

航天器在轨状态检测与诊断维修

卫星在轨故障诊断 技术与应用

肇刚 李玉庆 徐敏强 杨天社 著

On-Orbit Satellite Fault Diagnosis
Technology and Application



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天器在轨状态检测与诊断维修

卫星在轨故障诊断 技术与应用

On-Orbit Satellite Fault Diagnosis
Technology and Application

肇刚 李玉庆 徐敏强 杨天社 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

卫星在轨故障诊断技术是航天领域的重要研究方向。本书构建了比较系统的卫星在轨故障诊断理论方法体系,主要包括基于定量模型的方法、基于定性模型的方法、基于规则的方法、基于案例的方法、数据驱动方法以及卫星在轨故障融合诊断方法,给出了卫星在轨故障诊断的典型实例和应用,介绍了国内外几种典型的卫星在轨故障诊断系统的特点和功能。

本书取材广泛、内容新颖,理论与实践兼顾,可为工程单位、工业部门、科研院所和高等院校从事航天器在轨故障诊断技术研究和应用的管理人员、工程技术人员和教学科研人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星在轨故障诊断技术与应用/肇刚等著. —北京:国防工业出版社,2019.5

ISBN 978-7-118-11835-3

I. ①卫… II. ①肇… III. ①人造卫星-故障诊断
IV. ①V474

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 060067 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京龙世杰印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20½ 字数 365 千字

2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 268.00 元

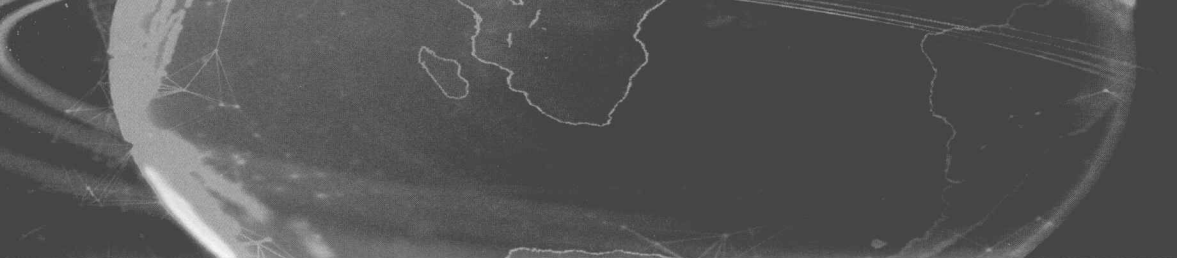
(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



FOREWORD 序

卫星结构复杂、工作环境特殊,在轨故障难以避免;相比地面装备,卫星可观测性和可维护性差,在轨故障诊断困难。在我国新平台、新型号及使用新技术的卫星不断增多,卫星设计寿命不断延长的背景下,深入研究卫星在轨故障诊断技术,对于保证卫星在轨长寿命和高可靠至关重要。

卫星在轨故障诊断技术一直是航天领域的重点研究方向,经过几十年的发展已取得了长足进步。本书作者系统地总结、提炼了在卫星在轨故障诊断方面的研究成果,从指导实际应用的角度提供了卫星在轨故障诊断的大量案例。

本书取材广泛、内容新颖、理论与实践兼顾,具有很强的理论意义和实用价值。目前,我国正在全面推进航天强国建设,本书对我国卫星在轨故障诊断理论方法的研究和应用,会发挥很好的促进作用。

李济生

2018年12月



PREFACE 前言

近年来,我国航天事业蓬勃发展,取得了巨大成就。卫星作为用途广泛、发展迅速的航天器,在航天技术的发展和应用中占有举足轻重的地位。卫星结构复杂、可观性和可维护性差、工作环境特殊。国内外航天实践表明,无论在设计、研制阶段采取了多么严格的措施,卫星在轨运行时发生故障都难以避免。这些故障会威胁在轨卫星的安全,影响卫星长寿命高可靠运行,导致卫星效能降低或失效。

目前,我国在轨卫星种类和数量急剧增加,新平台、新型号及使用新技术的卫星不断增多,卫星设计寿命不断延长,保证卫星在轨安全可靠及长寿命运行的难度不断增大。近 10 年来,无论是工程单位、工业部门、科研院所还是高等院校,都很重视卫星在轨故障诊断技术的研究和应用,很多高校还设立了相关的专业课程。目前,针对卫星在轨故障诊断技术和应用的图书缺乏,难以满足本领域不断增长的迫切需求。

本书系统总结提炼作者及其科研团队发表的论文、研究报告以及多年积累的卫星在轨故障诊断维修案例,并参考国内外研究成果,较为全面系统地论述了卫星在轨故障诊断的技术方法,并通过具有针对性、实用性和操作性的实例或示例进行了说明。全书共分为 9 章:第 1 章介绍卫星在轨故障诊断的国内外研究现状和发展趋势;第 2 章介绍卫星在轨故障数据类型和预处理方法;第 3 章至第 8 章介绍卫星在轨故障诊断的基本方法,包括基于定量模型的方法、基于定性模型的方法、基于规则的方法、基于案例的方法、数据驱动方法以及卫星在轨故障融合诊断方法等,并介绍了相关方法的应用实例和示例;第 9 章介绍国内外几种典型的卫星在轨故障诊断系统的特点和功能。

本书编写过程中得到了西安卫星测控中心及哈尔滨工业大学的各级领导的大力支持。西安卫星测控中心樊恒海研究员、王信峰研究

员、高宇高级工程师、吴冠高级工程师、李肖瑛高级工程师、高波高级工程师、陆军高级工程师、傅娜、刘帆、赵静,国防科技大学金光教授,哈尔滨工业大学王日新副教授对本书的撰写工作提供了大量帮助。研究生董韵佳、雷明佳、冯小恩、董诗音、江飞龙、方博、李政等参与了本书的校对和整理工作。在此对所有提供支持和帮助的领导、专家、学生表示衷心的感谢。

本书编写得到国家安全重大基础研究项目资助,在此表示感谢。

本书是国内首次系统介绍卫星在轨故障诊断技术的专著,由于编写时间有限、资料保密、参考资料较少等因素影响,加之作者水平有限,书中难免有错误或不当之处,恳请各位专家和读者不吝指正。

著 者

2018年12月



第 1 章 绪论	1
1.1 目的和意义	1
1.1.1 卫星在轨故障诊断的目的	1
1.1.2 卫星在轨故障诊断的意义	1
1.2 卫星在轨故障基本情况与特点	3
1.2.1 故障总体情况	3
1.2.2 故障类型	4
1.2.3 卫星在轨故障诊断特点	5
1.3 国外研究现状	5
1.4 本书的内容和特色	7
参考文献	8
第 2 章 卫星在轨数据类型与预处理	10
2.1 引言	10
2.2 在轨数据类型	10
2.2.1 遥测数据	10
2.2.2 外测数据	11
2.2.3 上行遥控数据	11
2.3 数据补齐与采样	12
2.3.1 数据补齐	12
2.3.2 时间同步	13
2.3.3 数据采样	13
2.4 野点剔除	14
2.4.1 53H 法	14
2.4.2 前推差分算法	14
2.5 数据平滑	16
2.5.1 中值滤波算法	16
2.5.2 滑动平均算法	16
2.6 数据特征检验	18

2.6.1	分布检验	18
2.6.2	时间序列特征识别	19
2.6.3	基于 EMD 的趋势分析	23
2.7	数据降维	27
2.7.1	主成分分析	27
2.7.2	投影寻踪	32
2.7.3	示例分析	34
	参考文献	35
第 3 章	基于定量模型的卫星在轨故障诊断	37
3.1	概述	37
3.2	测量机构的定量故障诊断方法	38
3.2.1	平衡方程法	38
3.2.2	状态 χ^2 检验法	41
3.3	基于奇偶向量法的执行机构故障诊断	49
3.3.1	奇偶向量法的基本思想	49
3.3.2	故障检测方法	49
3.3.3	故障隔离方法	51
3.3.4	基于 Potter 算法的奇偶矩阵解算	52
3.3.5	仿真算例	53
3.4	基于多解析模型的故障诊断方法	59
3.4.1	基于多解析模型的故障隔离	59
3.4.2	姿控系统的冗余产生及故障隔离	65
3.4.3	仿真验证	72
	参考文献	76
第 4 章	基于定性模型的卫星在轨故障诊断	78
4.1	概述	78
4.1.1	定性和定量诊断方法的区别	78
4.1.2	定性故障诊断方法简介	79
4.1.3	实施步骤	81
4.2	典型定性模型建模方法	82
4.2.1	基于故障树的建模方法	82
4.2.2	基于符号有向图的建模方法	87
4.2.3	传递系统模型建模方法	93
4.2.4	基于决策树的建模方法	100

4.3	基于定性模型的诊断推理方法	106
4.3.1	基于第一定律的推理方法	106
4.3.2	理论基础及数学描述	107
4.3.3	约束传播技术	110
4.3.4	基于解析冗余的冲突识别	111
4.3.5	基于定性模型的诊断过程	113
4.3.6	定性模型中的不确定推理	115
4.4	应用示例——卫星电源系统故障诊断	118
4.4.1	卫星供电分系统组成	118
4.4.2	基于有向图的结构描述	120
4.4.3	基于命题表达式的功能描述	121
4.4.4	冲突识别算法	126
4.4.5	电源定性模型诊断推理过程	126
	参考文献	128
第5章	基于规则的卫星在轨故障诊断	132
5.1	概述	132
5.1.1	基本原理	134
5.1.2	实施步骤	134
5.2	卫星故障规则的获取和表示	136
5.2.1	故障规则知识获取	136
5.2.2	故障规则表示	141
5.2.3	规则修正	142
5.2.4	卫星典型故障规则	143
5.3	基于规则的推理	145
5.3.1	推理策略	145
5.3.2	不确定性推理	149
5.4	应用示例	154
5.4.1	经验知识的提取	155
5.4.2	定性故障模式的设置	155
	参考文献	157
第6章	基于案例的卫星在轨故障诊断	158
6.1	概述	158
6.1.1	基本原理	158
6.1.2	基本步骤	159

6.2	卫星故障案例的获取和表示	160
6.2.1	故障案例获取	160
6.2.2	故障案例表示	161
6.2.3	案例修正	169
6.2.4	案例学习	170
6.3	基于案例的推理	171
6.3.1	案例检索	171
6.3.2	案例相似性度量	175
6.3.3	案例匹配	177
	参考文献	178

第7章 数据驱动的卫星在轨故障诊断 179

7.1	概述	179
7.1.1	基本原理	179
7.1.2	实施步骤	180
7.2	特征提取	181
7.2.1	时域特征	181
7.2.2	频域特征	184
7.2.3	信息域特征	184
7.2.4	反作用轮异常掉电时的多层次征兆建模	189
7.3	特征约简和降维	190
7.3.1	基于粗糙集的卫星特征约简	190
7.3.2	基于非负矩阵分解的高维特征约简	201
7.3.3	基于流形学习的复杂特征降维方法	209
7.4	基于支持向量机的故障建模与诊断	214
7.4.1	基本原理	215
7.4.2	SVM 实现问题	217
7.4.3	示例分析	220
7.5	基于概率图的故障建模与诊断	231
7.5.1	贝叶斯网络基本概念	231
7.5.2	贝叶斯网络建模	233
7.5.3	贝叶斯网络推理	234
7.5.4	示例分析	235
	参考文献	239

第 8 章 卫星在轨故障融合诊断 242

8.1	概述	242
8.2	融合诊断框架	243
8.2.1	融合诊断框架的基本要素	243
8.2.2	融合诊断信息分类	244
8.2.3	融合诊断框架模块设计	244
8.2.4	融合途径	247
8.3	定量模型与神经网络融合诊断	248
8.3.1	理论基础	248
8.3.2	技术方法	252
8.3.3	故障建模方法的示例	252
8.4	残差分析与规则推理融合诊断	259
8.4.1	理论基础	260
8.4.2	残差分析与规则推理融合诊断的技术方法	262
8.4.3	残差分析与规则推理融合诊断示例	267
8.5	定量模型与历史数据融合诊断方法	277
8.5.1	理论基础	278
8.5.2	定量模型与历史数据融合诊断的技术方法	279
8.5.3	定量模型与历史数据融合诊断示例	286
8.5.4	结果分析	288
	参考文献	292

第 9 章 卫星在轨故障诊断系统 294

9.1	概述	294
9.2	国外情况	294
9.2.1	G2 实时专家系统开发平台	294
9.2.2	Livingstone 卫星诊断推理系统	299
9.3	国内卫星故障诊断系统	303
9.3.1	测控单位故障诊断系统	303
9.3.2	运管单位故障诊断系统	307
	参考文献	315

第1章 绪论

1.1 目的和意义

1.1.1 卫星在轨故障诊断的目的

人造卫星一般由测控、电源、控制、星务等众多分系统构成,其结构和控制十分复杂。另外,由于长期在太空极端温度、强电磁辐射环境中运行,难免发生各种故障,威胁卫星在轨运行安全,甚至影响卫星的使用寿命。通过对卫星在轨故障进行诊断,可及时发现、定位故障,支持故障影响分析和故障维修策略制定,达到及时、有效地排除故障,减少故障危害,保障卫星在轨安全、可靠、长寿命运行,使卫星在国民经济和国防建设相关领域更好地发挥作用。

1.1.2 卫星在轨故障诊断的意义

航天领域是一个高投资、高风险、高效益的领域,因故障导致卫星使用效率降低或失效对国民经济和国防建设影响很大。因此,研究卫星在轨故障诊断的意义重大。

(1) 国内外航天实践表明,无论在设计、研制阶段采取了多么严格的措施,卫星在轨发生故障都难以避免。因此,需要研究卫星在轨故障诊断技术,对卫星在轨故障进行有效诊断。

卫星是一个由成千上万个模块和元器件组成的力、热、机、电、磁混合的大型复杂系统,系统研制阶段难免出现设计、工艺、加工、制造、原材料质量等方面的缺陷;卫星发射后上述缺陷已无法改变;陀螺、动量轮、太阳帆板驱动机构等多类部件处于长年不间断运行状态,蓄电池、各种开关等部件的状态因卫星进出地影或工作模式变化而频繁切换;星上的元器件会随着在轨时间推移而逐渐老化、退化。国内外航天实践表明,由于上述因素的影响,卫星在轨发生故障难以避免。能否对卫星在轨故障进行有效诊断,成为反映卫星管控水平和保障卫

星在轨安全可靠运行的重要技术标志。

(2) 卫星在轨故障大多是预想不到的。由于星上自主故障诊断和处置能力有限,需要地面针对卫星在轨故障进行专门研究。

一是受空间环境、星上状态动态变化等因素影响,卫星在轨故障往往与设计人员的预期不同。例如,卫星长期在轨运行期间,内外部因素使星上状态发生大范围、大幅度变化,特别是长寿命卫星和发生故障的卫星,何时何处何原因诱发何种故障往往是设计时难以提前预知的。

二是卫星在轨故障具有“过程”特征,故障表现形态、演变规律及故障影响的复杂性,使得许多问题难以采用事先设计或静态模拟的既定方法解决。卫星在轨故障过程具有高动态、强耦合、小样本、不确定等特性,需要结合相关领域专家知识和历史故障案例,甚至需要借鉴其他途径获得的信息和知识,进行知识层融合分析与定性定量多方法融合推理等。

三是卫星在轨故障诊断和处置的条件受限,难以直接套用地面设备或系统诊断处理方法。首先是在卫星运行过程中,即使发生故障,也不能全系统断电或“停机检修”,发生故障的部件难以更换;其次,因卫星可诊断性设计不足,存在传感器测点不可达又无法增加新测点的情况,故障的可诊断性与地面装置或系统存在显著差异。

四是受重量和星载计算机软、硬件资源的限制,卫星对其自身发生的异常和故障的自主分析、诊断、处理能力有限,通常必须依赖地面测控支持的星地联合工作模式。

(3) 卫星在轨故障分析、诊断研究薄弱,需要持续研究。

对卫星在轨故障的高可靠诊断研究还较为薄弱,导致故障误诊率、漏诊率高,特别是对于信息不完备性、故障过程中继发和并发故障、非预期故障以及系统级故障,有效的故障诊断方法不多,导致对卫星故障不能及时地发现和维修,故障影响卫星的安全(故障不能及时发现)、使用(故障不能及时排除)和寿命(燃料损失严重、故障危害波及)。

(4) 研究卫星在轨故障诊断技术,具有紧迫性。

一是我国在轨卫星种类和数量急剧增加,保障卫星在轨安全运行的需求不断增强,急需研究卫星在轨安全管理技术。不断发展的航天技术、日渐复杂的航天器平台结构、日益多样的航天应用需求、迅速增多的在轨卫星数量、异常繁重的卫星管控任务,要求必须针对我国大部分卫星平台,系统地开展卫星在轨故障诊断技术研究,提高卫星故障的处置能力。

二是未来卫星平台新、型号新、技术新,使保障卫星在轨安全可靠和长寿命运行的难度逐步增大,急需研究故障诊断技术。我国新平台、新型号卫星不断



增多,使用新技术、新部件也变得更加复杂,导致在轨发生故障的概率增大、保障卫星在轨安全可靠和长寿命运行的技术难度也进一步加大。例如,采用集成度更高的综合电子技术,会使卫星在轨故障强耦合、难分离;带有大幅度频繁姿态机动的卫星“敏捷”技术应用,增大故障概率等。

三是卫星设计寿命不断延长,使卫星达到设计寿命难度加大,急需突破故障诊断技术。随着我国卫星设计技术的进步,对在轨高可靠、长寿命运行要求越来越高,对卫星在轨故障诊断技术的要求也越来越高。

1.2 卫星在轨故障基本情况与特点

1.2.1 故障总体情况

1. 国外航天器故障情况

国外航天器在轨发生的故障不胜枚举,下面给出一些示例。

2000年11月10日,由于星载计算机软件发生故障,导致美国国家航空航天局(NASA)的两个价值高昂的火星探测器失效。

2003年10月,美国 Landsat 7 卫星主传感器失灵。

2003年12月,“亚洲”二号卫星姿态异常,星上 C 波段和 Ku 波段转发信号中断。

2004年2月25日,“机遇”号火星探测车电源系统供应系统发生故障,对火星探测车寿命构成严重威胁。

2005年1月10日,太阳耀斑产生的高能粒子,使美国 NASA 的科技卫星 ACE 与 NOAA 的气象卫星 GEOS 中部分观测设备无法正常使用,日本的 KDDI 通信卫星和 JSAT 的通信卫星也因此发生故障。

2005年11月28日,美国 Landsat 5 卫星备份太阳能电池驱动器出现故障,导致太阳能帆板无法给卫星电池提供足够的能源供给。

2006年5月,NASA 公布了一份有关耗资为 1.1 亿美元的 DART 空间探测器与 MUBLCOM 空间探测器由两探测器制导系统程序故障导致的碰撞事故。

2. 国内卫星故障情况

一是卫星发生在轨故障现象较普遍,但大部分故障得到排除。在统计的 68 颗卫星中,有 55 颗卫星发生过状态异常或故障,卫星发生故障的比例为 80.9%。发生故障总数为 324 个,故障总次数约为 600 次,平均每颗卫星发生在

轨故障约 4.8 个、8.8 次。在 324 个在轨故障处理中,从维持卫星系统功能角度看,约有 203 个故障成功排除(占 62.7%),约有 99 个故障未彻底排除。这反映了我国卫星在轨故障的排除率较高,其主要原因是卫星在轨故障大部分为可修复的一般故障,卫星系统的很多关键分系统均采取了冗余备份措施,软件类故障可以通过地面进行维护处理。

二是卫星控制、电源分系统故障高发。控制分系统故障率最高,依次分别是测控分系统和电源分系统,三者合计占平台故障总数的 83.4%。导致这一现象的主要原因:系统结构相对复杂,技术要求高;系统有长时间或频繁开关机的工作要求,对器件的失效、损坏有一种助推作用,且控制分系统的活动部件相对较多,从而故障发生概率较大;系统易受空间环境干扰,控制、测控分系统电子化程度相对较高,易受空间环境的电磁干扰,控制分系统的敏感器较多,易受空间环境的光学干扰。

1.2.2 故障类型

故障类型包括输入类、控制类、输出类。

表征故障的要素包括故障类型、故障名称、等级、平台、系列、卫星、分系统、部件、常驻标记、波及影响、特征参数及变化、发生时间、发现时间、处置结束时间、星上模式、地面操控、对应的空间环境等。

按照故障对卫星应用效能产生的影响程度不同,将故障危害度定为“致命、严重、一般”三级。致命故障:故障不能排除,造成卫星完全失效,无法工作。严重故障:故障造成卫星部分功能失效,或性能下降,或可靠性降低,或卫星工作寿命未达到设计指标,或同一故障反复多次出现。一般故障:除致命和严重故障外的所有故障。

依据故障发生的机理,可将故障分为以下三类:

(1) 能源:供给系统正常运行的能量,正常情况下,应稳定在一定阈值内或以一定规律发生变化,若能源的供给不足或不稳定,则将引起系统或设备工作不正常。该类故障称为能源类故障。

(2) 控制:正常情况下,在特定的工作模式下,系统或设备运行的逻辑应是确定的。即输入信息的变化引起输出信息变化的逻辑与工作模式相关,工作模式确定时,控制逻辑应是确定的,若控制逻辑出现偏差或异常,则会引发非预期的输出,例如控制失效或错乱,机械装置控制异常等。该类故障称为控制类故障。

(3) 传输:设备内、设备间、系统间存在信息和能源的传输,当传输出现异常时,会引发故障。例如供电设备输出正常,用电设备无输入;又如控制逻辑不



能收到输入信息等。这些因能量或信息的传输异常而引发的故障称为传输类故障。

1.2.3 卫星在轨故障诊断特点

与地面设备不同,卫星在轨诊断维修具有看不见、摸不着、高时效、高可靠等特点。

卫星在轨故障表现特点:突发/渐变故障、确定性/不确定性故障、未知/已知故障。

技术方法特点:卫星在轨运行的环境远比地面工业系统复杂,只能借助遥测、遥控、遥操作等手段进行检测维修,并且不能“停机待修”难以套用工业或化工过程等其他领域的故障诊断成熟技术。

卫星在轨故障诊断特点:不同数据来源;信息不完备;不同故障模型建立;诊断知识获取与挖掘不同方法;多种诊断推理;结果的不确定性和概率。

1.3 国外研究现状

卫星在轨故障诊断技术研究对于保障卫星在轨安全可靠运行至关重要,与之相关的技术与方法越来越受到国内外航天领域的重视。

以美国为代表的航天大国在重视卫星设计和研制质量的同时,大力开展了卫星在轨故障诊断与预测研究,取得了丰富的研究结果,部分成果已成功应用于卫星在轨管理中,使卫星在轨安全可靠和长寿命运行能力大为增强。

美国国家航空航天局在其早期航天任务中强调,在航天器上使用高可靠性部件避免航天器在轨发生故障,由部件供货商负责航天器全寿命周期保障服务的思想;同时强调完善星上功能软件和提高星上软件质量来保障航天器的高可靠性。由于航天器在轨运行过程中不断发生故障,特别是重大故障频发,NASA 逐步重视航天器在轨故障演变规律分析和诊断、预测技术研究,出现了许多新原理、新方法。并且,研究成果已不同程度地应用于航天器在轨运行管理中,有力地支持了航天器的安全可靠运行,提高了航天器的空间生存能力。

NASA 等机构一直非常重视航天器故障诊断技术。20 世纪 80 年代前后,美国在其双子座、阿波罗、天空实验室以及哈勃太空望远镜等航天工程中,曾

采用状态监测和基于算法的故障诊断。NASA 约翰逊航天中心 CLIPS 专家系统推出以来,在全世界范围内得到了广泛的应用和发展。随着航天领域中可靠性和维修工程越来越受到重视,迫切需要在地面利用故障诊断和维修专家系统来保障在轨卫星的安全,已有系统包括航天器故障诊断专家系统(ATFDES)和地面实时故障诊断专家系统等。

在航天飞机项目中,研究人员利用人工智能开发工具 KEE 和 G2 开发了一个实时的故障诊断系统,航天飞机主发动机涡轮泵故障诊断专家系统(SEES),对航天飞机的主发动机状态进行了检测和诊断,它除利用传感器信息外,还利用了历史和工程的知识库。另外,还有学者利用神经网络技术模拟航天器主发动机的非线性和复杂性,设计了航天飞机主发动机基于模型的故障检测和诊断系统。

在国际空间站项目中,NASA 为提高地面人员的航天器故障管理能力,使用了先进的故障管理技术。已开发了相应的原型系统包括诊断推理系统和恢复专家系统。诊断推理系统能够诊断故障源和评价该故障对其他部件的影响。而恢复专家系统能够制定旨在排除故障的方案。其中诊断推理系统采用了人工智能技术(模式比较、符号推理和基于模型的推理)。

在“深空一号”探测项目中,NASA 首先采用了基于模型的故障诊断和系统重置结构分析工具 Livingstone。Livingstone 是由 NASA 的 JPL 开发的一套能够实现故障诊断与系统重构的软件平台,这个版本的 Livingstone 称为 L1。L1 主要由两部分组成,即状态识别(MI)和系统重构(MR)如图 1-1 所示。其中,状态识别主要完成故障诊断,模式重构主要完成故障处理。L1 有三个显著的技术特点:①为了支持基于模型的诊断,不管被检测对象执行何种任务,每个部件始终只用一个模型表示,这样不管遇到何种情况,L1 均可以用一套算法处理;②结合使用离散定性描述和并行转移模型,L1 能够在形式上表示既有离散部分又有连续部分的软硬结合的系统;③结合使用冲突指向搜索算法和快速命题推理,L1 消除了人工智能中演绎和反推之间的矛盾,实现快速的搜索和推理。

在 L1 的基础上,NASA 又提出了第二代 Livingstone(L2)。对每种故障,L1 只能给出一个可能的诊断解,而 L2 却可以给出多个故障诊断解,并依据它们发生的概率大小进行排序。L2 还具有时间持续性,也就是依据新的观测的发生,L2 会不断地修改其诊断解。L1 只能当系统停止后,才能进行故障检测;而 L2 在系统变化时也可以进行故障检测。L2 应用于美国 EO-1 卫星,在地面试验中 L2 成功地诊断出 EO-1 卫星 17 种故障场景中的 16 种,只有 1 种没有检测出来,说明该诊断系统还是比较成功的。