故障预测信息规划装备的维修策略,优化备品备件等资源的管理与调度。
- 7) 接口部分。接口部分实现综合航电 PHM 系统各层级之间的数据交互,实现人-机交互以及与其他系统的交联,包括人-机接口和机-机接口。

3.2 地面 PHM 结构

地面 PHM 主要由实时数据接收、实时数据记录、数据回放、预测诊断、寿命管理、维修辅助等模块构成,如图 2 所示。

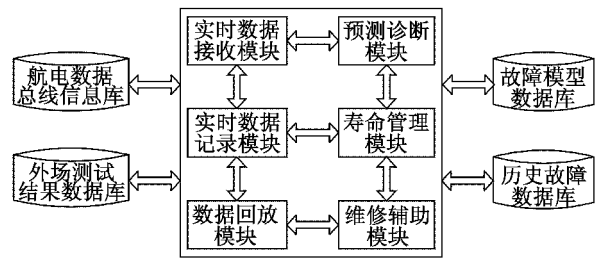


图 2 地面 PHM 系统结构

Fig. 2 Architecture of ground PHM system

实时数据接收、记录模块通过无线通信链路与机载 PHM 通信,从机载 PHM 实时接收并记录下传的航电系统故障信息,使地勤保障能够在飞机返航前做好维修准备。数据回放模块可以根据记录数据重现故障发生时航电系统的状态,为工程师和维修人员深入研究系统故障提供支持。预测诊断、寿命管理模块通过离线的数据处理和信息融合实现部件使用寿命分析和健康状态趋势分析,并结合在线的飞行员告警信息进行综合判别,实现基于状态的维修。维修辅助模块辅助维修人员定位系统故障并给出维修建议。

地面 PHM 系统离不开相应数据库的支持,图 2 中相应数据库中存储的数据包括航电总线数据、运行环境数据、设计和生产过程的表征设备正常/故障状态的技术数据、维修记录数据等,这些数据为地面 PHM 功能提供数据支持。

3.3 机载 PHM 和地面 PHM 接口

机载 PHM 和地面 PHM 之间的接口分为空中接口和地面接口两类,空中接口通过无线数据链方式实现,指战机在飞行过程中,航电系统故障信息通过该接口实时下传至地面 PHM,地面接口通过有线或无线方式实现,维护人员通过地面接口下载机载 PHM 记录的系 统故障信息、航电总线信息,为故障的分析解决提供支持。

4 综合航电系统 PHM 关键技术

4.1 系统监测性能参数选择技术

目前机载航电任务系统已经非常复杂,包含数量巨大的电子产品,由于电子产品具备难于检测、时效短等故障特性,因此要对航电系统进行监测,首先要面对选择何种性能参数来监测的问题。针对这个问题,综合航电 PHM 系统可以在航电系统、子系统、航电设备、元器件等多个级别上分别进行特征参数的性能检测,采用分布式方式实施监测。美国空军对某海军基地飞机航电系统故障调查分析结果表明,机载航电设备寿命很容易受到恶劣环境条件及过应力的影响^[22],而且电子元件/设备故障常常伴随着工作电流的显著变化,所以综合航空电子系统 PHM 设计可以将各设备的工

作电流、工作温度、湿度应力等作为系统监测参数。

4.2 设备剩余能力评估技术

设备剩余能力评估以故障诊断、故障隔离和系统重构为基础,根据设备目前的工作模式、工作状态以及未来可能的工作模式,判断设备正常工作能力的多少。设备剩余能力可以采用两种方式表示:1)设备功能性能参数的下降,例如雷达故障后对目标的探测距离的减少;2)用设备完成功能的概率来表示,根据不同的概率划分为不同的健康度等级。以上两种方法也可对应起来。设备剩余能力评估计算通常以设备正常工作下的工作能力为基础,实时监测设备的性能状态参数,利用评估算法模型进行计算,得到设备对正常状态的偏离程度,从而得到航电设备的剩余能力。设备剩余能力评估方法有基于马尔可夫模型(HMM)计算方法和基于贝叶斯网络计算方法。

4.3 设备故障预测技术

航电系统设备及其所包含的元器件种类和数量都很大,每种元器件发生故障的模式又各不相同,而元器件处于失效状态的时间很短,发生故障所造成的影响非常复杂,这些因素都给设备故障预测增加了难度,如何构建系统故障预测模型成为 PHM 系统研究的一项关键技术,目前还没有成熟的技术可供借鉴。故障预测方法可以归纳为 3 种:1)累积损伤预测法,该方法以元器件发生失效物理数学模型、失效产生机理等知识为基础,综合考虑产品性能、工作载荷及实际环境条件,是目前应用较多的一种方法^[23];2)故障征兆监测法,一般情况下,电子元器件、设备的工作状态在发生异常前其性能参数或特征物理量会出现明显变化,如工作电流、温度、匹配阻抗等,该方法基于此构建预测模型方法;3)故障预警监测法,该方法通过在设备中设置预警芯片来进行故障预测,预警芯片工作电路与被监测设备工作电路的故障模式和失效机理相同,但失效率比被监测设备要高。对于航电系统而言,间歇性故障预测是故障预测中的一大难题^[24]。

4.4 设备故障诊断技术

设备故障诊断以故障诊断知识为基础,采用一定的算法模型进行诊断推理,判断系统故障的准确位置。综合航电系统 PHM 的故障诊断包含检测、定位、辨识 3 个阶段,建立系统内部结构与信号流向之间的依赖关系,得出各个模块与测试点之间的相关矩阵,综合利用故障诊断方法进行诊断^[25]。目前,故障诊断方法主要有相关性模型方法、专家系统推理方法等。通过综合推理策略及统一协调机制,可以提高诊断系统的诊断能力和诊断效率^[21]。

5 PHM 发展与挑战

虽然航空电子系统 PHM 技术的发展十分迅速,但是距离大规模工程应用还很遥远,在以下方面存在较大困难:1)航电设备失效数学模型难以建立;2)设备剩余能力预测评估精度不高;3)间歇性故障预测方法还很不成熟。

综合航空电子系统 PHM 技术需要在以下几个方面加大研究和试验力度^[26]:1)采用并行工程原则,将 PHM 系统的框架设计和细节设计与综合航电系统的设计开发同步进行;2)综合航电 PHM 系统设计得合理与否需要采用多种试验方法进行定量评价与验证;3)数据源的监测精度有待进一步提高,使用灵巧、稳健的传感器设备,结合故障预测技术,降低虚警率,不断提高健康监控与管理的质量;4)进一步提高预测系统的综合性能,多种故障预测算法相结合可以有效提高故障预测的可靠性,降低故障虚警率;5)加大综合航电 PHM 仿真验证系统的研制,支撑故障预测算法的开发和验证。

6 结束语

PHM 技术是确保综合航空电子系统运行安全、提高系统可用性、降低系统全寿命周期运行成本的关键,因此得到了世界各国的大力发展。本文总结了国内外 PHM 技术的发展现状,介绍了综合航电 PHM 体系的体系结构,分析了 PHM 的关键技术和面临的挑战,对于我国综合航空电子系统 PHM 技术发展具有积极的借鉴作用。

参考文献

- [1] 熊华钢,王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009:16-92. (XIONG H G, WANG Z H. Advanced avionics intergrace technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:16-92.)
- [2] 霍曼. 飞速发展的航空电子[M]. 北京:航空工业出版社,2007:8-32. (HUO M. Avionics advancing at high speed[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2007:8-32.)
- [3] WILKINSON C, HUMPHREY D. Prognostic and health management for avionics [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004,6-13.
- [4] ANDREW H, CALVELLO G, DABNEY T. PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept [C]//Proceedings of Aerospace Conference, 2004: 3543-3550.
- [5] HESS A, FILA L. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM

- concept: potential impact on aging aircraft problems [C] // IEEE Aerospace Conference, 2002, 3021-3026.
- [6] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作技术的发展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594. (ZHANG B Z. Development and application of integrated diagnostics, prognostics and health management technologies of abroad [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(5): 591-594.)
- [7] VICHARE N, PECHT M. Prognostics and health management of electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 222-229.
- [8] 曾声奎, MICHAEL G P, 吴际. 故障预测与健康管理工作 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2006, 26(5): 626-632. (ZENG S K, MICHAEL G P, WU J. Status and perspectives of prognostics and health management technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 26(5): 626-632.)
- [9] 吴明辉, 许爱强, 戴豪民. PHM 技术在综合航空电子系统中的应用 [J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 72-77. (WU M H, XU A Q, DAI H M. Application of PHM technique in integrated avionics electronics system [J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(4): 72-77.)
- [10] 黄鹤, 陈文豪, 张弋. 机载航电系统射频信道健康表征及影响评估 [J]. 电讯技术, 2013, 53(5): 628-633. (HUANG H, CHEN W H, ZHANG Y. Health characterization and effect evaluation of RF channel in airborne avionics system [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(5): 628-633.)
- [11] 王晗中, 杨江平, 王世华. 基于 PHM 的雷达装备维修保障研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(4): 83-86. (WANG H Z, YANG J P, WANG S H. Research on the maintenance support system for radar equipment based on the PHM [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(4): 83-86.)
- [12] 王宏. 健康管理在机载雷达中的应用研究 [J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 20-24. (WANG H. A study of health management in airborne radar [J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 20-24.)
- [13] 赵剡, 滕冲, 杨辉, 等. 预测与健康管理工作在惯导系统中的应用研究 [J]. 航空兵器, 2014(2): 49-53. (ZHAO Y, TENG C, YANG H, et al. Research on the application of prognostics and health management in inertial navigation system [J]. Aero Weaponry, 2014(2): 49-53.)
- [14] 孙博, 康锐, 谢劲松. PHM 系统中的传感器应用与数据传输技术 [J]. 测控技术, 2007, 26(7): 12-14. (SUN B, KANG R, XIE J S. The application technique of prognostic and health management system [J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(7): 12-14.)
- [15] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 飞机故障预测与健康管理工作应用模式研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(9): 2061-2063. (YANG Z, JING B, ZHANG J, et al. Research on implementation modes of airborne PHM system [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(9): 2061-2063.)
- [16] 孙海东, 吕健. 航空电子系统健康管理专家系统的关键技术综述 [J]. 电光与控制, 2009, 16(7): 40-44. (SUN H D, LYU J. On critical technologies for health management expert system of avionics system [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(7): 40-44.)
- [17] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 机载系统故障预测与健康管理工作验证与评估方法 [J]. 测控技术, 2012, 31(3): 101-104. (YANG Z, JING B, ZHANG J, et al. Verification and evaluation method of airborne PHM system [J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(3): 101-104.)
- [18] 张亮, 张凤鸣, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理工作 (PHM) 系统的体系结构 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(2): 6-9. (ZHANG L, ZHANG F M, LI J T, et al. Research on on-board prognostics and health management system architecture for operational aircraft [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(2): 6-9.)
- [19] 王昊天, 石健. 基于可用度模型的故障预测与健康管理工作方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2584-2589. (WANG H T, SHI J. Method of prognostics and health management based on availability model [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2584-2589.)
- [20] 张亮, 张凤鸣. 装备健康管理中的传感器优化配置问题研究 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27(7): 18-20. (ZHANG L, ZHANG F M. Research on optimal sensor placement in equipment health management [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(7): 18-20.)
- [21] BENGTTSSON L M, OLSSON E, FUNK P, et al. Technical design of condition based maintenance system: a case study using sound analysis and case-based reasoning [DB/OL]. [2015-01-01]. <http://www.doc88.com/p-9005742132930.html>.

- [8] 刘超. 基于 DM368 的嵌入式数字高清网络摄像机采集处理模块设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2012. (LIU C. DM368-based embedded digital HD IP network camera acquisition and processing module design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.)
- [9] 颜学究. 基于 TMS320DM6467 的视频编码系统研究与实现[D]. 重庆:重庆大学,2012. (YAN X J. The research and implementation on video coding system based on TMS320DM6467 [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [10] 李宏,吴衡. 机载 LVDS 数字视频信号采集记录技术研究[J]. 电光与控制,2011,18(5):72-75. (LI H, WU H. Acquisition and recording of onboard LVDS digital video signal [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(5):72-75.)
- [11] 陈智,邱跃洪,董佳. LVDS 接口原理及其在电路设计中的应用[J]. 科学技术与工程,2005,5(21):1656-1657. (CHEN Z, QIU Y H, DONG J. LVDS interface principle and its application in the circuit design [J]. Science Technology and Engineering, 2005, 5(21):1656-1657.)
- [12] 高非非,刘辛国. ARM-Linux 中 I2C 总线驱动开发[J]. 微型机与应用,2012,31(5):57-58. (GAO F F, LIU X G. Design of I2C bus driver based on ARM-Linux [J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(5):57-58.)

(上接第 65 页)

- [22] GU J, PECHT M. Prognostics and health management using physics-of-failure [C]//54th Annual Reliability & Maintainability Symposium, RAMS 2008:481-487.
- [23] AVIZIENIS A, LAPRIE J C, RANDELL B. Fundamental concepts of dependability [C]//Proceedings of the 3rd Information Survivability, 2000:7-12.
- [24] 章新瑞,任占勇. 可靠性试验中环境应力与产品故障机理间关系研究 [J]. 环境技术, 2000(5):7-11. (ZHANG X R, REN Z Y. Research on relationship between stress and product reliability failure mechanisms environment experiment [J]. Environment Technology, 2000(5):7-11.)
- [25] 丛伟,景博,樊晓光. 综合航电系统健康管理体系统结构设计 [J]. 测控技术, 2013, 32(8):126-130. (CONG W, JING B, FAN X G. Design of health management architecture of integrated avionics system [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(8):126-130.)
- [26] SAHA B, GOEBEL K, POLL S, et al. Prognostics methods for battery health monitoring using a Bayesian framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(2):291-296.

(上接第 70 页)

- 34(3):227-229. (WANG X Y, LIU Z, TANG L J. A multi-attribute evaluation based on expert knowledge of software quality methods [J]. Computer Technology and Application Development, 2008, 34(3):227-229.)
- [7] 李文静. 软件缺陷与软件测试 [J]. 计算机与网络, 2001(21):31-32. (LI W J. Software defects and software testing [J]. Computer and Network, 2001(21):31-32.)
- [8] FENTON N, NEIL M. A critique of software defect prediction models [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1999, 25(5):675-689.
- [9] 郭飞,侯朝桢,戴忠建,等. 基于模糊-证据理论的软件缺陷评估新方法 [J]. 计算机应用, 2006(s1):275-276. (GUO F, HOU C Z, DAI Z J, et al. Fuzzy-software defects evidence theory methods to evaluate new computer application [J]. Computer Applications, 2006(s1):275-276.)

(上接第 75 页)

45. (WANG W W, YANG G P, LYU C, et al. New image segmentation model based on the level set method [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(6):39-45.)
- [11] DIRAMI A, HAMMOUCHE K, DIAF M, et al. Fast multilevel thresholding for image segmentation through a multiphase level set method [J]. Signal Processing, 2013, 93(1):139-153.
- [12] BALLA-ARABÉ S, GAO X, WANG B. A fast and robust level set method for image segmentation using fuzzy clustering and lattice Boltzmann method [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(3):910-920.
- [13] WANG L F, PAN C H. Image-guided regularization level set evolution for MR image segmentation and bias field correction [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2014, 32(1):71-83.
- [14] DONG F F, CHEN Z S, WANG J W. A new level set method for inhomogeneous image segmentation [J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(10):809-822.
- [15] 崔玉玲. 基于改进符号距离函数的变分水平集图像分割算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(11):1033-1040. (CUI Y L. A variational level set method for image segmentation based on improved signed distance function [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(11):1033-1040.)
- [16] DIRAMIA A, HAMMOUCHEA K, DIAFA M. Fast multilevel thresholding for image segmentation through a multiphase level set method [J]. Signal Processing, 2013, 93(1):139-153.