

·光电系统·

电子系统故障预测与健康管理技术研究

张秋菊¹, 张冬梅²

(1.东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2.锦州中理外轮理货有限公司, 辽宁 锦州 121007)

摘要: 简要回顾了故障预测和健康管理的形成过程和发展历史, 从主导思想、关键技术、应用层次和对故障响应方式等方面对比了与传统监控测试技术的区别。重点阐述了故障预测和健康管理的基本原理, 通过引入系统健康状态分类和系统健康退化进程, 提出了基于状态维修思想, 分析了基于状态维修与事后维修和定期维修的区别。按照故障预测和健康管理的能力需求探讨了其主要工作内容和实施流程。针对典型的基于传感器系统的故障预测与健康管理技术, 介绍了其系统组成, 并结合实际应用研究了传感器系统的选择原则。最后就开展健康管理系统的故障预测方法和监控参数的选择等关键技术给出了一些建议。

关键词: 故障预测与健康管理; 故障诊断; 基于状态维修

中国分类号: TN607

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)01-0019-06

Study on Prognostic and Health Management of Electronic System

ZHANG Qiu-ju¹, ZHANG Dong-mei²

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China;

2. China Ocean Shipping Tally Company Jinzhou, Jinzhou 121007, China)

Abstract: The formation and development history of prognostic and health management (PHM) are reviewed, the differences between PHM and traditional test technology are compared from leading idea, key technology, application level and fault response method. The basic principle of PHM is discussed. The condition based maintenance (CBM) is proposed by introducing the health status classification and health degradation process of the system, the differences between CBM and breakdown maintenance and periodic maintenance are also analyzed. According to the capacity requirement of PHM, the task and flow are discussed. Aiming at the typical PHM technology based on the sensor system, the system composition is introduced, and the selection principle of the sensor system is studied combining with the practical application. Some advice about key technologies such as PHM method and selection of monitoring parameters are given.

Key words: PHM (prognostic and health management); fault diagnosis; CBM (condition based maintenance)

在信息化技术的推动下, 各种大型复杂系统的性能不断提高, 电子设备不断向综合化、智能化发展。其中, 电子器件成本已占到大型系统总成本30%以上, 而电子系统的故障占到系统总故障40%以上, 使用与保障费用已占到总费用70%以上。这些数据表明, 系统的经济承受性已成为一个不可回避的问题, 传统的事后维修和定期维护方式耗费资源且效

率低, 已不能满足复杂系统日益增长的维修保障需求, 因此, 对电子系统的故障诊断、预测以及维修保障方法急待改进^[1]。

而故障预测与健康管理(PHM)正是基于上述需求提出的方法, 它的目的不是消除故障, 而是了解和预测故障何时发生^[2]。它通过采用不同的故障预测方法, 提前预知故障的发生时机, 而不必等到故障真

正发生之后再做出反应,最大限度减少维护次数,延长维护周期,通过及时维修保持系统可用性;降低检查成本、缩短停用时间,减少备件库存,降低设备的使用寿命周期成本。

目前,故障预测与健康领域研究受到越来越多的关注,已成为国内外科学研究热点,是提高电子系统故障预测能力,完善健康管理的重要研究方向。

1 故障预测与健康管理的形成与发展

故障预测与健康管理的起源可追溯到20世纪50年代,由于部分电子系统极端恶劣工作环境和条件,促使最初的可靠性理论、环境试验和系统试验以及质量方法的诞生。20世纪70年代,随着系统复杂性增加,由于设计不充分、制造误差、维修差错和非计划事件等各种原因导致故障的机率不断增加,由此产生了新的诊断故障源和故障原因方法用于监视系统状态,预防异常事件。20世纪80年代后期提出的全面质量管理是一种基于过程的可靠性改进方法,用于检测和测试系统的设计缺陷。20世纪90年代初期,NASA研究机构提出了“飞行器健康监控(VHM)”概念,通过适当选择和使用传感器和软件来监测空间飞行目标的“健康”。

20世纪90年代末,美国研发的JSF项目为故障预测与健康技术诞生带来了契机,故障预测与健康是JSF项目实现经济承受性、保障性和生存性目标的一个关键所在^[3]。进入21世纪以来,在需求牵引和技术推动下,故障预测和健康管理以前所未有的势头得到了迅速的发展,在机械、电子、航空航天、船舶、汽车、石化、电力等多个行业领域得到了广泛的应用。在美国由波音公司牵头,来自工业部门、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)。确定了各类故障预测和健康管理共同的设计思想以及应用技术和方法,用于指导实际工作应用于机械和电子等领域。国外对相关预测技术和方法进行了大量的研究,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^[4]。2002年11月,美国推出了“增强型基于状态维护(CBM+)”战略性保障策略,旨在将传统的计划外修复性维修,转变为可预测的预防性维修,从而根据实

际需要安排维修工作。2005年,美国针对11项CBM计划开展了调查指出:“电子系统预测”是当前最必要的维修特性或应用之一,应当不计成本地实施^[5]。

故障预测与健康是在传统的状态监控和故障诊断技术基础上发展起来的,其演变过程是人们认识和利用自然规律过程的一个典范,是随着系统和设备性能复杂性增加以及信息技术的发展而发展的。故障预测与健康技术经历了从外部测试、机内测试、综合诊断到预测与健康管理体系的形成等演变过程;从对故障和异常事件的被动反应,到主动预防,再到预测和综合规划管理。在产品层次上,从过去的部件和分系统发展到现在的系统集成级,并最终形成完善的故障诊断、预测与健康管理体系。

2 故障预测与健康管理的原理及分析

2.1 基本概念和原理

故障预测与健康的主导思想是利用各种先进的传感器采集系统状态数据,并采用各种算法进行特征提取,预先诊断部件或系统完成功能的状态,获取系统的健康状态特征,评估电子系统与预期正常状态相比的偏离或降级程度,同时根据系统以前、现在运行情况,预测未来健康状态进程,从而实现对系统健康状态的监控、预测和管理。

电子系统的健康状态是指其各子系统及部件的整体状态,是其子系统及部件在执行其规定功能时所表现出的能力。健康状态可以划分为正常、错误、异常、故障、性能下降、功能失效等几种状态。随着电子系统投入运行时间的增加,在使用过程中,辐射和各种应力的作用会造成电子元器件退化、失效,电缆也会逐渐老化,这些都要经历一个从量变到质变的过程,其健康状态表现为从正常到性能下降直至功能失效,这个进程为系统健康退化进程。例如,某一系统由某单一故障模式引起的故障,系统的健康采用健康指数度量,工作正常健康指数为1,其健康指数退化进程如图1所示。一般系统的健康退化都是由多种故障模式引起的,其健康退化进程曲线分别对应不同的曲线。

正是由于存在着电子系统健康退化进程,因此开展健康管理是非常必要的。健康管理是指与其健康状态直接相关的管理活动,既要了解系统状态,同

时在出现功能失灵时能将其恢复到正常状态,在系统故障时将安全风险和对任务的影响降到最小。系统健康状态评估过程就是健康预警的过程。当监测数据超过健康警戒线时,会发出健康预警。当监测数据在警戒线以外且在极限环境下超出容限时,则表明设备已处于亚健康状态,应安排维修,排除隐患,避免事故的发生。健康警戒值是基于设备性能指标和安全要求进行计算,通过适当的试验验证确定,并根据使用中反馈的数据加以修正。

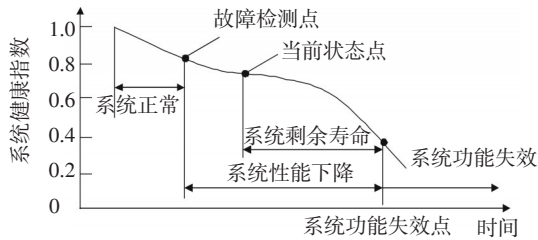


图1 系统健康退化进程曲线

故障预测与健康管理的正是在传统机内测试和状态监控能力基础上进一步发展。这种发展的核心要素是从状态监控向健康管理的转变,是从被动反应在确定时间对准确部件进行准确维修的主动式活动的转变^[6],这种转变引入了故障预测技术,借助于故障预测完成故障识别、维修规划和供应保障。主要目的是降低使用与保障费用、提高系统安全性和任务成功性,实现基于状态维修和自主式保障。

基于状态维修不同于事后维修和周期维修,是面向设备实际工作状态和发展趋势的。它的基本思想是根据对设备当前和将来状态的正确可靠预测来安排维修活动。因此,设备当前状态描述,以及对下一时段状态和故障预测是实现维修的根本,这也正是故障预测技术要着力解决的问题,同时也是健康管理的难点所在。故障预测技术使得设备维护人员可以预知故障的发生,从而采取一系列维修或预防措施,而不必等到故障真正发生之后再做出反应^[7]。

2.2 工作内容和实施流程

故障预测与健康管理要监测和评估整个电子系统的健康状况,必须具有测试能力、数据采集能力、信息融合能力、检测故障或失效状态的能力、预测即将发生故障的能力和预估剩余寿命的能力。各部件、子系统的状态信息通过各种通信网络集中到健康管理系统,通过与知识库、数据库相关数据进行对比和分析,检测和预报故障的部件或子系统,隔离故

障,并给出测试报告和维修决策。

为确保系统具有上述功能,故障预测与健康管理系统组成中就要包含实现相应功能的模块。系统主要由数据预处理程序、分析和推理程序、标准知识库、系统健康数据库、诊断与预测程序、故障预测与故障报告程序组成^[8]。各部分的主要内容如下所述。

(1)数据预处理程序负责对来自各子系统的实时监测数据作预处理,包括取样、滤波、综合、重组和分类。

(2)分析和推理程序是为了获得最优结果,根据不同对象的损伤机理和数据分析要求,设立的不同策略的推理方法。主要分析与推理方法有基于规则和案例的方法、基于故障树的方法、基于神经网络的方法和基于相关性统计分析的方法。

(3)标准知识库内存储的是系统健康监测和诊断所需的工程技术资料,包括正常、异常数据、容限、曲线、参数、警戒线、原因、危害、相关因素、判据、案例、处理预案等内容,主要用来支撑推理和分析,可根据监测数据对系统当前健康状况做出正确的认定。

(4)健康数据库存放所有与系统使用、维护、维修有关的技术数据和历史记录,全面反映系统的累计使用情况、历次维修情况、当前健康状况、损伤残留、待查隐患、任务能力评估以及预定的维修安排等内容,以用来支撑推理和分析,以根据监测数据对系统、子系统和部件当前健康状况的变化做出正确的认定。

(5)诊断与预测程序将分析和推理的各路输出结果进行综合,对系统健康状况做出最后的诊断和预测。

(6)故障预测与故障报告程序将诊断和预测结果按要求生成报告,提供给使用者,实现自主保障。

故障预测和健康管理的实施流程主要由数据收集、故障检测、故障诊断、确定故障影响和预测健康状况发展进程等5个阶段组成。数据收集是通过数据总线或相关监测信号获取系统状态数据。故障检测是采用不同策略分析系统是否存在不正常状态,检测故障征兆。故障诊断是对故障的根本原因进行诊断,包括故障隔离和故障认定,故障隔离是确定系统发生故障的位置,故障认定是确定故障发生的主要原因和故障模式。确定故障影响是分析故障对系统导致的不良后果。预测健康状况发展进程是确定系统失效将发生的时间及系统、子系统或组件的剩

余使用寿命。其中,制约故障诊断结果有2个主要条件,一是支持决策的传感器数据信息是否足够做出明确判断;二是这些数据是否适合用于确定系统的健康状态。系统故障预测和健康管理实施流程如图2所示。

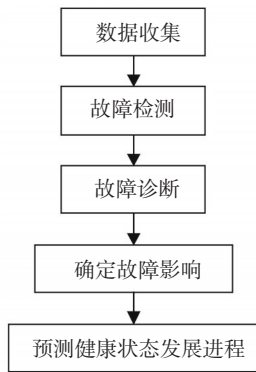


图2 系统故障预测和健康管理实施流程

2.3 典型故障预测与健康管理技术

电子系统故障预测是实现健康管理的一个非常重要的环节,故障预测方法的选择直接影响了预测结果,是健康管理的工作重点和难点,需要根据实际情况选择不同的方法予以实现。根据当前的研究进展,故障预测方法的分类尚不统一,主要有基于参数、基于趋势、基于数据驱动和基于模型等分类方法,其内容随着研究和工程应用也在不断完善。以下对典型的基于传感器系统的故障预测与健康管理技术进行详述。

基于传感器系统的故障预测与健康管理技术通过使用传感器进行状态监测,获取产品生命周期的所有阶段的运行状态信息和性能参数变化,包括环境和系统各部件的运行参数,如幅度、变化、峰值水平以及变化速率等,通过设计更先进的数据分析技术,结合标准或经验值进行诊断,给出电子系统故障预测信息和健康状况信息^[9]。

传感器系统通常由传感器、A/D转换器、存储器、内嵌式处理功能模块、数据传输以及电源组成。传感器系统的选择要综合考虑以下5个因素。

(1)在分析应用时考虑传感器系统的性能需求。主要包括:准确性、灵敏度、精确度、分辨率、测量范围、响应时间和稳定时间等。准确性指测量值与所测参数真实值之间的相符度。灵敏度是输出差异与特定输入差异之间的比较结果。精确度以确保

被测物理量能够可靠地进行测量。分辨率确保可测量的输出变化。响应时间是对特定输入做出反应的时间,稳定时间是指针对某一稳定输入达到稳定输出的时间。这些属性直接影响测量结果,易导致故障预测认定偏差^[10]。

(2)传感器系统的物理属性包括尺寸、质量、形状、封装以及安装到应用环境的方法。在应用中,传感器的尺寸可能是最重要的选择标准,这是因为连接传感器的可用空间有限,或是由于传感器位置不可接近。此外,传感器的质量在一些应用中也必须考虑到,例如某些存在移动位移或使用加速计的震动测量应用中,有可能会因为质量的增加而改变系统响应,因此,应用时首先应确定环境可承受的尺寸和质量,然后考虑传感器系统的整体尺寸和质量。某些应用中还必须考虑传感器的形状,如圆形、矩形或扁平形状。某些应用根据需要感应的参数,还对传感器的封装材料有要求,如金属或塑料材质。另外,还应该考虑连接或安装传感器的方法,如何固定更有助于节省空间和提高性能。

(3)考虑传感器系统的电力和功能属性。主要包括功率和功率管理能力、内存和内存管理能力、可编程采样速度和模式、数据传输速率、距离和安全性以及数据处理能力。例如,对于无线和移动系统来说,功耗管理尤为重要,可确定系统在不连接电源情况下可工作多长时间。内存可用于存储收集数据和其他附属信息,内存管理支持用户配置、分配、监控和优化内存使用。高速采样速率和数据传输速率可减少系统反应时间,使用户能尽快得到数据,做出故障诊断和维修决策。

(4)传感器系统还应具备可靠性。通过传感器自诊断、自校验和传感器融合这些方法来评估传感器系统完整性,对其进行适当的调节或修正。另一个提高传感器系统可靠性的策略是使用冗余设计,多台传感器来监控同一个系统,降低由于传感器系统故障所导致的数据丢失风险。虽然传感器系统的可靠性很重要,但传感器系统对其将要监控的产品可靠性所产生的影响同样重要,一定质量的传感器系统附加到产品表面一段时间后,会降低测试系统的可靠性,此外,如果附加材料与产品材料性质冲突,例如,焊接、粘帖或螺栓等方式,这种附加方法也会降低产品的可靠性。

(5)选择适当的传感器系统还必须考虑成本和可用性。成本评估包括传感器系统的采购、维护以

及更换。例如,某系统购买15个月后,发现其传感器仅平均工作了12个月,且每年都需要更换一次,暂不说采购成本多少,仅维修和更换成本的无谓增加,也是得不偿失的。可用性主要考虑是否成熟,是否已发展至批产阶段及来源是否稳定。

采用传感器系统用于故障预测过程中,需要对以上5个因素进行优先级划分,进行必要的权衡和取舍,从而为特定应用选择最佳的传感器系统。

3 需注意的问题

故障预测与健康管理是一门涉及传感器技术、数据采集技术、数据处理技术、故障诊断技术、健康状态评估、寿命预测及建模等多专业学科,其方法和技术正不断进步,虽然该技术的很多领域已经取得了一定成绩,但远远未成熟,仍有一些方法和技术上的问题需要解决。由于电子系统自身的特殊性,各种失效因素的组合对不同电子器件的影响要复杂得多,健康管理的每个生命周期阶段也会面临不同的挑战,因此,在技术发展中要充分利用现有资源,重点关注以下几个方面,一是选择可行的预测方法、二是重点选择表征系统健康状况的监控参数,三是要考虑电子器件质量差异,以及要合理应用数据融合技术,开发出全面、完善的健康管理系统,提高健康管理的有效性。

(1) 选择可行的预测方法

用于预测的方法种类较多,但对于不同电子产品和故障模式而言,预测方法也不尽相同,要根据实际设备情况,选择可行的预测方法,预测方法是影响健康管理系统实用性或效率的主要因素。例如,数据驱动方法基于机械学习技术和统计模式识别,采用监督性学习方法,而学习所用的训练数据需要进行适当的预处理,方法中又引入了优化和搜索机制,直接影响计算的复杂性^[11]。基于性能参数的预测方法适用于主要性能指标具有连续变化范围的电子设备,例如一些模拟电子设备。基于工作状态的预测可用于部分器件的健康评估和故障预测。例如,电子系统中常用的VLSI电路,当器件老化或器件局部电路受损时,其静态电流将明显增大,出现这种情况后,器件很快就会因工作时发热过度而损坏。因此可以用VLSI电路静态电流的变化预测器件和设备的故障。对于像电池、连接器、继电器、指示灯等器件,

采用基于寿命的预测方法,在其产品指标中有明确的寿命限制或动作次数限制,对这些电子器件,可将其使用寿命参数与设计中的降额系数、使用中的环境参数引入的损耗结合起来建立预测模型,在器件使用到寿命后期时及时做出故障预报。

(2) 重点选择表征系统健康状况的监控参数

要对一个复杂系统对象进行健康管理,首先要确定可以直接表征其健康状态的参数指标,或可通过间接推理判断系统健康状态所需要的参数信息。这些信息是健康管理的数据基础,建议重点选择与以下功能关联密切的参数,这此功能包括:对安全性至关重要的功能、很可能预示灾难性故障的功能、对于完成任务至关重要的功能和会造成长时间停机的功能。此外,也可根据过去对重要参数的了解、类似产品的现场故障数据来选择参数。

由于电子系统故障原因的多样性,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,健康管理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,对于还有一些参数如静电损伤等并不常见,需要研发可探测这些参数的新型传感器。

(3) 要考虑电子器件存在的质量差异

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的一致性。同一厂家生产的同一类型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,即使生产同一类型芯片,其使用寿命也会有所区别。电子元器件的质量影响着电子系统的质量,因此,在电子系统健康系统中要考虑电子元器件质量的差异,以提高故障预测的精度。

(4) 合理应用数据融合技术

融合是对不同渠道的来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,系统进行信息融合的目的是为了提高检测精度和系统可靠性,提高异常检测、故障诊断和预测技术的整体效能,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统结构进行组合优化,提高检测、预测的置信水平。融合的应用主要有3个方面:

数据融合、特征融合和信息融合。要在适当阶段合理应用不同的融合方法,通过确认传感器信号的合理性并抽取特征,对特征进行智能综合,获得可信诊断信息,最后综合经验信息和测量信息,提高电子系统预测精度。

4 结束语

电子系统故障预测和健康管理是压缩维修保障费用的重要手段,通过减少备件、保障设备、维修人力等保障资源需求,降低维修保障费用;通过减少维修,特别是计划外维修次数,缩短维修时间,提高系统完好率;通过健康感知,减少工作过程中故障引起的风险,提高任务成功率^[12]。故障预测与健康管理可以满足人们监控电子系统持续健康状态、预测剩余寿命、降级使用水平以及任务成功可能性的要求,满足后勤保障管理日益增长的需求。

故障预测与健康管理是测试性技术发展的最高阶段,但离不开测试性技术的支持,是建立在状态感知、信息融合基础上。建议扎扎实实做好测试性设计相关技术理论和技术研究工作,将测试性设计技术与健康管理相结合,使系统获取更多的故障和预测信息^[13]。

故障预测与健康管理是一项新技术,也是一个复杂的系统工程,发展到今天,虽然已经应用于一些工程系统的子系统级或部件级,但还没有完全实现工程化,需要联合各专业学科的力量开展研究,方能取得较快的进展和较好的效果。随着各种技术的发展和成熟,健康管理将应用于更多的电子系统。

参考文献

- [1] 景博,黄以锋,张建业.航空电子系统故障预测与健康管理工作现状与发展[J].空军工程大学学报(自然科学版),2010,11(6):1-6.
- [2] 宁东方,章卫国,李斌.预测和健康管理技术[J].航空制造技术,2009(5):71-73.
- [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.
- [4] 赵宁社,翟正军,王国庆.新一代航空电子综合化及预测与健康管理工作[J].测控技术,2010,30(1):1-5,9.
- [5] 张宝珍.预测与健康管理工作的发展及应用[J].测控技术,2008,27(2):5-7.
- [6] 刘志伟,刘锐,徐劲松,等.复杂系统故障预测与健康管理工作(PHM)技术研究[J].计算机测量与控制,2010,18(12):2687-2689,2751.
- [7] 梁旭,李行善,张磊,等.支持视情维修的故障预测技术研究[J].测控技术,2007,26(6):5-8,14.
- [8] 韩国泰.航空电子的故障预测与健康管理工作[J].航空电子技术,2009,40(1):30-38.
- [9] 连光耀,吕晓明,黄考利,等.基于PHM的电子装备故障预测系统实现关键技术研究[J].计算机测量与控制,2010,18(9):1959-1961.
- [10] 苏鹏辉,徐亚光,李成,等.温度传感器自动检测系统误差分析[J].光电技术应用,2009,24(3):44-46.
- [11] 派克.迈克尔,康锐.故障诊断、预测与系统健康管理[D].故障预测与系统健康管理研究中心,2010:57-72.
- [12] 曾声奎,Michael G Pecht,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,2005,26(5):626-632.
- [13] 张秋菊,刘承禹.电子设备可靠性的加速试验[J].光电技术应用,2010,26(4):81-85.

欢迎利用期刊网站浏览本刊已发表文章

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便、阅读需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为:<http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009~2011年已发表文章的在线浏览。读者可在过刊目录下,查阅2009~2010年期刊各期目录,点击文章题目或摘要,阅读文章全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部