

# 基于知识的卫星故障诊断与预测方法

杨天社, 杨开忠, 李怀祖

(西安交通大学, 西安 710043)

**[摘要]** 卫星结构的复杂性、运行环境的独特性和诱发故障的多源性, 使得卫星故障的诊断与预测较一般设备困难。通常, 一种形式的推理只能诊断和预测卫星的一类故障。文章提出了同时应用多种形式推理进行卫星故障诊断和预测的新方法, 此方法已成功地应用于基于知识的卫星故障诊断与恢复系统的开发, 并取得了显著的效果。

**[关键词]** 卫星; 故障; 诊断; 预测; 多形式推理

**[中图分类号]** TP18; V474.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)06-0063-05

## 1 概述

笔者研究用多形式推理进行卫星故障诊断和趋势预测方法。此方法能使卫星故障诊断与预测更加准确、全面和自动化, 改善在轨卫星的管理, 增加在轨卫星的有效应用时间。卫星故障诊断与趋势预测通常是一项耗时、重复和劳动强度很大的工作。目前, 在大部分情况下, 卫星管理人员采用手工检查卫星遥测数据的方式来确定卫星是处于健康状态还是故障状态, 以及卫星是否存在危险的趋势, 以预测卫星是否在不久的将来处于故障状态。应用的具体方法或者是一些统计学估计方法, 或者是通过比较卫星遥测参数的实测值与期望值之间的差异方法。这些方法存在严重的缺陷, 主要是过分依赖人工经验以及难以实现故障诊断与预测的自动推理<sup>[1~3]</sup>。建立基于知识的卫星故障诊断与恢复系统(KSFDRS)的目的之一, 是通过应用多形式推理来提高卫星故障诊断与趋势预测的效率、准确性和可靠性, 降低卫星管理人员的劳动强度。该系统综合应用规则推理、模型推理和案例推理方法进行卫星故障诊断与趋势预测。具体方法是通过检查航天测控系统接收到的卫星遥测数据, 建立与之有关

的数学描述, 应用从遥测数据中导出的信息和模型, 来实现卫星及其部件状况的自动推理, 进而实现卫星故障诊断和危险趋势预测的自动化。若发现卫星存在故障和危险趋势, 还可自动产生故障恢复或避免危险趋势进一步恶化的预防措施(控制命令序列), 或提醒卫星管理人员注意卫星的运行状况。

卫星故障诊断与趋势预测或许可基于卫星绕地球运行一圈的数据, 但在多数情况下, 要基于较长期的数据, 如数圈、数天、数月甚至卫星寿命期数年的数据<sup>[4]</sup>。

在KSFDRS运行中, 先应用基于规则库中的规则进行故障诊断和趋势预测推理, 对于那些无法使用基于规则的推理方法诊断的故障和预测的趋势, 则应用基于模型的推理方法。对于新的故障, 则应用基于案例的推理方法进行诊断。应用规则推理方法进行故障诊断时, 系统中基于规则的推理模块根据规则库中的诊断与恢复规则自动给出诊断结果, 生成用于故障恢复的可自动执行的命令序列或提醒卫星管理人员注意卫星的运行情况。应用模型推理方法进行故障诊断时, 系统中基于模型的推理模块对卫星遥测数据与相关模型进行比较, 根据模型库自动给出诊断结果; 同基于规则的推理模块一

样，产生用于故障恢复的可执行的命令序列或提醒卫星管理人员注意卫星的运行情况，在此过程中可能需要人工干预。应用案例推理方法进行故障诊断和趋势预测时，系统中基于案例的推理模块在案例库中寻找与该故障和趋势相似的案例。如果存在相似的案例，则给出供参考的故障诊断结果，以及应用于故障恢复、避免危险趋势进一步恶化的命令序列；若找不到相似的案例，则应提醒卫星管理人员进行综合分析。一旦解决了新故障的诊断问题，就要根据实际诊断情况更新规则库和模型库，并把描述该故障及诊断方法的新案例添加到案例库中。

KSFDRS的具体运作过程为：根据获取的航天测控系统测量数据，应用基于知识的多形式推理进行故障诊断和趋势预测，输出相关结果，如图1所示。

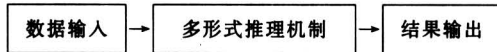


图1 KSFDRS基本运作过程

Fig.1 Basic operating process of KSFDRS

KSFDRS中用于卫星故障诊断与趋势预测的两种知识源为：a. 专家知识；b. 从卫星历史事件或数据中导出的知识。

专家知识主要用于故障诊断与趋势预测过程中的诊断规则、状态模型、期望状态和基本概率知识的初始设计。KSFDRS的一个重要目标是在实时运作中拥有足够的自学习能力，以获取更多知识的同时自动更新其相关库<sup>[5]</sup>。

从卫星历史事件或数据中导出的知识，在KSFDRS中被设计为一系列故障案例和危险趋势案例，案例的数据结构中必须包括故障和危险趋势的恢复方法及其执行结果，不论这些方法的执行结果是成功还是失败。

在开发KSFDRS系统时，建立案例库存在的一个主要障碍是现有的知识一般不能直接形式化。解决此问题的主要途径是借助专家的指导。但即使是专家的知识，有时也缺乏标准的数学表述，或者难以用数学方法表述，这也增加了建立案例库的难度<sup>[6,7]</sup>。所以，建立KSFDRS的主要步骤是提出一个标准的表述方法，以便使获得的知识形式化，并保持各种知识的精确和一致。

## 2 KSFDRS多形式推理机制

KSFDRS的多形式推理原理如图2所示。

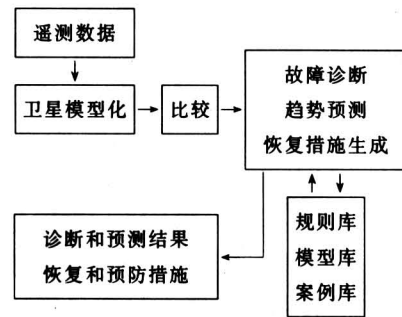


图2 KSFDRS推理原理

Fig.2 KSFDRS reasoning principle

### 2.1 卫星模型化

在卫星模型化推理过程中，生成故障诊断和趋势预测期间卫星与反映卫星所处模式的遥测数据的期望状态。

在卫星模型化的过程中，遥测数据值以组的形式表示，并按层次排列，以表示部件、分系统或整星的状态。例如，在卫星姿态控制分系统（ACS）中，最底层的红外地球敏感器头部的状态可以表示为若干遥测参数值（电机电流、电机温度、地球辐射强度等）。上一级的红外地球敏感器（IRES）的状态可以表示为“头部状态”和“电路状态”的组合，每一个部件都有属于它自己的参数特征。再上一级的姿态控制分系统的状态可以由各种组成部件，如红外地球敏感器（IRES）、陀螺（Gyro）、数字太阳敏感器（DSS）、模拟太阳敏感器（ASS）、动量轮（MW）和磁力矩器（MT）等的状态定义。最高层为整星状态，可以由卫星的所有分系统，如姿态控制分系统（ACS）、星上数据管理分系统（OBDH）、测控分系统（TT&C）、电源分系统（PSS）及各种应用分系统等等的状态定义。通过模型化过程，卫星各部件、分系统或整星的状态能够根据遥测参数进行实时评估<sup>[8,9]</sup>。卫星的模型化过程如图3所示。

在部件和分系统的物理模型中，遥测参数值指物理部件或分系统的状态。例如，红外地球敏感器的电机电流、电机温度和地球红外信号辐射强度等参数值表示红外地球敏感器的状态，测控应答机（接收机和发射机）的电流和电压等参数值表示测控分系统的状态。卫星的正常和异常状态都可以被模型化<sup>[10]</sup>。例如，若红外地球敏感器故障、陀螺故障、动量轮故障和磁力矩器故障都可能导致卫星姿态控制分系统状态异常，则

$$(Failure)_{ACS} = \bigcup_{j=1}^4 (Failure)_{Part-j},$$

其中部件 (Part) 的含义为: Part - 1 表示 IRES, Part - 2 表示 Gyro, Part - 3 表示 MW, Part - 4 表示 MT。

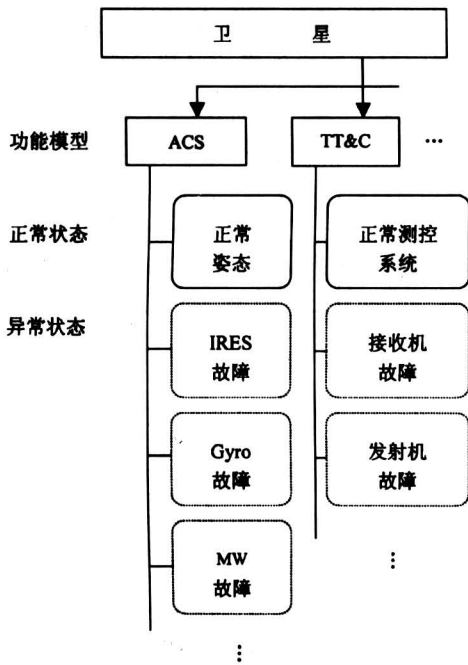


图 3 卫星模型化原理

Fig.3 Satellite modeling principle

如果遇到一个故障状态, KSFDRS 系统即产生一组相应故障的恢复措施, 执行这些措施可使卫星姿态控制分系统从异常状态恢复到正常状态。如果遇到一个危险趋势, KSFDRS 系统即产生一组排除该危险趋势的措施, 执行这些措施可使卫星姿态控制分系统排除危险趋势, 或避免危险趋势进一步恶化, 以尽可能不影响卫星其他操作, 在卫星可观测弧段允许的条件下, 尽快排除危险趋势。

故障恢复和危险趋势预防措施或者自动被执行, 或者作为一个建议, 供卫星管理人员参考。

2.2 比较

比较推理是把航天测控系统接收到的卫星遥测参数实测状态与卫星模型期望状态和遥测参数的期望值进行比较, 找出两者之间的差异, 并给出这些差异的数学描述。

2.3 故障诊断和趋势预测及恢复措施生成

该功能获取比较功能的输出, 确定故障或危险趋势是否存在。若发现了一个故障或危险趋势, 则根据规则库、模型库和案例库确定一系列假设。仿

真器中的仿真模型验证这些按可能性大小排列的假设, 并验证确定这些假设的方法。假设确定后, 即生成故障或危险趋势的恢复措施。在此过程中, 历史经验和数据可能是很有帮助的。

预测卫星遥测数据中是否存在危险趋势有若干种方法, 然而, 没有任何一种单一的方法适合于所有类型的数据, 因此必须彻底分析每类数据的特性, 针对每种数据选择一种合适的预测方法。还应意识到, 能引起未来失效的危险趋势可能难以发现, 因为这些危险趋势可能会以不同形式被隐藏起来, 如逐渐偏离门限值 (渐变)、噪声突变等<sup>[11,12]</sup>。

故障诊断和趋势预测过程可实时进行。

3 KSFDRS 故障诊断推理过程

KSFDRS 故障诊断推理的基本过程是:

1) 对于熟悉的故障, 由基于规则的推理方法处理。若诊断出的故障属于可以用执行自主恢复措施排除的, 则基于规则推理产生的命令序列即被自动执行。

2) 对于知识不完整 (如数据不完整、参数不完整、信息不完整等) 的故障, 由基于模型的推理方法处理。

3) 基于案例的推理可以改善 KSFDRS 的故障诊断与恢复的性能。在 KSFDRS 中, 有用的信息 (如分系统和部件的描述、故障症状、故障原因、故障恢复措施以及恢复措施的执行结果等) 存储于一系列案例中。

故障案例数据结构为:

- 故障名称
- { 分系统和部件的描述;
- 故障症状变量集;
- 故障日期和时间;
- 故障原因;
- 故障恢复措施 (命令序列);
- 恢复措施执行结果;
- 必要的说明。}

危险趋势案例数据结构为:

- 危险趋势名称
- { 分系统和部件的描述;
- 危险趋势症状变量集;
- 发生日期和时间;
- 发生原因;

可能导致的故障  
 建议的预防措施（命令序列）；  
 预防措施是否实际执行；  
 措施的执行结果；  
 必要的说明。}

4) 对于无法预见的故障或危险趋势，且用基于规则、模型和案例推理无法处理时，则需要进行人工干预。

KSFDRS 诊断推理由“假设确定”和“恢复措施确定”两部分组成：

a. 假设确定。假设确定寻找可以根据故障部件解释故障的假设，或寻找可以根据将要失效的部件解释危险趋势的假设，直到“假设确定”的输出状态与实际故障、危险趋势匹配时，这些部件方能最后确定。

b. 恢复措施确定。“恢复措施确定”通过调整故障模型中部件的操作模式寻找给定假设的解决方法（恢复措施），直到达到期望的输出状态。

基于模型的推理过程如图 4 所示。

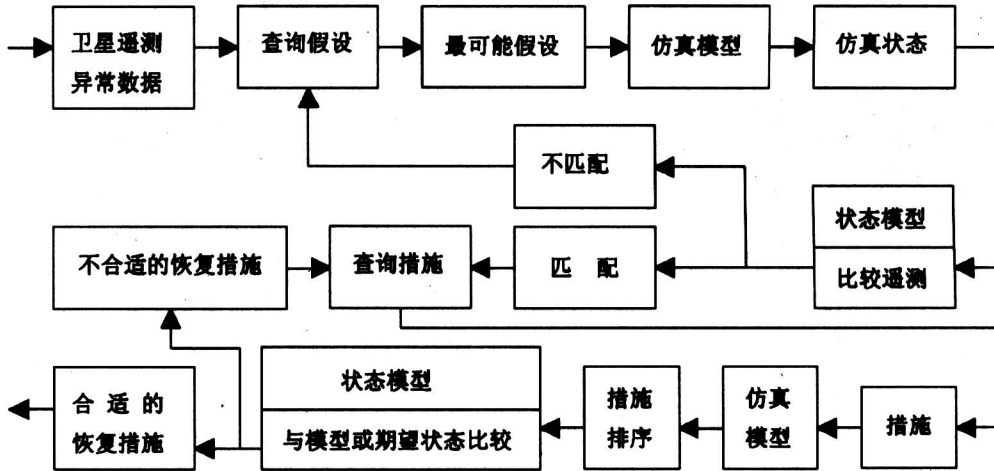


图 4 基于模型的推理过程

Fig.4 Model-based reasoning process

#### 4 结论

笔者提出了一种应用多形式推理进行卫星故障诊断和趋势预测的新方法，实践证明它是一种非常有效的方法。根据笔者研究和开发 KSFDRS 的实践，得出以下结论：

1) 对于卫星的不同故障类型和危险趋势，需要应用不同的推理方法进行诊断。只有这样，才能使卫星故障诊断和危险趋势预测更加准确、有效。

2) 在应用多形式推理方法进行卫星故障诊断和危险趋势预测中，相关知识的形式化描述是其中的一个难点，这也是专家系统中研究的一个热点问题，它直接影响着推理的自动化。

3) 建立正确、合理的规则库、模型库和案例库是应用多形式进行卫星故障诊断和危险趋势预测的关键。

#### 参考文献

[1] 吴德安. 卫星姿态控制系统自主故障诊断与重构 [J]. 上海航天, 2001, (1): 39~43

[2] 徐敏, 黄少毅. 设备故障诊断手册 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998

[3] Breed J. Spacecraft emergency response system for autonomous mission operation [A]. NASA Goddard Space Flight Center [M]. 2001

[4] Teo C Y. Application of knowledge-based system for fault diagnosis and supply restoration [J]. Engineering Application, 1997, (6): 631~638

[5] Studer R. Principle and methods, data & knowledge engineering [A]. Knowledge Engineering [C]. 1998. 161~197

[6] 陈玮. 飞行器故障诊断专家系统中的知识获取机制 [J]. 上海交通大学学报, 2000, (6): 845~847

[7] 杨大明. 空间飞行器姿态控制系统 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001

[8] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学和控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998

- [9] 范显峰. 基于模型的卫星热控系统故障诊断技术研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, (3): 318~320
- [10] 谢涛. 基于集合-覆盖模型的液体火箭发动机多故障诊断研究 [J]. 宇航学报, 2000, (1): 47~54
- [11] Truszkowski W. Multi-agent planning and scheduling environment for enhanced spacecraft autonomy [A]. NASA Goddard Space Flight Center [M]. 2000
- [12] Vedam H. Signed digraph based multiple fault diagnosis [A]. Computer & Chemical Engineering [C]. 1997. 655~660

## Research on Knowledge-based Method for Satellite Fault Diagnosis and Prediction

Yang Tianshe, Yang Kaizhong, Li Huaizu  
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China)

[Abstract] The fault diagnosis and prediction of satellites is a difficult problem due to the complex structure and the unique of operating environment of satellites as well as the presence of multi-source of satellite faults. Usually, one kind of reasoning model can only diagnose and predict one kind of satellite faults. This paper proposes a new method in which the use of multi-modal reasoning for satellite fault diagnosis and prediction is concerned. The method has been used in the development of the knowledge-based satellite fault diagnosis and recovery system and good results have been achieved.

[Key words] satellite; fault; diagnosis; prediction; multi-modal reasoning

## 高峡出平湖

〔本刊讯〕随着导流底孔和泄洪深孔按计划徐徐关闭，三峡工程于 2003 年 6 月 1 日正式下闸蓄水了。毛泽东主席“高峡出平湖”的蓝图正在变为现实。以蓄水、通航、发电为目标的三峡二期工程即将取得全面胜利。

三峡库区 135 m 水位线下移民迁建及库底清理工作已全面完成。截至 2003 年 4 月底，135 m 水位线人口、实物已全部迁出；135 m 水位线下库底清理任务已按规定全部完成。

国务院长江三峡二期工程验收委员会枢纽验收组、移民工程验收组高度评价三峡工程建设，并一次性通过对验收项目的验收。温家宝总理在国务院三峡工程建设委员会第 12 次全体会议上，充分肯定了三峡工程建设取得的成绩。他说，在党中央、国务院领导下，这些成就是全国人民和各个方面大力支持的结果，也是广大三峡工程建设者艰苦奋斗、库区移民群众勇于奉献的结果。

按三峡工程蓄水计划，6 月 15 日前，水库水位要达到 135 m，回水将抵达 490 余公里处的涪陵清溪场，西陵峡江段的水深将增加 60 m，巫峡江段水深将增加 55 m，瞿塘峡江段可增加 50 m。江面拓宽、水深增大，这会有力改善长江通航条件。

国务院三峡建设委员会副主任、三峡总公司总经理陆佑楣在接受记者采访时称，三峡工程按期蓄水是三峡工程建设史上具有里程碑意义的重大事件，它标志着三峡工程即将从单一的建设转入建设与发挥效益并重的阶段，三峡工程即将进入收获期。