

空间运输航天器故障诊断系统架构研究

高家一, 吴义田, 徐文彬, 陈海鹏

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 故障诊断技术不仅是提高空间运输航天器的安全性和可靠性的重要手段, 而且可以节约航天器整个寿命周期的运行维护成本, 因此研究航天器故障诊断技术, 特别是处理紧急故障的在轨故障检测和诊断技术是非常必要的; 在分析国外航天器故障诊断系统发展趋势的基础上, 提出了基于天地一体化设计思想的空间运输航天器故障诊断系统架构, 阐明了设计原则, 以及具体功能需求; 介绍了在轨故障诊断系统和地面故障诊断系统, 提出了地面故障诊断系统软件的组件模型构成; 地面系统对航天器在轨故障诊断有较强的辅助作用, 能有效补充故障分析、诊断、预测、处理能力; 给出的系统架构对航天器故障诊断系统研制具有一定的参考价值。

关键词: 空间运输; 故障诊断; 航天器

Research of Space Transfer Vehicle Failure Diagnosis System Structure

Gao Jiayi, Wu Yitian, Xu Wenbin, Chen Haipeng

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The failure diagnosis technology is not only an important method to enhance the safety and reliability of spacecrafts, but a process to save the maintenance cost during the whole working period of spacecrafts. Thus, it is very significant to investigate the spacecraft failure diagnosis technology, especially the orbit checking and diagnosis technology for the emergent failure treatment. Base on the development of international space transfer vehicle failure diagnosis technology, which produces the integrated design idea of orbit and earth space transportation spacecraft failure diagnosis system structure, expounds the design principle, as well as the specific functional requirements. It introduces the on-board failure diagnosis system and ground failure diagnosis system, whose software component model is proposed. Ground failure diagnosis system is an important role in failure diagnosis on orbit, it can effectively complement the failure analysis, diagnosis, prediction, processing capacity. The system structure has certain reference value to the development of failure diagnosis system for spacecraft.

Keywords: space transfer; failure diagnosis; spacecrafts

0 引言

随着航天技术的不断发展, 空间运输航天器作为新的分支逐渐发展成型, 其有别与普通运载火箭, 它在释放主要有效载荷后还能短期或者长时间留轨作业, 进行其它任务。例如某类火箭上面级、可重复使用运载器 (RLV)、航天飞机等航天工具都可归入此类。空间运输航天器的技术组成较复杂, 留轨期间面对复杂恶劣的空间环境, 其各部分功能模块的可靠性和稳定性, 是完成空间任务的基本保障。

故障诊断技术不仅是提高空间运输航天器的安全性和可靠性的重要手段, 而且可以节约航天器整个寿命周期的运行维护成本, 因此研究航天器故障诊断技术, 特别是处理紧急故障的在轨故障检测和诊断技术是非常必要的。在航天器的设计中更多地采用自主控制技术, 使其具备较强的故障诊断、隔离和系统重构能力, 是发展“高精度、高可靠性、长寿命”航天器, 实现航天器智能自主控制的关键技术之一^[2]。

随着数字化、智能化技术的应用, 天地间数据高速通道的建立, 在轨航天器上的主要数据都能被地面监测设备获取, 借助地面系统强大的计算机软硬件能力, 通过提高处理、分析、预测的广度和深度, 是拓展故障诊断技术的有效可行途径。本

文对航天器故障诊断技术进行分析, 提出了空间运输航天器故障诊断系统架构, 以期对后续空间运输系统研制提供帮助。

1 国内外研究现状及发展趋势

航天器故障诊断技术的发展始于 20 世纪 60 年代, 美国、俄罗斯和西欧等航天大国在这方面作了大量的研究工作, 取得了令人瞩目的研究成果。从 20 世纪 60 年代到 80 年代初期, 美国主要采用状态监测和基于算法的故障诊断。Rice, Amanda B 开发了实时遥测专家系统原型, 采用基于模型的推理技术。在航天飞机方面, ROGERS, JOHN S 等人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。GUO, TEN-HUEI 提出了一个基于模型和专家系统结合的故障诊断演示系统, 用来进行航天飞机主发动机涡轮泵气封泄漏故障。20 世纪 90 年代出现了大量运用机器学习进行航天故障诊断的研究应用, 故障诊断技术应用于航天器的安全管理进入一个高潮期。

新世纪, Garbos-Sanders, Ray 提出了可重复使用运载器 (RLV) 系统健康管理 (SHM) 的基本要求, 以及演示样机 X-33 的健康管理系统和地面健康管理系统的体系结构和分布式光学传感器技术。Puettmann, Norbert 分析了未来的可重复使用运载器关键技术, 这些技术将在 X-38 任务中得以验证, 其中很重要的一条就是健康监测系统。

国内航天器故障诊断技术研究起步较晚, 国内已有的系统有: 火箭故障诊断专家系统、发动机试车专家系统、导弹故障

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-04-15。

作者简介: 高家一 (1971-), 男, 天津静海人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭总体设计方向的研究。

诊断系统、卫星控制系统故障诊断专家系统等。但国内所开发的大部分故障诊断系统还属于实验型,距离实用化阶段还有许多工作要做,且主要是以地面诊断为主。^[5]

目前国外航天器健康管理技术的发展趋势是:

1) 加强在轨健康管理系统的健康评估、故障预测和诊断、自动维护等功能,提高应变能力。例如美国的 X-34 考核了检测衰变部件性能的诊断算法,考核了健康检测系统实时故障检测、隔离和恢复功能。

2) 加强航天器关键部件性能的检测,采用先进的传感器和高集成度的器件,实现小型化,重量轻,低功耗;提高分布式采集管理和数据的实时处理能力,例如美国的 X-33 验证了支持快速起飞后的地面维护和传感器布局的有效性。

3) 加强自主化处理,减少操作者的过失,实现功能部件的单元化;提高可靠性的鲁棒程度,例如美国的 X-37 考核了机电执行器的性能。

4) 通过在轨系统与地面管理系统的协同增加冗余度,例如美国的深空 1 号探测器使用了 IVHM 自动导航遥控技术实现了自动导航操作,演示地面站的应用。

5) 建立故障诊断系统开发平台。如: NASA 研制的 Livingstone 开发平台,该平台已经成功的在 Deep Space 1、X-37、EO1 等航天器中作为新技术验证得到了应用。

2 航天器故障诊断系统方案设计

空间运输航天器故障分为突变故障和缓变故障,从影响空间运输航天器可靠性因素的角度,相对缓变的故障是直接影响和决定大多数长期在轨航天器寿命的主要因素之一。而这些故障在发生前绝大多数是可预兆的,一方面可以通过在轨健康自主系统发现、报警和隔离;另一方面,通过地面遥测数据的分析预示,也可以向地面专家提供预诊断、决策支持信息。最大限度地延缓和消除故障带来的系统及影响,保障航天器在轨长寿命运行。

因此,综合采用在轨状态数据分析诊断处理技术和地面基于遥测数据的趋势分析与预测技术,及时准确地发现缓变故障的发生和发展趋势,在轨及时诊断和隔离已发生故障单元,使其对系统影响降到最低,最大限度地减缓和避免预诊断故障的发生,将对保障空间运输航天器可靠运行具有重要现实意义。

基于天地一体化的设计思想,结合传统航天器故障诊断与故障处理方法,提出以下几点空间运输航天器故障诊断与故障隔离系统的设计思想:

1) 故障诊断与故障隔离系统采用天地一体化的设计思想,对于突发故障主要由天上系统进行处理,地面系统实时监测在轨系统的状态,对在轨系统的状态及其发展趋势进行判断,最大限度地延缓和消除故障带来的系统及影响;

2) 根据目前技术情况,在轨软件主要采用原各分系统根据故障模式分析使用的故障处理方式,但是设计一套与其并行的在轨智能故障诊断系统,它的作用一方面在系统设计阶段,对各分系统提出的故障模式进行并行检验,同时也可以检验原故障模式的完备性,为今后该项技术的应用创造条件;

3) 地面故障诊断系统采用基于人工智能技术的故障诊断方法,既具备根据在轨数据对在轨系统进行状态评价和趋势分析的功能,也能够配合地面模拟系统,对在轨故障进行模拟和

诊断,这样有助于对在轨疑难故障的诊断和处理;

4) 注重发挥设计过程中故障诊断技术的应用,在设计阶段利用智能诊断技术对故障模式分析的完备性和准确性进行检验,同时根据检验结果,对测点的设置、故障模式等提出设计意见;

5) 对于系统具有冗余的功能模块,故障诊断系统只对状态进行判断,不参与冗余切换的控制,冗余切换根据分系统自动进行判断和切换。

2.1 故障诊断系统功能需求分析

空间运输航天器的健康状态是对系统、子系统和组件实现其设计功能的能力的一种描述。构成空间运输航天器的每一个元素可以描述为工作在正常范围内或超出正常范围,对超出正常工作范围的可以描述它的劣化程度。该项工作的目标是监测空间运输航天器及其组件的工作状态,当发生故障时,将其恢复到正常的系统状态,并使故障对系统的安全风险与飞行任务的影响最小化。该系统的主要功能如下。

2.1.1 故障诊断

采用多种智能诊断方法(如:基于模型、基于神经网络和基于规则的专家系统等方法),对空间运输航天器的复杂故障,尤其是并发耦合故障进行诊断,并且从系统级角度协调各分系统之间的关系,找出故障源和故障传播路径,进行故障定位。

2.1.2 故障预测

根据空间运输航天器的历史统计数据 and 经验,通过一定的模型预测空间运输航天器状态的发展趋势,及早发现和预报系统或部件的劣化趋势,采取必要的应对措施,避免故障的发生。故障预测比故障诊断更重要,该部分的最终目标是预测出将要发生的故障,而不是故障发生后再去诊断,当然故障预测比故障诊断更难实现。

2.1.3 状态评估

一旦发生故障,该系统需要立即就该故障对系统其它部分和飞行任务的影响进行全面评估,帮助决策人员确定故障隔离和修复方案,重新规划飞行任务,以降低故障的影响,尽量保证系统的安全和飞行任务的完成。

2.1.4 故障修复

空间运输航天器故障的修复工作一般是通过切换冗余部件,实现故障隔离,使系统功能全部恢复或部分恢复。空间运输航天器的故障修复工作是在轨进行,由于受空间限制,系统只能为关键部件提供冗余备份,因此应尽量实现自主修复,这就要求空间运输航天器系统部件在设计时就考虑自动切换和自主修复功能。

2.1.5 恢复验证

帮助验证故障修复的正确性。首先要记录所有原始故障现象,并证明修复后这些现象都消除了,另外还要通过系统级的测试确定故障修复过程没有引发其它问题。

设计空间运输航天器故障诊断系统的主要目的是提高空间运输航天器的可靠性和安全性,以保证飞行任务的完成。因此健康管理的主要任务是检测空间运输航天器及其组成部件的工作状态,及时发现和预测故障,及时将空间运输航天器恢复到正常状态,必要时进行系统重构或任务重规划,尽量减小由此引起的对飞行安全性和飞行任务的影响。

2.2 故障诊断系统体系结构框架

天地一体化故障诊断系统由在轨诊断系统和地面诊断系统两部分组成, 系统框架结构如图 1 所示。该系统的任务主要包括故障预测、诊断、评估、修复和验证等, 根据任务的性质和完成条件的要求, 在轨系统和地面系统分别承担不同的任务, 分工协作, 信息共享, 共同完成空间运输航天器的健康管理任务。空间运输航天器任务的分配主要包括以下几点:

- 1) 在轨健康管理主要负责对紧急故障进行实时自主诊断和自主修复;
- 2) 地面系统由于不受空间、资源和时间的限制, 可以在地面配备仿真系统、验证系统、对策系统和各分系统试验室, 并由人类专家参与诊断和决策, 因此可以对空间运输航天器进行更全面的健康管理;
- 3) 系统不仅考虑各分系统的故障诊断, 更注重从系统级角度协调各分系统之间的诊断功能与诊断结果, 对空间运输航天器整体健康状况进行评估;
- 4) 在轨系统和地面系统应及时进行信息交互: 在轨管理系统应将其检测结果和处理过程等信息传送到地面管理系统。地面管理系统应将故障处理指令上传给在轨管理系统。

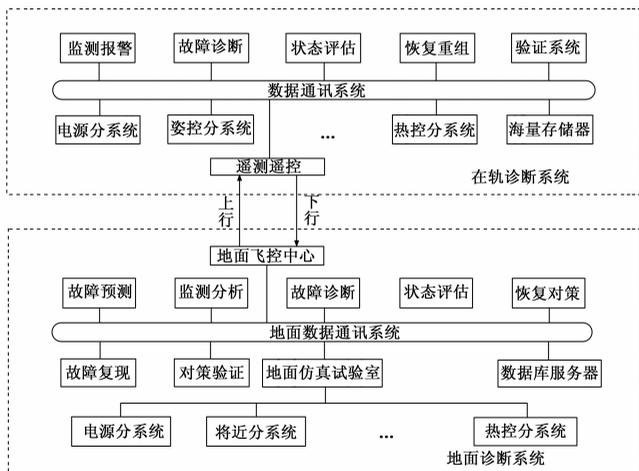


图 1 天地一体化故障诊断系统架构示意图

2.2.1 在轨故障诊断系统

在轨系统主要包括监测报警系统、故障诊断系统、状态评估系统、各分系统内置的诊断测试单元、维修和后勤支持系统等部分。在轨故障诊断系统是一个包含部件诊断、分系统诊断和系统级诊断的多层次结构, 这样可以保证检测和诊断的实时性。部件诊断模块可以包含在检测模块中, 因为许多部件都有内置测试系统。

在这样的分层次诊断系统中, 低层诊断系统向更高层的诊断系统提供经过分析和提炼的特征信息, 高层诊断系统通过低层诊断系统提供的故障特征进行综合分析, 确定整个系统的健康状态。在轨故障诊断系统的主要功能包括如下。

- 1) 传感器数据验证和融合: 对采集到的数据进行分析 and 特征提取, 检测传感器故障并进行自适应调整;
- 2) 单元自主检测: 各分系统或部件通过内置的诊断测试单元进行特征提取和部件健康变化的预报。提供部件健康和衰变的信息;
- 3) 故障定位: 从系统级角度综合分析各分系统或部件的

检测信息, 找出故障源和故障传播路径, 进行故障定位;

- 4) 自主恢复: 通过切换冗余部件, 实现故障隔离, 进行系统重构, 使系统功能全部恢复或部分恢复;
- 5) 恢复验证: 提供验证测试工具, 帮助宇航员验证故障修复的正确性;
- 6) 任务重新规划和调度: 根据系统状态的变化和自主恢复的需要, 重新进行任务规划和调度;
- 7) 实时响应执行: 根据健康状态管理系统发出的运载器状态信息, 执行诸如恢复和重构等命令。

2.2.2 地面故障诊断系统

故障地面诊断系统是地面技术支持系统的核心组成部份, 它的主要功能就是综合利用各种各样的有效信息, 准确、快速地对空间运输航天器的工作状态进行监测, 当有异常出现时, 通过系统中的已有知识推断出系统的故障状况, 准确地指明故障发生的时间、位置、严重程度以及其它有利于保证空间运输航天器健康的信息等。

地面故障诊断系统主要安装在地面飞行任务控制中心 (MCC) 的故障诊断计算机上, 空间运输航天器的所有信息 (包括传感器数据、在轨设备运行指令流以及在轨诊断系统的诊断结果) 通过遥测系统传输到地面的 MCC, 然后把这些信息经过处理后存在不同的数据库中 (关于系统健康的信息存放在故障诊断、维护数据库中)。地面健康管理从故障诊断数据库中读出下传的空间运输航天器状态信息, 并进行诊断推理, 其诊断结果可用作在轨诊断系统诊断结果的补充和校核。采用网络化技术, 移动终端可以访问和维护故障诊断数据库, 并且该数据库可以在飞行前后及其在轨时不断学习和改进。

飞行任务控制中心 MCC 的故障诊断系统核心功能软件都通过组件技术研发, 可包括如下系统: 支持或增强在轨系统的诊断系统、过程管理系统、地面分析系统、故障历史系统、预测系统、其它相关的报告系统, 如逻辑推理和维修状态。

组件化设计是软件工程中的一项先进技术, 通过功能模块组件化, 可以提高故障诊断系统软件的开发效率, 提高可维护性、可继承性。

图 2 为组件化的地面故障诊断系统框架。

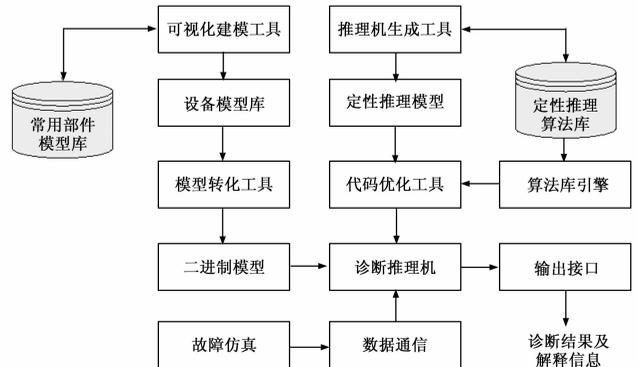


图 2 组件化的地面故障诊断系统框架

介绍几个主要模块组件:

常用部件模型库: 对可视化工具可调用的模型资源, 是系统常使用的部件级模型, 提高了复用性。

设备模型库: 对应航天器上配套设备, 形成特定的虚拟模型资源。

二进制模型：通过转换工具形成的推理机可调用的二进制模型组件。

诊断推理机：综合各类输入的信息资源进行逻辑推理，负责形成诊断结果。

定性推理算法库：按定性规则形成的推理逻辑算法，知识型资源。

故障仿真：可以仿真各类故障，形成故障用例产生激励，供诊断推理机参考。

MCC 的诊断系统可以用于评估空间运输航天器的健康状况。空间运输航天器的故障诊断可以分为在轨诊断系统和基于地面的诊断系统。紧急故障的诊断在轨完成，危急程度较低的故障在地面处理。在轨诊断的结果需要传送到地面，提供给 MCC 飞行控制人员和地面诊断系统。

3 结束语

故障诊断技术是空间运输航天器工程应用的关键技术，本文在分析国外航天器故障诊断系统发展的基础上，提出空间运输航天器故障诊断系统架构。虽然目前我国在卫星、空间站等

(上接第 54 页)

独立物理通道、6 独立逻辑通道的收发信号同时处理。模块支持扩跳频、非相干扩频、相干扩频、USB 测控等体制，可满足当前主流型号的测控测试需求。模块使用 PCIe 总线完成遥测数据、遥控数据原码与接口控制模块的交互，由接口控制模块进行数据帧协议解析。

2.4 数传存储功能实现

数传存储功能由存储模块、变频模块、数传信号处理模块 3 个模块共同完成，如图 4 所示。变频模块可提供 1 上、1 下两个变频通道，输入、输出信号点频可设置，信道带宽最大支持 1.5 GHz，可满足高速数传需求。

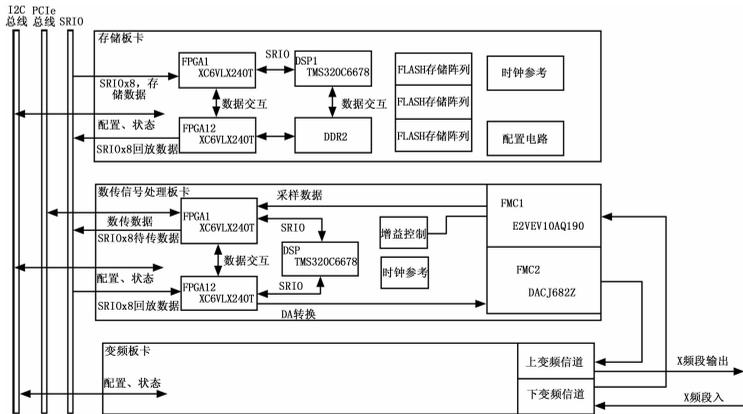


图 4 数传功能实现原理

数传信号处理模块采用双 FPGA + DSP 架构，携带两块 FMC 子卡，提供 1 路 2.5 Gbps 双通道采样精度 8 bit 的 ADC 芯片，以及 1 路 1000 Msps 采样率 16 bit DAC 芯片。可实现 2 物理通道的数传收发信号同时处理。模块支持 QPSK、OQPSK、16QAM、GMSK 等数传体制，可满足当前主流型号的数传测试需求。模块具备数传帧协议解析功能，使用 PCIe 总线完成数传数据与接口控制模块的交互。

存储模块支持数据存储与回放功能，采用双 FPGA + DSP 架构，携带 FLASH 存储阵列，最大存储容量 2 TB，具备外

故障诊断系统中已经有突出进步，并有天地一体化集成诊断系统实现运行。本文提出的架构和关键技术，也是一种技术参考，它清晰提出了空间运输航天器故障诊断系统功能构成，其结合地面诊断系统协调运行机制，可大幅提高故障诊断分析的有效性和准确性，但其涉及的诸多关键技术仍待深入研究。为了更好地推动故障诊断技术的应用，需要在实践中不断摸索和修正。

参考文献：

[1] 王 兵, 等. 实时监控与发射决策专家系统推理机设计 [J]. 系统仿真学报, 2003, 16 (5): 820-822.

[2] 邢 琰, 等. 航天器故障诊断冗余错控制技术综述 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (3): 221-226.

[3] 汪广洪. 航天器故障诊断技术发展综述 [J]. 航天飞行控制技术, 2014 (5): 9-14.

[4] 韩庆田, 等. 神经网络在发动机状态监控与故障诊断中的应用综述 [J]. 导弹与航天运载技术, 2004 (5): 23-29.

[5] Passani M, rindle A B. Automated Diagnosis of Attitude Control Anomalies [J]. Proc. of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Keystone, Colorado, February 1986: 255-262.

接磁盘阵列接口，利于存储容量拓展。

3 结构设计

综合处理设备结构上采用定制的可支持 6U 板卡 12 槽位机箱。风机设计于机箱右侧，对设备抽风散热，机箱两侧有通风孔，配合机箱内风道设计，保证模块和电源的散热。维修时，各模块可插拔，便于维护。机箱采用加固骨架与轻质外壳配合，两侧有提手底部安装橡胶减震撑脚，便于携带和移动。

4 试验结果与分析

综合处理设备经过 24 h 拷机测试，各通道模块性能指标均符合设计要求，接收遥测帧计数、数传帧计数连续，未发现丢帧现象。数传存储容量最大达到 1.8 TB，数据读取写入正常，无异常延时现象。设备经过 3 000 km 等效三级公路运输考核，运输测试后设备加电工作正常，抗力学环境满足要求；50 ℃ 高温试验连续工作 8 h，设备指标与常温无明显变化，各模块工作正常。

5 结论

基于 VPX 总线架构的测控通信综合测试系统，采用通用、模块化设计，由多块 6U 高性能处理模块组成了高性能计算机系统，同时采用风冷技术保证了计算机性能的实现。基于 VPX 总线架构的测控通信综合测试系统已经成功应用于某型号测控系统测试，在应用过程中性能稳定、效果良好。

参考文献：

[1] 郑东卫, 陈 矛, 罗丁利. VPX 总线技术规范及应用 [J]. 火控雷达技术. 2009, 12 (4), 73-77

[2] 富勒 (Fuller, S. (美)) 等著, 王 勇等译. Ra-pidIO 嵌入式系统互连 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[3] 包利民, 潘 奇. VPX 总线技术及其实现 [J]. 电子机械工程, 2012, 4 (2), 57-60.

[4] 廖兴文. 基于的数据处理平台方案 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.