

民机故障预测与健康管理系统顶层架构设计技术研究

谢娜^{1,2}, 雷江妮²

(1. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240; 2. 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 民机故障预测与健康管理系统顶层架构是指对民用飞机故障预测与健康管理系统顶层技术和相关的应用体系结构及功能的顶层定义, 该架构设计的主要研究内容包括机上故障预测与健康管理系统技术架构、地面故障预测与健康管理系统技术架构、基于故障预测与健康管理的航空公司运营支持架构以及相关的通信体系架构等; 该技术研究是通过通过对民用飞机故障预测与健康管理系统应用体系的顶层架构及相应的功能的详细定义, 明确了民用飞机故障预测与健康管理系统顶层架构各组成部分所承载的功能和性能及接口关系; 文章的研究成果可以作为民用飞机故障预测与健康管理系统研制的基础和规范, 同时对其他军用航空设备的故障预测与健康管理的也有一定的指导意义。

关键词: 民机故障预测与健康管理的; 技术架构; 演示验证

A Technical Research of Prognostics and Health Management Architecture on Civil Aircraft

Xie Na^{1,2}, Lei Jiangni²

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Prognostics and health management top architecture on civil aircraft is top architecture and function definition for technology and application of prognostics and health management system on civil aircraft, including onboard prognostics and health management technology architecture, ground prognostics and health management technology architecture and prognostics and health management based airline operations support and related communication architectures, and so on. prognostics and health management top architecture on civil aircraft is to define the function and performance of each components of prognostics and health management top architecture on civil aircraft through the architecture and function definition for technology and application of prognostics and health management system on civil aircraft. Defining the function and performance of each components of prognostics and health management top architecture on civil aircraft; The research can regulate and guide the research on prognostics and health management technology of civil aircraft, and also has great significance in prognostics and health management project on other military aviation.

Keywords: prognostics and health management on civil aircraft; technology architecture; demonstration

0 引言

民机故障预测与健康管理的(简称 PHM)技术是保证飞机运营安全、实现飞机基于状态维修和降低飞机运营经济性的关键技术, 在技术层次上涉及总体技术、系统技术、基础技术等, 在应用上又涉及机载、地面、航空公司运营管理/维护支持、工业部门客服等。因此, 民机 PHM 技术设计跨专业、跨部门的协同, 因此需要详细规划、系统研究^[1-3]。

既往国内对 PHM 技术的研究多集中于 PHM 基础技术方面, 如故障预测与健康管理的模型如何建立、以及建模工具等方面; 在“十二五”期间, 工信部组织专家按 6 个专业方向编制了民机科研的规划, 其中涉及 PHM 技术的有

4 个专业组。各专业的先行研究使得目标和结果表现得冲突且重叠, 最终的成果形式难以在飞机的工程研制中得以应用。主要原因是在顶层设计, PHM 技术研究缺乏成体系的顶层架构、功能定义、指标体系、功能组成等技术方面的研究, 造成具体技术的研究目标不清晰。为此, 需先行研究飞机 PHM 的顶层架构设计技术^[4-5]。

1 总体思路及研究内容

1.1 总体思路

现在 PHM 的技术研究五花八门, 各成体系但却没有实质性进展, 主要是因为缺少 PHM 系统的顶层架构。顶层架构是 PHM 系统技术研究的基础, 可以依此来规范和指导飞机 PHM 系统的设计。

在基于模型的系统工程中, 最基本的要素是要满足使用的需求。因此, PHM 顶层架构技术研究也从需求开始, 通过使用需求来确定架构的功能, 再由功能分析来确定实现

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-21。

作者简介: 谢娜(1982-)女, 河南驻马店人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事测试性工程 PHM 设计方向的研究。

构型,将功能构型进行综合确定总体架构。通过仿真验证,架构又能涵盖功能,功能又能满足使用,就证明这是一个工程实用的顶层架构。

因此,我们需要在使用结构的基础上,确定系统的功能要求,按照功能要求逐项对每个功能进行实现构型分析,然后将每个构型进行综合,形成民机 PHM 系统的顶层架构。然后,与功能进行反复叠代、不断完善,最终确定民机 PHM 系统的顶层架构。总的研究思路如图 1 所示。

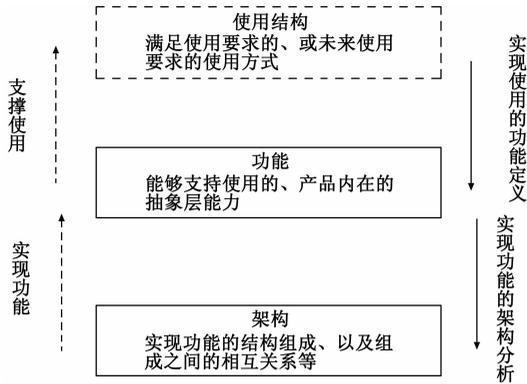


图 1 研究思路

1.2 PHM 的使用场景及需求分析

PHM 系统的使用场景:PHM 连续监控装备的使用、健康和安,检测部件或分系统的性能降级情况,然后隔离故障,预计失效时间,并计划需要完成的必要维修工作。在装备返回基地之前,把需要进行的维修活动信息通过数据链传给后勤,使其提前做好准备。

PHM 系统的通常组成为机上健康检测和地面维护管理系统两个部分。根据 PHM 系统的特殊性,按照使用/维护场景进行划分,其通常包括 6 个节点:

- 1) 客服的使用状态实时监控平台和产品支援、设计/支持团队的熟化工具等;
- 2) 机上 PHM 系统:连接机上一地面 PHM 系统的数据通信系统;
- 3) 地面健康管理平台;
- 4) 航空公司的地面运营管理系统;
- 5) 地面健康管理平台/航空公司的;
- 6) 地面运营管理系统一使用状态实时监控平台的网络通信系统。

在飞机的飞行过程中,通过机载 PHM 系统节点 2) 对飞机的状态进行监控,并对所有系统的故障信息自动进行相互关联,确认并隔离故障,最终形成维修信息和供飞行员使用的知识信息,通过节点 4) 传送给地面航路点的数据站点,由航路点网络系统传送给地面健康管理平台(节点 3)),地面健康管理平台(节点 3))和航空公司的地面运营管理系统(节点 4))据此来判断飞机的安全性,安排飞行任务,实施技术状态管理,更新飞机的状态记录,调整使

用计划,生成维修工作项目,以及分析整个机群的状态。而客服团队(节点 1))则根据地面健康管理平台/航空公司的地面运营管理系统一使用状态实时监控平台的网络通信系统(节点 f))所传的使用状态信息,提供产品支援和产品熟化(节点 1))。

1.3 研究内容

以总体思路为牵引,根据飞机的维护使用场景及需求分析,PHM 顶层架构设计技术主要涉及以下 5 项研究内容:

- 1) PHM 系统适航技术研究;
- 2) PHM 系统顶层架构研究及功能定义技术研究;
- 3) 机载 PHM 系统架构及功能布局研究;
- 4) PHM 地面支持系统架构定义及参数定义技术研究;
- 5) PHM 系统顶层架构仿真技术研究。

2 技术方案

2.1 民机 PHM 系统适航技术

虽然 PHM 技术近年来得到了快速发展,但目前还没有完全统一的标准来规定 PHM 在飞机上的使用^[5-8]。在适航方面,PHM 需要解决两个问题:

- 1) PHM 功能合格审定或批准的方式;
- 2) PHM 如何影响飞机、系统或机体的合格审定,从初始适航到持续适航。

由于 PHM 的功能目前仍作为咨询系统来考虑,所以 PHM 不涉及飞行安全,研制功能以研制保证等级(DAL)E 级来审定;PHM 对飞机系统和机体合格审定的影响目前还没有相应的规章,主要参数是结构或系统安全性评估的影响。

初始适航方面,PHM 对系统的影响需要关注的标准主要是有 PHM 功能的 CS.25.1309 解释材料、涉及到 PHM 的系统研制的 ARP 的使用以及 PHM 功能研制 ARP 的使用;PHM 对机体的影响需关注的标准主要是有 PHM 功能机体的 CS25.302 解释材料、有 PHM 功能机体的 CS25.571 解释材料、与 PHM 相对的 MSG3 过程。

持续适航方面,PHM 需要关注事件报告相应的标准,需要对事件报告、纠正措施及事件报告信任水平三个方面进行关注;同时应关注 PHM 对使用限制的影响,关注 ALS 的第 1 到第 4 部,以及可能的第 6 部分;再次,PHM 也应关注与维修相关的 145 部标准,所有地面设备 145 部要求定义的将是 PHM 地面设备的最低要求。

2.2 民机 PHM 系统顶层架构研究及功能定义技术研究

PHM 系统从结构组成上来说包括三个部分:

- 1) 机载 PHM 系统部分;
- 2) 数据服务系统部分;
- 3) 地面 PHM 系统部分。

其功能的实现依赖于三个组成部分的相互协调配合,

三个组成部分各自实现的总体功能如下:

1) 机载 PHM 系统部分: 通过有限的传感器收集飞机相关系统和结构的信息, 能够进行故障检测和初步故障诊断。

2) 数据服务系统部分: 通过空地实时数据链路, 在飞行过程中实时传输关键参数和信息; 通过地面无线网络, 在飞机落地后传输大量数据信息。

3) 地面 PHM 系统部分: 在机上系统进行初步的故障诊断的基础上, 利用接收到的数据和信息, 进行实时监控与健康应用。地面 PHM 系统属实时和事后处理系统, 负责完成对机载 PHM 系统提交的数据、信息和结论进行综合、仿真、评估、决策和优化。对于机载 PHM 系统所需的与维修管理、备件供应和人员培训等有关的需求做出恰当的、及时的和决策性的响应, 并同时将有用的信息通过联合分布式信息系统向飞机设计系统反馈, 并在同型号飞机之间共享。

民机 PHM 系统顶层架构研究及功能定义技术研究主要明确了民机 PHM 系统的使用结构、功能定义及与之配套的顶层架构, 包括其组成、大致的连接关系等, 使民机 PHM 系统研制、民机 PHM 技术研究及应用有一个总体的框架, 为形成规范体系奠定了基础, 如图 2 所示。

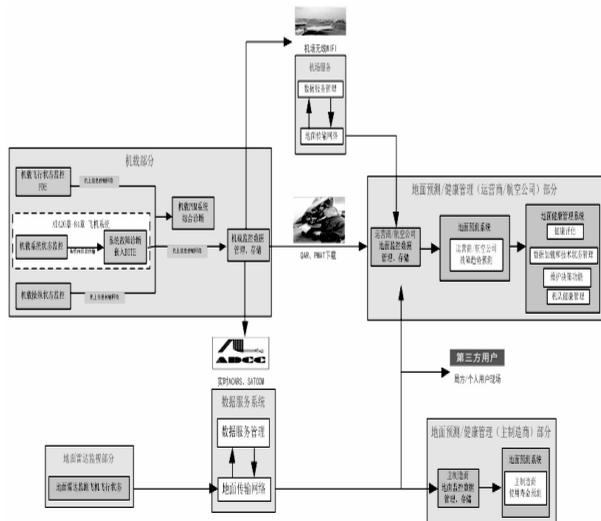


图 2 民机 PHM 系统的顶层架构图

PHM 能使飞机诊断自身的健康状况, 在事故发生前预测故障, 并且给出使飞机维修时间最少的解决办法。传统上, 空客、波音等国外民机公司主要依靠其供应商提供飞机健康维护系统以及其他集成商要求的性能参数/对象。一般系统的 OMS 被其作为一个黑盒子被集成在飞机层面, 一般具有 CMS 和状态监控功能。对于更特殊的 PHM, 并无具体要求, 现代 PHM 的概念通常是指利用传感器来采集飞机及系统的特征数据信息, 借助各种数据处理技术来诊断飞机及系统的健康状态, 因此, 结合国内外民机相关 PHM

系统分析, 根据民机 PHM 使用需求和功能需求, 它应具有状态监控、故障诊断、预测以及健康管理 4 大能力, 如图 3 所示。

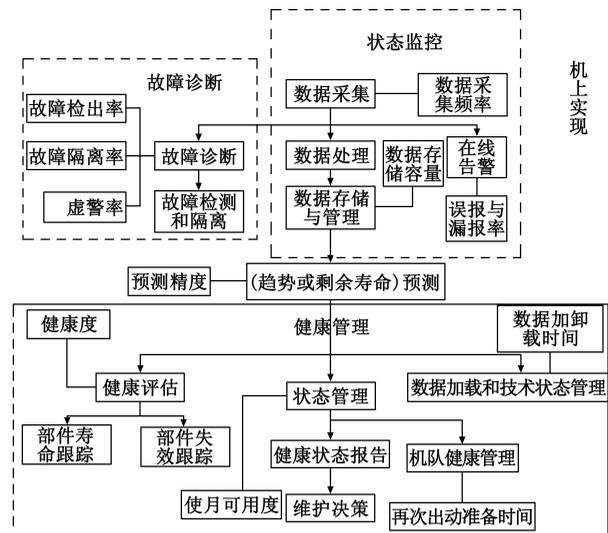


图 3 民机 PHM 系统功能图

PHM 系统指标体系再加上一些定性描述, 基本涵盖了 PHM 系统的 4 大功能, 其中, 数据采集频率、误报与漏报率、数据存储容量分别对应状态监控功能中的数据采集功能、在线告警功能和数据存储与管理子功能; 故障检测率和故障隔离率分别对应故障诊断功能中的故障检测和隔离子功能; 预测精度是 PHM 预测功能的度量单位; 最后, 用数据加卸载时间和使用可用度来反映健康管理功能。

2.3 民机机载 PHM 系统架构及功能布局研究

民机机载 PHM 系统架构及功能布局研究是参照空客、波音民机机载 PHM 系统的布局, 研究民机机载 PHM 系统架构及功能布局, 定义以 ATA 章节为对象背景的机载 PHM 系统架构及功能模块, 进而定义监控参数及设计流程。

本研究内容是通过对外典型民机型号 (B747、A380 等) 的机载 PHM 系统基本结构和原理进行深入研究, 采用共性技术提取、兼容民机机载功能系统的固有测试性设计, 使机载 PHM 系统做到功能相对独立, 解决了机载 PHM 系统的技术架构问题^[6-9]。

机载 PHM 系统的组成主要分布在 ATA 章节中, 其中主要有 23 章通信、31 章指示和记录系统、42 章集成模块化航空电子、45 章中央维护系统、46 章信息系统。机载 PHM 系统的组成如图 4 所示。

2.4 PHM 地面支持系统架构定义技术研究

民机运行地面 PHM 系统的最终目的是要实现飞机健康状况及时、有效、准确的把握, 以此为基础实现预防性维护和视情维修。各相关模块系统主要完成实时数据监控、高级诊断、数据加卸载及技术状态管理以及预测、机队健

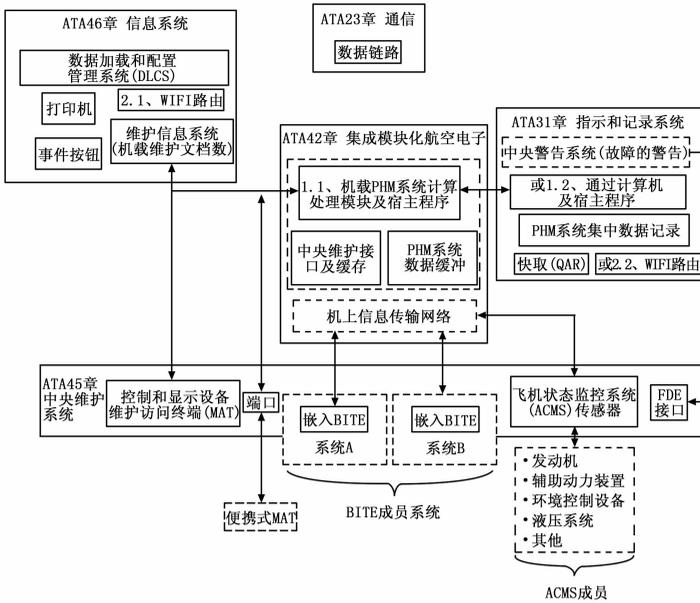


图 4 机载 PHM 系统组成图

健康管理、维修决策等基本功能，具体功能架构如图 5 所示。

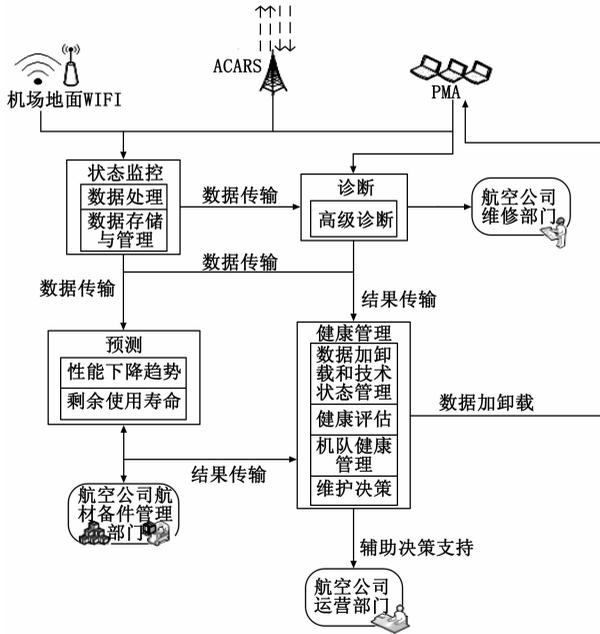


图 5 PHM 地面支持系统功能架构图

2.5 PHM 系统顶层架构仿真技术研究

为了减少风险、提高可靠性、降低系统成本，需要先建立一个民航 PHM 架构的研究仿真平台，有效验证系统 PHM 架构的合理性、可行性和扩展性^[10-11]。

通过对 PHM 功能组成（状态监控、数据处理、诊断、寿命分析、机队管理）和功能布局（机载 PHM 系统、地面 PHM 系统、地空数据通讯系统、机场维护保障系统），实现了对 PHM 顶层结构的仿真；仿真验证平台通过仿真运行数据进行分析，统计注入的故障激励数据在实际运行中的

结果，得出故障检测率、隔离率、虚警率、健康度等性能指标和费效比评价的方法，实现了对 PHM 顶层架构的验证评价；通过对飞行过程仿真、PHM 功能仿真和验证评价软件模块的集成调试和任务激励，实现了 PHM 功能使用过程的演示。仿真验证系统如图 6 所示。

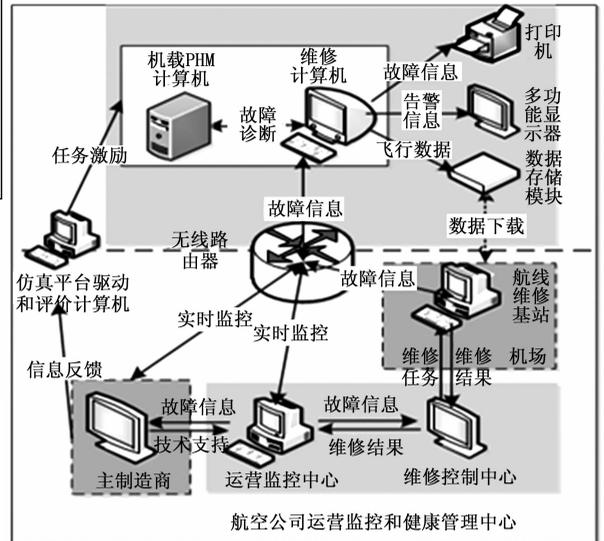


图 6 民航 PHM 系统仿真验证平台

仿真验证演示平台将通过 3 台计算机、若干显示器和一台无线路由组成。其中三台计算机分别仿真任务配置和评价系统、仿真机上状态监控和地面健康管理系统；显示器包括多功能告警显示器、状态监控显示器和维修控制中心显示器；PHM 仿真系统各个设备之间通过以太网和无线 WIFI 方式进行连接。

通过飞机 PHM 总体架构仿真技术研究，可实现如下技术指标：

- 1) 飞机 PHM 系统顶层总体仿真可模仿飞机 PHM 系统的使用或应用流程，包括机载子系统的 PHM 系统、地面 PHM 系统、地空数据通讯系统、机场维护保障系统等；
- 2) 实现飞机故障预测与健康管理系统主要功能仿真，完成数据采集、状态监控、数据处理、诊断、寿命分析、机队管理等环节；
- 3) 在架构确定的情况下，参照系统定义和系统参数类型完成对飞机故障预测与健康管理系统使用架构的仿真；在任务的驱动下，模拟飞机的使用、维修和保障过程，实现对整个架构系统组成的验证演示；仿真验证平台通过仿真运行数据进行分析，统计注入的故障激励数据在实际运行中的结果，对运行数据进行收集和统计分析，得出故障检测率、隔离率、虚警率、健康度等性能指标的设计来验证 PHM 顶层架构的是否合理；

4) 仿真验证平台通过配置管理系统可实现对架构、子系统及参数的加载替换功能实现可扩展性，同时仿真验证平台友好界面可随时查询相关的参数信息，具有开放性。