

战斗机预测与健康管理技术应用的思考



王海峰*

航空工业成都飞机设计研究所, 四川 成都 610091

摘要:从装备维修保障能力发展需求及预测与健康管理(PHM)技术内涵入手,根据主要武器装备的作战使用及维修特点,分析了战斗机应用PHM技术的迫切需求以及国内外PHM技术工程应用现状和特点;重点研究给出了战斗机PHM系统研制过程中关于需求识别、软硬件统筹、系统架构设计与能力提升、分层级诊断体系构建、功能系统对象权衡确定等5个关键环节的解决思路;结合国内某型新机PHM系统的应用场景阐述了战斗机PHM系统研制效果;最后对未来战斗机PHM技术发展和应用方向进行了展望。

关键词:战斗机; 预测与健康管理; 工程应用; 认识与思考; 应用进展; 关键环节; 研制效果

中图分类号:V240.2

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.07.001

为应对新的作战需要,装备的信息化水平和复杂程度显著提升,使得按传统模式和技术手段来保持和恢复装备固有可靠性水平的维修保障不堪重负,实现精确维修、缩小保障规模、降低保障费用迫在眉睫。因此需要引入新技术、创新理念,将传统的事后维修或定时预防性维修转变为基于状态的维修。

预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)是以装备机内自测试、综合诊断技术为基础,基于海量的传感器信息和飞行记录参数,借助各种推理模型对装备系统、部件或模块的故障和剩余寿命进行精确诊断、预测,综合装备的使用需求和可用的保障资源对维修活动进行适当决策的能力^[1]。有关工程应用研究表明,该技术有助于推动装备实现精确维修、敏捷保障、直接提升作战效能:

(1)故障诊断及时、准确,能尽最大可能减少不正确维修,缩短故障排除时间,降低维修人员技术水平要求。

(2)故障和剩余寿命预测能力,能大幅度减少定时维修,降低非计划维修的不可预知性,提升保障资源配置的精确性。

(3)基于健康状态安排维修,能最大程度提升装备执行任务能力,降低保障规模和保障费用。

装备综合应用PHM技术是作战需求、技术研究与工程

应用不断迭代的过程。其间,涉及一系列既与装备自身发展关联,又与新技术研究应用相关的基础问题,既需要技术研究的突破,又需要工程应用上的正确理解、合理使用与系统集成创新。需要多领域专家共同努力、联合攻关,在工程实践中持续深入研究基础技术,探索系统研制应用方法。目前,国外开展了先进传感器、信息获取与处理、诊断预测智能模型、综合体系架构、驱动维修保障等理论与技术方法,并在F-35战斗机上初步研制形成相应系统,但其核心技术对外实施技术封锁。国内相关的基础技术研究相对比较薄弱,发表的文献也多以智能传感器、故障诊断与健康评估、诊断和预测算法推理模型等理论性研究为主。本文基于工程应用的认识和理解,在深入思考和总结国内外应用进展的基础上,给出了战斗机PHM系统工程实践关键环节和发展方向,以期工程研制人员提供参考。

1 PHM技术应用于战斗机的总体认知

与其他武器装备相比,战斗机具有出动强度大、任务成功性高、机动部署性强、寿命周期长等特殊的作战使用特点,研制的目标是追求高作战效能,因此,故障及时发现、快

收稿日期: 2020-05-15; 退修日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-10

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY 2016205A004)

*通信作者: Tel.: 028-85509596 E-mail: 611@avic.com

引用格式: Wang Haifeng. Research on application of prognostics and health management technology for fighter aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(07): 3-11. 王海峰. 战斗机预测与健康管理技术应用的思考[J]. 航空科学技术, 2020, 31(07): 3-11.

速排除和精确维修、敏捷保障等能力显得尤为重要,PHM技术可以发挥更好的作用。

1.1 战斗机独有的维修特点使亟须PHM技术

航空、航天、兵器、舰船等各类武器装备作战使用及维修保障各不相同、各具特点^[2-4],其对PHM能力需求具有自身不同的应用方向,但存在一些差异。

航天装备的主要使用模式为一次性使用或一次发射长期在轨运行。发射过程若发生故障通常引起灾难性后果,在轨运行后工况相对稳定,因此航天装备注重发射前测试与故障诊断、重视单次高可靠、不允许带故障发射。对于发射过程或在轨运行过程中发生的故障,无法及时采取维修工作,也无急迫的使用中和使用后保障需求。以上这些特点,使PHM技术触发后续维护活动的作用就显得比较难以实施。

兵器装备的使用主要集中在地面,发生故障后可以随时停留原地等待维修,引起车毁人亡等严重后果的风险较低,而在装备内部实现PHM需要一定的代价,需要综合权衡,因此兵器装备通常采用定时维修或故障后修理相结合的策略,PHM技术在兵器装备中如何有效使用,需要进一步探索研究。

舰船装备长期远洋航行、出动频次低、单次出动周期长,航行期间仅能根据舰船修理条件和备件情况开展“部件替换式”的自修,主要结合在港停泊期间的航修以及坞修、厂修等开展定时维修或事后维修,故障排除虽有一定的实时性要求,但对故障精准诊断和预测要求不同,所以应用PHM技术的紧迫性和全面性上需要权衡。

对于航空装备,尤其是战斗机,作为制空作战的拳头力量,采用基地化部署,高频次重复使用、快速出动要求高,空中飞行发生故障可能导致机毁人亡。因此,飞行前必须确保关键功能完好,以保证飞行安全、任务成功。飞行中能主动发现关键功能故障便于决策备降或返航。一旦飞机着陆就能即时排除故障使之快速再次出动。应该说,战斗机应用PHM技术正是破解其因作战使用形成的独特维修保障需求的关键所在。

1.2 PHM技术是影响战斗机研制目标的关键要素

战斗机研制追求的目标之一是高作战效能。长期以来,战斗机研制技术相比以前已有明显进步,但距离目标仍有差距,在战斗机交付部署后面临着维修时间长、机动能力差、维修费用高等主要问题,具体表现为外场出现新故障、故障不复现、故障不能准确定位、有故障但没有报告、外场偶发故障(原因不明)、报故返厂测试后一切正常等。经分析,造成上述问题的主要原因是在战斗机设计过程中功能性能设计与可靠性、维修性、测试性、保障性等影响作战效能的固有属性

同步设计不充分,缺乏PHM系统整体规划和设计,严重制约着研制目标的实现。

PHM技术具备的故障诊断能力可有效降低虚警、减少故障排除时间;预测能力可大幅减少因定时维修导致的战斗机不可用时间,并能预测即将发生故障的设备从而触发提前更换,降低任务执行过程中故障发生概率,也可使偶然故障转为计划性的修复性维修。因此,在一定的可靠性、维修性、测试性、保障性设计基础上,工程应用PHM技术,可更有效提升战斗机可用度(A)、可信度(D)和保障度(S),进而间接影响作战效能,使战斗机研制追求的目标更加落地^[5],实现买的起、用的起、好用、顶用的作战使用特点,如图1所示。

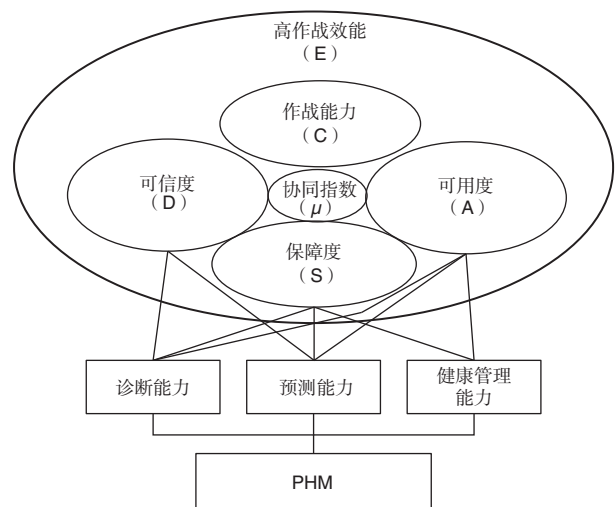


图1 PHM技术对战斗机研制目标的影响

Fig.1 Influence of PHM technology on fighter development target

1.3 需权衡处理好与关联技术的应用关系

PHM技术能力强大,但与战斗机已有的测试性、机内综合告警等技术存在关联,工程应用不能唯PHM论,需综合权衡处理好与其他相关技术的应用关系。

(1) 充分认识其与测试性技术的依托关系

测试性是产品能及时并准确地确定其状态,并隔离其内部故障的能力。测试性设计使产品可以通过测试确定是否发生故障以及发生故障的位置。PHM技术要完全发挥实时监控、增强诊断、故障预测与健康管理的功能,重要前提是测试性设计的测试点与数量是否满足要求。没有良好的测试性为基础,PHM技术功能再强大也会成为无米之炊。在工程应用时,不仅不能错误地认为其将代替测试性,反而应该进一步加强机内测试(BIT)和综合诊断等测试性设计,以助力PHM系统研制。

(2) 正确处理其与机上故障告警触发信号的同源关系

战斗机综合告警系统负责将需要告知飞行员的飞机故障信息等通过视觉和听觉方式传递给飞行员并引导其采取适当的飞行操作动作。其中,故障信息由飞机管理系统、任务系统、机电系统的处理单元负责处理后直接传递给综合告警系统触发告警。PHM技术具备实时监控并诊断故障的能力,可以提供准确的全机故障信息为维修服务。从数据同源的角度看,综合告警系统的触发信号可以由PHM系统产生。但也应该清楚地认识到,告警系统传递的信息是需要飞行员引起注意或操作处理的故障,关系飞行员安全、飞行安全及任务执行,工程应用初期PHM可不直接参与机上故障告警,但可以同步对数据的同一性进行分析验证,待技术应用成熟后,从任务关键信息开始逐步支持故障告警。

2 国内外PHM技术工程应用进展

PHM技术在综合诊断基础上发展而来,经过深度技术研究和工程应用,体现出其在故障深度诊断、实现故障与寿命预测、助力自主保障和提升保障效能方面特有的技术优势,越来越受到各国军方的高度重视,国内外航空装备工业部门更致力于使之转化为新研装备的重要技术组成部分。

2.1 技术研究现状

国外从20世纪60年代的机内测试技术开始,历经BIT、综合诊断等发展阶段,直至90年代PHM技术的诞生与发展,经过长期研究和积累,目前已形成了完善的技术方法体系、功能结构、标准体系以及技术转化应用与技术集成机制^[6]。

国内自“十五”末期引入PHM技术概念以来^[7],有关高校、工业部门在“十一五”相继开展了大量技术基础和国外应用研究;“十二五”适应国内某型新机研制需要,工业部门组织开展了关键技术应用研究与应用攻关,为型号应用奠定了重要基础;“十三五”随着新机研制,结合预先研究专项安排,重点开展了复杂装备PHM系统技术理论、工程系统及故障模型试验验证等研究工作,进一步梳理了国内技术方法体系、工程设计与验证技术方法,走出了一条型号研制与预先研究并进的技术研究之路。

2.2 工程应用现状

随着技术研究的不断深入,PHM技术在诸多领域已逐渐探索工程应用^[8]。其中,在战斗机领域的应用最为全面、系统而富有成效,也促进其在其他领域应用的落地与发展,更成为F-35和国内某型新机的典型技术特征之一,如图2所示。

美国自20世纪70年代中期的A-7E飞机研制发动机监控系统以来,在经历40余年的测试技术发展和F-15、F-16、

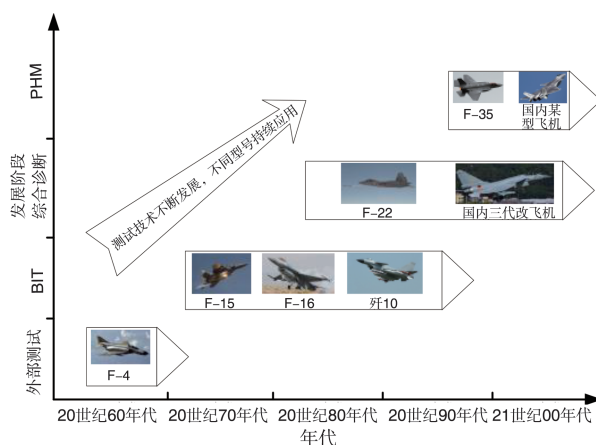


图2 不同战斗机测试技术应用情况

Fig.2 Application of various testing technologies on fighter aircraft

F/A-18、F-22等型号的可靠性、测试性和综合诊断工程实践后,为提高出动架次率、降低保障规模、减少维修人力,F-35战斗机研制中启动了PHM系统研制,并形成一套研制方法和设计工具^[9]。该系统是一种由机上和地面两大部分构成的软件密集型系统,采用分层智能推理结构,其机上部分由成员系统、区域管理器、飞机平台管理器三个层次构成,成员系统借助传感器、BIT、模型等检测故障,飞机系统、任务系统、机体结构、推进系统等的区域管理器具有信号处理、信息融合和区域推理的功能,飞机平台管理器通过关联信息确认并隔离故障。除推进系统管理器外,其他区域管理器和飞机平台管理器软件均驻留综合核心处理机(ICP)或显示管理计算机(DMC)中^[10]。F-35 PHM系统研制历经10余年,取得了很大的进步,但随着作战试验和各批次飞机部署验证,也暴露了系统仍然存在故障检测隔离能力仍不足、故障预测能力实现滞后等问题^[11],这也是PHM工程应用过程的自身规律。

中国从自主研制的歼10战斗机开始,在国内引入并首次开展可靠性、维修性、测试性工程实践,打下了理论方法和技术应用基础。经历30余年的发展,依托良好的可靠性、测试性工程实践技术支撑,在PHM工程基础相对薄弱的情况下,为实现高保障能力、低全生命周期费用,首次将PHM系统作为国内某型新机的一个子系统纳入装备研制。该系统充分利用飞机管理计算机(VMC)、ICP、显示管理处理机(DMP)及各二级控制器,构建了具备不同工作模式的成员级、区域级、飞机级三层联动系统架构。国内PHM系统技术工程应用时间仅仅10多年,形成了一套特有的系统研制基础技术与体系方法,并随着新机试验、交付部署及公开军事活动亮相等一系列验证表明,故障检测隔离能力相比三代机

明显改善,预测能力逐渐提升。

基于以上技术研究和工程应用现状的梳理与分析可以看出:

(1) 国内外新一代战斗机都应用了PHM技术,提升了战斗机故障检测隔离能力。未来战斗机更加广泛地深入应用PHM技术是发展趋势。

(2) 不同战斗机应用PHM技术的理念相当,但由于新技术的发展,研制的PHM系统在使用方面各有千秋。

(3) 良好的可靠性、维修性、测试性和保障性设计与工程数据积累是PHM系统规划和实现的基础。

(4) 战斗机PHM系统能力存在长期熟化的过程,需要在全生命周期内不断提升,也符合工程研制渐进式发展模式。

3 战斗机PHM系统研制关键环节

战斗机PHM系统是在传统测试性设计基础上构建和提升,应充分结合战斗机研制特点和系统研制需要,基于自身基础和优势,对不同技术有所侧重,采取一条自主创新、正向设计的研制路径,研究其在需求、架构、硬件、对象等方面的关键研制环节。

3.1 首要环节是全方位识别系统需求

战斗机PHM系统研制的初衷是使维修保障与战斗机高战备完好性、高出动架次率、快速出动的作战需求相适应,解决维修时间长、保障费用高等问题,必须以适应和支撑战斗机作战使用、维修保障、供应保障以及工程支持等业务需求为基础,通过系统性地梳理战斗机作战使用和保障

过程中的工作要求来确定系统的功能需求和运行方式。

战斗机PHM系统的用户主要涵盖作战指挥、飞行、维修、供应、设计、制造、技术支持等不同人员,不同用户关注的活动不尽相同。作战指挥关注作战能力,飞行关注操作使用,维修关注故障,供应关注维修需求,设计关注能力提升,技术支持关注状态与数据。因此,需要基于不同用户的运行流程,定义各主要活动、先后次序、活动输入、输出等要素,不断捕获系统全生命周期不同用户的需要,进而通过功能分析、场景分析、状态分析等将用户需要转化为系统需求,纳入系统设计规范,形成牵引成品、子系统和系统功能设计的详细研制要求,并在方案设计、详细设计等阶段不断开展系统验证,确认系统需求,改进PHM系统设计,确保战斗机作战、使用保障与维修等各方需求均能有基于PHM的解决方案(见图3)。

3.2 务必注重系统软硬件规划与融合

战斗机的任务使命要求最大化发挥平台性能、搭载更多任务载荷。在一定的发动机推重比情况下,战斗机重量、发动机推力、平台机动性、任务设备、挂载武器、系统基本可靠性等是一组矛盾体,尤其健康管理自身带来的重量(质量)增加和基本可靠性的降低,需要慎重,综合权衡考虑为宜。

战斗机PHM系统是由硬件和软件构成的机载系统。硬件是系统的感知、传导和驻留的承载体,需要借助各类传感器和BIT设备等采集故障识别所需的数据,基于总线网络、数据链进行数据传输,利用各类处理器驻留相关软件;软件是系统的大脑,负责对识别故障的数据进行信号处理、信息融合、区域推理、关联分析。将其作为独立系统进行研

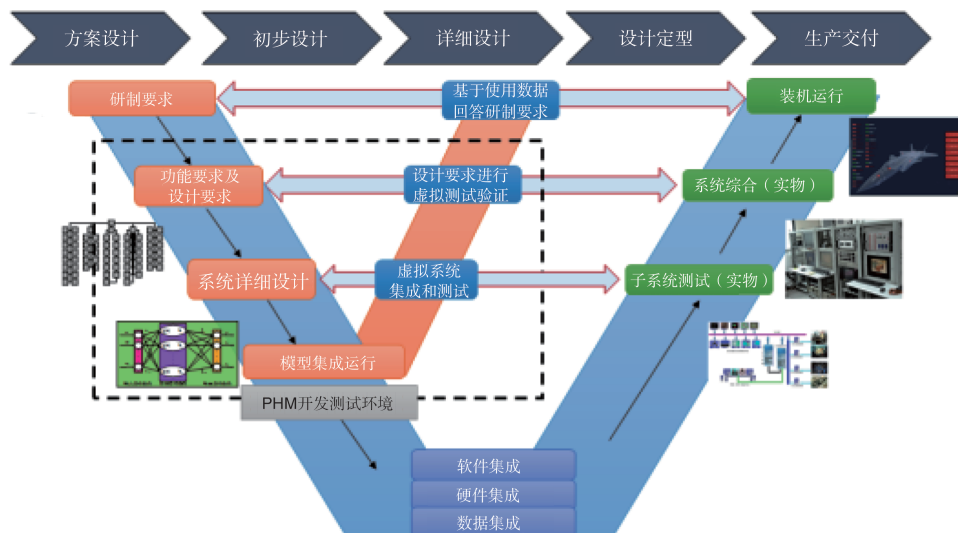


图3 系统“V”形需求识别与验证模型

Fig.3 V-shape model of system requirement identification and verification

制,设计独立的硬件,软件独立于系统之外运行,必然会增加战斗机重量、降低系统基本可靠性,使维修保障不降反增,与系统研制初衷背道而驰。因此,战斗机PHM系统研制,应与其他机载系统功能性能同步规划、综合权衡,注重软硬件统筹、规划与融合。

(1) 硬件尽可能共用化

首要原则是尽量与机上功能系统共享硬件资源。系统、设备故障识别的信息采集与BIT设计所需硬件应与重量、能源、基本可靠性综合权衡,持续优化机上已布置的系统功能传感器;机体结构裂纹、疲劳、腐蚀等损伤识别特别避免加装传感器,利用飞行参数—载荷模型识别关键结构载荷,通过损伤评估模型,完成关键结构损伤识别;借用飞机管理、任务处理计算机为驻留平台进行信息融合、诊断推理;依托机上现有总线系统和空地链路实现机载PHM数据管理和信息传递。

(2) 功能软件化

为实现战斗机强大的作战能力,新研制战斗机软件规模非常庞大。PHM系统能力主要通过软件实现,在能力未成熟前,应暂不参与机载系统功能运行,仅进行能力设计,采用功能软件化、独立分区的设计思想,便于系统能力可持续不断提升,避免系统软件崩溃影响其他机载系统正常工作(见图4)。

(3) 数据对于战斗机PHM系统至关重要

PHM系统研究的主要对象是系统和成品故障模式及影响分析(FMECA)工作输出的“故障”,各成品测试性设计是故障识别的基础,系统级、飞机级通过数据关联分析确认故障,飞机系统、任务系统及PHM系统产生的数据会记录到飞机数据记录系统中,实际飞行一个架次会记录数十个G的数据,战斗机全生命周期的数据堪称海量。因此,PHM系统研制应保证数据设计、数据记录、数据产生、数据利用等不同阶段的数据同源,多次重用,便于诊断、预测模型开发和优化。

3.3 开放式、升级性强的系统架构是核心

战斗机PHM系统设计面临技术领域多、覆盖对象广,系统能力不能一蹴而就,需要制定与平台能力版本升级协同的系统能力路线和批次定义,将研制要求分阶段、分批次进行分解,化解技术风险,确保系统能力随飞机整体研制进度逐步提升。

同时,由于战斗机全生命周期时间长,在平台相对稳定的情况下,战斗机系统特别是任务系统,能力批次多,升级迭代快。PHM系统与其他机载系统并行开始详细设计和模型算法开发,更重要的是在战斗机服役后,系统依然需要利用积累的故障和维修数据开展基于数据驱动的推理模型熟化。为此,系统的架构设计与能力提升应能适应电子系统不断升级和不同阶段自身系统功能验证与回归测试的发展需求,确保满足系统设计规范。

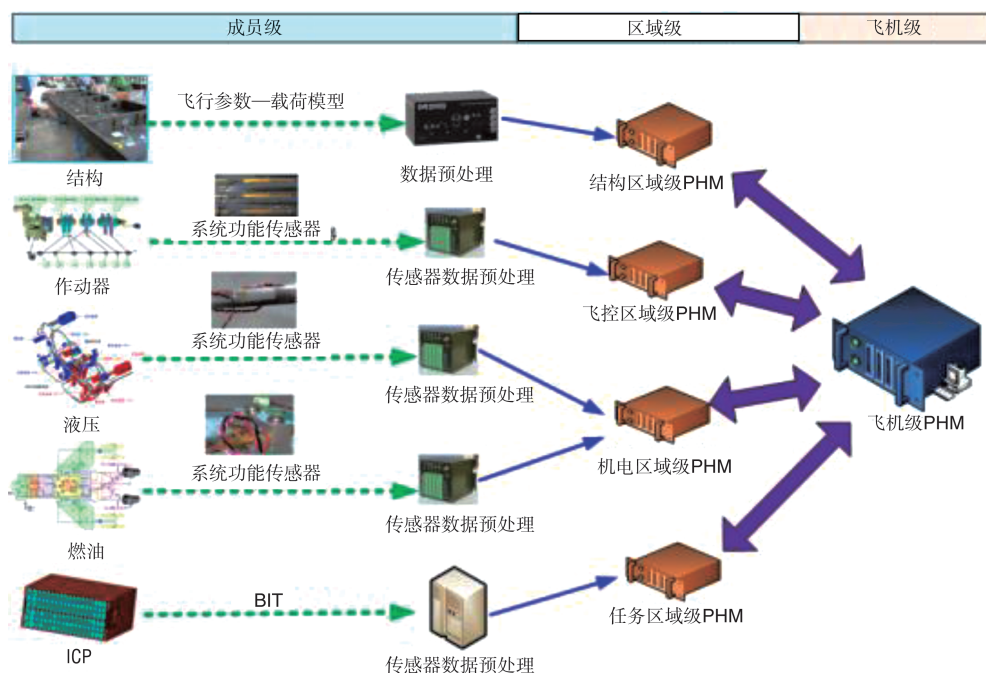


图4 硬件共用化、功能软件化的战斗机 PHM 系统

Fig.4 Fighter aircraft PHM system featuring hardware sharing and software functionality

基于以上分析,战斗机PHM系统架构设计应采用“架构一次到位,能力逐渐提升”研制思路,在方案设计阶段对功能定义、架构定义进行多轮分析和迭代,设计开放式、升级性强的系统架构,在不同阶段不断进行设计与验证的反馈和迭代,确保架构设计一次到位、合理有效,满足全生命周期系统不断升级的技术需要以及能力的螺旋式提升,满足全部利益攸关方的需要。

3.4 重点要围绕故障建立分层的诊断体系

战斗机综合程度越来越高,系统、子系统、设备之间的关联性、耦合度越来越复杂,导致故障模式爆发式增长,且产生大量具有关联和传播特性的故障难以检测和隔离,传统通过加装硬件设计诊断系统的方法不能适应战斗机的研制特点,给战斗机PHM系统研制带来了新的挑战,需要根据战斗机复杂、分层的技术特点,采取相应的研制措施:

(1)自顶向下规划,统筹机上能力需要与硬件资源状态,考虑预测与健康管理所需数据量大、硬件资源占用多以及预测具有一定提前量、实时性不高等特点,采用机上和地面相结合的技术体系。在机上构建分层级诊断推理体系,成员级诊断模型侧重于物理模型的构建,注重时域、频域特征参数的挖掘提取,系统级和飞机级诊断模型侧重于功能模型的构建,重点采用系统功能关联分析模型及基于维修保障数据驱动的智能诊断方法,实现系统级故障诊断、飞机级故障确认与隔离,最终形成维修信息供地面综合、判断和决策。

(2)自下而上研制,将飞机、系统设计要求逐层、全面贯彻到各成品测试性设计中,作为识别故障的信息源,并采用信息融合和数据驱动等技术,在系统级进行有效信号提取、信息融合、区域推理,飞机级进行故障关联确认、故障存储和传输,为地面PHM系统预测模型算法积累数据,同时支持机载PHM系统设计更改和模型优化(见图5)。

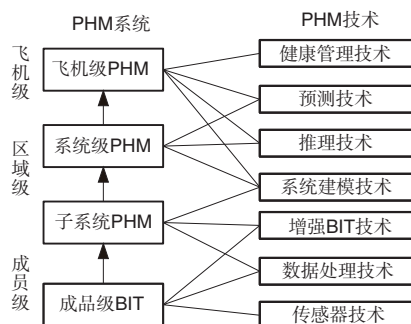


图5 战斗机PHM系统分层级诊断技术体系

Fig.5 Hierarchical diagnosis technology system of fighter aircraft PHM system

3.5 面向外场维护单元的诊断和预测是根本

战斗机全生命周期主要经历设计、制造、试验、使用、维修等阶段,不同阶段责任主体、所针对的对象不完全相同(见图6)。

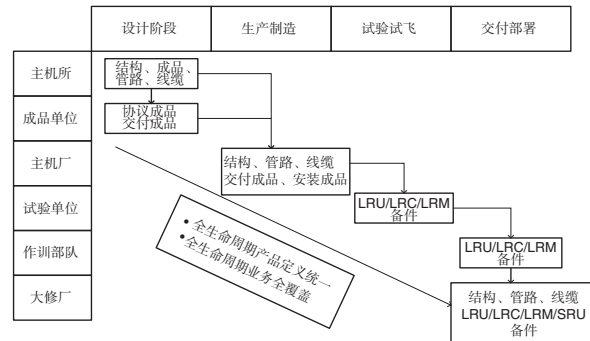


图6 战斗机全生命周期责任主体及对象

Fig.6 Accountability and objects across the whole life cycle of fighter aircraft

PHM系统的研制、使用、升级会涉及战斗机整个全生命周期,系统能力应考虑不同阶段的不同对象,实际上是建立不同类型BOM的对应关联关系。从系统服务的对象及其功能角度出发,系统研制的主要需求应是对外场维护单元的故障准确诊断和隔离,使故障确认后基层级能实施快速维修或更换,而外场维护单元可能覆盖多个系统、多个成品、多个制造工艺环节等。因此,考虑面向基层级维修统筹系统研制,其关键是将完整功能、可整体拆卸和更换、可检测隔离的结构件、成品设备、管路、线缆等基层级维修单元作为PHM系统检测、隔离、预测的对象(见图7)。

故障代码是地勤人员排故的主要依据,代码应精准指示部队地勤人员可快速更换的设备、故障的检测方式、更换

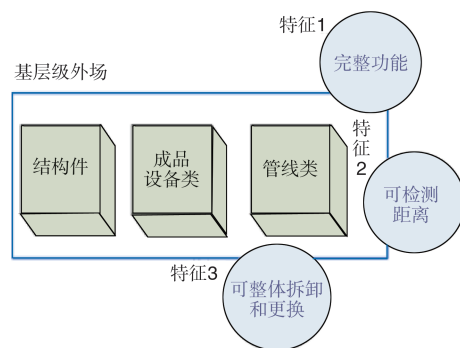


图7 战斗机基层级外场维护单元设计方法

Fig.7 Design approach of organizational-level field maintenance unit for fighter aircraft

的备件等(见图8)。因此,统一的故障代码设计必不可少,其自身包含全机各系统专业的设计逻辑和宝贵经验,向前能够打通故障模式分析和测试性设计,向后可以传递维护所需的信息,驱动高效维修保障,不仅能够满足部队对于精准隔离、快速维修、快速出动的现实诉求,从长期来看,能够降低战斗机全生命周期的保障费用。

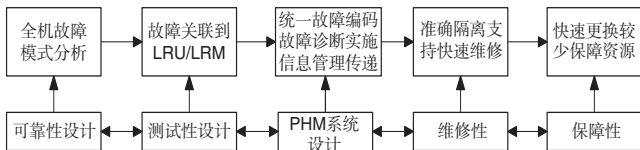


图8 战斗机PHM系统故障代码设计方法
Fig.8 Design approach of PHM system fault code for fighter aircraft

4 PHM技术应用案例与效果

在战斗机典型作战场景下,按照上述PHM系统研制关键环节开展了系统研制,PHM系统与自主保障系统相结合形成了典型使用场景,如图9所示。

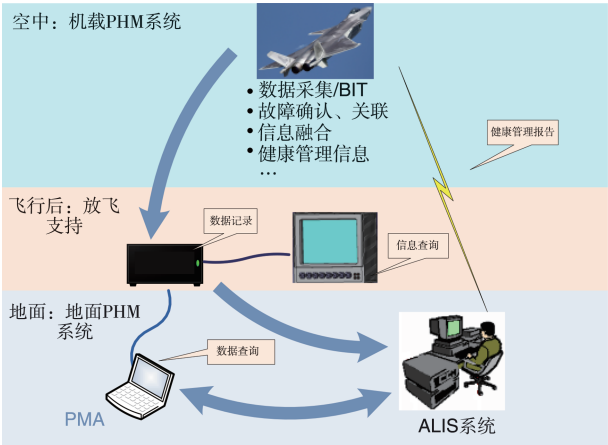


图9 战斗机PHM系统典型使用场景
Fig.9 Typical application scenario of fighter aircraft PHM system

(1) 实时监控状态

实时监控飞机、系统、设备状态,机上原位检测和隔离大部分关键故障,虚警大幅减少,最大限度支持实施正确维修。

(2) 提前触发保障

通过数据链在着陆前将大量的飞机飞行、消耗品和故障数据实时传至地面,如图10所示,触发地面提前制订作战任务计划、开展维修准备和保障资源调度,确保飞机一旦着陆就能根据实际健康状态开展针对性维修和快速出动保障。

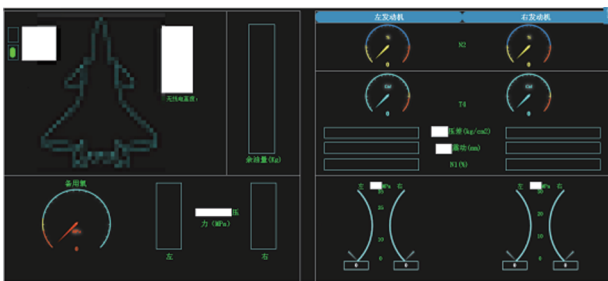


图10 基于PHM的实时健康状态
Fig. 10 Real-time health status based on PHM

(3) 智能放飞决策

飞机地面维修保障人员得到的是PHM系统处理运行的明确结果,实现了快速定位与自动判读。通过故障关联分析,最大程度过滤虚警,基于健康管理代码快速判断飞机状态,按故障影响等级决策放飞,如图11所示。

(4) 故障检测隔离

利用关联信息增强故障诊断和深度定位能力,故障对象直接指向维修单元,地勤人员仅需完成故障件拆卸、更换等简单维修工作。

(5) 基于状态维修

根据健康状态和历史数据预测剩余使用寿命,在功能故障前实施维修。

(6) 机体个性翻修

实现以每架次飞行参数为输入,通过构建的“飞参—载荷”方程、结构损伤评估模型,评估、预测单架飞机机体结构损伤状态,确保根据每架飞机使用履历和结构损伤程度制订个性化的基地级维修计划。

国内某型新机部署效果表明,飞机可用度高、出动速度快、架次多,故障发现及时、定位准确,虚警率低,很大程度上简化了维修方式、提升了保障效能,PHM系统达到了预期的研制目标,验证了PHM系统研制关键环节的正确性。

5 结论与展望

PHM技术具有故障诊断及时准确、故障和剩余寿命可预测、可基于状态安排维修等能力,战斗机独有的维修需求使应用更加迫切,也有利于有效解决战斗机面临的维修时间长、保障费用高等问题,系统研制过程中需重点关注技术转化应用的途径与方法。结合战斗机自身的研制、使用、维修特点,在需求、架构、体系、硬件、软件、对象等方面形成了技术转化与工程应用方法,经国内某型新机PHM系统研制实践表明,本文总结的方法行之有效,能够有效促进其关键技术落地,有助于提升战斗机作战效能。

序号	HMC码	故障名称	发生时间	消失时间	持续时间	故障指示	放飞条件
1			17:08:59.016	---	---	故障图	任务条件放飞
2			15:48:32.121	15:48:32.762	00:00:0.641	故障图	时间条件放飞
3			15:48:20.469	15:50:51.691	00:02:31.223	故障图	不能放飞
4			17:03:41.105	---	---	故障图	不能放飞
5			16:10:3.383	16:10:3.703	00:00:0.320	故障图	时间条件放飞
6			16:13:56.621	16:13:57.301	00:00:0.680	故障图	时间条件放飞
7			16:21:43.848	16:21:44.488	00:00:0.641	故障图	时间条件放飞
8			16:43:24.938	16:43:25.574	00:00:0.637	故障图	时间条件放飞
9			17:08:40.895	---	---	故障图	不能放飞
10			16:27:27.641	16:27:31.160	00:00:3.520	故障图	任务条件放飞
11			16:28:21.922	16:28:24.840	00:00:2.918	故障图	任务条件放飞
12			16:25:51.680	16:25:55.879	00:00:4.199	故障图	任务条件放飞
13			17:08:39.574	---	---	故障图	不能放飞
14			17:08:39.574	---	---	故障图	不能放飞
15			15:50:41.242	15:51:55.512	00:01:12.270	故障图	不能放飞
16			15:50:41.242	15:51:55.512	00:01:12.270	故障图	不能放飞
17			15:48:33.719	15:48:37.285	00:00:3.566	故障图	不能放飞
18			17:08:58.777	---	---	故障图	不能放飞
19			15:59:39.742	16:00:1.105	00:00:21.363	故障图	不能放飞

图 11 基于PHM的智能放飞决策

Fig. 11 Intelligent decision of flight clearance based on PHM

未来空战模式具有智能化、体系化特点,需要在更大范围和程度上综合发挥体系内各作战单元的战力,也需要更加有效及时地实施维修保障。战斗机也会更加智能。为此,战斗机PHM系统将向着适用于体系化、智能化作战需要的方向发展:

(1) 聚焦作战任务能力的综合化健康状态评估

感知并融合利用多源信息,建立硬件、功能与任务能力的关联关系,考虑装备健康状态评估体系作战能力,根据任务能力要求推荐满足条件的装备组合出动执行任务。

(2) 面向体系作战的集群化健康状态管理

挖掘历史使用和维修保障大数据,进行综合化故障与寿命预测,考虑机群健康状态以及体系作战训练任务,适应性调整维修任务,提高体系作战条件下能执行任务的能力。

(3) 适应复杂环境的智能化健康管理技术

应用新一代人工智能技术,使系统外在表现更智能化,提升预测与健康管理精度与广度,提供健康状态结果支持任务与维修决策;使系统自身智能化,自主利用应用过程中不断积累的海量数据进行深度学习,循序渐进增强预测与健康管理能力。

同时,PHM依然是既涉及多学科交叉,又涉及战斗机研制、生产、作战使用、维修的新兴技术。未来PHM技术转化在国内战斗机应用技术取得初步成效的基础上,仍需要继续以型号工程应用为牵引,建立相应的技术体系和研制方法,才能有效提升其整体技术能力并促进关键技术落地应用到型号工程中。

AST

参考文献

[1] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594.
Zhang Baozhen. Development and applications of integrated diagnostics, prognostics and health management technologies of abroad[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(5) : 591-594. (in Chinese)

[2] 于功敬,熊毅,房红征. 健康管理技术综述及卫星应用设想[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 227-232.
Yu Gongjing, Xiong Yi, Fang Hongzheng. Survey of prognostics and health management technology and application idea for satellite[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3) : 227-232. (in Chinese)
[3] 翟梅杰,丛华,冯辅周,等. 装甲车辆PHM系统性能度量指标体系构建[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(2): 53-59.
Zhai Meijie, Cong Hua, Feng Fuzhou, et al. Construction of performance measurement index system for armored vehicle PHM system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(2) : 53-59. (in Chinese)
[4] 裴大铭,王建峰,周鹏太,等. 船舶PHM技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1289-1297.
Pei Daming, Wang Jianfeng, Zhou Pengtai, et al. Survey on PHM technology in marine system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1289-1297. (in Chinese)
[5] MIL-HDBK-338B Electronic reliability design handbook [S]. America: Department of Defense USA, 2012.
[6] 吕琛,马剑,王自力. 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.
Lyu Chen, Ma Jian, Wang Zili. A state of the art review on PHM technology[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 1-4. (in Chinese)
[7] 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, 2005, 26(5): 626-632.
Zeng Shengkui, Michael G P, Wu Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632. (in Chinese)
[8] 张宝珍. 国外预测与健康管理(PHM)技术研发及应用[J]. 国

- 防科技情报,2013(3):1-3.
- Zhang Baozhen. Development and applications of prognostics and health management (PHM) technologies of abroad[J]. Defense Science and Technology Information, 2013(3):1-3. (in Chinese)
- [9] 朱斌,陈龙,强弢,等. 美军F-35 战斗机 PHM 体系结构分析[J]. 计算机测量与控制,2015,23(1):1-7.
- Zhu Bin, Chen Long, Qiang Tao, et al. Analysis on PHM architecture of US F-35 fighter[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(1):1-7. (in Chinese)
- [10] Pecht M. Prognostics and health management of electronics [M]. America: Wiley online Library, 2008.
- [11] 郝晓辉,孙蛟. 美军F-35 预测与健康管理和自主保障信息系统研制进展及启示[J]. 空军装备,2018(5):26-28.
- Hao Xiaohui, Sun Jiao. Development progress and enlightenment of US F-35 prognostics and health management and automatics logistics information system [J]. Air Force Equipment, 2018(5): 26-28. (in Chinese)
- (责任编辑 王昕)

作者简介

王海峰(1964-)男,博士,研究员。主要研究方向:飞行器设计、飞行控制与飞行试验、健康管理与综合保障。

Tel: 028-85509596 E-mail: 611@avic.com

Research on Application of Prognostics and Health Management Technology for Fighter Aircraft

Wang Haifeng*

AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China

Abstract: From the perspective of the development requirements for equipment maintenance & support capabilities and the connotation of prognostics and health management (PHM) technology, the paper analyzes the urgent demands, marked effects and interlinked tradeoff for the PHM application on fighter aircraft based on its unique characteristics in the operation and maintenance modes from other types of military equipment. It reviews the current research status and features of PHM engineering application at home and abroad, and highlights the solutions in five key links during the development process of PHM system on fighter aircraft. They are respectively identification of system requirement, planning & integration of software and hardware, design and upgrade of system architecture, construction of hierarchical diagnosis system, as well as tradeoff determination of functional system objects. Furthermore, the application effects of PHM system development on fighter aircraft are elaborated in light of its application scenarios on a new type of domestic fighter, and thus the future development direction of PHM technology application on fighter aircraft is proposed.

Key Words: fighter aircraft; PHM; engineering application; understanding and reflections; application progress; key links; development effects

Received: 2020-05-15; Revised: 2020-06-01; Accepted: 2020-06-10

Foundation item: National Defense Basic Scientific Research Program of China (JCKY 2016205A004)

*Corresponding author. Tel.: 028-85509596 E-mail: 611@avic.com