

# 综合模块化航空电子系统的故障预测与健康管理技术

杨德才

(电子科技大学 航空航天学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 航空电子系统是保障现代飞机性能的非常关键因素之一, 对其开展故障预测及健康管理技术的研究是保证飞机安全性的重要课题。针对航空电子系统综合模块化发展趋势, 研究了一种面向其开放式与模块化架构的故障预测与健康管理技术。通过对综合模块化航空电子系统的分层结构分析, 结合关键子系统展开设计, 包含了飞机PHM系统的体系结构设计及相关环节的技术实现。结果表明该体系结构可满足航空电子系统标准化、层次化、模块化、开放性的要求。

**关键词:** 航空电子系统; 故障预测; 健康管理; 综合模块化

**中图分类号:** TN710-34; TP206

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-373X(2015)05-0125-04

## Prognostics and health management for integrated modular avionic systems

YANG De-cai

(School of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The avionics system is one of the most vital factors which can affect performance of modern planes and it is very important for research of the fault prognostic and health management (PHM) technology to ensure the safety of the avionics system and the whole plane. According to the integrated modular development tendency of the avionics system, a PHM system is proposed for open type and modular architecture. The hierarchical function allocation of avionics system is utilized in this paper to design the architecture of the PHM system and the related technology detail by the analysis of the critical subsystems. The analysis result shows that the designed PHM system can meet the demands of standardization, hierarchy, modularization and openness of avionic systems.

**Keywords:** avionics system; fault prognostic; health management; integrated modularization

## 0 引言

航空电子系统的发展经历了分立式、联合式、综合式和先进综合式4个阶段的演变, 综合模块化航电系统是目前机载航电系统发展的最高阶段。故障预测与健康管理(PHM)技术是保护航电系统乃至整个飞机安全性、维护性等多种因素的重要技术之一<sup>[1-3]</sup>。目前, PHM已成为航空电子系统可靠性和可维护性发展的必然趋势, 通过研究将模块化的航电系统特征与PHM系统有机的结合起来, 意义重大<sup>[4-10]</sup>。

以美国的联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)航电系统为典型代表, 综合模块化航电系统主要特征是采用开放式的系统结构, 射频与广电孔径综合及传感器预处理综合, 统一的航电网络(Unified Avionics Network, UAN)互连, 商用货架(Commercial Off The

Shelf, COTS)产品与创新技术<sup>[11]</sup>。飞机平台通过航空电子系统成为现代战争信息网络系统中的一个节点, 综合航空电子系统在不断地提高智能化程度, 将飞行员从操纵飞机、系统监控、信息判读、态势掌握、武器投放等繁重工作中解脱出来, 便于集中精力于高层次的战术决策。因而, 随着航空信息综合能力的增强, 对航空电子系统的可靠性要求也越来越高。

在造成飞机故障的因素中, 电子系统产生的故障已经占据了总比重的40%以上, 并且对电子系统进行维修所消耗的时间占据总飞机维修时间的1/3。由此可见, 航空电子系统的重要地位, 也就逐渐凸显出了航空电子故障预测与健康管理技术的重要性。同以往的航空电子故障诊断技术相比较而言, 故障预测与健康管理技术是一种更加先进和高效的技术, 逐渐成为航空电子系统中主流故障诊断技术。

PHM技术能够对整个电子系统进行全方位的监督和预测, 是一种更加智能化的动态监测系统, 不仅能够很大程度上减少对电子系统进行监测的时间, 减少人

收稿日期: 2014-05-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助  
(ZYGX2011J126)

力物力的投入,同时还能大幅度地降低维修费用,提高经济效益。另外,对于提升战备的完好率和任务的完成率也发挥出了重要的作用。

## 1 航电系统功能分配结构分析

飞机航电系统的功能需求与其任务使命是密切相关的,通过研究航电系统功能与结构之间的关系,归纳其共性问题与知识,可用来指导健康管理体系统架构设计。

美军为JSF所提出的开放式先进航空电子系统如图1所示。它有如下特点<sup>[1]</sup>:

(1) 航空电子统一网络(UAN)由于光纤具有频带宽、质量小和抗电磁干扰等优点,采用以民用标准为基础的统一的光纤传输网络,以较少的费用实现系统宽带信息传输的需求。

(2) 综合核心处理(Integrated Core Processor, ICP)。将数字信号处理、数据处理以及其他计算性要求的任务处理等集中到共享的、容错的和高性能的综合核心处理区内完成。

(3) 座舱人机接口。采用高分辨率彩色液晶显示器和头盔显示器,以大图像方式提供态势信息,提高飞行员感知范围和能力。

(4) 综合射频和综合光电系统以模块化方式构建综合探测系统,前端充分利用不断发展的软件无线电及开放光电系统方法,采用规范的部件接口,降低费用,实现开放目标。

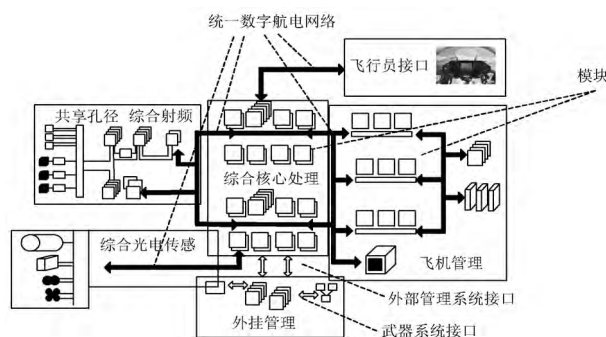


图1 开放式先进航空电子系统结构

如图2所示,可以将航电系统按功能划分为层次化的结构。按照需求分解原则(如模块化),将顶层功能进一步分解成任务管理、功能管理等分系统,其中任务管理分系统又细分为CNI(通信、导航、识别)、探测、电子战等子功能。依次类推,将每个功能分解到可在物理实体上实现的独立功能模块为止。

由此可见,层次化结构、开放式特征等在一定程度上降低了综合航电系统的复杂性。航空电子系统通过层次化划分,将系统分成功能相对集中的功能模块。

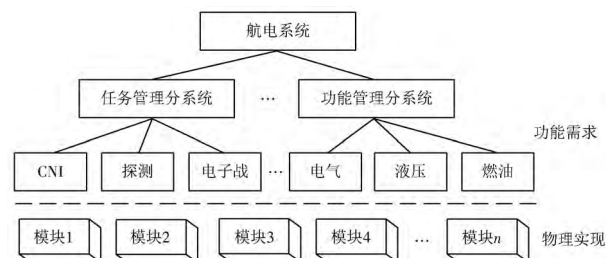


图2 航空电子系统功能层次结构

## 2 综合模块化航空电子系统的健康管理系统设计

模块化航空电子系统是指通过一系列标准化通用功能模块的组合,通过加载与硬件无关的软件,完成航空电子各个设备功能的系统。

模块化航空电子系统的典型结构如图3所示<sup>[3]</sup>。模块化航空电子系统由核心处理系统和非核心处理系统组成,核心系统包含了若干个机柜,而每个机柜上装载了一定数量的通用功能模块(Common Function Module, CFM)。非核心设备包括信号采集设备、传感器设备等<sup>[12-16]</sup>。图4为一个包含两个机柜的系统,在其中创建了两个综合区域(Integration Areas, IA),这两个综合区域通过一些共享资源(如信号处理模块SPM、网络支持模块NSM、数据处理模块DPM、电源转换模块PPM、大容量存储模块MMM、图形处理模块GPM等)排列在一起。

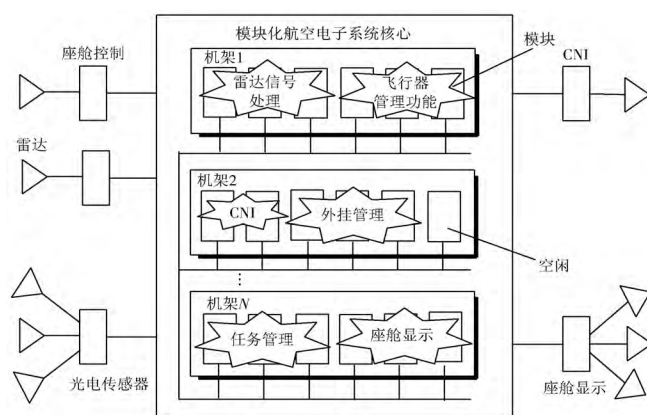


图3 通用模块构成的航空电子系统

对于综合模块化的航空电子系统,其健康管理系统设计要对应其模块化特征。

### 2.1 PHM系统架构

结合综合模块化航电系统的开放式结构特征,PHM系统也采用开放式结构,分为机上PHM系统、地面支持决策系统、机下机上系统接口三个部分,如图5所示。

机上PHM系统采用分层的管理体系结构,分为三个层次:最底层为模块/组件级管理器,分布在飞机各分系统部件中的软、硬件监控程序,包括传感器或机内测试(BIT)设备,将有关信息直接提交给中间层的分系统级

管理器;中间层为分系统级,具有信号处理、区域推理机功能;顶层为飞机系统级,通过对所有系统的故障信息相互关联,确认并隔离故障,评估整个航电系统的健康状态,最终形成维修信息和供飞行员使用的知识信息,传给地面支援中心系统。

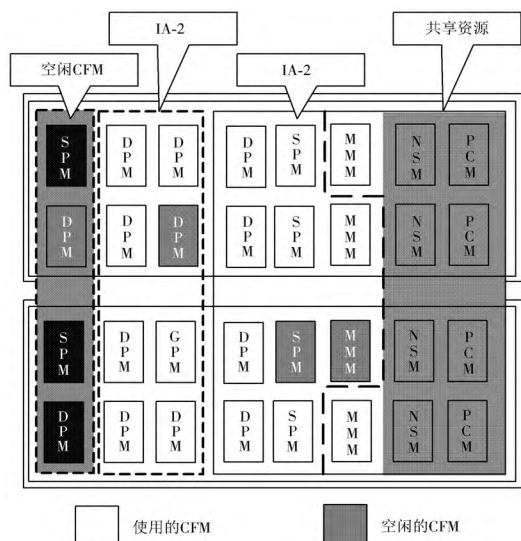


图4 综合模块化结构的综合区域示意图

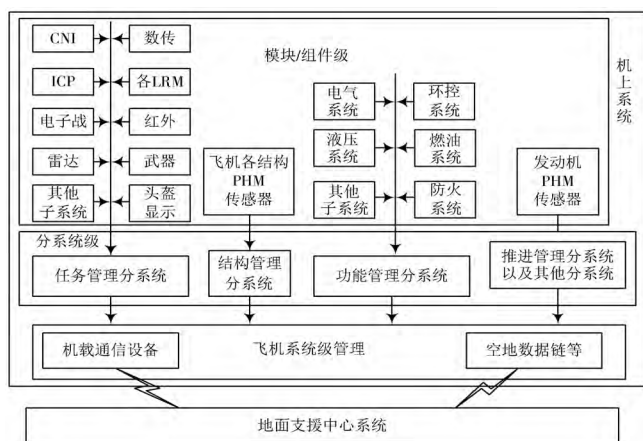


图5 综合模块化航电系统的PHM结构

综合模块化航空电子系统采用机载和地面两级维护策略。机载在线测试和维护操作时,不应该干扰系统功能的执行。在执行测试和维护时,需要记录所有故障,故障条目应当包含时间,环境等信息。同时航电设备应该提供地面测试接口,验证在线检测的结论。

## 2.2 健康状态监控

健康状态监控主要包括监控系统健康状况和检测系统错误,还包括系统错误筛选和确定错误报告,如图6所示,其中主要包括以下几方面功能:

- (1) 故障检测机制。通过主动或被动方式完成硬件、软件的故障检测。
- (2) 操作系统健康监控服务。用来捕获故障检测

机制传递来的故障和错误信息,经过综合处理后向通用系统管理中的健康监控器服务报告,并传递诊断信息。

(3) 通用系统管理健康监控器。收集从操作系统健康监控服务传来的故障信息,根据严重程度和性质进行筛选,做出相应的处理操作。

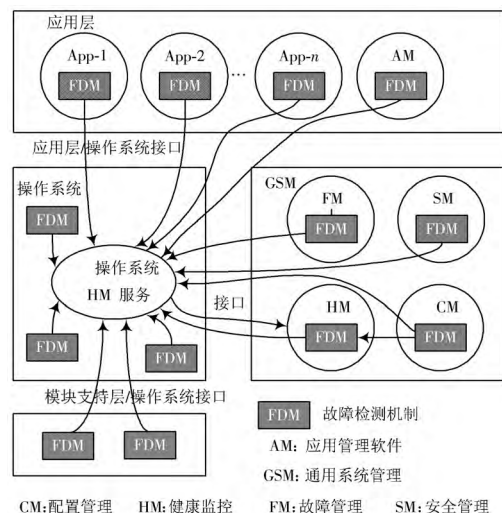


图6 综合模块化架构系统故障探测机制

## 2.3 故障处理

故障处理包括掩盖、定位、限制等机制,从而使系统能够在错误存在的情况下继续运行一段时间。故障处理的行为与具体的由健康监控器报告的事件有关,故障管理器根据事件信息采取进一步的故障处理措施,如图7所示。

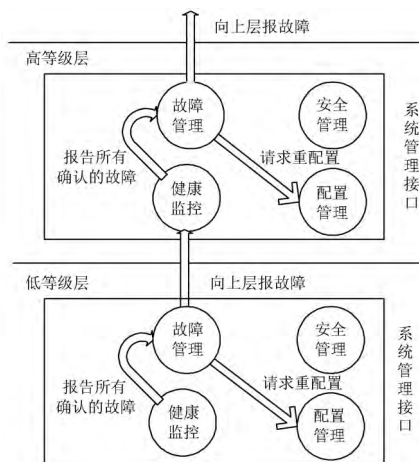


图7 故障处理过程

图7中,健康监控器需要向故障管理器报告所有确认的故障。故障管理器支持各种故障的处理机制,对故障响应将按一系列处理序列进行,一般包括故障关联、识别和定位,向配置管理器请求重配置已实现故障掩盖,请求应用程序错误处理函数,向上层健康监控器报告等。配置管理器将处理由故障管理器发来的重新配置请求,配置完后配置管理器将通知故障管理器。



### 3 结 论

航空电子系统是现代飞机的“中枢神经”,承载着大部分任务功能。通过开展综合模块化航电系统的PHM系统设计,可知 PHM 系统体系结构应具备的共性特征包括:系统分层次的体系结构;分布式、跨平台系统特点,作为未来全球自主保障支撑技术的PHM 系统,必然是存在多个对象系统之间的分布协作关系;开放性、模块化的设计实现方法;实时性要求,能实时监测系统状态并做出决策。

本文设计的综合航电 PHM 系统采用开放性、分布式、模块化的系统结构,模块化便于系统的集成和新技术及方法的导入;开放性系统结构便于系统的更新,便于与飞机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。

#### 参 考 文 献

- [1] 褚文奎,张凤鸣,樊晓光,等.综合模块化航空电子系统软件体系结构综述[J].航空学报,2009,30(10):47-51.
- [2] 诸葛卉.高速发展的新一代综合模块化航空电子系统[J].航空电子技术,2007,38(3):9-14.
- [3] 熊华钢,王中华.先进航空电子综合技术[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 丛伟,景博.航空电子系统故障管理体系结构研究[J].测控技术,2013,32(7):125-129.
- [5] 吴明辉,许爱强,戴豪民.PHM 技术在综合航空电子系统中的

应用[J].兵工自动化,2013,32(4):72-77.

- [6] 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技术[J].测控技术,2011,30(1):1-4.
- [7] 景博,黄以锋,张建业.航空电子系统故障预测与健康管理技术现状与发展[J].空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(6):1-6.
- [8] XU J P, XU L. Health management based on fusion prognostics for avionics systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 428-436.
- [9] 杨云志,罗通俊,黄进武.我国大型飞机航空电子系统的发展与思考[J].电讯技术,2007,47(4):1-5.
- [10] 宁东方,章卫国,李斌.一种飞控系统健康管理专家系统的设计[J].测控技术,2007,26(6):76-78.
- [11] 梁德文.战斗机航空电子系统最新的发展趋势:网络化[J].电讯技术,2008,48(6):93-97.
- [12] 高占宝,梁旭,李行善.复杂系统综合健康管理[J].测控技术,2005,24(8):1-5.
- [13] 韩国泰.航空电子的故障预测与健康管理技术[J].航空电子技术,2009,40(1):30-38.
- [14] 丛伟,景博.综合航空电子系统故障预测问题研究[J].电光与控制,2013,20(5):53-62.
- [15] PECHT M G. Prognostics and health management of electronics [M]. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2008: 30-35.
- [16] MATHEW S, DAS D, ROSSENBERGER R, et al. Failure mechanisms based prognostics [C]// International Conference on Prognostics and Health Management. [S.l.]: IEEE, 2008: 234-238.

作者简介:杨德才(1974—),男,博士。主要研究方向为故障测试与诊断。

(上接第124页)

对提出的模型进行仿真实验及比较,证明了本文提出模型的优良性,在后续研究中可以更好地通过分析缺陷探测率、软件运行覆盖率、排除错误时错误引入率等特性,代入本文提出的模型中,从而达到更好的拟合效果。

#### 参 考 文 献

- [1] 李海峰,刘畅,郑军,等.考虑测试工作量与覆盖率的软件可靠性模型[J].软件学报,2013,24(4):749-760.
- [2] PHARN H, ZHANG Xue-mei. NHPP software reliability and cost models with testing coverage [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 145(2): 445-454.
- [3] OHBA M. Software reliability analysis models [J]. IBM Journal of Research and Development, 1984, 28(4): 428-443.
- [4] PHAM H. An imperfect-debugging fault-detection dependent-parameter software [J]. International Journal of Automation and

Computing, 2007, 4(4): 325-328.

- [5] HUANG Chin-yu, LIN Chu-ti. Software reliability analysis by considering fault dependency and debugging time lag [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(3): 436-450.
- [6] 侯春燕,崔刚,刘宏伟,等.基于构件的INHPP类软件可靠性增长模型的研究[J].计算机科学,2009,36(4):195-199.
- [7] 孙志安,裴晓黎.软件可靠性工程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [8] ZHANG X M, TENG X L, PHAM H. Considering fault removal efficiency in software reliability assessment [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems and Humans, 2003, 33(1): 114-119.
- [9] PHAM H, NORDMANN L, ZHANG X. A general imperfect-software-debugging model with S-shaped fault-detection rate [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(2): 169-175.

作者简介:滕士波,工程师。主要研究方向为软件可靠性、软件测试。