

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2021.03.005

引用格式:张洪亮.特种飞机综合化任务系统 PHM 设计与实现[J].电讯技术,2021,61(3):291-297. [ZHANG Hongliang. Design and implementation of PHM for integrated mission system of special aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(3):291-297.]

特种飞机综合化任务系统 PHM 设计与实现^{*}

张洪亮^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:任务系统是特种飞机能力的关键因素,对其开展故障预测诊断及健康管理技术(Prognostic and Health Management, PHM)的研究是一项重要课题。目前任务系统综合化程度不断提高,故障诊断难度不断加大。结合任务系统的使用场景以及综合化系统的结构特点,对 PHM 系统的层次结构、基础资源要素、功能要素、综合诊断、状态策略、故障管理等环节开展了全面设计与实现。设计结果表明,PHM 系统在故障诊断准确性、降低飞机再次出动执行任务的间隔时间、缩短地面维修时间方面均具有明显优势。

关键词:特种飞机;综合化任务系统;故障诊断;健康管理

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN802;V243

文献标志码:A

文章编号:1001-893X(2021)03-0291-07

Design and Implementation of PHM for Integrated Mission System of Special Aircrafts

ZHANG Hongliang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Mission system is the key factor of the capability of special aircraft. It is an important subject to study the technology of prognostics and health management (PHM). At present, the integration degree of mission system is constantly improving. Considering the application scenarios of the mission system and the structural characteristics of the integrated system, this paper designs and implements the hierarchical structure, basic resource elements, functional elements, comprehensive diagnosis, state strategy and fault management of PHM system. The results show that the PHM system has obvious advantages in the fault diagnosis accuracy, reducing the interval time of aircraft to launch again and shortening the ground maintenance time.

Key words: special aircraft; integrated mission system; fault diagnosis; health management

0 引 言

目前机载综合化电子系统已经发展到第四代高度综合化阶段,装备先进性、复杂性大大提高,容错能力更强^[1-2]。

故障诊断及健康管理(Prognostic and Health

Management, PHM)技术在未来航空领域将发挥重要作用。通过 PHM 系统设计,结合飞机起飞、巡航等不同场景的应用,能够有效提升任务完成率和装备可靠性。PHM 技术将成为支撑装备实现高效保障、自主健康管理的最重要手段^[3-4]。

* 收稿日期:2020-06-17;修回日期:2020-12-13

** 通信作者:anywn310@163.com

国内关于 PHM 技术的研究起步较晚,研究内容主要集中在概念原理、技术研究及局部支撑技术,尚无完整的系统投入使用,与国外存在很大差距^[5]。在航空领域,主要围绕型号技术攻关,在机电和结构方面开展了技术研究以及部分应用,机载航空电子系统应用还处于较为初步的阶段^[6]。目前,军用飞机装备 PHM 存在以下几方面问题^[7]:装备设计初期 PHM 设计阶段考虑不足,信息感知样本少,故障模式难以通过 PHM 检测充分暴露;检测设备对故障的检测和隔离能力较弱,外场故障隔离主要依赖外场保障人员;装备实时健康信息、故障场景信息等信息不足且较为离散,无法进行综合诊断。综合来看,目前的军用飞机装备离实时健康监测、故障诊断准确定位、快速高效综合保障等 PHM 主要功能差距较大^[5]。随着机载航空电子信息系统综合化程度不断提高,资源共用带来的系统内部交联复杂性将进一步加大故障诊断难度。

本文针对特种飞机复杂综合化任务系统设计并实现了一种 PHM 系统,能实时监控系统健康状态,通过模块、功能等层次化的设计分析和多功能的综合故障诊断,能快速故障隔离并将故障定位至模块内部芯片,对机上系统剩余能力发挥、有效降低飞机再次出动执行任务的间隔时间、大大缩短修复时间均具有重要意义。

1 PHM 系统功能

PHM 技术在综合航空电子信息系统的主要功能包括状态监测、功能性能测试、故障诊断定位、故障预测以及综合保障及健康状态管理^[5]。国外航空领域的 PHM 系统主要是以 F-35 飞机为代表的固定翼飞机 PHM 系统、直升机的健康和健康管理(Health and Usage Management System, HUMS)以及波音公司为代表的大型民用飞机的飞机健康管理(Aircraft Health Management, AHM)系统^[6]。目前国内对军用特种飞机(电子战飞机、预警机等)的 PHM 技术研究较少。

军用特种飞机的任务系统往往含有大量的侦察、雷达、光电、通信等电子设备,是特种飞机的主要任务属性以及最重要价值体现。任务系统往往较为独立,并具有独立的计算机与显示器^[1]。国外某战场监视飞机的远航程任务机组成员数量超过 10 人^[1]。因此,针对特种飞机任务系统开展 PHM 研

究与设计具有重要意义。

任务系统的 PHM 功能要考虑其使用场景(飞行前、中、后),通过任务系统的系统结构、主要功能、基础要素等特点切入,开展状态监测与故障数据的采集,挖掘信息进行故障诊断与定位,建立模型推断可能的故障,并以图形化的显示提供给任务机组人员;任务机组人员根据系统目前资源情况考虑功能重构以及通知地面备件准备,从而达到系统使用效能最大化,降低飞机再次出动时间以及提高效率的目的。

2 PHM 使用场景分析

任务系统的 PHM 的应用主要贯穿于起飞前准备、巡航、地面处理三个环节,在爬升、下降、着陆等阶段任务系统一般不加电。图 1 为典型电子战飞机战场监视任务图^[1]。

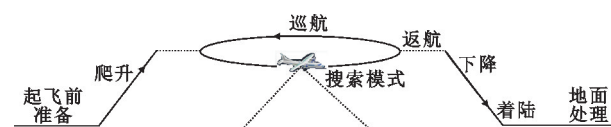


图 1 典型战场监视任务概图

在起飞前:PHM 需要对任务系统进行全面的功能、性能及健康检测,并给出实测以及故障预测结果,为飞机的任务规划提供重要依据。

巡航阶段:进入巡航阶段后,PHM 需要对系统功能、性能以及系统运行状态全面检测。当系统发生故障时,PHM 应给出诊断结果以及故障影响的范围,并能实时提示任务机组。

地面处理阶段:飞机抵达地面时,维修保障人员能够依据 PHM 给出的故障信息完成维修策略以及备件更换。

3 综合化任务系统 PHM 设计

3.1 综合化任务系统典型结构

综合化系统一般采用模块化综合设计思路和开放式架构进行设计,对硬件资源进行分类综合和统一配置管理。系统资源按类别分为综合天线孔径、射频信道类模块、数字类模块,天线孔径与射频信道通过射频开关网络互连,采样类模块与数字类模块相互之间通过高速网络互连。图 2 给出了一种典型的综合化系统体系架构。

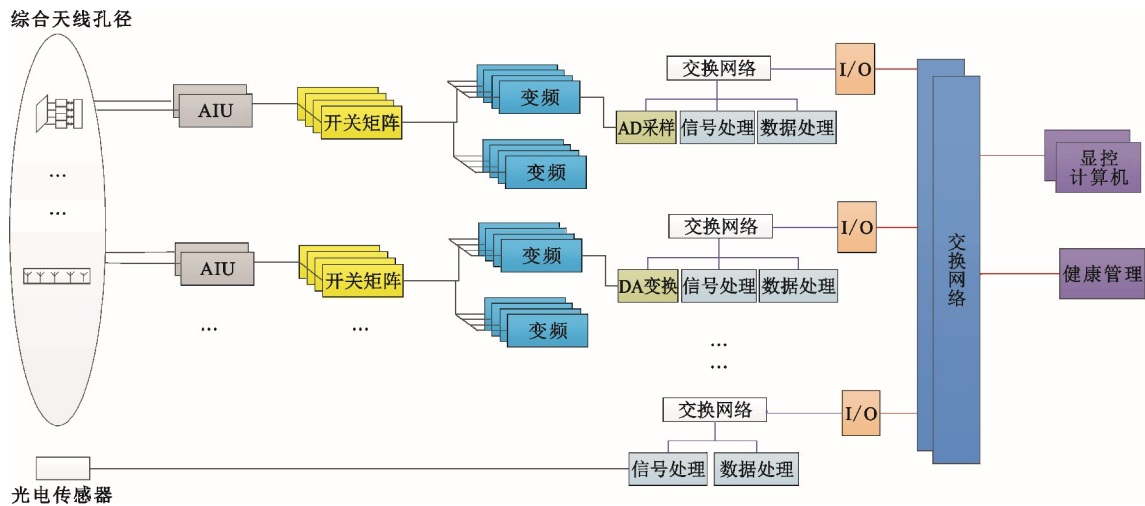


图 2 综合化任务系统典型结构

3.2 任务系统 PHM 设计

3.2.1 任务系统 PHM 组成

任务系统 PHM 分为机上与地面两个部分。地面部分主要包括各通信、雷达检测仪等测试设备。当飞机处于地面时,使用地面 PHM 设备对任务系

统全部功能、性能进行检测,并将检测结果报送机上 PHM。机上 PHM 依据任务系统结构特点设计,具备基础资源级、功能级、系统级三层健康管理结构设计,并具备图形化显示界面,能将故障实时诊断、显示和报送任务机组。

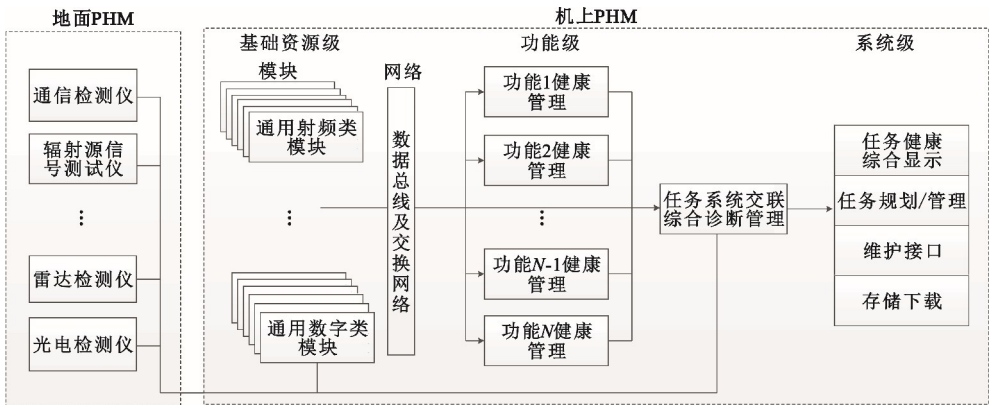


图 3 任务系统 PHM 组成

3.2.2 PHM 层次划分

任务系统 PHM 采用的是机上、地面一体化,机上分层设计、逐级诊断、集中处理的体系结构。结构分层图如图 4 所示。低级别的层次为模块及网络等基础资源,依据系统资源重构特性,重点考虑模块内部及网络的资源划分、各类测试数据的覆盖性、准确性,以降低虚警率。中间层为功能级,搜集功能评估所需的健康数据,结合功能自身软硬件、模式以及闭环测试进行初级诊断,并将报告上报系统级。高级别层次为系统级,系统健康管理将故障结果进行关联分析、综合故障诊断,并以图形化方式通知任务机组。通过分层设计、逐级融合进一步提高故障诊断

能力,减少虚警。

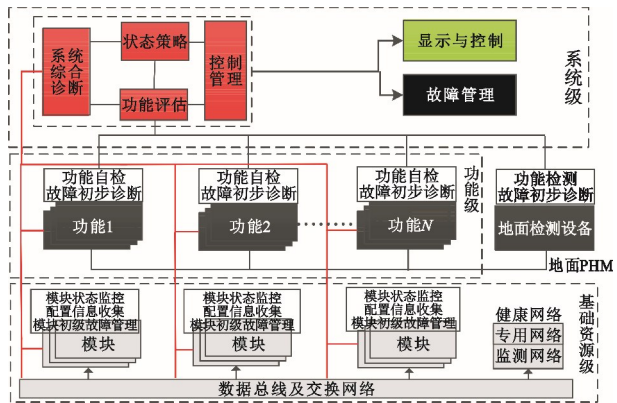


图 4 任务系统 PHM 体系结构

3.2.3 基础资源健康管理设计

3.2.3.1 模块健康管理设计

模块健康管理功能主要完成模块内部健康测试及监测功能,测试点精细化至芯片。图 5 为模块健康设计原理。

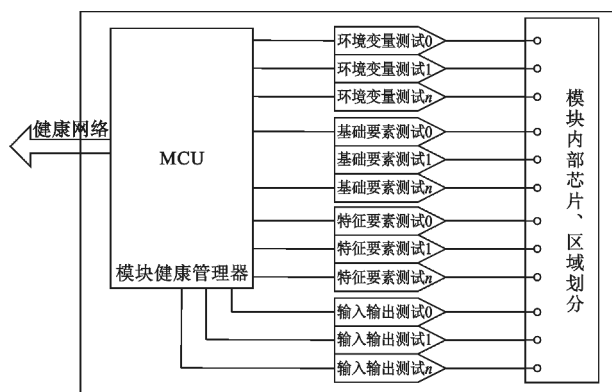


图 5 模块健康管理原理

该设计有以下能力:一是监测能力。对模块内部的环境变量(温度、湿度、振动等)实时监测;对模块内部芯片温度、供电电压、时钟等基础要素进行采集管

理;健康设计依据系统影响结合模块内部芯片特征要素进行监测,例如数字芯片(例如 CPU、大容量存储等)的工作状态,主频、使用率、扇区坏道等,射频芯片的功率、本振锁定状态、开关状态等。二是初步诊断能力以及执行策略能力。采用独立的微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)作为健康管理器,对健康数据进行采集、分析、上报,对故障进行初级分析、诊断、消除虚警,及故障隔离;在系统生成状态策略时,MCU 可以完成对本模块动态部署、重构等动作。

3.2.3.2 数据总线及交换网络健康管理设计

数据总线及交换网络负责任务系统内的业务数据传输,一般分为控制网络以及数据网络。控制网络用于传输控制命令、状态参数等数据,其特点是抗干扰性、可靠性、实时性要求高,但数据量较低,网络负荷较低。数据网络用于传输雷达、光电、数据链等功能业务数据,其特点为数据量大,网络负荷相对较高。因此数据总线及交换网络的健康设计,应该考虑数据测试以及状态监测相结合的方法。图6为一种典型数据及控制网络健康监测原理框图。

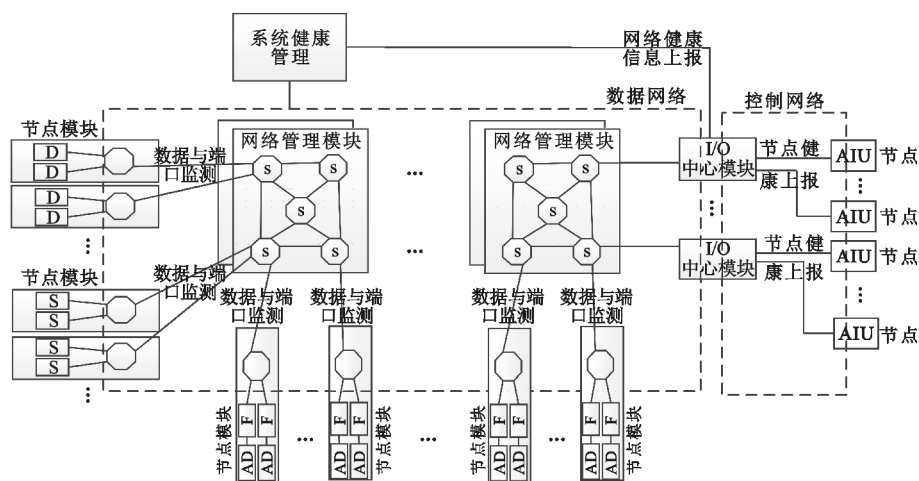


图 6 监测网络原理框图

图6中网络管理模块实时监测数据网络,中心模块实时监测控制网络的健康状态,并将网络健康信息上报系统健康管理。该设计具备以下能力:具备端到端的网络状态监测与数据统计,包括收发累计包、丢弃包、错误包、重传包等信息,综合判断任意节点在网络中的健康状态;在启动或者运行中周期实时监测与之相连的模块端口速率、连接状态等物理状态信息,实时监测节点网络状态;在启动、运行或者维护过程中运行大规模健康数据,测试网络带宽、速率等网络效能。

3.2.3.3 专用健康网络设计

专用健康网络用于系统对模块的健康信息采集与传输。大型的综合化任务系统内模块数量往往较多(几十上百),对于模块精细化健康设计后,会产生海量的数据。如果使用系统内业务网络进行搜集、传输,一方面将会给业务总线带宽、延时等网络资源带来巨大消耗,另一方面一旦出现网络故障也会导致故障隔离难度加大。在有系统设计允许的情况下,采用专用网络是解决上述问题的较好办法。图7为一种专用健康网络结构。

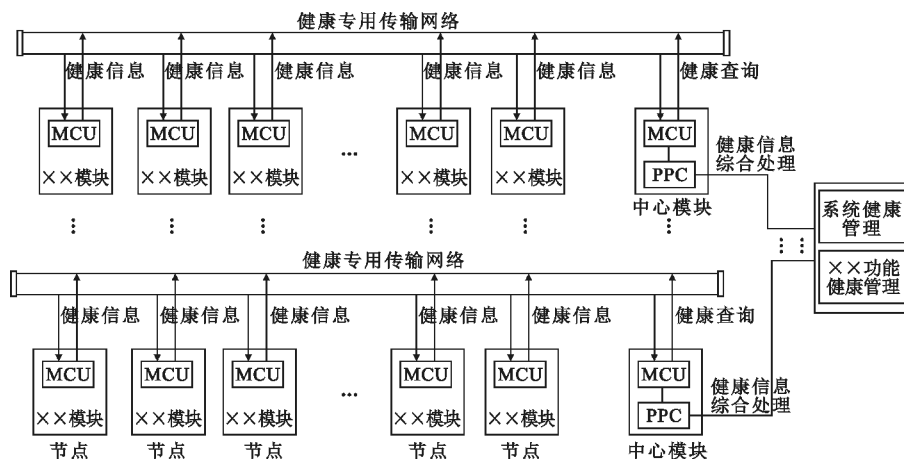


图 7 专用健康网络结构

该设计具备以下特点:采用多区域划分,区域划分子网方式,降低了故障诊断难度;区域中设计中心节点对子节点模块进行统一管理,包含数据搜集、剔除、打包、初级判断等;PHM 系统级管理对区域中心节点通信即可完成区域内硬件管理。

3.2.4 功能健康管理设计

功能的健康管理是结合功能使用的硬件资源、功能软件进行功能自检。并开展功能闭环自检。功能的健康结果需要对自检及闭环自检综合诊断。

(1) 功能硬件健康

功能使用的硬件资源的健康状态搜集及综合诊断,包含独用以及共用射频信道资源、信号处理资源等健康状态。

(2) 功能软件健康

功能使用的功能软件的健康信息的搜集以及综合诊断,包含不同模式状态检测、软件自检状态、功能软件链路状态检测等。

(3) 闭环检测

依据功能的正常工作模式,采用系统内部信号源闭环的方式对功能进行检测。

具体设计方法是在屏蔽外界信号基础上,通过接收标准信号与预置信号比对,确定功能检查结果,并将检测结果报送功能健康管理。设计中的开关矩阵、变频、AD 采样等功能所需链路均工作在正常的工作模式下,能有效隔离故障并降低虚警。

(4) 功能健康管理的初步综合诊断

通过功能使用的硬件、软件以及系统资源的健康状态,结合功能的性能指标特性综合判断功能可用性,并给出功能当前的健康状态,分为正常、告警以及故障。通过闭环检测,可以进一步剔除虚警,并确认故障位置。

3.2.5 系统健康管理设计

系统健康管理主要包括综合诊断、功能评估、状态策略、故障管理等环节,各个环节之间交联如图 3 所示。

3.2.5.1 综合诊断

综合诊断是通过多方式进行关联诊断,将故障结果与功能故障模式关联分析确定故障位置,流程如图 8 所示。其中综合诊断的难点在于多方式故障综合。多方式故障综合在设计上主要分为资源分类与多方式综合诊断分析两步。

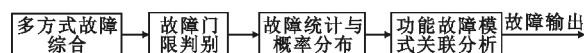


图 8 综合诊断流程故障

(1) 资源分类

以功能 1 为例对综合诊断进行说明。图 9 为功能 1 使用的资源,将信号处理、信道等资源用 A、B、C 替代,网络、传输总线用图 9 中互联线表示。功能 1 使用的独用资源为 A1、A2、A3,公用资源为 C1、C2、C3,功能 2 是与功能 1 资源相关功能。系统中所有资源分类与连接以蓝图形式预置于 PHM 系统中。

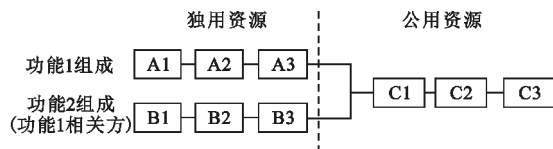


图 9 资源分类

(2) 多方式综合诊断

多方式综合诊断使用基于模型推导诊断结果,结合功能 1 自检及闭环自检结果、功能 2 自检及闭

环自检结果,将公用资源 C1、C2、C3 以及独占资源 A1、A2、A3 进行综合故障统计与概率分析。通过多

方式综合诊断,故障虚警率极大降低。图 10 为多方式综合诊断框图。

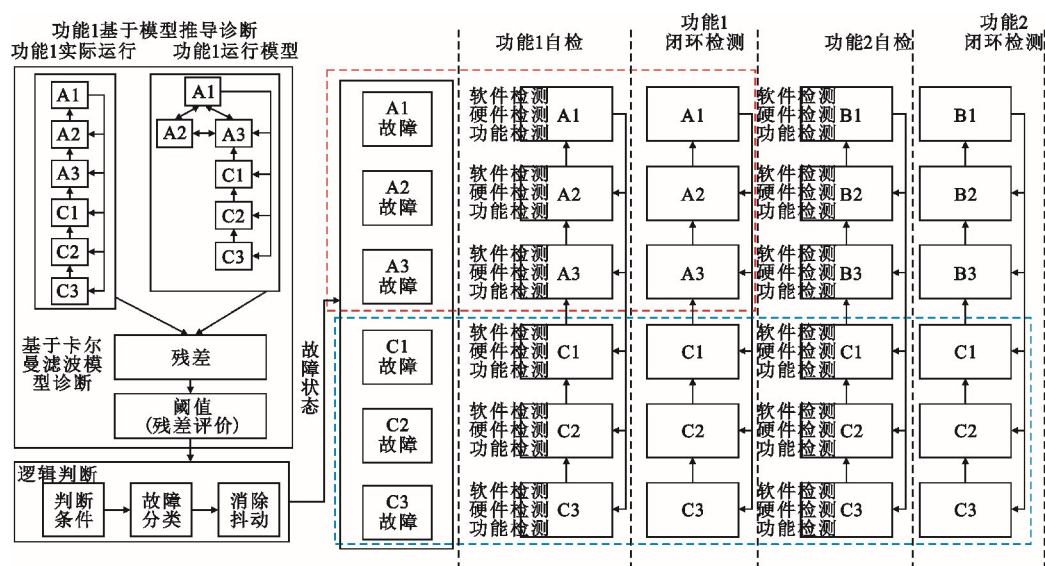


图 10 多方式综合诊断

图 10 中模型推导采用基于卡尔曼滤波^[9]方式对实际功能和功能模型产生残差,通过残差评价推断故障发生,将残差结果进行判别、分类、消除抖动等逻辑判断,最终给出基于模型的故障结果。

3.2.5.2 功能评估

功能可用状态的评估采用定性评估办法,通过构建功能与链路上每个资源状态的映射关系,基于综合故障诊断结果、当前功能与资源链路的配置关系,评估功能的可用状态。

3.2.5.3 状态策略

系统依据功能评估的结果,结合当前任务规划情况对生成该功能的状态策略,包括降级、停止、重构等策略,并提交显示控制,提醒操作员是否执行该策略。

3.2.5.4 故障管理

主要包括故障触发以及过滤、信息记录与分析。建立统一的故障触发及过滤策略,当故障达到定义的门限时,触发错误报告。对全系统的健康数据、故障日志、工作日志、系统运行状态等实时记录,供事后数据回放与分析。

3.2.5.5 系统健康实时显示与控制

通过主动方式对全系统运行及健康状态实时监测,并以图形化实时显示,对于出现的故障可以实时提示。

4 典型应用及效果分析

4.1 典型应用

(1) 起飞前

通过 PHM 系统地面检测设备、机上 PHM 对任务系统进行全面功能、性能及健康检测,并给出检测以及故障预测诊断结果,为飞机的任务规划提供重要依据。

(2) 巡航阶段

在任务系统启动工作时,PHM 通过加电检测、闭环检测等方式,对系统功能、性能以及系统运行状态全面检测,并给出健康检测以及故障诊断结果。在任务系统开始任务执行时,PHM 对系统进行实时运行状态监测、健康监测、综合故障诊断、实时数据记录等。当系统发生故障时,PHM 给出综合诊断结果以及故障影响的范围,记录故障,并将该结果以图形化方式实时提示任务机组。任务机组依据故障诊断结果,结合本次任务,确认功能重构等策略,将当前的系统剩余能力发挥至最大;并同时故障信息以及需要准备的备件通过数据链通知地面维修保障人员,地面保障人员依据故障信息,提前构建维修策略。

(3) 地面处理阶段

飞机抵达地面时,维修保障人员依据 PHM 提供的故障信息完成备件准备,通过更换备件,有效降

低飞机再次出动执行任务时间间隔。同时,维修保障人员依据故障诊断结果(如图 11 所示)开展故障件维修,降低故障件维修时间。

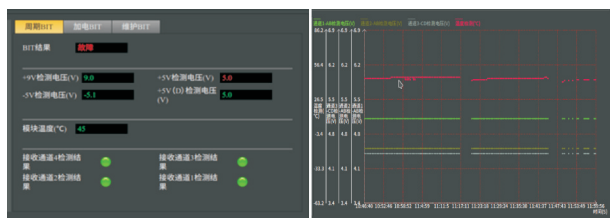


图 11 模块典型故障提示信息

4.2 效果分析

(1) 起飞前效果分析

依据检测及故障诊断结果,对已发生或者可能发生故障预警,能有效减少因故障引发的飞机返航。

(2) 巡航阶段效果分析

对于机上故障,PHM 给出功能评估以及故障策略,任务机组可以依据功能评估结果确认是否可用,依据故障策略确认功能重构或者返航,将当前系统剩余能力发挥至最大。

(3) 地面更换备件

由于飞机抵达地面前,保障人员已经依据故障将备件准备好,因此以往设计中地面检测、维修、更换等数天的工作流程直接被压缩至数小时乃至 1 h 内,飞机再次出动执行任务时间大大降低。

(4) 地面维修

由于机上 PHM 已经将故障信息隔离至芯片,因此地面检测、维修设备的时间也大大降低。以往设计中地面排查、检测、维修等数周的工作流程,可能被压缩至数天乃至 1 天内,维修设备时间大大降低。

5 结 论

机载电子信息的综合化、一体化设计越来越成熟,机载电子信息系统在作战中的效益越突出。通过研究特种飞机的综合化体系的特点,设计一体化的 PHM 系统是解决复杂电子信息系统健康管理设计的重要思路。

本文设计的 PHM 系统具备层次化体系结构、完善的基础资源管理、多方式故障综合诊断能力,以及统一可视化实时监测界面,使得 PHM 系统具备故障诊断准确、机上故障处理及时、地面维修高效等特点,为复杂综合化电子系统的健康管理设计提供了参考。

参考文献:

- [1] MOIR I, SEABRIDGE A. Military avionics system[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [2] 霍曼, 邓中卫. 国外军用飞机航空电子系统发展趋势[J]. 航空电子技术, 2004, 35(4): 5-10.
- [3] TSUI K L, CHEN N, ZHOU Q, et al. Prognostics and health management: a review on data driven approaches[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(6): 1-17.
- [4] ESTEVES M A M, NUNES E M P. Prognostics health management: perspectives in engineering systems reliability prognostics[EB/OL]. [2020-07-20]. <https://core.ac.uk/download/pdf/55639152.pdf>.
- [5] 卢海涛, 王自力. 综合航空电子系统故障诊断与健康管理技术发展[J]. 电光与控制, 2015, 22(8): 60-65.
- [6] 吕琛, 马剑. 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.
- [7] 景博, 徐光跃, 黄以锋. 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 161-169.
- [8] 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): 246-250.
- [9] BYUN Y S, KIM B H, JEONG R G. Sensor fault detection and signal restoration in intelligent vehicles[J]. Sensors, 2019, 19(15): 1-20.

作者简介:



张洪亮 男, 1984 年生于山东蓬莱, 2008 年获学士学位, 现为工程师, 主要从事航空电子综合传感器系统设计。