

数据驱动视角下飞机故障预测与健康管理系统设计及验证

刘 亮, 周 博, 于 涛, 张 宁

(沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110031)

摘要: 由于故障预测与健康管理系统 (PHM) 是涉及多层次、多领域、耦合度高的复杂系统, 很难从整体对 PHM 系统进行设计和验证, 所以始终没有成熟的工具和方法; 从数据驱动的视角, 研究了飞机 PHM 系统设计及验证; 以数据为主线, 采用了 4 种方法实现 PHM 系统设计及验证: 1) 采用系统建模语言 (SysML) 进行 PHM 系统的架构设计; 2) 采用基于事件的方法将被观测系统的行为状态化, 实现 PHM 系统中资源的充分利用, 降低局部的资源压力; 3) 采用基于模型的推理方法, 实现了系统状态模型的应用; 4) 采用多线程、异构能量耦合等方法定义了一个 PHM 仿真框架, 并在该框架指导下开发了一个仿真环境, 并针对机载配电系统设置了几种测试用例进行诊断推理, 对提到的各种方法进行了验证; 研究结果表明, 上述方法是合理有效的, 可以构建描述完整、资源均衡的 PHM 系统架构。

关键词: 故障预测与健康管理系统; 系统建模语言; 基于模型的推理; 验证框架

Design and Verification of Aircraft PHM System Under Data-Driven Viewpoint

Liu Liang, Zhou Bo, Yu Tao, Zhang Ning

(Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110031, China)

Abstract: PHM system is a multi-layers, multi-disciplines, high-coupled complex system and hard to be designed and verified as a whole, so there are no mature tools and methods for PHM design and verification. Design and verification of aircraft PHM system is researched from data-driven viewpoint. Four methods are used: 1) System Modeling Language (SysML) could be used for the design of PHM system under Data-Driven Viewpoint; 2) Event-based method could convert the monitored system's behavior to some states which will utilize resource of PHM system adequately so as to reduce the local resource pressure; 3) Model-based reasoning method is introduced and system's state model is implemented. 4) Eventually, a multi-thread method and a heterogeneous energy-coupled method are used to define a PHM simulation framework under which develops a simulation environment and verifies mentioned methods, and some test cases of power distributing system are developed for reasoning. The result of research shows that methods mentioned above are valid and could be used for construction of PHM system architecture completely and resource-balanced.

Keywords: PHM; Sysml; model-based reasoning; verification framework

0 引言

故障预测与健康管理系统 (PHM) 是国内外普遍认可、能够显著提升装备维护保障能力的关键技术, 可以实现飞机的维护模式从事后维护、定期维护到视情维护、信息化维护的跨越, 降低保障费用, 提高飞机的安全性、完好性和任务成功性^[1]。对于飞机故障预测与健康管理系统, NASA、洛马、波音等在 PHM 领域开展了持久而深入的研究, 但没有形成成熟的理论、方法和工具来支撑故障预测与健康管理系统 (PHM) 的设计和验证。

本文面向飞机故障预测与健康管理系统设计和验证, 主要探讨了以下内容: 1) 在数据驱动视角下, 用系统建模语言 (SysML) 进行故障预测与健康管理系统设计; 2) 利用基于事件的方法对具有混合行为的系统进行状态化处理, 降低 PHM

系统的数据密度; 3) 利用冲突识别和候选产生, 进行基于模型的推理, 实现故障的诊断定位; 4) 定义一个 PHM 验证框架, 实现对 PHM 理论、架构、方法的验证。

1 数据驱动视角下 PHM 系统设计

常见的系统设计都有成熟的理论和方法, 如电气系统可以采用电路理论和 AutoCAD 等工具, 机械系统可以采用多体理论和 CATIA 等工具。故障预测与健康管理系统 (PHM) 系统是与航电、飞管等系统高度耦合的、分布在系统级、区域级、飞机级和地面等高度层次化的、物理载体多样且系统边界较为模糊的一种系统, 所以 PHM 系统的设计具有一定的挑战性。

要实现 PHM 系统的设计表达, 必须对系统做进一步抽象, 从更高级抽象层次上才能描述下一级的复杂系统。系统建模语言 (SysML) 从高度抽象的角度将系统统一抽象为行为要素和结构要素, 并用 9 种图进行表达, 只要是一个系统就可以用 SysML 进行表达^[2]。结合面向对象的系统工程方法 (OOSEM) 等方法论, 通过不断的定义和分解, 得到合理的 PHM 设计描述。

系统的设计开发有许多视角, 如能量视角、经济性视角、

收稿日期: 2016-11-17; 修回日期: 2017-02-13。

作者简介: 刘 亮 (1984-), 男, 辽宁阜新新人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事飞机电气系统故障预测与健康管理系统、飞机电气控制系统设计、系统混合信号仿真、系统工程实践研究等方向的研究。

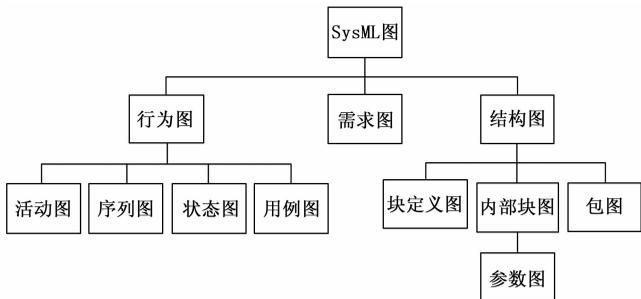


图 1 系统建模语言组成

可靠性视角等, 不同的视角决定了不同的系统形态。故障预测与健康管理 (PHM) 是信息化与工业化相融合的一个典型范例, 是一种数据密集型的系统, 所以可以采用数据驱动的视角, 从数据的产生、传输、处理和使用的过程, 来分析和设计 PHM 系统。

从数据驱动视角, 利用系统建模语言中的用例图对 PHM 系统提供的外部可见服务, 触发和参与用例的参与者, 以及在环境、系统间流动的各种数据描述如图 2 所示。在图 2 中描述的 PHM 系统主要分为机上 PHM 系统、地面 PHM 系统和自主后勤信息系统 3 个部分; PHM 系统的外部环境主要包括机上各系统、空地勤人员等; 在环境与系统间交互的数据主要包括: 传感器数据、指令数据、记录数据、实时数据、历史数据、链路数据、结果数据、报告数据等。

从数据驱动视角, 利用系统建模语言中的活动图对 PHM 系统具备的各项功能行为, 以及随着时间推移和事件发生, 数据如何在功能行为间产生和流动进行描述如图 3 所示。PHM 系统要具备故障检测、故障隔离、预测、部件寿命跟踪、性能降级趋势跟踪、故障选择性报告、辅助决策和资源管理、信息融合、信息管理等功能, 在 PHM 系统运行过程中, 这些功能要产生数据、分发数据、处理数据。

从数据驱动视角, 利用系统建模语言中的块定义图对 PHM 系统组成要素、相互关系、数据空间进行描述如图 4 所示。图中展示了一种空地联合、层次化的 PHM 系统。利用系统建模语言中的内部块图描述 PHM 系统元素内部详细的数据连接, 定义了实例提供的属性、操作和接口, 说明了各组成部分在数据层面该如何集成才能够实现 PHM 系统元素功能, 如图 5。

利用系统建模语言的序列图为 PHM 系统提供一种动态视图, 描述数据行为发生的顺序, 执行数据行为的元素和触发事件的元素。图 6 描述了 PHM 系统进行区域级诊断推理的一个运行场景。飞行员发出指令后, RIU 将指令传递到阀并监测阀的位置, 当在规定时

间内没有达到位置, RIU 中的周期 BIT 软件会设置“卡滞故障”信号, 但此时不能确定阀是处于关闭卡滞、中途卡滞、还是打开卡滞。RIU 中软件将这些信号打包为健康报告代码 (HRC), 发送 HRC 到 PHM 区域管理器。区域管理器收集机上的其他信息, 并将这些信息送入基于模型的推理引擎, 做交叉确认推理。推理机结合其他信息, 包括命令, 阀位置, 从雷达来的工作信号, 环境空气数据, 阀特征曲线, 确定或否决 (虚警) 阀的卡滞故障。如果推理机确认卡滞故障是真实故障, 推理机将根据雷达的温升等信息确定是关闭还是打开卡滞, 并且信息被送到飞行器区域管理器。然后结合飞机级推理输出和其他飞机信息, 产生一个预先定义的健康报告代码 (HRC), 送到飞行员显示、AMD/PMD 存储和下行数据链路。在座舱一个显示器上, 飞行员将会看到一个显示, 如“雷达液冷阀关闭卡滞, 液冷循环性能降级”。

在流程、方法和工具的支撑下, 通过不断的迭代优化, 可以得到具有合适颗粒度、描述完整的 PHM 设计模型, 可以得

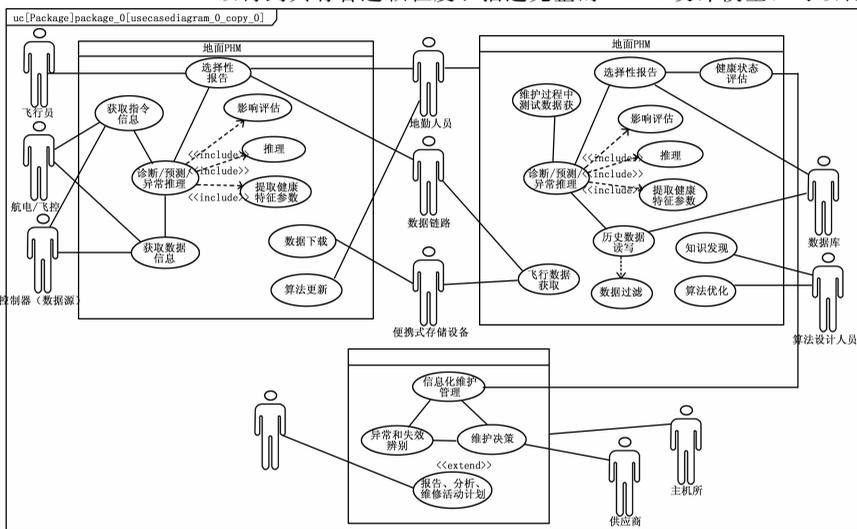


图 2 PHM 系统用例 (UCD)

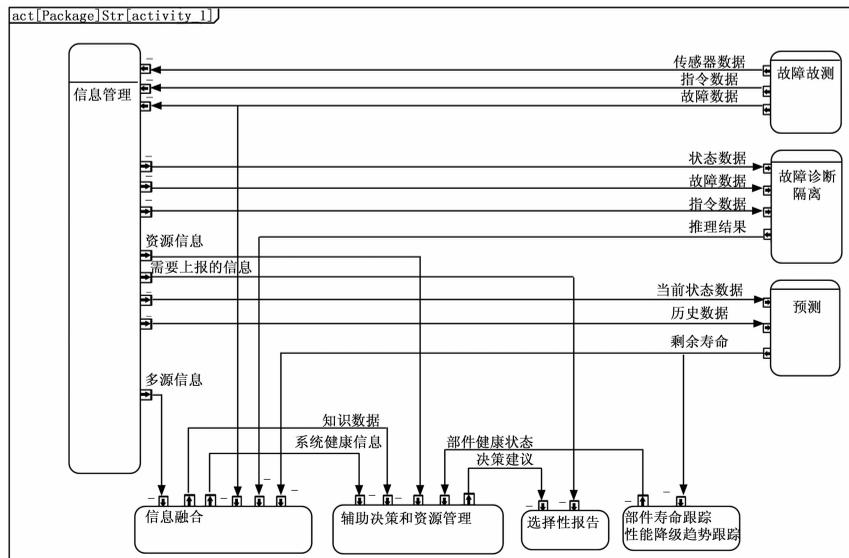


图 3 PHM 系统功能活动图 (ActD)

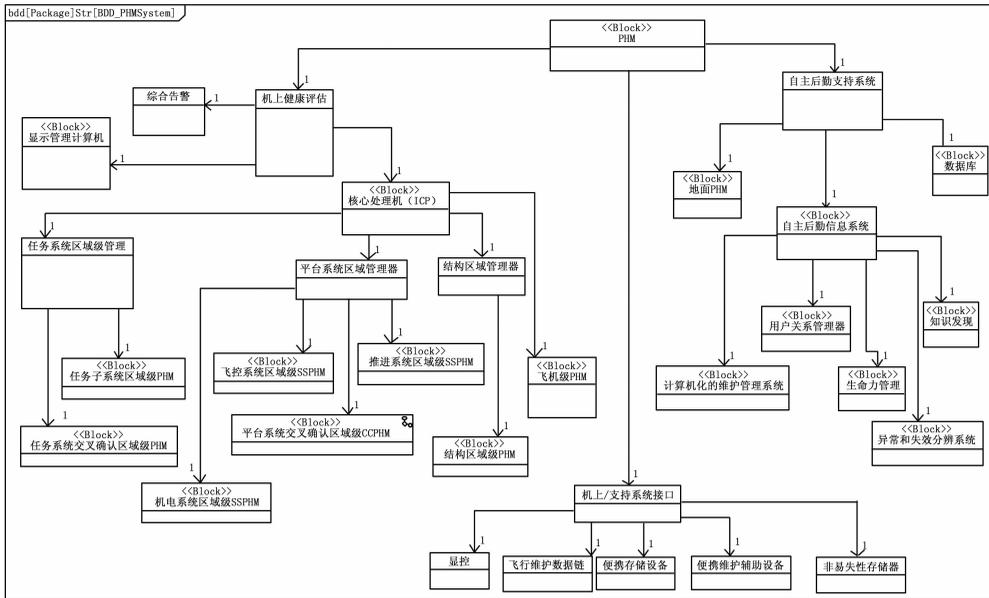


图 4 空地结合、层次化的体系架构块定义图 (BDD)

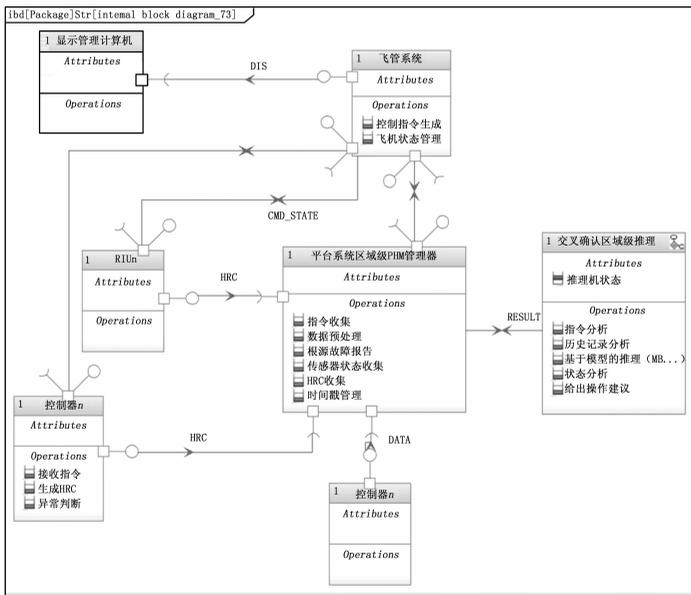


图 5 机上区域级 PHM 及与各分系统关系 (IBD)

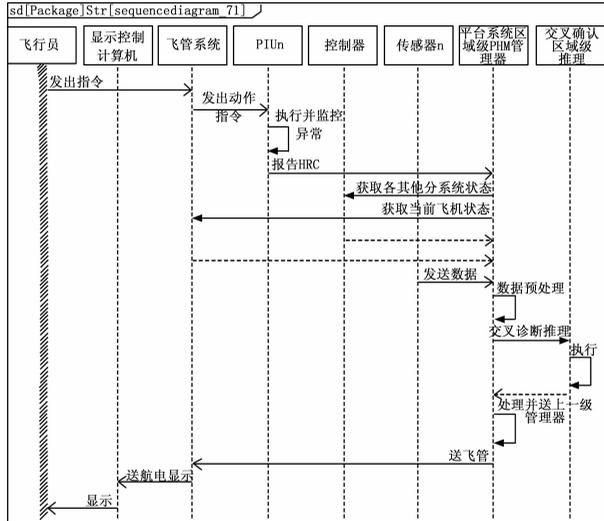


图 6 PHM 系统进行区域级诊断推理的运行场景 (SD)

到各元素面向对象的属性、操作和接口，以及系统的集成方法和测试场景，并且在 Rhapsody 等工具支持下，可以保证 PHM 设计的合理性、一致性、无二义性，为 PHM 在飞机上的集成应用奠定坚实的基础。

2 基于事件的系统状态模型

从数据驱动视角分析，图 5 中描述区域级等综合诊断推理过程，可能会存在一些问题。对于 PHM 系统常见的监控对象，如机电系统等，包括了流体、机械等连续动力学过程，也包括逻辑控制等离散过程，是一个典型的具有连续和离散混合行为的系统。要实现 PHM 要求被测系统具有可观测性，对于连续过程，系统的行为可描述为：

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \theta(t), u(t)) + v(t)$$

$$y(t) = h(x(t), \theta(t), u(t)) + n(t)$$

$x(t)$ 是状态向量， $\theta(t)$ 是参数向量， $u(t)$ 是输入向量， $v(t)$ 是噪声向量， $n(t)$ 是测量噪声向量， $y(t)$ 是输出向量，系统的可测量是 $y(t)$ 的一部分。

对于连续系统开展常规的基于模型的推理，就是依据实时采集 $y(t), u(t), n(t)$ 去计算辨识 $\theta(t)$ 和 $x(t)$ ，再根据 $\theta(t)$ 和 $x(t)$ 去评估系统健康状态的过程。从数据角度，各传感器采集点会产生大量的数据。如果采用集中处理方式，需要将大量的系统运行状态数据上传上一级推理机进行综合推理。在进行综合推理时，要采用连续系统模型，可能会给局部的计算、存储、总线等资源造成较大的压力。

为了克服上述问题，在综合推理中可以采用一种基于事件的有限状态机模型，用一种低数据密度的方法表达知识并推理。可以采用分布式形式，利用各控制器中的闲置计算资源，将系统部件的连续行为离散化为状态后在上传。

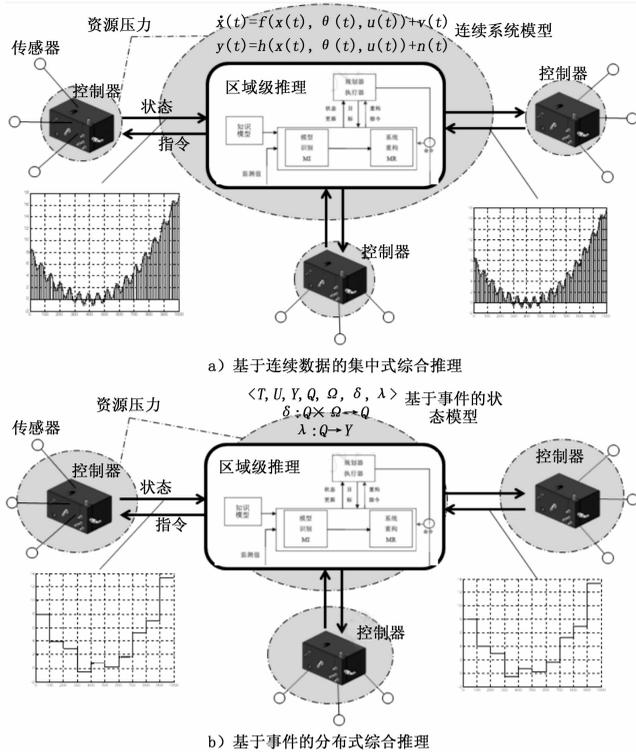


图 7 不同处理形式的资源压力对比

有限状态机是一个包含状态和转移的系统, 可以使用最少的组分建立系统模型, 将状态、输入和输出结合起来, 而不是仅用输入和输出描述系统。用状态机描述一个系统为 $\langle T, U, Y, Q, \Omega, \delta, \lambda \rangle$, T 是时间集, $T \in Z, U$ 是输入集, Y 是输出集, Q 是可数状态集, Ω 是可接收的输入函数集合, 由于离散状态空间原因, 输入函数背影设为特定时间的输入值, δ 是转移函数, $\delta: Q \times \Omega \rightarrow Q, \lambda$ 是输出函数, $\lambda: Q \rightarrow Y$ 。将被观测系统的连续行为离散化为若干个状态, 连续行为的变化转换为状态的转移; 在不同的状态中, 输入与输出间对应不同的关系, 也就是约束; 输入、输出与约束之间构成了传播关系; 状态转移的发生通常是由一些事件 (指令) 触发。这一模型也可以用图形化进行描述, 如图 8 描述了一个固态功率控制器 (SSPC) 基于事件的状态转移模型。定型模型的本质是将连续模型离散化, 从数据驱动角度, 就可以大幅降低数据密度, 但由于保留了约束、传播等特性, 同样可以用于基于模型的推理。

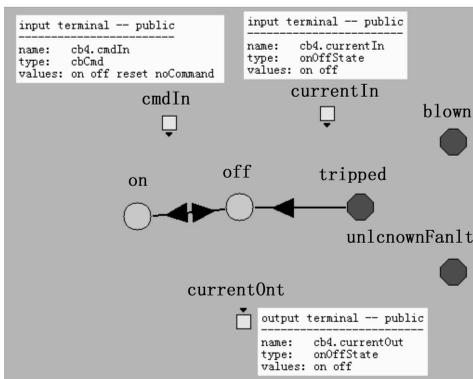


图 8 固态功率控制器 (SSPC) 基于事件的状态模型

3 基于模型的推理 (MBR)

基于模型的推理分析方法采用模型作为知识的表达, 能够克服专家系统的知识获取瓶颈, 在复杂系统的故障诊断推理方面有非常多的应用。该方法通过描述设备内部结构和行为的模型来预测设备的预期行为, 通过观测可知设备都作了哪些工作, 而预测则是要求设备在同样情况下应该作哪些工作。如果这两者出现了差异, 就产生了诊断问题^[3]。

在基于模型的推理中, 给模型一个输入集合, 这个输入集合在模型内部进行传播, 然后产生一个输出集合, 这个输出集合称为系统的期望输出, 即系统正常时的输出值。如果系统的实际输出同期望输出不一致, 就称此为“冲突”, 这表明实际系统有故障存在, 找出引起这种不一致现象的原因集合, 则称为冲突识别。

在冲突识别中, 将系统抽象地描述成一个 3 元组合 (SD, CMPS, OBS)。其中, SD 为系统描述, 反映系统预期输出行为; CMPS 为系统部件集; OBS 为系统观测, 反映系统实际输出行为。另外, 用到一阶谓词 AB (异常) 和 $\neg AB$ (正常)。假设系统有 n 个部件, 用谓词逻辑的析取式: $SDU \{ \neg AB(C1), \dots, \neg AB(Cn) \}$ 表示当所有部件正常时系统的预期输出行为。

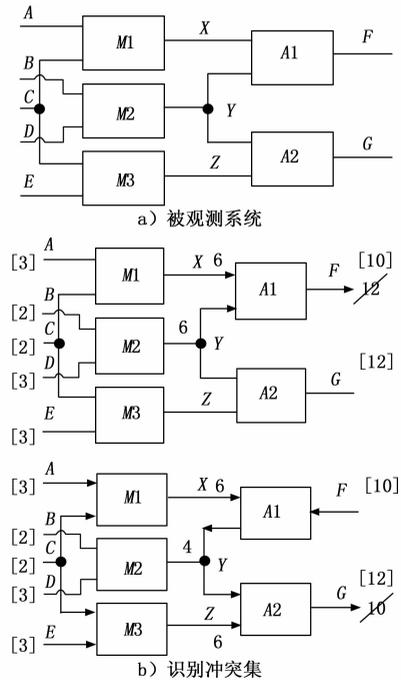


图 9 基于模型的推理过程

对于图 9 中 a) 表达的系统, 利用 3 元组合进行描述如下:
 $CMPS = \{M1, M2, M3, A1, A2\}$
 $SD = \{MULT(M1), MULT(M2), MULT(M3), ADD(A1), ADD(A2), in2(M1) = in1(M3), out(M1) = in1(M2), out(M2) = in2(A1), out(M2) = in1(A2), out(M3) = in2(A2), MULT(x) \rightarrow \neg AB(x) \rightarrow out(x) = in1(x) * in2(x), ADD(x) \rightarrow \neg AB(x) \rightarrow out(x) = in1(x) + in2(x)\}$

在实际工作过程中, 若系统发生故障, 其实际输出行为值将与与所有部件假设正常时的系统预期输出行为值之间产生冲突, 即系统观测 OBS 与 $SDU \{ \neg AB(C1), \dots, \neg AB(Cn) \}$ 之间出现不一致, 也就是产生了冲突集, 冲突集是指系统中某

个特定部件组合, 当该组合中所有部件均假设正常时, 系统预期输出行为值与系统实际输出行为值之间产生冲突, 该部件组合为系统的一个冲突集, 也就是满足 $SD \cup OBS \cup \{AB(C1), \dots, AB(Ck)\}$ 为真。如图 9 中 b) 表达的过程获得两个冲突集, 分别是 $AB(M1) \vee AB(M2) \vee AB(A1)$ 和 $AB(M1) \vee AB(M3) \vee AB(A1) \vee AB(A2)$ 。

求解问题的第二步是候选产生, 即利用第一步所产生的冲突集, 找出可能的诊断解。一个候选 (Candidate) 就是一个特定的假设, 它表示该假设中元素均已经发生故障。一个候选应该能解释所有的征兆, 因而它必须能解释每一个冲突, 即与每一个冲突有一个非空的交集。候选空间是与当前测量相容的候选集合, 在没有测量之前, 候选空间为被诊断对象的所有元素的幂集空间。根据图 9 中 b) 获得的冲突集产生的候选为 $AB(M1) \vee AB(A1)$ 。

4 PHM 系统仿真验证框架

PHM 验证通常包括各系统的运行模拟、故障注入、数据传输、存储、处理模拟等诸多过程, 另外, 为了能够充分利用机上的计算、存储、总线资源, PHM 通常都是分布式的, PHM 的验证具有一定的难度。笔者设计了一个基于数字化仿真的低成本、小型化的 PHM 框架, 可以从数据视角对 PHM 系统进行验证, 见图 10。在该框架中, 对于 PHM 架构中存在的控制器、区域级管理器、交叉确认推理机等数据处理部件, 采用 Windows 中的进程予以实现, 进程间采用管道、邮槽等形式进行通信, 模拟 PHM 数据在机上的传输过程。推理所用的模型运行在推理引擎中。在 Saber、AMESim 中构建供电分系统、液压分系统、燃油分系统等各系统仿真模型。通过仿真总线 Cosimate, 实现 Saber、AMESim 等之间异构能量耦合, 实现控制器与分系统之间的控制和状态采集。

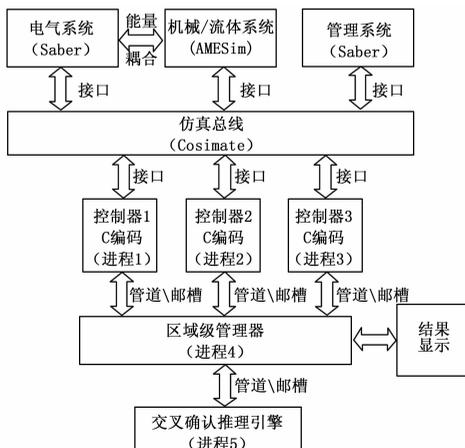


图 10 基于事件的 PHM 系统仿真验证框架

按照这个框架, 组建了一个仿真环境, 对利用系统建模语言描述的 PHM 系统进行验证, 也用于基于事件模型的有效性、基于模型推理引擎的有效性、仿真框架的合理性等的验证。采用的测试用系统如图 11, 由 6 个 SSPC 构成的配电系统, $CMPS = \{SSPC1, SSPC2, \dots, SSPC6\}$, 系统观测为 4 个负载的电压, $OBS = \{v1, v2, v3, v4\}$, 根据系统行为和观测之间出现的冲突, 来推理诊断系统中的各种故障。

测试用例 1: 在发出所有 SSPC 接通指令后, 在 Saber 中制造一个故障注入, 使 SSPC4 跳闸, 这时负载 4 停止工作,

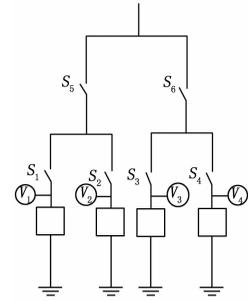


图 11 测试用系统

而负载 3 工作正常。此时, 经过推理分析, 认为 SSPC 跳闸, 结果如图 12。

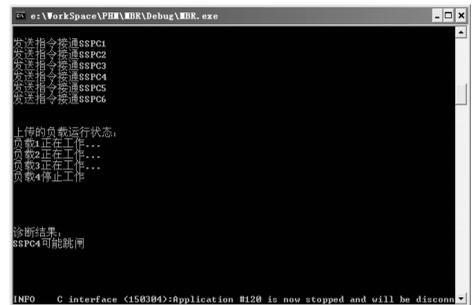


图 12 测试用例 1 的监测及推理结果

测试用例 2: 在发出所有 SSPC 接通指令后, 在 Saber 中制造一个故障注入, 使 SSPC6 跳闸, 这时负载 3 和负载 4 均停止工作。此时, 经过推理分析, 怀疑是 SSPC3 跳闸或 SSPC5、SSPC6 跳闸或全部跳闸。复位 SSPC6, 4 个负载全部正常工作, 推理分析结果为没有故障。

5 结论

故障预测与健康管理技术在各种安全关键系统、高成本系统等工业产品中正在体现出巨大的应用价值。在飞机中应用故障预测与健康管理技术, 受到体积、重量、成本等的限制, PHM 系统具有耦合程度高、层次化、多领域等特点, 使飞机故障预测与健康管理的设计和验证具有很高的挑战性。

本文从数据驱动的视角出发, 提出了利用系统建模语言 (SysML) 进行 PHM 系统设计的方法, 并进行了实践; 为了应对大量数据对机上局部资源造成的压力, 提出了利用基于事件的系统模型并结合基于模型的推理的方法, 降低了对局部资源产生的压力; 为了实现 PHM 系统的快速验证, 文中还提出了一种数字化仿真验证框架。通过本文的研究和实践, 说明上述方法是合理、有效的。

参考文献:

- [1] 邵新杰, 等. 复杂装备故障预测与健康管理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] Lenny. SysML Distilled—A Brief Guide to The Systems Modeling Language [M]. Pearson Education, Inc. 2013.
- [3] 崔子谦. 基于定性模型的卫星电源系统故障诊断方法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] Luis Hernandez. A Framework for Developing an EPS Health Management System [J]. SAE, 2010; 117-123.
- [5] Andrew Hess. PHM a Key Enabler for the JSF Autonomic Logistics Support Concept [A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2004: 3543-3550.