

航空机电作动器健康管理验证系统研究

于劲松^{1,4}, 刘浩^{1,3}, 张平¹, 廖灿星², 李芳亮³

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 解放军 95478 部队, 重庆 401329;
3. 解放军 95927 部队 14 分队, 河北 沧州 061036; 4. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘要: 针对健康管理智能算法与推理模型性能的验证与评估需求, 设计了一种航空机电作动器健康管理验证系统; 通过分析航空机电作动器的故障机理, 提出了电机、控制器、齿轮减速器的数学建模方法和对应的主要失效模式的故障注入方法, 设计了验证系统硬件平台、基于组件模式的通用软件运行环境及支持实时显示功能的验证与评估模块; 仿真结果表明, 该平台能够支持各种健康管理算法与系统模型的加载和调用, 并能够实现验证与评估信息的在线显示。

关键词: 航空机电作动器; 健康管理; 验证系统

Study on Validation System of Prognostic and Health Management System for Aviation Electromechanical Actuator

Yu Jinsong^{1,4}, Liu Hao^{1,3}, Zhang Ping¹, Liao Canxing², Li Fangliang³

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Unit 91, Army 95478 of PLA, Chongqing 401329, China; 3. Unit 14, Army 95927 of PLA, Cangzhou 061036, China; 4. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: A validation system of prognostic and health management system for aviation electromechanical actuator (AEMA) was designed for validating and evaluating the intelligent algorithms and reasoning models of prognostic and health management (PHM) system. By analyzing the failure mechanism of AEMA, the modeling and fault injection methods of electrical machine, common fault data source were presented as well as the hardware architecture and general software operating environment based on component-based architecture of the verification prototype system were designed, in which various PHM algorithms and system models could be loaded, called and evaluated, simultaneously, the information of verification and evaluation could be online real-time displayed.

Key words: aviation electromechanical actuator; prognostic and health management; validation system

0 引言

在健康管理系统 (PHM, Prognostic and Health Management) 设计完成之后, 如何对其智能算法和推理模型进行验证与评估一直是一个热点和难点问题^[1]。为此, 国内外相关研究人员着力于研究 PHM 验证系统, 试图通过搭建通用的软硬件架构来为健康管理算法和模型提供可靠的验证和评估平台。这些 PHM 验证系统的典型代表有美国国家航空航天局埃姆斯研究中心 (NASA Ames Research Center) 和范德比特大学 (Vanderbilt University) 合作开发的先进诊断与预测测试平台 (ADAPT, Advanced Diagnostics and Prognostics Test-bed)^[2] 以及佐治亚理工学院与美国 Impact 科技公司共同开发的基于网页的 PHM 验证与确认平台^[3]。前者以航空电源系统为研究对象, 开展相应的故障诊断与故障预测技术的开发与验证工作; 后者结合 F-35 项目的实际需求, 验证与评估在 F-35 的 PHM 架构中所有层面决策的准确性。

因此, 依据有代表性的对象系统建立一类切合实际的验证

平台为故障预测与健康管理理论及应用提供技术保障, 是健康管理领域需要引起重视且亟需解决的问题。通过查阅目前国内资料显示, 这方面的研究还很少。为此, 本文围绕航空机电作动器健康管理 (AEMA-PHM, Aviation Electromechanical Actuator-Prognostic and Health Management) 系统的验证问题, 从故障注入方法、验证系统软硬件环境设计和评估显示模块设计 3 个方面展开具体研究。

1 AEMA 故障机理描述

AEMA 是机电一体化的复杂装置, 在全电化飞行器设计趋势下将发挥重要的作用。其故障种类涵盖了机械、电子和电气等多个门类, 故障模式及故障机理在机电系统中具有很好的代表性。

通过详细分析 AEMA 生产方——Moog 公司提供的失效模式影响和危险程度信息、已经公布的工业信息、美国军方报告信息以及一些关于 AEMA 诊断的研究报告可知, 其最主要的故障类型为机械故障, 约占故障总数的 60%。其中, 轴承故障最为常见, 约占一半; 其次是齿轮、螺纹及滚珠丝杠的故障; 电机和控制器也是较容易发生故障的部件^[4]。

分析表征各特定故障模式的故障特征状态变量并研究各故障特征在闭环控制系统中的传播机理, 选取的故障特征应尽可能同时满足具有物理意义和计算不复杂两项要求。进一步来说, 故障特征的选取将基于以下 3 项标准:

(1) 故障特征之间差别大, 但是特征样本之间的差别小;

收稿日期: 2013-11-03; 修回日期: 2014-01-15。

作者简介: 于劲松 (1968-), 男, 江苏滨海人, 副教授, 主要从事自动测试与智能诊断技术、新型总线仪器与合成仪器技术、复杂系统综合健康管理技术等方向的研究。

张平 (1955-), 女, 北京人, 教授, 博导, 主要从事飞行控制系统方向的研究。

(2) 故障特征对外界环境变量如噪声、系统误差等相对不敏感;

(3) 故障特征与 AEMA 其它故障模式的故障特征不关联。

基于上述标准确定了如表 1 所示的 4 种故障模式, 作为健康管理验证平台中最终需要注入的故障模式。这些故障模式不仅能够在 Matlab 下的 Simulink 模型仿真中注入, 同时也将会在实物验证中得到实现。

表 1 AEMA- PHM 验证系统拟注入的故障模式

AEMA 元件	功能	主要失效模式
电机	将电信号转换为机械的转动能	漏电阻故障 绕组匝间故障 轴承抱死故障
控制器	根据指令信号和位置反馈控制电机的输出	霍尔信号检测故障
齿轮减速器	转换转动能并实现减速功能	齿轮断齿故障 齿轮摩擦力大

2 AEMA- PHM 验证系统总体设计

AEMA- PHM 验证系统首先进行全数字健康管理算法的仿真验证, 在全数字健康管理仿真能够正确运行, 也即所有的故障模式以及 PHM 算法都已经得到仿真验证的基础上, 逐步加入半实物仿真数据源, 最终在不对 AEMA 进行破坏性试验的前提下, 使得尽可能多的故障信号由半实物仿真注入。系统总体结构如图 1 所示。

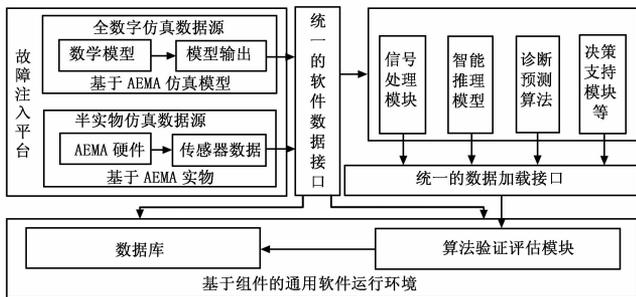


图 1 AEMA- PHM 验证系统总体结构图

该 AEMA- PHM 验证系统主要由故障注入平台、PHM 系统和软件运行环境 3 个部分构成。

(1) 对于故障注入平台中的全数字仿真数据源部分, 为其选择开发出合适的 Simulink 模型, 该仿真模型依据某型号直升机的机电作动器建立, 仿真情况尽可能地与 AEMA 实际情况相吻合, 能够真实地仿真机电作动器的工作状态并进行对应的故障注入;

(2) 对于半实物仿真数据源部分, 根据所需要注入的故障类型开发出对应的信号采集电路及故障注入电路, 具备实时采集状态数据与动态故障注入等功能。半实物仿真模式运行时, 部分传感器数据 (比如电压、电流、转速等参数) 由数据采集系统采集自实际作动器工作时的输出信号;

(3) PHM 系统主要由信号处理模块、智

能推理模型、诊断预测算法与决策支持模块等组成, 完成对 AEMA 健康状态的综合评估;

(4) 基于 Lua 脚本和 C# 语言开发了一套层次清晰、可重用、可移植的软件运行支撑环境。需要实现 PHM 系统模型、算法的可定制与动态加载, 同时支持对其他的模型和算法模块进行加载、验证与评估等功能。所有的传感器数据都会通过软件运行支撑环境分别传输给后面的处理算法模块。软件接收到这些原始参数后, 首先调用 PHM 系统中的信号处理模块实时地对数据进行信号处理, 将它们转换为故障征兆量或者故障证据信息 (比如电机三相电流有效值的标准差), 并将转换后的故障征兆量或者故障证据信息实时的传递给故障诊断与预测算法模块, 故障诊断模块对故障征兆量进行诊断后会给出一个最终的诊断结果, 当故障检测模块报警后, 启动故障预测模块通过预测算法给出作动器剩余的使用寿命, 起到故障预测的作用。

2.1 验证系统故障注入方法设计

AEMA 仿真模型由多个模块组成, 包括电机本体模块、霍尔检测模块、逆变器模块、换相逻辑模块、齿轮减速箱模块、反电动势生成模块及 PID (比例、积分、微分) 控制模块等。其仿真模型的 Simulink 图如图 2 所示。

针对以上建立的仿真模型, 本文主要研究了电机堵转故障、绕组匝间短路故障、齿轮减速器故障与控制器故障 4 种故障的注入方法。

2.1.1 电机堵转故障

电机堵转故障的注入方式为在电机的负载端加一个很大的力矩来实现。负载端力矩很大, 所以电机电流堵转时会增大。

2.1.2 绕组匝间短路故障

该故障产生的短路匝自成回路, 其内部会产生很大的电流, 使电机磁场产生畸变, 使短路匝的温升在很小的范围内迅速升高, 最终损坏绝缘, 烧毁电机。因此为了有效监控机电作动器的工作性能, 获取匝间短路的早期故障特征十分必要。

对于发生绕组短路故障的电机, 考虑相间互感不平衡, 可以在 Matlab 下借鉴文献 [5-6] 建立带匝间绕组故障注入的电机模型。

2.1.3 齿轮减速器故障

齿轮减速器故障由 PID 控制模块模拟, 即每当机电作动器输出轴转过一个固定的角度 (相当于减速箱器的某个齿轮转

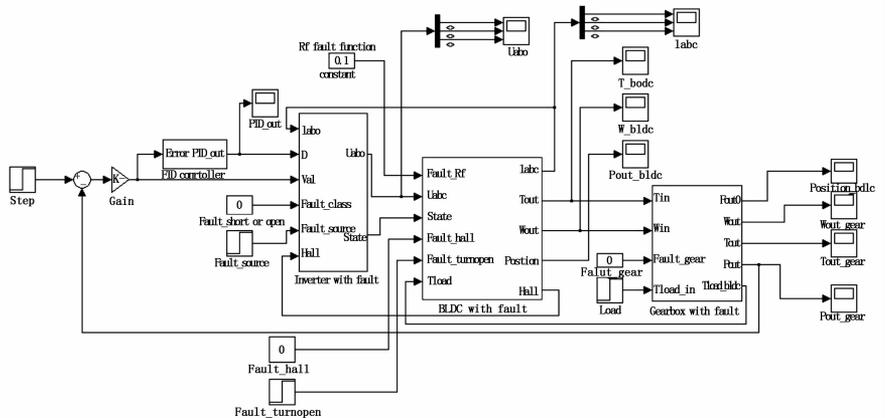


图 2 AEMA 仿真模型图

一圈), 则将 PID 控制模块的输出置为零一次 (相当于减速器的齿轮断齿, 从而失去了传递功能)。

2.1.4 控制器故障

控制器故障包括三相 PWM (脉宽调制) 逆变器故障、霍尔传感器故障及 PID 控制器故障等。由于这部分故障模式基本属于电气短路或者开路, 根据对机电作动器的各个控制模块进行了精确建模可知, 只要在对应模块中将信号进行短路或者开路即可进行故障注入。

2.2 验证系统硬件环境设计

验证系统硬件平台架构包括一台 AEMA 及负载模拟系统实物、PXI 测控系统、NI 公司的实时数据采集模块、自行研制的驱动板卡、故障注入板卡和采集板卡等。基于研究需要, 本文采用商业 PWM 方波控制器作为 AEMA 的驱动装置。

其中, PXI 测控系统采用 NI 公司的 FPGA 数据采集卡 PXI-7854 实现 PID 控制逻辑并结合位置传感器的位置反馈信号实现作动器的角度或速度控制。由于需要获取 AEMA 工作时的各种参数, 比如三相中各相的电流电压和电机的温度、振动等, 因而需要多种相应的传感器对这些参数进行转换, 同时利用 PXI-7854 丰富的数字 I/O 接口和模拟输入接口对各项参数进行采集。

2.3 验证系统软件环境设计

AEMA-PHM 验证系统由信号采集、故障注入、算法加载及用户界面等多个模块组成, 各个模块之间具有比较复杂的互操作关系, 每个模块往往需要了解两个甚至更多的其它模块, 这样就形成了比较混乱的关系图, 因此, 如何降低模块间的耦合度是验证平台开发中需要解决的主要问题。

本文基于组件模式, 提出了一个完整的算法加载与运行的软件框架。采用 C#, NET 的反射功能加载不同系统功能模块, 并集成 Matlab 等工具, 实现了系统模型的加载与各种健康管理算法的调用。

软件运行后首先启动一个组件管理器模块, 利用 C#, NET 的反射技术动态寻找并加载若干组件驱动器模块, 每个组件驱动器程序都与组件管理器程序建立双向联系并开放统一的功能接口, Matlab 引擎模块、作动器驱动模块等软件功能组件分别运行在各个组件驱动器中。基于组件模式的软件基础结构如图 3 所示。

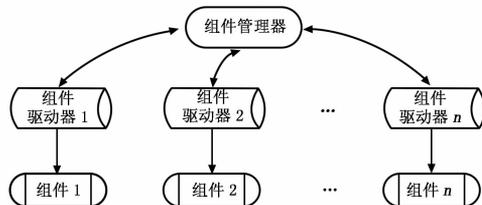


图 3 基于组件模式的软件基础结构

从软件信息流的角度观察, 所有组件成员和组件管理器构成了一个以组件管理器为中心的星形拓扑结构。通过这样的组织结构, 软件的各个组件成员可以相互通信、协同运行。

2.4 验证与评估模块设计

健康管理算法验证与评估模块的基本思想是: 基于一组确定的指标对诊断或预测算法性能进行评估, 所有 PHM 算法的运行信息及对应的算法评估结果将存入数据仓库, 便于以后的故障分析与统计。评估指标包括检测率、隔离率、准确度、精

度、均方误差、平均绝对百分比误差、漏检率、虚警率及故障预测门限等。为了综合衡量算法性能, 选用的故障类型包括间歇故障、漂移故障和持续故障 3 种。

AEMA-PHM 验证评估模块结构如图 4 所示。

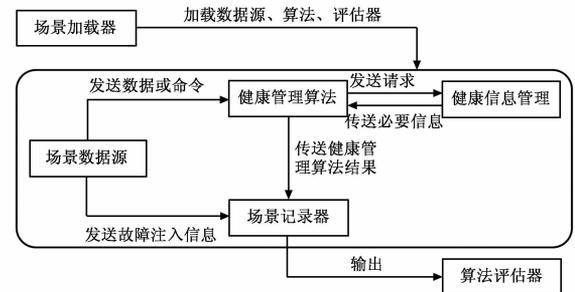


图 4 验证与评估模块结构

其中, 场景加载器完成指定 PHM 算法的加载, 场景数据源的注入。场景数据源是指由半实物机载健康管理系统的运行采集到的各种故障模式下运行数据或仿真生成的场景数据流, 作为算法评估的依据。场景记录器用于同时接收场景数据源和算法模块的运算输出数据流, 并标注时间戳, 作为最终算法评估的依据。评估器根据场景运行结果文件计算算法指标, 获得算法评估结果并通过相应界面及时显示。

3 实验仿真及结果分析

以 AEMA 匝间绕组故障为例, 其故障演化过程如下: 从 7 min 开始加入绕组匝间短路故障, 短路电阻初值为 180 Ω, 每过 7 min 短路电阻减少 20 Ω。故障报警征兆量阈值设置为 0.5 (100 Ω 左右), 失效阈值设置在 0.6 Ω。计算可知这样的系统应当在 42 min 左右达到失效阈值^[7]。

分别使用递归最小二乘 (RLS, Recursive Least Squares)^[8] 和粒子滤波 (PF, Particle Filtering)^[9] 两种算法处理故障现象数据, 对该故障进行诊断及故障预测。算法运行过程中, 各种性能指标将记录在数据库中, 作为算法验证与评估模块的客观依据。其软件运行界面如图 5 所示。

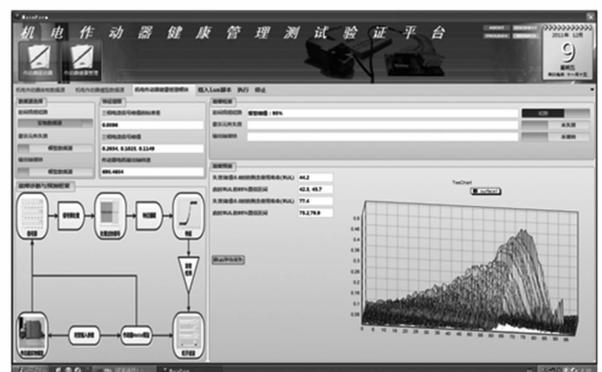


图 5 AEMA-PHM 验证系统软件界面

如图 5 所示, 可以设定的故障模式分别为匝间绕组短路故障、霍尔元件失效和输出轴堵转故障等; 数据源包括机电作动器实物数据源和模型数据源; 然后根据相关信号处理算法对数据源进行特征提取; 根据故障诊断与预测框架输出相应的诊断和预测结果; 最后调用算法评估模块得出信号处理、故障诊断和预测算法的性能评估报告并实时显示。

RLS 算法运行及验证与评估结果如图 6 所示。

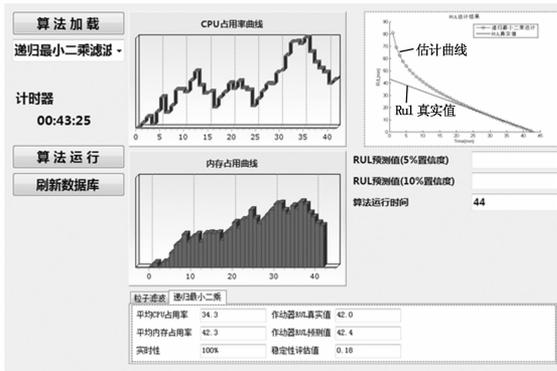


图 6 RLS 算法运行及评估结果

由图 6 可知，算法运行及评估结果界面不仅可以显示加载的算法名称与算法运行时间（如 RLS 算法运行时间为 44min），还可以在算法运行过程中实时地显示算法动态性能评估指标曲线，如 CPU 占用率和内存占用率曲线等。当算法运行结束后可以得出 CPU 和内存的平均占用率及相应算法的稳定性指标计算值，如 RLS 算法的平均 CPU 和内存占用率分别为 34.3% 和 42.3%，稳定性评估指标值为 0.18。同时，其诊断/预测结果信息也会以图例或者文字形式在界面中显示出来以便于 PHM 算法验证用户参考（如图 6 中不仅以坐标图的形式显示了剩余使用寿命（RUL, Remaining Useful life）估计结果曲线，还给出了 RUL 预测值的 5% 和 10% 置信区间）。

同时，PF 算法的诊断和预测结果如表 2 所示。

表 2 PF 算法运行及评估结果

故障时刻	报警时刻	运行时间	使用寿命
35.0min	35.1min	45min	42.8min

从表 2 可知，PF 算法的诊断与预测结果为：AEMA 匝间绕组故障时刻发生在 35 min 时，0.1 min 后算法诊断出该故障，并预测出匝间绕组的 RUL 值为 42.8 min，与理论值 42 min 较为符合，其预测值的 5% 和 10% 置信区间分别为 [41.3, 44.6] 和 [40.1, 47.1]，单位为 min。

4 结论

由第 3 节仿真结果可得出以下结论：

（上接第 1799 页）

分析表 2 可得，采用本文方法构建的监控系统的监控效率为 97%，高于传统算法，主要因为本文方法采用 B/S 结构构建监控系统，能够解决控制端数据过多产生的监控数据串扰问题，增强了监控系统的有效性。

5 结束语

通过对某大型 DCS 设备的仿真验证，可得到以下结论：

（1）采用本文设计的 DCS 设备应用监控系统，大幅提高了工作站的工作效率，减少由于服务器故障导致的所有工作站与控制站失联，无断线问题出现。

（2）设计的 B/S 模式的大型 DCS 数据监控系统测量结果误差小，上位机通信的时长不超过 1 s，服务器冗余重启切换不超过 1.2 s，上位机与控制站通信中断率低于万分之四。

（1）该验证系统具备加载各种 PHM 算法的能力、AE-MA 建模仿真与故障注入能力、PHM 算法性能验证与评估能力以及结果的实时显示能力；

（2）通过比较 PHM 算法的性能评估结果，可以为 PHM 算法用户选取算法提供客观依据，同时也为 PHM 算法设计人员改善算法提供参考；

（3）通过对比半实物仿真与全数字仿真的输出结果，可以不断完善系统的建模与故障注入能力。

参考文献：

- [1] 景 博, 杨 洲, 张 勃, 等. 故障预测与健康管理系统验证与确认方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (21): 23-27.
- [2] Poll S, Patterson-Hine A, Camisa J, et al. Advanced diagnostics and prognostics test bed [A]. Proceedings of the 18th International Workshop on Principles of Diagnosis [C]. 2007.
- [3] Dzakovic J E, Valentine G S. Advanced techniques for the verification and validation of prognostics & health management capabilities [A]. Proceedings of Machinery Failure Prevention Technologies (MFPT 60) [C]. 2007.
- [4] Paul B H, Delbert T. Condition based Maintenance for Intelligent Electromechanical Actuators [R]. The University of Texas at Austin, 2004: 54-58.
- [5] Brotherton T, Grabill P, et al. A testbed for data fusion for helicopter diagnostics and prognostics [A]. Proceedings of the 2003 IEEE Aerospace Conference [C]. 2003.
- [6] Roemer M J, Kacprzynski G J, Orsagh R F. Assessment of Data and Knowledge Fusion Strategies for Prognostics and Health Management [J]. IEEE, 2001, 11 (6): 2979-2988.
- [7] 吴 豪. 机电作动器故障预测与健康关键技术研究 [D]. 北京航空航天大学, 2012.
- [8] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian Bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50 (2): 174-188.
- [9] Simon D. Optimal State Estimations [M]. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

参考文献：

- [1] 王 迎, 陈仕彬, 朱 洁. 污水处理厂远程监控系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (10): 2433-2436.
- [2] 郑魁彪, 袁 磊, 周 鑫. 基于 C/S 结构的数控设备网络监控系统 [J]. 机械设计, 2012, 8: 5-10.
- [3] 张 方, 武 鹏, 霍 锐, 等. 基于 C/S 结构的气象信息网络综合监控系统的设计与实现 [J]. 气象与环境科学, 2009, S1: 279-282.
- [4] 厉玉昇, 申双和, 冶林茂, 等. 基于 C/S 架构的紫外线网络监控系统 [J]. 计算机应用与软件, 2008, 7: 154-155.
- [5] 彭小军. 基于小波变换的变频器异常定位检测技术 [J]. 科技通报, 2012, 10 (28): 107-109.