

基于视情维修的电子装备 PHM 体系结构分析

杨 森

(军械工程学院无人机工程系 石家庄 050003)

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100083)

摘 要 为推行自主式保障理念,提高电子装备的综合保障能力,提出了一种基于视情维修的电子装备预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)构建方案。在分析 PHM 内涵和功能的基础上,从数据信息维、模型维和生命周期维 3 个维度研究了 PHM 系统结构,采用开放式 PHM 架构方式,建立了基于视情维修的电子装备 PHM 体系结构,并对其系统实现技术进行了探讨。通过对某型装备模拟训练与仿真测试系统 PHM 策略的设计,验证了所提方案的有效性。

关键词 视情维修,综合保障,PHM 体系结构

中图分类号 TP206 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.09.003

Analysis of Equipment PHM Architecture Based on Condition Maintenance

YANG Sen

(Department of UAV Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to push the autonomic concept of equipment and improve the integrated logistics support ability of electronic equipment, a establishment scheme of electronic equipment PHM based on condition maintenance was proposed. After analyzing the content and function of PHM, the PHM system architecture was studied from three dimensions: data information dimension, model dimension and life cycle dimension. Based on open Architecture PHM, the electronic equipment PHM architecture based on condition maintenance was constructed, and the implementation technology of the system was discussed. Finally, a PHM strategy design of a certain equipment simulation training and testing system reveals that the proposed scheme is effective.

Keywords Condition maintenance, Integrated support, PHM architecture

1 引言

随着计算机信息技术的不断发展与进步,装备正朝着高度复杂化、集成化和微型化的方向发展。装备性能的不断提
高以及系统复杂性的不断增加,使得装备的可靠性、维修性与
维修保障等问题越来越突出。在我军装备跨越式发展的过程
中,电子装备在武器系统中所占比重越来越大,在战争中的作
用也越来越明显,一旦其发生故障,将会直接影响部队战斗力
的发挥。据有关资料介绍,因电子装备故障而给军事行动造
成的损失越来越大^[1];1960 年 10 月,前苏联发射的一枚 P-16
型洲际弹道导弹由于一个引信电路发生断路,导致导弹在发
射台发生爆炸,夺去了多名火箭专家和军人的生命;2001 年 8
月,俄罗斯的 S-300 型防空导弹由于自动操纵仪和自爆装置
失灵导致导弹坠毁爆炸,军事演习被迫中断;2003 年伊拉克
战争期间,一架英军“旋风”战斗机由于敌我识别装置发生故
障,遭到己方导弹的拦截,造成机毁人亡;2009 年 4 月,印度
空军一架苏-30 战机由于电子飞行控制系统故障在拉基斯坦
邦飞行时坠毁,机上乘员一死一伤;2012 年在俄罗斯阿穆尔

河畔,一架苏-30 多用途战斗机由于电子控制系统故障,导致
战机坠毁、人员失踪等。

此外,装备的维修保障也面临着巨大的经济压力^[2-3];美国
国家研究委员会于 2012 年年中发布的一份关于弹道导弹
防御系统的调查报告指出,近 20 年来用于保障维修“爱国者
3”(PAC-3)系统的费用已接近 2500 亿美元,花费惊人;在海
湾战争和伊拉克战争中,美军武器装备的使用和保障费用占
到整个生命周期费用的 70%~80%,后期保障规模庞大,效
率低下;美国航空公司每年在飞行器后勤保障上花费的费用
高达 310 亿美元,平均每一个小时的飞行时间就需要有 12 个
小时的后勤保障时间,代价高昂。因此,为了减少由于电子装
备故障而引发的严重后果,降低维修保障费用,提高部队战
斗力,电子装备的“健康”问题越来越引起部队的高度重视。

目前,为了防止电子装备故障的发生或健康状态的退化,
事后维修和定期维修是应用最普遍的维修方式^[4-5];事后维
修属于被动式维修范畴,是在装备出现故障之后才进行的维
修,容易造成难以估量的损失和人员伤亡;定期维修属于计
划维修范畴,它虽然是一种预防性维修方式,但很难预防灾难性故

障的发生,而且时常引起不必要的停机,造成维修过剩或维修不足,缩短了使用寿命并且浪费了大量人力和物力等。

针对这些情况,美军方率先提出了一种以状态维修(Condition Based Maintenance, CBM)为基础的全新视情维修保障策略——PHM 技术^[6]。PHM 技术是对传统机内测试(Built In Test, BIT)、状态监控和故障检测技术的进一步拓展,通过利用装备的各种数据信息,对系统进行状态监测与评估、故障诊断和状态/寿命预测,提出维修保障建议,为管理决策提供相应的支持。PHM 技术在国外已有 30 多年的发展历史,是一项能够显著降低维修、使用和保障费用,提高装备安全性和可用性的综合性技术^[7],在 2000 年被列入美国国防部的《军用关键技术》报告,其联合攻击战斗机(JSF)在设计时就引入了该技术。国内对 PHM 技术的研究还处于起步阶段,大多集中在 PHM 相关概念和体系结构的研究上,未进行实际应用^[8]。

本文从提高我军装备保障能力、降低全生命周期维修保障费用的角度对电子装备 PHM 理论进行研究;采用开放式 PHM 架构,建立基于视情维修的电子装备 PHM 系统体系结构,并对其系统实现技术进行探讨,以期延长电子装备的使用寿命,降低系统故障率^[9],为实现装备自主式保障奠定基础。

2 国内 PHM 研究现状分析

国内对 PHM 的研究起步较晚,但发展较快。北京航空航天大学可靠性工程研究所和中国航空工业发展研究中心率先展开了 PHM 理论与技术应用方面的相关研究^[10];北京航天测控公司正在参与研发卫星系统的预测与健康管理平台^[11];西北工业大学对飞行器 PHM 技术与系统设计进行了相关研究^[12]。此外,国防科学技术大学、空军工程大学、海军航空工程学院、香港城市大学、哈尔滨工程大学、北京石油化工大学、军械工程学院、电子科技大学等也相继展开了该领域的研究^[13-18]。

伴随着 PHM 技术的不断发展,国内有关 PHM 的学术组织以及学术交流活动也日益增加^[19-21]。北京航空航天大学康锐教授联合 PHM 领域著名教授派克·迈克尔等创立了中国故障预测与健康管理学会(China PHM Society),旨在推进中国工业的质量管理、可靠性、维修性以及安全性的关键需求,通过在系统健康管理中引入预测流程设计和预测技术来提升中国工业和学术机构的可持续发展意识;2004 年在中国天津召开了大型复杂系统故障诊断国际研讨会,会议将故障预测与健康管理作为今后的一个热门领域;2009 年 10 月,国内首次 PHM 技术高峰论坛在北京航空航天大学柏彦大厦召开,总装备部、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、海军装备技术研究所、北京航天测控公司等 22 家单位参加了讨论,会议建议在条件成熟时,在学会下成立跨行业、跨部门、跨学科的专家联盟,并定期进行学术交流;2010 年 5 月在中国深圳举办了首届故障预测与健康管理企业管理人员论坛和技术研讨会,会议讨论了世界各地工业中 PHM 的应用趋势,介绍了世界前沿的 PHM 应用前景,并针对 PHM 理念还处于起步阶段的中国现状进行了分析;2010 年成立了 PHM 技术社区等。

目前,国内对 PHM 的研究虽然取得了一些初步成果,但大多数研究仍停留在对国外相关资料的消化吸收上,工程应

用案例较少,且大多应用在机械系统、航空系统、液压系统上,对电子装备 PHM 的研究与应用还很不成熟,与国外相关研究单位还存在很大差距。因此,我国应在借鉴国外相关理论和技术的基础上,结合实际工程需求,对 PHM 系统架构及其实现技术展开更加深入的研究,以期缩短与发达国家之间的差距。

3 PHM 的内涵与功能

3.1 PHM 的内涵

PHM 的内涵主要包括^[22]:1)通过最大程度地利用传统的故障特征检测技术,并结合先进的传感器技术、机内测试技术和先进的软件建模技术,来获得虚警率几乎为零的故障检测和隔离结果;2)收集和处理关键部件的性能信息,并将其用于预计这些部件的残余使用寿命,提前做好需要更换的部件,实现视情维修;3)通过向后方维修基地传播故障信息来激活自主式维修保障系统程序。

PHM 的原理是首先利用各类先进传感器实时监测装备运行的各种状态参数及特征信号,提取状态征兆;然后借助各种算法和智能模型(如专家系统、神经网络、模糊逻辑等)进行推理,找到这种映射关系,对可能发生的故障进行预测,推导出故障的原因及部位,指出故障发展趋势和后果以及部件的剩余寿命;最后通过保障决策分析形成诊断预测结果、部件剩余寿命估计和最佳维修保障方案^[23-24]。

PHM 的目的是为复杂系统/装备的操作员及任务执行者提供信息和辅助决策,避免不可预料的危险事故,减少维修耗费,提高战备完好率并实现自主式保障。

3.2 PHM 的功能

PHM 是新一代武器系统的维修管理技术,也是一种全面的故障检测、隔离和预测及状态管理技术。它代表了一种方法的转变,即从状态监控向状态健康管理的转变,引入了故障预测能力,从系统的角度来识别和管理故障,极大地促进了视情维修取代事后维修和预防性维修的进程,实现了自主式维修保障。

综合当前研究成果^[25],总结出 PHM 的功能主要包括:

- (1)故障检测和隔离能力;
- (2)故障预测的能力;
- (3)部组件剩余使用寿命预计的能力;
- (4)故障选择性报告的能力;
- (5)实时调节装备的能力;
- (6)多传感器信息融合能力。

4 PHM 三维结构分析

PHM 贯穿于装备设计、试验、检测、使用和维护的各个阶段,其实施过程涉及多个方面:首先需要到装备全生命周期过程进行分析,对其中所生成的数据信息进行收集;然后基于这些数据信息构建装备的 PHM 模型(包括数据优化模型、监测评估模型、状态/寿命预测模型和维修决策模型等),通过健康管理策略将这些模型组织起来实现装备数据信息的统一管理;最后利用 PHM 模型实现装备全生命周期的维护与健康信息的集成。为了更加清晰、直观地展现 PHM 的实施过程,建立 PHM 三维结构视图,如图 1 所示。

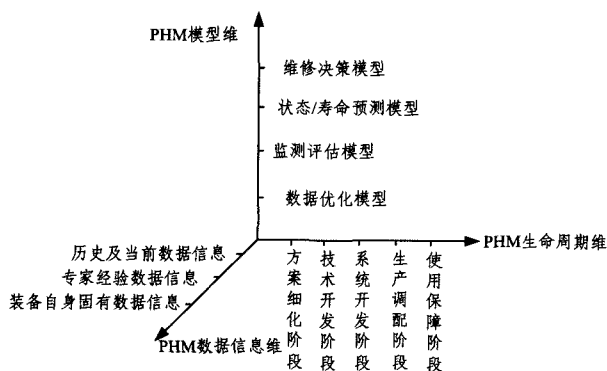


图1 PHM 三维结构分析

从图1可以看出,整个视图由PHM数据信息维、模型维和生命周期维三维结构组成,各维坐标上包含了其重要节点信息。下面分别对各维含义进行详细分析。

4.1 PHM 数据信息维

PHM数据信息维描述了PHM中监测评估、预测以及诊断等模型的数据来源,主要包括装备使用过程中所生成的历史及当前监测数据信息、领域专家积累形成的经验数据信息以及反映装备自身行为的固有数据信息等。

(1) 装备历史及当前监测数据信息

该部分是PHM建模的关键数据信息。由于故障的产生和传播过程呈现一定的时间特性,是一个渐进的过程,因此对装备历史及当前监测数据信息的分析与统计是评估装备当前健康状态的基础,对装备未来健康状态的预测与故障的预诊断更有意义。

(2) 领域专家积累形成的经验数据信息

领域专家通过长期积累可以获取一定的反映装备健康状况的经验数据信息,该部分信息常常以知识和规则的形式被利用,虽然其获取难度较大,但在进行PHM建模时,可以通过该部分信息对建模数据进行纠正与补充,使得建模过程更加符合装备的实际运行状况。

(3) 反映装备自身行为的固有数据信息

装备自身行为是指在各种输入条件下装备固有结构和功能的外在行为特征表现,它们既可以用定性方式描述,也可以用定量方式来描述,通过其行为输出(固有数据信息)以及装备的功能特性可以获得装备输入、输出行为正常与否的阈值信息,从而为装备健康状态监测与评估、状态预测等过程的实施奠定基础。

4.2 PHM 模型维

PHM模型维以典型OSA-CBM系统结构为基础^[26-27],通过对装备生命周期中各种数据信息的学习,采用先进的建模思想建立PHM各层的数学模型。主要包括数据处理层的数据优化模型、状态监测与评估层的监测评估模型、预测层的状态/寿命预测模型以及自动推理决策层的维修决策模型等。

(1)数据优化模型。数据优化模型主要用于处理来自数据获取层的原始监测数据,通过特征提取、特征降维等数据优化算法将原始数据处理为状态监测与评估层所需的特征数据。常用的数据优化算法有小波变换、PCA、KPCA、LDA算法等,经数据优化模型处理后的特征数据从不同角度表征了装备的健康状态,为下一步的状态监测与评估以及状态预测奠定了基础。

(2)监测评估模型。监测评估模型主要用于完成与装备健康状态相关的特征的判定与估计,将由数据优化模型输出的特征数据与预定的失效判据进行比较来判断装备的健康状态,在此基础上根据状态监测结果和历史状态信息对装备健康状态进行进一步的估计,从而确定装备的健康状况与退化程度。常用的监测评估算法有神经网络、人工免疫算法、HMM、SVM、SVDD算法等。经监测评估模型处理后的输出反映了装备当前的健康状态和降级程度,可采用健康度、健康指数以及灰度等指标来衡量。

(3)状态/寿命预测模型。状态/寿命预测模型主要用于评估和预测装备未来的健康状态和剩余寿命。该模型综合利用数据处理层和状态监测与评估层的数据信息进行预测,通过对装备状态退化过程的分析来估计装备未来的健康状态或在使用包线和工作应力下的剩余使用寿命。常用的预测算法有灰色理论、神经网络、SVR算法、LS-SVM、HMM和HSMM等,经状态/寿命预测模型处理后的输出反映了装备未来的健康状况,为进一步的预诊断和维修决策提供了指导。

(4)维修决策模型。维修决策模型主要对来自各层的数据信息和输出结果进行信息融合,从而做出相应的维修决策,为维修资源管理和其他PHM过程提供支持。维修决策模型主要包含装备运行能力的评估、任务计划以及维修资源管理等内容,一般可将其分为状态监测器融合、多传感器数据融合、特征级融合和知识级融合4类^[28]。

4.3 PHM 生命周期维

PHM生命周期维明确了装备生命周期内各阶段的PHM目标和任务,参照DoD5000.2生命周期框架所对应的PHM设计过程,将装备的生命周期活动划分为5个阶段:方案细化阶段、技术开发阶段、系统开发与演示阶段、生产与调配阶段以及使用与保障阶段。在装备生命周期内的任何一个阶段引入PHM,都可以提高系统的设计效率并降低系统全寿命周期的费用。

(1) 方案细化和技术开发阶段

方案细化和技术开发阶段主要完成PHM需求分析和技術选择工作,目的是降低技术风险和优化PHM需求,为PHM系统的开发做准备。该阶段涉及的主要活动包括面向系统工程的PHM指标的综合权衡和面向装备维修体制的测试、监测评估与维修系统结构的确定。其中,测试、监测评估和预测技术的选择过程应综合考虑已有技术和新技术,对各项技术应进行技术成熟度评价,从而尽量降低设计风险。在综合权衡PHM系统的过程中,应考虑的主要因素有:

- 1)开展测试、监测评估、预测和维修的时间与环境;
- 2)故障识别率、虚警率、预测覆盖率、预测精度、预测误差等要求;
- 3)测试仪器的选取,以及测试仪器的技术成熟度、定量测试精度等要求;
- 4)设计开发PHM的费效模型。

此阶段考虑了技术成熟度、测试精度、预测误差和PHM费效模型等不确定因素和经济效益,与传统方法相比,考虑的目标更加系统工程化。

(2) 系统开发与演示阶段

系统开发与演示阶段主要完成PHM系统的设计工作,

其目的是使 PHM 在满足装备完好性的基础上实现设计费用最小化、后勤工序最小化、测试性水平最大化。该阶段的主要活动包括:

- 1) 分析相似装备的历史信息,为 PHM 设计提供借鉴;
- 2) 完善 PHM 设计并开展 PHM 体系结构的建模分析;
- 3) 基于测试性分析优选基于状态监测的测试点;
- 4) 选择和训练用于监测评估和预测的算法,并生成监测评估与预测策略。

此阶段的活动内容在传统流程的基础上增加了状态预测策略的设计,体现了 PHM 的设计思想。

(3) 生产调配与使用保障阶段

生产调配与使用保障阶段主要完成 PHM 的数据采集与熟化工作,其目的是及时验证与评价 PHM 的实际性能,确保 PHM 的有效运行。期间的主要活动包括:

- 1) PHM 数据采集;
- 2) PHM 数据分析,包括故障分析和状态退化趋势分析;
- 3) PHM 校准与维护;
- 4) 熟化 PHM 能力,挖掘 PHM 潜力。

该阶段的大部分工作是被传统维修保障工作所忽略的,因为传统的自测试与诊断维修系统所给出的历史信息通常都是定性的,定性的历史信息通常只被用作概率统计和故障诊断。然而,PHM 系统能够提供大量的定量信息,定量信息具备很强的数据挖掘能力,通过训练这些定量信息能够使得装备的状态监测与评估以及预测结果更加准确。

5 基于视情维修的电子装备 PHM 系统结构

5.1 结构框架

基于视情维修的电子装备 PHM 系统采用开放式系统架构,其核心是利用先进传感器的集成,借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理系统的健康状况,是机内测试能力和状态监控技术的进一步拓展。

目前,PHM 系统架构还没有形成统一的标准,有借鉴意义的是国际标准组织(International Standard Organization, ISO)发布的 ISO 13374 系列标准。ISO 13374 系列标准给出了一个通用的基于状态的监测结构,其中定义了 6 层 PHM 基本功能:数据采集(Data Acquisition, DA)、数据处理(Data Manipulation, DM)、状态监测(Condition Monitor, CM)、健康评估(Health Assessment, HA)、预测评估(Prognostics Assessment, PA)、决策生成(Advisory Generation, AG)。前 3 层定义相对明确,与当前的相关概念基本吻合,只是 PHM 需要具备定量的数据采集、处理和状态检测能力;后 3 层功能需要结合人们对监测技术的认识来评估当前装备的状态、预测未来故障、提供决策建议。典型的基于 6 层功能的开放式 PHM 系统结构如图 2 所示。

(1) 数据采集。该部分利用各种传感器采集系统的相关参数信息,提供 PHM 系统的数据基础,且还具有数据转换以及数据传输等功能。

(2) 数据处理。该部分接收来自传感器以及其他数据处理模块的信号和数据,并将数据处理成后继的状态监测、健康评估和故障预测等部分处理要求的格式。该部分的输出结果包括经过滤和压缩简化后的传感器数据、频谱数据以及其他特征数据等。

(3) 状态监测。该部分接收来自传感器、数据处理以及其他状态监测模块的数据。其功能主要是将这些数据与预定的失效判据等进行比较来监测系统当前的状态,并且可根据预定的各种参数指标限值/阈值来提供故障报警能力。

(4) 健康评估。该部分接受来自不同状态监测模块以及其他健康评估模块的数据,主要评估被监测系统(也可以是分系统、部件等)的健康状态(如是否有参数退化现象等),可以产生故障诊断记录并确定故障发生的可能性。故障诊断应基于各种健康状态的历史数据、工作状态以及维修历史数据等。

(5) 预测评估。该部分可综合利用前述各部分的数据信息,可评估和预测被监测系统未来的健康状态,包括剩余寿命等。预测评估能力是 PHM 系统的显著特征之一。

(6) 决策生成。该部分接受来自状态监测、健康评估和预测评估部分的数据。其功能主要是产生更换、维修活动等建议措施,可在被监测系统发生故障之前的适宜时机采取维修措施。该部分实现了 PHM 系统管理的能力,是另一显著特征。

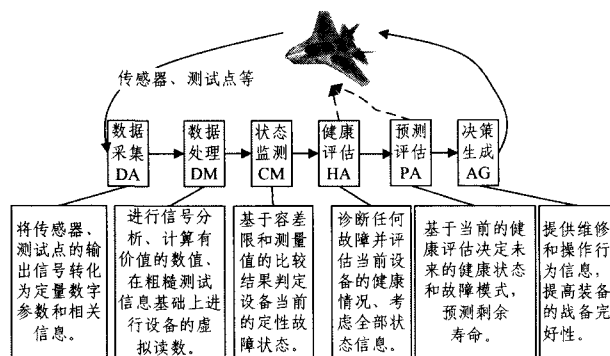


图 2 开放式 PHM 系统结构

5.2 系统实现技术

实现电子装备 PHM 系统主要是实现基于视情维修的电子装备 PHM 系统结构中各层的功能,课题组主要采用 LabWindows/CVI 与 Matlab 混合编程技术来完成。

LabWindows/CVI 的信号分析和处理能力强,界面友好,但算法表述复杂。Matlab 是公认的优秀数学应用软件,数值计算能力强,算法表述简便,但人机交互界面较差,程序执行效率低。本文将二者进行有机结合,利用 Matlab 编写 PHM 系统各层功能的算法并封装后,在 LabWindows/CVI 环境下利用软接口技术对其进行调用,完成 PHM 系统应用程序的开发。

两者结合的关键在于实现两种语言之间数据和命令的交换,即 LabWindows/CVI 与 Matlab 之间的混合编程和相关的软接口技术。这种软接口技术的基点在于:Matlab 和 LabWindows/CVI 都提供与外部程序进行交互的接口组件。因此,软接口技术的核心是使用正确的方法建立 Matlab 与 LabWindows/CVI 之间的联系。

课题组在实践中总结出 3 种方法:1) 引擎调用技术;2) Active X 服务控件;3) 编译器。3 种方法各有优势,主要体现在:1) 在易用性方面,第一种最佳,第二种次之,第三种最差;2) 在数据处理的灵活性方面,第三种最佳,第一种次之,第二种较差,但第三种的调用接口和环境配置较复杂,需要编程人员具备很高的 C++ 水平;3) 在数据交流的可靠性方面,

第三种最优,第一种和第二种次之,但随着计算机配置的不断提高,第一种已逐渐显示其巨大的应用潜力,因此课题组在用LabWindows/CVI开发PHM系统的主程序时主要采用引擎调用技术。下面对引擎调用技术进行详细介绍。

引擎调用技术是将Matlab作为计算引擎,用CVI编写主程序和引擎程序,引擎程序用于启动Matlab引擎,向Matlab传送数据和命令,通过引擎函数让Matlab在后台完成数据处理并将结果返回到CVI的变量中。

引擎程序必须包含引擎头文件engine.h和libeng.lib, libmx.lib, libmat.lib这3个静态库文件。engine.h头文件包含引擎函数及其相关数据类型的定义和头文件matrix.h的声明,它的缺失将导致无法调用Matlab引擎。引擎程序需要的eng函数(即引擎函数)和mx函数都包含在这3个静态库中,这3个静态库的作用如下:

(1)libmat.lib用于支持在C程序中从Matlab生成的MAT文件中获取数据;

(2)libmx.lib用于支持在C语言程序中用mx函数生成和处理能传递给Matlab引擎的矩阵变量;

(3)libeng.lib用于支持在C程序中使用eng函数。

引擎程序中可能用到的引擎函数如表1所列。

表1 Matlab引擎函数

引擎函数名	函数功能
engOpen	打开引擎
engSetVisible	可视化引擎
engEvalString	调用引擎,完成在Matlab中的数据处理和计算等操作
engPutVariable	将C中变量的内容传递给Matlab中的变量
engGetVariable	将Matlab中变量的内容传递给C中的变量
engClose	关闭引擎

为方便LabWindows/CVI与Matlab的混合编程,LabWindows/CVI软件还附带了一个方便且实用的Matlab基本函数封装文件Matlabutil.c,该文件存储在CVI软件安装路径的“...\\samples\\activex\\matlab”目录下,其包含的常用函数有MinMaxMatlab(最小或最大化Matlab窗口)、RunMatlabCommand(运行Matlab命令)、SendMatrix(向Matlab工作空间发送矩阵)、GetMatrix(从Matlab工作空间中获得矩阵)等。

6 案例分析

为加强装备培训人员的实际操作能力,减少对实装的动用,降低损耗和维护费用,延长装备的使用寿命,课题组开发出了一套某型装备模拟训练与仿真测试系统^[29],用于模拟该型装备开/关机操作训练和开机后主要检测的项目,使操作人员熟悉设备舱内的操作,为实装训练打下坚实基础。

在该系统的设计过程中,对系统的可靠性、维修性等提出了严格要求。为了节约研制时间和研制费用,提高系统的任务可靠性和可用性,依托项目需求,应用本文的研究成果对系统进行了PHM系统设计。

6.1 开发平台

在设计初期,采取了详细的可靠性与测试性设计分析。从功能角度出发,整个系统可以分为电源分系统、空情模拟分系统、装情模拟分系统、功能检测分系统和辅助功能分系统,可靠性框图如图3所示。

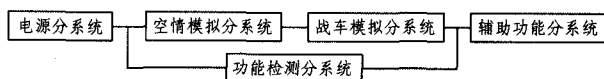


图3 系统的可靠性框图

利用我单位复杂装备故障诊断与预测技术实验室的软硬件条件,采用图4的形式实现不同设计人员之间的PHM信息共享与系统故障仿真分析,使得系统的研制周期大大缩短,研制成本也相应减少,并有效地降低了系统研制过程中各种功能电路板的废品率。

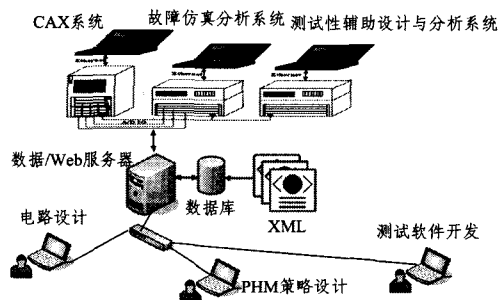


图4 开发平台结构

采用XML的形式将待研系统的信息存入数据/Web服务器计算机的数据库中作为整个系统的数据源,该数据库是一个XML本源数据库,即数据直接采用XML数据文档的形式进行存储与读取。

6.2 功能框架及软件开发流程

在对该系统的PHM进行设计的过程中,为了节约时间和研制费用,提高系统的可靠性和可用性,依托项目需求,根据前文提出的基于视情维修的电子装备PHM系统结构开发了相应的PHM系统模块。该系统主要由以下几部分构成:数据处理模块、监测评估模块、故障预测模块、信息集成模块和系统维护模块等。该系统的功能框架如图5所示。

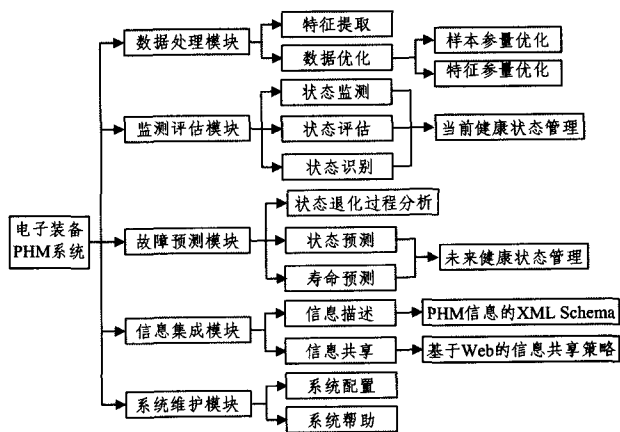


图5 系统功能框架

同时,根据该模拟训练与仿真测试系统中各子系统的特点,分别设计了不同模块(数据优化、状态监测与评估以及预测模块)的实现算法,其软件实现流程如图6所示。

在上述PHM软件开发流程的状态预测环节中,采用将基于原始数据的预测方法和基于历史及当前健康度的预测方法相结合的方式,以达到综合利用两种预测信息(原始数据信息和历史及当前健康度信息)并提高预测精度的目的。

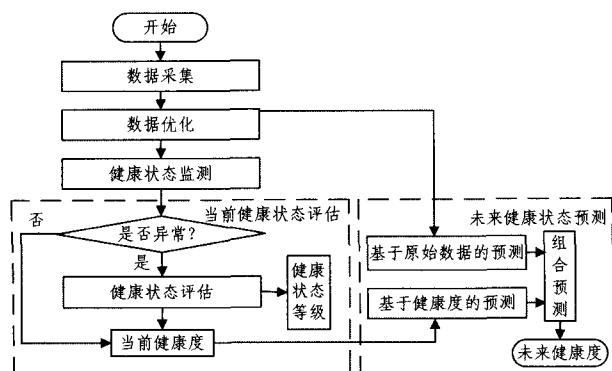


图6 PHM软件开发流程

通过应用本文的研究成果对该仿真训练系统进行了较为全面的 PHM 设计与验证。从应用效果来看,本文所提出的基于视情维修的装备 PHM 结构框架和系统实现技术可以满足复杂装备的 PHM 设计需要,并且有力地支持了装备视情维修与综合保障工作的开展。

结束语 本文分析了电子装备在武器系统中的重要作用及其维修保障现状,引入基于视情维修的装备预测与健康管理的(PHM)理念,在对 PHM 结构进行三维视图分析的基础上,采用典型开放式 PHM 架构建立了基于视情维修的电子装备 PHM 体系结构框架,并从实际应用的角度探讨了其系统实现方法,为构建基于视情维修的电子装备 PHM 系统奠定了基础。

本文将基于视情维修的 PHM 保障策略引入电子装备中,从理论上突破了传统维修理论和保障理念相对滞后、状态信息匮乏的局限,将维修方式从事后维修、定期维修转变成基于状态的视情维修,降低了维修保障费用,缩短了维修时间;通过对以视情维修为基础的 PHM 系统结构的研究,系统顶层设计阶段解决了装备设计复用性、软件互操作性和可维护性等问题,解决了装备全生命周期过程中由于“理念落后、贫信息”而难以实现对装备健康状况快速且准确“体检”的问题,切实提高了装备的健康管理能力。在某型装备模拟训练与仿真测试系统中的应用表明,PHM 系统的引入能够有效提高装备的可靠性和维修性,降低维修保障费用,具有显著的军事和经济效益。

参考文献

- [1] 孙智信,李自力. 世界电子信息装备[M]. 北京:国防科技出版社,2001:15-28.
- [2] KIRY K,KEITH S,EMIL S,et al. A process and tool for determining the cost benefit of prognostic applications[C] // 2001 IEEE AUTOTESTCON Proceedings of Systems Readiness Technology Conference. 2001:532-544.
- [3] BOB B,ANDY H,LEO F. Writing a convincing cost benefit analysis to substantiate autonomic logistics[C] // 2001 IEEE Proceedings of Aerospace Conference. 2001:3095-3103.
- [4] ZHANG B Z,WANG P,et al. Overview of Oversea Prognostics and Health Management Technologies Development Project[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(6): 1-7. (in Chinese)

张宝珍,王萍,等. 国外飞机预测与健康管理工作计划综述[J]. 计算机测量与控制,2016,24(6):1-7.

- [5] GAO Q Y,QIAN H Y. Aero-engine Prognostic Health Management(PHM) Technology[J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32(增刊): 220-223. (in Chinese)
- 高秋颖,钱红余. 航空发动机预测与健康(PHM)技术[J]. 测控技术,2013,32(增刊): 220-223.
- [6] HESS A,FILA L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: potential impact on aging aircraft problems [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. 2002:3021-3026.
- [7] HERNANDEZ L. EHM Framework Description & Breakout Session Introduction [R]. NDIA Enterprise Health Management Workshop, 2009.
- [8] JING B,XU G Y,et al. Recent advances analysis and new problems research on PHM technology of military aircraft[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 161-169. (in Chinese)
- 景博,徐光跃,等. 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(2): 161-169.
- [9] AN Y L. Key Technology of Design for Diagnostics to Integrated Diagnosis for Equipment[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009: 2-9. (in Chinese)
- 安幼林. 面向综合诊断的装备诊断设计关键技术研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2009:2-9.
- [10] ZHANG B Z,ZENG T X. PHM: The Key Enabler to F-35's Affordability[J]. Avionics Maintenance & Engineering, 2005(6): 20-23. (in Chinese)
- 张宝珍,曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术[J]. 航空维修工程,2005(6): 20-23.
- [11] 石君友,田仲. 测试性设计分析与验证[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [12] LI A J,ZHANG W G,TAN J. Survey on aircraft health management technology[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(3): 78-84. (in Chinese)
- 李爱军,章卫国,谭键. 飞行器健康管理技术综述[J]. 光电与控制,2007,14(3): 78-84.
- [13] LU M Z,SONG Y J. Study on Testability Design of Missile Equipment Based on Prognostics and Health Management[J]. Measurement and Testing Technology, 2017, 44(1): 27-31. (in Chinese)
- 卢明章,宋永军. 基于 PHM 的导弹装备测试性设计[J]. 计量与测试技术,2017,44(1): 27-31.
- [14] CHANG Q,YUAN S F. Overview of integrated vehicle health management (IVHM) technology and development [J]. System Engineering and Electronics, 2009(11): 2652-2657. (in Chinese)
- 常琦,袁慎芳. 飞行器综合健康管理(IVHM)系统技术现状及发展[J]. 系统工程与电子技术,2009(11): 2652-2657.
- [15] L V C,MA J,et al. A State of the Art Review on PHM Technology[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 1-4. (in Chinese)
- 吕琛,马剑,等. PHM 技术国内外发展情况综述[J]. 计算机测量与控制,2016,24(9): 1-4.
- [16] SHI W,SUN Y F,WANG Z L,et al. A Study of PHM System and Its Fault Forecasting Model[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(10): 1-34. (in Chinese)
- 时旺,孙宇峰,王自力,等. PHM 系统及其故障预测模型研究[J]. 火力与指挥控制,2009,34(10): 1-34.

- [15] MAJI P, GARAI P. On fuzzy -rough attribute selection: Criteria of max-dependency, max-relevance, min-redundancy, and max-significance [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13 (9): 3968-3980.
- [16] ZHANG Z X, FAN X Q, ZHAO S Y, et al. Fast reduction algorithm research based on k-nearest neighbor fuzzy rough set[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2015, 9(1): 14-23. (in Chinese)
张照星, 范星奇, 赵素云, 等. k-近邻模糊粗糙集的快速约简算法研究[J]. 计算机科学与探索, 2015, 9(1): 14-23.
- [17] ZHANG X, MEI C L, CHEN D G, et al. Feature selection in mixed data: A method using a novel fuzzy rough set-based information entropy [J]. Pattern Recognition, 2016, 56(1): 1-15.
- [18] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1[J]. Information Science, 1975, 8(3): 199-249.
- [19] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-356.
- [20] LI D M, LI T, ZHAO T. Continuous attribute reduction algorithm based on interval type-2 fuzzy rough sets[J]. Application research of computers, 2015, 32(5): 1379-1382. (in Chinese)
李冬梅, 李涛, 赵涛. 基于区间二型模糊粗糙集连续属性约简算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1379-1382.
- [21] MAJI P, GARAI P. IT2 fuzzy-rough sets and max relevance-max significance criterion for attribute selection [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(8): 1657-1668.
- [22] LU J, LI D Y, ZHAI Y H, et al. A model for type-2 fuzzy rough sets[J]. Information Sciences, 2016, 328(c): 359-377.
- [23] MENDEL J M, JOHN R I. Type-2 fuzzy sets made simple[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(2): 117-127.
- [24] DUBOIS D, PRADE H. Putting rough sets and fuzzy sets together[J]. Intell. Decision Support, 1992, 11: 203-232.
- [25] AISBETT J, RICKARD J T, MORGENTHALER D. Multivariate modeling and type-2 fuzzy sets[J]. Fuzzy sets and systems, 2011, 163(1): 78-95.
- [26] MENDEL J M. Advances in type-2 fuzzy sets and systems[J]. Information Sciences, 2007, 177(1): 84-110.
- (上接第22页)
- [17] MA S S, CHEN G S, FANG X Q. Research on Prognostic and Health Management System of Complex Equipment[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(1): 1-4. (in Chinese)
马飒飒, 陈国顺, 方兴桥. 复杂装备故障预测与健康管理系统初探[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 1-4.
- [18] CHEN J, PENG Y, LI Q, et al. Data-driven PHM software system for airborne equipment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1536-1543. (in Chinese)
陈静, 彭宇, 李祺, 等. 数据驱动的机载设备 PHM 软件系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1536-1543.
- [19] CUI J, HE J, LIU Q, et al. Research on the Architecture Design of UAV PHM System[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(6): 133-135. (in Chinese)
崔嘉, 贺静, 刘奇, 等. 无人机 PHM 系统体系结构设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 133-135.
- [20] GUO Y M, CAI X B, ZHANG B Z, et al. Prognostics and Health management technology for new-generation weapon[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(13): 199-203. (in Chinese)
郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 等. 新一代装备的预测与健康状态管理技术[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(13): 199-203.
- [21] GUO Y M, CAI X B, ZHANG B Z, et al. Review of Prognostics and Health Management Technology[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(9): 1213-1218. (in Chinese)
郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 等. 故障预测与健康状态管理技术综述[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1213-1218.
- [22] JIA H, XU H Q, QU Q L. Maintenance support for ship equipment [J]. Instrumentation Customer, 2006, 13(3): 8-10. (in Chinese)
贾慧, 胥辉旗, 屈清林. 基于 PHM 的舰船装备维修保障研究[J]. 仪器仪表用户, 2006, 13(3): 8-10.
- [23] LONG F, WANG Z, CHENG X J, et al. A PHM Blueprint Based on Information Fusion for Military Digital Devices[J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27(9): 86-90. (in Chinese)
龙凤, 王忠, 程绪建, 等. 一种基于信息融合的军用电子产品 PHM 方案设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(9): 86-90.
- [24] 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. (in Chinese)
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.
- [25] ZHANG B Z, ZENG T X. Advanced Prognostics and Health Management Technology[J]. Measurement & Control Technology, 2003, 22(11): 4-6. (in Chinese)
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.
- [26] DISCENZO F M, NICKERSON W, MITCHELL C E, et al. Open systems architecture enables health management for next generation system monitoring and maintenance [R]. Development Program White Paper, 2001.
- [27] LV Z B, SUN Q, WANG J, et al. Research on Prognostic and Health Management (PHM) Model Verification Engineering Process[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 281-283. (in Chinese)
吕镇邦, 孙倩, 王娟, 等. PHM 模型的工程化验证方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 281-283.
- [28] WANG Y Y. The Study of Fault Diagnosis Based on Information Fusion Technology[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2010: 10-12. (in Chinese)
王艳英. 基于信息融合技术的故障诊断方法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2010: 10-12.
- [29] 陈建辉. 战车原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 1-2.