

航空电子系统故障预测与健康管理技术现状与发展

景 博¹, 黄以锋¹, 张建业²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军工程大学 科研部, 陕西 西安 710051)

摘 要:故障预测与健康管理(PHM)技术是比传统的故障诊断技术更高级的故障诊断、预测和健康管理技术,将 PHM 技术应用于电子系统已成为该技术的重要发展趋势之一。根据当前的研究进展,总结了电子系统故障预测的 4 种实现方法:特征参数法、预警电路、累积损伤模型法和综合法,分析了电子系统 PHM 技术涉及的关键技术,探讨了电子系统 PHM 技术发展在特征参数获取、物理损伤模型和电子元器件质量方面将遇到的问题和挑战。最后,从可测性、PHM 的标准化和评价指标等方面对电子系统 PHM 技术的进一步发展提出了几点意见。

关键词:航空电子系统;故障诊断;故障预测与健康管理;可测试性设计

DOI: 10.3969/j.issn.1009-3516.2010.06.001

中图分类号: V24; TP206.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)06-0001-06

在信息技术的推动下,武器装备正在发生着深刻的变化。首先,传统的非电系统不断被电子系统所取代。在 20 世纪 50 年代,飞机上的航空电子设备在飞机的总成本中占有的比例不到 10%,但到 90 年代, F-22 飞机的航空电子成本已占到飞机总成本的 30% 以上^[1]。其次,在未来战争中,通信、导航、雷达、火力控制、电子对抗等电子系统对整套武器装备作战性能的影响越来越大。另外,随着电子系统不断渗透到武器系统的核心任务系统,信息化、智能化程度越高的武器装备需要电子系统辅助完成的任务将会越多,因电子系统故障引起的损失也将大大增加。武器装备的这些变化必然将会影响保障体系的变化。随着电子系统规模的增大,其维护保障问题已日益凸显。例如在 F-15 飞机中,航空电子系统的故障数占到全机故障数的 40% 以上,维修工时占到全机维修工时的 1/3 左右^[2]。

故障预测与健康管理(PHM)技术主要用来监控、预测系统完成其功能的状态,包括确定部件的残余寿命、预测故障的发生等,并根据这些信息做出决策^[3]。工程应用和技术分析表明,PHM 技术可以降低维护费用,提高战备完好率和任务成功率^[4]。目前,PHM 技术已广泛应用于发动机^[5]、旋转机械^[6]、机体结构等机械结构系统中。而电子系统的 PHM 技术起步较晚,近几年发展迅速,已成为国内外的研究热点。由于电子系统的 PHM 技术的研究具有通用性,其成果同样可用于航空电子系统,现有的研究也没有针对特定的电子系统。因此,本文将讨论电子系统的 PHM 技术现状和发展,为下一代航空电子系统的发展提供参考。

1 电子系统 PHM 技术实现方法研究现状

在 PHM 技术中,故障预测是核心任务和内容。根据当前的研究进展,电子系统故障预测主要实现方法可分为以下 4 种^[7-9]。

1.1 监测特征参数

通过监测特征参数来预测故障是指依据电子系统的功能性和结构性特点,对能反映系统性能的特征参

※收稿日期: 2010-06-09

基金项目: 国防预研基金资助项目(9140A27020308JB3201)

作者简介: 景 博(1965-),女,河北邯郸人,教授,博士生导师,主要从事故障预测与健康管理、无线传感器网络和现代检测研究。E-mail: jingbo_senso@163.com

数进行监测,在获得大量数据的基础上,提取有用信息,并利用各种预测算法对故障进行预测。由于电子系统功能结构、失效机理等各不相同,所以特征参数的选取和数据处理方法也多种多样。许丽佳等用纹波电压作为监测雷达发射机高压电源健康状态的特征参数,用阴极电流作为监测雷达发射机多注速调管健康状态的特征参数,并结合灰色理论预测法对故障进行预测^[9]。Impact公司以无线传感器节点^[10]和GPS接收机^[11]为例,将无线接收系统作为一个整体,通过在加速损耗试验中记录一些系统相关参数,然后对这些参数进行分析、融合、特征提取,得到一种新的和损耗程度相关联的特征参数,最后利用新的特征参数对系统健康状况进行评估。

1.2 利用预警电路

图1展示了利用预警电路预测故障的基本原理。预警电路的故障高发期比正常电路要早一段时间,这段时间用于系统接收警告信号,并及时做出反应,以避免造成重大损失。预警电路可分为2种。一种预警电路的可靠性在开始时和正常电路没有区别,只是在设计时增大了使用负担,这样其将在正常电路之前发生故障。例如通过减少预警电路的线路直径来增加其电流密度,这样其产生的热量比正常电路大,热应力增加,从而先于正常电路失效;另一种预警电路与正常电路的工作环境一样,但初始寿命要短于正常电路,也将先于正常电路发生故障。导致芯片的寿命缩短的原因有静电损伤(ESD)、辐射损伤、电迁移、热载流子等。美国Ridgetop集团针对特定失效机理设计了故障预测单元^[12]。故障预测单元和正常电路在同一芯片里,工作在相同的环境下,由于故障预测单元的寿命要短于正常芯片,因而可以在正常电路还有一定的剩余寿命时失效,达到故障预测的目的。

1.3 建立累积损伤模型

累积损伤模型是在物理失效模型基础上建立的关于各种载荷与可造成损伤程度对关系的模型。该模型建立后,可通过对系统寿命周期内所承受的全部载荷进行分析来对系统的累积损伤程度和剩余寿命进行评估。电子系统寿命周期中的载荷包括机械、化工、物理等多个方面,具体载荷及其详细载荷条件参见文献[8]。美国马里兰大学提出的“寿命消耗监测法(LCM)”就属于这种方法^[13-15]。它运用基于物理的损伤模型处理监测到的外部温度、湿度、压力等载荷信息,计算累积损伤,评估电子系统的残余寿命,见图2。LCM方法已被应用于JSF飞机电源开关模块和DC/DC转换器的寿命预测,取得了良好的效果^[16-17]。国内的研究机构也使用了类似方法。如李刚等提出利用电子产品全寿命故障规律进行故障预测的方法,通过加速试验,获取电子产品在加速应力下的全寿命故障规律,然后推导出正常应力下的全寿命故障规律并用于故障预测^[18]。吕克洪等对焊点所承受的各种环境应力和工作应力的时间历程(时间应力)进行测量,并根据物理模型及相关理论对数据进行分析,同时考虑时间应力测量、焊点模型、焊点累积损伤计算等过程中存在的不确定性因素,研究了基于时间应力及隐马尔可夫模型(HMM)的焊点故障预测技术^[19]。

1.4 融合多种方法

近几年,为了提高预测的精度,人们开始融合上述方法中的某两种来预测故障。如孙博等采用了性能参数监测法与故障物理模型法相结合的形式,将健康状态监测和故障预测的一般性方法、技术和理论应用到具

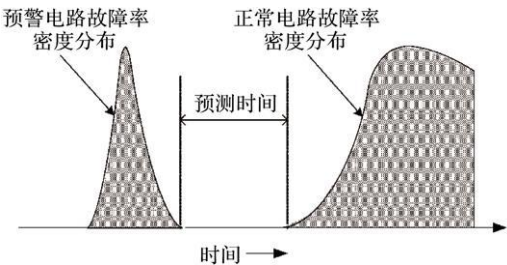


图1 预警电路预测故障原理

Fig.1 Advance warning of failure using canary structures

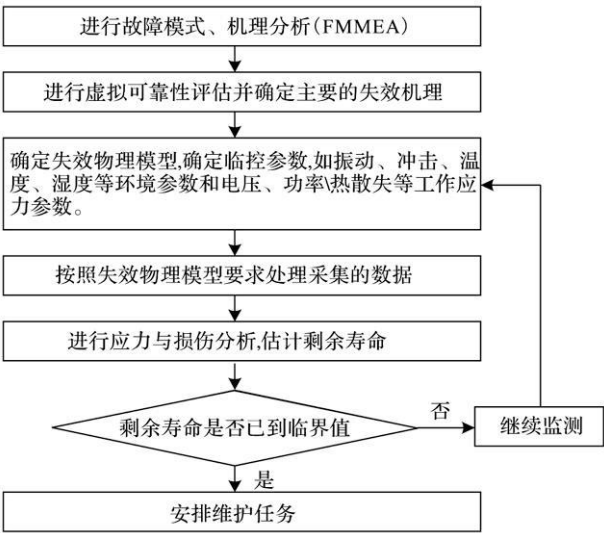


图2 寿命消耗监测法(LCM)流程图

Fig.2 The flow chart of life consumption monitoring methodology

体的电子产品^[20]。Impact公司将传感器参数与基于物理的损伤模型相结合,以对电子系统的寿命损耗进行监测^[21]。

2 电子系统 PHM 的支撑技术

电子系统 PHM 系统的建立过程中,需要以下几种关键技术的支撑:

2.1 数据采集与传感器技术

要对一个复杂系统对象进行 PHM,首先要确定可以直接表征其健康状态的参数指标,或可间接推理判断系统健康状态所需要的参数信息。这些信息是 PHM 系统的数据基础,获取这些信息的技術主要包括选择监测的参数,传感器的类型、安放的位置、精度和带宽等。由于电子系统故障原因的多样性,在 PHM 系统中往往需要对多种参数进行监测,如振动、冲击、温度、湿度等环境参数和电压、功率、热散失等工作应力参数。如果每种参数都用一种传感器,那么传感器的数量将非常庞大。这在工程实践中是不现实的。因此,PHM 技术对传感器体积的小型化和功能的多样化提出了更高的要求。另外,还有一些参数如静电损伤,时间相关介质击穿等并不常见,需要进一步开发对这些参数敏感的新型传感器。

2.2 故障诊断技术

故障诊断是指利用传感器来探测系统状态特征参数,并结合其他数据信息(如历史维修数据、加速寿命实验数据)对系统当前的健康状态进行评估,达到诊断和监控的目的。故障诊断技术可分成基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法 3 种。基于解析模型的方法是在知道诊断对象数学模型的基础上,按一定的数学方法对被测信息进行处理诊断。基于信号处理的方法通常是利用信号模型,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征值,从而检测出故障。基于知识的故障诊断方法是在知识的层次上,以知识处理技术为基础,实现辩证逻辑与数理逻辑的集成,符号处理与数值处理的统一,推理过程与算法过程的统一,通过在概念和处理方法上的知识化实现系统的故障诊断。

2.3 故障预测技术

故障预测技术首先提供相关历史经验数据及其变化趋势,然后根据目前设备的状态参数、使用情况、环境和工作条件,通过某种预测模型的计算,推断出设备若干时间后的状态参数,最后根据预测的参数状态进行诊断,推断系统当前的健康状态。在预测过程中,故障预测算法是由系统的历史数据推算其将来状态过程中重要的一环。现有的预测算法可分为参数模型法和非参数模型法。参数模型法通过研究历史数据的变化规律,建立数据模型,以此来推算系统未来的状态。常用的参数模型法包括时间序列预测法、滤波器预测法、灰色理论预测法等。非参数模型法不需要精确的数据模型,主要包括神经网络、粗糙集理论、组合预测等。

2.4 数据融合技术

融合是对多源信息进行综合处理,从而得到更为准确、可靠的结论。从健康管理的角度看,PHM 系统进行信息融合的目的是为了提高检测精度和鲁棒性,提高异常检测、故障诊断和预测技术的整体效能。PHM 中常用的融合算法有 D-S 证据理论融合、贝叶斯推理、模糊逻辑推理、神经网络融合等,其最终目标是将测量系统和融合算法与相应的健康管理体系结构进行组合优化,提高检测、预测的置信水平。融合在 PHM 系统中的应用主要有 3 方面:① 数据融合:用于融合来自传感器阵列的数据,确认传感器信号的合理性并抽取特征;② 特征融合:对数据融合得到的特征进行智能综合,以获得最可信的诊断信息;③ 信息融合:综合经验信息(如以往的失效率或物理模型)和信号信息,提高预测精度。

2.5 人工智能技术

在对武器装备进行诊断的过程中,传感器本身可能发生故障,从而提供错误或是不准确的数据。同时,在武器装备的使用过程中,一些真实故障是间歇性的,它们只出现在特定的环境条件下,而在其他条件下自动恢复正常。这 2 类问题会导致故障不能复现(CND)和重测合格(RTOK)等情况的出现。人工智能推理机(如专家系统、神经网络、模糊逻辑或遗传算法)是解决这类问题的常用方法。人工智能推理机在报告一个故障前,通常通过一种回归分析来考虑所有相关的传感器数据,记录检测出故障时的环境条件并报告给推理机。这些智能推理机经过事先训练,可以非常精确地模仿和识别机器的状态属性及其故障模式,从而达到提高诊断精度的目的。

2.6 BIT 和 BIST 技术

机内测试(Built-in Test,BIT)是一种能显著提高系统测试性和诊断能力的重要技术,即不用外部测试

设备就能完成对系统、分系统或设备的功能检查、故障诊断与隔离以及性能测试。随着芯片技术的发展,人们又提出了内建自测试(Built-in Self-Test BIST)。BIST技术是一种由硬件本身执行完成的可测性设计技术,它在设计中就考虑在被测电路中集成一些额外的自测试电路。测试时从芯片外部施加必要的控制信号,启动自测试电路,通过软硬件协调,在内部检测出被测件的缺陷或故障。BIST是BIT概念的延伸,它将系统的自测试能力推向芯片级别,有利于提高故障定位精度,缩小故障隔离范围,同时可为PHM系统提供更多更精确的参数。

2.7 健康管理技术

健康管理是指与健康状态相关的管理活动^[29],可分为4类:① 诊断:检测系统部件的工作状态和性能下降程度;② 缓解:减轻部分功能失效对整个系统的影响,尽量保证任务的有效性;③ 修复:更换或修复失效的部件;④ 检验:确定修复后系统的状态,评估失效部件对系统的影响。健康管理是测试技术、人工智能和信息的综合应用,具有智能和自主的特点。

3 面临的问题与挑战

目前,电子系统的PHM技术已是研究的热点,但还远未成熟。由于电子系统自身的特殊性,其PHM技术的发展将面临多方面的问题与挑战。

3.1 特征参数不易获取

用特征参数来预测故障的方法简单、直观,并已在机械系统中得到广泛应用。但电子系统中可用于预测的特征参数不易得到,实际应用非常有限。在机械系统的PHM系统中,通常是找到故障先兆,比如因为磨损而导致的振动信号的改变等,然后通过一些推理算法,对当前的状态进行估计。而电子系统中还未能找到一种容易得到的参数评估其损耗程度。数字电路输出的信号只能为离散的几个固定值。当发生故障时,信号是突变的,间隔时间很短,不能利用这些信号对故障进行预测。一些学者直接把这类故障称为突发性故障,认为难以预测,因此转而研究渐进性故障的预测。但在现代的电子系统中,数字电路的应用是最广泛的,突发性故障的比例远大于渐进性故障。Impact公司通过监测多种参数并从中提取可用于预测的综合参数^[10-11],但过程比较复杂,也不具有通用性。

3.2 物理损伤模型复杂

电子系统失效是多种负荷综合作用的结果。在研究过程中可先分别建立单一负荷条件下的物理失效模型,找到单一负荷强度与损伤之间的关系,然后研究各种负荷之间是否相关。如果不相关,则仍然可用其各自的物理失效模型,得到对应的损伤程度后直接叠加成共同的损伤程度;如果相关,则需继续研究其相关程度,负荷叠加可能会使损伤加重,也可能使损伤减轻。可见,物理失效模型的建立是非常复杂的,如果没有可用的失效模型,那么监测参数的选择只能基于以往的经验数据或者通过加速试验得到的经验模型,其精确性难以保证。

3.3 电子元器件质量参差不齐

经过几十年的发展,电子元器件的质量已经有了很大的提高。但由于电子元器件的质量不易评估,很难保证电子系统中所有电子元器件的使用寿命都是一样的。同一厂家生产的同一型号芯片的使用寿命难以保证全部相同。不同厂家因技术水平不同,即使生产同一型号芯片,其使用寿命也会有很大区别。电子元器件的质量影响着电子系统的质量,因此,在电子系统PHM系统中应考虑电子元器件质量的差异,以提高故障预测的精度。

4 结束语

PHM系统是可测性技术发展的最高阶段,PHM系统的建立也离不开可测性技术的支持。可测性是测试信息获取难易程度的表征。目前,可测性设计技术主要用于使难测或不可测故障转变为易测或可测的故障,只考虑了在系统出现故障时如何方便地找到故障,而未考虑对故障进行预测。现有可测性指标也不包含故障预测能力的评判指标。如何将可测性设计技术与PHM系统相结合,使PHM系统更方便地获取故障和预测信息,成为当前可测性设计技术发展中必须要思考的问题。

目前,PHM还处于起步阶段,关于PHM技术的标准还很少。由于PHM技术与测试、故障诊断等技术具

有的内在联系,在发展过程中可参考一些存在于测试、诊断和维护技术领域的标准,但从长期发展来看,应尽快开展 PHM 的标准化研究工作。

为了保证设计的 PHM 系统能够达到预期的目的,必须对 PHM 系统进行验证和评估。目前,常用的验证方法有实际运行验证、加速试验验证、分析验证和仿真验证等,这些方法可以互为补充、相互验证。但是,针对 PHM 系统的评估方法、评价指标还很少,以后应加强这方面的研究。

参考文献:

- [1] 霍曼,邓中卫. 国外军用飞机航空电子系统发展趋势[J]. 航空电子技术, 2004, 35(4): 5—10.
HUO Man, DENG Zhongwei. Development Trend of Foreign Military Avionics[J]. Avionics Technology, 2004, 35(4): 5—10. (in Chinese)
- [2] 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京:航空工业出版社, 1996.
ZENG Tianxiang. Test and Diagnosis Technology of Electronic Equipment[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHANG Baozhen, ZENG Tianxiang. Advanced Prognostics and Health Management Technology[J]. Measurement & Control Technology, 2003, 22(11): 4—6. (in Chinese)
- [4] 曾声奎, Pecht M, 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): 626—632.
ZENG Shengkui, Pecht M, WU Ji. Status and Perspectives of Prognostics and Health Management Technologies[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626—632. (in Chinese)
- [5] Leader S, Friend R. A Probabilistic Diagnostic and Prognostic System for Engine Health and Usage Management[C]. //Aerospace Conference Proceedings of IEEE[S. I.]; IEEE Press, 2000, 185—196.
- [6] Heng A, Zhang S, Tan A, et al. Rotating Machinery Prognostics: State of the Art, Challenges and Opportunities[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 23(3): 724—739.
- [7] 于晓伟,张宝珍. 国外电子产品故障预测技术的发展[J]. 测控技术, 2008, 27(S1): 209—211.
YU Xiaowei, ZHANG Baozhen. Development of Prognostics and Health Management for Electronic Systems[J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(S1): 209—211. (in Chinese)
- [8] Vichare N, Pecht M. Prognostics and Health Management of Electronics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 222—229.
- [9] Xu L, Jiang W, Wang H, J Long B. Study on State Prediction Method for Electronic System[C]. //IEEE Pacific—Asia Workshop International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application[S. I.]; IEEE Press, 2008, 665—670.
- [10] Nanduri S, Almeida P, Kalgren P, et al. Circuit as a Sensor: A Practical Approach Toward Embedded Electronic Prognostics[C]. //Autotestcon IEEE Conferences[S. I.]; IEEE Press, 2007, 632—638.
- [11] Douglas B, Patrick K, Carl B, et al. Electronic Prognostics: A Case Study Using Global Positioning System (GPS) [J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47: 1874—1881.
- [12] Ridgetop Semiconductor-Hot Carrier(HC) Prognostic Cell[M]. USA: Ridgetop Semiconductor—Sentinel Silicon(TM) Library, 2004.
- [13] Ramakrishnan A, Pecht M. A Life Consumption Monitoring Methodology for Electronic Systems[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(3): 625—634.
- [14] Mishra S, Pecht M, Smith T, et al. Remaining Life Prediction of Electronic Products Using Life Consumption Monitoring Approach[C]. //In Proc Eur Microelectron Packag Interconnection Symp. Poland[S. I.], 2002, 136—142.
- [15] Rouet V, Minault F, Diancourt G, et al. Concept of Smart Integrated Life Consumption Monitoring System for Electronics[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 1921—1927.
- [16] Goodman D, Vemeire B, Spuhler P, et al. Practical Application of PHM /Prognostics to COTS Power Converter[C]. //IEEE Aerospace Conference[S. I.]; IEEE Press, 2005, 3573—3578.
- [17] 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.
- [18] 李刚,蔡金燕,梁四洋. 获取全寿命故障规律进行电子产品故障预测的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(1): 34—37.
LI Gang, CAI Jinyan, LIANG Siyang. Electronic Product Fault Prediction Method Based on All Lifetime Fault Rule[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(1): 34—37. (in Chinese)
- [19] 吕克洪,邱静,刘冠军. 基于时间应力及隐马尔可夫模型的焊点故障预测技术[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 222—227.

- LÜ Kehong QIU Jing LIU Guanjun Fault Prognosis Technology for Solder Joints Based on Time Stress and Hidden Markov Model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 222—227. (in Chinese)
- [20] 孙博, 赵宇, 黄伟, 等. 电子产品健康监测和故障预测方法的案例研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 29(6): 1012—1016.
- SUN Bo ZHAO Yu HUANG Wei et al Case Study of Prognostic and Health Management Methodology for Electronics[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 29(6): 1012—1016. (in Chinese)
- [21] Kalgren P, Baybutt M, Dabney T et al Application of Prognostic Health Management in Digital Electronic System[C] // IEEE Aerospace Conference-[S. l.]: IEEE Press, 2007: 1—9.
- [22] 高占宝, 梁旭, 李行善. 复杂系统综合健康管理[J]. 测控技术, 2005, 24(8): 1—5.
- GAO Zhanbao LIANG Xu LIXingshan Complex System Integrated Health Management[J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(8): 1—5. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

Status and Perspectives of Prognostics and Health Management Technology of Avionics System

JING Bo¹, HUANG Yi-feng^{1, 2}, ZHANG Jian-ye²

(1. Engineering Institute Air Force Engineering University Xi'an 710038, China; 2. Research Department Air Force Engineering University Xi'an 710051, China)

Abstract Prognostics and health management technology more advanced than the traditional fault diagnosis technology is about fault diagnosis prognostic and health management. It is of great significance in cutting down failure rate and maintenance cost. More and more attention is paid to the reliability of electronic system, especially avionics system. Applying PHM technology to electronic system has been one of the most important trends of PHM technology. Based on the analysis of current research, the four implementation methods of prognostics and health management technology of electronics are summarized. They are monitoring precursors using canary structures monitoring environmental and usage loads and integration. Then, the key technologies related to PHM technology of electronics are presented, and the future problems and challenges for PHM technology of electronics in the field of precursors capture physical degradation model and quality of electronic component are discussed. Finally, several suggestions about design for testability standard and estimation of PHM technology are given for future development of PHM technology of electronics.

Key words avionics system; fault diagnostics prognostics and health management; design for testability