

美国故障预测和健康管理技术的军品应用与发展研究

刘 志 李 磊

摘 要 结合故障预测和健康管理技术的发展历程,着重论述了美国 PHM 技术在武器装备系统中的典型应用,并分析了该技术在导弹武器系统中视情维护和改进、改型定量标准中的应用现状与实际意义。

关键词 PHM 导弹武器系统 视情维护 定量标准

引 言

随着高科技的不断发展,航空、航天现代装备的高度集成化、高智能化以及分析处理问题的高效化日益增强,随之而来的系统故障诊断、维修保障和可靠性越发受到企业的高度重视。由于智能电子信息设备的普及应用,后期故障检测和状态管理,不同于以往设备机械故障的简单定期更换措施。而且,武器装备内测试、综合诊断技术的发展也为实现故障自动检测与隔离提供了可能。因此,外军武器装备主要重点由故障维修转变为以信息搜集、处理分析和传输进而做出维修管理决策为主。同时,现代军事强国的装备采办开支和维保

耗费大量资金,在经济环境和技术需求的双重压力下,故障状态预测与健康管理系统(PHM)正在引起各方的青睐和研究。

1 PHM 技术发展应用历程

故障预测与健康管理技术是综合利用现代信息技术、人工智能技术的研究成果而提出的一种管理健康状态的解决方案,PHM 系统主要由六部分构成:数据采集、信息归纳处理、状态监测、健康评估、故障预测决策和保障决策。早期主要集中在航空发动机领域,如 GE 的 F404 发动机、PW 的 F117 发动机等。20 世纪 70 年代中期,PHM 技术应用在 F-18 大黄蜂机队 F404 发动机检测系统,用于大黄蜂战机的发动机监测。当时只有剩余寿命评估、操作极限监控、传感器失效检测、熄火检查,但缺少故障预测功能,是 PHM 的发展雏形。20 世纪 90 年代初期,在 NASA 研究机构内部关注飞行器健康监控(VHM)。而且,从 20 世纪 80 年代后期~90 年代,美国国防

部便提出综合诊断相关概念,并在三军中盛行,陆续在美军新一代武器装备如 M1A2 主战坦克研制中、F-22 和 F-35 战斗机、SSN-21 攻击核潜艇得到采用。同时,美国在研的主力飞机——联合攻击战斗机(JSF)在设计时,也引入了 PHM 技术。在民航应用领域,波音公司也将 PHM 技术延伸研发,形成飞机状态管理(AHM)系统^[2]。

在 F-22 飞行时传输部分数据,落地后采集全部数据。通过计算机插入接口,发送重点部位的测试数据,当时的 PHM 是基于状态检测管理水平。直到 2014 年 9 月,美国 F-35 试用最新版本的自主保障信息系统(ALIS),通过此新版系统,高级管理者能够更好地浏览和管理维修优先问题、失效率和飞行进度安排等事务;也能通过对超出预期的失效率分析,探讨是否需要飞机及其部件的设计进行修改。在该项目上,PHM 又得到了长足的发展,基本具有了实时分析与故障预测功能。2015 年 7

本文 2016-05-08 收到,刘志、李磊分别系北京海鹰科技情报研究所工程师

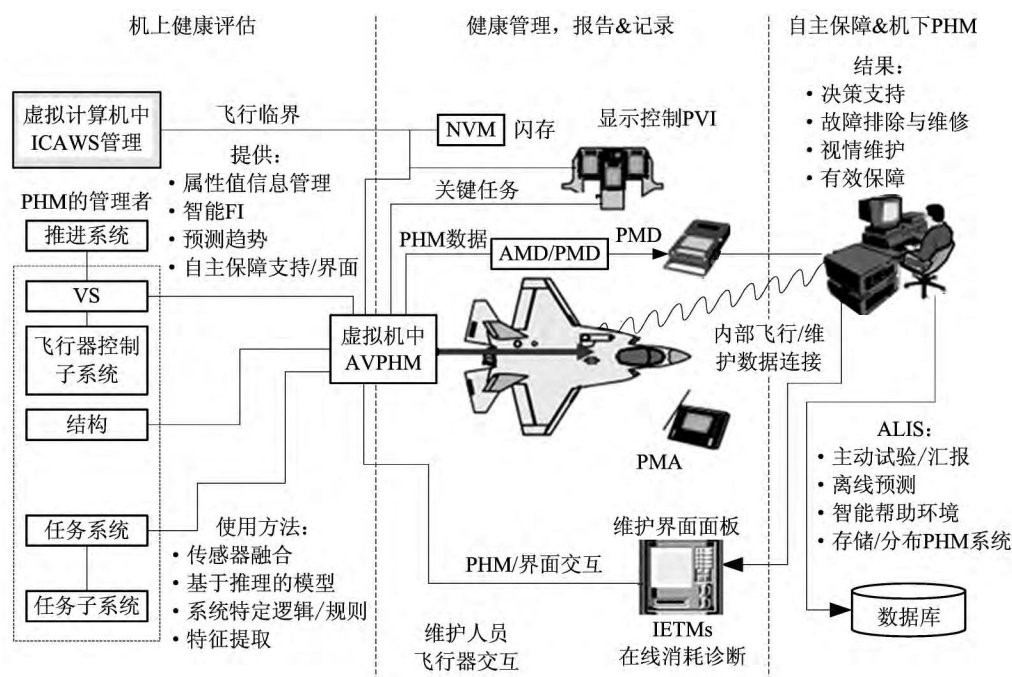


图1 F-35 PHM系统框架和所用技术

月，NASA 和美国空军研究实验室 (AFRL) 以及联邦航空管理局 (FAA) 测试全新的发动机健康监测系统。2015 年 8 月，美国国家标准与技术研究院 (NIST) 发布《用于智能制造系统的故障预测与健康测量科学路线图》，旨在维系高效的无故障制造生产、助力装备综合效率达到峰值，实现全时段满负荷废品的监控状态。PHM 技术发展至今，大致由外部测试到机内测试，进而实现监控、诊断、预测三个维度的技术学科，随着产品智能化全周期寿命要求，成为现在的预测和健康健康管理技术。

2 美国 PHM 技术的典型应用

美国是 PHM 技术的提出者，并最先运用到军事领域研究。而后，各军兵种和国防部随着故障飞航导弹 2016 年第 9 期

监测和维修技术的快速发展，PHM 技术已成为国防部采购武器装备系统的一项必备要求。PHM 技术在美国国家航空航天局和美国国防部的支持下不断发展和成熟起来，比较典型的两个代表就是 NASA、波音、霍尼韦尔等提出的运载器综合健康管理和洛马公司在联合战斗机项目中提出的预测与健康健康管理。值得说的是，美国国防部由于 PHM 技术在 F-35 联合战机上的应用，维修人员减少 20% ~ 40%，保障规模减少 50%，出动架次提高 25%，保障费用减少 30%。

2.1 PHM 技术在典型研究型项目——JSF 计划 F-35 中的应用

美空军 F-35 飞机的 PHM 系统包括机载智能实时监控系统和地面飞机综合管理系统两大部分。目前公认美军是基于状态监

控和维修保障的顶级水平^[4]。F-35 飞机的 PHM 系统采用了分层智能推理结构，并且飞机级、区域级、成员级都有逻辑推理设备。

军机的 PHM 系统都安装了专用传感器，通过优化设计，实现用最少的传感器实现所要求。成员级的自身监测信息和飞机状态参数，通过诊断分析，把相关信息传达给区域级。区域级管理器包括推进系统、机构、任务系统、机电系统、航电系统，区域管理软件驻留在综合处理机 (ICP) 中，各区域管理器具有信号处理、信息传输交互和区域推理功能，持续不断监测飞机相应分系统运行状态。最终部分的区域故障信息，传达给飞机管理器，实现各区域故障信息的关联性逻辑分析，实现故障诊断，并

做出隔离处理。然后,再把飞机的整体健康信息和维修需求信息传达地面联合分布式信息系统,及时做出飞机状态信息、技术状态管理,调整任务安排,实时掌握整个集群的运维状态。F-35 飞机的 PHM 系统框架如图 1 所示。

2.2 PHM 技术在导弹系统保障中的典型应用

2.2.1 PHM 技术在导弹智能检测方面的应用研究

1) 用于海麻雀导弹的 RFID 系统

自 2011 年 3 月起,为了降低海麻雀导弹的维修成本,北约的海麻雀项目办公室(NSPO)启动改进的海麻雀导弹(Evolved Sea Sparrow Missile, ESSM)健康监测项目,旨在通过使用 RFID 系统来监测 ESSM 的温度、湿度、震动、撞击等数据,对导弹进行监测,提高导弹的可靠性,以及武器系统的准确性。该项目由 ODIN 公司负责完成,2012 年 1 月,首枚安装了 RFID 的导弹离开了安装工厂,运往预定目的地。

该系统主要使用的这个系统由主动式标签和传感器组成。使用 RFID 系统之后,当海麻雀导弹的温度、湿度、震动、撞击超过预定的门限值时,RFID 和传感器将发出导弹需要维修的信号。

通过使用 RFID 技术在极大地节约维修成本的同时,可以确保导弹存在健康隐患时及时地得到维修。目前,北约的导弹每年都需要进行维修,平均每枚导弹的维修价格为 10 万美元。正常



图2 CCHM 安装在阿帕奇直升机携带的海尔法 II 导弹上

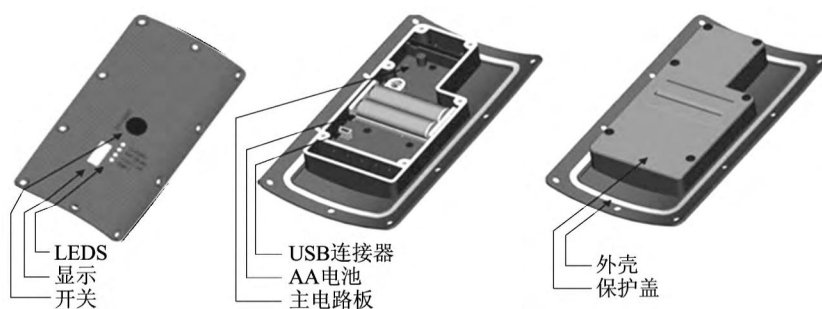


图3 CCHM 模型示意图

情况下,导弹在此期间都是正常运转的,不需要进行维修。通过安装 RFID 来测量环境因素,如温度、震动、湿度和空气咸度,可以将定期维修时间拖到 24 ~ 30 个月进行一次。同时利用 RFID 技术,将导弹的失败率每降低一个百分点,政府可以节约 1 000 万美金。

2) 挂飞健康监测系统(CCHM)

美国空军于 21 世纪初期开始研制用于海尔法 II 导弹的挂飞健康监测系统。该系统目前主要用于监测、记录海尔法 II 导弹在阿帕奇 AH-64D 直升机上的挂飞情况,图 2 为 CCHM 安装在阿帕奇直升机携带的海尔法 II 导

弹上。

系统主要由振动传感器、磁传感器、温度传感器、计时器、微控制器、主电路板、USB 接口、电池、LED 显示屏组成。图 3 为 CCHM 系统示意图。

通过使用 CCHM 系统,可以对造成损伤的环境因素进行自动监测和记录,并为地面上的检测人员提供检查依据,可以显著地降低地勤人员和导弹维修人员的工作量,以及提高维修工作的准确性。

3) 提高导弹使用管理决策支持能力系统(LCMEM)

早期战斧巡航导弹系统缺乏足够的手段对导弹所处环境做出实时监控管理,并由于使用前对

飞航导弹 2016 年第 9 期

状态不明确，发生过几次意外事件，导致装备维修和工程分析、抽样检测费用达到数以亿美元计，事故代价惨重。但美国海军采用了 Midé 公司研制的低成本导弹环境检测系统（LCMEM）解决了此问题。LCMEM 是综合集成系统，包括 Midé 公司开发的子系统、部件和软件，以及一些现成的商用部件，该系统便于安装及与其它配套用户系统对接。

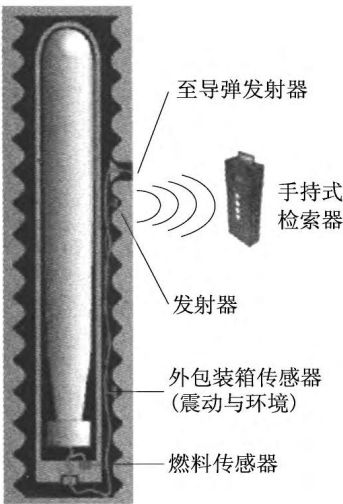


图4 LCMEM 系统原理示意图

该系统的组件中包括气候传感器、数据采集卡、冲击事件记录仪。其中数据通过红外传输方式发送给手持检索器，并以串行数据形式下载给计算机数据库。

如针对战斧导弹燃料泄漏情况，LCMEM 系统自带一个基于现有商用液体传感器的燃料传感器装置，它利用传输线通过装运箱和发射器直接连接到武器控制系统。装运箱在出厂前便已将 LCMEM 与内装运箱 (Mk10) 和外飞航导弹 2016 年第 9 期

表1 LCMEM 系统应用

导弹	装运箱★	发射箱★★	指挥部门	项目代码
战斧全备导弹	Mk14	Mk41 VLS (水面) 以及 CLS (潜艇)	NAVAIR NAVSEA	IMA 280 PMS 422
标准导弹 (SM2, SM3)	Mk13	Mk41 VLS	NAVSEA	PMS 422
海麻雀 (ESSM)	Mk21 Mk25	Mk41 VLS	NAVSEA	PMS 471
拉斯姆增强型 垂直发射 阿拉斯克 (VLA)	待定 Mk15	Mk41 VLS Mk41 VLS	NAVAIR -	IMA 258 -

★只包括用于垂直发射系统的装运箱，全部由联合防御公司 (United Defense Industries) 生产。

★★表中所列导弹有些也使用其它型号发射系统。

装运箱 (Mk14) 集成在一起。外部装运箱装置利用电池供电，通常在导弹保养周期内一般无需更换电池，结合数据记录器会完成重要的状态信息。所有数据采样的周期频次可由技术人员根据实际需求及时调整。将 LCMEM 与全装导弹进行集成时需要全装导弹稍微进行一些改动，包括：

1) 将燃料传感器装置嵌入内装运箱 (Mk10) 的地板上；

2) 调整外装运箱 (Mk14) 的数据传输线；

3) 对外装运箱进行改动，使之可以附加发射器和外部装运箱装置。

LCMEM 系统还用于与战斧全装导弹 (AUR) 类似的运输、存储和垂直发射方式的导弹中，如表 1 所示。

2.2.2 PHM 技术在导弹智能诊断系统中应用研究

为了实现对导弹武器系统的智能检测与诊断，美国陆军自 20 世纪 90 年代初开始设计一种用来检测导弹存储和运输环境的系统——遥测战备器材预测/诊断

系统 (RRAPDS)。该系统将温度、湿度、振动传感器整合在导弹内部来监测、诊断、预测、分析长时间库存的导弹的健康状况，其目的是减少导弹武器及其发射平台等维修保养、供给、运输和存储等相关的费用。

该系统主要由三轴 MEMS 加速度计、微处理器、电池、状态请求开关以及状态显示屏组成。目前，美国陆军设计的 RRAPDS 可以对常态环境下的温度、大气压力、湿度和激烈的振动等参数进行感知，测试人员可以通过遥测的方式获取有用的信息，并将信息发送到相关通讯网^[8]。在后续研究中，美国陆军还将增加可以对腐蚀性进行检测的传感器包，用来预测导弹武器系统关键元件老化情况，并将在导弹武器系统内部集成基于人工智能的实时诊断和预测工具。同时，还将为系统增加固体连接可靠性监测、推进器寿命监测功能等。

目前，该系统已被成功地应用在爱国者地空导弹 (GEM 和

PAC-3), 以及陶氏反坦克导弹中。

3 PHM 技术对导弹武器系统影响分析

3.1 PHM 技术应用在导弹武器维护中的状况分析

目前,在武器装备领域,军用飞行器方面的 PHM 技术相对成熟,PHM 技术在导弹方面的应用,一定程度上是借鉴飞机的有关研究,尤其是导弹健康状态预测方面。但导弹作为一种非持续任务领域中的典型装备,与飞机有很大不同:1) 导弹属于“长期贮存,一次发射使用”装备,在寿命周期大部分处于贮存状态,多为偶发故障、故障规律难以掌握;2) 导弹在构造和工艺等方面与飞机有较大的差异,导弹的机内测试技术尚不完善,导弹一旦出厂,就难以向其内部安装数据传感器,无法进行密集的数据采集,导弹与飞机的易故障部位不同,无法借鉴故障的模式和数据。这导致目前导弹的 PHM 技术在健康状态预测方面缺乏充足建模数据和预测性能评价体系。

3.2 PHM 技术对导弹武器系统维护影响分析

1) 基于 PHM 技术实现导弹的视情维护

在信息化作战形势下,要求装备保障快速、精确、可视、集成、经济等。导弹的战备完好性与应急反应速度在现代战争中可直接导致局部战术或战役,甚至战略的成败,从而影响全局战争的发展。导弹装备是多种技术的综合应用产品,涉及到机械、电子、计算机、自动控制、信息处

理等,组成复杂,系统性强,一个关键元器件或部件发生故障会导致整个武器系统不能工作,且导弹部分时间处在运输、贮存、装卸、战斗值班等状态。在复杂多变的环境下任何环节都有可能

导致导弹的性能退化。维修保障,需要用数据说明,长期深入到本身的实际(物理层面)状况,才能达到导弹战备的完好状态。结合失效物理模型的 PHM 技术有效解决了从前导弹维修体制(定期抽检和维护)的强度大、急值班效率低等不足。

PHM 技术对导弹当前的状态实时描述,下一时段情况监测和运行故障预警,进而实现导弹的后续视情维修。由此降低维保费用、把灾难性故障风险降到最低,最大可能地减少装备故障的发射,使装备发挥最大的作战效能。

2) PHM 技术提供了导弹改进/改型可靠性定量标准

利用 PHM 技术中所采集到的大量历史载荷数据,提取有效的贮存期信息,对于开展型号可靠性工程活动具有较大的实际价值。主要体现在:a) 综合论证阶段,PHM 技术通过对相似现役装备状态监控,对现有装备进行使用可靠性评定,并参与确定新装备具体的可靠性定量分配要求;b) 方案设计阶段,PHM 技术立足故障物理的研究,以预测手段支撑可靠性预测工作;c) 使用退役阶段,PHM 技术实时监测数据辅助指导维修计划和备件,这也是 PHM 技术的健康评估功能,依据各种历史全套健康数据

提供改进/改型可靠性定量标准依据。

4 结束语

从目前的情况看,PHM 在一定程度上代表了 21 世纪装备保障的发展方向。PHM 技术在飞机、发动机等领域发展相对成熟,在导弹维护中还处于初级发展阶段,但随着物联网、云端测试等信息技术的不断发展,PHM 技术在导弹系统故障预测和健康管理中的应用将提升导弹的战备完好率,提高军队的快速响应能力,提高导弹使用管理决策科学预判能力,提高一线作战军种对武器装备的宏观掌握能力。同时为我国军工企业导弹数字化智能制造平台建设发展提供借鉴与思考。

参考文献

- [1] 朱斌,陈龙,强弢,等. 美军 F-35 战斗机 PHM 体系结构分析. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1)
- [2] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: potential impact on aging aircraft problems. Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2002 (6)
- [3] Dickson B, Cronkhite J, Bielefeld S, et al. Feasibility study of a rotorcraft health and usage monitoring system (HUMS). NASA Report, 1996
- [4] Jacek S Stecki. The PHM technology-risk minimization. Air Force Institute of Technology, 2011
- [5] 丛林虎,徐廷学,卜祝涛. 基于故障数据的导弹突发故障预测方法. 战术导弹技术, 2014 (2)

飞航导弹 2016 年第 9 期