柔性可靠性与故障诊断处理综合设计技术

赵廷弟 田 瑾

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 针对现代卫星高可靠、长寿命的要求,从卫星系统整体角度出发,根据卫星数字化系统/设备的特点,应用网格技术和多学科综合技术实现卫星内部、甚至卫星个体之间的柔性重组,提高卫星及星座的系统可靠性. 提出柔性可靠性技术、测试技术和故障诊断与处理的融合技术,将可靠性、测试性和故障诊断与处理的设计分析与产品功能/性能设计紧密结合,建立综合应用的设计分析模型,实现一体化设计,并尝试对此进行综合应用仿真,以达到卫星数字化系统/设备简单、经济和高可靠的目的.

关 键 词: 卫星; 故障分析; 柔性设计; 任务可靠性

中图分类号: TB 114.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1205-04

Integrated flexible reliability and fault diagnosis design technique

Zhao Tingdi Tian Jin

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to meet the demand that modern satellite be high-reliability and long-life, flexible restructuring was executed among the components insides atellite or among the satellites in a mission group, by means of grid and multi-disciplinary technology, based on characteristics of digitalized system or equipment of satellite and over-all properties of system. Thus system reliability of satellite or satellite group could be increased. A technique that integrates flexible reliability design, testing and fault diagnosis/recovery processing was put forward, and design & analysis to reliability, testability and fault diagnosis/recovery was combined with design to function/performance of products. The corresponding integrated design & analysis model was established, and simulation for application was carried on. Therefore, the digitalized system or equipment of satellite could be ensured simple-structured, low-cost and reliable.

Key words: satellites; fault analysis; flexible design; mission reliability

在卫星设计和制造过程中,器件与材料的可靠性提高是有限的,卫星设备的可靠性大幅度提高也是很困难的,因此要提高卫星系统的可靠性,不能仅仅是孤立地提高卫星各组成部分的可靠性,而是需要从整星或星座系统的角度考虑部件间或星间优化重组,从而提高任务可靠性. 然而,在目前卫星设计中,卫星结构设计与控制方法、控制系统设计一般是分开进行的[1-2],缺乏系统性的考虑;卫星的故障处理方式主要表现为部件、工作模式和工作参数的切换上,在轨故障诊断和重构大多数是基于硬件冗余[3-5],系统工程的重组冗余关系并没有得到充分利用.

基于以上考虑,本文从系统工程的角度出发,根据卫星这种复杂的系统的功能特性、任务可靠性和故障特性,从整星或星座系统的角度,建立起面向任务可靠性的柔性设计分析方法,即从卫星甚至星座的整体任务功能成功性出发,应用系统综合原理,利用信息技术(如数据链与总线技术)[6],基于网格技术[7]整合所有可利用资源,进行系统的柔性重组和(分时段/分区域)借用,总体优化实现卫星整体的高任务可靠性. 将柔性可靠性技术作为诊断处理的方式之一,测试诊断作

收稿日期: 2006-06-12

作者简介: 赵廷弟(1965-), 男, 陕西户县人, 教授, ztd@buaa.edu.cn.

为柔性可靠性决策重组的依据,可进一步实现面向卫星任务可靠性的尽可能简单的故障诊断与处理.

面向任务可靠性的柔性设计分析技术以及在此基础上建立的故障诊断处理方法的研究对于提高卫星系统资源的利用率,利用较少的硬件资源达到一定的任务可靠性要求提供了较为新颖和完善的研究理念和思路.

1 柔性可靠性及故障诊断综合模型

1.1 总体描述

可靠性设计、测试性设计与故障诊断及处理的分离处理是难以实现高可靠的,需要将其作为一个整体,综合优化,在卫星特性分析、任务可靠性模型和故障模式分析的基础上,开展柔性可靠性设计分析,并将柔性可靠性设计方案作为故障诊断与处理策略的设计依据,以及故障处理与系统恢复技术研究的必要输入,这样才能实现卫星的高使用可靠性. 如图1所示.

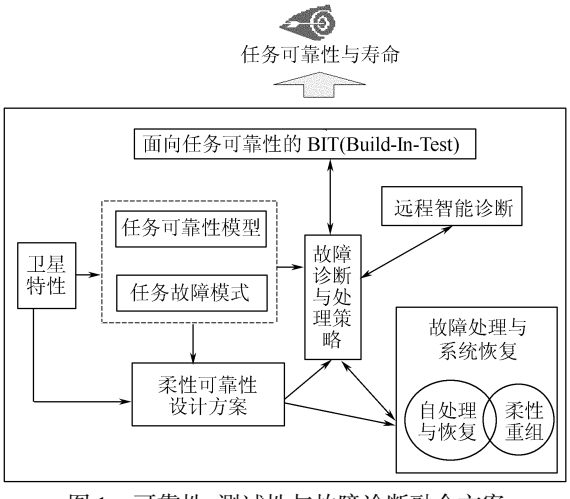


图1 可靠性、测试性与故障诊断融合方案

1) 卫星特性分析是柔性可靠性技术研究的一个关键前期工作,在分析型号存在的问题与需求的基础上,结合型号的特性,对产品和需求进行深入细致的了解,重点进行产品体系结构分析;功能/性能分析;任务过程分析;信息特性分析;软硬件特性分析,特别是总线与数据链分析等. 通过卫星特性分析,确定其功能/关键功能、信息/关键信息与信息处理的模式、任务过程模式、软硬件任务界面等,获得使用过程中软硬件的任务过程及其相关性,信息流及其相关性,为综合设计分析、各项技术的研究奠定基础.

2) 任务可靠性模型建立和任务故障模式分析是前期的基础性工作. 在调研分析的基础上,结合背景型号及其特性分析的结果,针对卫星在使用过程中基本不可维修这一工作特点,应用常规的可靠性框图、马尔可夫技术、故障模式与影响分析(FMEA)和故障树(FTA)等对卫星进行任务可靠性建模和任务故障分析,同时,结合卫星任务过程特点,建立基于过程的任务可靠性模型,并与故障模式相关联,建立任务过程的故障机理模型,为可靠性设计分析、测试性和诊断系统的分析设计,及其综合提供基础.

3) 利用柔性可靠性技术,将其与故障机理模型相结合,针对影响任务的故障模式,基于测试性、应用智能技术等的综合故障诊断与处理技术,实现自诊断与处理、基于网络的远程智能诊断与处理,实现面向卫星任务可靠性的尽可能简单的故障诊断与处理. 根据任务需求与卫星系统特点,针对任务故障模式/异常现象诊断与处理的可能性,由故障诊断与处理决策模块决定诊断与处理的方式与方法,诊断处理与系统恢复之后,卫星的当前状态存储,作为下一次的故障诊断与处理的依据.

1.2 卫星特性分析

卫星特性分析重点开展产品体系结构分析、功能/性能分析、任务过程分析、信息特性分析、软硬件特性分析等,特别还要开展总线与数据链分析.

如图2所示,通过卫星特性分析,确定其功能/关键功能、信息/关键信息与信息处理的模式、任务过程模式、软硬件任务界面等,获得使用过程中软硬件的任务过程及其相关性,信息流及其相关性.

1.3 柔性可靠性设计分析概念和原理

资源的柔性组合利用,提高可靠性主要有如

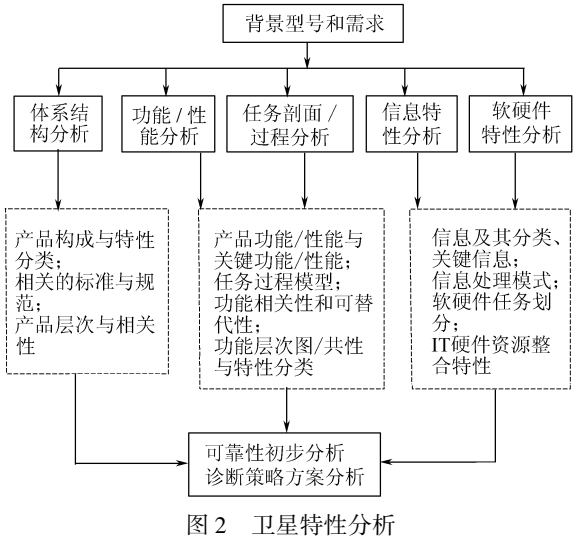


图2 卫星特性分析

下几个方式:

1) 图 3 中上半部分演化过程,可以分为以下 2 种情况:$AA \rightarrow AB$,$AA \rightarrow BB$,即 AA 同时为 A,B 2 个分系统服务(在 BA 故障的前提下,反之亦然);AA 与 BB 同时为 A、B 两个分系统服务(在 BA,AB 故障的前提下,反之亦然).

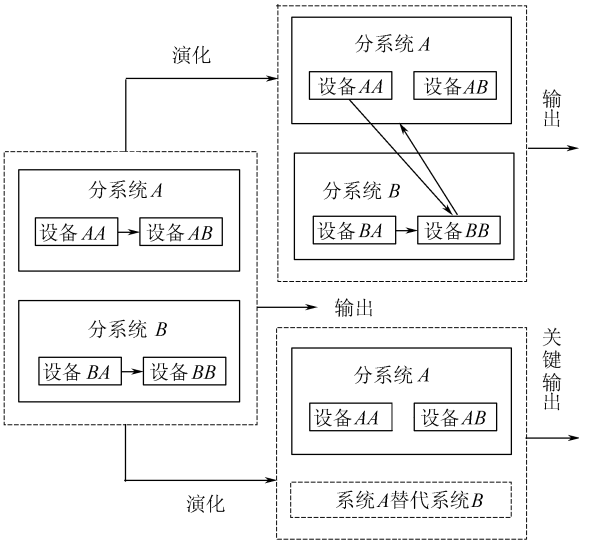


图 3　柔性可靠性设计概念和原理

2) 图 3 中下部分演化过程描述 2 个系统相似,均具有完成相同关键功能的能力,及各自其他的功能. 当一个系统故障时,另一个系统完成 2 个系统的关键功能.

3) 利用多个设备/分系统的相似性及任务时间的串行特征,当一个设备故障时,有一个设备分时段完成 2 个系统的任务(前提是时段间隔较大,由软件完成其主要功能).

4) 软件的在轨升级与维护修正.

1.4　柔性可靠性设计分析方法模型

卫星柔性可靠性技术分析方法模型如图 4 所示.

首先,分析建立卫星任务过程、功能与信息相关性模型,包括:任务/功能对应的信息,信息流图;建立任务/功能与信息层次图,逐层分析建立共性与专用信息与任务/功能关系模型,为功能与信息融合的柔性重组奠定基础.

然后,结合故障机理分析,从卫星整体任务/功能出发,建立功能层次图,并划分出关键功能/主要功能.

在此基础上,应用美军系统体系结构描述的理论和方法,进而建立卫星任务执行视图(mission view)、系统视图(system view)和信息视图(information view),由此 3 个视图构成柔性可靠性技术基础结构. 任务执行视图从任务及其执行过程/功能完成角度描述卫星;系统视图从卫星的系统构成及其相关性角度描述(执行任务的载体);信息视图从信息构成及信息流的角度描述(特别是数字化分系统/设备).

再次,应用基础结构,解析出从公共基础平台、局部公共平台、专用部分,在此基础上,进行柔性可靠性总体策略技术研究,即整合卫星资源,建立多重柔性技术综合的可靠性模型.

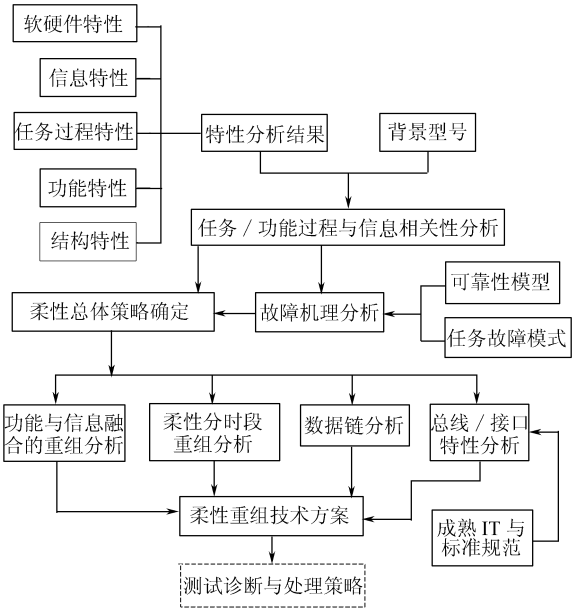


图 4　柔性可靠性技术分析方法模型

最后依据基础结构,应用功能与信息融合的柔性重组技术、分时段柔性重组技术,以及数据链应用技术、总线与接口技术,从而形成面向任务可靠性的卫星柔性可靠性技术模型,同时为测试诊断与处理策略确定提供支持.

1.5　面向任务可靠性的测试性与故障诊断模型

面向任务可靠性的测试性与故障诊断技术方案如图 5 所示.

首先,在对根据卫星系统的特点、影响任务的模式分析的基础上,针对卫星任务可靠性,建立应用信息融合技术的总体综合故障诊断决策模型,针对不同的故障模式与特性,采用不同的诊断方法.

其次,从全寿命周期的角度出发,分析卫星寿命周期内故障及其诊断处理的相关性(即认为每次故障及其处理的结果,对以后的故障及其处理是有影响的),建立相关性模型,为建立综合诊断与处理模型奠定基础. 同时,应用机内自测试 BIT(Build-In-Test)的设计原理,根据故障模式与任务可靠性模型,针对卫星的可靠性与寿命特点,研究板级/设备级,甚至分系统级的 BIT 设计分析技

术. 在 BIT 能力之外,开发将多种故障诊断技术组合应用的远程智能诊断技术,针对不同的故障特点,实现多种故障诊断技术的最佳组合应用.

最后,基于信息融合的综合诊断技术,解决单一方法难以诊断的故障.

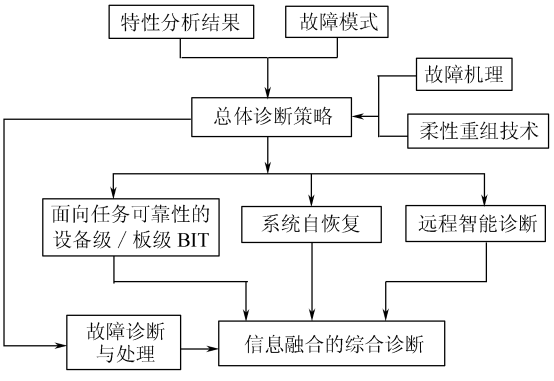


图 5 面向卫星任务可靠性的 BIT 与故障诊断处理方法模型

2 综合应用仿真技术与系统研发

综合应用仿真是在上述内容的基础上,形成仿真软件系统,进行设计方案的分析和优化. 综合应用仿真方案如图 6 所示.

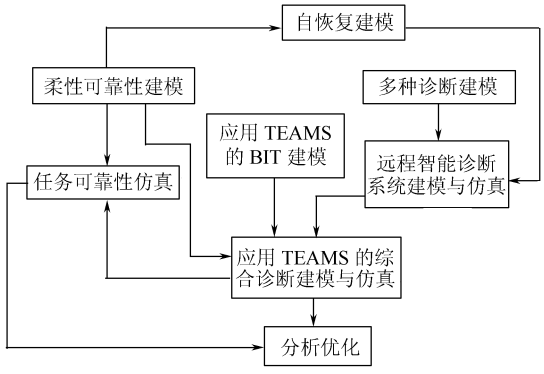


图 6 综合应用仿真设计思想

综合应用仿真技术将可靠性与故障诊断与恢复融合为一个整体,进行仿真分析,进而进行将模型的可行性、合理性和以任务可靠性为目标的整体优化.

综合应用仿真系统的实现方案包括:

1) 结合传统的计算机辅助设计(CAD)软件进行柔性可靠性技术仿真研究,并开发仿真软件模块.

2) 选择美国的 TEAMS 软件作为测试性与诊断仿真平台,进行 BIT 和综合诊断仿真技术的研究和建模,同时,应用 TEAMS 进行故障注入的诊断仿真.

3) 开发多种诊断(成熟技术)的软件模块,并在此基础上进行远程智能诊断系统的建模与软件开发.

4) 集成以上开发的柔性可靠性建模软件模块、自恢复建模模块和远程智能诊断系统模块等,在综合建模模块的协调下,形成综合诊断与故障处理仿真系统.

3 结 束 语

本文应用系统综合和信息融合技术,使可靠性、测试性与故障诊断处理融合设计,为卫星产品研制提供了一套设计分析技术方法和仿真模型思路,避免简单的卫星内单元可靠性的孤立提高,达到简化设计、降低成本、提高有效载荷的目的. 该研究针对数字化系统或设备,具有一定的通用性,可广泛应用于航天器的可靠性设计与故障诊断处理(如载人飞船等),同时,也可应用于其他武器装备和其他民用产品的研制中.

参考文献 (References)

[1] 赵艳彬,王萍萍,王本利. 柔性卫星姿态稳定鲁棒变结构控制器设计[J]. 航天制造技术,2005,10(5):34-36
Zhao Yanbin, Wang Pingping, Wang Benli. Design for flexible satellite stabilization robust vari-structure controller[J]. Aerospace Manufacturing Technology,2005,10(5):34-36(in Chinese)

[2] Pan Shuwen, Su Hongye, Hu Xiehe, et al. Variable structure control theory and a survey[C]// Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Hefei: IEEE, 2000: 2977-2981

[3] 向琳,曲峰,崔刚,等. 小卫星星务计算机的容错体系结构设计[J]. 航天控制,2005,23(2):92-96
Xiang Lin, Qu Feng, Cui Gang, et al. The fault tolerant system design of housekeeping computer for small satellite[J]. Aerospace Control,2005,23(2):92-96(in Chinese)

[4] Sweeting M N. Space at survey: micro-mini-satellites for affordable access to space[J]. Air & Space Europe,2000(1):38-52

[5] 云奔. 一类冗余星载惯性姿态参考系统的可靠性分析[J]. 中国空间科学技术,2003(4):47-51
Yun Ben. Reliability analysis of special type of redundant inertial attitude reference system on board[J]. Chinese Space Science and Technology,2003(4):47-51(in Chinese)

[6] Euler H J, Zebhauser B E, Townsend B, et al. Comparison of different proposals for reference station network information distribution formats[J]. ION GPS, 2002:2349-2358

[7] Foster I, Kesselman C, Tuecke S. The anatomy of the grid: enabling scalable virtual organizations[J]. International Journal Supercomputer Applications, 2001(3):200-222