

# 机载维护仿真平台的设计与验证

邹会荣, 吕镇邦, 沈新刚

(中国航空工业集团公司 西安航空计算技术研究所, 西安 710068)

**摘要:** 机载维护系统作为飞机不可或缺的功能和保障系统, 对飞机的日常维修和运营成本有着重要影响; 机载维护仿真平台是对我国民用飞机机载维护系统的前期探索和验证; 文中针对维护系统与其它成员系统之间的复杂交联特点, 提出了一种机载维护仿真平台的独特架构设计, 详细阐述了仿真平台的功能设计, 利用灵活的用户人机交互界面和嵌入式计算机系统实现了机载维护系统的故障诊断和隔离功能, 模拟了飞机状态监控参数的动态传输过程; 最后, 通过成员激励系统和仿真平台的交互实验, 验证了仿真平台设计思路的有效性与实用性, 证明了机载维护系统各项功能的正确性。

**关键词:** 机载维护系统; 综合模块化航空电子系统; 外场可替换单元; 机内测试; AFDX网络

## Design and Verification for Simulation Platform of Onboard Maintenance

Zou Huirong, Lv Zhenbang, Shen Xingang

(AVIC Xi'an Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** As an indispensable function and support system of civil airplane, Onboard Maintenance System has an important influence on routine maintenance and the operating costs of airplane. The simulation platform of onboard maintenance is the early exploration and verification of onboard maintenance system. In view of the complex cross-linking characteristics between maintenance system and other membership systems, this paper proposes a uniquely architectural design for simulation platform, describes the functional design of simulation platform in details, realizes the function of fault diagnosis and failure isolation for onboard maintenance system using the flexible user interface and embedded computer system, simulates the dynamic transfer process for the parameter of aircraft condition monitoring. At last, it verifies the effectiveness and practicality of simulation platform, proves the correctness of functions of onboard maintenance system through the interactive experiment between membership excitation system and simulation platform.

**Keywords:** onboard maintenance system; integrated modular avionics; line replaceable unit; built in test; avionics full-duplex switched ethernet network

## 0 引言

机载维护系统 (Onboard Maintenance System, OMS) 是现代飞机航空电子系统必备的子系统之一, 它是从传统的机内测试 (Built In Test, BIT) 转向基于智能系统的故障诊断和预测, 反应式的通信转向在准确时间对准确部位进行准确维修的先导式活动<sup>[1]</sup>。为了及时获取故障发生的原因、位置和解决方案, 利用数字化信息技术手段, 收集、处理整个系统 (包括飞机、子系统、部件) 的实时状态, 借助各种算法和模型, 找到故障征兆和故障原因的映射关系, 推导出故障的原因及部位, 并跟踪征兆趋势, 对可能发生的故障进行预测并给出维修策略。最后通过维修决策, 合理调配维修保障资源, 制定最佳维修保障方案, 从而提高整个系统的运行可靠性和维修准确性, 减少系统设备的

维修费用, 实现精、准、快的日常保养和维修, 努力做到防患于未然。

目前, 美国和欧洲的主要航空发达国家均十分重视机载维护系统的研究与应用, 并且朝着更加综合化、智能化、网络化和标准化的方向发展, 并逐步成为新研飞机的重要系统之一<sup>[2]</sup>。当前最为先进的机载维护系统的典型代表当属空客 A380 和波音 B787 机型的机载维护系统。

空客 A380 的 OMS 采用集中式架构设计, 它将 OMS 的软件驻留在网络服务器系统中, 基本实现了与机载信息系统的功能融合; 波音 B787 的 OMS 采用了全新的综合模块化航空电子系统 (Integrated Modular Avionics, IMA) 架构思路, 它将 OMS 的功能驻留在 IMA 系统中, 独立于机载信息系统, 实现了机载维护系统的基本功能。

我国的新研民机项目对机载维护系统的设计提出了很高的要求, 不仅要继承国际先进 OMS 技术的发展趋势, 也要有自己独特的设计理念。机载维护仿真平台的建立是对我国新研民机 OMS 的前期探索和初步实现。它的系统架构是在借鉴空客 A380 和波音 B787 的 OMS 架构的优点基础上, 提出了自己独特的系统架构思路, 并通过大量实验验证了该系统架构的正确性、灵活性和可靠性。

**收稿日期:** 2019-01-23; **修回日期:** 2019-02-18。

**作者简介:** 邹会荣(1977-), 硕士, 工程师, 主要从事飞行器健康管理及故障诊断方向的研究。

吕镇邦(1976-), 博士, 高级工程师, 主要从事健康管理及软件工程方向的研究。

沈新刚(1968-), 硕士, 高级工程师, 主要从事健康管理及软件工程方向的研究。

机载维护仿真平台的建立为我国新研民机的 OMS 研究提供了核心技术支持, 缩短了关键技术的研制周期, 提高了效费比, 为未来新型民用飞机的 OMS 研制奠定了良好的技术基础。

## 1 仿真平台架构设计

### 1.1 平台架构设计

借鉴和吸收国外 OMS 技术的先进经验, 结合新研民机项目的应用需求, 机载维护仿真平台提出了自己独特的 OMS 架构思路, 具体的架构设计如图 1 所示。

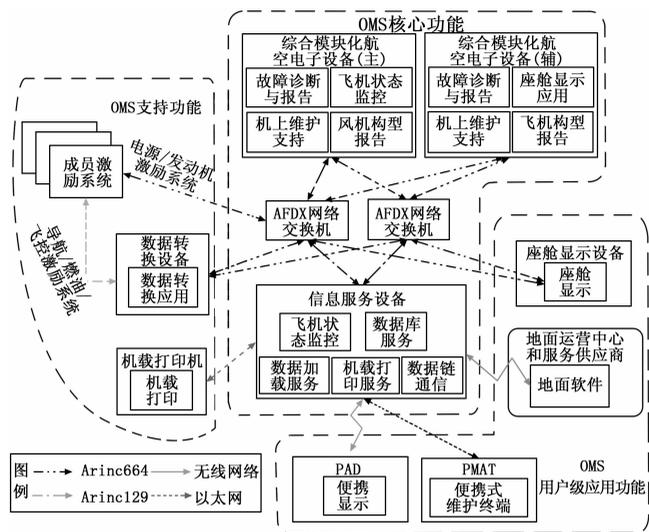


图 1 机载维护仿真平台的架构和功能设计

仿真平台的架构设计采用综合模块化航空电子系统的分布式、跨平台的开放系统架构形式。以主、辅 IMA 设备和信息服务设备作为信息处理平台, 在全双工交换式以太网 AFDX 的支持下, 实现多种不同系统功能的信息转换、处理和应用, 将过去分立的系统设备转换成综合化设备。借助于此架构设计, 系统可以使用大量的外场可替换单元 (Line Replace Unit, LRU), 使得模块的通用性提高, 模块数量和种类减少, 故障诊断和隔离能力加强, 通过系统的重构和冗余设计, 增强系统的容错能力, 提高系统的可靠性<sup>[3]</sup>。为了提高平台的可靠性和安全性, 仿真平台架构设计采用了冗余结构设计。平台将 IMA 分为主、辅两个设备, 在正常工作状态下, 主设备和辅助设备同时参与平台程序处理和数据计算, 不同之处是辅助的设备部分不输出控制信号。如果主设备发生故障, 平台进行主设备和辅助设备切换, 并从中断处由辅助设备接替主设备工作, 并处于单机工作状态, 从而降低仿真平台发生故障的机率<sup>[4]</sup>。

### 1.2 3 种 OMS 系统架构比较

空客 A380、波音 B787 和机载维护仿真平台的 OMS 系统架构比较如表 1 所示。

## 2 仿真平台功能设计及关键技术

机载维护仿真平台的功能设计由 OMS 核心功能、OMS 支持功能和 OMS 用户级应用功能三部分内容组成。其功能

设计如图 1 所示:

### 2.1 OMS 核心功能

OMS 核心功能完成了机载维护的核心任务, 它由一组驻留在主、辅 IMA 设备和信息服务设备上的软件应用及

表 1 振动加速度传感器的主要参数

系统比较	A380	B787	仿真平台
系统架构特点	开放式设计, 集中式架构	开放式设计, 通用核心系统, 分布式架构	开放式模块化设计, 分布式跨平台 IMA 系统架构
软件驻留位置	仅驻留在网络服务器系统中, 与机载信息系统功能融合	仅驻留在 IMA 上	分别驻留在 IMA 和信息服务设备上, 实现了功能跨平台运行和交互
数据网络传输	全双工交换式以太网	光纤以太网的通用数据网络	全双工交换式以太网
子系统数	3 个子系统 <sup>[2]</sup>	5 个子系统 <sup>[1]</sup>	14 个子系统
重组能力	较强	较弱	灵活
冗余备份	无	冗余设计	冗余设计
升级维护	比较方便	升级比较困难	简单方便

AFDX 网络交换机组成。驻留在 IMA 设备中的软件应用主要完成故障诊断与报告功能、飞机状态监控功能、座舱显示应用功能、机上维护支持功能和飞机机构型报告功能; 其中三大主要功能完成如下任务:

- 1) 故障诊断与报告功能负责从飞机各成员系统中收集 BIT 数据和飞机状态参数数据, 使用故障方程进行诊断定位, 根据诊断的结果将故障定位到 LRU, 并采取隔离手段, 生成故障诊断与维修报告, 供维修人员借鉴;
- 2) 飞机状态监控功能负责从 AFDX 网络中获取和计算数据, 实时记录并捕获飞机的 LRU 的趋势数据和超限数据等;
- 3) 座舱显示应用功能为在显示设备上显示的维护数据提供 ARINC661 接口, 并通过与各应用软件的数据通信实现座舱显示系统对 OMS 系统的人机操作;

图 1 中, 在 IMA 辅助设备上对故障诊断与报告等 3 个功能分别做了冗余备份。

信息服务设备上驻留了数据库服务应用软件、飞机状态监控软件 (冗余备份)、数据加载服务软件、数据链通信服务软件和机载打印服务软件等五项功能。

AFDX 网络交换机保证了每个端口上的数据快速而有效的交互与传输。

### 2.2 OMS 支持功能

OMS 支持功能为实现 OMS 核心功能提供所需的信息处理服务, 包括成员激励系统、数据转换服务和机载打印机设备。

- 1) 成员激励系统为仿真平台提供各类运行数据源或设备数据源。
- 2) 数据转换服务软件驻留在数据转换设备上, 完成 ARINC664 与 ARINC429 数据的相互转换。

3) 机载打印机设备用于接收座舱显示应用和便携式显示应用发送的打印数据, 组织打印格式并输出打印数据。

### 2.3 OMS 用户级应用功能

OMS 用户级应用功能为用户提供直接操作 OMS 的人机交互界面, 如座舱显示设备、便携式显示、维护终端设备和地面软件系统。

1) 座舱显示设备是 OMS 向机组或维护人员提供维护信息的输入输出设备; 该设备上驻留有基于 ARINC661 协议的图形服务软件, 为用户提供人机交互界面并显示多种数据。

2) 便携显示 PAD 设备作为 OMS 访问界面, 为维护人员提供信息访问并执行维护数据加载操作。

3) 便携式维护终端 PMAT 设备上驻留有远程维护应用软件, 通过该软件可查看 OMS 系统的故障信息、构型数据、机载维护文档等。

4) 地面软件提供机载或地面数据的数据分析和管理工作, 实现各种历史数据的分析和回放、增强诊断与趋势分析及余寿估计。

### 2.4 关键技术

#### 2.4.1 基于故障方程的诊断定位技术

机载维护仿真平台使用故障方程的诊断定位技术实现了故障的诊断和定位。

基于故障方程的诊断定位技术就是利用若干个变量和逻辑操作符组成的布尔表达式来判断飞机级、区域级、成员级的故障是否发生, 定位故障发生的位置, 隔离出有问题的部件。故障方程通常由故障逻辑和故障方程属性两部分构成。故障方程属性描述了故障的维护、存储、报告信息, 提供了故障的记录要求、生成故障报告时的一些过滤条件、准备报告的内容、维修时的故障建议和排故帮助信息。

以发动机的一个引擎出现内部故障为例, 具体说明故障方程的诊断过程, 步骤如下所示。

(1) 选定设备:

发动机引擎 1 (N1), 发动机引擎 2 (N2)。

(2) 分析设备可能发生的故障及现状:

①可能发生故障: 发动机引擎 1 发生故障;

②故障现状: 发动机引擎 1 转速超限, 但是引擎 2 转速正常。

(3) 输入源: 发动机引擎 1 的转速数据, 发动机引擎 2 的转速数据。

(4) 定义参数: 将 BIT 诊断结果转换为代表物理量和相关信息的参数。

①根据参数命名规则定义参数名称:

参数: N1\_OUT\_OF\_RANGE, N2\_OUT\_OF\_RANGE

②设置参数属性:

参数 1 所属 LRU: 发动机引擎 1

数据源: L FADEC

标注地址: 数据起始地址、目的地址

传输参数的总线类型 (ARINC429)

数据域: 浮点型数据

参数 2 所属 LRU: 发动机引擎 2

数据源: R FADEC

标注地址: 数据起始地址、目的地址

传输参数的总线类型 (ARINC429)

数据域: 浮点型数据

(5) 映射变量:

①根据变量命名规则定义变量名:

变量名: V\_N1\_Speed, V\_N2\_Speed

②根据参数的数据类型映射变量:

V\_N1\_Speed\_Err: N1\_OUT\_OF\_RANGE  
= TRUE

V\_N2\_Speed\_Err: N2\_OUT\_OF\_RANGE  
= TRUE

(6) 建立故障方程:

①根据故障方程命名规则定义故障方程名: EQ\_N1\_Speed-Err。

②根据故障逻辑建立故障方程:

EQ\_N1\_Speed-Err: V\_N1\_Speed\_Err AND  
(NOT V\_N2\_Speed\_Err)

方程释义: 当故障发生时, 故障方程的逻辑关系结果为 True, 而根据故障状态得知发动机引擎 2 未超速 (False), 那么只有当引擎 1 发生故障时, 故障方程逻辑关系才能成立, 从而定位出故障发生的位置。

(7) 设置故障方程属性, 如故障种类, 维护信息, 排故信息及座舱效应等。

(8) 生成多种格式的故障方程报告。

(9) 故障定位: 发动机引擎 1。

(10) 隔离措施: 更换或修复发动机引擎 1。

#### 2.4.2 基于 Arinc661 的座舱显示应用技术

为了提高座舱显示系统分布式处理的能力, ARINC661 规范定义了面向用户的图形显示系统 (Cockpit Display System, CDS), 处理所有逻辑过程的用户系统 (User Application System, UAS) 及两者进行交互的通信协议, 成功做到了座舱图形显示和处理逻辑的分离, 降低了显示和控制之间的耦合性。

机载维护仿真平台座舱显示应用软件和显示设备上驻留的图形服务软件的设计过程均严格遵从 ARINC661 规范。显示设备上的图形软件利用法国的 SCADE Display 软件实现了 CDS 的功能。座舱显示器 PFD/MFD 的屏幕按照用户需求被划分为多个显示单元 DU, 每一个 DU 为一个单独的显示窗口 Window, 在单个 Window 内可显示多个不同的层 Layer, 各层由结构化的窗体部件 Widget 组成, 同一个 Widget 可应用于不同的层上, 使得显示画面切换更加灵活<sup>[5-6]</sup>。这样, CDS 可以理解为一种分层管理的图形渲染器, 可以实时地显示结构化的用户接口组件 Widget。座舱

显示应用软件利用 SCADe Suite 软件实现了 UAS 的功能, 模拟了显示系统的所有逻辑过程, 一方面为 CDS 提供更新数据, 另一方面为操作者的行为进行逻辑判断, 并给出相应的响应。CDS 和 UAS 之间的通信方式采用“事件驱动”方式, 识别底层部件 Widget 成为了 CDS 和 UAS 通信的基础。通过以上三部分的协同工作实现了座舱显示功能。

### 3 仿真平台验证方法

通过成员激励系统模拟并注入多种类型的数据源, 使这些数据与驻留在机载维护仿真平台上的多个软件模块进行信息交互, 实现机载维护系统基本功能, 验证机载维护系统的功能指标和性能指标。

成员激励系统模拟了燃油、导航、飞行控制、电源和发动机共 5 个成员系统的故障数据、失效数据、历史故障数据、构型数据, 超限数据和事件、启动测试数据和趋势数据。成员激励系统中的燃油、导航和飞行控制系统分别模拟了 ARINC429 格式的数据; 成员激励系统中的电源和发动机系统模拟了 ARINC664 格式的数据。这些数据通过与 AFDX 网络交换机、数据转换仿真设备连接进行数据交互。电源、发动机、燃油、导航和飞行控制系统仿真设备都接入到机载维护仿真平台中, 如图 2 所示。其中实框为机载维护仿真平台涉及的设备, 虚框为成员激励系统涉及到的设备。

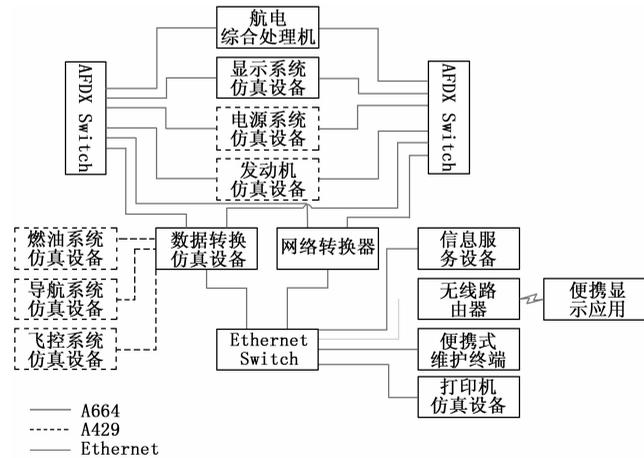


图 2 机载维护仿真平台与成员激励系统的交互图

### 4 仿真平台验证结果

仿真平台依靠 Linux 和 windows 两类操作系统, 借助 Eclipse、Scade、VxWorks653、FlexBuilder 和 CodeBlocks 等开发环境, 以成员激励系统内的导航数据源仿真设备和机载维护仿真平台中的故障诊断与报告软件、飞机状态监控软件的数据交互为例, 说明了机载维护系统的故障诊断定位和隔离功能、飞机状态监控功能的动态数据传输仿真过程, 完成了机载维护仿真平台的功能验证、实现了仿真平台集成及平台与成员设备之间的数据通讯功能。

成员激励系统导航数据源仿真设备和机载维护仿真平台中的故障诊断与报告软件、飞机状态监控软件的数据交

互过程, 分为四步, 具体步骤如下:

首先, 对所有硬件设备加电启动、完成自检和初始化过程;

其次, 启动成员激励系统仿真软件, 打开导航数据源仿真设备软件, 选择需要注入的数据源, 点击发送命令, 将数据源发送给故障诊断与报告软件或飞机状态监控软件。

再次, 当故障诊断与报告软件或飞机状态监控软件接收到来自成员激励系统的数据源后, 根据自主研发的故障诊断算法, 诊断出故障, 定位并隔离发生故障的外场可替换单元。

最后, 将诊断结果和实时变化的参数数值显示在座舱显示系统的用户界面上, 供机组维护人员查看浏览, 并提供可行的维护解决方案。

成员激励系统导航数据源仿真设备软件如图 3 所示, 故障诊断与报告结果如图 4 所示, 飞机状态监控参数的动态传输结果如图 5 所示。

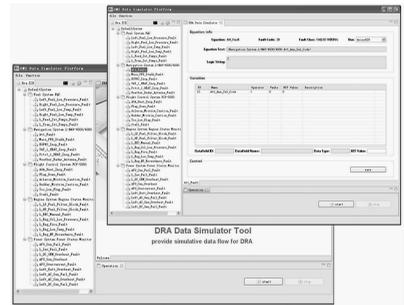


图 3 成员激励系统导航数据源仿真设备软件

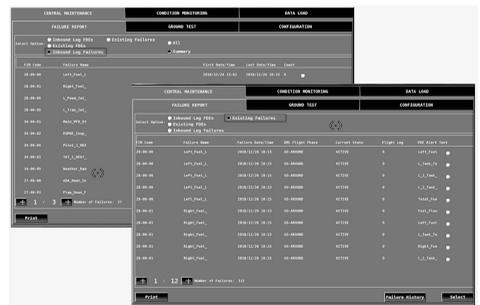


图 4 故障诊断与报告结果

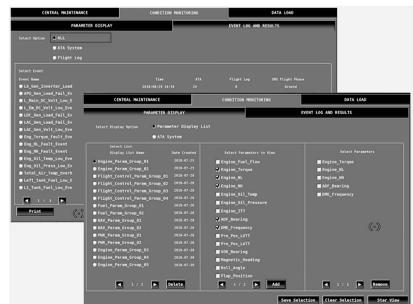


图 5 飞机状态监控参数的动态传输