

航天电子产品的 PHM 技术研究

龙 凤¹, 王 忠¹, 程绪建², 陈桂明¹

(1 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710012; 2 西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 将先进的故障预测和健康管理技术引入航天电子系统将极大地提高系统的可靠性和可用性. 在对当前电子产品 PHM 技术进行了综合分析的基础上, 提出了一种层次式 PHM 构架, 将基于模型的和基于数据的方法结合在一起, 并在顶层通过特征提取与自动推理算法的融合处理, 得到对整个电子系统的最优健康估计.

关键词: 故障预测与健康管理; 视情维护; 剩余使用寿命

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)10-0096-05

Research on Prognosis and Health Management Technology of Space-borne Electric Products

LONG Feng¹, WANG Zhong¹, CHEN Xu-jian², CHEN Gui-ming¹

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710012, China;

2 Xi'an Microelectronic Technology Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The reliability and availability of space-borne electric systems can be greatly improved by introducing advanced Prognostics and Health Management (PHM) technology. Based on synthetical analysis of current PHM techniques used in electric systems, this paper put forward a hierarchical architecture, in which the model-based method and the data-driven method is combined, and feature extracting algorithms and automatic reasoning algorithms are fused at the top level to get the optimum health estimation.

Key words: PHM; CBM; RUL

1 引言

PHM 概念出现于 1990 年代中期. 在美国、英国及其他国家军方合作开发的联合攻击战斗机 (Joint Strike Fighter, JSF) 项目中, 美军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).

近年来, PHM 的应用逐渐从最初的机械领域扩展到电子领域, 目前的研究重点侧重两方面: 一是产品全寿命周期在线监测的传感系统与传感技术; 二是剩余寿命预测/评估模型与算法. 前者集中于开发嵌入式的无线微型传感器; 后者致力于探索各种不同类型预测模型与算法.

2 PHM 的基本概念

PHM 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 FFT、DCT) 和智能模型 (如专家系统、神经网络、模糊逻辑等) 来预测、监控和管理系统的健康状态. 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, 从被动地做出反应转向在确定时间对准确的部位进行准确维修的主动式活动. 其目的是减少维修人力, 增加执行任务的次数, 实现自主式保障, 实现从事件主宰的维修 (即事后维修) 或时间相关的维修 (即定期维修) 向视情维护 (Condition Based Maintenance, CBM) 转变.

2001 年在美国军方支持下, 由波音公司牵头,

来自工业部门、军事单位以及科研院所等 10 多个组织机构制定了视情维修的开放体系结构(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM),确定了各类 PHM 系统共同的设计思想以及应用技术和方法,用于指导实际构建应用于机械、电子和结构等领域的各种具体类型的 PHM 系统.目前,该体系结构已在美军舰船、飞机、民用车辆以及其他工业领域在内的诸多系统中得到应用验证,OSA-CBM 如图 1 所示^[1-4].

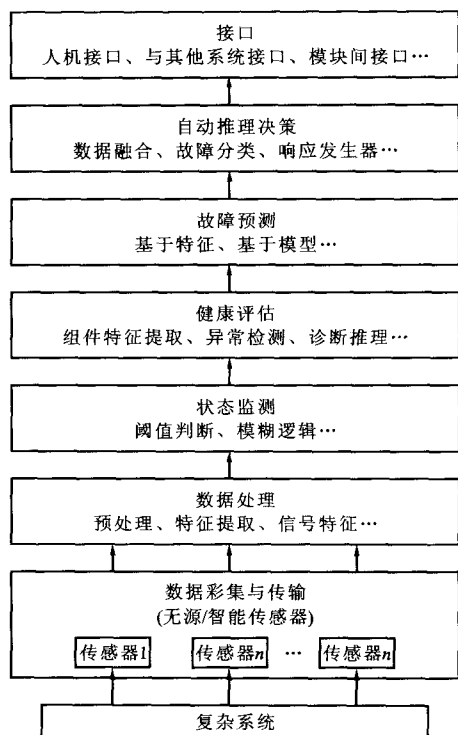


图 1 OSA-CBM 体系结构

需要指出的是,图 1 中体系结构的各模块之间并没有明显的界限,存在着数据信息的交叉反馈.国外对上述各模块中应用的一些技术(如传感器、数据传输与处理等)和方法(如系统框架模型、状态监测、健康评估和预测推理算法等)进行了大量的研究,同时也进行了大量的工程实践.其中,电子产品 PHM 研究领域的权威机构是美国马里兰大学 CALCE 电子产品和系统中心,其水平处于世界领先地位[<http://www.calce.umd.edu/>]^[5].

3 电子产品 PHM 的技术现状

目前,电子产品常用的 PHM 技术可以大致划分为三类:

- ① 采用预警装置的故障预警技术;
- ② 故障预兆监控和故障推理技术;

③ 基于生命周期负载的累积损伤建模及分析技术.

3.1 故障预警技术

即使用消耗性器件作为报警装置,如“fuses”或“canary”.“金丝雀(Canary)”一词源于早期的煤矿有毒气体预警,这是由于金丝雀对矿井中有毒气体的敏感能力比人类超出许多.后来扩展到电子系统中,是指针对灾难性故障的有效预警保护措施.PHM 系统也使用了同样的技术,产品中安装的 Canary 装置可以用来对由特定的耗损故障机制导致的故障提供预警.目前国外对采用预校准单元(电路)对半导体的健康状态进行监控的技术已经达到实用.Ridge-Group 公司已经把一种基于这种预测单元的技术商品化,能够对即将发生的故障提供先期警告.目前已经可以提供针对 0.32、0.25 和 0.18 μm CMOS 工艺的预测单元.功耗大约 600 μW ,单元的大小在 0.25 μm 工艺条件下,面积约为 800 μm^2 .针对半导体故障机制的预测单元种类包括 ESD、热载流子、金属迁移、绝缘层击穿以及辐射效应等.

还有研究人员^[6]将上述思想进一步扩展到板级故障,他们设计了一种 Canary 组件,和对应电路置于同一块印制板上,故障机制和对应电路也一样,并对两种故障机制进行了验证:一是焊点的低周疲劳(Low Cycle Fatigue, LCF),通过 Canary 组件封装之中和之上的焊点进行评;二是腐蚀监测,采用对腐蚀敏感的电路实现.采用加速试验对这些 Canary 组件的环境退化性能进行评测,相对于实际对应电路的故障等级对它们的退化等级进行调校.腐蚀测试装置含有对各种腐蚀导致故障的敏感电路.采用阻抗谱来识别电路的变化情况,通过测量阻抗的幅值和相位,把它们作为频率的函数,并把阻抗特性的变化和特定的退化机制建立对应关系.

但是,目前还有一些实用问题有待解决.例如,如果更换了一个 Canary 监控器,当对应的电路被重新激励,会带来怎样的影响?维修以后,采用什么样的保护性结构是合适的?当含有/不含故障安全保护结构时,应当遵循什么样的维护指导准则?另外,这种方法对于遗留子系统特别难以实现,因为这可能需要对包括 Canary 模块在内的整个系统重新进行检定.另外就是使用“保险丝”和“金丝雀”会增加芯片或印制板的面积.

3.2 故障预兆监控及故障推理技术

故障预兆(Fault Precursor)是预示即将发生故障的一个事件,故障预兆产生故障指示信息(Fault

Indication),通常是一个可测的、与故障有关的一个量的变化信息.例如,电源输出电压产生漂移,这可能暗示着反馈调节器或隔离器受到损坏,即将产生故障.这样,通过在可测量与相关故障之间建立一种因果关系,就可以对故障进行预测.

PHM 选择与产品全生命周期有关的参数进行监控.根据安全等级,这些参数可以分为以下三类:一是可能带来灾难性故障的;二是完成任务所必须的;三是会导致工期延长的.

参数的选择还可以借鉴经验知识和相同产品定量测试的故障数据,也可以使用一些系统化方法,如故障模式机制和效应分析(FMMEA)来确定需要监控的参数集合.

针对电子系统的一些常用成分,如开关电源、导线和连接器、CMOS 集成电路、电压控制的高频振荡器等,美国马里兰大学 CALCE 电子产品和系统中心的 Born、Boenning^[7]和 Pecht^[8]等人列出了一些故障预兆参数,如表 1 所示.

表 1 可以作为电子产品故障预兆使用的参数

电子系统	故障预兆参数
开关电源	DC 输出(电压和电流)、纹波、脉宽占空比、反馈(电压和电流)、漏电流、RF 噪声等
导线和连接器	阻抗变化、物理损伤、高能绝缘击穿等
CMOS IC	电源漏电流、电源电流变化、电流噪声、逻辑电平变化等
压控振荡器	输出频率、电源损耗、相位失真、噪声等
FET	栅漏电流/电阻、漏-源漏电流/电阻等
陶瓷封装电容	漏电流/阻抗、耗散因数、RF 噪声等
通用二极管	反向漏电流、前向压降、热阻、功耗、RF 噪声等
电解电容	漏电流/电阻、耗散因数、RF 噪声等
RF 功率放大器	电压驻波比(VSWR)、功耗、漏电流

目前,通过对系统内部不同部位进行电流、电压和温度等参数的连续监控,以获得早期的故障检测和故障预测能力是研究热点. Sun 公司将这种技术称之为连续系统遥测工具 CSTH. 它对诸如负载、吞吐量、队列长度、位错率等软性能参数和传感器信息一起进行跟踪监控. 在 PHM 实现之前,通过监控信号(或不同的变量)在一个多变量状态评估模型 MSET 上的学习过程,得到参数的特征化描述. 一旦使用这些数据把模型建立起来,就可以使用它来对一个特定的参数进行预测. 根据应用当中变量的变化期望值,执行一次序贯概率比测试(SPRT). 在实际监控时,使用 SPRT 来检测真实值和期望值之间的偏差(需要注意的是这不是基于单阈值的).

在具体实现时,使用 Sun 服务器中已有的传感器对性能参数进行连续监控,并把监控数据存到一个环形文件结构中. 该文件将高速采样得到的数据保留 72 小时,低速采样得到的数据保留 30 天. 对于每一个正在被监控的信号,使用 MSET 模型生成一个期望信号,这个信号使用学习过程中得到的知识实时生成. 这样就可以生成一个有关剩余寿命的新信号,即真实值和时序信号期望值之间的差异. 将这些差异输入到 SPRT 模型,连续地进行差异分析,就

可以在超出预想值时给出告警. 对监控得到的数据进行分析,可以实现以下功能:一是提供基于故障起始指示信息的预警;二是进行故障诊断、未发现故障 NFF 的根源分析、软件老化导致的故障分析^[9]等.

另外,最近 GMA 公司^[10]提出了一种将分子测试设备 MTE 嵌入到集成电路 IC 中的方法,以便在正常工作期间能够连续进行自我测试,并且在失效时给出可视的指示信息. MTE 可以被嵌入集成到单片集成电路芯片的衬底,还可以使用分子大小的传感器“针海”来测量电压、电流和其他电气参数,同时感知集成电路化学结构的变化,以获得即将发生和实际产生的故障指示信息. 这种技术的重点是开发碳纳米管的特定掺杂工艺,这是构造这种传感器基本结构的关键. 另外的关键技术是如何把这些传感器集成到传统的 IC 中,以及如何使用分子导线构造传感器互连网络,目前还没有任何有关该项技术的产品或原型开发出来.

3.3 基于生命周期负载的累积损伤建模及分析技术

电子产品的全寿命周期环境由制造、存储、使用、工作或非工作状态等构成. 全生命周期负载,无论单一负载情况,还是多种负载情况,都会使产品性

能退化或带来物理损伤,进而缩短其服役时间. 常见的全生命周期负载的种类如表 2 所示. 产品退化程度和退化速度取决于这些负载的大小和作用时间(使用率、频率和严重程度). 如果能够现场测量这些负载,就可以把它们和损伤模型结合在一起,对退化情况进行评估.

基于生命周期负载的累积损伤建模及分析的典型例子是 CALCE 的 Pecht 等人提出了一种称为 LCM(寿命消耗监控)的方法,他们把现场测量得到的使用负载和环境负载与基于物理的应力和损伤模

型结合在一起,用来进行寿命消耗评估,LCM 流程如图 2 所示.

表 2 常见的全寿命周期负载

负载	负载状态
温度负载	稳态温度、温度变化范围、温度循环、温度梯度、爬坡率、散热
机械负载	压力大小、压力梯度、振动、冲击负载、疲劳、应力、噪音等级
化学负载	活性与惰性环境、湿度、污染、臭氧、燃料溢出
物理负载	辐射、电磁干扰、海拔
电气负载	电流、电压、功率

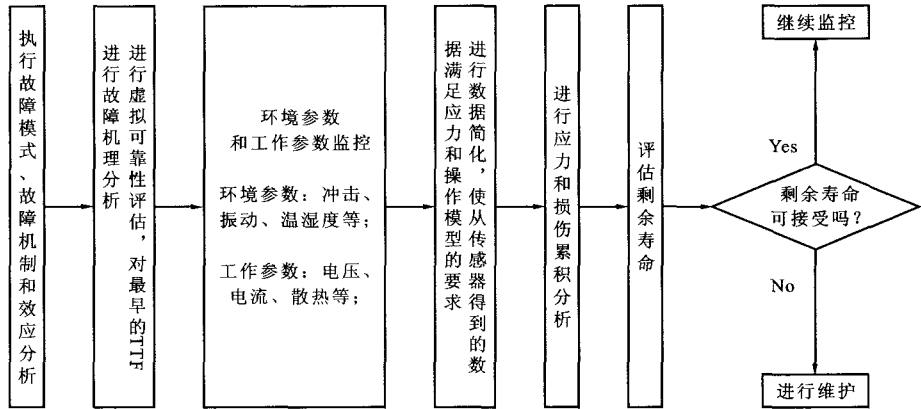


图 2 寿命消耗监控方法(来自 CALCE)

LCM 方法在美国航天领域已经普及并得到成功应用. 如 LCM 方法成功用于航天飞机固体火箭发动机(SRB)里的电路板剩余寿命预测,和航天飞机遥控系统(SRMS)的机器手臂里面的终端受动器(EEEU)的剩余寿命预测.

另外,最近数据挖掘技术也在电子产品的 PHM 得到应用,文献[11]开发出一种用于航空电子单元故障预测的数据挖掘模型. 该模型提供了一种针对测量参数,如振动、温度、电源、超负载、气压等进行有效数据聚类的方法. 这些参数使用时间-应力测量设备(TSMD)现场在线进行测量. 建立这个模型的目的在于:一是研究在特定故障的演化过程中,所测环境因素所起的作用;二是研究若干因素的组合效应;三是在已知特定的不利状态下,重新评估故障概率. 与前面的基于物理的评估方法不同,数据挖掘模型依靠的是 TSMD 记录下来的环境因素和工作状态的统计性数据. TSMD 记录和故障概率计算一起被用于开发预测模型. 数据挖掘使得对历史使用数据有了更好的理解,并且能跟踪故障原因到单个操作或环境因素.

总的来说,目前电子产品 PHM 的预测方法、成本以及预测精确度、应用范围之间的关系可以用图

3 表示,限于篇幅,本文不再赘述.

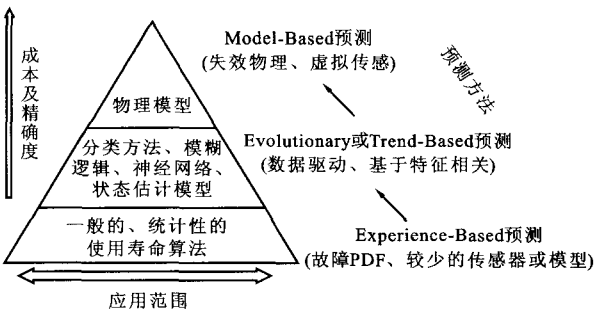


图 3 不同预测方法之间的关系

4 航天电子产品实施 PHM 的一种方案

将 PHM 引入航天电子系统的设计将极大地提高系统的可靠性进和可用性,是航天电子系统下一步的必然发展方向. 结合电子产品 PHM 技术发展现状,本文提出了一种分层的 PHM 系统构架,如图 4 所示. 将整个电子系统的 PHM 划分为组件级、板级以及系统级三个层次,在组件级综合使用可靠性统计模型、损伤累计模型、故障物理模型等基于模型的故障预测方法,在板级使用数据驱动的故障预测方法. 微侵方法和内建数据获取方法在板级和组件

级成对使用,据此得到的监控数据和基于模型的评估方法结合在一起,并在系统级通过特征提取与自动推理算法的融合处理,得到对整个电子系统的最优健康估计。

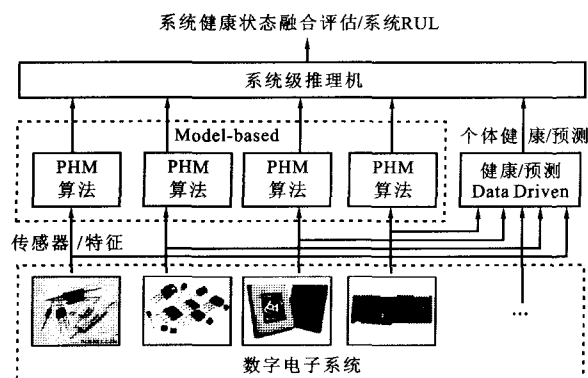


图4 电子产品实施 PHM 方案

在这种结构中,除了需要建立系统级的故障物理学模型外,还需要使用已有的诊断/验证算法,使得能够在系统层次上,根据任意的一组输入参数,如特征参数或原始传感器数据,对一块数字电路板及其组件进行评估,这需要采用基于数据驱动的方法,也就是说融合基于模型的方法和基于数据的方法。图4中每一条独立路径进行的健康评估结果可以在系统级进行融合,以便得到整个电子系统的一个较准确的健康状态评估以及剩余使用寿命 RUL。

5 结束语

本文仅对基于 PHM 的电子系统故障预测/健康状态评估技术进行了论述,实际上还有大量的工作要做。故障预测和健康管理发展到今天,还没有到尽善尽美的地步,因为电子系统始终处在外部环境中,例如振动、噪声、污染、温度、电磁场、高低压等异常现象,它们可以掩盖电子系统的正常工作噪声。另一个问题是异常现象在宏观上是系统级的,但故障原因却是芯片级的或板级的,因此故障预测也可以缩小到芯片故障预测、板级故障预测、模块级故障预测和系统级故障预测等四个层次。故障预测层次分的越细,预测范围越来越大,故障预测越来越精准。但故障预测仍是一个复杂的系统工程,故障产生原因也是多样的,怎样把历史数据和故障预测技术相结合,提升 BIST 能力,减少不能复现(CND)、找不到问题(NTF)和复测合格(RTOK),降低虚警率等仍是故障预测和健康管理要深入研究的。

但无论如何,基于 PHM 的方法对复杂电子设备的测试、维修和保障体制必将带来深远的影响。

参考文献:

- [1] 曾声奎, Michael G P, 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, 2006, 26(5): 626-632.
- [2] 张叔农, 谢劲松, 康锐. 电子产品健康监控和故障预测技术框架[J]. 测控技术, 2006, 26(2): 12-17.
- [3] 谢劲松. 失效模型的形式与实时故障诊断预测的基本方法和技术[C]//中国电子学会第十一届全国可靠性物理学术讨论会论文集. 北京, 2005: 283-290.
- [4] 孙博, 赵宇, 黄伟, 等. 电子产品健康状态监测和故障预测方法的案例研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 1762-1767.
- [5] 张宝珍, 曾天翔. 先进的故障预测与状态管理技术[J]. 测控技术, 2003, 22(11): 4-6.
- [6] Kalgren Patrick, Carl Byington, Michael Roemer, et al. Defining PHM, a lexical evolution of maintenance and logistics [C]//IEEE AUTOTESTCON 2006 Conference Record. Anaheim, California, 2006: 353-358.
- [7] Hess, Andrew. Real prognostics—challenges, issues, and lessons learned: chasing the big ‘P’ [C]//First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace NASA. Napa Valley, CA, 2005.
- [8] Roemer, Michael, Carl Byington, et al. An overview of selected prognostic technologies with reference to an integrated PHM architecture [C]//First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace, NASA. Napa Valley, CA, 2005.
- [9] Jata K V, Parthasarathy T A. Physics of failure [C]//First International Forum on Integrated System Health Engineering and Management in Aerospace, NASA. Napa Valley, CA, 2006.
- [10] Kalgren, Patrick, Mark Baybutt, et al. Application of p Prognostic health management in digital electronic systems [C]//Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, 2007.
- [11] Scott, Andrew. Electro-mechanical diagnostics/prognostics [C]// IEEE AUTOTESTCON 2007 Conference Record. Baltimore, MD, 2007: 340-348.

作者简介:

龙凤男, (1972-), 博士研究生. 研究方向为导航、制导与控制、军事装备学。

王忠男, (1968-), 博士, 副教授. 研究方向为信号处理与故障诊断。

程绪建男, (1965-), 硕士, 高级工程师。

陈桂明男, (1965-), 博士, 教授。