

机载燃油测量系统 PHM 测试床设计及故障注入实现

余思奇, 景 博, 吴 喆, 杨 洲, 邓 森

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:针对国内缺少故障预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)验证评估平台的现状,在深入研究国外典型 PHM 测试床基础上,以飞机典型机电系统——燃油测量系统为例,提出 PHM 测试床设计方案,采用 NI 虚拟仪器和 PXI 总线模块仪器设计并实现 PHM 测试床故障注入功能,解决 PHM 验证中数据源匮乏的问题。实验表明:系统能有效再现故障模式,为 PHM 技术提供验证评估平台,对机电系统 PHM 通用化验证平台研究有参考价值。

关键词:故障预测与健康管理;PHM 测试床;故障注入;机载燃油测量系统

中图分类号:V241.7+21;TP206+3;TP391.9;V328.3 文献标志码:A 文章编号:1674-5124(2013)05-0116-05

Design of airborne fuel measurement system PHM test-bed and realization of fault injection

YU Si-qi, JING Bo, WU Zhe, YANG Zhou, DENG Sen

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the domestic status of lacking of validation and evaluation platform for prognostics and health management (PHM), the paper proposed the scheme of PHM test-bed design based on deep study of the typical PHM test-bed abroad and took the typical aircraft electromechanical subsystem——fuel measurement system as an example. It used NI virtual instrumentation and PXI modular instrument to design and realize the fault injection of PHM test-bed, which can solve the problem that experimental data for PHM validation is insufficient. The experimental results show that system can make the faults reappear effectively and therefore provide a validation and evaluation platform for PHM technology. It is a useful reference for the general PHM validation platform research of electromechanical systems.

Key words: prognostics and health management; PHM test-bed; fault injection; airborne fuel measurement system

0 引 言

故障预测与健康管理是一种全面的故障检测、隔离、预测及健康管理技术,能有效提高系统安全性、战备完好率和任务成功率,对推动自主后勤、降低使用维护费用具有重要作用^[1-2]。验证评估是实现 PHM 的关键环节,其发展研究的滞后已逐渐成为制约 PHM 技术熟化的瓶颈。PHM 验证与评估存在的

主要问题包括缺少算法评估对比的通用性框架和指标体系,验证平台较少以及实时故障数据难以获取等。

PHM 测试床为 PHM 验证评估提供综合开发环境和高度仪器化的实验平台,对促进诊断理论成熟、提供算法性能评估、辅助健康管理系统设计意义重大^[3-4];同时能显著降低试验费用,缩短验证评估周期;通过故障注入,再现故障征兆,也在一定程度上解决了实时故障数据缺乏的困境。飞机机电系统主要指对飞行或战斗起底层支撑和辅助作用的机械电气系统。作为飞机结构中的典型系统之一,研究其 PHM 相关技术具有代表性及现实意义^[5-6]。

收稿日期:2013-01-04;收到修改稿日期:2013-02-27

基金项目:航空科学基金项目(20101996012)

作者简介:余思奇(1990-),男,湖南南县人,硕士研究生,专业方向为故障预测和健康管理验证与确认。

本文以飞机典型机电系统——机载燃油测量系统为例,研究了 PHM 测试床相关技术。针对国内 PHM 测试床理论研究刚刚起步而工程实践尚未展开的现状,在总结国外典型 PHM 测试床结构组成、设计理念和故障注入方式的基础上,提出机载燃油测量系统 PHM 测试床设计方案。

1 典型测试床特点分析

美国国家航空航天局(NASA)埃姆斯研究中心致力于 PHM 技术及验证的研究,设计了先进诊断和预测测试床^[7-8](advanced diagnostics and prognostic testbed, ADAPT)及机电作动器飞行测试台(flyable electromechanical actual test stand, FLEA),主要用于提供诊断算法的实验平台和诊断系统评估测试的技术基础,搭建 PHM 理论与航空应用间的桥梁,促进诊断技术的成熟。

1.1 ADAPT

ADAPT 包括航天电源系统及负载的硬件实物平台、数据采集系统和基于局域网的评估系统。实物平台包括蓄电池、负载以及相关组件,模拟航天电源系统中电能的产生、存储及配送过程;系统数据采集和控制模块能实时获取电压、电流和温度等数据;验证算法直接或通过辅助系统集成到测试床,利用 C++ 或 Java 应用程序接口与系统数据通信。

ADAPT 同时构建了数字式虚拟测试床,实现对测试床硬件高仿真度建模。虚拟测试床采用与 ADAPT 相同的基于订阅/发布的数据通信模式、功能角色及局域网接口。

ADAPT 通过重复的软硬件故障注入方式,为诊断和预测模型及算法提供标准化的测试平台。软件故障注入通过修改控制命令和补偿传感器数据模拟传感器故障;硬件故障注入直接引入对测试床无安全影响的故障;虚拟测试床仿真实验成本昂贵、危险性高或硬件难以注入的故障。

1.2 FLEA

FLEA 包括航空作动器系统实物平台、数据采集系统和控制器。系统采用小型化、自主化设计,所有装置集成到小型铝合金设备内,正常工作仅需要提供机载数据总线和电源接口。作动器实物平台包括正常作动器、故障作动器和负载作动器,其中负载作动器为其他作动器提供负载;控制器和数据采集卡均使用货架产品;软件系统基于 LabVIEW 和 Matlab 混合编程设计。

FLEA 商品化、集成化的设计不仅能够提供软硬件结合的故障注入,还能实施性价比良好的失效试

验分析。故障注入包括通过软件修改被测数据模拟传感器故障;通过外围装置作用模拟部分机械故障。失效实验采用系统重复工作、加速失效的方式实施。

NASA 埃姆斯研究中心针对不同系统设计的 PHM 测试床,具有 4 个共同特点:

(1) 基于实物系统硬件平台设计测试床,为 PHM 技术验证提供真实的运行环境。

(2) 布置大量传感器,提供强大的数据采集能力,能有效获取系统运行数据。

(3) 从安全性、经济性和真实性的出发,采用多样化的故障注入方式。

(4) 充分利用货架商品设计软硬件,提高系统通用性、扩展性和经济性。

1.3 国内研究现状

我国 PHM 技术起步较晚,与国外存在较大差距。目前主要研究集中于 PHM 关键技术,并且已在数据采集、诊断预测算法等方面具有一定技术积累。PHM 系统设计大部分借鉴机械信息管理开放系统联盟(MIMOSA)提出的视情维修的开放系统体系构架(OSA-CBM),仍处于理论研究阶段。部分科研院所进行了 PHM 系统设计的工程实践,但产品功能有限。

PHM 验证评估技术研究则刚刚起步,吴明强等在分析国内外研究的基础上,提出构建 PHM 集成工程环境的设计思路,并阐述了各部分的功能组成^[9];代京等综述了 PHM 验证评估的相关定义和国内外研究现状,指出了国内研究中存在的不足^[4]。目前国内 PHM 测试床研究仍停留在理论构想阶段,没有针对具体对象的工程实践,因此建立典型系统 PHM 测试床对 PHM 验证评估的理论发展和工程实践都具有积极意义。

2 机载燃油测量系统 PHM 测试床设计

2.1 飞机燃油测量系统

飞机燃油系统是储存燃油,并保证在飞机所有工作状态下按规定顺序向发动机输送燃油的装置。飞机燃油测量系统是飞机燃油系统的子系统,用于提供各种油量信息,一般由油量传感器、补偿传感器、密度传感器、燃油测量计算机和油量显示等部分组成,其基本工作原理如图 1 所示。系统结构复杂,信号种类繁多,交联影响较大,是飞机典型的机电电子系统。

传统的模拟式机载燃油测量系统存在测量精度低及可靠性维护性差等缺点,现役战机燃油测量系统同样面临故障率高和测试效率低的问题。随着视情维修和自主后勤要求的提出,面向新一代战

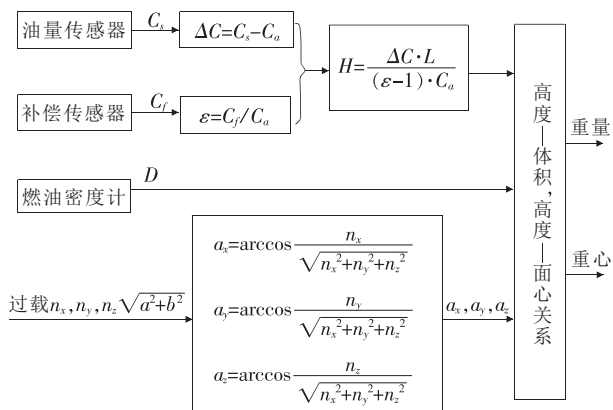


图1 飞机燃油测量系统基本工作原理

机的机载燃油测量系统必须具备 PHM 技术,以适应新型武器装备提高维修效率、降低全寿命周期费用的需求。

2.2 PHM 测试床设计

针对机载燃油测量系统 PHM 技术发展需求并结合典型机载燃油测量系统特点,设计 PHM 测试床由测试平台、运行平台和验证评估平台组成,能为 PHM 系统设计、测试、评估和改进提供综合开发环境。系统结构图如图 2 所示。

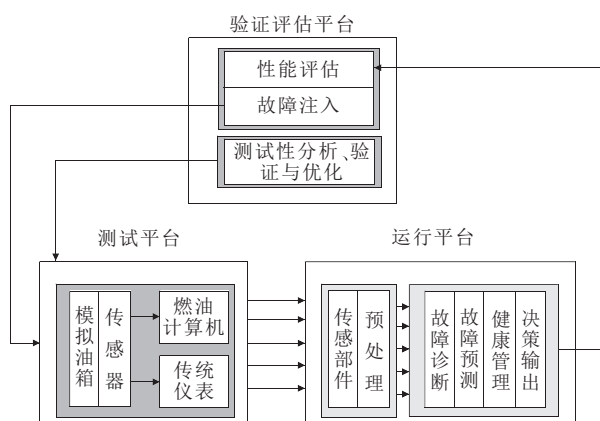


图2 机载燃油测量系统PHM测试床

测试平台在机载燃油测量系统半实物仿真平台的基础上搭建而成,包括模拟油箱、传感器、燃油计算机和传统仪表,构成了模拟式机载燃油测量系统和数字式机载燃油测量系统。能真实地模拟机载燃油测量系统,提供 PHM 系统高仿真度运行环境;以数字式机载燃油测量系统为载体,提供测试性设计与改进硬件平台;允许故障注入,提供 PHM 系统测试环境。

运行平台由数据采集和处理器组成。数据采集方式包括传感器采集和测试点信号经接线端子板直

接引出,处理器采用 PXI 总线嵌入式控制器。运行平台为 PHM 全过程实施提供软件系统和硬件基础。

验证评估平台由故障注入模块和测试性模块组成。故障注入模块包括 PXI 总线系统硬件平台和 NI 虚拟仪器软件平台,能提供软硬件结合的故障注入方式。测试性模块搭载了美国 QSI 公司开发的集成化系统软件平台 TEAMS。验证评估平台能再现故障征兆,提供算法验证所需的故障数据;验证 PHM 性能指标,提供性能分析报告;构建基于多信号流图的测试性建模环境,提供对象系统测试性分析、验证与优化软件平台。

3 故障注入模块设计

3.1 总体框架

依据研究历史数据和维修经验所总结的机载燃油测量系统故障模式,采用软硬件结合的故障注入方法。

(1) 软件故障注入。燃油测量系统传感器数量和故障类型多,硬件故障注入需要大量外围电路,故设计软件故障注入器,通过修改采集的数据,模拟传感器故障及数据错误。

(2) 硬件故障注入。对易于实现、不影响系统安全的故障(如传感器开路等)硬件故障注入^[10]。

(3) 边界扫描故障注入。电路板故障注入通常采用插入法和探针法。插入法会改变目标系统的时序(尤其是高速系统);探针法容易损害芯片,且对于部分封装的芯片故障覆盖率不高。基于燃油计算机固有的 JTAG 调试接口,采用边界扫描技术实施故障注入^[11]。

结合燃油测量系统实物平台和故障注入需求,提出故障注入模块的总体设计方案。本模块包括控制器、故障注入器和数据采集系统,能实现燃油测量系统的运行数据采集和故障注入,同时提供被测算法性能评估报告,模块框图如图 3 所示。故障注入模块首先确定测试床各子系统工作状态,并根据用户需求设置故障注入参数;其次实施故障注入以及有效性判定;最后给出故障诊断算法评估结论。

3.2 硬件设计

为提高系统的扩展性,选取货架产品较多、规范定义成熟、与主流软件平台兼容性高的 PXI 总线系统。机载燃油测量系统测试床故障注入模块硬件由控制器、故障注入器、数据通信模块等组成,图 4 为系统硬件设计图。

控制器采用凌华科技 3U PXI-3950/M2G 嵌入式控制器,配置 CoreTM2Duo T7500 2.2GHz 内核,带有 2 G 内存和 160 G 硬盘,安装 Windows XP 系统。控制器提供良好的人机交互界面,支持故障参数设

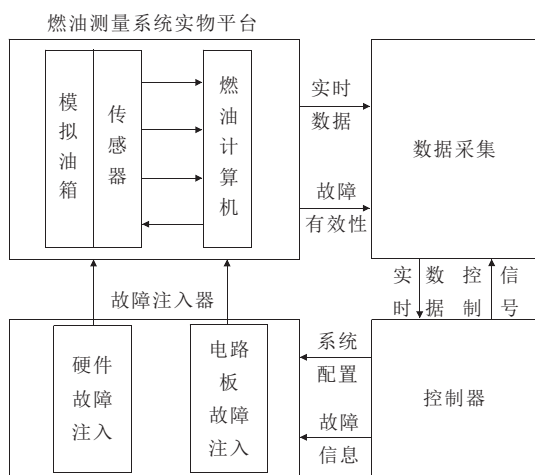


图3 故障注入模块框图

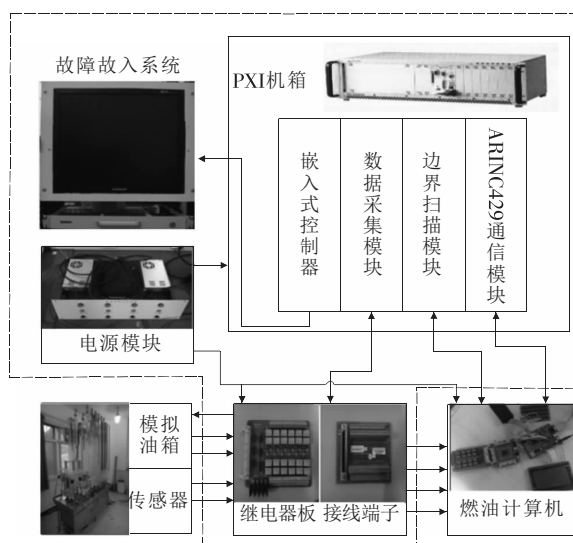


图4 系统硬件设计图

置、控制故障注入器配置及故障注入;搭载评估系统,提供算法评估报告;构建数据库,辅助故障建模、算法开发和评估。

故障注入器由注入电路和边界扫描模块组成。注入电路主要完成实物平台的故障注入,包括矩阵开关(#2)和接线端子板。设计矩阵开关选通式故障注入方式,通过改变继电器状态,屏蔽正常信号,引入故障信号。如图 5 所示。边界扫描模块采用 PXI 标准化模块仪器,将控制器设置的故障参数转换成符合 IEEE1149.4 标准的混合边界扫描信号,模拟集成芯片以及电子元件虚焊、短路等故障。

数据通信模块包括 ARINC429 接口电路和数据采集电路,均采用支持 PXI 总线的模块仪器。数据采集电路提供多路模拟和数字信号输入,采集传感器实时运行数据,并提供矩阵开关多路控制信号。

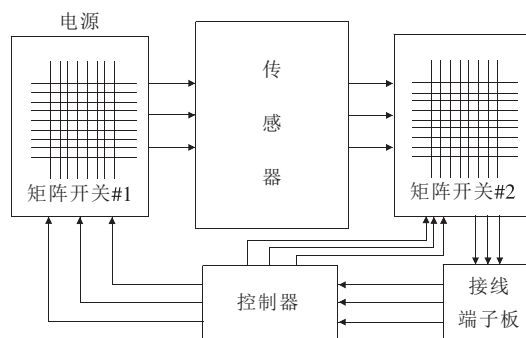


图5 注入电路原理图

ARINC429 接口电路实现与燃油计算机的数据通信, 获取油耗量、告警及系统实时状态监控信息。

3.3 软件设计

PXI 总线是在 PCI 总线规范基础上设计实现的,保持了与用户熟悉的工业 PC 软件的兼容性,本文选用 NI 公司的图形化编程的软件 LabVIEW 设计控制界面。LabVIEW 提供与网络和绝大多数结构化查询语言数据库通信的能力;集成的 DAQ 选项卡,使用户能够快速地采集数据和产生信号;采用模块仪器配套的驱动软件,无需用户自行设计。本文基于 LabVIEW 强大的数据采集和通信能力采用混合编程设计故障注入模块。软件系统框架如图 6 所示。

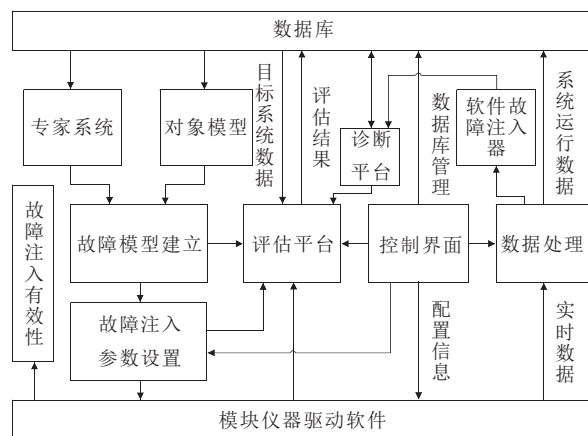


图6 软件系统构架

故障注入模块软件系统包括故障注入控制、诊断平台、数据库和数据处理。

故障注入控制由控制界面、软件故障注入器组成,采用 LabVIEW 和数据库混合编程设计,以实现故障注入器的配置、故障注入控制以及数据库管理。控制界面采用图形化编程语言设计,支持故障注入参数设置、有效性判定、评价结果及故障注入器配置信息的显示;利用 LabSQL 工具包提供的数据库访

间能力,辅助用户建立故障模型,设置故障样本、注入点、样本数量、注入时间等参数;借助 DAQ 选项卡功能,实现故障注入器控制。软件故障注入器采用 LabVIEW 功能函数信号发生子模块产生基本波形、各种噪声和直流偏移等信号,能仿真噪声过大、静态故障和突发故障等。

评估模块包括诊断平台和评估平台。诊断平台由 Matlab 和 LabVIEW 混合编程设计,借助 ActiveX 自动化技术实现 LabVIEW 对 Matlab 命令的调用,为算法提供运行平台;利用 LabVIEW 的数据采集和通信功能,为算法提供故障数据。评估平台通过计算目标系统的故障隔离率、故障虚警率等指标,并结合故障模型建立及设置的注入参数全面评价目标系统。

数据处理模块利用 LabVIEW 功能函数信号处理子模块提供的数字滤波器、时域分析和频域分析等功能,处理实时采集的系统工作数据,并提供给软件故障注入器、诊断平台和数据库等模块。

数据库是软件系统的基础,包含专家系统、对象模型、评价结果和历史数据等子数据库,用于辅助故障模型建立以及记录评估结果和系统工作数据。

4 故障注入实验

本实验注入的故障类型如表 1 所示。机载燃油测量系统半实物仿真平台安装 19 根电容式传感器和 15 根磁致伸缩液位传感器,结合表 1 的故障类型,本次实验注入故障 257 个。其中成功注入故障 254 个,对 3[#]、7[#]、12[#] 电容式传感器注入短路故障引起电压不稳定,导致输出干扰较大并造成故障注入失败。实施软件注入的故障按原理可分为 3 类,即噪声干扰(故障 3)、随机偏差(故障 4~5)和固定偏差(故障

6~8)。实验结果表明,本文设计的故障注入模块能有效注入机载燃油测量系统常见故障。

5 结束语

PHM 技术广阔的发展前景和急迫的应用需求促使与之紧密联系的验证评估技术成为国内外研究热点。本文针对国内 PHM 验证平台缺少或功能有限的现状,给出了机载燃油测量系统 PHM 测试床设计方案及故障注入实现手段;并通过故障注入实验,证明了研究成果的可行性;未来应进一步完善故障模式数据库以及多故障注入实验等。

参考文献

- [1] Gorinevsky D, Smotrich A, Mah R, et al. Open architecture for integrated vehicle health management[C]// AIAA, 2010: 3434.
- [2] 邱立军. 故障预测与健康管理技术在航空装备领域的应用[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(3): 54-56.
- [3] Kurtoglu T, Narasimhan S, Poll S, et al. Benchmarking diagnostic algorithms on an electrical power system testbed[C]// Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009.
- [4] 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.
- [5] 陶来发, 樊焕贞, 吕琛, 等. 机电系统故障预测技术的现状与分析[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 636-639.
- [6] 刘大伟, 陶来发, 吕琛, 等. 飞机机电系统 PHM 的综合诊断推理机设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(增刊): 114-118.
- [7] Patterson-hine P S, Garcia D a. et al. Advanced diagnostics and prognostics testbed[C]// 18th International Workshop on Principles of Diagnosis.
- [8] Patterson-hine P S, Camisa J A. et al. Evaluation, selection, and application of model-based diagnosis tools and Approaches [EB/OL] <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.78.8647>.
- [9] 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.
- [10] 张阳, 谢文涛. 基于 PXI 总线的故障注入系统设计[J]. 测控技术, 2011(30): 190-192.
- [11] 邓志伟, 徐凯, 张天宏. 边界扫描技术在电子控制器测试中的应用[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 636-639.

表 1 注入故障列表

代码	名称	故障模式
1	电容式/磁致伸缩液位传感器	开路
2	电容式/磁致伸缩液位传感器	短路
3	电容式/磁致伸缩液位传感器	噪声过大
4	电容式/磁致伸缩液位传感器	转换误差大
5	电容式/磁致伸缩液位传感器	精度下降
6	电容式/磁致伸缩液位传感器	固定偏差
7	电容式/磁致伸缩液位传感器	数值漂移
8	电容式传感器	电容误差超差