

机载诊断模型的工程化开发方法

吕镇邦¹, 陶来发², 孙倩¹, 丁宇²

(1. 航空工业西安航空计算技术研究所, 西安 710068;

2. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘要: 建立准确、有效的机载诊断模型是飞机健康管理系统能力提升中最为核心的技术问题; 在分析国内外故障诊断模型开发方法研究现状的基础上, 对机载诊断模型的工程化开发方法进行了深入研究; 重点阐述了基于模型的故障诊断原理、机载诊断模型建立流程, 并设计和实现了相应的机载诊断模型工程化开发辅助工具, 其阶段性成果已在实际的工程项目中得到应用和验证。

关键词: 健康管理; 故障诊断; 机载诊断; 数据模型

Engineering Development Approach for Onboard Diagnostic Data Models

Lü Zhenbang¹, Tao Laifa², Sun Qian¹, Ding Yu²

1. Aeronautic Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China;

2. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The establishment of accurate and effective onboard diagnostic models is the core technical problem for the capability improvement of aircraft health management system. Based on the analysis of the research status at home and abroad, an engineering development approach for onboard diagnostic models is presented. The principles of model-based diagnosis and the establishment process of onboard diagnostic models are expounded. Besides, an auxiliary tool is developed to standardize the models. The achievements have been applied in actual project and proved to be effective.

Keywords: health management; fault diagnosis; onboard diagnosis; data model

0 引言

由于机载健康管理系统的监测和诊断为主要手段, 并完成维修支持, 必须建立在状态或者信息感知、融合和辨识的基础上, 其功能的实现完全依赖于所大量使用的各种推理模型。因此, 机载诊断模型的开发成为健康管理系统的研制中最核心的技术问题。目前国内对故障诊断技术已开展了大量研究, 但研究重点主要集中在故障诊断技术的理论研究和实验室模型/算法的实现方面, 在工程应用领域的研究较为薄弱, 特别是在机载诊断的数据建模方面, 与国外先进机型相比存在明显的差距, 严重制约了机载健康管理系统的效能的发挥。系统的高度复杂性往往导致故障症状与故障原因之间的映射关系表现为不清晰、不确定, 系统参数的变化以及报警提示未必能正确反映故障的类型及位置, 为系统建模带来困难。本文在分析国内外相关研究现状和具体型号技术需求的基础上, 对机载诊断模型开发的工程化方法进行了深入研究, 并设计和实现了相应的辅助开发工具, 为机载健康管理系统的诊断能力提升提供支持。

1 研究现状

国际标准化组织 ISO 和 IEEE 等许多国际组织和机构专

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, 这为故障诊断模型开发工作提供了基础和指导^[1-2]。

Honeywell 公司研制的诊断模型开发工具 (DMDT) 接收来自各种渠道的信息, 包括飞机接口控制数据库、机组人员告警信息和故障模式与影响分析报告, 然后由飞机系统设计人员输入子系统特定诊断信息, 最终完成诊断模型的构建^[3]。Impact 技术公司的模型开发工具 NeticaTM, 将权重方法和贝叶斯推理方法相结合, 可建立贝叶斯认知网络模型 (BBN), 进而描述整个系统的关联关系, 完成诊断推理^[4]。由机载系统部件性能退化而引起的潜在有害事件的早期检测和缓解是目前健康管理领域所面临的重要挑战, IEEE 的 Daniel L. C. Mack 等人采用知识工程方法, 将飞行参数数据挖掘与专家经验相结合, 对现有贝叶斯推理模型进行修正, 建立更为有效的故障早期诊断模型^[5]。机载系统的复杂性和工况变化导致机载诊断不确定性问题日益严重, 针对此问题文献 [6] 提出将设计数据与实时监控信息相联合的智能诊断建模方法, 充分利用可用信息, 降低了诊断不确定性, 提高维修效率。

国内许多院校开展了故障诊断技术方法和应用方面的相关研究, 研究的热点集中在建立故障诊断模型/算法, 实现故障诊断原型系统等方面。为了提高层与层之间的推理

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-11-01。

基金项目: 装发重点基金项目 (41403020102)。

作者简介: 吕镇邦 (1976-), 男, 甘肃景泰人, 博士, 高级工程师, 主要从事健康管理与软件工程方向的研究。

准确性, 某机液压系统采用基于状态、元件、传感器和功能的交叉增强校核方法, 建立交叉增强校核诊断推理模型, 提高诊断精度和准确性^[7]。产品设计阶段往往缺乏明确的故障模式数据, 文献 [8] 通过定义故障与功能的关联关系及功能故障率, 将故障与功能间的不确定性关联转化为确定性关联, 从而实现在产品早期设计阶段建立混合诊断模型。针对复杂系统故障诊断建模及推理的复杂性、数据不足、领域知识及监测信息不完备等问题, 北京航空航天大学研究团队开展基于动态不确定因果图, 对权重逻辑推理进行系统化研究, 引入绑定权重系数的逻辑事件推理机制, 确保变量状态概率的自动归一性和链式推理的自我依赖性, 为多赋值因果关系的简洁、不完备表达提供了解决方案^[9]。但上述工作大都围绕各自不同的具体成员设备作为研究对象而展开, 主要停留在理论研究层面, 普遍偏于学术探索性, 比较缺乏对通用性和工程化的考虑, 也没有在具体的工程应用中得到验证。

2 基于模型的故障诊断原理

基于模型的诊断 (Model-based diagnosis, MBD) 是一种全新的诊断方法, 该方法分析、合并和处理系统故障, 并将其隔离到产生故障的根源 LRU 上。MBD 方法与传统诊断方法的本质区别在于 MBD 克服了传统诊断方法的严重缺陷, 其基本观点是可以使用系统的内部结构与行为知识模型进行智能推理^[10]。该方法从待诊断设备的模型和具体观测行为出发, 依据系统实际观测行为和模型预计行为之间的差异, 通过诊断推理确定出现故障的组件或单元, 并给出诊断结果, 其诊断原理如图 1 所示。

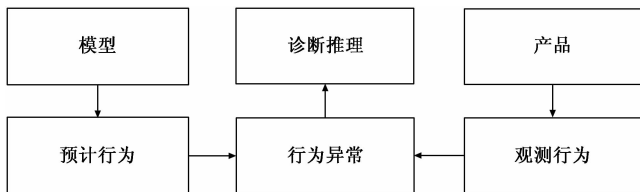


图 1 基于模型的诊断方法原理

- 1) 模型预计行为和产品实际观测行为的比对是诊断的基础, 依据诊断知识构建诊断推理模型;
- 2) 当已知系统输入时, 可以获取系统的实际观测行为, 并通过逻辑推理得到模型的预计行为;
- 3) 将二者进行比较, 若存在差异, 按照冲突识别、候选诊断和诊断鉴别的步骤进行诊断推理;
- 4) 最后根据诊断鉴别结果, 确定下一步的检测顺序, 进行故障定位与隔离, 直至找到真正的故障原因。

基于模型的故障诊断方法的流程如图 2 所示。

- 1) 系统启动, 针对诊断对象, 获取诊断知识, 构建新设备或者选择已有设备的结构、功能和行为模型;
- 2) 在模型化的基础上, 依据诊断模型和系统输入得到模型的预计行为;
- 3) 获取系统当前的实际观测行为, 判断观测行为和预

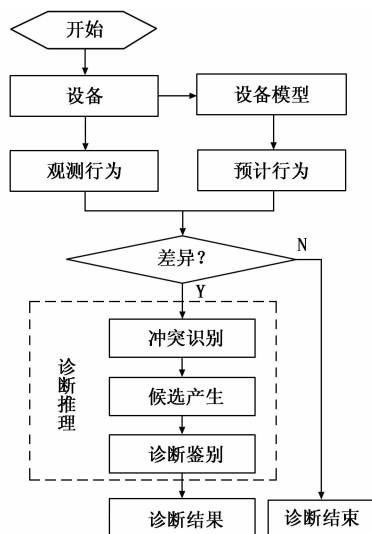


图 2 基于模型的故障诊断方法流程

计行为之间是否存在差异;

4) 若存在差异, 则按照冲突识别、候选产生和诊断鉴别的诊断推理顺序寻找真正的故障;

5) 若没有差异, 则设备正常。

3 机载诊断模型建立流程

尽管飞机安装有众多的传感器, 但在实际应用中, 大多数传感器都是安装在装有多个动力传动模块的箱体外部, 不可能直接监测其内部的组件, 所以影响系统运行安全的数百个组件只能依赖于所属系统的观测范围, 比如齿轮箱中的轴承和齿轮, 它们各自的特性会给齿轮箱外表可观测系统行为留下持久的征兆。因此, 如何从系统级传感器数据解读这些征兆, 并利用其进行自动推理, 进而诊断出系统组件以及整个系统的健康状态就尤为重要。基于模型的故障诊断用于从可观测系统行为中检测并隔离出系统内部的部件故障, 并形成部件级故障传播模型, 进而对系统即将发生的危险进行智能估计。机载诊断模型建立流程如图 3 所示。

其实施步骤如下:

- 1) 在系统部件功能知识库的辅助下, 建立系统知识模型;
- 2) 基于诊断过程中提取并合的系统内部部件临近关系信息, 构建故障传播模型;
- 3) 使用工程化平台语言将系统知识模型和故障传播模型整合在总体的基于模型的诊断推理架构中;
- 4) 将上述模型开发结果应用于飞机系统的智能诊断中, 依据可见的系统行为对不可见的故障部件实施基于模型的诊断推理;
- 5) 对所开发的诊断模型库中的推理算法进行计算复杂性分析, 进而确保其性能可以满足在线执行。

机载诊断建模就是要清晰地描述设备之间的关联关系, 从模型上反映实际系统的结构和行为, 机载系统诊断模型

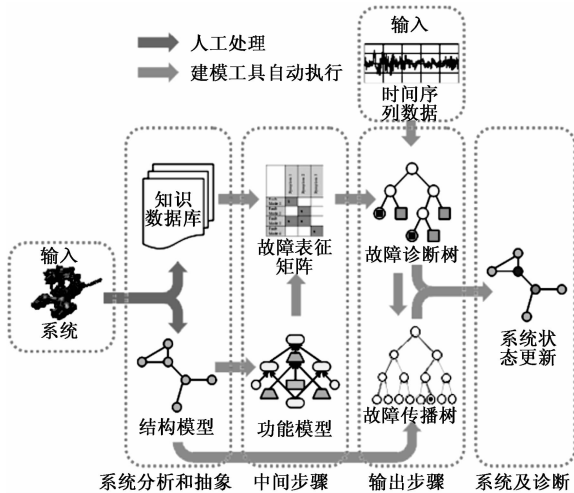


图 3 机载诊断模型建立流程

库就是要建立能够描述系统结构和行为信息的推理模型，根据输入的故障现象，依据各 LRU 之间的故障关系推理出可能的故障源。

3.1 系统知识模型建立

知识获取历来是知识工程与人工智能中的瓶颈问题，机载诊断模型相关知识包括有关设备的功能结构、工作原理、接口关系、使用记录及案例等，也包括领域专家的经验及个性知识。机载诊断模型知识获取的难度在于恰当地提取和归纳诊断对象的特点、关系，及相应的诊断方法，并把它们用规范的形式化语言精确地表示出来，是不断重复、渐进完善的过程。

机载系统知识模型是基于模型的故障诊断的基础。知识模型不仅需要充分反映系统工作原理、故障传播路径以及部件的故障率等基本信息，而且还要结合故障诊断算法建立算法能够识别的数据库形式，根据输入的故障征兆信息，通过模型判断逻辑推导出故障源。系统知识模型库的建立过程如图 4 所示。

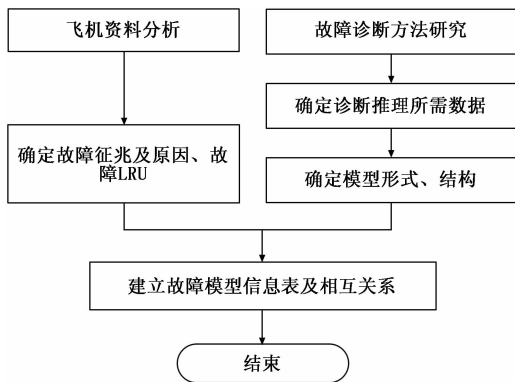


图 4 系统知识模型库建立过程

要建立系统知识模型，就需要对机载系统的故障征兆和故障原因进行透彻地分析，分析结果的正确性将直接影响到诊断结论的正确性，故障分析过程主要包括以下两方面工作。

1) 确定故障征兆表现形式和所有具体的故障模式。飞机故障报告一般有如下多种形式：驾驶舱面板故障灯指示、驾驶舱仪表故障指示和故障报告、中央显示单元 (Central Display Unit, CDU) 上的 BITE 故障信息、中央维护系统故障信息等。建立机载系统诊断模型库首先明确本飞机系统的故障表现形式，然后将每种形式下的故障全部收集。此项工作需要参考飞机系统培训手册、故障报告手册等资料进行。

2) 根据相关资料，确定机载系统总体和子系统结构，研究部件工作原理。分析每个 LRU 主要可能发生的故障及每个故障的表现形式即故障征兆，进而确定故障在不同部件间的传播路径。

3.2 故障传播模型建立

为了对机载系统进行有效的故障诊断，需要考虑系统的功能知识，建立其故障传播模型。基于原理的故障传播有向图模型可用来描述故障现象及该故障在 LRU 间的传播关系。建立故障传播模型需将子系统分解为各个组成单元，针对各个组成单元的功能模型所表达的输入-输出连接关系，组成整个系统的故障传播模型。针对机载设备的各个组成单元而言，其故障传播模型在满足单元的输入彼此独立和单元的故障模式之间彼此独立两种假设的前提下建立。

故障传播模型建立的步骤如图 5 所示。

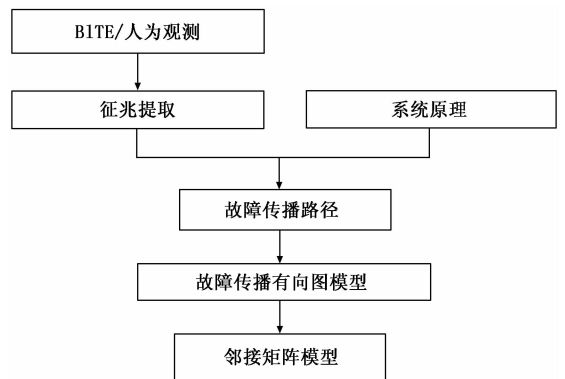


图 5 故障传播模型建立步骤框图

- 1) 首先根据飞机的自检和告警信息以及人为观察信息，提取故障征兆；
- 2) 结合机载系统工作原理推断出相应的故障传播路径，抽象出相应故障传播有向图模型；
- 3) 在此基础上，建立故障传播邻接矩阵模型。

故障模式与故障征兆之间的相互作用，以及故障传播方向，可以采用有向图的方式将其简洁、直观地表示出来，如图 6 所示。其中矩形框代表 LRU 故障而圆圈代表故障征兆，节点之间的箭头代表故障传播路径。

图中有 3 个 LRU，分别是 C1、C2 和 C3，两个工作模式 A 和 B。C1 的故障征兆是 D1~D3，C2 的故障征兆是 D4~D7，C3 的故障征兆是 D8~D10。该图还包含一个系统故障征兆 D11，不与任何 LRU 相关联。

另外，采用邻接矩阵也可以表示各要素之间的连接关

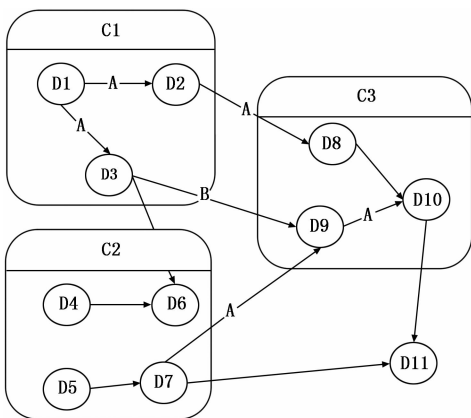


图 6 故障传播有向图

系, 建立故障传播模型就是建立对应与不同故障征兆的故障传递邻接模型。由图论的知识可知, 有向图与邻接矩阵有一一对应关系, 因此为了便于计算机进行分析计算, 在工程上常常以邻接矩阵的方式来表示有向图中的全部信息, 包括故障传播图结构和故障传播方向。

故障传播有向图模型 $\{S, R\}$ 的邻接矩阵 (Adjacency matrix) $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 定义如下, 在一般情况下, 对于含有 n 个节点的模型 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 则 $n \times n$ 的邻接矩阵 A 中的元素 a_{ij} 规定为: 当 s_i 对 s_j 有影响时, a_{ij} 为 1; 否则, a_{ij} 为 0。也就是说在结构模型有向图中元素 s_i 与 s_j 相邻 (有从 s_i 到 s_j 的箭头), a_{ij} 为 1; 否则, a_{ij} 为 0。由于它表示的是要素之间的邻接关系, 所以这个方阵叫做邻接矩阵。如果 A 和 B 都是 n 阶邻接矩阵 (n 阶方阵), 则 A, B 的逻辑和用 $A \cup B$ 表示, 它也是 n 阶布尔方阵。若 $A \cup B = C$, 则 C 的各元素与 A, B 各元素的关系是: $c_{ij} = a_{ij} \cup b_{ij} = \max \{a_{ij}, b_{ij}\}$, 即 a_{ij} 和 b_{ij} 中只要有一个为 1, c_{ij} 就为 1, 只有当 $a_{ij} = b_{ij} = 0$ 时, c_{ij} 才为 0。

4 机载诊断模型的工程化开发实践

机载诊断模型适用于航电和非航电系统突发性故障的在线自主诊断、以及渐发性故障的在线异常检测。为了保证所创建机载诊断模型的完备性和一致性等, 通常借助知识建模辅助工具进行模型开发、模型检查和模型修改。机载诊断模型基本开发流程如图 7 所示。

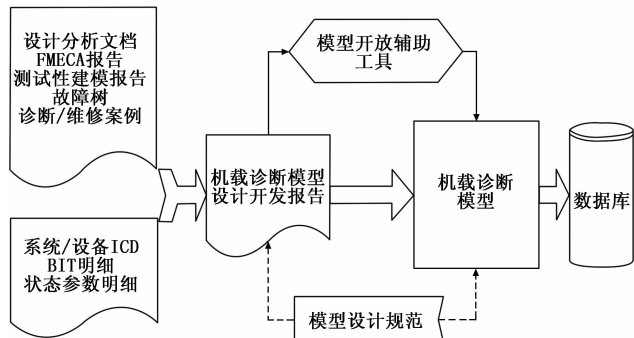


图 7 机载诊断模型的基本开发流程

4.1 模型开发步骤

4.1.1 数据准备

通过对机载系统/设备的设计分析文档、FMECA、测试性建模、故障树分析、“四性”分析数据、维修案例、系统需求和数据定义等知识的梳理和分析, 获取系统中每个组件的以下信息:

- 1) 组件的结构信息描述;
- 2) 组件的功能信息描述;
- 3) 组件的故障模式定义;
- 4) 组件的故障特征定义 (名称、阈值等)。

4.1.2 创建结构模型

通过对系统的各组件物理连接进行分析, 提取, 并以数据库的形式进行存储。包含系统中每个组件的类型、位置信息和互联关系, 以及组件的故障属性 (故障模式、故障特征等)。

4.1.3 获取功能模型

通过对系统的结构模型进行遍历, 结合数据库中组件的功能描述信息及故障特征相关属性, 对每个组件的结构信息、功能描述信息及相关属性进行综合, 提取出系统的功能模型, 并以数据库的形式进行存储。

4.1.4 建立故障征兆矩阵和诊断树

通过对系统的功能模型进行遍历, 结合组件的故障特征, 提取出每种故障模式的故障触发诊断逻辑, 并以矩阵的形式表示故障模式和与其相关的故障特征的映射关系, 再转化为诊断树, 如图 8 所示。

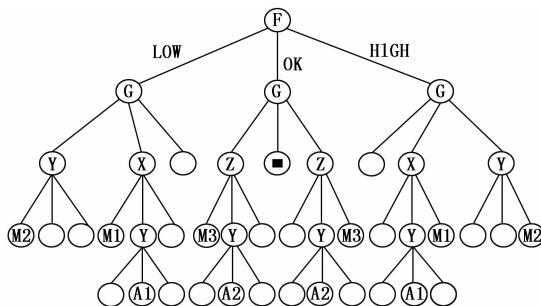


图 8 诊断树示意图

- 1) 根节点和中间节点: 表示监测的系统内部信号;
- 2) 叶子节点 (含有文字说明): 表示发生故障的组件;
- 3) 叶子节点 (空心圆): 表示关联的故障模式;
- 4) 叶子节点 (含有黑色正方形): 表示未检测或未隔离故障。

4.1.5 建立故障传播树

通过对系统的结构模型进行遍历, 根据系统组件包含的故障模式以及连接关系, 梳理故障传播路径、建立故障传播邻接矩阵, 并生成故障传播树。

4.1.6 模型集成与管理

对机载系统各级的诊断模型进行集成和必要的修正及维护, 完善故障相关维护信息、模型存储方式、故障相关联的 FDE 信息, 并可导出统一格式的 .XML 数据文件。

4.2 模型实现

机载诊断模型的实现成需要通过图形化辅助工具来进行开发和集成。模型实现过程由数据输入、内部操作和数据输出 3 部分共同完成，具体实现过程如图 9 所示。

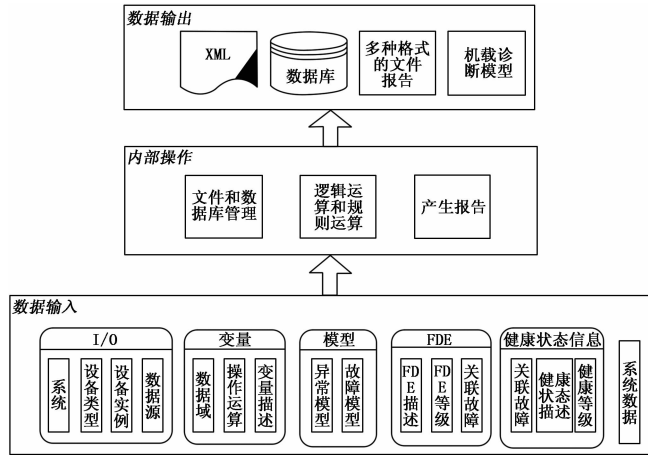


图 9 机载诊断模型的图形化辅助开发与集成过程

机载诊断模型融合来自 LRU 的多个 BIT 信息，通过模型数据解算，尽可能地将故障隔离到单个的 LRU 或接口。机载诊断模型的工程化实现示例如图 10 所示。

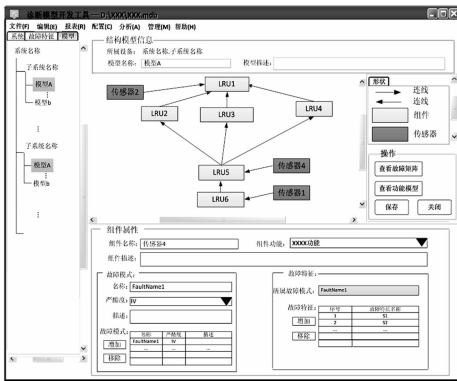


图 10 机载诊断模型实现示例

具体实现步骤如下：

- 1) 建立 I/O 信息（系统信息，LRU 类型，LRU 实例，数据源）；
- 2) 建立变量信息（变量关联的数据源，变量基本信息定义）；
- 3) 建立异常模型信息（异常属性信息，异常模型逻辑定义）；
- 4) 建立故障模型信息（故障属性信息，故障转播邻接矩阵，故障模型逻辑定义）；
- 5) 建立 FDE 信息（FDE 描述，FDE 等级，关联故障列表）；
- 6) 建立健康状态信息（健康状态信息，触发此健康状态的关联故障列表）；
- 7) 工具内部操作（文件和数据库管理，逻辑运算和规则运算，报告生成）；
- 8) 输出数据库信息（以 *.XML 格式存放）；

9) 输出机载诊断模型数据文件；

10) 输出多种格式的文件报告，如 PDF，WORD，HTML 文件。

4.3 效果分析

通过使用图形化机载诊断模型开发工具，使工程应用中机载诊断逻辑的获取、整理、表示和求解过程规范化，模型判定规则和诊断逻辑确定性较强，执行效率高，适于工程应用。该方法重点解决信息增强诊断和接口关联诊断问题，突破了诊断策略的提取和转换瓶颈，形成具有对内部故障、外部接口故障、潜在故障等进行综合诊断和辨识的完整推理体系。

5 总结

本文在分析国内外相关研究现状和具体型号技术需求的基础上，对故障诊断模型开发的工程化方法进行了深入研究。重点阐述了基于模型的故障诊断方法原理、推理架构和建模流程，并设计和实现了相应的机载诊断模型工程化开发辅助工具，为机载健康管理系统的诊断能力提升提供支持。但为实现建立统一、可靠、完备的工程适用化机载诊断模型库，还需要进行大量的基础研究和工程实践工作。

参考文献：

- [1] 周林, 赵杰, 冯广飞. 装备故障预测与健康管理技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] 李兴旺, 汪慧云, 沈勇, 等. 飞机综合健康管理系统的 应用与发展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1069-1072.
- [3] 王洪, 黄加阳. 民用飞机关联性诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3301-3303.
- [4] Li Y G. Course note on engine diagnosis and prognosis [M]. London: Cranfield university UK, 2010.
- [5] Daniel L. C. Mack, Gautam Biswas, Xenofon D. Koutsoukos, Dinkar Mylaraswamy. Learning Bayesian Network Structures to Augment Aircraft Diagnostic Reference Models [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14 (1): 358-368.
- [6] Xi Chen, He Ren, Yongquan Sun, Cees Bil, Hongwei Jiang. Synchronize Design Knowledge and Real-time Monitoring Information for Aircraft Complex System Diagnosis [J]. AIAA Aviation, 2016, 4134: 1-13.
- [7] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理的核心技术 [J]. 航空学报, 2014, 35 (6): 1459-1472.
- [8] 杨智勇, 许爱强, 赵秀丽, 等. 混合诊断建模与故障检测率和隔离率算法解析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2622-2625.
- [9] 董春玲, 张勤. 用于不确定性故障诊断的权重逻辑推理算法研究 [J]. 自动化学报, 2014, 40 (12): 2766-2780.
- [10] A Model-Based Reasoning Architecture for System-Level Fault Diagnosis [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.