

基于案例推理的航天发射场故障诊断系统

周辉峰, 王一雄, 曾少龙, 张庆胜

(西昌卫星发射中心发射测试站, 四川 西昌 615606)

摘要: 随着科学技术的飞速发展, 航天发射场测试发射系统的结构越来越复杂, 影响航天试验任务装备系统正常运行的因素也急剧增加, 使其产生故障或失效的可能性也越大, 且故障也呈现日趋复杂化的趋势; 以外安系统为例, 根据外安系统设备组成及工作原理, 研究了基于案例推理和故障树分析相结合的故障诊断方法, 为系统指挥决策提供参考信息, 有效地提高了航天器在靶场的测试效率。

关键词: 航天发射场; 故障监测分析系统; 基于案例推理; 故障树分析方法

中图分类号: V55

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)05-0015-05

Cosmodrome Fault Diagnosis System Based on Case-Based Reasoning

ZHOU Hui-feng, WANG Yi-xiong, ZENG Shao-long, ZHANG Qing-sheng

(Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615606, China)

Abstract: With the rapid development of science and technology, space launch structure and field test launch equipment system become more complex. The factors to influence the normal operation of aerospace test equipment system have increased dramatically, which makes the growing possibility of malfunction / failure, and these failures also showed a trend of being increasingly complicated. Outside trajectory measurement and self-destruction system as an example, according to the system composition and working principle of the equipment, a kind of fault diagnosis method that the combination of the case-based reasoning method and fault tree analysis method has been studied. The application of this method provides reference information for the launch command decision, and improves the test efficiency of spacecraft test at launch site.

Key words: space launch site; monitoring and fault analysis system; case-based reasoning; fault tree analysis method

随着科学技术的飞速发展, 航天发射装备的结构越来越复杂, 功能越来越完善。相应地, 影响航天试验任务装备系统运行的因素也急剧增加, 故障也呈现日趋复杂化得趋势。运载火箭测试发射过程中出现的故障问题比较多, 涉及的面比较广, 不仅涉及火箭的各个分系统, 还涉及地面测试发控系统的测试设备。目前, 在靶场测试中各系统均缺少在线的故障监测分析系统, 测试中出现的故障均需人工去排查、分析, 其过程需要投入不少人力, 同时也占用额外的测试时间, 阻碍了测试的进程。

根据靶场信息化建设要求, 为提高靶场测试技术的自动化程度, 本文针对现有运载火箭测试发射过程及原理, 从信息共享和辅助决策的角度出发, 结合现有测试网络的体系结构, 提出了适用于运载火箭测试发射的故障诊断系统。该系统接收来自主控计算机转发的测试数据, 根据测试数据及已有的专家系统知识库、故障树, 故障诊断专家系统进行诊断分析、判断故障原因、确定故障源并对其进行隔离, 进行相关图形回显和存储诊断结果。逐步实现对运载火箭相关系统进行有效的故障分析和诊断, 指导火箭的测试发射, 进而有

收稿日期: 2012-12-05

作者简介: 周辉峰(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事航天器测试发射、卫星编队与控制技术、计算机视觉与图像处理研究。

效的提高运载火箭发射的可靠性和安全性。

1 总体设计

1.1 故障诊断系统的组成

故障诊断是根据故障征兆信息寻找系统故障原因并确定故障模式的过程,是一个有穷递归过程,如图1所示。一般而言,一个大型航天测试发射系统设备的故障诊断系统的基本模块包括信号提取、信号处理、状态辨识、监测与诊断决策^[1]。由于在各个模块中所使用的数理方法不同,形成了形形色色的故障诊断系统。

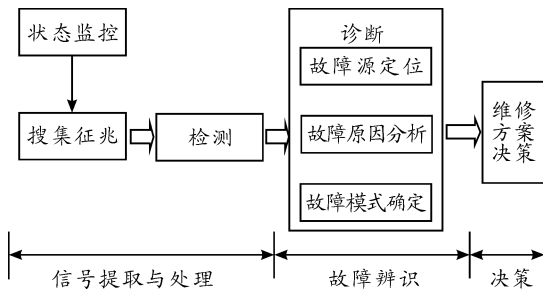


图1 故障诊断一般流程

1.2 故障诊断方法

故障推理机制是故障诊断中的重要组成部分,目前推理机制主要有3种:基于模型的推理方法(Model-Based Reasoning, MBR)、基于规则的推理方法(Rule-Based Reasoning, RBR)和基于案例的推理方法(Case-Based Reasoning, CBR)。基于案例的推理属于机器学习领域的类比学习,即通过源问题与目标问题的相似性,查找目标问题的求解方法。其学习本身是增量式的,可以解决非线性的半结构化或非结构化问题。而基于规则的推理和基于模型的推理则是机器学习中的归纳学习,是非一般的研究对象为学习对象,用归纳总结的方法得到一般性描述和规律的方法^[2,3]。根据发射场设备组成原理及故障特征,限于篇幅,本文主要研究基于案例的推理机制的故障诊断模式。

基于案例的推理机制是一种类比推理,即通过访问案例库中过去类似问题的求解从而获得当前问题的解。在CBR系统中,知识单元是案例。案例就是一次经历,是一组带有相关值的特征,这些特征描述了一个问题及其结论。新问题的解决通过寻找一个与之相似的以往案例,把它重新应用到新问题的环境中来。CBR还是一个持续的、渐进增长的学习过程,一旦解决了一个新问题,就获得新的经验,用来解决将来的问题^[4,5]。一个典型的CBR问题求解过程如图2所示。

1.3 诊断策略

由于航天发射场系统庞大,设备结构复杂,很难建立可用于故障诊断的动态数学模型。而且,现有可实时利用的检测信号非常少,许多征兆不易测量和获取。对于大型的复杂系统,采用单一的故障诊断方法难以达到好的诊断效果。本文采用了以基于CBR推理的专家系统方法与基于故障树模

型的故障诊断方法相结合的混合智能诊断技术方案。

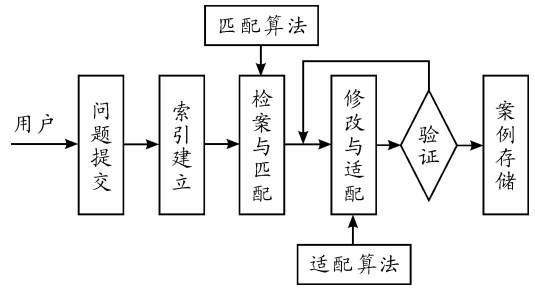


图2 CBR推理机制

1.3.1 层次诊断策略

在建立诊断系统过程中,先采用基于等级结构模型的故障诊断方法诊断出粗的故障诊断范围,然后再进一步诊断出细的故障部位。根据对航天测控设备的结构层次划分,功能单元以上的层次结构模型作为诊断对象的高层模型。当确定某一功能单元出现故障后,诊断系统再利用该诊断对象的低层模型进行故障诊断,不同层次的诊断对象可根据需要采用不同的诊断方法。

1.3.2 合适的诊断粒度

诊断粒度,即最小诊断单元,是指具体的定位结果要确定到系统的哪一个层次级别。显然,诊断粒度是与要求的信息量成反比的,粒度越小,诊断所需要的信息量越大,花费的代价自然也越大。所以确定诊断粒度要根据诊断的要求来进行,在满足诊断要求的前提下,使划分的“块”大一些,以降低工作量。本文的诊断粒度原则上是定位到设备级。

1.3.3 浅知识和深知识有机结合

浅知识是表示故障、征兆和原因等直接相联系的专家启发式经验知识。深知识是表示诊断对象的结构和性能的描述知识,包括功能结构层次、相互间输入输出关系及设备工作原理等。对于复杂系统的故障诊断,仅使用浅知识进行故障诊断是远远不够的。本文在诊断推理方法中,采用大量的深知识,并将浅知识和深知识有机结合,浅知识主要用于启发式推理或动态枝剪深知识。

1.3.4 知识的表达方法

1) 产生式表示法。产生式表示法可以表示为:IF P THEN Q 。其含义:如果前提 P 被满足,就可推出结论 Q 或执行 Q 所规定的动作。

2) 基于案例的知识表示。案例是故障诊断知识的一种表示模式,它将专家的知识与经验以案例的数据结构表示出来,实际上就是专家求解问题的具体例子。案例对象由关系槽、故障特征属性槽、分析方法槽和最低相似度槽组成,以框架的形式表示。关系槽表示对象与其它对象的静态关系;故障特征属性槽通过描述多个故障现象的侧面以及侧面权重值来描述其特征;分析方法槽由检查方法、原因分析、维修建议和帮助信息4个侧面组成;最低相似度是故障特征属性应满足的约束条件。

2 故障监测系统方案设计

2.1 软件总体结构设计

以靶场外安系统为例,本着紧贴测试需求、优化岗位功能结构的原则,从信息共享和辅助决策的角度出发,立足现有的测试体系结构,建立外安系统在线故障监测分析系统。

系统设计思路:在连接测试网络的计算机工作站上,故障监测分析系统接收来自外测终端、遥测检测站、前端 VXI 和自动测控终端的数据和指令,经过挑路处理,把外安系统各设备的工作状态参数和系统流程的动作指令综合起来分析,根据测试流程的指令动作推断系统设备的状态变化,把推断结果与实时监测数据对比,若出现异常或超差,则把现象与故障库进行模式匹配,并实时仿真重现在软件界面上。设计思路如图 3 所示。

2.2 故障树分析与故障库的建立

2.2.1 故障树建立

故障树分析方法是一种图形演绎方法,是故障事件在一定条件下的逻辑方法。它是用一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图,清晰地说明系统是怎样故障的。根据故障树分析系统发生故障的各种原因和系统可靠性特征量,就是故障树分析方法(FTA)^[6]。

将外安系统故障作为顶事件,根据系统设备组成,进一步将系统故障分为外安系统地面故障和箭上故障两大块。地面故障包括后端测试设备故障、前端测试设备故障和前后端网络故障。箭上故障包括箭上单机故障和箭上电缆及接口故障。如此逐级往下分析,并对每个事件进行编号,当分析到某一环节不能再往下分析时,便作为基本事件不再分析。得到外安系统故障树如图 4 所示。

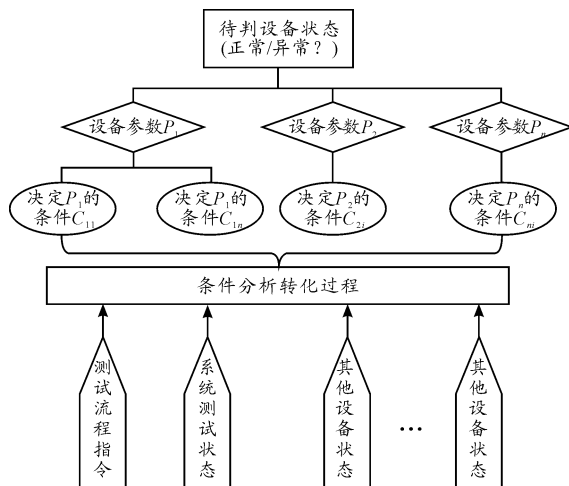


图 3 外安系统故障分析系统总体设计思路

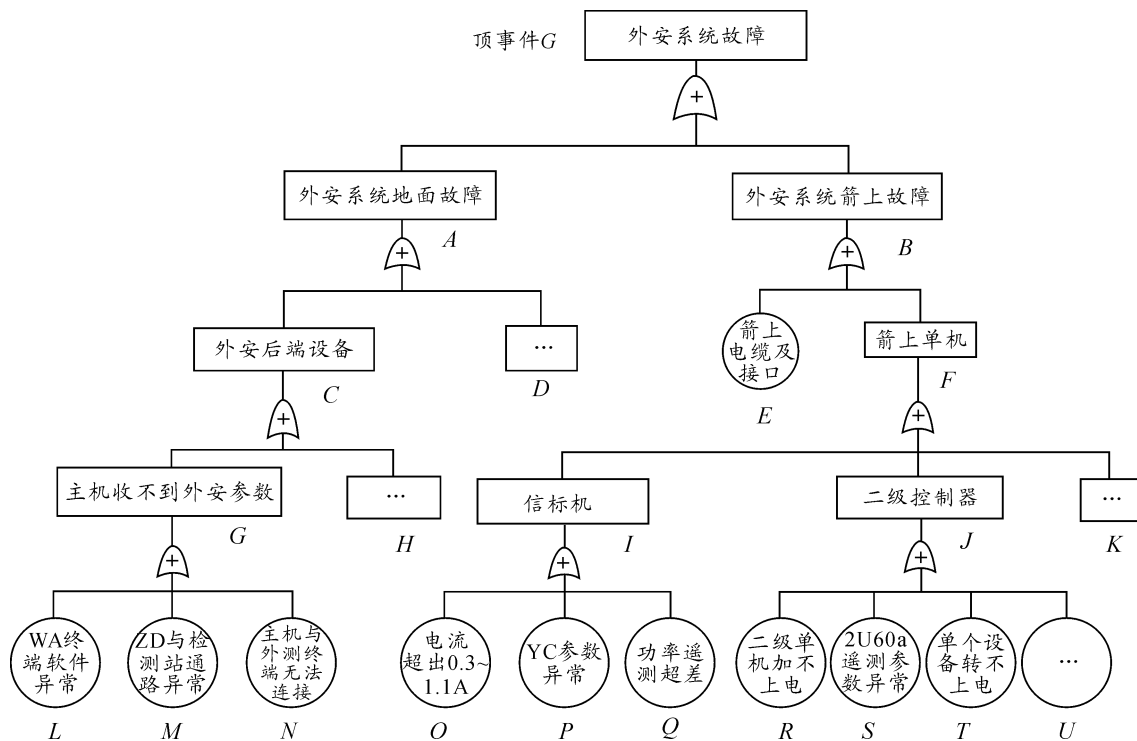


图 4 外安系统故障树

2.2.2 案例库建立方法

案例库建立主要依据以往发生的故障案例和行内专家、设计人员通过系统分析推理得到的可能发生的故障预案及其故障现象来建库。故障库建立好后可以通过将来发生的故障不断补充和添加,同时故障库管理员可以对故障库中的信息进行添加修改,以便故障库中的案例更加有利于系统的故障匹配。

在靶场测试装备故障诊断 CBR 系统中,对装备划分了类别层次,并以此为基础来组织案例库,属于层次组织法,如图 5 所示。先按系统进行分类,即案例的顶层;然后对系统划分为箭上、地面等,即案例的第二层;将箭上地面系统的具体设备归结为第三层;将设备的故障现象归结为第四层。

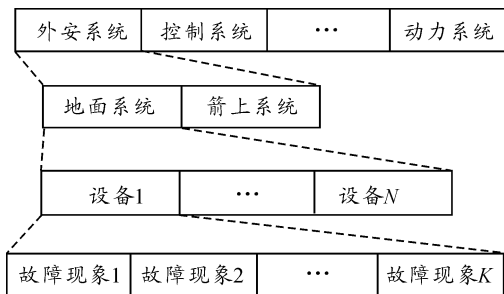


图 5 系统设备故障案例的分层组织

通常一个案例应该包含以下几个方面的内容:问题的描述;该问题的解决方案;对该解决方案的解释或延伸信息,如应用结果、解得评价、派生解甚至指向相似案例的指针等。一个完整的案例至少需要有问题和解的描述信息,如表 1 所示。

表 1 案例的主要信息

名称	含义
案例编号	唯一标示案例的代码
设备	故障案例所属的设备
故障现象	故障案例的最基本的特征
诊断结论	故障诊断后得到的结论
诊断方法	排除故障的方法
案例发生频率	该故障发生的次数
专家评价	专家对该案例进行诊断的反馈

2.3 案例检索策略与相似匹配算法

2.3.1 案例的检索策略

检索是指根据问题情况不断寻求可利用的知识,从而构造一条代价较少的推理路线使问题得到圆满解决的过程。通常这种搜索在一定的粗限制条件下进行,也称为过滤。最后对这些进过筛选的案例进行匹配,并按相似度顺序排列。目前,案例的检索策略通常有最近相邻策略、归纳检索策略和知识引导策略等。

最近邻法是指从案例库中找出与当前情况距离最近的

案例的方法。最近邻法将一案例的特征矢量视为高维空间的一个点,在这些点上建立一个特殊的最近邻查找结构,使得当给定一个问题描述(也就是空间中的一个点)时,能够迅速找到与之取得最佳匹配的点。使用这种方法首先需要给出案例间距离的定义,然后计算出当前案例与案例库中所有案例间的距离,然后从中选出距离最小者。不同的应用领域对案例间距离的定义不同。常用方法有距离定义为相匹配的输入案例的特征加权和、两个集合的交集、代数矢量间的距离等方法。最近邻法计算简单容易实现,并且其检索结果能达到全局最优解。但该方法检索效率不高,只适用于案例库规模较小的应用系统,否则检索速度很慢。同时还要求案例库中所有案例都应具有完全相同的结构。

归纳索引法是通过某种方法对案例库建立索引,由索引来进行案例检索的方法。其主要目的是经过缩小搜索范围来提高搜索效率和速度,实现归纳索引法的关键技术在于如何建立合适的案例索引。目前已出现多种不同的建立案例索引的方法和途径并在实际中得到应用,归结成两大类,一类称为群所引发,另一类称为结构索引法。本文采用归纳法和最邻近法相结合的检索方法,检索过程如图 6 所示。

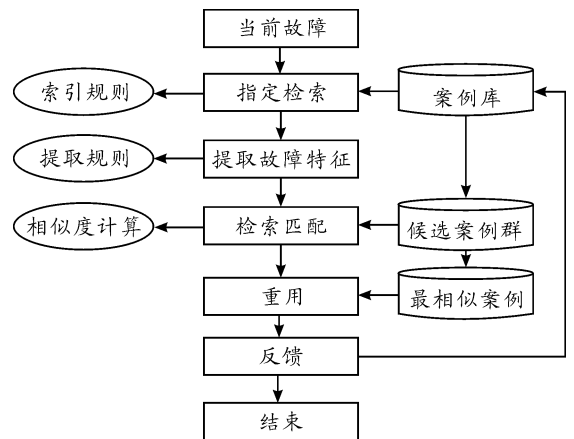


图 6 CBR 诊断模块工作流程

2.3.2 案例的相似匹配算法

案例匹配是两个案例的比较与耦合,其结果为一一致、近似一致或不一致。一则案例可视为由一组特征属性值对构成的集合。案例匹配要建立目标案例的这些特征属性值对与候选案例中的这些特征属性值对的相似性度量方案。给定 n 维空间 $F = (f_1 \times f_2 \times \dots \times f_n)$, 设 X 和 Y 为该 n 维空间中的两点(即两个案例), 则 X 和 Y 的相似度:

$$S(X, Y) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \times \text{sim}_i(f_i^X, f_i^Y)) \quad (1)$$

式(1)中, $S(X, Y)$ 表示案例 X 和 Y 之间的相似度, $\omega_i \in [0, 1]$ 为第 i 个特征的权值, $\sum \omega_i = 1$, $\text{sim}_i(f_i^X, f_i^Y) \in [0, 1]$ 为 X 和 Y 中第 i 个特征的相似性。常用的特征量有布尔型特征、数值型特征、区间型特征、字符型特征等具体计算方法见文献[1]。

3 案例的学习与维护

3.1 基于专家评价的案例学习

案例的学习是指案例库不断获取新的知识(案例)和改进旧知识(案例)的过程。自学习能力强是案例推理方法本身的优点,因为每获取一个新问题的解,都可以将其组成一个新案例存入案例库中,从而扩充案例知识,解决知识获取的瓶颈。案例的学习主要包括两个方面,一是向案例库增加新的案例;二是对案例库中已有的案例进行调整,使它更逼近真实情况,提高案例求解的精度。本系统设计采用基于专家评价的新案例学习方式,该方法是根据案例推理的结果对实际设备进行诊断,然后由专家对诊断结果进行评价,给出反馈意见,作为案例学习的依据。

3.2 案例库的维护

案例管理者根据收集到的案例及用户诊断后反馈的诊断效果,在后台进行案例库的维护管理操作,包括案例的增加、修改和删除。通过案例维护模块,使得 CBR 系统在使用过程中不断扩充和完善自身的知识库,扩大问题的求解范围和求解精度。案例库维护模块的工作流程如图 7 所示。

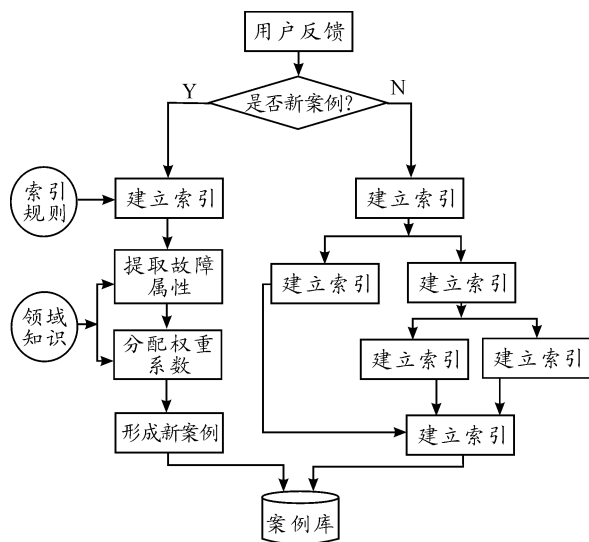


图 7 案例库维护模块工作流程

4 结束语

本文从信息共享和辅助决策的角度出发,结合现有测试网络的体系结构,以靶场外安系统各设备工作过程为研究对象,设计了基于案例推理和故障树分析方法相结合的在线故障监测分析系统。系统研制成功后能够监视和跟踪系统状态操作或条件改变而出现的变化,分析其可能导致的结果,为系统指挥决策提供参考信息,系统的应用将大为改善现有测试模式的不足,提高现有测试效率。

参考文献:

- [1] 张凤鸣,惠晓滨. 航空装备故障诊断学[M]. 北京:国防工业出版社,2010:22-23.
- [2] 杨奕飞,周江,周承斌. 航天测控设备智能故障诊断系统设计[J]. 电视技术,2009,49(8):54-56.
- [3] 何桂青,陈英,范丽云. 运载火箭故障诊断专家系统[J]. 北京理工大学学报,1998,18(6):685-686.
- [4] 刘磊,龙兵,刘震. 两种多故障诊断算法的性能比较研究[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(1):75-79.
- [5] FERET M, GLASGOW J. Hybrid Case-Based and Model-Based Reasoning for the Diagnosis of Complex Devices[J]. Journal of Applied Intelligence,1997,7(1):57-78.
- [6] 孙新利,陆长捷. 工程可靠性教程[M]. 北京:国防工业出版社,2005:62-32.

(责任编辑 周江川)