

航天器地面健康管理验证系统设计与实现

房红征^{1,2}, 张瑞³, 罗凯^{1,2}, 李蕊^{1,2}, 王晓栋^{1,2}

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

2. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 航天器地面健康管理作为整个航天器健康管理系统的核心, 主要为技术人员提供航天器试验、运行和管理过程中的数据分析、诊断、预测等服务; 目前由于航天器故障机理难以获取、故障验证环境不足、缺乏统一的验证方法和性能指标, 给航天器 PHM 的研究成果的有效验证与评价带来了困难; 提出了一种基于大数据的航天器地面健康管理系统设计思路, 并对其验证评估指标体系和验证方法进行了研究, 在此基础上设计实现了基于仿真和试验验证的航天器地面健康管理验证系统, 通过多个航天器故障仿真和在轨历史数据试验, 验证了提出的航天器地面健康管理验证系统设计方法的有效性, 能够有效地应用于航天器的地面健康管理过程, 具有较强的航天器工程应用价值。

关键词: 航天器; 地面健康管理; 验证系统; 故障诊断; 故障预测

Design and Implementation of Spacecraft Ground Health Management Verification System

FANG Hongzheng^{1,2}, ZHANG Rui³, LUO Kai^{1,2}, LI Rui^{1,2}, WANG Xiaodong^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Measure & Control Corp. Ltd, Beijing 100041, China; 2. Beijing Key Laboratory of

High-speed Transport Intelligent Diagnostic and Health Management, Beijing 100041, China;

3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: As the core of the entire spacecraft Prognostic and Health Management (PHM), the spacecraft ground PHM system mainly provides spacecraft technicians with services such as data analysis, diagnosis, and prediction in the process of spacecraft testing, operation and management. At present, due to the difficulty in obtaining the spacecraft failure mechanism, insufficient failure verification environment, and lack of unified verification methods and performance indicators, it is difficult to effectively verify and evaluate the research results of spacecraft PHM. A design idea of a spacecraft ground PHM system based on big data is proposed, and the index system of the PHM system verification and verification methods are studied. On this basis, the spacecraft ground PHM verification system based on simulation and experimental verification is designed and realized. The multiple spacecraft fault simulations and on-orbit historical data tests verified the effectiveness of the proposed ground PHM verification system design method, which can be effectively applied to the spacecraft ground health management process, and has strong practical significance in the field of the spacecraft engineering application.

Keywords: spacecraft; ground PHM system; verification system; fusion diagnostic; diagnostic; prognostic

0 引言

故障预测与健康(PHM)技术可以减少各种类型的在轨航天器的意外风险, 已经成为提高航天器的可靠性、维修性、测试能力和安全性的关键技术。作为整个航天器健康管理系统的核心, 地面健康管理主要提供对航天器技术人员提供对航天器的试验、运行和管理过程中的数据分析、诊断、预测等服务。在航天器地面健康管理系统的开发过程中, 验证是非常重要的阶段, 通过研究和开发相应的航天器地面健康管理验证方法、评价体系并实现相应的验证系统, 将有效地提高 PHM 系统验证的可信

度, 有效减少人力需求、拓展系统功能、提升技术水平、保障航天器健康管理系统的稳定性与可靠性。

验证评估技术目前已成为 PHM 技术研究的一个重要方向^[1-3]。国外通过近年的研究, 已形成了较为成熟的验证系统平台和工具^[4-8], 例如美国 Impact 公司与乔治亚理工学院合作研发的 JSF 的 PHM 验证系统平台, 形成了一套基于网络的综合软件应用集成工具, 为美国联合攻击战斗机(JSF)系统供应商提供 PHM 的验证与确认(V&V)工具; 美国波音公司的 RITA HUMS 的度量评估工具(MET), 与诊断数据库一起, 提供了用于估计和记录基于振动的诊

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-26。

作者简介: 房红征(1972-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 主要从事复杂系统通用测试、故障诊断、故障预测与健康技术方向的研究。

引用格式: 房红征, 张瑞, 罗凯, 等. 航天器地面健康管理验证系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 11-17.

断算法的性能的工具平台；美国海军增强型预测诊断系统的 V&V 工具，可基于大量数据和蒙特卡罗模拟法形成足够的统计基准来评估诊断和预测算法的性能和效力。国内在航空航天领域也开展了 PHM 验证技术和系统研究^[9-15]，提出了一些验证评估的指标体系和方法，但在如何用于具体工程应用方面仍然处于探索研究阶段。

本文针对航天器地面健康管理验证系统研究目前存在的验证指标及技术框架不够通用明确的问题，提出了一种基于大数据的航天器地面健康管理系统设计思路，在 PHM 验证评估指标体系和方法研究的基础上，结合实际航天器测试保障需求，设计实现了基于仿真和试验验证的航天器地面健康管理验证系统并进行了应用验证，有助于解决航天器等复杂装备系统 PHM 能力验证评价困难的问题，为促进航天器 PHM 系统工程进程进行了有益探索。

1 航天器地面健康管理系统的定位和 workflow

一种基于大数据的航天器地面健康管理系统的总体架

1) 故障诊断预测评估模型构建。知识模型构建是保证航天器地面系统应用的基础，地面系统为航天器各分系统技术专家提供了知识创编功能，以完成对已有知识和本项目研究、验证知识模型集成，并利用提供的数据验证功能，完成知识模型的初步检验，形成初步的知识模型库。

2) 航天器地面测试与在轨遥测应用。通过将本系统与地面实时测试数据、在轨实时遥测数据进行对接，实时获取多星实时数据，利用系统提供的诊断、预测应用，实现对异常检测、故障定位、故障与寿命预测等应用，为地面运管人员提供决策支持

3) 结果的人工分析与干预。由于航天器在轨工况复杂、环境干扰多，导致故障模式异常复杂，整个地面系统应用过程中可能会遇到系统知识不足、无法识别故障等情况。本系统为相关技术人员提供航天器数据事后分析计算功能，通过数据挖掘、人工比对等方法进行人工故障分析，并对分析结果进行干预处理。

4) 机器学习与数据归档。地面系统提供诊断、预测与

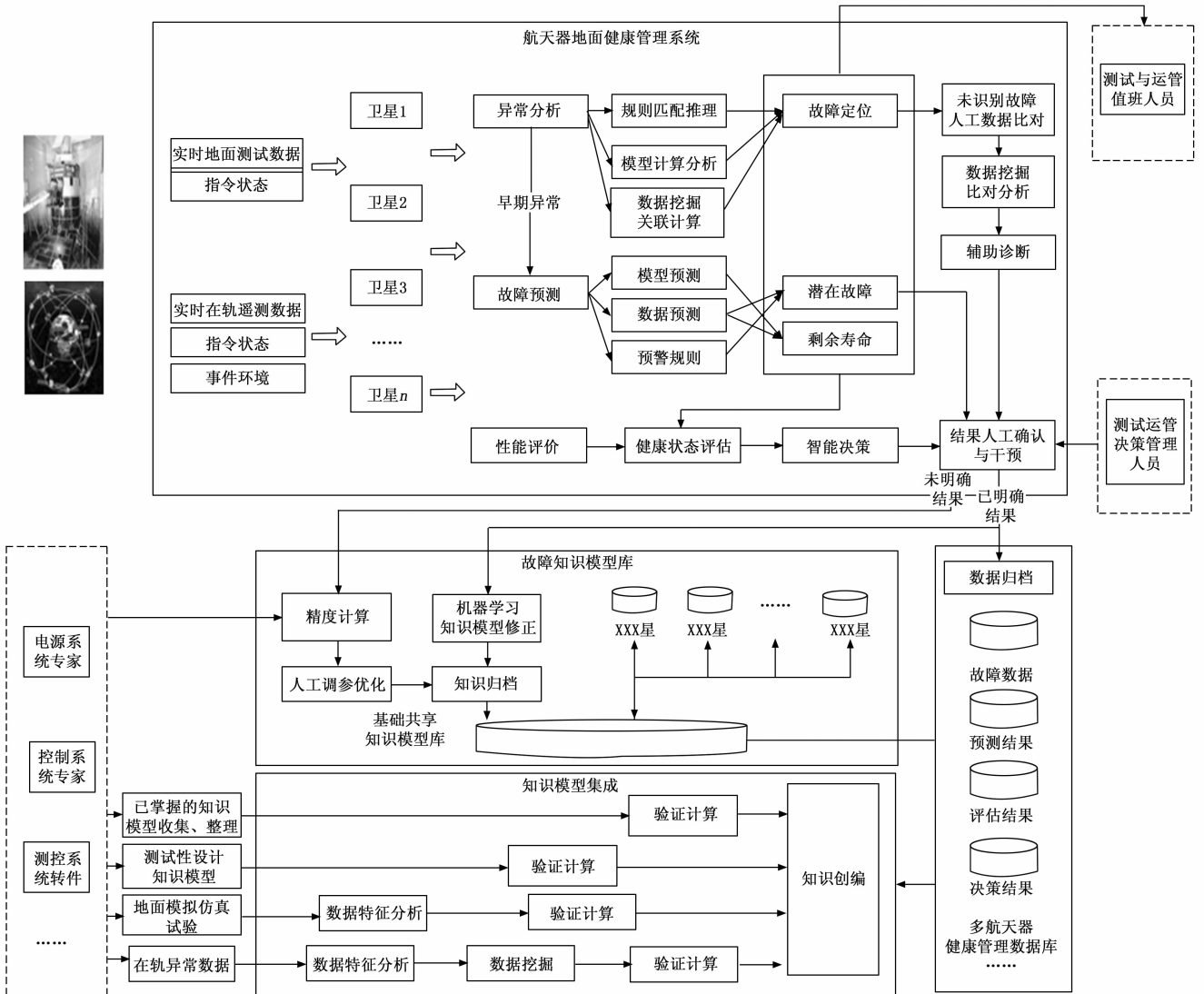


图 1 航天器地面健康管理系统的总体架构示意图

评估数据自动归档功能,并在归档过程中,自动调用系统机器学习算法,对已有知识、模型进行自学习计算,优化原有知识规则门限及模型参数,实现系统自主熟练。同时,为用户提供选择训练数据,进行算法模型精度优化分析工具,实现人工优化知识。

2 航天器地面健康管理平台验证评估指标和方法

2.1 验证评估指标体系

装备 PHM 系统级要求通常可以分成三类:安全、成本和性能^[18-19]。航天器地面健康管理系统的目标是能够通过提高可靠性和可用性来确保航天器的安全,并最大限度地减少额外成本,从而维持航天器系统性能。根据不同人员在健康状态感知全生命周期中的作用,可以将其进一步分成 3 类:1) 作业(关键部件/分系统/整星/星座管理员、业务应用、运行管理和维护人员等);2) 监管者(决策者);3) 工程设计人员(总体单位设计/研究人员等)。因此需要针对这些不同用户群来考虑地面 PHM 系统的能力评估与度量指标。依据系统的设计要求、运行和成本要求、算法性能要求、工作模式,总结出健康状态感知能力评估指标分类如表 1 所示,具体包括:

表 1 航天器地面 PHM 系统能力验证评估指标

类型	评估指标	说明
设计能力	失效覆盖率	PHM 所覆盖的失效数与作为 PHM 候选对象的严重失效总数之比
	系统覆盖率	PHM 所覆盖的重要部件/分系统的比例,要求将系统划分成若干个具有严重关键度的独立模块
成本能力	计算性能指标	是制定系统硬件要求或软件必须工作的约束条件,且仍需满足算法的性能要求,能够影响工程设计和实施成本
	费效指标	用于对实施健康状态感知的系统进行费效分析,重点是量化评价健康状态感知的性能并捡起转化为经济成本
算法性能	故障诊断性能	用于评价故障诊断的基本性能,如故障诊断的实时性、准确性、隔离能力、鲁棒性等
	故障预测性能	用于评价故障预测的基本性能,如早期检测的灵敏性、故障辨识的准确性以及系统失效时间的预测准确性等
	健康评估性能	用于评价健康评估的基本性能,如健康评估准确度等
	维修决策性能	用于评价维修故障诊断的基本性能,如维修效率等

2.1.1 设计能力评估指标

1) 失效覆盖率。健康状态感知所覆盖的失效数与作为健康状态感知候选对象的严重失效总数之比。

2) 系统覆盖率。健康状态感知所覆盖的重要部件/分系统的比例,要求将系统划分成若干个具有严重关键度的独立模块。

2.1.2 成本能力评估指标

1) 计算性能指标。有助于制定硬件要求或软件必须工作的约束条件,且仍需满足算法的性能要求,并对系统工程设计和实施成本产生影响。主要包括:

(1) 计算复杂度。描述算法运行(独立于软件和硬件实现)所需的时间。

(2) CPU 时间。度量中央处理器执行软件所花费的时间,规定了算法/软件实现和其搭载硬件运行的组合性能。

(3) 其他指标。如运行时间、内存大小、数据速率等。

2) 费效指标。用于从经济性上进行健康状态感知的性能评价。如投资回报率(ROI),通过“采用非计划性维修进行管理时系统的寿命周期费用”与“在使用健康状态感知方法进行管理时系统的寿命周期费用”之差与“实现和管理见状态感知所花费的投资”的比值来实现。

2.1.3 算法性能评估指标

1) 故障诊断算法性能度量。

(1) 故障检测率(FDR)。在规定时间内,由航天器 PHM 系统正确检测的故障数量与该时间内发生的故障总数之比,计算公式如下:

$$FDR = \frac{N_D}{N_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, N_T 、 N_D 分别表示 PHM 系统在规定时间内发生的故障总数和正确检测到的故障总数。

(2) 故障隔离率(FIR)。在规定的时间内由 PHM 系统正确隔离到单个 LRM/LRC 的故障数量与该时间内 PHM 系统正确检测的故障总数之比。计算公式如下:

$$FIR = \frac{N_L}{N_D} \times 100\% \quad (2)$$

式中, N_D 、 N_L 分别表示 PHM 系统在规定时间内正确检测的故障总数及正确隔离到单个 LRM/LRC 的故障总数。

(3) 虚警率(FAR)。计算公式如下:

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N_{FD} + N_{FA}} \quad (3)$$

式中, N_{FA} 为虚警次数; N_{FD} 为检测出的故障次数, T_{FH} 为 PHM 工作时间。

(4) 平均虚警间隔时间(MTBFA)。在规定的时间内,产品累计的运行小时数与该时间内 PHM 系统累积虚警次数之比,计算公式如下:

$$MTBFA = \frac{T}{N_{FA}} \quad (4)$$

式中, N_{FA} 为虚警总次数; T 为 PHM 运行总时间。

其他故障诊断评价指标还包括稳定性、工况敏感度、噪声敏感度、总体置信度等。

2) 故障预测算法性能度量。

(1) 预测准确率。计算公式如下:

$$P = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_{ri} - L_{pi}|}{n} \times 100\% \quad (5)$$

式中, L_{ri} 为第 i 次真实结果, L_{pi} 为第 i 次预测结果。

(2) 预测绝对误差。预测对象的实际观测值和预测值之间的差值。记 y_1, y_2, \dots, y_n 为预测对象的实际观测值, $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ 为预测值, 则计算公式如下:

$$a_t = y_t - \hat{y}_t, t = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

(3) 预测相对误差。预测点的绝对误差与预测对象的观测值之间的比值。计算公式如下:

$$\hat{a}_t = \frac{a_t}{y_t} = \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t}, t = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中, \hat{a}_t 常常用百分比表示, 衡量了预测点 t 上预测值相对于观测值的准确程度。

其他故障诊断评价指标还包括预测覆盖率、置信度、相似度、灵敏度等。

3) 健康评估算法性能度量。主要指标为健康状态评估准确度。

4) 维修决策算法性能度量。包括 MTBF (平均无故障工作时间)、MTTR (平均修复时间)、MTBUR (平均非计划拆换间隔时间) 等。

2.2 验证评估方法

航天器健康管理系统验证评估方法主要包括仿真验证、试验验证和评估验证等方法^[20-21], 实现对航天器健康管理系统的功能和性能指标进行验证和评价, 如图 2 所示。

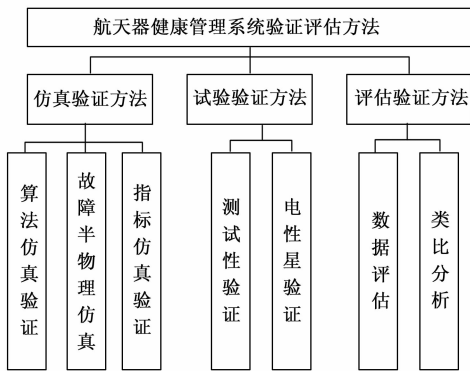


图 2 航天器地面健康管理系统验证评估方法示意图

2.2.1 仿真验证方法

该方法主要针对航天器系统 PHM 试验成本高或不适合做实物试验的场景, 采用基于数字仿真模型的方式代替实际的航天器系统进行试验验证, 针对特定工况建立数学物理模型模拟系统实际运行情况, 用定量的方法分析系统运行过程。优点是可以适当降低对航天器实物验证试验需求, 不足是对数学模型有较高的精度要求。由于航天器的可靠性程度较高, 因此在轨实际运行过程得到的故障案例有限, 很多故障真实航天器上无法注入, 因此需要搭建基于仿真的半物理仿真验证平台进行必要的验证。具体内容包括诊断预测等算法仿真验证、故障半物理仿真、指标仿真验证等。

2.2.2 试验验证方法

对于定量评估要求, 如果工作条件不具备, 可以用该方法加以补充。试验验证该方法按照预定的试验方案和计

划, 在规定的条件下针对航天器实物进行故障或故障趋势的模拟和注入, 获得与健康管理系统验证相关的有关数据, 通过分析、处理、计算与评定等过程, 确定被验证的参数指标是否符合规定要求所采用的一种验证方法。具体内容包包括航天器单机测试性设计验证试验、寿命试验等, 以及系统级的大型环境试验等。

2.2.3 评估验证方法

在航天器系统样本量少、数据量不足等情况下可以考虑试用该方法, 一方面可以针对健康管理技术定量要求, 按照用户认可的计算、分析、评估模型和计算方法, 利用试验或在轨运行中已经得到的遥测数据, 以及系统的测试试验等数据进行分析评估, 判定航天器系统健康管理水平是否满足规定要求; 另一方面可以将待验证航天器产品同已经通过验证或实际使用结果证明满足要求的相似产品, 进行功能、使用环境条件、诊断预测能力等方面的对比分析, 根据相似产品验证结果得出航天器产品健康管理技术水平是否满足要求。具体内容包括历史数据评估、在轨评估验证等。

3 航天器地面健康管理系统验证系统设计

航天器地面 PHM 验证试验主要用于验证地面健康管理系统的接口和故障诊断、预测、评估和决策等功能。设计了相关验证系统, 架构如图 3 所示。

在基于仿真的验证流程中, 地面验证系统采用了基于模型的系统设计技术, 首先根据航天器各部件工作机理和故障机理进行原理建模, 构建航天器环境模型库、故障模型库和退化模型库, 然后利用航天器历史试验数据与在轨运行数据进行模型修正, 将得到的修正后模型用于系统设计及集成。在系统运行阶段, 验证平台通过效果评价软件发送验证指令至仿真调度软件, 仿真调度软件加载并运行集成后的模型, 生成仿真数据发送至可编程接口单元, 接口单元加载接口报文配置, 将仿真数据组帧以模拟卫星实际健康数据流, 通过星地链路模拟器传至地面系统, 地面系统完成分析工作后将分析结果反馈至验证效果评价软件, 后者根据反馈结果计算健康管理系统的检测率、虚警率等指标, 实现闭环验证。

在基于历史数据的研制流程中, 验证平台通过效果评价软件发送回放验证指令, 选择导航、遥感等不同类型的历史在轨数据, 发送至地面健康管理系统, 用于验证诊断、故障预测、寿命预测等系统功能。

其中, 航天器数字故障仿真、半物理仿真验证主要工作流程如图 4 (a) 所示。历史数据回放验证在开始时采用数据库接口程序, 按照数据库链接、数据库操作、数据抽取、数据返回以及转发流程实现数据回放启动控制。具体流程如图 4 (b) 所示。

4 验证系统实例分析与验证

利用通用故障预测与健康管理系统开发工业软件实现了航天器地面健康管理系统以及验证系统, 选取了导航、遥感

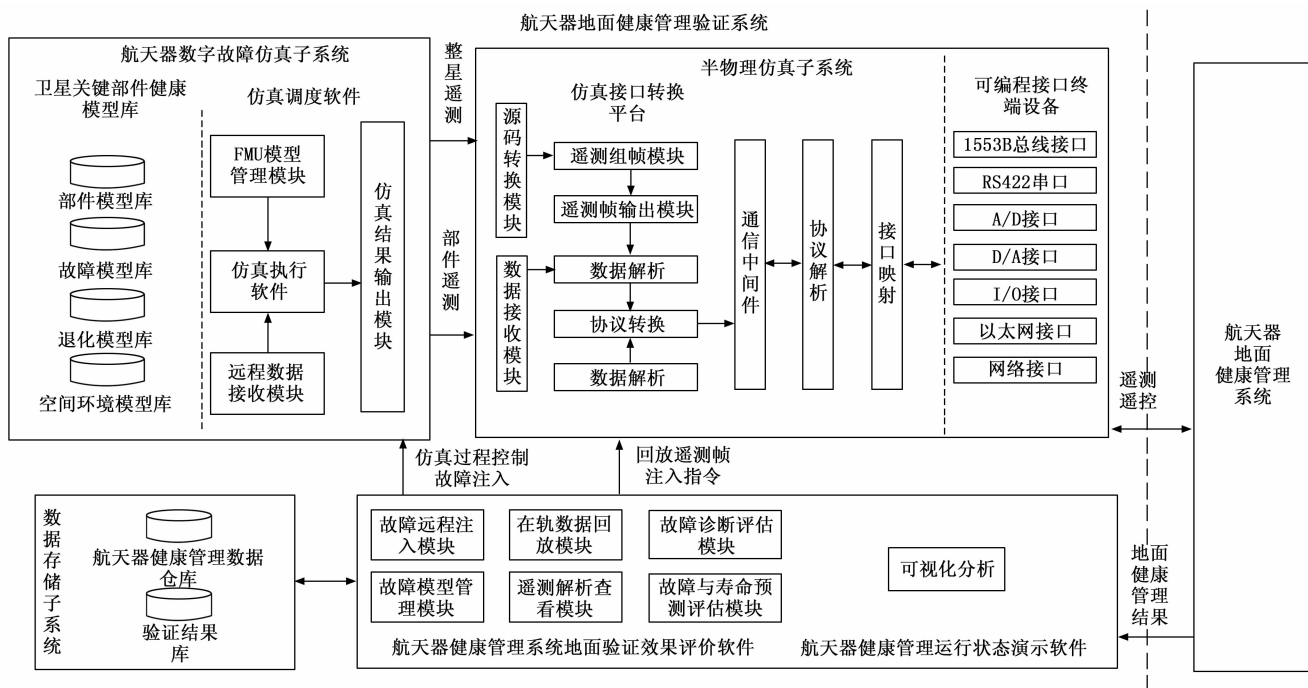


图 3 航天器地面健康管理验证系统架构图

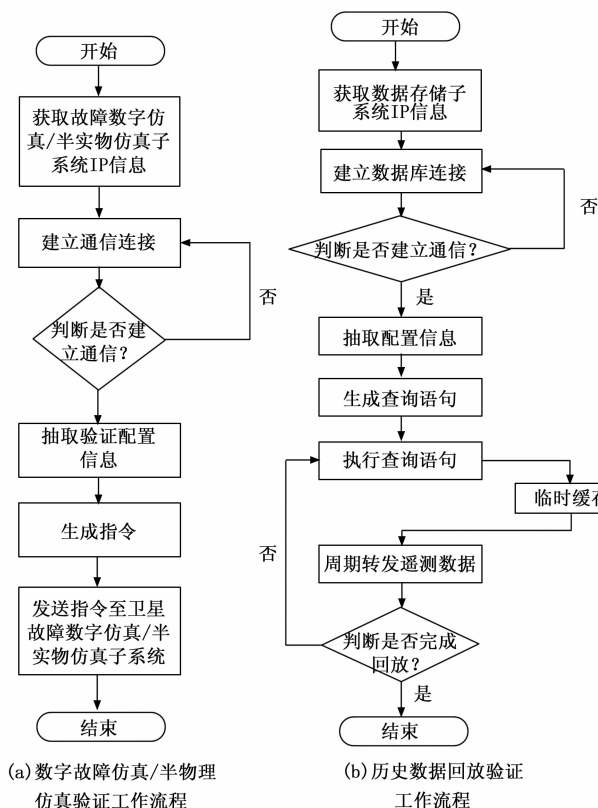


图 4 航天器地面健康管理验证系统工作流程

等多个卫星的控制、电源、热控、测控等分系统的遥测参数和故障模式, 结合数字仿真、半实物仿真、在轨历史数据等进行了航天器地面 PHM 系统的故障诊断、预测、评估

等功能和性能的验证, 其中诊断、预测部分验证情况说明如下。

4.1 帆板跟踪太阳异常故障诊断验证案例

该故障原因主要包括模拟太阳敏感器故障(无输出和输出异常)、控制计算机工作异常(驱动控制单元对外接口故障)、SADA 工作异常(驱动机构堵塞卡死、信号环短路和传动机构失效等), 在发生故障后, 系统主要表现为输出特征参数为 0。帆板无法正常捕获太阳将导致卫星帆板展开异常。采用地面数字故障/半实物仿真系统控制分系统仿真数据进行验证, 采用单测点、多工况分时序和多个测点同时注入的方式进行帆板无法正常捕获太阳故障仿真, 利用航天器健康管理地面系统的状态监测与诊断软件进行故障诊断, 验证相关性故障诊断模型, 并生成故障诊断结果。以驱动机构堵塞卡死为例说明, 主要步骤包括:

1) 验证开始。进入地面验证效果评价软件, 选择“ASS2 无输出传动机构失效”用例, 并查看用例故障描述及主要原因。如图 5 所示。

2) 故障注入。在地面验证效果评价软件执行测试用例, 在故障仿真设置之后驱动地面仿真系统开始仿真。该故障具体的仿真设置包括: 工况设置: 火箭分离消偏/帆板展开; 工况判定: 指向太阳; 注入故障: 驱动机构失效故障注入。如图 6 所示。

3) 故障诊断。在地面 PHM 系统中进入状态监控与诊断软件, 进入帆板跟踪太阳异常故障诊断任务, 采用相关性模型对进行诊断, 查看故障诊断结果。如图 7 所示。

4) 结果确认。返回地面验证效果评价软件, 查看用例执行后接收到的诊断结果与故障注入结果一致性, 记录验



图 5 地面验证效果评价软件进行典型故障诊断验证设置

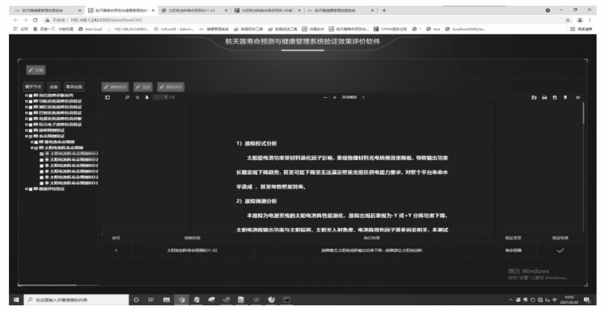


图 8 地面验证效果评价软件进行典型预测验证设置

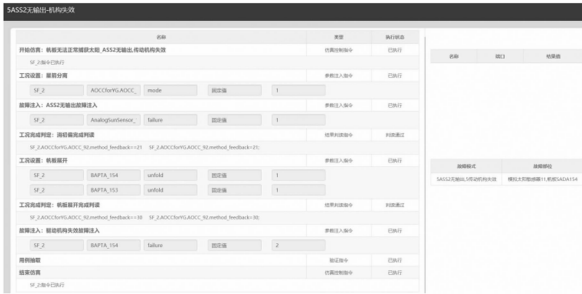


图 6 地面仿真系统进行典型故障诊断仿真设置

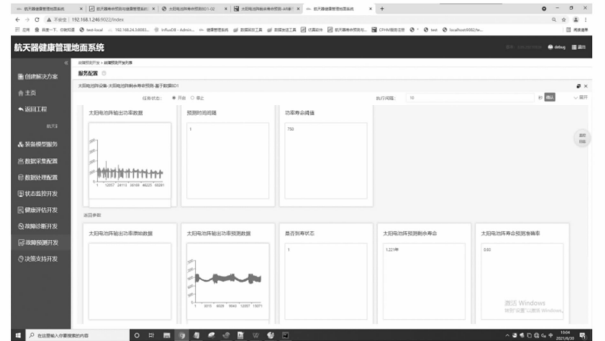


图 9 航天器地面健康管理系统典型预测界面

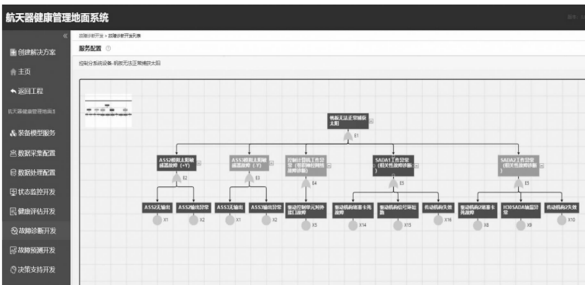


图 7 航天器地面健康管理系统典型故障诊断界面

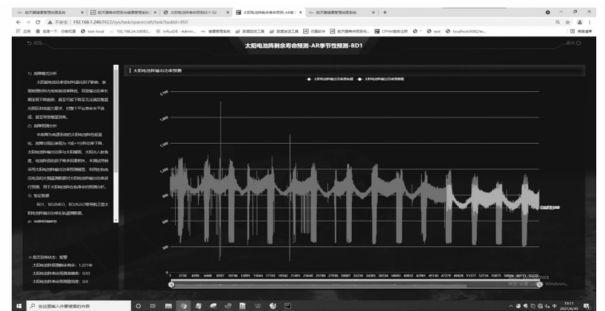


图 10 地面验证效果评价软件显示预测性能评价

证结果。对该故障的控制系统仿真数据进行 15 次诊断验证, 均能进行正常诊断。

4.2 太阳能电池阵输出功率下降预测验证案例

该故障原因为太阳能电池阵性能退化, 表现为 -Y 或 +Y 分阵功率下降, 与太阳辐照、太阳光入射角度、电池阵损伤因子等多因素相关。本验证采用基于数据驱动的 AR 预测模型, 利用某导航卫星 2005—2008 年的在轨遥测数据对太阳能电池阵输出功率进行预测分析验证, 主要步骤包括:

1) 验证开始。进入地面验证效果评价软件, 查看太阳能电池阵输出功率下降故障模式, 选择相关用例, 配置历史数据回放文件进行回放, 启动验证用例。如图 8 所示。

2) 故障预测。进入地面 PHM 系统的“故障与寿命预测软件”, 查看“太阳能电池阵输出功率下降”任务以及故障预测结果, 按照预警门限进行监视。如图 9 所示。

3) 结果确认。返回地面验证效果评价软件, 查看用例执行后接收到的预测结果, 此次预测准确率为 93%, 确认预测成功和正确性。如图 10 所示。

4.3 故障诊断与预测综合分析验证案例

按照第 3 节所示方法和步骤选取多个卫星、分系统和

诊断方法进行了航天器地面 PHM 系统的故障诊断验证, 综合分析结果如表 2 所示, 可见取得了较好的诊断效果。

按照第 3 节所示方法和步骤选取多个卫星关键部件和预测方法进行了航天器地面 PHM 系统的故障预测验证, 综合分析结果如表 3 所示, 取得了较好的预测效果。

5 结束语

航天器地面 PHM 验证系统技术通过实现对现有 PHM 研究成果的有效验证与评价, 发现 PHM 系统研究和设计过程中存在的缺陷, 为 PHM 系统设计提供信息一遍采取改进措施, 从而推进 PHM 系统的实际工程应用, 因此已成为一个非常富有挑战性和迫切需要解决的问题。本文设计并实现了一种基于仿真和试验验证的航天器地面健康管理验证系统, 通过仿真和在轨数据试验, 可以提高 PHM 能力评估的准确度和效率, 降低 PHM 验证成本, 将对航天器等复杂装备测试保障工程产生积极的影响。

表 2 PHM 验证系统故障诊断验证指标分析表

故障模式	验证方式	验证诊断模型	故障数据验证次数	故障验证成功次数
无法消旋故障	单测点故障注入仿真	支持向量机模型	23	21
帆板无法正常捕获太阳故障	多测点同时注入仿真	相关性模型	15	14
在轨姿态失控故障	多测点同时注入仿真	自测试编码模型	17	16
蓄电池储能故障	多测点同时注入仿真	时间序列模型	16	15
光照区蓄电池组充电不足	多工况分时序/多测点同时注入仿真	K 近邻故障诊断模型	154	144
阴影区母线过压	多工况分时序/多测点同时注入仿真	支持向量机	154	138
阴影区母线欠压	多测点同时注入仿真	自测试编码	308	288
遥控数据管理异常	导航卫星相关故障数据	相关性模型	7	6
自主导航功能异常	导航卫星 ISU、激光终端处理机等故障数据	卷积神经网络模型	1054	938
通道下行误码增加	导航卫星相关故障数据	卷积神经网络模型	120	108
无法建立星上时频基准	高分卫星相关故障数据	卷积神经网络模型	82	80
合计			1950	1768
结论	故障检测率:91%			

表 3 PHM 验证系统故障预测指标分析表

故障模式/寿命	验证方式	预测方法	准确率/%
测控固放功率异常下降	2011 年某卫星通道输出功率异常	LSTM 神经网络	93
铷钟性能异常	2015 年某卫星铷钟性能异常下降	时间序列模型	94.2
行波管放大器螺流异常	2016 年某卫星行波管放大器螺流降	LSTM 神经网络	87
太阳能电池阵功率下降寿命预测 1	某卫星太阳能电池阵在轨电压、电流、功率、光强数据回放	太阳能电池阵失效物理模型	92
太阳能电池阵功率下降寿命预测 2	某卫星 7 年太阳能电池阵输出功率在轨遥测数据	AR 模型	93
蓄电池组寿命预测	卫星锂离子电池地面循环寿命试验数据	改进粒子滤波模型	92.5
结论	在置信度 90% 条件下, 平均预测准确率 92.4%		

参考文献:

[1] 邱立军. 武器装备故障预测与健康管理系统的核心技术 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (5): 17-18.

- [2] DZAKOW J E, VALENTIME G S. Advanced techniques for the verification and validation of prognostics and health management capabilities [C] //Proceedings of the 60th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach [C]. Virginia, 2006.
- [3] KACPRZYNSKI J, LIBERSON A, PALLADINO A, et al. Metrics and development tools for prognostic algorithms [C] // Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2004: 3809-3815.
- [4] 闻化, 胡志伟. 装备故障预测与健康管理能力验证评估技术 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 260-264.
- [5] LEWIS F L. 工程系统中的智能故障诊断与预测 [M]. 袁海文, 王秋生, 袁梅, 等译. 国防工业出版社, 2013.
- [6] 周林, 赵杰, 冯广飞, 等. 装备故障预测与健康管理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [7] YANG C S, LETOURNEAU S. Model evaluation for prognostics: estimating cost saving for the end users [C] //The Proceedings of the 2007 International Conference on Machine Learning and Applications, Cincinnati; National Research Council of Canada, 2007: 1-20.
- [8] UCKUN S, GOEBEL K, LUCAS P J F. Standardizing research methods for prognostics [C] //Proceedings of the 2008 International Conference on Prognostics and Health Management, Denver: IEEE, 2008: 1-10.
- [9] 赵思阳, 李文东, 杨柳青, 等. 高分多模卫星自主健康管理系统设计与验证 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (3): 64-68.
- [10] 潘宇倩, 冯文婧, 张弓, 等. 导航卫星自主健康管理指标体系构建方法 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (4): 8-14.
- [11] 冯文婧, 潘宇倩, 张弓, 等. 导航卫星健康管理协同仿真验证系统设计与实现 [J]. 无线电工程, 2022, 52 (5): 896-903.
- [12] 苗学问, 杨云, 雷迅, 等. 军用飞机预测与健康管理系统性度量体系研究 [J]. 测控技术, 2011, 30 (12): 106-110.
- [13] 尉询楷, 刘芳, 陈良峰, 等. 航空发动机健康管理用户的诊断预测指标体系 [J]. 航空发动机, 2012, 38 (5): 27-35.
- [14] 任占勇. 航空电子产品预测与健康管理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [15] 李兴旺, 汪慧云, 沈勇, 等. 飞机综合健康管理系统的申请与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1069-1072, 1079.
- [16] 张雷, 李志栋, 孙波. 航天器健康管理平台设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 18-22.
- [17] FAN H Z, SUN B, FAN H Z, et al. Design of the spacecraft health management ground support system based-on big data [C] //68th International Astronautical Congress 2017 (IAC 2017), 2017.
- [18] JENNIONS I K. Integrated vehicle health management: the technology [M]. Society of Automotive Engineers Inc, 2013.
- [19] VACHTSEVANOS G. Performance metrics for fault prognosis of complex system [C] //Proceedings of the 2003 IEEE Aerospace Conference, New York: IEEE, 2003: 341-345.
- [20] 吴明强, 房红征, 文博武, 等. 飞行器故障预测与健康管理 (PHM) 集成工程环境研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 98-101.
- [21] 代京, 刘浩, 于劲松. 飞行器健康管理系统验证与评估技术研究 [J]. 电子测量技术, 2012, 35 (8): 1-10.