

新一代航空电子综合化及预测与健康管理技术

赵宁社¹, 翟正军¹, 王国庆^{1,2}

(1 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

摘要:在介绍航空电子系统发展演变历史的基础上,分析了新一代综合化航电系统的主要特征,深入探讨了航空电子预测与健康管理(PHM)的关键技术,包括失效机理分析、应力损伤评估、故障先兆以及预警电路(canary)4个类别,详细分析了 PHM 相关的信息融合、人工智能、数据挖掘与预测等技术的实现方法与应用,研究并给出了新一代综合模块化航空电子系统与 PHM 的体系架构。

关键词:航空电子综合化;预测与健康管理;PHM 体系架构

中图分类号: TP206⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2011)01-0001-05

Technologies of New Generation Avionics Integration and Prognostics and Health Management

ZHAO Ning-she¹, ZHAI Zheng-jun¹, WANG Guo-qing^{1,2}

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

2 China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on the introduction of the evolution of avionics systems, the main features of the new generation integrated avionics system are analyzed and the key technology of avionics PHM are probed deeply, including physical-of-failure (POF), stress damage assessment, failure precursor and canary. Moreover, the key technology and applications of the PHM-related information fusion, artificial intelligence, data mining and prognostics are thoroughly analyzed. Finally, the architecture of new generation integrated modular avionics system and PHM are researched and given.

Key words: avionics integration; prognostics and health management; PHM architecture

航电系统的综合化经历了独立式、联合式、综合式和先进综合式 4 个阶段的演变,目前综合化、模块化航空电子(MA)系统的应用是新一代航空器的突出特点。随着航电系统复杂度的提高,对综合保障和故障诊断维护能力也提出了越来越高的要求。故障诊断技术由外部测试、BIT 进化至当前的预测与健康管理(PHM)系统。目前,预测与健康管理(PHM)已成为新一代航空电子可靠性与可维护性发展的必然趋势。国外对 MA 和 PHM 技术进行了深入、系统的研究,我国新一代飞机的研制对这两项技术也有迫切的需求。本文综合论述了新一代航空电子综合化技术和 PHM 技术

的国内外研究现状,探讨了所需要的关键技术,研究了新一代综合模块化航空电子系统与 PHM 的系统结构。

1 新一代航空电子综合化技术概述

1.1 航空电子综合化发展历史与现状

航空电子发展之初,研究工作只是针对航空任务有效性进行的,各个部件是完全独立开发、纵向集成的。这个阶段的航电系统属于独立式结构,系统中各独立部件如雷达、通信、显示等部件之间采用点对点连接。

随着航空环境与飞行任务日趋复杂,对航空电子的性能要求也与日俱增。航电系统规模不断扩大,机载电子的种类不断增多,传感器、显示器、控制器等部件都大量重复使用,航电系统串联研发的压力趋向饱和。研发人员开始研究机载部件之间的联系,根据任务需要,把功能相近、彼此交联的部件进行横向联合,形成了联合式航空电子系统。这个阶段的代表技术是在美国空军的数字式航空电子系统(DAIS)基础之上,

收稿日期: 2010-01-08;修回日期: 2010-04-21

基金项目: 国防“十一五”预研基金资助项目(B2720060300)

作者简介: 赵宁社(1975-),男,博士研究生,主要研究领域为嵌入式系统、分布计算;翟正军(1965-),男,教授,主要研究领域为航空测控和智能故障诊断;王国庆(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为航空工程、计算机系统结构。

采用 1553B 总线。该技术的使用极大地简化了部件间的连接关系、弱化了电磁干扰、建立了模块化模式、推动了航电系统的综合化。

随后的美国空军“宝石柱”(Pave Pillar)计划进一步增强了各学科的横向联合,航电系统表现为由学科联合走向学科综合,在该计划执行中制定的“宝石柱航空电子系统结构规范”推动了航电系统正式进入综合化,使得航电系统的发展向着模块化、综合化、电子化的第 3 阶段迈进。F-22 战机是基于“宝石柱”计划研发的典型代表,技术特征是使用综合核心处理机(ICP)来完成系统信号与数据的综合处理,它实现了各功能区间的高速数据总线互联。第 3 阶段的综合化航电系统同时实现了共用模块、容错和重构,为第 4 阶段高度综合化航电系统打下了良好基础。

继“宝石柱”计划执行的“宝石台”(Pave Pace)计划与在其基础上研制的 JSF F-35 代表了最先进的新一代战机,其拥有先进综合的航电系统,实现了资源的高度共享、综合系统管理及预测与健康健康管理,提供了子系统的自检、故障隔离与重构能力,具备更高的可靠性与可维护性。

有资料表明,综合化的进一步发展是面向平台空间的“网络化”,是更高意义的综合化。

1.2 新一代航电综合化关键技术分析

1.2.1 开放式体系结构

传统的“封闭式结构”是面向专用技术的研发,在满足性能需求提升时,由于缺乏技术竞争,经济可承受性大幅度提升,同时工程上也缺乏与异构设备互动的灵活性和可移植性。“开放式结构”则克服了以上缺点,它的出现使采购及维护的成本明显降低。开放体系结构的实现关键在于接口标准与交换协议的制定,使异构部件之间互动遵循统一的规范和标准。开放式体系结构不但促进了第三方厂商之间的合作,而且利于缩短开发周期。在 F-35 航电系统中,所有关键的电子系统,包括 ICP 大量采用通用模块和商用货架产品(COTS)。开放体系结构在军用航空中的扩大应用是不可逆转的趋势。

1.2.2 传感器信息融合技术

为满足新时期航空需求,航电系统要大量采集飞机内外部的各种数据并对其进行融合,形成对航空以及作战的正确感知。传感器网络在信息集中起着关键的作用,通常在整个航电系统中,传感器占到费用的 70%。比如在 JSF 的研发中,多个国家参与其中,其中的高水平探测传感器与信息融合则是由美国掌控的,仅从这一点不难看出传感器信息融合的重要性。

新一代 MA 的传感器网络均采用高速通道。比如在 F-35 中,ICP 和每个传感器、CNI 系统和各显示器

之间的通信采用速度为 2 Gb/s 的光纤总线。另外在 MA 中,任务系统软件是实现传感器网络的数据处理、筛选、融合和参照显示的关键。

1.2.3 实时容错操作系统

传统的多线程实时操作系统已经不能满足航空电子对于安全性的需求,实时容错操作系统是航电操作系统的发展趋势。

目前国际上存在两个关于航空实时操作系统的标准:ARINC653 标准与 ASAAC 标准,它们为系统的安全性制定了多种可行的策略,其中有分区、分层、虚通道等技术。按照航电应用功能划分的独立工作单元就是分区,分区有独立的运行环境、数据空间与上下文关系,能有效地进行任务隔离,分区管理的关键是时间、空间隔离。为了保证航电系统的安全性和实现软件模块的灵活控制,采用了分层防御技术,标准中对实时容错操作系统定义了层次架构以及层间的各种接口。ARINC653 制定的体系包括 3 部分:操作系统、软件开发环境和开放式接口规范。进程间通信采用了虚通道技术,借助虚通道供操作系统管理,可以预测进程时间和空间的使用情况,同时保证了进程间数据的独立与安全性。

1.2.4 预测与健康健康管理(PHM)技术

新一代 MA 的采用引起了系统结构、活动能力、状态管理方式及健康管理方式的变化,如何优化系统的操作可用性和安全性成为系统发展的新需求,PHM 正是为满足该需求而诞生的。面向航空应用的 PHM 是个极具挑战的新课题,系统健康方面的工作不仅仅只是状态监控和健康监测,而更多的是健康管理,这已成为机载系统平台管理的任务之一。同时预测与健康健康管理是新一代航空电子系统资源组织和系统重构的基础,也是系统完成任务的保证。

2 预测与健康健康管理技术探讨

在新一代航空综合化中,模块化、标准化的设计理念使得系统资源配置愈来愈优化。在诸多技术中,PHM 技术关系到系统资源的有效组织与重构。

英美等国直升机的 PHM 应用叫作健康与使用监控系统(HUMS)。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。英国国防部也与史密斯航宇公司达成协议,为未来山猫直升机开发一种状态与使用监测系统和机舱声音与飞行数据记录仪(HUMS/CVFDR)组合能力,将于 2011 年开始交付。Teledyne 为美国海军 P28A 多任务海上飞机开发并提供与 HUMS 类似的飞机健康监测系统(AHMS)。F-35 自主式保障系统所采用的 PHM 技术目前仍在研制和提高,它代表了目前 PHM 技术的

最高水平。美军方的 JSF 所采用的 PHM 系统代表了目前基于状态的维修 (CBM) 技术所能达到的最高水平。

PHM 的理论研究一直没有停止, 2005 年 11 月 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, 将综合系统健康工程和管理作为一门新的学科推出。目前, PHM 系统还没有标准化的成熟方法可言, PHM 的很多相关研究仍然处于起步阶段。

2.1 故障诊断与故障预测方法

关于故障诊断与故障预测方法的分类, 目前尚不统一, 基于经验、趋势、模型、数据等的分类方法都可以见到。文献 [2] 从诊断与预测的实现角度对其进行了分类。

(1) 基于失效机理的诊断与预测方法。

采用失效机理的方法考虑到电子器件从制造初就开始了性能退化过程, 并伴随其整个生命周期。从该角度出发, 可靠性技术人员把器件的失效机理作为研究重点, 提出了多种模型, 如热效应模型、绝缘击穿时间模型、晶体管退化模型等。通用电气 (General Electric) 认为, PHM 的主要目的是延长器件操作性能, 在整个退化过程中, 使用最小维护费用延长其使用寿命。基于损伤标尺的故障预测就是针对失效机理的预测技术, 其可以在器件内和电路板级进行。针对器件内的损伤标尺, 目前国外已有商业化的产品, 可针对静电损伤 (ESD)、TDDb、电迁移、热载流子、辐射损伤等失效机理, 做到在宿主器件剩余 20% 寿命时失效。

(2) 基于应力损伤评估的诊断与预测方法。

外部环境应力必然对电子器件造成损失, 应力损伤评估方法是基于该认识而提出的。通常的做法是在产品内嵌入若干传感器测定器件的环境应力因素, 包括环境温度、湿度、压力、电压、电流、电磁场强度等。欧洲宇航防务公司 (EADS) 采用的方法就涉及到使用生命周期系统环境, 该方法认为生命期负载是温度、机械、化学、物理或电子类型的可能导致产品或器件退化、缩减的因素。EADS 开发了一个移动的无线飞机诊断工具, 叫做 SAMS 使用超过 30 个外部和内部传感器输入。EADS 的 CLIO 项目还包括一个健康监控的时间应力测量设备 TSMD。Expert Microsystems 公司为在线传感器和数据验证、设备健康监控、寿命预测、不确定性自动推理开发软件方案, 旗帜性产品是一个实时诊断监控软件包 Sure-Sense。目前寿命消耗监控 (LCM) 方法论是主要发展方向, 该方法采集工作环境信息, 结合电子产品的失效物理模型, 通过环境应力和工作应力监测, 进行累计损伤计算, 进而推断产品的剩余寿命。LCM 方法论同时也适用于机械产品。

(3) 基于故障先兆的诊断与预测方法。

电子器件退化表现为性能参数的衰减, 通过故障模式效应分析 (FMEA), 可以选取与退化失效相关的物理量参数作为故障的先兆或特征, 建立故障预测模型。在实际应用中通过监测相关的产品特性参数来评估产品或器件的性能并预测故障。异常信息的故障诊断与预测技术就是基于此认识, 即基于历史统计数据、故障注入获得的数据等各类已知信息, 针对当前产品异常现象特征, 进行故障损伤程度的判断及故障预测。概率分析方法、人工神经网络、专家系统、模糊集、被观测对象物理模型等都可以用于建立异常现象与故障损伤关系模型。基于故障状态信息的故障诊断与预测技术, 直接采集被观测对象功能新信息及性能信息, 进行故障诊断, 是目前置信度最高的一类故障诊断方法, 得到了最成功的应用。典型的方法包括电子产品的机上测试 (BIT), 以及非电子产品功能系统的故障诊断等。

(4) 基于故障预警的诊断与预测方法。

国际上许多研究机构正在研究故障预警电路, 马里兰大学的 CALCE 就是代表性的一家。文献 [3] 中指出故障预警方法是指在产品的电路中设置故障预警电路, 通常是利用保险丝 (fuse) 和预警设备 (canary device) 来进行预先报警。用来监视电路的保险丝可防止瞬态电压与多余的功耗, 防止电源短路。在某些产品中, 自检电路也能被包含进产品进行异常状态感知并调整回正常态, 或者采取激活替代手段进行补救。目前商品化封装的预警元件已经用来进行半导体的失效现象监测, 这种元件与宿主电路属于同一类型, 具备同样的失效机理, 但在设计中有意识地加大了它的负载而使其应力人为增大, 加速了其失效过程。实际电路中加载的预警电路依据具体消耗故障机制来提供故障预告。

2.2 PHM 关键技术分析

2.2.1 信息融合技术

信息融合是 PHM 设计中最基础的应用。信息、数据融合是指对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。

信息融合包括检测、互联、相关估计以及信息组合, 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。信息融合的结果包括较低层次上的状态和身份估计, 较高层次上的整个战术态势估计, 以及多传感器数据融合系统的设计问题 (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)。

在 PHM 系统中, 故障诊断与预测中的数据融合可以在 3 个层次进行: ① 传感器层融合, 没有信息丢失,

但传输与计算量大;② 特征层融合,特征提取时有信息丢失;③ 推理层融合。典型的数据融合过程包括在特征层融合时采信传感器层的关键原始数据;推理层融合时采信相似产品可靠性统计数据或专家经验知识。

2.2.2 人工智能技术

人工智能近些年来发展迅速,它的主要目标是研究如何用机器来模仿和执行人脑的一些智力活动,从而开发的相关理论和技术。它主要包括专家系统、机器学习、定性推理与计算智能等,其中计算智能涉及到神经网络、模糊逻辑、进化计算和人工生命等领域。人工智能在 PHM 的设计实现中有广泛的应用价值。在感知环节之后,为了进行故障检测与诊断,必须获取故障的特征,由于现代电子设备结构越来越复杂,样本空间也随之呈现爆炸趋势,提取对故障贡献率大的有用数据就是特征提取,采用神经网络特征提取具有可靠的模型与分类灵敏度。人工智能在飞控系统的健康管理中得到应用,文献[13]采用专家系统与故障树结合的方法,给出了飞控系统健康管理专家系统的设计。

2.2.3 数据挖掘技术

数据仓库提供海量信息的存储,供事后分析研究中对有用信息的分类和提取。数据挖掘是知识发现的关键步骤,可以从数据中自动地抽取模式、关联、变化、异常和有意义的结构,可利用数据挖掘改善模型。其流程一般有 3 个步骤:① 数据预处理;② 建模与数据挖掘;③ 解释与评价。数据预处理主要对各种类型的数据(结构化或非结构化数据)进行数据清理、集成、降噪及转换。建模与数据挖掘是知识发现的核心部分,就是根据挖掘任务选择适当的表达与算法(可以是粗集理论、云计算、模糊逻辑、D-S 理论、PNN、SVM 等),然后寻找所关心的模式,比如分类、聚类、关联、回归、时序、偏差等,并采用合适的方式来表达。解释与评价是指对前一步骤得到的模式进行评估,识别出知识表达的、真正有意义的模式,并采用表达手段,把挖掘得到的相关知识进行展示。数据挖掘技术在航空 PHM 中的应用很受重视,如在美国 JSF 战机的 PHM 系统中,就利用数据挖掘技术对齿轮的低周疲劳断裂引起的故障进行监测和预测,ARL 实验室曾对结果的有效性进行了验证。

2.2.4 预测技术

PHM 研究中应用了多种故障预测方法,如基于物理损伤的预测、基于统计学习的预测、渐近式预测、基于特征扩展的智能预测以及状态评估预测等。通常把它们分为两类:数据驱动(data-driven)的预测和基于模型(model-based)的预测。数据驱动的方法以源于模式识别理论的统计和学习技术为基础。其范围可从

多元统计方法(如动态统计、线性及二次判别、偏最小二乘与经典变量分析)到基于神经网络的黑盒方法(如概率神经网络、决策树、多层感知、径向基函数与倾斜矢量量化)、图模式(贝叶斯网络、隐马尔科夫模型)、自组织特征映射、信号分析(过滤器、自回归模型、FFT等)与模糊规则系统。数据驱动方法关注的是对系统健康相关信号的监控。基于模型的预测方法首先假定存在一个可用的精确数学模型,它使用实时系统感知测量与模型输出之间一致性检验结果的残差作为特征。前提是故障存在的时候残差大,而正常干扰、噪声以及建模误差存在时残差小。统计技术用于定义阈值来检测故障的存在。生成残差的 3 个办法分别基于参数估计、观察器(如卡尔曼滤波器、降阶未知输入观察器以及交互多模型)与等价关联。

3 新一代综合模块化航空电子系统与 PHM 体系架构探讨

3.1 新一代 MA 系统架构研究

3.1.1 体系结构

联合标准化航电系统架构协会(ASAAC)为航空标准化作出了很大贡献,他们针对先进航电系统的周期成本、性能与可靠性制定了一系列规范标准,包括体系架构标准、软件标准、封装标准、通信与网络标准、通用功能模块标准以及一系列系统设计的指导性文档。

MA 系统通常由多个机架构成,每个机架上部署着若干标准模块(符合 ASAAC 标准的有限种类),模块间通过统一的航空数据总线互联,构成模块阵列。如图 1 所示,软件模块与硬件模块不采用紧密耦合,软件集的存储由大容量存储设备承担并配合存储管理任务,根据系统配置定义,在进行系统初始化时下载到各个相应模块,从而部署实现任务管理、CNI(通信、导航、识别)、座舱管理、目标探测跟踪等任务,这种模式非常有利于航电系统的在线升级与使用维护。

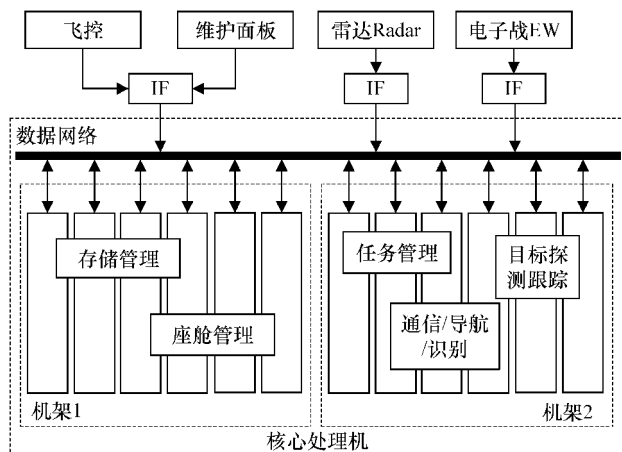


图 1 MA 体系

3.1.2 软件架构

软件部分主要是定义 MA 核心系统软件架构设计与开发的规范要求。如图 2 所示,总体上 MA 软件架构自顶向下分为 3 层:应用层 (application layer)、操作系统层 (operation system layer) 和模块支撑层 (module support layer)。同时对每两层间的接口也下了定义:操作系统—模块支持层接口 (MOS)、应用层—操作系统接口 (APOS)。层次结构有利于软件的开发、升级与移植。

应用层包含功能应用软件 (FA) 与应用程序管理软件 (AM), 功能应用软件主要用于通信、导航等具体功能的实现, 应用管理软件主要进行与操作系统平台相关的管理以及工作模式配置等事项; 操作系统层包含操作系统 (OS) 与通用系统管理 (GSM) 软件, 操作系统提供对于整个系统的资源管理、任务管理、内存管理、文件管理及设备管理等主要支持; 通用系统管理进行该层次上与 OS 平台无关的管理工作, 即系统健康管理、故障管理、配置管理和安全管理。

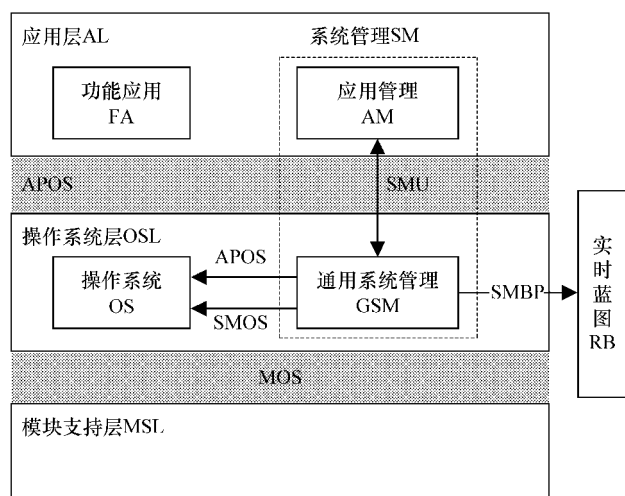


图 2 MA 软件架构

3.2 PHM 系统架构研究

PHM 的实现以 MA 为基础, 是 MA 可靠性保障软件的一部分, 如图 3 所示, 新一代航空电子系统的 PHM 系统呈现层次结构。上层为航电系统的健康管理 (APHM), 负责管理航电各子系统的健康信息, 诊断和隔离系统内子系统的故障, 评估整个航电系统的健康状态, 并提供子系统的故障预测及实施实时容错处理; 中间层 (SPHM) 提供子系统监控及功能测试, 负责诊断隔离子系统 LRU 的故障; 底层 (DPHM) 由各设备的监测与自组织构成, 属于设备级的健康管理, 跟设备内置 BIT 能力有很大关系。就整个飞机而言, 还有其他部分的 PHM (以 APHM 为重), 联合形成了飞机的自主保障系统, 从系统级提供可靠性与维修性支持。

层间是具体的接口规范, 为保证开放性与扩展性, 层级之间主张采用松散耦合联系, 比如可结合多 Agent 组织、Web Service 等技术。层间通信依据具体情况采用异步、同步、服务或订阅。美国宾州州立大学为 Army LTA (army logistics transformation agency) 研发的项目中就以 Web Service 为中间件, 采用 XML 实现了系统中的通信。

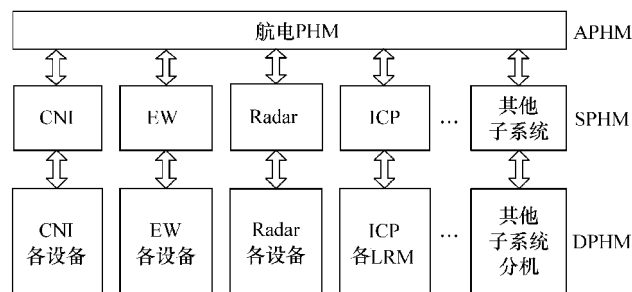


图 3 航电系统 PHM 的层次结构

4 结束语

从以上分析来看, 航电系统综合化的标准由国外引领, 我国的航电综合化还没有进入自主创新的局面。今后的研究工作应从以下几个方面展开:

① 航电系统标准化。把 ASAAC 与 ARINC653 定义的规范与我国的国情结合起来实施, 重点放在综合核心处理机 ICP 的自主化研制上。

② 系统可靠性与故障容错。预测与健康管理中的预测技术是具有挑战意义的课题, 需要针对上述关键技术进行更深、更细化的研究。

③ 注重系统重构组织研究。航空电子不同于其他类别的电子, 针对故障的重构技术不但可以提供早期修复的能力, 而且能保障系统的实时能力。

MA 是我国新一代飞机研制的重点, 需要诸多学科齐头并进, 以及多种技术的相互协作。PHM 作为 MA 新生的技术力量正在不断成长, 美国、欧盟同仁取得了不菲的成绩, 且仍在不懈努力。目前我国航空电子综合化仍有许多工作需要完成, 尤其是 PHM 技术才刚刚起步。为争取我国航空事业的较快发展, 尽快赶超国际水平, 必须认真地展开相关理论与应用的进一步研究。

参考文献:

- [1] Zhang S N, Kang R, He X F, et al China's efforts in prognostics and health management [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2008, 31(2): 509—518.
- [2] 韩国泰. 航空电子的故障预测与健康管理技术 [J]. 航空电子技术, 2009, 40(1): 30—38.

- roHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems [C]. 2009, 267—272.
- [5] Vidal-Vendú F, Hafez M. Graphical tactile displays for visually-impaired people [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 2007, 15(1).
- [6] 陈旭. 纹理触觉检测与再现技术的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [7] Anderson T, Breckenridge A, Davidson G. FGB: a graphical and haptic user interface for creating graphical haptic user interfaces [R]. Sandia National Laboratories 1999.
- [8] Henricus A H C van Veen, Jan B F van Erp. Tactile information presentation in the cockpit [J]. Lecture Notes in Computer Science 2001, 2058 (3118): 74—181.
- [9] Ikei Y, Wakamatsu K, Fukuda S. Vibratory tactile display of image-based textures [J]. IEEE Computer Graphics and Applications 1997, 17(6): 53—61.
- [10] Ng J Y, C. Man J C F, Fels S et al. An evaluation of a vibrotactile display prototype for physiological monitoring [J]. Anesthesia and Analgesia 2005, 101(6): 1719—1724.
- [11] Jones L A, Lockyer B, Piatieski E. Tactile display and vibrotactile pattern recognition on the torso [J]. Advcd Robotics 2006, 20(12): 1359—1374.
- [12] Wellman P S, Peine W J, Howe R D. Mechanical design and control of a high bandwidth shape memory alloy tactile display [A]. Proceedings of the International Symposium of Experimental Robotics [C]. Barcelona, Spain, 1997.
- [13] Wagner C R, Ledeman S J, Howe R D. A tactile shape display using RC servomotors [A]. Proceedings of Tenth Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems [C]. Orlando, FL, 2002.
- [14] Makino Y, Shinoda H. Selective stimulation to skin receptors by suction pressure control [A]. Proceedings of the SICE Annual Conference [C]. 2004, 2103—2108.
- [15] 祝钦, 宋爱国, 李建清. 实时触觉再现接口的设计与实现 [J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 814—817.
- [16] Benall-Khoudja M, Hafez M, Kheddar A. VITAL: an electromagnetic integrated tactile display [J]. Displays 2007, 28(3): 133—144.
- [17] King C H, Culjat M O, Franco M L et al. Optimization of a pneumatic balloon tactile display for robot-assisted surgery based on human perception [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2008, 55(11): 2593—2600.
- [18] Shikida M, Inamura T, Ukai S et al. Fabrication of a bubble-driven arrayed actuator for a tactile display [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering 2008, 18(6).
- [19] Koo I M, Jung K, Koo J C et al. Development of soft-actuator-based wearable tactile display [J]. IEEE Transactions on Robotics 2008, 24(3): 549—558.
- [20] 胡文松. 力觉临场感时延稳定性研究及触觉再现装置的研制 [D]. 南京: 东南大学, 1999.
- [21] 吴涓, 宋爱国, 李建清. 图像的力触觉表达技术研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(5): 1—3.
- [22] Kajimoto H, Kawakami N, Tachi S et al. Smart Touch: electric skin to touch the untouchable [J]. IEEE Computer Graphics and Applications 2004, 24(1): 36—43.
- [23] Kaczmarek K A, Nammi K, Agarwal A K et al. Polarity effect in electrovibration for tactile display [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2006, 53(10): 2047—2054.
- [24] Ino S, Shimizu S, Odagawa T et al. A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface [A]. Proceedings of IEEE 2nd International Workshop on Robot and Human Communication [C]. Tokyo, Japan, 1993.

□

(上接第 5 页)

- [3] Pecht M G. Prognostics and health management of electronics [M]. Wiley-Interscience 2008.
- [4] Uckun S, Goebel K, Lucas P J F. Standardizing research methods for prognostics [A]. International Conference on Prognostics and Health Management 2008.
- [5] Mathew S, Das D, Rossenberger R et al. Failure mechanisms based prognostics [A]. International Conference on Prognostics and Health Management 2008.
- [6] 俞慎, 李宁波. 航空电子嵌入式实时操作系统的安全策略 [J]. 计算机工程, 2007, 34(20): 167—169.
- [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—197.
- [8] 何志强. 综合化航空电子系统发展历程及重要支撑技术 [J]. 电讯技术, 2004(4): 1—5.
- [9] 项剑锋, 景武. 战斗机综合航空电子系统现状与发展探索 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(2): 16—20.
- [10] 李京生, 李军生. 航空电子技术发展展望 [J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(3): 1—5.
- [11] 诸葛卉. 高速发展的新一代综合模块化航空电子系统 [J]. 航空电子技术, 2007, 38(3): 9—14.
- [12] 韩枫. 第 4 代战斗机的航空电子系统 [J]. 现代军事, 2006(6): 36—39.
- [13] 宁东方, 章卫国, 李斌. 一种飞控系统健康管理专家系统的设计 [J]. 测控技术, 2007, 26(6): 76—78.
- [14] 梁德文. 战斗机航空电子系统最新的发展趋势——网络化 [J]. 电讯技术, 2008, 48(6): 93—97.

□