

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.021

# PHM 技术在综合航空电子系统中的应用

吴明辉, 许爱强, 戴豪民

(海军航空工程学院, 山东 烟台 2640001)

**摘要:** 为了提高综合航空电子的可靠性、可用性以及寿命周期内的经济可承受性, 将故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 技术应用到该系统中。分析 PHM 技术的目标和优势, 构建基于 OSA-CBM 的综合航电 PHM 系统的框架结构, 从可预测性设计、故障预测技术和健康管理技术 3 个方面, 阐述构建综合航电 PHM 系统的支撑技术。该研究对综合航电 PHM 系统的应用和开发具有重要意义。

**关键词:** PHM; 综合航电系统; 可预测性; 故障预测; 健康管理

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Application of PHM Technic in Integrated Avionics Electronic System

Wu Minghui, Xu Aiqiang, Dai Haomin

(Naval Aeronautic Engineering Institute, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To improve the reliability, availability, and life cycle economy receptivity, prognostics and health management (PHM) technology was applied to the integrated avionics system. Firstly, the objectives and advantages of PHM system were analyzed. And then, based on the OSA-CBM, the system architecture of the PHM system was designed for integrated avionics system. At last, the supporting technology of building the PHM system for integrated avionics were presented, from the technology of prognostic capability design, fault prognostics and health management. The paper has important significance for applying and developing a PHM system for the integrated avionics.

**Key words:** PHM; integrated avionics system; prognostic capability; fault prognostics; health management

### 0 引言

综合航空电子 (integrated avionics, IA) 系统是现代作战飞机完成通信、导航与识别 (communication navigation identification, CNI), 探测与对抗, 控制与管理等任务的先进电子装备的集成平台<sup>[1]</sup>。随着信息技术的推动和信息条件下作战需求的牵引, 综合航空电子系统的作用与地位日益突出, 在飞机结构组成和费用成本中所占的比重越来越大, 目前, 航空电子设备占战斗机出厂成本的 40% 以上, 占预警、侦查和电子对抗等专用飞机成本的 50% 以上<sup>[2]</sup>。另外, 综合航电系统支持飞机飞行和作战等每项任务的执行, 其出现故障的风险和所造成的损失越来越大, 为保证其可用性所要付出的保障费用也越来越高; 因此, 在追求综合航电系统高性能的同时, 研究如何提高其可靠性、可用性以及寿命周期内的经济可承受性尤为紧迫和重要。

故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 是联合攻击机 (joint strike fighter, JSF) 自主式后勤 (autonomic logistics, AL) 保障系统的关键使能技术, 是 JSF 项目实现生存性、

可维护性和经济可承受性目标的支撑技术<sup>[3]</sup>。故障预测, 即预计性诊断部件或系统完成其功能的状态, 包括确定部件的残余寿命或正常工作的时间长度; 健康管理是指根据诊断/预测信息、可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策的能力。PHM 技术的实现将使原来由事件主导的反应性维修 (事后维修) 以及与时间相关的预防性维修 (定期维修) 被基于状态的维修 (condition-based maintenance, CBM), 即视情维修所取代。PHM 技术可以在准确的时间对准确的部件进行准确的维修, 有效提高产品的可用性, 减少保障费用; 因此, 笔者以 PHM 为技术手段, 以提高综合航电系统的可靠性、可用性、安全性、经济可承受性为目标, 开展 PHM 技术在综合航电系统中的应用研究。

### 1 PHM 目标及优势分析

自 20 世纪末, 美军在 JSF 计划中提出 PHM 技术, 其发展经历了故障诊断、故障预测、系统集成 3 个日益完善的阶段, 在部件级和系统级 2 个层次, 在机械产品和电子产品 2 个领域经历了不同的发展历程<sup>[4]</sup>。PHM 技术是实现 JSF 综合保障研究计划的

收稿日期: 2012-10-18; 修回日期: 2012-11-19

作者简介: 吴明辉 (1981—), 男, 山东人, 在读博士, 从事航空电子装备故障预测及健康管理研究。

关键技术之一,能够显著提高飞机安全性和可用性,降低维修、使用和保障费用,实现大型复杂系统保障的“经济可承受性”目标。

PHM 作为一种技术手段将植入到装备的研制、生产、试验、使用、维护、保障、报废等全寿命周期活动中,作为装备及其保障装备的“桥接”技术,在提高装备系统的安全性、可靠性、维修性、保障性、测试性以及经济性等方面展现出独具特色的优势<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。

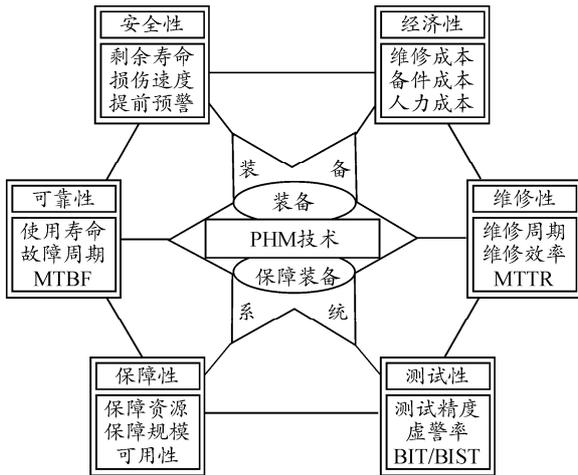


图 1 PHM 技术的优势分析

1) 安全性。

传统的故障诊断,只能在故障发生后才能被识别,而 PHM 能够预知组件或子系统的早期故障,并在这些故障发展为系统级、灾难性故障之前提前预警,提供采取有效措施的时间,提升系统安全性。PHM 技术通过采用不同的预测方法,针对不同的预测需求,提供包括剩余有用寿命 (remain usage life, RUL)、故障率、损伤速度和损伤趋势等不同的预测结果。图 2 为累计损伤预测的一个示例,可以获取 RUL、损伤速度及趋势等预测信息。提前故障预警是 PHM 的主要优势之一。

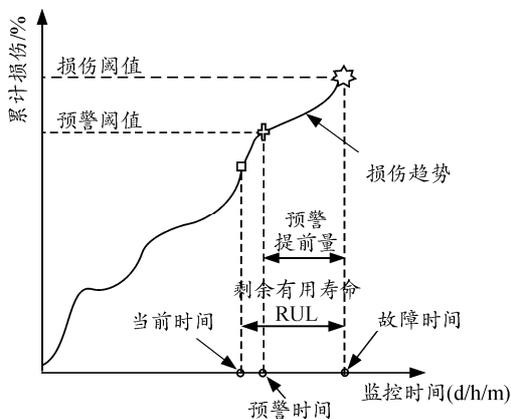


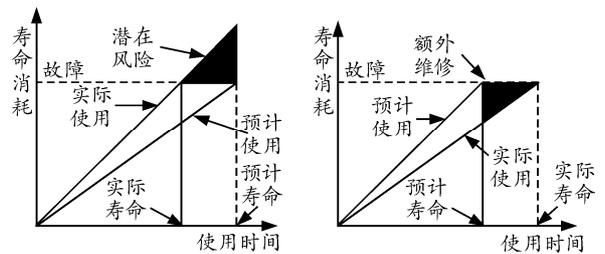
图 2 累计损伤预测

2) 可靠性。

科学的设计和有效的生产过程控制可以使系统获得较高的基本可靠性。但对于作战飞机所面临的恶劣的飞行条件和环境,不能确保其始终具有较高的任务可靠性。PHM 技术可以通过先进传感器对影响系统实际寿命消耗的环境和运行载荷(温度、振动、湿度、电压等)进行实时监控,采取积极主动的控制措施,延长使用寿命和故障周期,提高总体可靠性。

3) 维修性。

传统的事后维修,避免不了故障风险,较为被动。定期维修,虽有一定的主动性,但其对产品可靠性和运行条件预计不足,难免造成潜在风险(维修周期内出现故障)或额外维修(周期维修时无故障)情况的发生,如图 3 所示。PHM 技术可促成 CBM 的发展,通过预测及管理使维修更为主动且有针对性,可最大限度的减少计划外维修,消除冗余检查,延长维修周期,提高维修效率,降低维修成本。



(a) 高于预计的使用 (b) 低于预计的使用

图 3 定期维修产生的潜在风险与额外维修

4) 保障性。

传统观念认为,电子系统故障无法被预测,只能在出现故障后加以处理,这导致了庞大的航空保障规模,包括大量分散的备件库,复杂的检查维护设备,大规模的保障人员以及其他保障资源。PHM 技术通过联合分布式信息系统 (joint distributed information system, JDIS) 与 AL 保障系统较链,可综合管理保障活动,优化保障资源,精简保障规模。

5) 测试性。

传统航电产品采用机内测试 (built-in test, BIT) 来进行故障诊断,但由于对实际故障模型及产品运行和环境条件知识不足,致使“故障不能复现”(can not duplicate, CND) 和“重测合格”(re-test OK, RTOK) 等原因造成虚警率居高不下。PHM 技术支持实时监控,通过多传感器系统对系统本身及实际运行环境和条件进行实时信息收集,再通过准确的预测模型解决这些问题,降低虚警率。

6) 经济性。

“经济可承受性”是开展 PHM 技术研究的首要目标。通过以上分析可知, PHM 技术在降低常规检查成本、备品备件成本、维护规模成本、系统非必要停机成本、维护人力成本以及充分利用产品寿命等方面具有巨大的经济优势。

2 综合航电 PHM 系统结构

随着 PHM 技术的深入发展, PHM 技术以不同的形式在直升机 (health and usage monitoring system, HUMS)、无人机 (unmanned aircraft vehicle health management, UAVHM)、战斗机 (prognostics and health management, PHM) 以及航天器 (integrated vehicle health management, IVHM) 等不同的系统平台, 在机载电源、发动机、GPS 等不同的分系统得到广泛应用<sup>[6]</sup>。PHM 在不同领域应用的过程中, 虽然所采用的具体技术方法不同, 但其基本设计思想和系统结构相似。为实现系统的标准框架, 使得不同厂家开发的产品相互兼容, 美国海军资助波音等多家知名公司制定了基于状态维护的开放式系统架构 OSA-CBM<sup>[7]</sup>。笔者借鉴 OSA-CBM 优势与特点, 构建综合航电产品的 PHM 系统结构如图 4 所示。

综合航电 PHM 系统由不同层次的功能模块组成。数据采集传输层通过传感器的优化布局采集系统所需的各种参数数据, 并以无线或有线的方 式传送到数据预处理层; 数据预处理层对采集到的数据进行去噪、挖掘和融合处理, 为后续应用提供可用数据; 状态检测层根据任务需求和装备状态实时监控装备状态, 并提供状态指示和异常报警; 健康评估层根据输入的状态信息诊断故障部位, 结合历史数据及知识信息评估装备的健康状况; 故障预测层采用智能预测模型对关键部件的剩余有用寿命、累计损伤趋势等进行预测; 健康管理层结合各种数据库信息及健康评估和故障预测信息规划装备的维修策略, 优化备品备件等资源的管理与调度。接口部分主要用于系统内部各模块之间的信息传递, 完成人-机交互功能以及与更高系统的交联。

综合航电 PHM 系统采用开放性、分布式、模块化的系统结构。模块化的组成方式, 便于系统的集成和新技术和方法的引入; 开放性系统结构, 便于系统的更新, 便于与飞机的其他系统集成构成更高层次的 PHM 系统, 便于与自主式保障系统交联提高整体保障效能。

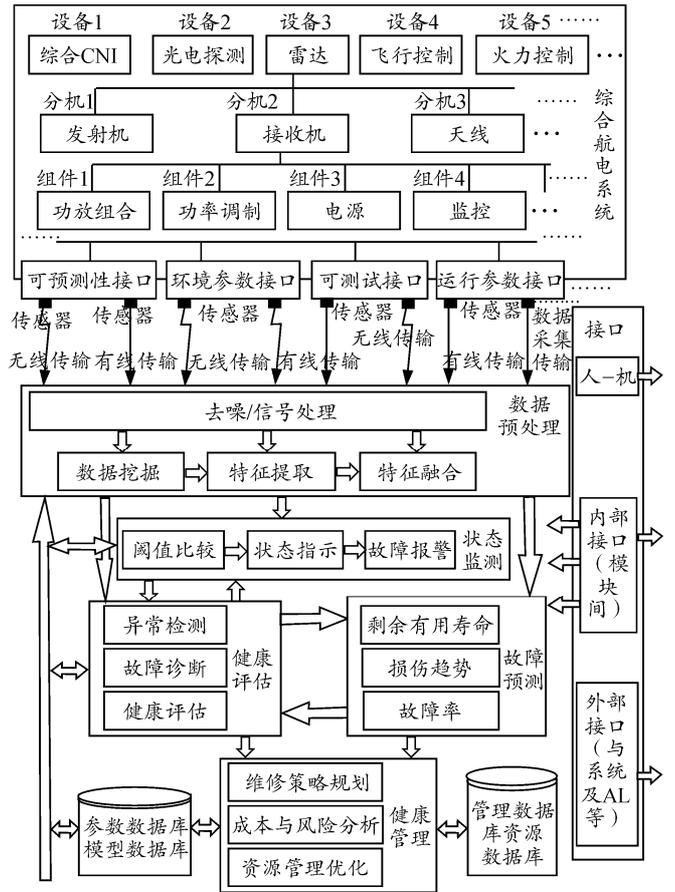


图 4 基于 OSA-CBM 的综合航电产品 PHM 系统结构

3 综合航电 PHM 系统支撑技术

由于综合航电产品的结构复杂、总类繁多, 且目前对电子系统故障预兆的知识有限, 因此, 要实现航电产品的 PHM 系统, 在顶层设计上要采用并行工程等系统工程的思想, 在产品 设计之初同步设计 PHM 系统, 使产品本身具有可预测性, 然后采用基于物理失效或基于数据驱动等预测技术和方法, 实现产品的故障预测, 最后将预测信息输入到健康管理系统中, 对产品及系统进行经济、快速、有效的维修保障等健康管理活动, 实现提高整个综合航电系统的可用性和经济性等目标。

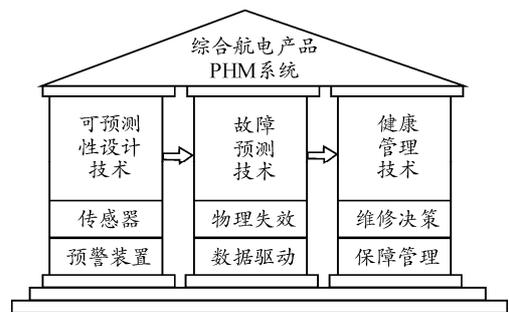


图 5 综合航电产品 PHM 系统的支撑技术

因此, 以可预测性设计技术为起点, 以故障预

测技术为途径, 以健康管理技术为落脚点构成实现综合航电产品 PHM 系统的支撑技术, 如图 5 所示。

### 3.1 可预测性设计技术

PHM 技术在机械领域的应用已逐步走向成熟, 这一方面归功于机械产品故障模式多为渐进式故障, 故障机理相对容易掌握; 另一方面是因为机械产品的状态监控比较容易实现。而 PHM 技术在电子产品应用过程中却遭遇到了瓶颈, 采用与机械产品相似的 PHM 技术很难达到预期的目的, 实际需求与具体应用之间矛盾重重。造成这样的局面, 有对电子产品故障机理认知不足方面的原因, 但更主要的原因是很多电子产品本身不具备支持 PHM 技术的能力; 因此, 为提高电子产品的可预测性, 采用并行工程的思想, 在其设计之初就同步考虑其可预测性设计成为目前 PHM 技术在电子领域应用过程中迫切需要研究的一个问题。

#### 3.1.1 预警装置设计技术

预警装置又称为故障标尺<sup>[8]</sup>, 其作用类似于保险丝。预警装置的结构及运行环境与实际产品相似, 但不完全一样, 通过增大预警装置所承受的应力或降低其本身应力承受能力等方式, 使预警装置比实际产品更快发生故障, 从而提供预警功能。预警装置预警功能的实现如图 6 所示, 可对预警装置进行校准, 以提供充足的故障预警时间, 还可设置多个预警装置, 提供不同程度的预警。

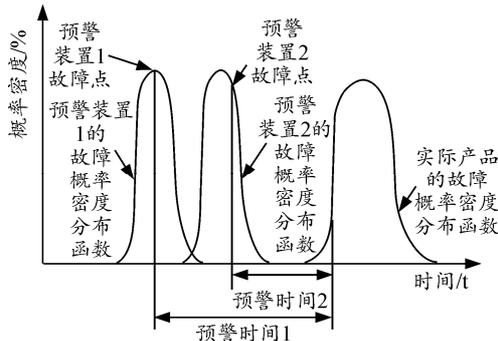


图 6 故障预警装置预警功能实现示意图

#### 3.1.2 传感器系统的选择与设计

具备对环境及运行载荷等数据的有效收集能力是实现 PHM 系统的先决条件。综合航电产品 PHM 系统所涉及的环境及运行载荷包括热学、电学、力学、光学等众多学科门类。为有效获取所需的监控参数, 必须在电子产品设计之初同步考虑其传感器系统的选择与设计<sup>[9]</sup>。

随着微机电系统 (micro-electro-mechanical

systems, MEMS) 及智能材料技术的成熟, 传感器技术正朝着微型化、多参监控、超低功耗、无线网络及智能数据处理方向发展, 为综合航电 PHM 系统数据采集平台的搭建创作了有利条件。

除了设计预警装置及传感器系统之外, 通过其他有针对性的可预测性技术手段也可提高电子产品的可预测性, 例如, 美国锐拓公司针对 FPGA 芯片与 PCB 的焊接实效问题, 在芯片的焊点之间增加电容, 通过对该电容的监控, 对焊点断裂进行预测。

### 3.2 故障预测技术

故障预测技术是实现 PHM 系统的核心技术之一。目前, 在电子产品 PHM 系统中应用比较广泛的故障预测技术包括基于物理失效 (physics-of-failure, PoF) 故障预测技术<sup>[10-11]</sup>, 基于数据驱动 (data-driven, DD) 故障预测技术以及基于两者融合的故障预测技术。

#### 3.2.1 基于 PoF 的故障预测技术

基于 PoF 的预测建立在对产品失效机理的认知和生命周期载荷监控的基础上, 基于 PoF 故障预测技术的通用流程如图 7 所示。

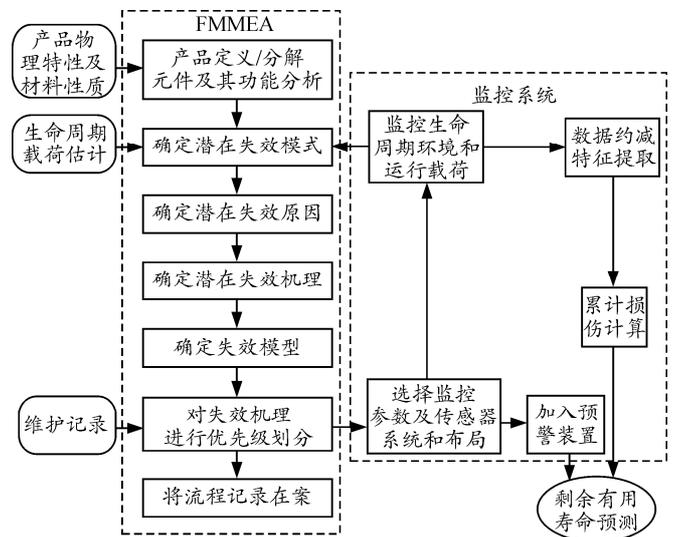


图 7 基于 PoF 故障预测流程

故障模式、机理和影响分析 (failure modes, mechanisms and effects analysis, FMMEA) 是由马里兰州大学 CALCE 开发的一种系统化方法, 可确定产品所有潜在故障模式中的潜在故障机理及模型, 并对故障机理进行优先级划分。故障机理是潜在失效位置上载荷变化的影响函数, 也可理解为诱发故障源的原因。

FMMEA 能够克服传统故障模式、影响分析

(failure modes and effects analysis, FMEA) 和故障模式、影响及危害性分析 (failure mode, effects and criticality analysis, FMECA) 流程中的缺陷。FMMEA 与传感器数据结合, 能够实时识别产品与预期正常状态的偏离或降级程度, 并可预测产品的剩余有用寿命或累计损伤程度。

### 3.2.2 基于 DD 的故障预测技术

基于 DD 的故障预测技术从可用的历史数据和状态数据出发, 以数理统计和概率论为基础, 通过机器学习的方法对数据进行分类/聚类、回归或排序, 使原始数据转换成有用信息, 实现对系统未来状态的预测。DD 故障预测方法可分为统计方法和机器学习方法

统计方法主要针对数据信息直接可用的情况, 包括参数方法和非参数方法。参数统计方法是假设数据适合某种类型的分布(如威布尔分布等), 然后根据给定的数据计算出该分布的某些参数方法; 参数统计方法包括似然比检验、极大似然估计、最大后验估计、预期最大化等。非参数统计方法针对数据分布信息未知的情况, 主要包括基于最临近的分类, 核密度估计、K-S(kolmogorov-smirnov) 检验等。

在原始数据信息很难直接利用的情况下, 通过机器学习方法对原始数据进行约减、提取、分类/聚类, 实现健康等级预测。根据分类结构是否已知, 机器学习可分为监督类学习和非监督类学习。监督类学习是指分类结构已知的情况下, 将输入数据进行分类指定的方法, 主要包括线型判别法、神经网络、支持向量机、隐马尔科夫、朴素贝叶斯分类器等。非监督类学习是指没有预定义类别, 通过算法对数据进行聚类, 并对聚类进行描述的方法, 主要包括主成份分析、独立成份分析、粒子滤波等。

### 3.2.3 基于融合的故障预测技术

基于 PoF 的故障预测技术和基于 DD 的故障预测技术各有所长, 也同时都存在着各自的局限性。PoF 对于存在交互的故障机理缺乏有效的预测手段, 而 DD 对于缺乏完整历史数据的产品, 难以完成预测任务; 因此, 结合 PoF 和 DD 进行融合的方法成为一种更为有效的手段。融合故障预测方法的流程如图 8 所示。

通过 2 种方法的融合, 可以克服采用单独某种方法的局限性, DD 方法能够提供较好的诊断功能, 而 PoF 方法有助于确定故障根源, 并提供系统参数的阈值, 利用各自的优势可以更好地实现 PHM 系

统的预测功能。

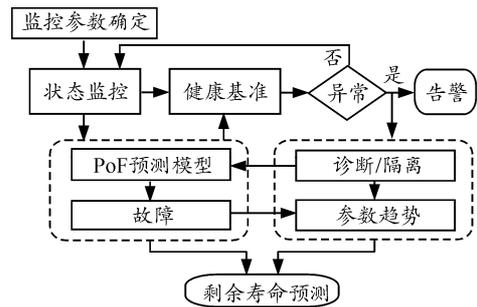


图 8 基于融合故障预测流程

### 3.3 健康管理技术

健康管理技术是 PHM 系统平衡任务可用性和经济可承受性的关键一环, 如图 9 所示。

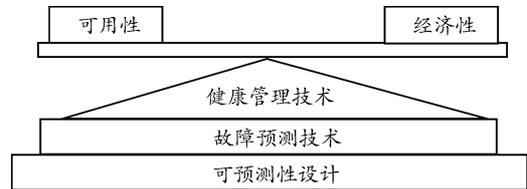


图 9 健康管理技术平衡作用示意图

利用 PHM 系统的预测信息结合任务需求, 在提高系统可用度的同时降低保障费用是健康管理的主要任务。健康管理应包括信息管理、维修决策及资源管理等。

信息管理是通过信息管理技术对 PHM 系统的数据、模型、资源和维修等信息进行有效管理。通过信息管理系统管理装备状态信息, 积累装备历史信息, 管理系统资源, 为 PHM 系统有效进行健康管理提供决策依据。

维修决策是指根据装备的健康状态、任务需求、维修资源和历史信息等条件, 对装备的维修方式、维修类型、维修时机等作出科学合理的决策, 最大程度地满足装备可用度需求和经济可承受目标。维修决策技术以决策论为基础, 常用的方法有多属性决策、比例危险模型等。

资源管理主要是指利用 PHM 系统健康评估及预测信息, 结合资源信息和维修决策需求, 动态规划保障装备、备品备件等资源, 满足平时和战时任务需求的同时, 精简保障资源规模, 降低资源配置投入, 节约保障成本。其中备品备件的配置和管理是资源管理的重点内容。

健康管理中的“健康”应包含 2 个层次的内容: 一是通过管理保持装备的健康状态, 即实现可用性的目标; 二是管理本身应是“健康”、科学和可持续的, 综合考虑任务需求和经济成本, 提高装备保障

的经济性目标。

### 4 结束语

PHM 技术在机械领域中的应用方兴未艾, 而在电子领域中的应用却刚刚起步。笔者建立了综合航电系统 PHM 系统的框架结构, 研究了实现 PHM 系统的支撑技术。该研究对综合航电 PHM 系统的开发与实现具有一定的意义。

### 参考文献:

[1] 熊华刚, 王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 16-92.  
 [2] 霍曼. 飞速发展的航空电子[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007: 8-32.  
 [3] Hess. Andrew, Calvello. G, Dabney. T. PHM a Key Enabler for the JSF Autonomic Logistics Support Concept[C]. Aerospace Conference 2004 Proceedings. 2004 IEEE, 2004: 3543 - 3550.  
 [4] 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, 2006, 26(5): 626-632.

[5] Bo Sun, Shengkui Zeng, Rui Kang. Benefits Analysis of Prognostics in Systems[C]. Macau: 2010 Prognostics & System Health Management Conference. 2010 IEEE, 2010: 1-8.  
 [6] 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]. 系统工程于电子技术, 2007, 29(10): 1762-1767.  
 [7] Swearingen, K, Majkowski, W, Bruggeman, B, et al. An open system architecture for condition based maintenance overview[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2007: 4161-4168.  
 [8] 景博, 黄以锋, 张建业. 航空电子系统故障预测与健康管理系统现状与发展[R]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(6): 1-6.  
 [9] 孙博, 康锐, 谢劲松. 系统中的传感器应用与数据传输技术[J]. 测控技术, 2007, 26(7): 12-14.  
 [10] Gu J, Pecht M. Prognostics and health management using physics-of-failure[C]. 54th Annual Reliability & Maintainability Symposium, RAMS 2008: 481-487.  
 [11] Pecht M. Prognostics and health management of electronics[M]. Hoboken: John wiley & sonsinc, 2008: 8-46.

\*\*\*\*\*

(上接第 68 页)

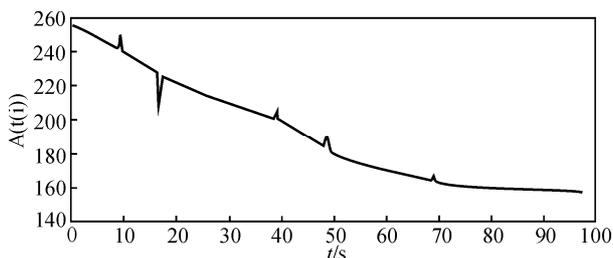


图 2 飞行器方位角测量值

表 2 野值数据剔除结果

剔野位置/s	文中方法	K-MODF
9.6	+(T)	-(F)
17.0 ~ 17.4	+(T)	+(T)
39.2	+(T)	-(F)
43.2	-(T)	+(F)
48.7 ~ 49.4	+(T)	+(T)
69.3	-(F)	-(F)
89.1 ~ 89.9	+(T)	+(T)

从表 2 可以看出, 笔者所提方法的剔野效果优于 K-MDOF。需要指出的是, 43.2 s 附近是目标的加速拐弯的过程, 由于 K-MDOF 方法没有考虑雷达数据的相关性, 采用“硬性”加权, 因此误判该处为野值; 文中所提方法采用“软”加权, 充分考虑了目标轨迹的连续性, 能很好地识别野值, 并且没有将目标的特征区段误判。

### 3 结论

软加权 k-均值距离异常因子雷达数据剔野方法, 充分考虑了飞行器运动轨迹连续性这个客观事

实, 充分利用了所有数据的信息, 最大限度地保持轨迹测量数据的完整性。对实际测量数据的剔野结果表明, 该方法对飞行器轨迹的雷达测量数据野值剔除是有效的。

### 参考文献:

[1] 楼宇希. 雷达精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.  
 [2] 杨娟, 池建军, 王中伟. 复杂电磁环境下雷达作战能力仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 1-4.  
 [3] Barnett V, Lewis T. Outliers in Statistical Data: 2nd[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.  
 [4] 胡峰, 孙国基. 航天靶场外测数据野值点的准实时诊断方法研究[J]. 飞行器测控技术, 1998, 17(4): 25-32.  
 [5] 王正明, 等. 弹道跟踪数据的校准与评估[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.  
 [6] 杨亚军, 等. 改进的极大似然算法及其在试飞数据处理中的应用[J]. 航空学报, 1997, 18(5): 539-542.  
 [7] Jiang M F, Tseng S S, Su C M. Two-phase Clustering Process for Outliers Detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(6/7): 691-700.  
 [8] Konrr E M, et al. Algorithms for Mining Distance-based Local Outliers[C]. Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Very Large Data Bases.  
 [9] Breunig M, Kriegel H P, et al. Lof: Identifying Density-based Local Outliers[C]// Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 2000: 93-104.  
 [10] 詹艳艳, 徐荣聪. 时间序列异常模式的 k-均距异常因子检测[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(9): 141-145.