

“天巡一号”微小卫星数据综合系统设计与在轨性能评估

叶伟松¹ 刘海颖¹ 陈志明² 阎 浩¹

(1. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要: 数据综合系统(Data integrated system, DIS)作为星上电子系统和信息管理的核心, 在卫星研制和运行管理中, 起着非常重要的作用。根据“天巡一号”(NHTX-1)微小卫星的任务需求, 对数据综合系统进行硬件及软件设计。着重描述了 VxWorks 操作系统的使用、整星安全模式、计算机板故障监测和计算机板主备份自主切换等关键技术及创新设计。另外对卫星在轨期间数据综合系统的运行情况进行统计分析, 结果表明该系统工作稳定, 功能性能指标均满足设计要求。

关键词: “天巡一号”微小卫星; 数据综合系统; 卫星平台; VxWorks

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)06-0797-06

DIS System Design and In-Orbit Performance Assessment of NHTX-1 SAT

Ye Weisong¹, Liu Haiying¹, Chen Zhiming², Lü Hao¹

(1. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Data integrated system (DIS), as the core of the on-board electronic system and information management of satellite, plays a very important role in satellite development and operation management. DIS system hardware and software are designed based on NHTX-1 SAT mission requirements. Key technologies and innovative design such as the use of the VxWorks operating system, the safe mode, the CPU board fault monitoring and backup switching technology, are described. The statistical analysis of satellite in-orbit status is given. Result shows that the system works stable and functional performance indexes meet the design requirements.

Key words: NHTX-1 SAT; data integrated system (DIS); satellite platform; VxWorks

“天巡一号”微小卫星是南京航空航天大学自行研制的一颗对地成像科学试验卫星, 采用降交点地方时为上午 10:30 的太阳同步轨道, 轨道高度 495.2 km, 卫星在轨质量 64.2 kg, 于 2011 年 11 月 9 日成功发射入轨, 至 2012 年 3 月 14 日, “天巡一号”在轨正常运行近百天。在此期间, 它经受了 2 次太阳风暴, 安全抵御了 1 次单粒子事件。卫星平台工作稳定, 有效载荷工作正常, 整星状态良好, 功能达到了设计指标。

数据综合系统是“天巡一号”微小卫星的重要组成部分, 其任务使命是在卫星飞行期间, 按照卫

星任务规划, 通过星上数据的有效传递和集中处理, 协调和操作姿态确定与控制分系统、通信分系统、电源分系统和电荷耦合元件 (Charge-coupled device, CCD) 相机的工作状态和任务时序, 并在可能出现的故障状态下, 制定和采取有效对策, 从而确保卫星飞行任务的完成。

小卫星一般采用集中管理模式的星载计算机系统, 即星载计算机同时完成星务管理和姿态控制的功能。传统的小卫星星载计算机系统多采用双机冗余热备份工作方式。文献[1]详细介绍了小卫星星务管理系统的组成特点和关键技术, 并对未来展

基金项目: 南京航空航天大学基本科研业务费资助项目。

收稿日期: 2012-04-17; **修订日期:** 2012-06-12

通讯作者: 叶伟松, 男, 助理研究员, 1982 年出生, E-mail: wenqiuye@gmail.com。

望进行了概述;文献[2]介绍了一种星载计算机系统设计方案,但是集成度稍有不足,系统中配置了 1 台星载计算机和 4 台下位机;文献[3]给出了典型的双机冗余热备份系统结构,其双机切换由双机管理软件模块控制切换逻辑电路完成。这种做法带来几点不利因素:其一,双机热备份给整机带来了额外的体积、重量和功耗,降低了整机的集成度;其二,星务管理软件需要耗费大量资源用来管理双机工作状态,且很可能由于软件故障导致误切换。

随着微小卫星集成度和功能复杂度的不断提高,平台对星载计算机的体积、重量和功耗等指标的要求越来越严格,传统的双机热备份设计已经不再适用。本文介绍的数据综合系统是一种新型的集中管理式星载计算机系统,在冗余备份方式和接口等方面采用新的设计方法,可以有效解决这一问题。

1 系统设计

数据综合系统在设计中继承了传统的集中管理模式,按照标准化、模块化、轻小型化的原则,采用通用的系统架构,合理设计系统部件的功能和技术指标,并提出了新的冗余备份设计方法,仅对关键功能单元进行双机冷备份,具有在轨自主进行系统故障检测、诊断、隔离和系统恢复重构能力;此外,通过接口板集成了整星全部的电气接口,管理其他星载设备,提高了系统集成度。

数据综合系统仅对关键功能单元进行双机冷备,即计算机主板和电源配电模块双机冷备份,而互斥设计避免了主备份同时加电工作。故障情况下,可由直接遥控指令或者切换逻辑电路完成自主切换,在保证可靠性的同时,有效降低了整机体积、重量和功耗等指标,又避免了可能出现的因软件故障导致误切机的致命危险。

1.1 数据综合系统任务

- (1)星上时间及校时:根据 GPS 时间信息或者地面注入的时间数据,确定星上时间基准;
- (2)遥测:完成下行遥测数据流的采集、打包、按格式组帧和存储,形成下行帧^[4],按要求下行实时遥测或者组合遥测(实时遥测及延时遥测);
- (3)遥控及数据注入:接收由 S 波段应答机输出的上行数据流,完成对其编码的解调校验,形成上行数据块;
- (4)程控:接收来自地面的带有执行时间码的遥控指令,完成卫星的各种延时操作^[5];
- (5)对地成像:根据成像指令协调和操作 CCD

相机、姿态控制和电源等相关分系统,完成对地成像,并按规定格式保存图像数据;

(6)姿态确定与控制:采集姿态测量部件信息,运行姿态测量算法根据测量计算,运行姿态控制算法,并向执行部件输出控制指令;

(7)大容量存储器管理:延时遥测的存储、回放,图像数据的存储、回放;

(8)容错与故障处理:监测系统运行状态,并对可预见的故障进行诊断与处理;在卫星发生能源异常情况时,自动切断故障单机的电源供应,关闭次要单机和载荷。

1.2 数据综合系统硬件

数据综合系统借助于现场可编程门阵列(Field-programmable gate array,FPGA),集成了星上设备的全部输入/输出接口,包括模拟输入/输出、串口输入/输出、图像低压差分信号(Low-voltage differential signaling,LVDS)输入、供配电指令输出、双电平输入等接口,整星没有任何下位机,这台集星务管理、和姿态控制于一体的高性能、高功能集成、高可靠性的星载计算机被称作数据综合处理装置。

数据综合处理装置硬件组成图见图 1,该设备由 6 块电路板组成:主份计算机板、备份计算机板、模拟量接口板、数字量接口板、电源配电板和底板,计算机板通过底板总线连接其他功能单元。

(1)计算机板采用双机冷备份设计;计算机板加电后,从 BootRom 开始运行初始化程序,引导 VxWorks 启动,VxWorks 启动后运行应用程序;

(2)模拟量接口板配置一片 FPGA,实现 64 路

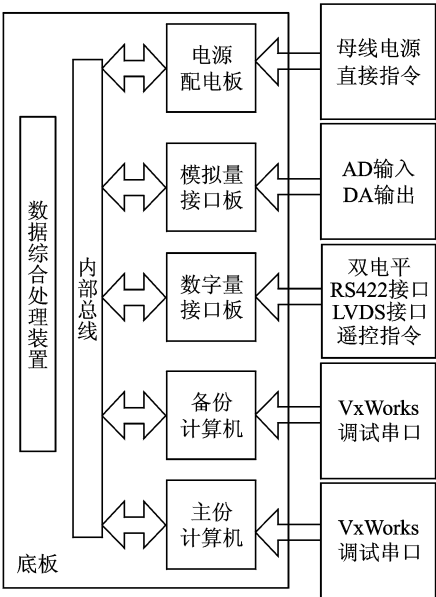


图 1 数据综合处理装置硬件组成图

AD 采集通道和 4 路 DA 输出通道;

(3)数字量接口板配置 31 路双电片输入通道,23 路间接遥控指令输出通道,15 路图像数据 LVDS 输入通道,7 路 422 串口输入/输出通道,所有控制逻辑通过一片 FPGA 完成;

(4)电源配电板为整机提供二次电源,DC/DC 模块采用双机冷备份设计。

经测试,数据综合处理装置整机功耗仅 3.6 W,重量约 4.0 kg,符合卫星总体分配的功耗、重量指标要求。

1.3 数据综合系统软件

数据综合软件是数据综合系统完成设计功能的重要部分,该软件的开发过程严格按照有关标准和规范进行,按结构化方法进行软件分析和软件设计。

数据综合软件由系统软件和应用软件两部分组成,组成框图如图 2 所示。系统软件由引导程序、VxWorks 操作系统和板级支持包等组成,为星上软件运行提供必需的软硬件环境和资源。

实时多任务操作系统采用经过裁剪的 Vx-Works,由它负责系统运行管理、任务调度、存储管理、设备管理、时间管理和中断支持等^[6]。在国内,采用 VxWorks 作为卫星平台操作系统,在此基础上运行星务管理软件和姿态控制软件,并成功在轨验证的卫星,“天巡一号”尚属首例。

应用软件完成数据综合系统所需的功能,由 8 个功能模块组成。应用软件采用 C 语言编程。

1.4 空间辐射环境适应性设计

空间辐射环境对数据综合系统的影响主要包括 3 种:单粒子翻转效应、单粒子闩锁效应、辐照总剂量效应。

针对单粒子翻转效应,采用错误检测与纠正

(Error detection and correction,EDAC)设计、信息冗余设计(CRC 校验、奇偶校验等)以纠正可能出现的存储器数据错误。

针对单粒子闩锁效应,通过元器件降额使用和限流等措施进行防护,一旦发生闩锁,首先要做到安全防护,不能损伤器件,然后再由数据综合系统自主恢复或通过地面遥控指令人工干预恢复。

针对辐照总剂量效应,尽量选用等级较高的元器件和抗辐照元件;此外,对于 CPU、DC/DC 模块、FPGA 芯片和静态存储器等关键元器件使用 0.5 mm 厚钽板进行抗辐照加固。

2 关键技术研究

2.1 采用 VxWorks 作为卫星平台操作系统

“天巡一号”是国内首次采用 VxWorks 作为平台操作系统,并成功在轨验证的卫星。“天巡一号”基于 VxWorks 实现了星上信息的集中处理和传递,采用基于优先级的抢占式调度和轮转调度相结合的调度策略,对星上资源和软件运行进行了统一管理 with 调度,极大提高了卫星的自主运行管理能力,并有效解决了引入 VxWorks 操作系统带来的程序存储空间、CPU 机时、内存等资源紧张问题^[7]。

本项目使用的 VxWorks 操作系统经过了高度裁剪,保证系统以较高的效率、较小的资源运行。最终编译出的软件仅 652 KB,包含了 VxWorks 操作系统和应用软件。

本项目软件在第三方评测中专门就 CPU 机时占用和内存占用进行了测试。卫星处于三轴稳定模式下的 CPU 机时占用率仅 25%,而内存占用率为 50%,表明数据综合系统拥有充足的机时和内存资源应对复杂的在轨工作环境。

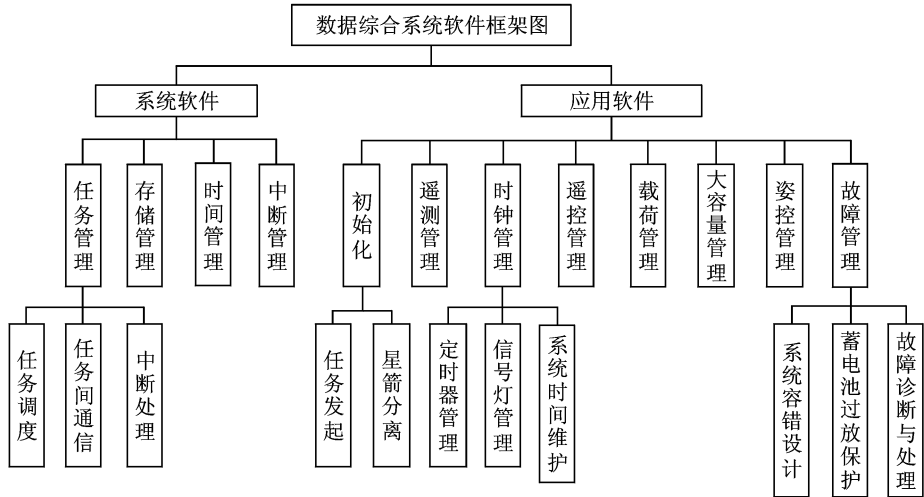


图 2 数据综合软件组成框图

2.2 整星安全模式设计

安全模式是卫星在轨运行期间,由卫星自主进行故障处理的一种工作模式,目的是使故障不扩散,降低故障对卫星功能、性能的影响^[8]。“天巡一号”是对地成像微小卫星,根据低轨卫星过境时间短、工作瞬间功耗大的特点,经过整星故障模式及影响分析,确定了如下几项影响整星安全性的事件,并展开了以保能源为目标的安全模式设计:

(1)数据综合处理装置计算机板安全模式:计算机板发生复位或者切机时,将产生系统失效信号(System failure,SF)。SF 信号将实现自主隔离故障计算机板的总线接口,控制总线开关处于电气隔离状态;另外执行部件控制指令输出接口将保持当前输出不变,防止在此过程中计算机板向执行部件发送错误指令;

(2)姿控安全模式:卫星姿态异常情况下,卫星可能无法正常成像,或者导致太阳电池阵输出电流下降,因此需要关闭次要单机和载荷,使卫星处于稳定的低功耗工作状态;

(3)电源安全管理模式:正常状态下蓄电池电压为 27.0~30.0 V,一次母线异常情况下,根据故障严重程度,自主不同地处理措施。其一,若蓄电池电压低于 26.5 V,则切除次要单机和负载;其二,若蓄电池电压低于 21.5 V,为防止锂离子蓄电池因过放而失效,则自主将蓄电池与母线断开,待蓄电池电压恢复至 28.0 V 后,再自主将蓄电池接入母线。

2.3 计算机板故障监测

计算机板故障监测是保证数据综合处理装置可靠、安全工作的重要措施。计算机板采用双机冷备份方式,具有在轨自主故障检测^[9]、诊断、隔离和系统重构能力^[10]。对于计算机板的故障监测分为 3 级:

(1)计算机板自主监测:计算机板上设计有“看门狗”监控电路,对“看门狗”复位进行监视,系统发生 1 次“看门狗”复位后重新启动引导程序,系统连续发生 4 次“看门狗”复位后发出 SF 信号;

(2)电源监测:电源配电板设计有计算机的电流监测电路,当其超过规定阈值时,切断故障计算机的电流;

(3)地面站监测:地面站对遥测数据进行全面分析和判断,故障确定后发送直接指令,恢复系统。

卫星地面测试期间就计算机主板故障的监测进行专项测试,模拟各类故障状态,数据综合处理装置均能有效诊断计算机板故障,并进行系统恢复、重构。

2.4 计算机板主备份自主切换技术

当班计算机板故障情况下,需要切换至备份,并进行系统重构,恢复功能。“天巡一号”卫星在继承成熟技术的基础上,设计了一套主备份自主切换机制,该功能由电源配电板实现。电源配电板实时监测计算机+5 V 电流,同时监测 SF 信号,若当班机出现 SF 信号或者电流持续超限时,产生断电指令脉冲,电路根据地面给定的权限采取切机措施,实现原理如图 3 所示。

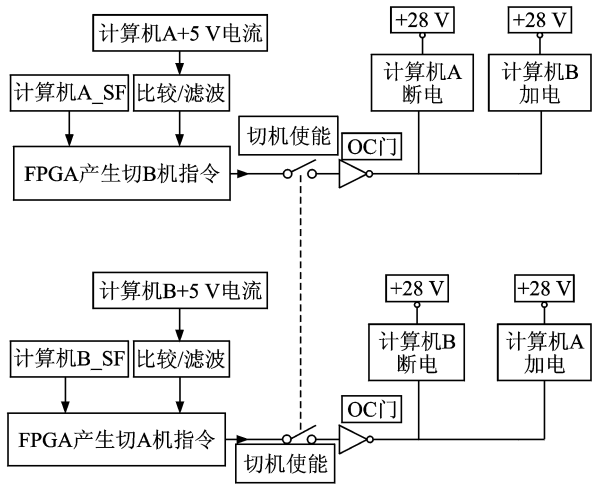


图 3 计算机主板主备份切换原理框图

3 在轨性能评估

“天巡一号”微小卫星自 2011 年 11 月 9 日发射成功至 2012 年 3 月 14 日,已飞行 1 930 圈,星地之间信息交换工作统计见表 1。在此期间,数据综合系统工作稳定,未出现复位、切机等故障。

表 1 星地之间信息交换工作统计

序号	名称	1~300 圈	301~1 930 圈
1	直接指令/条	6	2
2	数据注入块/块	73	239
3	间接指令/条	97	351
4	地面跟踪次数	42	162
5	跟踪时间/分钟	约 380	约 1 430

3.1 卫星遥测

数据综合系统过境期间发送实时遥测数据,经地面站累计接收约 42.9 MB,遥测格式完全符合设计要求,并能实时、正确地反映卫星的各类状态和参数,保证了在轨测试和对地成像等任务的顺利进行。

数据综合系统过境期间发送延时遥测数据,经

地面站累计接收约 42.2 MB,以 3 min 为间隔完整提供了卫星在轨飞行 1 930 圈过程中的延时遥测数据。延时遥测准确、全面的反映了卫星境外飞行过程的工作情况,为卫星在轨测试、应用,提供了准确、客观的境外卫星状态信息。

通过对遥测数据的分析得知,星上各设备工作正常,卫星各类工程参数与地面测试期间的模拟飞行数据一致性好。

3.2 卫星遥控及延时程控指令工作情况

根据卫星遥测下行数据判读,遥控上行统计如下:

(1)地面站累计向卫星发送直接指令 8 条,全部执行成功;

(2)地面站向卫星注入间接指令、延时程控指令块、轨道参数、时间调整数据块等近 760 条,全部注入成功并正确处理。

3.3 星上时钟管理

2011 年 11 月 9 日上午,发射前通过地面测试设备将星上时间调整为以 2008 年 1 月 1 日 0:0:0 为计时起点的协调世界时。

随后的 4 个月内,星上时统经过集中校时和均匀校时后,平均每个月与地面时间差约为 $\pm 0.594\ 5\ \text{s}$,完全满足使用要求。

3.4 模式切换

数据综合系统在轨长期处于姿态控制模式,此时卫星处于三轴稳定状态,收到地面上注的试验任务指令后,数据综合系统进行模式切换,进入试验任务模式。表 2 给出了 10 组星地时差数据。

具体统计如下:

(1)上注对地成像指令 37 条,“天巡一号”在轨完成了 37 次对地成像,星上共获得图像数据 51 幅;

表 2 星地时差测量数据

序号	日期	地面北京时间	星地时差/s
1	20111109	21:42:02	0.665 699 995
2	20111109	21:42:05	0.415 699 995
3	20111206	22:16:07	0.466 799 998
4	20111206	22:16:08	0.341 799 998
5	20120101	19:29:01	0.533 200 002
6	20120101	19:29:02	0.658 200 002
7	20120203	20:44:00	0.915 699 995
8	20120203	20:44:01	0.934 799 995
9	20120301	23:33:01	0.569 199 995
10	20120301	23:34:03	0.444 199 995

表明数据综合系统在姿态控制模式和对地成像模式之间的切换安全、成功;数据综合处理装置的供电、快门驱动等间接遥控指令接口工作正常,图像接口 LVDS 接口工作正常;

(2)上注试验指令 15 条,“天巡一号”在轨完成了 15 次试验任务;表明数据综合系统在姿态控制模式和试验模式之间的切换安全、成功;

(3)上注数传指令 14 条,“天巡一号”在轨完成了 14 次图像数据传输任务,地面获得有效图像数据 31 幅;表明数据综合系统在姿态控制模式和数传模式之间的切换安全、成功;数据综合处理装置与数传发射机之间的接口工作正常。

统计结果表明:基于 VxWorks 操作系统的星上软件在轨工作状态良好,VxWorks 操作系统完全胜任多任务多工作模式的资源管理和数据处理工作。

4 结束语

“天巡一号”微小卫星数据综合系统在轨 4 个月运行正常,工作稳定、可靠,系统未复位、未切机,表明:数据综合系统完全达到了设计的任务要求;系统软件设计正确可靠;数据综合处理装置采用了集中管理方式,并使用了新的冗余备份设计方法,减小了设备的体积,降低了设备的功耗、重量,实现了高度集成、轻小型化的设计目标;在轨期间卫星发生了单粒子事件,但由于数据综合系统的故障监测和容错设计比较完善,因此没有引起卫星运行故障,说明数据综合系统的容错设计很好的保证了卫星的可靠性。

参考文献:

[1] 李孝同.小卫星星务管理技术[J].中国空间科学技术,2001,2(1):29-36.
Li Xiaotong. Technology of house-keeping system for the small satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2001,2(1):29-36.

[2] 程光明,廖明宏,吴翔虎.小卫星星载计算机及其外围设备的管理[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(1):201-203.
Cheng Guangming, Liao Minghong, Wu Xianghu. Management of onboard computer and its peripherals [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002,34(1):201-203.

[3] 王平,孙宁,李华旺,等.“创新一号”小卫星星载计算机控制系统设计[J].计算机工程,2006,32(18):255-257.

Wang Ping, Sun Ning, Li Huawang, et al. Design of on-board-computer control system for Cx-1 micro-satellite[J]. Computer Engineering, 2006,32(18): 255-257.

[4] 国防科学技术工业委员会. GJB1198. 6-2004, 航天器测控和数据管理第 6 部分: 分包遥测[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 2004.

[5] 李孝同. “实践五号”卫星星务管理系统[J]. 中国空间科学技术, 2000(5): 30-35.

Li Xiaotong. Satellite keeping operation system for Chinese SJ-5[J]. Chinese Space Science and Technology, 2000(5): 30-35.

[6] 周启平, 张杨. VxWorks 下设备驱动程序及 BSP 开发指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

Zhou Qiping, Zhang Yang. Device Drive and BSP develop guide in VxWorks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[7] 何熊文, 孙勇. 一种卫星数管中心计算机软件的工程实现[J]. 航天器工程, 2007, 16(5): 47-53.

He Xiongwen, Sun Yong. Engineering realization of software in central terminal unit of satellite data management system[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(5): 47-53.

[8] 李志刚, 伍保峰, 冯永. 环境减灾-1A、1B 卫星星务分系统技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(6): 76-80.

Li Zhigang, Wu Baofeng, Feng Yong. Technical characteristics of HJ-1A/1B house-keeping system[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(6): 76-80.

[9] 王伟成, 罗宇. 基于分布式架构的星载并行计算机容错技术[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(3): 51-56.

Wang Weicheng, Luo Yu. Fault-tolerance technique for on-board parallel computer system based on distributed architecture[J]. Computer Engineering & Science, 2011, 33(3): 51-56.

[10] 孙兆伟, 刘源, 邢雷, 等. 面向多任务的可重构星载计算机设计[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1407-1413.

Sun Zhaowei, Liu Yuan, Xing Lei, et al. Design of reconfigurable on-board computer for multitask[J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(6): 1407-1413.