

引用格式:吕镇邦,沈新刚,王娟.基于系统数据分析的机载诊断模型开发方法[J].电光与控制,2020,27(2):103-106. LYU Z B, SHEN X G, WANG J. Development of onboard diagnostic models based on system data analysis[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):103-106.

基于系统数据分析的机载诊断模型开发方法

吕镇邦, 沈新刚, 王娟
(航空工业西安航空计算技术研究所,西安 710068)

摘要: 建立高准确率、智能化的机载实时诊断模型是提高武器装备系统可靠性和安全性的核心问题,针对目前已有诊断模型开发方法的局限性,提出了新的机载诊断模型开发方法。采用图形化建模方法,以系统或机载设备数据为基础,说明了模型开发的数据准备、系统模型提取、故障特征矩阵构建、诊断推理等方面的实现过程,并以某装备燃油箱的诊断模型开发过程和诊断结果为例,验证了基于系统数据分析的机载实时诊断模型的高检测率、高隔离率和准确率。

关键词: 故障诊断; 机载实时诊断; 机载系统数据; 结构模型; 功能模型; 故障特征矩阵

中图分类号: TP206.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.022

Development of Onboard Diagnostic Models Based on System Data Analysis

LYU Zhenbang, SHEN Xin'gang, WANG Juan
(Aeronautical Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China)

Abstract: The establishment of accurate and intelligent real-time onboard diagnostic models is essential for improving the reliability and safety of weapon system. Aiming at the limitations of the existing diagnostic model development methods, a new method for developing the onboard diagnostic models is proposed. By use of the graphical modelling approach and based on the data of the system or onboard equipment, the implementation procedures for the model development are introduced, including data preparation, system model extraction, fault characteristic matrix construction, and diagnosis reasoning. Taking the model development process and diagnosis results of a certain type of fuel tank as an example, it is verified that the real-time onboard diagnostic model based on system data analysis has high detection rate, high isolation rate and high accuracy.

Key words: fault diagnosis; real-time onboard diagnosis; onboard system data; structure model; function model; fault characteristic matrix

0 引言

随着现代武器装备系统及其机载成员系统规模日趋复杂,各成员系统间的联系越来越紧密,故障也愈加复杂以致难以判断,任何一个故障都有可能影响其他多个系统使其不能正常工作。因此,建立高准确率、高智能化的诊断模型,快速、精确地定位故障,成为人们关注的重要研究方向^[1-2]。

目前常用的故障诊断技术包括基于规则的模型、基于案例的模型以及基于系统数据分析的模型。其中:

基于规则的模型本质是利用通过归纳专家经验知识得到的规则^[3-4],采取搜索或推理的方法,分析故障现象与故障原因之间的关系,该模型表示方法简单、直观,在求解小规模问题时效率较高,易于理解与实现,美国波音公司已利用诊断模型开发工具(Diagnostic Model Development Tool, DMDT)实现了B787上基于规则的诊断模型开发;基于案例的模型是基于知识的专家系统领域中的一个分支,是区别基于规则的模型的一种推理和学习模式,其核心思想是对人们过去的经验和知识进行结构化存储,并据此进行相应的判断与推理,该模型解决了基于规则的模型知识获取的瓶颈问题,但由于基于案例的模型使用的经验和知识难以在理论方面有严格的证明,因此降低了模型的准确性和可靠性;基于系统数据分析的诊断将系统故障形成原因由总体至局部

收稿日期:2019-11-21 修回日期:2019-12-11

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,高工,研究方向为健康管理与软件工程。

按树枝状逐渐细化,作为一个以诊断对象结构、功能特征为依据的行为模型,是一种定性的因果模型,该模型克服了基于规则的模型和基于案例的模型的缺陷,避免了知识获取的限制,并可以有效解决系统结构复杂、故障分析困难的问题,是实现机载实时诊断的一种新思路,也是适用于航空、航天、汽车工业等大型系统或装备故障诊断的通用技术^[5]。

1 开发原理

机载诊断模型推理知识的获取主要有两大途径:

1) 利用系统及设备的设计数据、产品技术说明等知识,通过故障模式、影响和危害性分析(FMECA)、测试性、安全性、可靠性设计分析等,创建基于先验知识的规则或原理性模型;2) 利用试验数据和实际历史数据,通过数据挖掘的方法,创建基于数据的推理模型或案例。

基于系统数据分析的机载诊断模型是依据系统与设备的相关设计数据分析得到的先验性模型,通常采用基于规则的表现形式,模型的诊断逻辑及故障传播关系需通过人工分析获取,这样就降低了模型的准确性和置信度。

本文提出了一种图形化的建模方式,将系统结构与行为知识作为背景理论,构建系统组成部件和部件之间的交联关系,建立系统的结构模型和功能模型等系统模型,以模拟系统的实际行为,结合部件的知识数据库(故障模式、故障特征等知识),可自动获取故障传播关系及诊断逻辑,生成诊断模型和故障传播模型,从而实现系统故障的定位和隔离。采用图形化建模方式开发的机载诊断模型的准确率高、智能化程度高。

基于系统数据分析的机载实时诊断推理架构^[6]如图1所示。

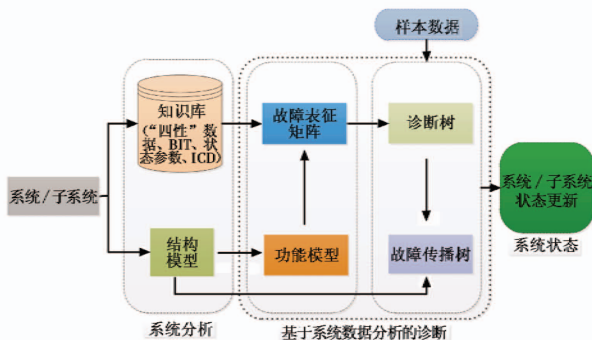


图1 基于系统数据分析的机载实时诊断推理架构

Fig.1 Real-time onboard diagnostic reasoning architecture based on system data analysis

2 开发方法

基于系统数据分析的机载实时诊断模型开发方法主要包括数据(知识数据库)准备、系统模型提取、故障特

征矩阵构建、诊断推理等几个方面,下面逐一进行介绍。

2.1 数据准备

数据准备即知识的获取,通过分析系统数据,将这些数据分为结构数据和操作数据两类。

1) 结构数据。

结构数据主要包括系统设备组件的类型、传感器、位置、依赖关系等。结构数据通常在系统开始运行时就进行收集。在大多数情况下,一旦收集了结构数据,除非系统一部分发生变化,否则不需要修改此数据集。随着时间的推移,更多详细的数据将会被添加到结构数据库中。

2) 操作数据。

与结构数据不同,操作数据是在系统运行过程中收集到的动态数据,这些数据主要包括传感器测量值和操作者的观测值。由于环境的变化或系统本身的变化(磨损、替换组件),操作数据的特征也会发生改变。根据对系统操作的目的,操作数据又分为基线操作数据和运行操作数据,由于系统特性会随时间发生变化,从而导致这两种数据发生微小改变,在这种情况下,应收集最新的基线数据,用于校准。在短时间周期内,如果基线数据和实时操作数据存在预期之外的重大偏差,说明系统可能失效,需要对实时操作数据进一步分析,来完成对系统故障的检测、隔离和识别。

对上述大量数据收集、分析后,可以推断出各种故障的分布情况、发生频率、故障特征等信息,将获取的信息提取为统一的结构化形式后,将系统、设备或者组件的功能描述、故障模式,以及相对应的故障特征等信息存储到功能数据库中。

2.2 模型数据提取

结构数据库和功能数据库创建完成后,就可提取系统的模型数据,包括结构模型和功能模型等系统模型。其中:结构模型是理解系统的故障及其传播影响的关键,它包含系统的组件组合以及它们之间的连接关系;功能模型可直观地展示出故障对系统或设备当前功能所产生的影响。

对于一个给定的系统,通过对系统所有关键组件的分解和识别,根据组件的优先级列表,提取系统的结构模型数据和功能模型数据^[7-9]。结构模型转换为功能模型的过程如图2所示。

根据系统的功能将系统分为更小的单元,分解的详细程度取决于系统的任务目标。系统被分解为子系统和组件以后,自顶向下创建系统的层次结构图,对每个关键组件的位置及其相邻组件相关联的信息都有一个详细描述。

根据已定义的结构框图来提取系统的功能模型数

据。功能模型不仅表现了系统中的组件功能,还可使用关键组件的传感器信息来确定已存在的故障。通过遍历系统结构框图及组件功能来创建系统的功能模型。

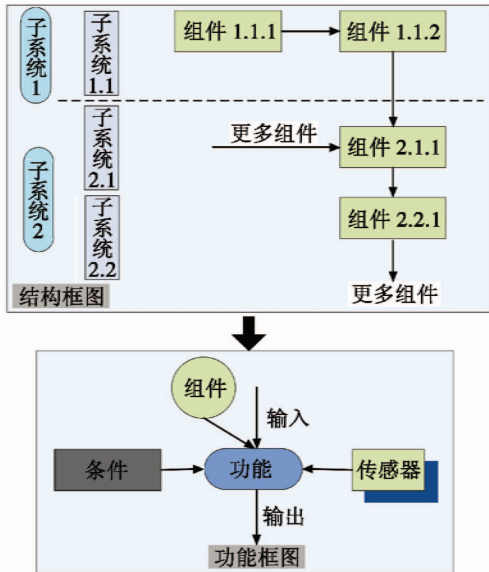


图 2 结构框图转换为功能框图的过程

Fig. 2 Structure diagram converts into function diagram

2.3 故障特征矩阵构建

故障特征矩阵的构建是基于系统数据分析的机载实时诊断模型开发的关键步骤,可作为推理系统行为变化的依据^[10-11]。根据系统的结构模型和功能模型,分析影响组件功能的系统状态特征,并以矩阵的形式表示组件故障模式和触发此故障的状态特征之间的映射关系。故障特征矩阵中的状态特征参数是直接间接引起系统故障的敏感参数或参数矩阵。一个功能模型可能包含多个故障模式,一个故障模式可能与多个状态特征参数相关。

状态特征参数可通过分析系统 FMECA 获取,状态特征参数的阈值设置可根据工程实践经验获得。状态特征参数通常包括系统状态参数、功能接口参数、旁路信号、关键元器件电学参数、环境应力参数。故障特征矩阵可表示为

$$M_F = \wedge i \wedge j \neg F_{ij} \quad (1)$$

$$\partial \equiv \neg M_F = \neg \wedge i \wedge j \neg F_{ij} = \vee i \vee j F_{ij} \quad (2)$$

式中: ∂ 表示故障特征矩阵; M_F 表示功能模型; F_{ij} 表示组件 i 的第 j 故障模式状态特征; \wedge 表示 AND; \vee 表示 OR; \neg 表示 NOT。

然后,通过诊断决策树实现对故障特征矩阵的最小化精简。诊断决策树是一个多分支的树形结构,是对故障特征矩阵进行转化后的表示形式,其内部节点表示监测系统的内部信号,叶子节点表示组件的故障模式。诊断决策树的转化原则为:

- 1) 需要转化的故障特征矩阵应尽可能地覆盖系

统所有的故障模式;

- 2) 故障模式之间是相互独立的,即一个故障的发生不会影响另一个故障的发生;

- 3) 状态特征值应至少与一个故障模式相对应,而不是与所有故障模式都对应。

依据上述转化原则,可将故障特征矩阵进行最小化精简,转化为诊断决策树,用于故障诊断。

2.4 诊断推理机

基于系统数据分析的诊断推理机与模型相互独立,是一种通用的诊断算法。诊断推理机根据捕获的状态参数以及故障特征矩阵,实时解析诊断决策树和故障传播树,得到系统组件的故障诊断结果,并根据故障诊断结果对系统的健康状态进行评估。

诊断推理机将故障特征矩阵转化后得到的诊断决策树、系统的结构模型,以及系统 FMECA 结果相结合,进行综合判断,定位发生故障的组件节点,并利用

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (3)$$

$$E = \{(V_a, V_b), \dots, (V_i, V_j), \dots\} \quad (4)$$

$\{V_i | (V_i \in V) \wedge (\exists j, x: M_F \Rightarrow F_{ij}) \wedge \langle V_i, V_x \rangle \in E\}$ (5) 形成故障组件节点集。通过遍历故障组件节点集中的所有节点,以及与其连接的所有组件,生成故障传播模型,从而定位故障。上式中: V 表示系统或机载成员设备中所有组件的集合; E 表示组件之间的连接关系; x 表示存在故障的组件节点; F_{ij} 表示组件 x 的第 j 故障模式的故障传播关系。

3 某装备燃油箱诊断模型开发示例

本文使用 G2 软件来实现某装备燃油箱的诊断模型开发。G2 软件平台以图形化和通用化的决策支持及故障传播关系描述为核心,采用可视化编程的方法,快速建立故障症状和根源之间的因果关系模型,实现系统或者机载成员设备的实时诊断。

某装备燃油箱由燃油箱体、过滤阀、油量控制阀等组件构成。通过 G2 软件构建燃油箱的结构图,并将其转化为功能模型,如图 3、图 4 所示。

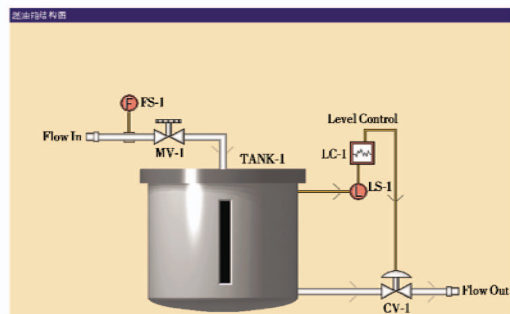


图 3 某装备的燃油箱结构图

Fig. 3 Structure of the fuel tank

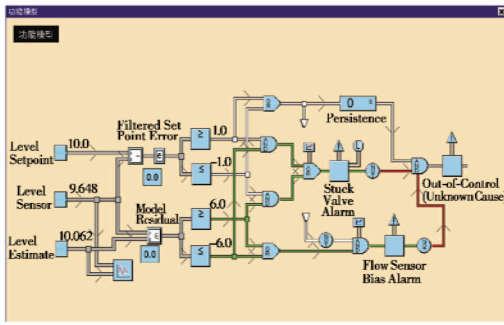


图4 某装备的燃油箱功能模型

Fig.4 Function model of fuel tank

通过分析燃油箱的功能模型,并结合 FMECA,得到燃油箱的故障模式和相应的故障特征参数,如表 1 所示。

表 1 燃油箱的故障特征参数表

Table 1 Fault characteristic parameters of the fuel tank

故障模式	故障特征参数 1	故障特征参数 2
燃油油量异常	燃油箱油量	燃油箱过滤阀位置
燃油流量异常	燃油箱入口流量	燃油箱出口流量

根据表 1 选取可驱动燃油箱功能模型的特征参数,并加载诊断推理机,实时解析诊断决策树和故障传播树,得到监测参数曲线图及故障诊断结果,如图 5 和图 6 所示。

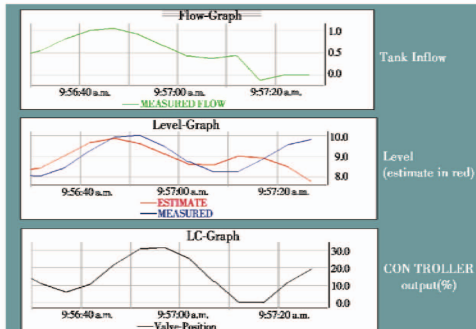


图5 监测参数曲线图

Fig.5 Monitoring parameter curve

Time	Sv	Alarm Message
05/07/2019 09:55:38	1	Tank-1 out-of-control alarm is set
05/07/2019 09:57:33	1	Suspect flow sensor FS-1 is biased with belief 0.788

图6 燃油箱的故障诊断结果

Fig.6 Fault diagnostic results of fuel tank

由诊断结果可知,燃油箱发生了“燃油流量异常”的故障,且将该故障与传感器 FS-1 进行了准确的关联,说明传感器 FS-1 所监测的燃油流量发生了故障。通过查看燃油箱的结构图,可确切定位“燃油流量异常”是由于燃油箱入口流量存在偏差引起的。

4 结论

本文提出的基于系统数据分析的机载实时诊断模型开发方法,是以对系统的功能、结构、原理,以及故障征兆和故障原因进行透彻分析为基础,生成用于故障诊断的诊断模型和故障传播模型,能够有效地解决系统结构复杂、故障定位困难的问题,是实现机载实时诊断的一种新思路。以某装备燃油箱的诊断模型开发为例,利用 G2 软件开发燃油箱的结构模型、功能模型、故障特征矩阵及诊断决策树,并根据得到的燃油箱故障特征矩阵选取可驱动功能模型的参数,通过实时解析燃油箱的诊断决策树和故障传播树,定位故障位置,给出故障诊断结果。最后确认诊断结果与预期触发结果一致,说明利用基于系统数据分析的机载实时诊断模型开发方法所生成的诊断模型准确率高,且该方法可推广应用于复杂系统的地面故障诊断工作。

参考文献

- [1] 刘恩朋,杨占才,靳小波. 国外故障预测与健康管理系统开发平台综述[J]. 测控技术,2014, 33(9):1-4.
- [2] 卢海涛,王自力. 综合航空电子系统故障诊断与健康健康管理技术发展[J]. 电光与控制,2015, 22(8):60-65, 86.
- [3] 徐庆宏,任和,马小骏,等. 民用飞机实时监控和健康健康管理技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2018.
- [4] 刘剑,陈一超,江虹. 基于规则的通用专家知识库故障诊断方法[J]. 计算机与数字工程,2010(6):72-76.
- [5] 王光秋,陈黎. 民机前沿技术[M]. 北京:航空工业出版社,2017.
- [6] BHASKAR S. A model-based reasoning architecture for system-level fault diagnosis[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [7] 刘鹏鹏,左洪福,苏艳,等. 基于图论模型的故障诊断方法研究进展综述[J]. 中国机载工程,2013, 24(5):696-703.
- [8] 张红林,付剑,张春元,等. 基于同构节点的动态故障树分析方法[J]. 计算机工程与设计,2011, 32(1):1-4.
- [9] 李莉,于沛,吴志川,等. 故障字典技术在机载电源系统故障诊断中的应用[J]. 电光与控制,2015, 22(11):72-75.
- [10] ABHINAV S. Knowledge-based architecture for integrated condition based maintenance of engineering systems [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [11] JOHNSON S B, GORMLEY T, KESSLER S, et al. System health management with aerospace application [M]. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.