

PHM 仿真试验系统设计与应用

孙 丁

(中国航空工业集团公司 西安飞机设计研究所, 西安 710089)

摘要: PHM 系统是保障机载设备稳定安全运行的重要工具; 通过构建 PHM 仿真试验系统, 可以对系统架构、总线接口、数据处理、分区存储等系统功能进行仿真验证, 以便尽早发现 PHM 系统设计初期存在的各种问题, 及时对方案进行改进和优化, 降低系统研制的风险; 对 PHM 仿真试验系统的设计进行了研究, 提出了一种 PHM 仿真试验系统设计与应用方法, 从总体层次、软硬件设计等方面介绍仿真试验系统的组成和功能设计; 搭建飞机级及各区域级的仿真设备, 构建基于总线通讯的交联仿真网, 支持数据、模型、流程等功能的仿真, 并在最后给出了仿真试验的主要流程; 实际应用表明, 本方法能够较好地支撑仿真验证试验, 从而缩短试验周期, 提高研制效率, 为系统设计工作提供支撑从 PHM 系统功能验证的角度为 PHM 系统研制提供支撑。

关键词: PHM; 仿真器; 仿真试验; 功能验证; 仿真流程

Design and Application on PHM Simulation Test System

SUN Ding

(The First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: A Prognostics and Health Management (PHM) system is an important tool to ensure the stable and safe of airborne equipment. The PHM simulation test system is constructed to simulate and verify the system architecture, bus interface, data processing, partition storage and other system functions, find out various problems in the initial design of the PHM test system as soon as possible, improve and optimize the scheme in time, and reduce the risk of system development. The PHM simulation test system is studied to propose a design and application method of the PHM simulation test system, which introduces the composition and functional design of the PHM simulation test system from the system level, software and hardware design. The simulation equipment of aircraft level and regional level is built, the cross-linked simulation network based on bus communication is constructed, and the simulation of data, model and process are supported. Finally, the main processing of the simulation system is carried out. The practical application shows that this method can support the simulation verification test, shorten the test period, improve the development efficiency, and provide a support for PHM simulation test systems.

Keywords: PHM; simulator; simulation test; functional verification; simulation process

0 引言

随着飞机性能要求的提高和飞行任务的复杂化, 飞机系统的设计复杂度日益攀升, 综合化、智能化程度不断提高, 出现故障的可能性以及出现故障后所要付出的成本代价也越来越高, 因此复杂系统的故障诊断和维护逐渐成为研究者关注的焦点。传统的事后维修和计划维修方式难以应对千变万化的情况, 不能满足飞机的使用要求。要想实现快捷方便的视情维修, 就需要设备具备能够对自身可能的故障进行诊断、预测以及对运行过程中健康状态进行管理的能力, 由此产生了预测与健康管理的概念^[1-5]。

在 PHM 系统研制过程中, 需要对数据、模型、流程等进行仿真验证, 同时还需经常与各系统专业沟通需求以及及时改进和优化研制方案, 降低系统研制风险。仿真试验系统在各种复杂设备的 PHM 系统研制过程中能够发挥先行验证的作用, 系统能够以较低的成本开展目标系统的仿真试验, 对 PHM 系统的各项功能性能进行仿真与验证, 为

PHM 系统的研制提供重要支撑, 设计一套 PHM 仿真试验系统具有可观的理论意义和工程实用价值。本文将对 PHM 仿真试验系统的设计与应用开展研究, 针对系统开展需求分析、系统总体层次设计、系统硬件与软件设计, 提出 PHM 仿真试验系统和试验流程的设计方案, 为 PHM 系统研制提供有效的参考和依据^[6-10]。

1 仿真试验系统需求分析

1.1 仿真试验系统总体需求

PHM 仿真试验系统的总体需求为通过该系统为 PHM 系统方案设计提供支撑, 搭建飞机级及各区域级的仿真设备, 并构建基于总线通讯的交联仿真网, 通过数据、模型、算法、流程、软件等功能的仿真, 实现 PHM 系统各相关功能的全机分配及优化、系统架构组成验证及其优化、面向自适应保障的功能逻辑验证、对系统关联数据进行处理与存储、同时实现系统接口及通信的仿真优化。

1.2 仿真试验器需求

仿真试验器用于仿真机载飞机级、区域级 PHM 计算机

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-05-15。

作者简介: 孙 丁(1997-), 男, 河北邢台人, 硕士, 助理工程师, 主要从事测试性与健康管理方向的研究。

引用格式: 孙 丁. PHM 仿真试验系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 245-250, 257.

功能,包括飞机级、区域健康管理数据的采集、处理、存储、故障诊断、地面测试、与区域健康管理的交互等。支持仿真飞机级、区域级 PHM 仿真器与相关设备的数据接口及相应的数据的信息采集、解析处理、分发与存储、故障诊断运行、测试执行、接口信息交互等功能仿真,仿真的功能、数据、协议、模型、信息来自于试验系统的配置。

1.3 仿真试验需求

PHM 系统仿真试验系统需要通过仿真试验系统网络建立飞机级 PHM 仿真器、区域 PHM 仿真器以及显示控制仿真机之间的数据交联,对系统架构、方案、总线接口、数据处理、分区存储等系统功能进行仿真验证^[11-12]。飞机级 PHM 仿真器与各区域级 PHM 功能仿真器进行数据交互,在飞机级实现数据汇总采集,进行故障诊断及状态监控等功能处理,显示控制仿真机完成 PHM 系统显示与控制,实现仿真过程中故障、参数等信息的显示^[13]。

2 仿真试验系统设计

2.1 系统总体层次设计

基于飞机健康管理系统的研制及仿真试验需求,构建 PHM 系统仿真试验系统总体架构,整个系统划分为应用层、软件层、数据层、硬件层及对象层共五个层次,系统采用分层设计架构,硬件满足模块化、可互换、可扩展特点,具备通过增加模块对功能与资源进行扩展的能力,实现应用与具体总线驱动解耦^[14]。PHM 系统仿真试验系统总体层次设计如图 1 所示。

应用层主要包括 PHM 系统仿真、仿真主控操作、数据与模型仿真等应用功能。

软件层基于数据软总线实现,集中统一管理程序运行的所有数据,并为功能程序提供配置管理及数据交换服务。功能程序主要包括系统仿真配置、实时仿真运行、仿真数据与模型管理、仿真试验管理、仿真总线接口框架、数据监测与分析判读、仪器硬件设备管理等功能模块。

数据层主要包括历史数据、仿真模型、协议数据、故障模式、数据参数以及仿真试验系统可用的其他来源数据等,是软件层数据服务程序的数据基础^[15-17]。

硬件层基于仿真机及各仿真器实现,主要包括飞机级 PHM 仿真器、各区域 PHM 功能仿真器、显示控制仿真机,以及仿真验证试验通讯网。

设计了预留对象层,为后续硬件在回路仿真设备提供更为便利的扩展支持,后续可通过接口适配、连接分配等工作实现仿真试验系统的分系统及其成员子系统对象的硬件在回路仿真接入。

2.2 仿真试验功能设计

2.2.1 飞机级 PHM 仿真器功能设计

飞机级 PHM 仿真器设计三项主要功能。

1) 与显示控制仿真机的交互及区域级 PHM 设备数据接口:

基于 PHM 系统信息通讯协议,将诸如异常信息、故障诊断信息等内容与显示控制仿真机及区域级 PHM 设备进行信息交互,交互信息可通过通讯总线等形式进行传递,传递的数据帧格式参照系统信息通讯协议的要求进行设计和使用。

2) 数据的采集、处理、存储、故障诊断:

基于飞机级 PHM 设备的通讯协议与通讯数据,实现系

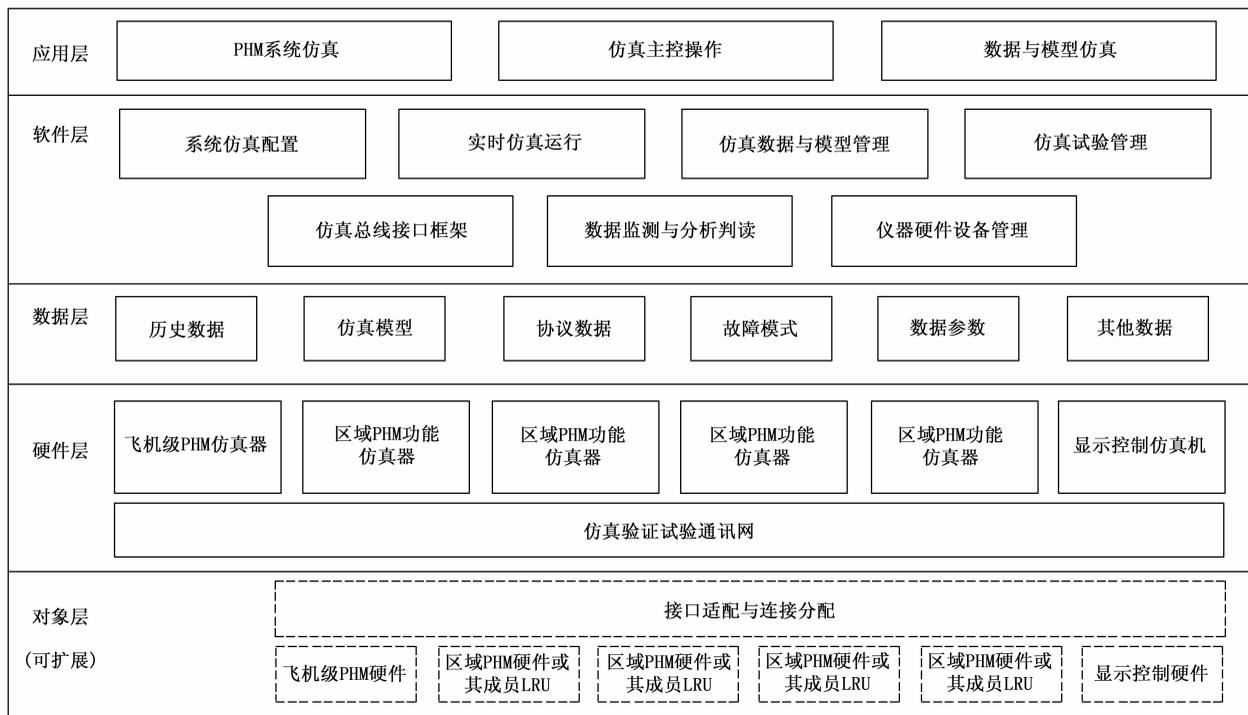


图 1 PHM 系统仿真试验系统总体层次设计

统内各设备的数据实时发送与实时接收, 基于接口控制文件 (ICD, interface control document) 通信协议实现协议数据的解析与处理, 针对协议的原始数据、处理后数据, 依照仿真工程配置进行数据存储, 同时依照诊断逻辑、诊断模型、判断依据等信息进行故障诊断和信息上报等操作^[18]。

3) 地面测试与区域健康管理的交互:

基于系统地面测试功能, 设计系统中地面测试与区域健康管理的交互, 包括地面测试的启动信息、自身测试信息的状态、对应的指令与数据信息等。

2.2.2 区域级 PHM 功能仿真器功能设计

区域级功能仿真器设计两项主要功能:

1) 各区域健康管理仿真功能:

基于数据、模型、逻辑等输入信息, 实现包括区域级 PHM 设备及各对应区域内配套设备或系统的功能, 具体设计提供包括液压系统、供电系统等各子系统的区域内仿真, 基于 ICD 通信协议实现协议数据的解析与处理, 针对协议的原始数据、处理后数据, 依照仿真工程配置进行数据存储, 同时依照诊断逻辑、诊断模型、判断依据等信息进行故障诊断和信息上报等操作。

2) 区域内各系统与飞机级 PHM 仿真器之间的信息交互功能仿真:

基于 PHM 系统信息通讯协议, 将系统诊断结果、系统功能影响结果、飞机级所需关联信息、飞机工作状态信息等内容与飞机级 PHM 仿真器进行信息交互, 内容涵盖内建测试 (BIT, built-in test) 数据、原始数据、诊断结果数据上传, 通过总线等形式进行传递, 传递的数据帧格式参照系统信息通讯协议要求进行设计。

2.2.3 显示控制仿真机功能设计

显示控制仿真机设计两项主要功能。

1) PHM 系统操作及显示功能:

该功能模拟机载 PHM 系统的实际显示与操作, 基于仿真试验系统的数据实现显示以及对应功能的操作, 主要功能包括: 显示 PHM 系统故障信息、驾驶舱效应 (FDE, flight deck effect) 信息、配置信息、测试状态及结果等内容, 提供 PHM 页面的基本功能操作, 进行 PHM 地面测试、状态监控参数定义等操作。

2) 整体仿真试验系统的管理与控制功能:

该功能是本系统软件核心功能, 负责提供仿真试验系统管理与控制及对应的用户交互界面, 并完成整个仿真试验系统的仿真配置、仿真运行、数据与模型管理、试验管理、总线接口管理、数据显示监测分析判读、硬件设备管理等功能, 各项功能均提供对应子功能模块。通过软件实现系统配置发布仿真工程后, 可调度飞机级和相应区域级仿真器进行仿真运行, 获得该对应的仿真验证结果。

2.3 系统硬件设计

2.3.1 硬件架构设计

机载 PHM 系统的主要工作原理为采集各机载区域健康管理数据, 包括机内检测的检测结果、传感器采集的参数

等信息, 基于系统内现有的功能逻辑、算法或模型进行分析, 实现故障增强诊断、性能监测与趋势分析、寿命预测与健康评估等功能, 并将维护人员关注的信息在显示控制终端上显示。

基于以上工作原理对仿真试验系统的组成和功能开展设计, 除机载 PHM 系统外, 仿真试验系统的仿真对象还包括了健康管理数据的来源和显示控制终端。

PHM 仿真试验系统主要由以下 6 套硬件设备组成: 飞机级 PHM 仿真器、4 台区域 PHM 功能仿真器和显示控制仿真机。

飞机级 PHM 仿真器、各区域级 PHM 功能仿真器以及显示控制仿真机分别由一台计算机或工控机、对应通讯设备和配套电缆组成, 其中显示控制仿真机还设计配备了显示控制设备和操作台。

PHM 仿真试验系统通过仿真环境网搭建仿真系统连接, 飞机级 PHM 仿真器与各区域级 PHM 功能仿真器之间基于仿真试验网络进行数据交互, 在飞机级实现数据汇总采集, 进行故障诊断及状态监控等功能处理, 显示控制仿真机完成 PHM 仿真试验系统显示与控制, 实现仿真过程中故障数据、参数信息的显示, PHM 仿真试验系统总体架构原理如图 2 所示。

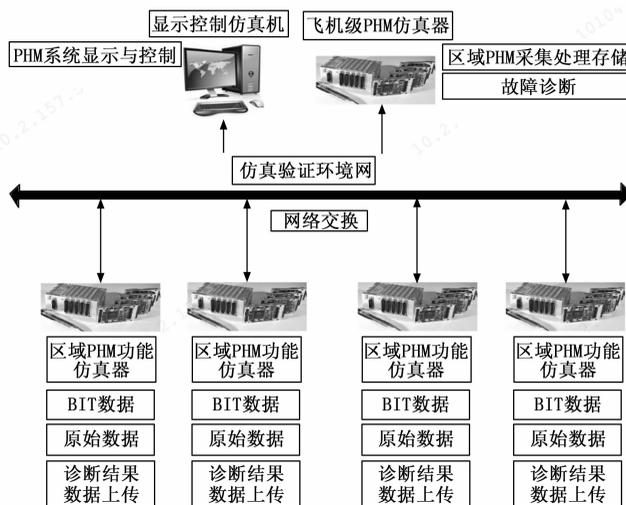


图 2 PHM 仿真试验系统总体架构原理图

基于该架构的仿真试验系统可以通过 PHM 功能仿真实现不同层级间的功能交互, 结合模型、参数等信息支撑 PHM 系统架构组成的仿真与优化, 通过显示控制仿真机可以实现整个系统的仿真数据处理功能, 各仿真软硬件通过网络与总线通讯仿真实现接口及通信的仿真与优化。

2.3.2 仿真器设计

仿真器采用标准 19 英寸 4U 上架型工控机, 选取了高性能处理器以确保设备运行稳定高效, 工控机配备多个 PCI/PCIe 插槽, 为 PHM 仿真试验系统中的各类型通讯总线板卡提供扩展支持, 同时也为后续设计预留的对象对接提供相应扩展接口。飞机级及各区域级仿真器根据自身总

线通讯需求，分别装载配套的多种总线通讯板卡，提供多个通道，并支持不同接口、通讯协议和通讯速率，支持时钟同步功能，满足仿真试验过程中各类总线通讯要求。

2.3.3 显示控制仿真机设计

显示控制仿真机选用高性能台式工作站，搭载相应的总线通讯设备，工作站选用了高性能处理器和专业级独立显卡，能够完成大量运算和图像处理任务并满足多路视频信号同时输出，可以满足仿真验证系统应用程序的稳定运行。显示控制仿真机共计配备多个显示终端设备，支持多屏同时显示输出，其中包含 2 个支持多点触控的显示终端，用于模拟仿真机载系统的触控操作，用户可通过触控的方式实现系统的操作与控制。

2.4 系统软件设计

PHM 仿真试验系统软件分别部署在各仿真硬件中，共计 6 个部分，各分系统软件相互协助，共同实现仿真试验系统软件的整体运行与应用目标。系统软件以显示控制仿真机软件为主控核心，包含了 PHM 操作仿真软件，同时负责完成整个仿真试验系统的仿真配置、数据与模型的管理、仿真过程监控、数据显示、硬件设备管理，完成各分系统软件的协同调度功能。各区域仿真器软件均属于分系统仿真软件，接收主控核心的调度，通过仿真引擎实现仿真功能的执行，通过加载不同的模型、数据、协议、底层硬件等实现不同分系统的仿真功能。软件体系架构如图 3 所示。

2.4.1 显示控制仿真机软件

仿真机软件主要提供仿真试验系统控制的用户交互界面，主要包括系统仿真配置、实时仿真运行、仿真数据与模型管理、仿真试验管理、仿真总线接口框架、数据监测与分析判读、仪器硬件设备管理等功能。仿真机软件还设计提供 PHM 系统的操作及显示页面，进行 PHM 数据的显示、PHM 相关功能的操作等。

1) 系统仿真配置功能：

系统仿真配置功能主要用于完成系统仿真验证流程的

过程配置，实现仿真模型文件以及生成的代码文件导入，建立对应的仿真工程，并完成仿真初始化配置，实现实时仿真全过程管理配置。主要包括仿真工程管理、数据采集配置管理、模型解析与配置、模型参数管理配置、模型变量监视配置、仿真数据管理配置、仿真目标机状态监视、可提供输入输出组件配置。

2) 实时仿真运行功能：

实时仿真运行功能主要用于仿真的运行与操作控制，为用户提供统一风格的操作界面。经过仿真序列分析编译后形成的仿真执行文件，在前台系统仿真管理系统的控制下，加载到后台仿真执行系统，由仿真运行引擎控制仿真流程的执行^[19-20]。仿真运行引擎在实时仿真运行过程中收集由实时仿真运行实例产生的相关数据信息和实时状态信息，为仿真试验系统用户提供对实时仿真运行执行的跟踪和监控功能。

3) 仿真数据与模型管理：

仿真数据与模型管理主要用于仿真数据、仿真模型以及整个 PHM 仿真试验系统数据信息的统一管理，可实现对不同的系统真实试验数据、飞行数据以及系统模型数据的导入、导出及检索查看功能。通过构建协议、配置、试验数据库实现对系统模型、PHM 诊断模型、系统数据、故障数据、试验信息数据、监测数据的管理。仿真数据与模型管理软件通过仿真总线共享数据信息。

4) 仿真试验管理功能：

仿真试验管理功能主要用于实现 PHM 仿真试验系统的各种试验信息管理功能，主要包括试验用户管理、试验权限管理、试验基础信息管理等，通过试验管理软件完成各试验信息的管理及存储。

5) 仿真总线接口框架：

仿真总线接口框架主要用于定义与管理 ICD 数据。采用真实系统中的各类总线接口来传递 ICD 数据，采用通用化的框架形式进行设计，支持标准 ICD 文件解析与配置，

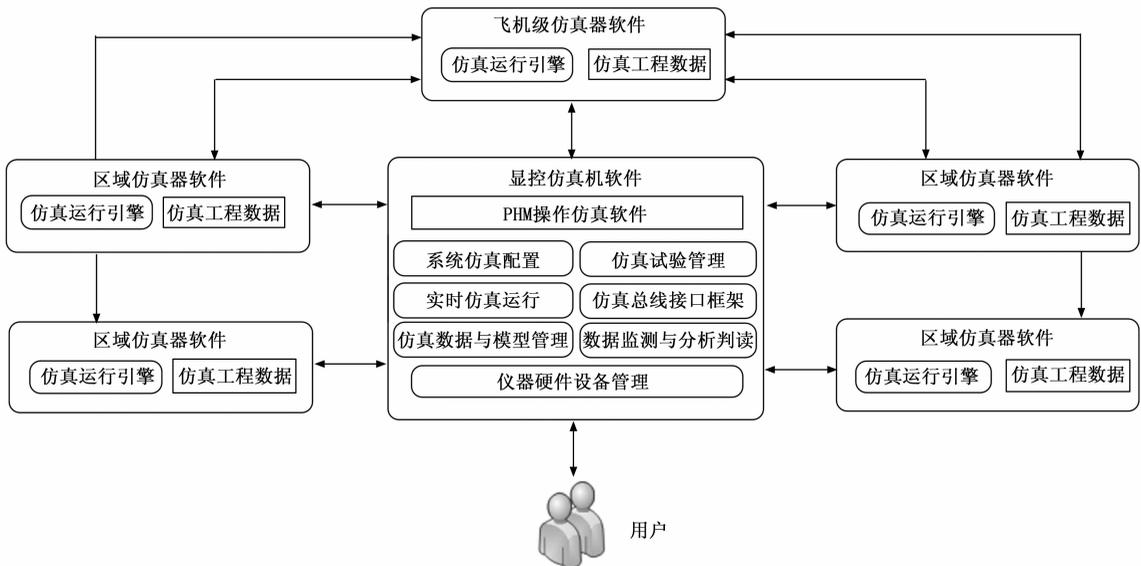


图 3 PHM 仿真试验系统软件体系架构

针对具体单独的仿真功能应用, 对应的仿真总线抽象封装为一组可调用接口供应用功能调用以实现数据访问。

6) 仪器硬件设备管理:

仪器硬件设备管理主要用于对仿真试验系统内的仪器设备、硬件资源、网络信息配置等进行管理。主要包括: 仿真设备仪器的管理、网络信息配置的管理。

7) PHM 系统操作与显示:

PHM 系统操作与显示主要用于 PHM 数据的显示以及 PHM 相关功能的操作, 主要包括: 显示 PHM 系统故障信息、FDE 信息、配置信息、测试状态及结果等内容, 提供 PHM 页面的基本功能操作, 进行 PHM 地面测试、状态监控参数定义等操作。

8) 数据监测与分析判读:

数据监测与分析判读主要用于提供在仿真试验过程中对输入输出数据进行实时监测、显示、数据分析、保存及数据管理等。主要包括软件能够在数据采集界面实现对采集配置功能、具备所有试验信号的监测管理功能, 软件中数据信号的监测显示具有多种表现形式, 具有采集数据管理功能。

2.4.2 分系统仿真软件

分系统仿真软件设计具备的详细功能包括如下。

1) 仿真启停控制功能:

仿真启停控制功能负责各仿真器的启动与停止功能, 具体包括仿真器设备自检、仿真器资源初始化、仿真资源注册、仿真资源释放、仿真板卡设备复位、仿真器停机等功能。

2) 仿真运行调度控制:

仿真运行调度控制负责仿真过程中运行调度与运行控制, 包括仿真工程解析、仿真运行配置读取、仿真实时运行控制、单步仿真、调试运行、步长设置、条件设置等功能, 同时提供对底层板卡的调用支持, 可通过配置实现通道间映射关系读取与执行控制功能。

3) 数据文件传输功能:

数据文件传输功能负责仿真使用数据文件的传输, 一般针对占用空间较大的数据文件, 包括原始历史数据文件、模拟数据文件等, 该功能特别针对大数据量的文件传输进行优化设计。

4) 数据通讯功能:

数据通讯功能基于仿真配置及协议解析内容, 进行总线数据的通讯与收发功能, 功能设计配合 ICD 文件共同实现通讯功能, 通过调用处理底层硬件总线通讯板卡提供的 API 函数实现数据收发。

5) 数据临时存储功能:

数据临时存储功能主要用于仿真工程运行过程中的数据临时存储, 包括原始收发数据、解析完毕的收发数据、临时故障处理数据、数据分析过程数据、关键运算中间数据等, 软件提供针对上述数据或其他需要临时存储数据的保存功能, 可依据不同仿真工程的数据需求进行选择存储。

6) 模型解析运行功能:

模型解析运行功能对于有仿真模型运行需求的仿真工程, 提供模型解析运行功能, 支持逻辑模型、算法模型、诊断模型、推理模型以及基于工具开发的仿真模型, 包括 C/C++、Simulink 等工具开发的模型, 支持模型中参数、数据等信息与设备物理通道关联映射^[21]。

2.5 仿真试验流程设计

根据验证功能的不同, 设计基于故障/参数/配置等不同类型信息的仿真与验证过程。仿真试验流程设计如图 4 所示。仿真试验系统主控界面如图 5 所示。



图 4 仿真试验流程设计



图 5 仿真试验系统主控界面（参数注入）

对于每个试验样本, 设计试验判据: 当显示控制终端中所记录的故障/参数信息与区域仿真机发布的数据中对应的信息一致时, 则代表合格, 否则不合格。

2.5.1 基于故障的仿真与验证

基于故障的仿真与验证流程主要用于仿真故障诊断场景, 通过仿真工程中预置的故障模型、故障联动信息、故障数据、故障参数等信息, 模拟基于预置信息的故障场景。基于故障的仿真工程中预置的故障信息可以包含基于规则的故障注入信息、基于案例的故障注入信息、基于模型的故障注入信息等。

仿真工程运行过程中, 各仿真器基于故障联动信息规则生成特定异常状态信息, 仿真触发飞机级 PHM 系统模块故障诊断模块功能并开展故障诊断的执行流程, 向关联的故障诊断模块传递对应的仿真数据信息, 各仿真机依据自身运行逻辑传递 PHM 故障诊断数据信息, 并依照各自区域的运行逻辑以及下发的数据产生与机载 PHM 系统相关的全部数据。飞机级 PHM 故障诊断模型基于数据信息进行验证运

行,接收各区域运行所产生的 PHM 相关数据并汇总至 PHM 故障诊断模型中,生成 PHM 故障诊断模型运行结果数据。

2.5.2 基于参数的仿真与验证

基于参数的仿真与验证流程主要用于仿真各模拟场景下的参照状态,通过仿真工程中预置的正常参数模型、异常参数模型、参数联动规则等信息,模拟基于预置仿真场景的整套系统参数,流程设计运行过程提供手动控制单一参数或批量参数能力,为仿真试验流程的参数提供高自由度的配置能力。

仿真工程运行过程中,各仿真器基于参数模型和规则生成特定正常或异常的系统参数,参数模型与规则基于不同区域及子系统的附属参数进行设计,并设计考虑在系统仿真的不同飞行阶段中呈现匹配的数据特征。各仿真机依据自身参数生成与收发逻辑,基于 ICD 文件组帧传递数据。飞机级 PHM 状态监测功能基于接收到的参数信息进行解析与监测运行,生成 PHM 状态监测运行过程数据和结果数据。

2.5.3 其他仿真与验证

其他仿真与验证流程主要包括软硬件配置信息、寿命监视信息等内容。通过仿真工程中预置的软硬件基本信息、配套信息、配置信息等数据内容模拟软硬件配置信息;基于预置的寿命模型信息、仿真运行的时间累积信息、寿命联动规则等信息,模拟寿命监视信息,流程设计运行过程支持手动调整软硬件配置和寿命信息。

仿真工程运行过程中,各仿真器预先加载硬件配置信息、寿命监视信息,并基于依据区域或设备的具体运行设定进行数据的生成与收发,飞机级 PHM 寿命监视功能模块、软硬件配置信息管理功能模块基于接收到的数据信息进行解析,生成对应的分析结果数据。

3 仿真试验系统应用

目前,该试验系统已经应用于 PHM 系统开发,为 PHM 系统原理试验提供硬件基础和方法指导。

试验针对基于故障的功能和基于参数的功能,通过仿真工程中预置的信息,对各类场景进行了仿真,对各项功能进行了逻辑验证。试验过程中,对所执行试验样本进行了数据采集与记录,主要包括故障基本信息、故障状态、参数值、参数名称、软硬件配置信息等。

基于 2.5 节设计的仿真试验流程,针对 PHM 系统功能进行仿真试验,将采集和记录的试验数据按照相应的试验判据进行分析,试验结果验证了各项健康管理功能逻辑的正确性。仿真验证界面与结果示例如图 6 所示。实际使用结果表明,本文提出的 PHM 仿真试验系统设计与应用方法,能够较好地用于仿真验证试验,为 PHM 系统的研制提供支持。

4 结束语

本文基于 PHM 系统发展现状,针对研制过程中的仿真试验需求,提出了 PHM 仿真试验系统和试验流程的设计方案。该试验系统采用仿真试验技术,通过仿真试验环境网

| | 参数页面1 | | 参数页面2 | |
|------|---------|---------|---------|---------|
| | A通道 | B通道 | C通道 | D通道 |
| xx参数 | 45mm | 42mm | 49mm | 56mm |
| xx参数 | 41mm | 57mm | 56mm | 53mm |
| xx参数 | 44mm | 56mm | 46mm | 45mm |
| xx参数 | 13°/s | -3°/s | 4°/s | -1°/s |
| xx参数 | 8°/s | 13°/s | 7°/s | 13°/s |
| xx参数 | 9°/s | -0°/s | 13°/s | -1°/s |
| xx参数 | 10004kg | 9998kg | 10001kg | 9998kg |
| xx参数 | 9990kg | 9998kg | 9999kg | 10000kg |
| xx参数 | 10007kg | 10000kg | 9996kg | 9992kg |
| xx参数 | 4998kg | 5009kg | 5003kg | 5006kg |
| xx参数 | 5008kg | 5006kg | 5003kg | 5000kg |
| xx参数 | 5004kg | 4997kg | 5009kg | 5005kg |
| xx参数 | 注意级告警 | 正常 | 正常 | 正常 |
| xx参数 | 警告级告警 | 正常 | 正常 | 正常 |
| xx参数 | 正常 | 正常 | 正常 | 正常 |

图 6 仿真验证界面与结果示例(参数页面)

络建立区域 PHM 仿真器、飞机级 PHM 仿真器以及显示控制仿真机之间的数据交联,能够对系统架构、方案、总线接口、数据处理、分区存储等系统功能进行仿真试验,实现飞机健康管理系统功能验证,从而缩短试验周期,提高研制效率,为系统设计工作提供支撑。

参考文献:

- [1] 杨军祥,田泽,李成文,等.新一代航空电子故障预测与健康管理系统综述[J].计算机测量与控制,2014(4):972-978.
- [2] 张宝珍,王萍,尤晨宇.国外飞机预测与健康管理系统发展计划综述[J].计算机测量与控制,2016,24(6):1-7.
- [3] 侯安生,平本红,薛萍.航空装备维修保障发展研究[J].航空维修与工程,2018(10):20-24.
- [4] 傅筱,韩俊毅,曹阔.大数据驱动的钢铁工业智能故障诊断技术综述[J].计算机测量与控制,2020,28(10):1-6.
- [5] 王亮,吕卫民,李伟,等.复杂系统健康状态评估技术现状及发展[J].计算机测量与控制,2013,21(4):830-832.
- [6] 石君友.测试性设计分析与验证[M].北京:国防工业出版社,2011:20-22.
- [7] 全权,崔根,赵峙尧,等.面向复杂系统健康评估的若干思考[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(3):601-628.
- [8] 周长红,黄建民,郑良义.一种民机 PHM 顶层架构仿真验证平台的设计和研究[J].计算机测量与控制,2019,27(6):263-266.
- [9] 于劲松,刘浩,张平.航空机电作动器健康管理验证系统研究[J].计算机测量与控制,2014,22(6):1835-1838.
- [10] 吴明强,房红征,文博武.飞行器故障预测与健康管理系统(PHM)集成工程环境研究[J].计算机测量与控制,2011,19(01):98-101.
- [11] 陈青,张观海,刘琪.飞机预测与健康管理体系结构浅析[J].飞机设计,2011,32(2):51-58.
- [12] 景博,黄崧琳,王生龙,等.军用飞机 PHM 系统一体化设计架构分析[J].航空工程进展,2022,13(3):64-73.

(下转第 257 页)