

基于 OSA-CBM 的 PHM 系统设计

付海燕^{1,2}, 阮育铭^{1,2}, 李兴旺^{1,2}, 吕亚辉^{1,2}

- (1. 故障诊断与健康管理技术航空科技重点实验室, 上海 201601;
2. 航空工业集团上海航空测控技术研究所, 上海 201601)

摘要: 结合 PHM 系统的使用目标和飞机各运行场景下 PHM 实现场景, 提出 PHM 系统主要实现的功能; 对 OSA-CBM 开展研究, 将 PHM 系统按照 OSA-CBM 的分层定义, 并且以某型号的 PHM 系统设计为背景, 提出了基于 OSA-CBM 的 PHM 系统设计框架; 介绍了该 PHM 系统按照开放式体系架构要求开展的功能定义、层次划分, 以及对每个层级的输入输出定义; 以 Rational ROSE 软件为模型开发工具, 建立了各层级间的数据流动关系以及同层级之间的数据传递关系, 对端口、算法、时序、配置等信息以 UML 语言进行了规定; 分别采用 Visual C# 2010 和 Matlab 软件开发平台实现了不同层级的功能, 最终共同搭建了 PHM 系统的演示平台, 实现了数据采集层、数据操作层、状态监测层及健康评估层、表示层等层级功能, 为后续 PHM 系统的多用户协同开发设计奠定了技术基础。

关键词: 故障诊断; 开放式体系架构; 分层体系结构; PHM; 固定翼飞机

Design of PHM System Based on OSA-CBM

FU Haiyan^{1,2}, RUAN Yuming^{1,2}, LI Xingwang^{1,2}, LÜ Yahui^{1,2}

- (1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Fault Diagnosis and Health Management, Shanghai 201601, China;
2. AVIC Shanghai Aero Measurement-Controlling Institute, Shanghai 201601, China)

Abstract: Combined with the application target of prognostic and health management (PHM) system and PHM implementation scenarios in each aircraft operation scenario, the main functions of PHM system are proposed. PHM system is defined according to the hierarchical definition of open system architecture for condition-based maintenance (OSA-CBM). A PHM system design framework based on OSA-CBM is proposed with the design of PHM system as the background. According to the requirements of open architecture, this paper introduces the function definition, hierarchy division, and input and output definition of each hierarchy. Using rational ROSE software as a model development tool, the data flow relationship of different levels and the data transfer relationship of same levels are established, and the information such as port, algorithm, timing sequence and configuration is specified by UML language. The different level functions are implemented on Visual C# 2010 and Matlab software development platform respectively, and finally the demonstration platform of PHM system is built, achieving the data acquisition (DA), data manipulation (DM), state detection (SD), health assessment (HA). It lays a technical foundation for multi-user collaborative development and design of PHM system.

Keywords: diagnosis; OSA-CBM; hierarchical architecture; PHM; aircraft

0 引言

故障预测与健康管理 (PHM, prognostics and health management) 系统已经成为各国军方、民用、工业等领域十分重视的核心技术之一^[1], 各专业团队经过多年的研究在各领域均有一定建树, 并且通过 PHM 系统的使用, 间接地获得巨大的经济效益。美军 F-35 的 PHM 系统从功能上代表了目前世界军机领域的最高水平, F-35 飞机上采用先进的传感器技术, 并借助各种算法和智能模型来诊断、预测、监控和管理飞机的工作状态。据估计, 通过采用 PHM 技术等各种先进技术措施可使故障不能复现率减少 82%, 使维修人力减少 20~40%, 后勤规模减小 50%, 出动架次率提高 25%, 使飞机的使用与保障费用比过去的机种减少 50% 以上, 而且使

使用寿命已经达到了 8 000 飞行小时以上^[2-3]。

随着科技的发展与技术创新, 快速故障诊断、寿命预测等 PHM 相关技术完全可以在飞机发生重大安全事故之前, 根据当前和预测的系统健康状况给机务人员进行建议, 使其能够对高保障代价的维修保障进行策划, 预先定位备件和安排维修, 提供一个高效且有效的保障环境, 实现基于状态的维修, 甚至是预测性维修。

故障预测与健康管理 (PHM) 系统主要实现对综合故障检测、故障隔离、故障预测、寿命预测及健康管理功能。通过在航空装备上加装 PHM 系统, 达到减少维修人力消耗、降低维修成本、增加飞行出动架次的目的, 从而实现装备的高效、快速、自主保障。而航空装备由传统的状态

收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-03-15。

作者简介: 付海燕(1983-), 女, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 付海燕, 阮育铭, 李兴旺, 等. 基于 OSA-CBM 的 PHM 系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 1-7.

监控和故障诊断技术向预测和健康管理 (PHM) 技术方向转变^[4-5]。采用 OSA-CBM (open system architecture for condition-based maintenance) 可使得 PHM 系统的集成者和供应商不需要针对每个机型搭建一个新的或者专门的架构, 而各供应商可以集中精力突破自身专业方向, 使得算法水平, 专业技术能力得到大大提升, 同时也允许各供应商在同样的开发框架下开展竞争和协作。而在新飞机型号的研制开发过程中, 航空设备的供应商选择均采用竞争择优或是双流水的方式进行, 因此 OSA-CBM 成为部队以及各主机厂所积极发展的方向, 在此前提下, 主机场所能够保证满足 PHM 系统完整的功能前提下, 对供应商的选择和更换具备更好的可操作性, 这也使得 PHM 系统的准入门槛更低。

本文主要针对某型飞机的 PHM 需求, 深入分析各层级的功能, 在此基础上提出基于 OSA-CBM 架构的 PHM 系统设计, 并且运用建模软件, 采用 UML 建模语言建立了各个层级的模型, 并搭建了 PHM 系统演示环境, 对数据采集、数据处理、状态监测等层级进行了演示。

1 系统结构及原理

PHM 系统主要由机载系统和地面系统两部分组成^[6-7], 机载系统主要由飞机的各成员系统、机载传感器分别采集 BIT 信息^[8]、状态信息、振动信息、环境参数信息等, 所有信息经 PHM 机载系统进行分析处理、综合诊断推理, 在机上给出状态监测结果和故障诊断结果, 并将重要的故障警告系统进行告警, 所有采集的原始数据以及诊断结果在地面将以无线链路方式或者数据卡卸载方式进行数据下载, 输入至 PHM 地面系统进行深层次的分析, 经健康评估、预测, 给出相应的评估结果, 与后勤保障系统相连接, 为后勤保障提供最优化维修维护策略, 从而缩短维修的时间并提升飞机执勤率。

从 PHM 系统功能着手, 结合用户的使用要求, 对场景进行分析, 从而提出在各个场景下 PHM 系统所需完成的功能, 具体分析如图 1 所示。

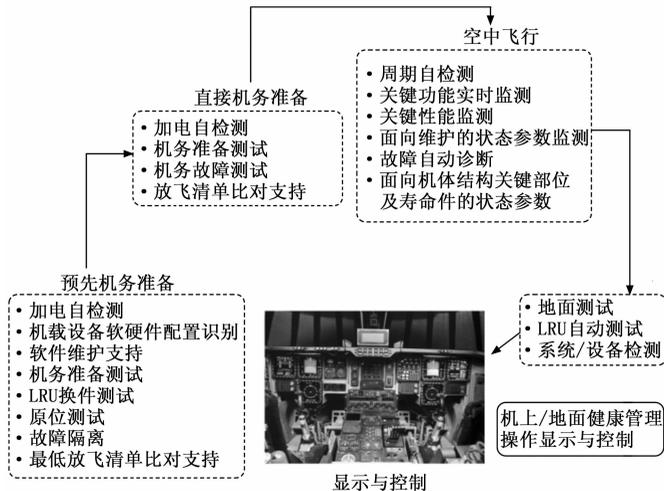


图 1 飞机各运行场景下的 PHM 功能

综合 PHM 系统的各应用场景, 梳理 PHM 系统的主要功能如下:

1) 实时状态监测: 对机上的部件、子系统、系统、飞机进行实时状态监测, 特别是实现飞机关键功能、性能的设备开展实时状态监测。其中部件的实时状态监测可由其自身或者安装传感器实现该功能, 所采集到的数据作为后续的上层系统的数据输入; 而子系统、系统、飞机的实时状态监测基础则是底层数据, 子系统、系统的实时状态监测主要实现对于超限、可判断的故障进行记录、告警, 并对危机到飞行安全的告警信息进行实时输出给操作人员;

2) 综合故障诊断: 基于机上实时采集的状态数据进行故障判读, 对于单一故障可直接进行故障判断, 并进行故障上报。对于多相关性的故障, 则需要对相关数据提取、组合后, 通过故障方程、模型等方式进行故障的确定、隔离, 给出确定发生故障的设备, 从而降低故障虚警率, 提升故障告警的置信度;

3) 寿命管理功能: 基于机上监测参数, 对关键有寿件进行管理, 包含对关键结构件的使用信息 (使用信息, 疲劳数据)、发动机的使用状态等信息进行采集, 使用模型或算法给出关键有寿件到寿预期^[9];

4) 地面测试支持: 对于在地面机务人员、维修维护人员的检查, 配合其完成对全机设备的检测, 并结合出行任务给出相应建议, 以及根据故障信息给出维修维护的知道意见。

5) 健康评估: 是对设备、系统或者组件的健康状态进行评估, 给出健康度评级, 为用户的使用、维护、保养计划提供帮助。

6) 趋势预测: 通过对设备的历史数据和行为模式的分析, 可采用基于模型的方法 (损伤累计模型、物理模型等)、基于数据驱动的方法 (回归分析、神经网络、深度学习、模糊系统等)、基于统计可靠性的方法 (贝叶斯方法、威布尔分布、模糊逻辑等) 预测设备的故障和失效, 从而提前采取相应的维修和保养措施。

7) 决策支持: 基于健康评估和趋势预测的结果, 制定合理的维修计划, 避免不必要的维修和停机时间, 提高设备的可靠性和利用率。

2 PHM 相关标准

针对 PHM 系统相关的标准主要包括 ISO (国际标准化组织)、MIMOSA (机器信息管理开放系统联盟) 以及 IEEE (美国电气和电子工程师协会), 其分别制定了以下相关标准^[10]。

2.1 ISO 相关标准

1) ISO 13372: 《机器状态监测和故障诊断领域术语》, 该标准定义了基线、失效、异常、征兆及状态监测等术语。

2) ISO 13373: 《机器状态监测和诊断——振动状态监测》, 该标准包含机器振动状态监测、振动数据处理分析描述、状态监测相关数据交换通讯方式方法、提供和显示机器振动监测所用的数据的格式等。

3) ISO 13374:《机器状态监测和诊断——数据处理、通信和表达》,该标准包含对数据处理、数据交换格式以及方法、数据显示的格式,数据处理需求,主要是对状态监测与诊断各层的功能、数据输入、数据输出、通信需求、数据显示需求等方面的描述。

2.2 IEEE 相关标准

1) IEEE Std1232: 测试和诊断环境的数据交换与服务标准 (AI-ESTATE) 主要是围绕测试环境的人工智能交换与服务标准。通过模块封装、接口边界定义、交换格式开发、服务标准化等,为具有互操作性、无特定厂商和产品的诊断系统的开发提供了方法。

2) IEEE Std1636: 该标准包含 IEEE Std 1636.1 测试结果标准和 IEEE Std1636.2 维护活动信息标准。IEEE Std1636.1: 2007 利用被测设备的测试历史信息,采用 XML 格式及信息模型,提供了一种提高诊断、预测效果的方法。IEEE Std1636.2: 2010 则针对维护过程提供出一种 XML 方案和一种信息模型,便于扩展至 PHM 领域。

2.3 MIMOSA 相关标准

MIMOSA 发布了两个标准: OSA-EAI (企业应用集成的开放系统架构) 和 OSA-CBM (开放系统架构的视情维修标准)^[11-12]。

1) OSA-CBM: 视情维修系统的标准结构、框架,进行了层级划分,并且对各个层级提出要求,OSA-CBM 是 ISO 13374 功能规范的拓展应用。在 ISO 13374 的各功能块基础之上添加了数据结构,定义了功能模块的接口,并且提供了 CBM/PHM 系统的标准体系结构。各模块可以单独设计,在标准下建立的规范模块可以无缝集成,从而简化了软硬件的集成,也大大提升了系统的兼容性。

2) OSA-EAI: 核心为公共关系信息模式,设备维护信息关系数据模式,涵盖 CBM 子系统中所要管理的所有信息、数据。

通过研究 ISO 关于机器的状态监测和诊断相关标准,其中 OSA-CBM 标准是 ISO 机器的状态监测和诊断标准的实现^[13],用于规范基于状态的系统设计,以及 CBM 系统之间数据交换的开放标准。OSA-CBM 标准采用 UML 语言对各层级进行定义,从而将各模块见的交互信息从通信接口的定义等工作中分离,实现多种实现方法的有机结合。如图 2 所示,基于 OSA-CBM 标准的 PHM 系统根据功能进行模块的划分^[14],OSA-CBM 体系结构分为 6 个层级,分别是数据采集层、数据处理层、状态监测层、健康评估层、预测评估层、决策支持层,以上 6 个层级的信息通过表示层进行显示,达到可视化效果,各层的定义及其主要功能如下:

1) 数据采集层 (DA, data acquisition): DA 层主要指数据的获取,数据类型包括从传感器获取模拟数据、从总线获 BIT 信息,从其他系统获取环境参数信息,或者通过人工输入获取相关信息,以上的信息作为 PHM 系统的数据基础,为后续 SD、HA、PA、AG 的实现奠定数据基础,

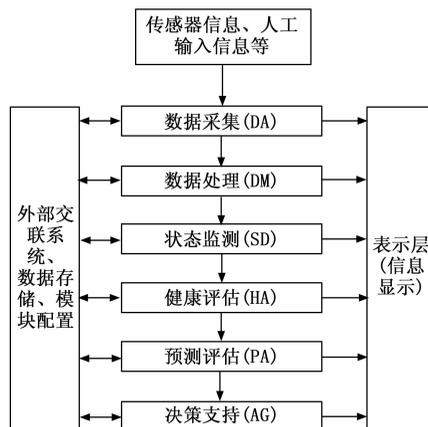


图 2 OSA-CBM 体系结构

并且 DA 层还应具备数据转换和传输等功能。

2) 数据处理层 (DM, data manipulation): DM 层次模块负责处理数据采集层的信号和数据,并将数据处理变成所期望的形式,例如将采集到的转速信号转换成具体的转速值,将振动信号提取特征参数,以便于后续层级的功能应用。

3) 状态监测层 (SD, state detection): SD 层次模块将 DA、DM 的输出的值与某基线值 (阈值),或者某剖面的数据相比较,并且给出比较后的结果,且应该将结果进行输出,如果系统功能允许,应该结合运行环境给出判断结果,并且随着运行环境、状态给出对应判断结果。例如需要结合飞机是起飞、降落、平飞状态,从而判断起落架是否正常;

4) 健康评估层 (HA, health assessment): HA 层接收 SD 层或其他健康评估模块的数据,通过智能算法进行系统的健康状态评估,并且与运行环境建立关联关系,诊断出异常点,最终输出部件、系统的健康等级,例如飞机中由于供电系统故障导致的某 LRU 功能失效,则需要通过综合诊断评估,结合影响某 LRU 功能失效的系统状态 (供电系统),给出供电系统出现故障的评估结果。

5) 预测评估层 (PA, prognostics assessment): PA 层综合利用 DA、DM、SD、HA 等多层数据信息,对系统进行趋势分析、剩余寿命的预测,未来健康状态的分析等。例如从压差、压力、油量、温度、污染度告警等信息综合判断油滤性能退化趋势。或者通过对历史使用数据统计对有寿件进行寿命评估。

6) 决策支持层 (AG, advisory generation): AG 层接收来自 DA、DM、SD、HA 的数据,通过推理,给出更换、维修等措施与建议,为维修维护人员提供技术支持,以使得其能够提前备件、提早进入维修维护环节。

以上 6 层的数据均通过表示层 (PM, presentation module) 进行信息表示,PM 层主要包括人机交互接口和机机交互接口,人机接口指 SD、HA、PA 和 AG 等层的数据通过人机交互界面进行可视化展示,机机交互接口用于实

现各模块之间以及各个 CBM 系统之间的数据信息传递。

3 系统设计

3.1 设计思路

通过研究 PHM 系统使用目的, 系统的体系结构以及相关标准等, 并且结合某型机的实际需求, 以 OSA-CBM 开放式体系架构作为主要参考模型, 深入分析 6 个层次的结构, 梳理每层级的输入、输出, 建立 PHM 系统各层级的数据流动关系, 数据传递时序, 状态转化关系等, 分析各层级所包含的端口、事件、算法等信息。在 Rational ROSE 软件的开发平台上, 采用 UML 建模语言对接口内容进行了详细描述。用 Visual C# 2010 和 Matlab 软件建立 PHM 系统的模拟样机。其中包含了两个开发平台之间的模块调用, 内部数据处理、API 接口以及 XML 数据解析等。最终搭建 PHM 的演示环境, 主要从数据采集、数据处理至状态监测层级进行了实例化的展示, 具体的设计思路如图 3 所示。

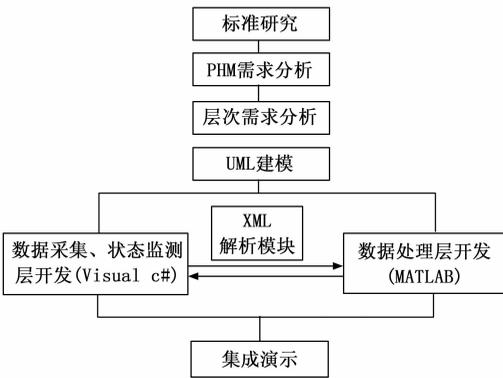


图 3 设计思路

3.2 某型机各层级设计

根据 PHM 系统的使用场景, 结合 OSA-CBM 体系结构的层次, 对各个层级提出具体的功能需求。

3.2.1 数据采集层 DA 功能

实现 PHM 系统的功能的前提条件是能够获取围绕飞机正常工作的各类数据, 而该类数据不仅数据量较大而且种类众多。其中包括结构化数据和非结构化数据, 结构化数据主要指飞机的飞行状态的数据、关键部件和系统的状态参数, 并且针对 PHM 需要实现的功能而飞机尚缺的监测点所增加的专用 PHM 传感器数据, 非结构化数据则包括人工的录入信息, 该类数据主要以文本、图片、视频等形式存在的外场维护信息。主要的数据类型如下:

- 1) 采集与飞机运行状态相关的参数;
- 2) 采集机上各 LRU 的 BIT 信息;
- 3) 采集与发动机、结构等振动相关数据;
- 4) 人工录入信息收集 (包括设备配置信息、机型信息以及其他历史相关信息);
- 5) 采集对 PHM 系统的指令信息;
- 6) 采集 PHM 系统本身 BIT 信息;
- 7) 其余层级的数据输出 (作为历史数据保存, 后续用

于趋势分析等功能)。

数据采集功能如图 4 所示。

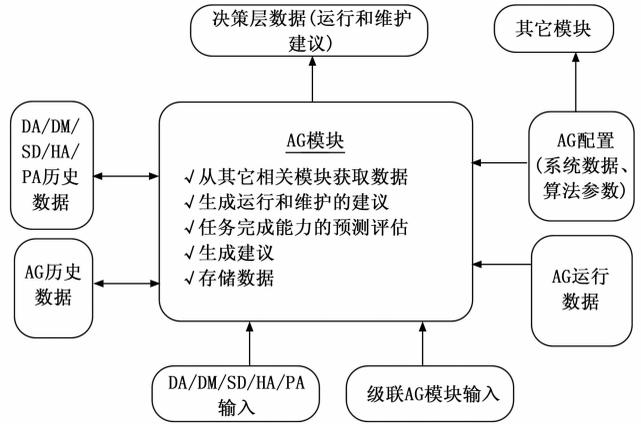


图 4 数据采集层功能图

该层级在 PHM 系统中主要是通过机载系统进行数据采集, 本演示系统对机载系统进行了模拟, 数据则来源于以往型号过程中所获取的数据。

3.2.2 数据处理层 DM 功能

采集的原始数据中存在大量噪声、数据异常等情况, 如果对这些数据直接采信则会大大降低后续层级的可信度, 因此对获取的数据需经过数据筛选、清洗、继承、变换以及数据规约等过程才能用于后续的状态监测、故障诊断等模块的输入。以某型机获取的数据为例, 4 个小时的数据采集数据量经解析后高达 10 G 的数据量, 而 PHM 系统则需从繁杂的数据量中选取有效的信息, 去除无效、异常值, 以保证数据的正确可靠, 改善数据的质量。同时根据故障诊断模型、健康评估模型的输入要求, 对数据进行参数离散化处理。按照约定的格式输入至故障方程或者模型中。

数据处理模块所需完成的功能以及数据的输入输出情况如下:

- 1) 获取 DA 模块的数据;
- 2) 通过获取的与飞机运行相关参数, 确定飞机状态并存储;
- 3) 人工录入信息收集 (包括设备配置信息、算法处理相关参数);
- 4) 对 BIT 信息进行存储;
- 5) 无效数据、异常数据处理;
- 6) 对发动机、机体等相关振动信息通过信号处理算法提取特征参数;
- 7) 参数离散化: 对获取的参数、BIT 信息、飞机状态信息有效数据按照模型输入要求进行组合。

数据处理层功能如图 5 所示。

3.2.3 状态监测层 SD 功能

状态监测层主要是对有标准的值或范围亦或是能够直接由部件、系统本身给出是否异常的参数进行状态评估,

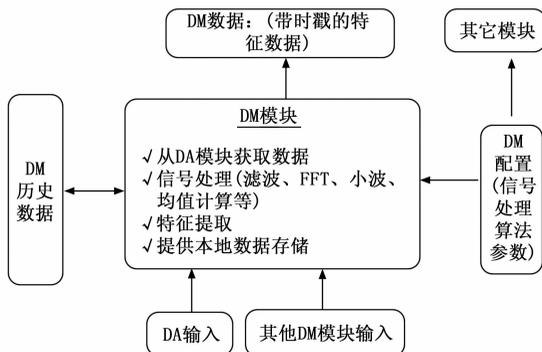


图 5 数据处理层功能图

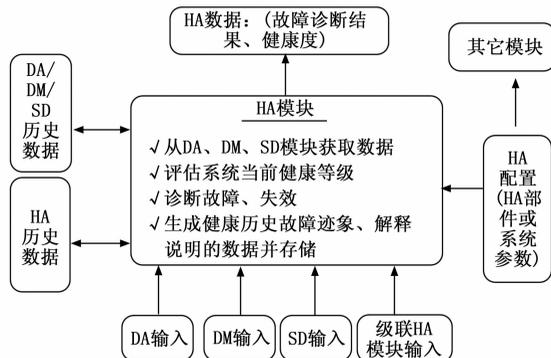


图 7 健康评估层功能图

该层主要的功能如下:

- 1) 获取 DA/DM 模块输出数据、历史数据等;
- 2) 人工录入信息收集 (包括设备配置信息、阈值等相关参数);
- 3) 结合当前飞机状态, 从 DA、DM 输出数据选取表征飞机状态的参数与对应阈值或者正常状态剖面进行对比, 得出正常/异常结果;
- 4) 对能直接进行故障判断的数据进行告警输出;
- 5) 状态监测结果的存储。

状态监测层如图 6 所示。

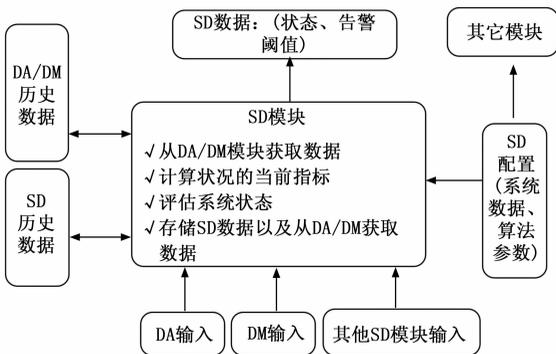


图 6 状态监测层功能图

3.2.4 健康评估层 HA 功能

健康评估层是在状态监测层的基础上, 对故障进行综合诊断, 对于有故障传递路径和交联关系的故障进行分析, 给出最终的故障确定发生的位置, 其主要功能如下所示:

- 1) 获取 DA/DM/SD 模块输出数据、历史数据等;
- 2) 人工录入信息收集 (包括部件、系统参数);
- 3) 通过 BIT 信息进行全机综合诊断;
- 4) 根据 SD 输出数据对超过阈值, 异常情况根据飞机当前状况给出系统是否故障, 并且综合评估飞机的健康等级, 进行系统重构, 给出飞机是否能够继续完成任务的诊断结果;
- 5) 针对部分部件给出健康度评估;
- 6) 健康评估结果的存储。

健康评估层如图 7 所示。

3.2.5 预测评估层 PA 功能

预测评估层主要的对象为有寿件、组件、飞机, 有寿件的预测评估主要基于前期获取的参数, 进行统计分析, 给出评估结果, 组件、飞机的预测则是对各部件的健康情况进行评估后经预测模型给出组件、飞机的健康度。

- 1) 获取 DA/DM/SD/HA 模块输出数据、历史数据等;
- 2) 人工录入信息收集 (包括系统参数、算法所用参数);
- 3) 对有寿件预测出剩余寿命;
- 4) 通过趋势模型, 对部件的故障、失效进行预估;
- 5) 评估飞机的健康状况;
- 6) 预测结果的存储。

预测评估层如图 8 所示。

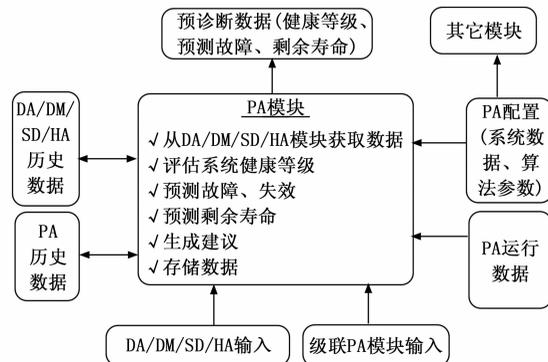


图 8 预测评估层功能图

3.2.6 决策支持层 AG 功能

PHM 系统的最终目标是与后勤保障相连接, 给维修保障人员一共维修维护支持。决策支持层利用前述各层级实现的功能, 从诊断的故障件与维修维护手册相联系, 给出最优的后勤保障决策和快速维修策略, 使得用户能够动态调度维修资源, 实现快速维修和自主式后勤保障。决策支持层的主要功能如下:

- 1) 获取 DA/DM/SD/HA/PA 模块输出数据、历史数据等;
- 2) 人工录入信息收集 (包括系统参数、算法所用参数);
- 3) 根据健康评估结果进行维修工作, 并且结合维修工

飞过程中获取的振动数据和部分 BIT 信息作为模拟数据的输入, 最终进行了模拟演示。

以 Visual C# 2010 和 Matlab 软件作为开发平台, 其中数据采集、状态监测、健康评估层采用 Visual C# 2010 作为开发平台, 而数据处理层则采用 Matlab 对特征参数进行提取。数据采集层、数据处理层、状态监测层和健康评估层均能通过软件界面进行显性化展示。

具体的演示界面如图 11 所示。



图 11 基于开放式体系架构 PHM 系统演示环境

图 12 中展示的是对某次试飞数据进行模拟输入, 数据采集模块对试飞数据进行获取, 数据处理模块调用 Matlab 软件, 对其进行滤波和 FFT 变换后, 获取频域特征值, 最后由状态监测模块给出结果。健康评估层则对采集的 BIT 数据进行综合分析, 经综合诊断模型推理诊断后给出最终故障诊断结果。该演示系统通过良好的接口定义, 实现了在不同开发平台对不同层级功能进行实现, 并有效的将各层级功能链接, 实现了 PHM 系统基本功能^[19]。

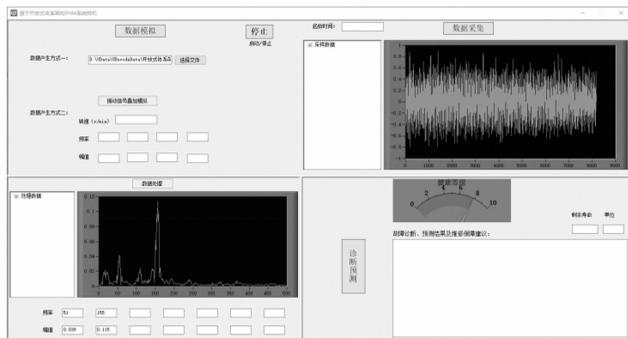


图 12 数据采集、处理、故障诊断演示

5 结束语

基于 OSA-CBM 体系结构的飞机 PHM 系统设计, 结合项目需求对 PHM 系统各层级的需要实现的功能性能进行分析, 建立了各层级之间的数据流动关系以及同层级之间的数据传递关系, 并以规范 UML 语言进行了模型的建立, 在模型中对端口、算法、时序、配置等信息进行了规定, 面向多人多用户多开发环境下共同进行 PHM 系统设计开发, 通过搭建的演示环境可证明, 采用 OSA-CBM 体系结构进

行 PHM 系统设计, 其开发效能能够得到有效的提升, 同时可以满足多设计团队共同开发。该平台的难点是需要对层级的接口进行详细准确的定义, 并充分考虑兼容性, 才能使得项目在后续过程中能够顺利推进。该演示平台由于缺少部分预测评估的数据基础, 功能尚不完善, 但是数据采集层、数据处理层、状态监测层、健康评估层、表示层等层级已经进行了实现, 其为后续 PHM 系统的深入开发设计奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] 吴建. UML 基础与 Rose 建模案例 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [2] 张宝珍, 曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术 [J]. 航空维修与工程, 2005 (6): 20-23.
- [3] MEILIR P J. UML 面向对象设计基础 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [4] HESS A, CALVELLO G, DABNEY T. PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept [C] // Aerospace Conference 2004, Proceedings, IEEE, 2004, 6: 3543-3550.
- [5] 彭宇, 刘大同, 彭喜元, 等. 故障预测与健康管理体系综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 1-9.
- [6] 蒋觉义, 利璠, 曾照洋. 故障预测与健康管理体系研究 [J]. 测控技术, 2013, 32 (11): 1-5.
- [7] 吕镇邦, 沈新刚, 邹会荣. 机载 PHM 系统软件设计与验证 [J]. 航空试验与测试, 2020, 39 (4): 11-16.
- [8] 余汇. 基于 OSA-CBM 的飞机状态监控技术研究 [J]. 电子世界, 2016 (16): 66.
- [9] 吴高杰. 基于 OSA-CBM 的设备健康管理体系结构研究 [J]. 价值工程, 2017, 36 (1): 75-77.
- [10] 丁秋月. 故障预测与健康管理体系结构综述 [J]. 航空维修与工程, 2021 (1): 70-74.
- [11] 杨融. 民用飞机健康管理体系研究 [J]. 科学与财富, 2013 (7): 28-29.
- [12] 殷苏东, 陈旭华. 基于状态的维修研究现状与发展趋势 [J]. 科学技术与工程, 2008 (6): 1530-1535.
- [13] 吕镇邦, 孙倩, 王娟. 民用客机健康管理体系的工程技术研究 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (7): 27-34.
- [14] 付昕, 王菲, 熊毅, 等. 民用客机 PHM 地面支持系统体系结构研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 57-60.
- [15] 王景霖, 林泽力, 郑国, 等. 飞机机电系统 PHM 技术方案研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (5): 163-166.
- [16] 王红, 杨占才, 靳小波, 等. 航空机电系统先进诊断与预测技术研究 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (7): 40-47.
- [17] 李小波, 王宏伟, 李良锋, 等. 基于 PHM 的发动机旋转部件状态维修决策研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (36): 9113-9115.
- [18] 杨淳红. 视情维修技术及其在飞机维修中的应用 [J]. 硅谷, 2014, 7 (7): 134-135.
- [19] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.