

PHM 模型的工程化验证方法研究

吕镇邦, 孙倩, 王娟, 汤幼宁

(中航工业西安航空计算技术研究所, 西安 710068)

摘要: 模型验证技术在故障预测与健康管理系统研制中受到高度重视, 特别是如何将验证方法在具体的工程应用中体现规范性、系统性、通用性和实用性, 已成为亟待解决的技术问题; 在分析国内外相关研究现状的基础上, 对 PHM 模型验证方法进行了系统深入的研究, 阐述了故障数据获取方法和故障诊断和预测性能指标体系, 并以机载诊断模型为例, 对 PHM 模型验证流程作了详细介绍; 最后, 将此方法应用到了 PHM 验证平台的设计、开发和具体实现中, 充分体现了 PHM 模型验证方法的工程化特点。

关键词: 故障预测与健康管理系统 (PHM) 模型; 故障注入; 性能指标; 验证平台

Research on Prognostic and Health Management (PHM) Model Verification Engineering Process

Lü Zhenbang, Sun Qian, Wang Juan, Tang Youning

(Aeronautic Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China (AVIC ACTRI), Xi'an 710068, China)

Abstract: Model validation technology in fault prediction and health management (PHM) system is being developed in high priority, especially how to realize normative, systematic, generality and practicability in engineering applications, has become a technical problem that need to be solved. Based on the analysis of the state of the art at home and aboard, this paper did a systematic research on the PHM model verification process, including the fault data election method, and the diagnostic and prognostic performance metrics. Setting the on-board diagnostic model as an example, the model verification flow is described in detail, which has been used for the design, development, and implementation of the PHM verification platform with engineering characteristics.

Keywords: prognostic and health management (PHM) model; fault injection; performance metrics; verification platform

0 引言

故障预测与健康管理系统 (PHM) 技术作为提高新一代武器装备的可靠性、安全性和经济承受性, 实现自主式保障和视情维修的关键技术, 近年来引起各国军方和工业界广泛关注, 使得对故障预测与健康管理系统研究深度和广度不断扩大^[1-2]。但在 PHM 系统的研制过程中, 还存在诸多关键的技术问题, 例如系统集成难度大、数据及知识积累不足、验证能力弱等。特别是由于 PHM 系统以监测、诊断和预测为主要手段, 在 PHM 系统构建之初以及部署实施时, 亟待解决的问题就是如何针对 PHM 系统模型, 评价系统的诊断、预测算法的性能等, PHM 模型验证由此成为健康系统研制中核心的技术问题。本文在分析国内外相关研究现状的基础上, 对 PHM 模型验证方法进行了系统深入的研究, 阐述了故障数据获取方法和故障诊断和预测性能指标体系, 并以机载诊断模型为例, 对模型验证流程作了详细介绍。最后, 将此方法应用到了 PHM 验证平台的设计、开发和具体实现中, 充分体现了 PHM 模型验证方法的工程化特点。

1 研究现状

随着 PHM 技术的不断应用, 针对 PHM 系统的技术要求验证也受到重视并不断发展。国际标准化组织 ISO 和 IEEE 等许多国际组织和机构还专门组建了联盟来推动故障诊断与健康管理系统相关标准的研发和推广, 由波音等 50 多家公司和组织组

成的机械信息管理开放系统联盟 (MIMOSA) 一直致力于开放的使用与维护信息标准的研发, 这为 PHM 模型验证工作提供了基础和指导^[3-4]。文献 [5] 给出了综合系统健康监测 (ISHM) 系统的综合仿真验证体系, 如图 1 所示。该体系包括飞机或目标系统仿真、机载 PHM 处理器、地面 ISHM 处理器、仿真控制模块、应用数据库等。

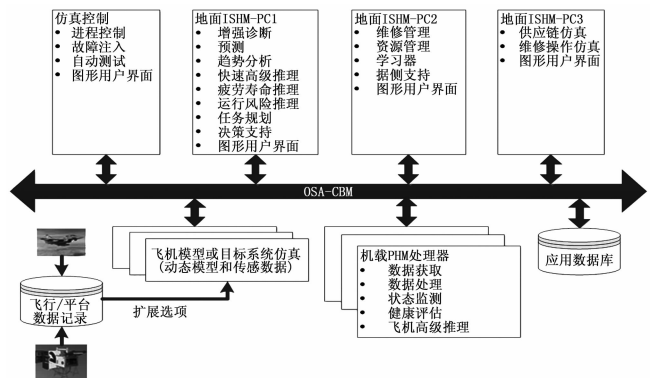


图 1 ISHM 系统综合仿真验证体系

NASA 开发的 TA-5 IVHM 虚拟试验台 (Integrated Vehicle Test Bed for IVHM, IVTB) 主要应用于位于加利福尼亚州帕萨迪纳市的美国宇航局喷气推进实验室 (JPL) 的飞行系统测试平台 (FST), 是典型的验证系统, 用以演示验证航天器各子系统是否平稳运行^[6]。IVTB 的基本运行模式包括客户端仿真系统和集成诊断系统, 分别用于产生所需的虚拟传感器信号, 并基于传感器信号进行故障诊断。美国空军大学正在致力于整个自主保障系统的仿真研究 (ALSim), 其关键技术模块就是 PHM 仿真模型。空军大学将 ALSim 应用于基于人工

收稿日期: 2015-11-28; 修回日期: 2016-05-05。

作者简介: 吕镇邦 (1976-), 男, 甘肃景泰人, 博士, 高级工程师, 主要从事故障预测与健康管理系统 (PHM) 方向的研究。

神经网络的预测推理案例并取得了阶段性的成果^[7]。

2 PHM 模型验证方法研究

模型验证利用数字仿真的形式模拟模型、算法运行时所需要的外部环境，验证 PHM 系统中相关模型、算法的性能，判断模型、算法的相关性能是否满足设计要求中所涉及的技术指标。

2.1 故障数据获取

故障诊断预测算法的验证工作都离不开大量对象系统数据的支持。数据来源一般概括为二类：一是基于实物故障注入数据，此类数据可以涵盖已知对象各种工况、负载和环境因素，数据真实可靠，但需要构建数据获取平台；二是基于仿真模型数据，此类数据可以按照算法开发和验证要求进行定制^[8]。因为难以对工况、负载和环境因素等进行仿真，因此对于利用专用仿真软件仿真得到的数据真实性通常无法保证。然而，在多数情况下，被验证对象难以注入故障，特别是交付验收的定型产品，几乎无法通过真实的、大量的故障注入对其测试性设计效果做出判断和对 PHM 指标进行考核，对这样的产品开展能力验证试验，必须能模拟出故障信号的真实产生和传输过程。基于仿真模型故障注入基本流程如图 2 所示。

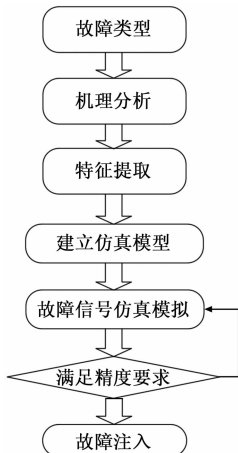


图 2 基于仿真模型故障注入基本流程图

2.2 故障诊断与预测性能指标

在 PHM 模型的度量评价阶段，分别从故障诊断及故障预测能力两方面开展相应的验证工作，根据所选取的验证算法的不同分别选取相应的度量评价指标进行 PHM 能力验证，最后将验证结果与规定值进行对比进行合格判定，给出验证结论。故障诊断与预测能力的定量评价指标体系如图 3 所示。

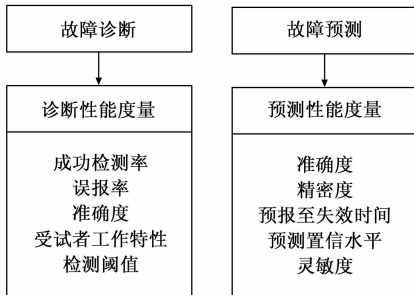


图 3 故障诊断与预测性能指标体系

根据故障诊断与预测能力与使用保障的影响关系，进行故障诊断与预测能力功能需求分析。考虑及时性和准确性需求，分析建立故障诊断定量要求通常利用基于故障检测事件的决策

矩阵来计算。基于该决策矩阵计算出的具体度量如下：成功检测率 (POD)、误报率 (POFA)、准确度 (Accuracy)、接受者操作特性曲线、检测门限 (Detection Threshold)、总体置信度 (Overall Confidence)、稳定性 (Stability)、工况敏感度 (Duty sensitivity)、噪声敏感度 (Noise Sensitivity) 等。预测能力的具体度量包括准确度 (Accuracy)、精度 (Precision)、预测至失效时间 (Time To Failure, TTF) 的及时性、预测置信度 (Confidence)、相似度 (Similarity)、灵敏度 (Sensitivity) 等。

2.3 模型验证流程

这里以机载诊断模型为例，阐述诊断模型的验证流程。机载诊断模型和推理机驻留在虚拟机载平台中，由仿真工具提供故障数据注入。PHM 验证平台通过以太网回收、显示诊断结果，诊断结果主要包括：配置信息、已检测故障、未检测故障、模糊组等。最后将模型输出结果与用户预期故障模式进行对比分析、计算诊断模型的检测率、隔离率、虚警率等性能指标，进而完成模型的诊断能力评价。

机载故障诊断模型验证流程如图 4 所示。

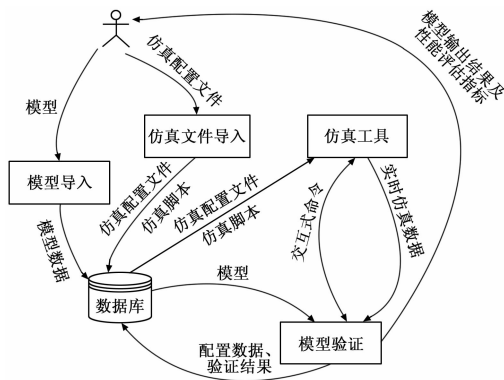


图 4 机载故障诊断模型验证流程

- 1) 将 xml 格式的模型导入数据库；
- 2) 将与模型配套的仿真配置文件、仿真脚本文件导入数据库；
- 3) 通过模型验证配置界面，选择待验证模型、仿真配置文件、仿真脚本，并填写模型预期输出结果；
- 4) 对已配置的模型验证过程进行完整性检查，如果检查通过，进行模型验证，否则用户根据平台反馈的错误信息进行修改；
- 5) 模型验证过程中，通过仿真工具实时注入模型验证所需的仿真数据，并通过进度条或状态指示灯显示模型验证状态；
- 6) 验证结束后，显示模型输出结果及各项性能指标；

对于第三方商用软件 (如 Matlab、LabVIEW 等) 的模型、算法验证，则将其统一封装为可执行程序 exe 形式，模型、算法的加载统一在 PHM 验证平台中完成，并以图形化方式提供对模型输入、输出接口的统一描述。故障注入支持仿真工具、历史文件数据两种仿真数据注入方式。针对诊断模型，提供对模型的检测率、隔离率、虚警率等性能指标的计算；针对趋势分析模型，提供对预测模型的预测准确度和预测成功率等指标的计算；针对健康评估模型，提供对评估模型的余寿置信度、健康状态准确度指标的计算。

3 PHM 验证平台

PHM 验证平台是体现模型验证工程化的典型应用。PHM

模型验证的工程化主要体现在规范性、系统性、通用性、实用性 4 个方面。

1) 规范性: 严格按照 OSA-CBM、IEEE1232 等技术标准定义数据接口;

2) 系统性: 验证流程贯通数据流和工作流, 整合集成相关工具;

3) 通用性: 验证方法尽可能覆盖不同的系统和设备, 具有普遍适用性;

4) 实用性: 所采用验证方法已具备一定的技术成熟度, 并通过提供图形化引导方式, 便于模型验证者使用。

PHM 验证平台为模型的验证提供图形化的引导式操作支持, 允许用户选择、组合执行被验证模型、算法, 以及验证所需的仿真配置或历史文件, 通过表格、雷达图、扇形图、曲线图等图形方式显示验证评估结果。支持对验证结果的报告导出功能, 并为验证过程提供过程控制和配置管理, 方便用户查看历史验证结果。

PHM 验证平台用于支持航电系统、结构系统、机电系统、动力系统等非航电系统的 PHM 模型仿真验证工作。

3.1 平台功能介绍

PHM 验证平台主要提供数据管理和仿真验证两方面功能。对各功能要求如下。

1) 数据管理功能: 数据管理功能是为仿真验证功能提供各种数据服务, 数据管理功能通过对设备数据、仿真数据、实验与历史数据进行统一管理, 可对这些数据进行二次处理和特征提取, 使其具有统一的格式和完整属性; 对验证过程及相关数据、以及模型和算法的统一管理; 根据接口定义文档实现对 ICD 信息数据、“四性”数据、产品生命周期内产生的历史数据的处理, 为模型的验证提供数据服务功能。

2) 仿真验证功能: 验证模型和算法的正确性, 以及进行统计分析 with 性能评价, 判断其是否达到设计要求中所涉及的技术指标。

PHM 验证平台系统组成如图 5 所示。

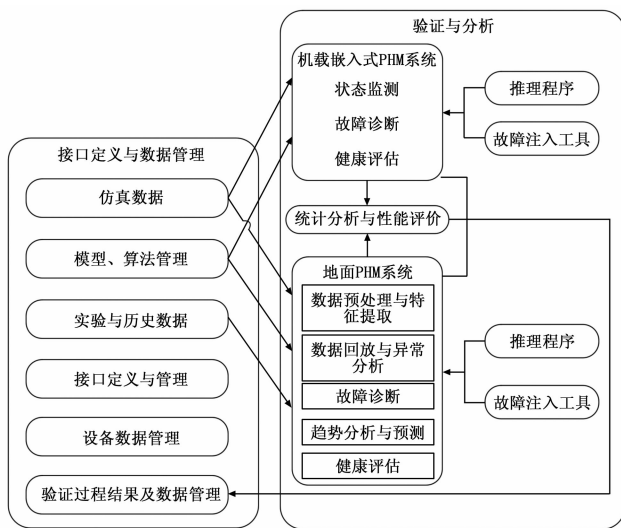


图 5 PHM 验证平台的组成结构

3.2 操作视图设计

航电系统主要针对故障方程和故障数据字典两种形式的诊断模型进行验证。

航电系统的诊断模型验证配置过程主要包括对以下数据的配置:

1) 设备名称; 2) 模型类型选择; 3) 模型选择; 4) 仿真配置文件选择; 5) 仿真脚本选择; 6) 预期触发故障模式设置。航电系统的 PHM 模型。仿真验证结果以扇形图和表格的形式对故障结果进行统计、分析, 验证结果主要包括以下数据:

1) 故障诊断配置项; 2) 已检测故障列表; 3) 未检测故障列表; 4) 模糊组; 5) 检测率、隔离率、虚警率。

地面 PHM 模型验证系统主要针对 Matlab、LabVIEW 等形式的模型、算法进行验证。

地面 PHM 系统的模型验证配置过程主要包括对以下数据的配置:

1) 设备名称; 2) 模型选择; 3) 模型输入、输出接口配置; 4) 模型预期值设置; 5) 验证指标选择; 6) 模型输出文件解析规则定义。

地面 PHM 模型。仿真验证结果以梯形图、曲线图和表格的形式对验证结果进行统计、分析, 验证结果主要包括以下数据:

1) 模型验证配置项; 2) 模型输出结果; 3) 诊断模型的检测率、隔离率、虚警率; 4) 预测模型的预测准确度和预测成功率; 5) 健康评估模型的余寿置信度、健康状态准确度。

4 总结

本文对 PHM 模型验证方法进行了系统深入的研究, 并将其应用到 PHM 验证平台的设计、开发和具体实现中, 该验证平台充分体现规范性、系统性、通用性和实用性等工程化特点。但上述方法目前主要应用在状态监测和故障诊断方面, 对于实现故障预测、健康评估、维修规划支持等方面功能的模型验证方法还需要进行大量的基础研究工作。

参考文献:

[1] 曾声奎, Pecht M G, 吴 际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 5: 626-632.

[2] 朱 斌, 陈 龙, 强 弢, 等. 美军 F-35 战斗机 PHM 体系结构分析 [J], 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 1-3.

[3] IEEE Standard for Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments (AI-ESTATE) [S/OL]. <http://standards.ieee.org/downloads/1232/1232-2010>.

[4] MIMOSA OSA-CBM 3.3.1, Open System Architecture for Condition Based Maintenance [S/OL]. 2010, <http://www.mimosa.org>.

[5] DM Buderath, PP Adhikari. Simulation Framework and Certification Guidance for Condition Monitoring and Prognostic Health Management [A]. European Conference of Prognostics and Health Management Society [C]. 2012.

[6] Automated Health Management for Gas Turbine Engine Accessory System Components 2008 [EB/OL]. <http://www.impact-tek.com/Resources/TechnicalPublicationsMore.html>.

[7] Leao B P, Yoneyama T, Rocha G C, et al. Prognostics performance metrics and their relation to requirements, design, verification and cost-benefit [A]. 2008 International Conference on PHM [C].

[8] 刘倩倩, 王红霞, 尹 明. 基于融合技术的电子产品 PHM 系统研究 [J], 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 2454-2456.