

引用格式:朱文博,陈绍炜,赵帅. 航电系统故障预测与健康管理体系结构分析[J]. 电光与控制, 2018, 25(12):59-62. ZHU W B, CHEN S W, ZHAO S. Analysis of PHM framework for avionics system[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12):59-62.

# 航电系统故障预测与健康管理体系结构分析

朱文博, 陈绍炜, 赵帅  
(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

**摘要:** 航电系统的故障预测与健康管理体系技术(PHM)能够大幅提高飞机的安全性、可靠性和稳定性,从而减少设备损耗和维修费用。简要介绍了综合模块化航电(IMA)系统的构架和系统管理功能。基于ASAAC标准与OSA-CBM模型,重点对IMA的PHM系统设计从结构、功能分层和树形运行蓝图(RTBP)上进行了分析。最后根据航电系统的特性,对我国未来航电系统PHM技术的应用与发展进行了探讨。

**关键词:** 航电系统; 故障预测与健康管理体系; 运行蓝图

中图分类号: V243 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.013

## Analysis of PHM Framework for Avionics System

ZHU Wen-bo, CHEN Shao-wei, ZHAO Shuai

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Prognostics and Health Management (PHM) technology of the avionics system can greatly improve the safety, reliability and stability of aircrafts, so as to reduce the maintenance costs. The structure and management functions of Integrated Modular Avionics (IMA) system are briefly introduced. Based on ASAAC Standard and OSA-CBM model, the design of PHM for IMA system is analyzed from the aspects of the structure, function layer and tree-form Run-Time Blueprint (RTBP). Finally, according to the characteristics of avionics system, the application and development of future avionic PHM technology are discussed.

**Key words:** avionics system; prognostics and health management; run-time blueprint

### 0 引言

航空电子系统承担了通信、控制、导航、显示等大部分的飞行任务与功能,是飞机能够正常完成飞行任务的重要保障。目前,飞机的故障预测与健康管理体系(PHM)的关键技术发展迅速,对于飞机的模块或者子系统如发动机系统<sup>[1]</sup>也有大量的研究。国外PHM技术在飞机上的应用成效以F-35, F-22较为显著<sup>[2]</sup>。但是与机械或机电系统相比,航电系统功能更为复杂,部件繁多且具有多属性、非线性等特征,各子系统、模块和功能之间耦合关系密切<sup>[3-4]</sup>,这对航电系统PHM技术的应用提出了巨大的挑战。目前,国内关于航电系统PHM技术的研究仍以理论为主,其整体的工程应用还处于起步阶段,与国外存在较大的差距,需要借鉴国外先进技术及设计理念,形成完善的PHM体系。

### 1 综合模块化航电系统及其健康管理

综合模块化航电(IMA)系统采用统一标准的通用化模块(CPM),通过高速航电总线将各模块连接在一起组成综合核心处理机<sup>[5]</sup>,如图1所示。IMA航电系统通过时间分区和空间分区使得各操作系统与应用能够处在不同分区下,根据不同任务需求加载应用与软件,独立占用相应CPM资源,从而实现资源上的高度综合与共享。

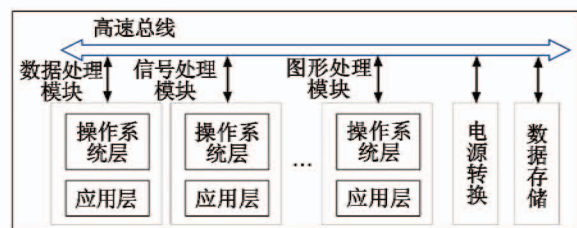


图1 IMA综合核心处理机

Fig. 1 IMA integrated core processor

联合标准化航电系统架构协会(ASAAC)标准针对IMA航电系统提出了相应的系统管理概念,将系统管理

收稿日期:2017-12-20

修回日期:2018-01-31

作者简介:朱文博(1994—),男,湖南浏阳人,硕士生,研究方向为无人航电系统。

分为3层,即飞机级、综合区域级和资源级<sup>[6]</sup>。其中,飞机级负责 IMA 整体管理,综合区域级负责子系统管理,资源级负责单一处理单元功能。在此基础上,ASAAC 提出了故障处理的基本流程:各模块通过故障检测机制将发现的错误信息汇总至本级系统管理中,通过结合运行蓝图(RTBP)信息进行健康监控和故障分析处理。

## 2 IMA 航电系统 PHM 体系设计

### 2.1 层次化 PHM 结构

参照 ASAAC 标准的系统管理模型与综合飞行器健康管理體系结构<sup>[7]</sup>,机载 PHM 体系设计采用分层结构,如图 2 所示。机载 PHM 体系分为飞机级 (APHM)、系统级/子系统级 (SPHM) 以及模块级 (MPHM)。APHM 负责航电系统整体 PHM 功能运行,根据各子系统的反馈信息完成状态监测与记录、故障处理和决策生成等功能,具有人-机接口,完成系统状态显示和故障显示、地面维护等功能。SPHM 负责所在系统及其下属的模块状态监测与记录、故障预测、故障诊断与处理,能够与 APHM 进行通信。MPHM 由通用处理模块、数据采集等设备组成,主要完成数据采集、状态监测与记录和故障管理,同时将故障上报。

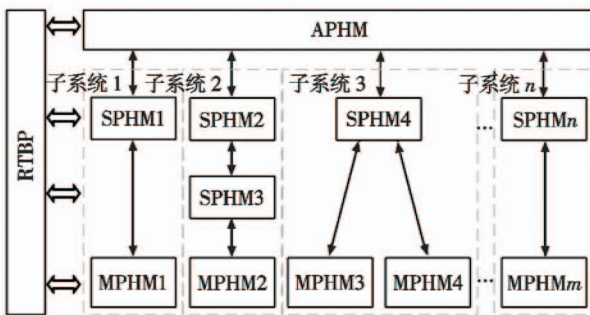


图 2 航电 PHM 分层结构

Fig. 2 Hierarchical structure of avionics PHM

### 2.2 PHM 功能分层

参照 ISO 133374 标准定义的 OSA-CBM 模型,将航电系统 PHM 功能划分为数据采集层(预处理)、状态监测层、故障预测与健康评估层、决策生成层和表述层共 5 层<sup>[8]</sup>,同时 RTBP 为 PHM 各层功能提供支持与指导。数据采集层负责数据采集、存储和预处理;状态监测层负责对各系统和模块运行状态监测,收集异常数据并上报;故障预测与健康评估层根据检测数据,结合历史记录数据、系统故障预测模型完成健康状态分析、故障诊断和预测功能;决策支持层根据故障预测与健康评估结果生成维修方案与措施;表述层提供人-机交互接口,显示系统当前状态信息,并且可以通过维护接口对系统进行综合维修。图 3 展示了 PHM 功能分层以及 RTBP 中部分对应信息。

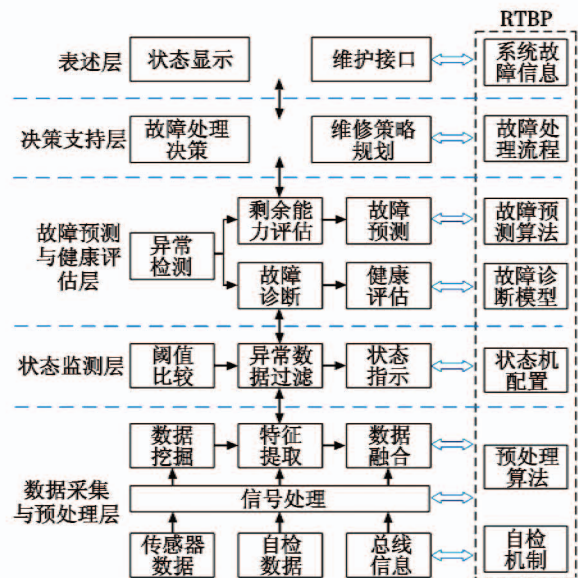


图 3 PHM 功能分层

Fig. 3 PHM function layer

需要注意的是,航电系统在各级 PHM 功能设计时应根据实际情况量体裁衣。如针对模块级 PHM,由于资源限制,只需具有对非关联故障进行诊断并对关联型故障进行初步分析并且上报的功能,而顶层的 APHM 决策支持层应支持多层次多区域复杂故障的处理。

### 2.3 蓝图设计

参照 ASAAC 蓝图设计理念,从整体上采用树形结构进行定义。各级 PHM 能够通过统一接口从蓝图树根节点以遍历方式访问到所需的任何数据结构。蓝图信息主要分为两类:静态配置信息和动态信息。静态配置信息包括系统管理信息、故障模型配置信息、故障管理措施信息等;动态信息包括系统实时健康状态信息、实时配置信息和实时故障处理信息等<sup>[9-10]</sup>。在具体内容上采用标准的格式,将所需的所有信息配置形成统一的 XLM 图表。图 4 为运行蓝图中健康监测状态机配置的树形结构示例。文献[10]融合 ASAAC 标准与 ARINC653 标准设计了详细的蓝图配置表信息,具有实际指导作用。

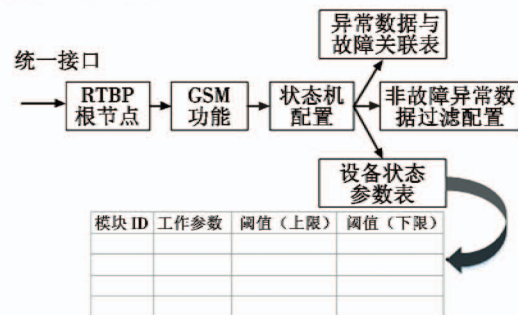


图 4 树形运行蓝图示例

Fig. 4 Example of tree-structure RTBP design

### 3 航电系统 PHM 发展与挑战

我国目前在航电系统 PHM 上已经开展了大量的研究,且进步显著,但与国外相比仍缺乏完善的标准,存在较大的差距<sup>[11]</sup>。本文认为,在目前航电系统 PHM 分层体系设计的基础上,需要加强对以下几个方面

#### 3.1 PHM 技术在航电系统中的应用

##### 1) 基于模型的故障预测方法。

基于模型的故障预测方法通过建立系统对应的数学模型来模拟其特性,通过实际系统测量值与数学模型进行对比分析,评估系统故障累积效应<sup>[12]</sup>,从而评估设备剩余寿命。基于模型的故障预测方法能够很好地了解系统特性,随着对设备或系统故障演化机理研究的逐步深入,可以逐渐修正和调整模型以提高其预测精度<sup>[13]</sup>,与其他方法相比误差更小。对于航电系统,由于其信号交联关系复杂<sup>[14]</sup>,难以建立精确的数学模型,基于模型的预测方法受限较大。需要深入研究综合应力下电子系统的失效机理和故障建模,提高预测与诊断的准确性。

##### 2) 基于统计数据的随机建模方法。

基于数据驱动的 PHM 技术主要基于统计数据的随机建模方法和人工智能方法,能够通过对系统多方面的数据,如传感器数据、仿真数据等进行数据分析来预测可能出现的故障,无需相应的物理模型与专家知识的支持<sup>[15-16]</sup>。相较于人工智能,基于统计数据的随机建模方法对系统进行闭环表示,能够对诊断和预测结果进行很强的不确定性量化管理,对于后续的系统维护策略至关重要。但航电系统关键部件的典型数据(仿真数据、故障注入数据)获取难度高,制约了其在航电系统中的应用。

##### 3) 基于大数据的人工智能方法。

基于大数据的人工智能技术在航电系统预测与诊断方面有着较好的自适应性、容错性、联想能力和学习能力。与基于统计数据的随机建模方法相比,人工智能所需要的配置更为简单,在构建航空大数据中心支撑的基础上<sup>[17-18]</sup>,对大量工作参数进行分析,挖掘出反映系统性能的信息,从而逼近非线性系统的工作状态与趋势,准确率较高。文献[19]介绍了两个利用大数据通过数据挖掘、机器学习进行故障预测的实例。该方法缺点在于其故障预测只能得到剩余寿命的点估计,无法明确系统内部运行机制,从而导致了无法量化剩余寿命预测结果的不确定性,限制了后期故障处理决策的生成。

鉴于航电系统的复杂特性,任何单一的故障预测

与诊断方法都无法较好地解决问题<sup>[20]</sup>。组合型预测方法通过结合多种预测方法,能够得到更准确的预测结果<sup>[21-22]</sup>,已成为研究热点与发展趋势。如近年来形成的数字双胞胎技术<sup>[23]</sup>,通过综合人工智能、机器学习等方法,建立系统数字模型,模拟系统真实运行状态以实现故障预测与诊断。

#### 3.2 数据采集与状态监测

在实际的应用过程中,受限于技术和系统结构,关键数据难以收集,航电系统中的状态监测存在较大困难<sup>[24]</sup>。在提高传感器采集技术的同时,充分利用现有传感器单元的能力,尽量减少传感器数量,通过收集分析系统固有的工作参数,比如工作功率<sup>[25]</sup>、GPS 工作参数精度<sup>[26]</sup>、信噪比等,以提高信息感知能力。同时,BIT(Built-in-Test)技术是航电系统各模块实现状态监测与故障诊断、隔离的有效方法<sup>[27]</sup>。结合先进的传感器数据采集技术和故障预测技术设计 BIT 功能<sup>[28]</sup>,提高系统检测能力,是实现状态监测功能的关键之一。

#### 3.3 多层次故障推理与诊断

机载航电 PHM 结构通常采用飞行器-子系统-底层资源的分层方式,各个模块与功能之间耦合关系密切,故障传递影响复杂。应加强研究不同功能模块之间的故障传递机制和失效机理,在不同层次的 PHM 模块中采用不同的推理与诊断方法,在层与层之间采用基于状态、传感器和功能的故障分析交叉增强校验<sup>[29]</sup>,从而提高整体的故障诊断精确度,避免虚警。

#### 3.4 故障处理决策支持

在系统不同健康状态和不同资源配置下,对故障处理措施的决策是目前研究的关键之一。决策方案的选择将会影响故障处理后飞机的整体性能<sup>[30-31]</sup>。如对资源不足时重配置结构的决策,将直接决定飞机能否继续正常运行。决策方案的选择,需要在航电 PHM 分层结构的基础上,采取多目标、多模块和多准则的方法进行综合分析比较,选取最优决策方案。目前,决策支持中引用专家系统、机器学习等新技术,大大提高了故障处理决策的可靠性,成为研究的热点。

### 4 结束语

未来航电系统将会朝着高度的灵活性、模块的通用性、结构的分布性、通信的高速性发展。我国航电 PHM 技术的发展,要结合国内的发展状况,注重有效数据的积累,针对当前研究热点如人工智能、物联网和大数据分析等技术展开研究,加强航电系统 PHM 仿真与工程应用的并行发展,使航电 PHM 朝着综合化与标准化方向前进。

## 参 考 文 献

- [1] ARP1587B. Aircraft gas turbine engine health management system guide[S]. New York: SAE International, 2013.
- [2] 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.
- [3] 黄鹤, 卢海涛. 综合化航空电子系统 PHM 应用与设计[J]. 电讯技术, 2014, 54(3): 245-250.
- [4] WANG M, ZHANG L H, GU Q F, et al. Research on integration modular avionics system health management [C]//Proceedings of the First Symposium on Aviation Maintenance and Management, 2013: 73-85.
- [5] NATO. STANAG 4626-2005 modular and open avionics architectures (Part I; architecture) [S]. Brussels: North Atlantic Organization, 2005.
- [6] NATO. STANAG 4626-2005 modular and open avionics architectures (Part I; system management) [S]. Brussels: North Atlantic Organization, 2005.
- [7] GORINEVSKY D, SMOTRICH A, MAH R, et al. Open architecture for integrated vehicle health management [C]//AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference, 2010: 3434.
- [8] FELKE T, HADDEN G D, MILLER D A, et al. Architectures for integrated vehicle health management [C]//AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference, 2010: 3433.
- [9] WANG H T, HE F, XIONG H G. Modeling of avionics blueprint architecture based on GSPN and LP [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 26(1): 111-119.
- [10] 丛伟, 景博, 樊晓光. 综合航电系统健康管理体系结构问题[J]. 电光与控制, 2013, 20(9): 64-68, 73.
- [11] 卢海涛, 王自力. 综合航空电子系统故障诊断与健康管理工作发展[J]. 电光与控制, 2015, 22(8): 60-65, 86.
- [12] REN F Y, YU J S. Fault diagnosis methods for advanced diagnostics and prognostics testbed (ADAPT): a review [C]//The 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015: 175-180.
- [13] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理工作综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.
- [14] 邓森, 景博. 基于测试性的电子系统综合诊断与故障预测方法综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 641-649.
- [15] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理工作综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
- [16] SI X S, WANG W B, HU C H, et al. Remaining useful life estimation-a review on the statistical data driven approaches [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1): 1-14.
- [17] CHEN J, LYU Z, LIU Y Y, et al. A big data analysis and application platform for civil aircraft health management [C]//IEEE Second International Conference on Multimedia Big Data, 2016: 404-409.
- [18] YANG L, WANG J, ZHANG G G. Aviation PHM system research framework based on PHM big data center [C]//IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, 2016: 1-5.
- [19] BHARADWAJ R, MYLARASWAMY D, VECHART A, et al. Case studies: use of big data for condition monitoring [C]//American Helicopter Society International-Airworthiness, CBM and HUMS Specialists' Meeting, 2015: 183-187.
- [20] 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.
- [21] LIU J, WANG W, MA F, et al. A data-model-fusion prognostic framework for dynamic system state forecasting [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(4): 814-823.
- [22] LIU Z J, LI Q, LIU X H, et al. A hybrid LSSVR/HMM-based prognostic approach [J]. Sensors, 2013, 13(5): 5542-5560.
- [23] SESHADRI B R, KRISHNAMURTHY T. Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept [C]//The 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2017: 1675.
- [24] HUANG B, DI Y, JIN C, et al. Review of data-driven prognostics and health management techniques: lessons learned from PHM data challenge competitions [C]//Machine Failure Prevention Technology, 2017: 1-17.
- [25] 黎华. 基于 OTDR 和光功率测试的光纤故障监测应用方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1357-1359.
- [26] BROWN D W, KALGREN P W, BYINGTON C S, et al. Electronic prognostics-a case study using Global Positioning System (GPS) [J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 1874-1881.
- [27] LEI L, WANG H J. CAN bus based on intelligent built-in test technique in complex electronic system [J]. Advanced Materials Research, 2011, 204-210: 1876-1879.
- [28] YAO G P, HOU W K, SHI L, et al. The information-enhanced BIT design of avionics system based on fuzzy neural network [C]//Proceedings of International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer, 2013: 2950-2954.
- [29] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理工作关键[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
- [30] GREGORY I M, LEONARD C, SCOTTI S J. Self-aware vehicles: mission and performance adaptation to system health [C]//The 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2015: 1-7.
- [31] DERRISO M M, BURNS R S, SCHROEDER J B, et al. Integrated systems health management (ISHM) for increased autonomy [C]//AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference, 2013: 4816.