DOI：10.13382/j.jemi.B2104760

大型光学遥感卫星高可靠高性能综合电子系统设计

孔令波　陈茂胜　郑惠中
（长光卫星技术股份有限公司　长春　130000）

摘　要：针对大型光学遥感卫星高可靠高性能和好用易用的需求，设计了一种具有高度容错能力的综合电子系统，详细介绍了系统的体系架构和信息流设计，深入探讨了卫星运行管理和系统容错机制等关键设计技术。介绍了所设计综合电子系统在某型号卫星上的在轨应用情况，该卫星充分采用了论文提出的多冗余备份架构、容错技术和运行管理技术，平均每天完成 21 次成像和 11 次数传，日均拍摄面积高达 1 100 000 km^2，最长连续无故障运行时间超过 6 个月，充分验证了所设计综合电子系统具有在轨高效稳定运行的能力。

关键词：卫星；综合电子；星务管理；容错机制
中图分类号：TN702；V19　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：520.6070

Design of high reliability and high performance integrated electronic system for large optical remote sensing satellite

Kong Lingbo　Chen Maosheng　Zheng Huizhong
（Chang Guang Satellite Technology Co.，Ltd.，Changchun 130000，China）

Abstract：In response to the requirements of large optical remote sensing satellites for high reliability，high performance and ease-to-use，an integrated electronic system with high fault tolerance is presented. The design of system architecture and information flow are showed，and the key design technologies such as satellite operation management and system fault tolerance mechanism are discussed exhaustively. The on-orbit application of the designed integrated electronic system on a certain satellite is introduced. The satellite fully adopts the multi-redundant backup architecture，fault-tolerant technology and operation management technology proposed in the paper，and completes 21 imaging and 11 transmissions per day on average. The average daily shooting area is as high as 1.1 million square kilometers，and the longest continuous trouble-free operation time is more than 6 months，which fully verifies that the designed integrated electronic system has the ability to operate efficiently and stably in orbit.

Keywords：satellite；integrated electronic system；satellite house-keeping；fault tolerance

0　引　言

随着科技的发展，人们基于自然资源调查、生态环境监测、城市建设以及防灾减灾等领域的需求对卫星遥感提出了更高的要求，具体表现在工作模式由单一推扫成像，向多点目标、多条带拼幅、立体成像、非沿迹曲线成像等复杂成像模式发展；星务管理由单一指令流控制、状态参数采集管理，向星上数据智能处理、自主健康监测、自主任务规划等复杂管理模式发展[1]。遥感卫星应用需求的提高，需要更高可靠、更高性能的卫星综合电子系统作为支撑。

卫星综合电子系统是星上采用计算机网络技术将星载电子设备互联，实现卫星内部信息共享和综合利用、功能集成、资源重组优化的信息处理和传输系统[2]，对卫星在轨运行安全、应用效能以及地面运控等起着至关重要的作用。现代卫星综合电子系统在传统卫星数管分系统的基础上进行拓展，通过系统总线与各功能单元进行信息流转，在星务计算机统一的任务调度和管理下，完成整星的数据管理、姿轨控管理、遥测遥控管理、供配电管理、热控管理、时统管理和有效载荷管理，实现卫星系统的集中管理和分布控制[3]。

收稿日期：2021-09-24　　Received Date：2021-09-24

现代卫星系统有两种发展趋势。一种是强调低成本、快速部署的微纳卫星,其单星功能、性能有限,通过批量部署组建卫星集群来实现热点地区快速重访和全球覆盖,其典型代表如 Planet 公司的鸽群星座[4];另一种发展趋势是强调单星性能的大中型卫星,通过强化卫星的机动能力和载荷性能来提升卫星数据获取能力和图像质量,其典型代表如 Digital Globe 公司的 WorldView 卫星[5]。微纳卫星由于其体积、成本、功耗等限制,主要采用集中式体系架构[6]综合电子系统,以达到硬件资源的最大化利用和功能综合。集中式体系架构各功能模块间耦合度大,加大了运行过程中故障扩散的可能性,不利于卫星的高可靠高稳定运行。大型卫星单星性能和可靠性要求较高,各星上设备功能复杂且多采用冗余备份设计,单机体积重量都较大,因此大型卫星主要还是采用分布式的体系架构[7-9]。传统的分布式卫星综合电子系统,常采用分级控制的拓扑结构,由分系统下位机完成星载单机的直接控制,如东五平台[10]就配备有专门的姿轨控计算机,而且,由于平台与载荷独立设计,整星电子学系统一体化设计程度低,系统复杂度高。

本文针对大型光学遥感卫星应用,采用平台与载荷一体化设计的方法,提出了一种分布式综合电子体系架构,在保证卫星可靠性的同时优化了整星电子学系统复杂度。在轨实际应用情况验证了所提出综合电子系统设计的合理性和有效性。

1　综合电子系统体系架构

1.1　功能体系架构

光学遥感卫星主要功能是根据地面系统的任务规划,完成对指定区域的光学影像获取,并将影像数据传回地面。光学影像获取及回传主要由载荷系统(光学相机和数传)完成,卫星平台主要完成测控通信、姿态与轨道控制、星务管理、能源与热控管理等服务保障功能,其功能体系架构如图 1 所示。卫星测控通信、姿态与轨道控制、能源与热控管理、影像获取与回传虽然由各个分系统具体执行,但受到综合电子系统星务管理软件的统一调度,保证卫星运行的协调有序。

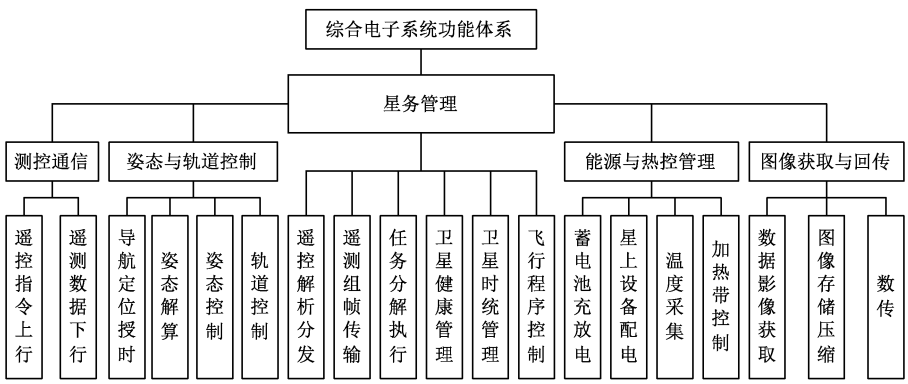


图 1　综合电子系统功能体系架构

Fig. 1　Integrated electronic system function architecture

星务软件承担着卫星的综合控制功能,以综合管理单元为处理核心,通过系统总线完成各分系统的状态采集和功能调度,主要体现在:调度测控分系统完成星地通信,实现卫星遥控/业务指令注入、地面授时/校时、程序重构等功能;调度能源与热控分系统完成星上单机配电、热控状态配置等功能;调度载荷分系统完成成像参数配置、成像时序控制、图像存储、图像压缩、图像回放等功能。除了外围分系统功能调度外,星务软件还要完成卫星任务管理、卫星健康管理、卫星时统管理和卫星飞行状态控制等功能,尤其是卫星任务管理和卫星健康管理,是卫星好用易用以及在轨稳定运行的关键[11]。另外,卫星姿轨控算法作为星务软件的一个进程被调度执行,完成卫星姿态与轨道控制、数传相控阵天线电扫角解算、相机积分时间与偏流角计算等。

1.2　网络体系架构

为了适应大型光学遥感卫星高可靠高稳定运行的应用需求,星载综合电子系统采用分布式网络体系架构。综合电子系统网络结构以综合管理单元为核心,构建了高低两种速率的总线网络来实现系统内部信息和数据的传输。低速网络用以传输卫星遥测遥控数据包、星载设备的遥控指令、配置信息、功能数据、状态数据等,其设计要点是数据传输的实时性和可靠性。低速网络以 CAN 总线和 RS422 串口进行构建,这两种通信体制在航天器中广泛应用,其可靠性和抗干扰能力在众多航天工程项目中得到充分验证[12-14]。系统设计了 3 路 CAN 总线,每路均为主备冗余设计,是星内信息流转的主干网络。高速数据网络用以传输图像数据,实现图像数据的存储和回传。高分辨大型光学遥感卫星图像数据率和数传速率

都很高,对星上高速网络的数据传输速率要求很高,采用TLK2711作为图像数据高速网络接口,其有效数据传输速率可达1.6 Gbps。综合电子系统网络体系架构如图2所示。

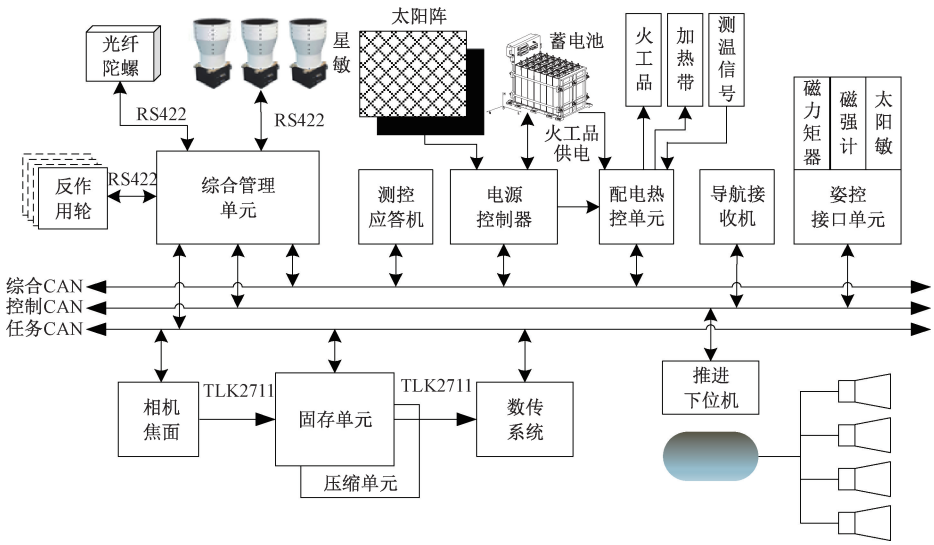


图2　综合电子系统网络体系架构

Fig. 2　Integrated electronic system network architecture

1.3　软件体系架构

综合电子系统星务管理软件,是实现卫星综合管理功能的核心构件,运行于综合管理单元中。星务管理软件采用分层体系架构,如图3所示。应用层根据功能体系划分设计多个软件进程,各进程间通过信号量和消息队列实现进程同步,通过全局数据结构实现数据共享。各进程在操作系统调度下周期性地有序协调运转,共同完成卫星遥测遥控管理、姿态与轨道控制、任务分解执行、飞行状态控制、健康状态管理、时统管理等功能。服务层除了提供操作系统服务、标准C函数库、软件协议库等外,还包括基于硬件层的板级支持包和接口驱动服务,为应用层提供标准化通用化的函数接口调用,屏蔽具体的硬件实现细节。硬件层主要描述支撑星务管理软件运行的底层硬件结构,为软件功能的实现提供必要的硬件资源,包括CPU寄存器页、中断控制器、定时器、IO接口以及外扩的存储器和FPGA等。综合管理单元硬件层配置PROM、EEPROM、FLASH和SRAM存储器,其中PROM用于存储系统引导程序,EEPROM用于存储系统运行所必须的配置信息,FLASH主要用于存储应用软件和遥测数据等,SRAM用于星务软件的运行。

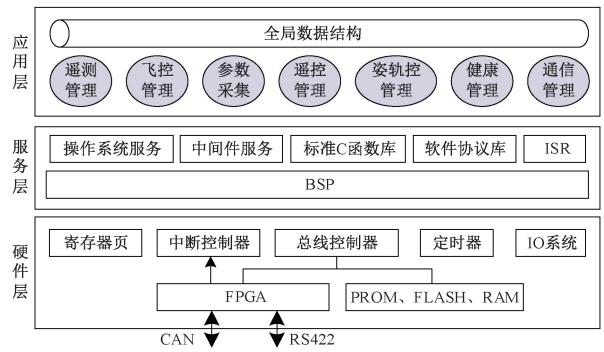


图3　综合电子系统星务软件体系架构

Fig. 3　Integrated electronic system house-keeping software architecture

2　综合电子系统信息流设计

2.1　平台信息流设计

1)姿轨控信息流设计

卫星姿态与轨道信息的有效流转是卫星姿轨控功能实现的基本保障,直接影响着卫星在轨运行安全、图像获取效率和成像质量。姿轨控程序作为星务管理软件的一个进程被调用,信息流由星务统一管理,星务软件通过全局数据结构实现与姿轨控进程间的信息交互。导航接收机每秒向星务广播带有时标信息的轨道数据,用于卫星定位和时统管理。星务软件每个控制周期采集星敏、陀螺、太敏等的姿态数据用于卫星定姿,并将姿轨控软件计算出的控制指令发送给推进系统、飞轮和磁力矩器,完成卫星姿态控制。需要强调的是,为了避免磁力矩器输出对磁场测量造成干扰,卫星磁控系统采用"采一控三"的策略,即每4个控制周期控制磁力矩器输出3个周期,第4周期采集磁强计数据用于磁控闭环。卫星姿态与轨道控制信息流如图4所示。

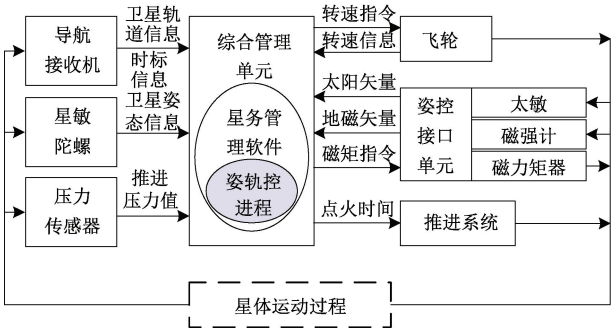


图 4　姿轨控信息流

Fig. 4　AOCS information flow

2)综合信息流设计

综合信息流定义为各分系统状态信息、配置指令等,综合信息流以综合管理单元为枢纽,完成地面遥控包上行解析、各分系统指令分发和状态采集、遥测包组帧下行,如图 5 所示。测控应答机收到地面遥控包后首先进行合法性校验,并判断是直接指令还是数据指令。直接指令由测控应答机通过硬件线路直接驱动星上设备执行。数据指令传递给综合管理单元,综合管理单元再次校验合法性后解析出立即指令或延时指令,立即指令即时分发给各分系统执行,延时指令添加至延时指令列表,执行时刻到来时分发给各分系统。综合管理单元采集各分系统状态信息进行遥测包组帧,并通过测控应答机传输至地面系统,以便于地面运控中心及时、全面、准确地掌握卫星在轨运行状态[15]。

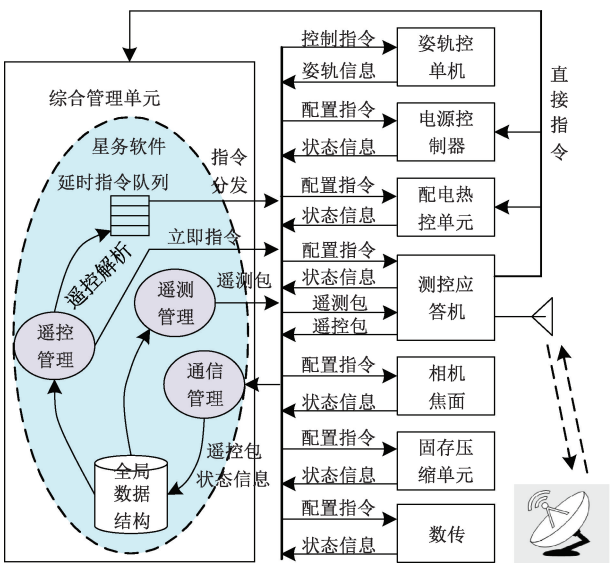


图 5　综合信息流

Fig. 5　Comprehensive information flow

2.2　载荷信息流设计

卫星成像过程中,除了获取地面目标的图像数据外,还需将成像时刻的轨道数据、姿态数据、时统信息等辅助数据与图像一起存储回传,以支持地面图像数据处理。辅助数据和相机积分时间由综合管理单元实时更新,辅助数据跟原始图像数据按照规定的格式组帧传输给固存压缩单元落盘存储。成像结束后,固存压缩单元可以根据综合管理单元指令对原始图像进行压缩,形成压缩图像落盘。卫星过站时,固存单元将压缩数据或原始数据回放给数传分系统传输至地面,数传相控阵天线电扫角由综合管理单元实时更新。载荷信息流如图 6 所示。

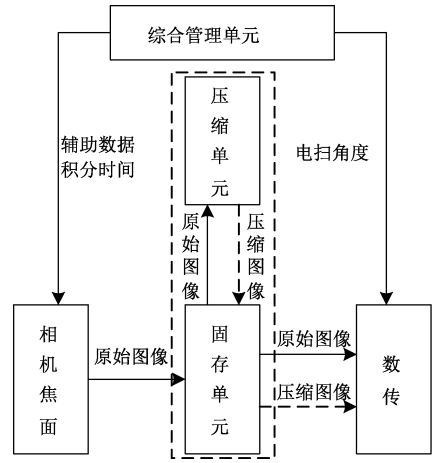


图 6　载荷信息流

Fig. 6　Payload information flow

3　卫星运行管理设计

3.1　卫星飞行程序设计

卫星飞行程序是指从卫星发射、星箭分离到长期在轨运行整个过程的飞行状态控制。卫星在发射过程中的工作状态定义为箭上模式,此时综合管理单元和测控应答机等少数设备上电运行,保证卫星处于可测控状态。卫星检测到星箭分离后,进入星箭分离模式,依次给姿轨控单机加电,调用姿轨控程序完成卫星初始入轨角速度阻尼并建立太阳帆板对日的三轴稳定姿态,卫星进入在轨待机模式。在轨单机模式是卫星在轨长期运行的模式,当执行地面规划任务时进入任务模式,此时姿控分系统完成任务姿态建立,载荷分系统加电工作,任务结束后返回在轨待机模式。当卫星在轨运行能源、姿态等出现重大异常时进入安全模式,关闭所有载荷电源,姿态紧急对日,降低星上设备热控要求,维持系统最小工作状态,直到故障排除后通过地面指令退出安全模式。卫星飞行程序如图 7 所示。

3.2　卫星任务管理设计

光学遥感卫星一般具有推扫成像、图像压缩、存储器

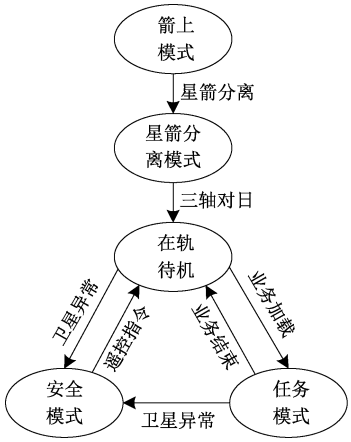


图7　卫星飞行程序

Fig. 7　Satellite flight program

擦除和数传等任务模式,地面用户通过卫星任务指令将任务参数注入卫星,卫星对任务指令进行合规性判定后将其添加至任务列表。以后卫星每个控制周期都对任务列表进行巡检,当到达任务执行时间,且卫星能源及健康状态也满足任务执行条件时,则对任务进行分解生成任务延时指令序列,卫星严格有序地执行指令序列完成任务要求的功能。任务合规性判定除任务格式和数据正确性校验外,主要对任务的时间冲突进行校验。任务执行通常包含姿态机动、载荷加电、载荷参数设置、载荷工作和载荷下电等过程,设任务执行过程占用时间区间为$[tb,te]$,要求各任务时间区间不可重叠。若新任务与任务列表中已有任务时间冲突,且任务优先级相同,则新任务被视为非法任务;如新任务具有更高优先级,则新任务被添加至任务列表,同时删除列表中与新添加任务时间冲突的任务。

3.3　卫星时统管理设计

卫星时统管理[16]即是使星上时间与时间基准保持同步,是卫星有序工作和数据图像处理的重要保障。卫星时统管理以综合管理单元为核心分为时间维护和时间发布两个层次,如图8所示。时间维护即维护综合管理单元时间符合时间基准。正常情况下,综合管理单元时间跟随导航接收机,并在秒脉冲[17]前沿进行一次小秒同步清零;当导航设备故障时,由地面系统对综合管理单元授时,综合管理单元依靠自身晶振守时,同时为了补偿晶体震荡频率不稳定导致的时间漂移,设计了集中校时和均匀校时等校时策略[18]。时间发布即综合管理单元通过授时指令和秒脉冲广播的方式,管理星敏、陀螺和载荷单机等星上时间敏感设备与综合管理单元保持时间同步。

3.4　卫星健康管理设计

卫星因其自身系统的复杂性和运行环境的影响,不可避免的存在各种异常情况的发生。卫星健康管理包括故障检测、故障处理和故障恢复等技术,是卫星在轨稳定运行的关键,卫星常见故障及处置策略如表1所示。卫星综合电子分系统主要通过监视各星上设备通信状态和参数完成各设备故障检测,从而对故障做出及时合理的响应,并将故障状态遥测回地面,确保地面运控中心全面、准确地了解卫星健康状态,必要时做出应急处置。在综合管理单元内部配置大容量数据存储器,对卫星境外遥测数据进行实时存储,当卫星进入测控圈时下传。保证卫星在境外发生故障时可获取卫星故障的现场数据,为事后的故障分析及处置提供支撑。

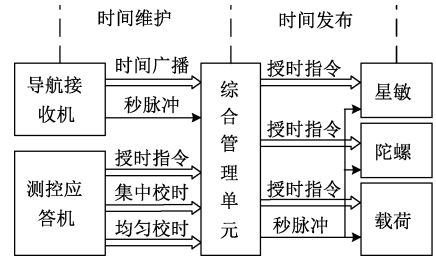


图8　时统管理模型

Fig. 8　flight time management model

表1　卫星常见故障及处置策略

Table 1　Common satellite faults and disposal strategies

故障类型	处置策略
通信故障	综合管理单元自身接口异常时进行接口重新初始化配置; 其他星载设备连续多次通信异常时,对设备进行切机或重加电
时间异常	连续多次监测到星敏、陀螺、载荷等设备时间与综合管理单元不同步时,进行重授时
状态异常	连续多次监测到设备状态异常,则对设备进行切机或重加电
数据异常	连续多次监测到设备功能参数异常,则对设备进行切机或重加电
能源异常	能源轻微不足时,卫星进入任务保护状态,不再执行任务 能源严重不足时,卫星进入安全模式,姿态紧急对日,降低星上设备热控要求,维持系统最小工作状态

4　综合电子系统容错机制设计

4.1　星上设备容错机制

冗余备份是航天器常用的高可靠设计手段,根据星载设备重要程度和工作方式的差异,设计不同的备份方式和切机机制,如表2所示。综合管理单元是整星的控制核心,需时刻保持当班状态,除在测控圈内可通过遥控指令切机外,还可通过自主切机确保卫星的境外运行安全。综合管理单元自主切机功能可通过测控直接指令禁

止或使能,自主切机使能时,当班机(主机或备机)重启失败或多次重启后则切换至另一机(备机或主机)运行,多次重启后切机主要目的是为了进行空间辐射效应退火[19]。测控上行链路是确保卫星安全和故障紧急处置的重要通道,任何时候都应该保持上行链路畅通,因此测控接收机采用热备份的方式。卫星姿态测量具有多种实现手段,因此除核心部件星敏和陀螺具有备份外,太敏和磁强计均为单份设计。多个星敏通过布局优化可确保飞行全程单星敏有效,可以满足卫星对日的需求,而在轨动量轮卸载可采用计算磁场和喷气卸载等方式。其他星上设备均采用冷备份设计,通过综合管理单元指令切机。

表 2　星上设备容错机制

Table 2　On-board component fault tolerance mechanism

星载设备	备份方式	切机机制
综合管理单元	双机冷备	自主切机 遥控切机
测控应答机	发射机冷备	指令切机
	接收机热备	遥控切机
姿态敏感器	系统级备份	/
其他	双机冷备	指令切机

4.2　星上网络容错机制

综合电子系统设计了 3 路 CAN 总线作为星上数据交互的主干网络,每路 CAN 总线均为主备份设计。综合管理单元给星上单机发送数据时,主备份 CAN 总线同时发送。星上单机设备上电默认使用主份 CAN 总线,若主份 CAN 总线连续未收到本节点 CAN 帧时间超过阈值,则切换至备份总线,备份 CAN 总线连续未收到本节点 CAN 帧时间超过阈值,再切换至主份总线,依次类推。同时,星上单机使用主份或备份 CAN 总线、总线切换机制的使能或禁止均可通过综合管理单元指令控制。

4.3　星务软件容错机制

1)星务软件双版本三模冗余存储

星务软件存储在 FLASH 存储器中,存储相同的 2 个版本,每个版本均为三模存储。系统启动时,引导软件根据 EEPROM 中的配置信息将指定版本软件搬移至 SRAM 中运行,如图 9 所示。星务软件在搬移过程中进行位级三取二表决,可有效降低空间单粒子影响[20],增强系统可靠性。存储 2 个版本的程序,可在待启动版本软件严重损坏无法启动时,自动切换至备份版本软件启动,同时在程序重构失败的情况下保证系统的稳定运行。

2)星务软件在轨重构

星务软件在轨重构,可实现软件 bug 修复和功能升级。将地面充分验证的程序编译生成的二进制文件通过遥控数据包的形式上注给星务软件,对 FLASH 指定区域进行擦除复写,从而实现在轨软件的修改。程序重构只对待启动版本软件进行更新,软件更新后系统重启,新版本软件被搬移至 SRAM 运行,同时引导软件将 EEPROM 中的待启动软件版本号刷新为备份版本,保证新版本软件异常再次重启时系统可回退到稳定状态。当新版本软件运行正常,地面进行充分的分析和验证后,可通过遥控指令更新待启动版本号,并用新版本软件复写备份版本,实现 2 个版本软件的更新。程序重构全流程如图 10 所示。

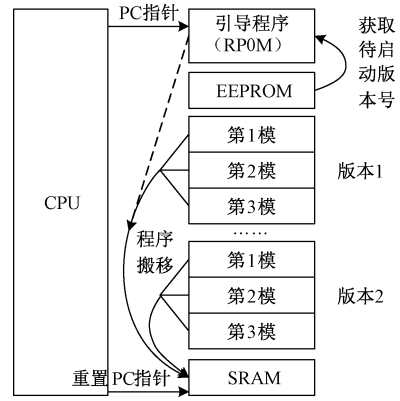


图 9　星务软件启动过程

Fig. 9　Boot process of the house-keeping software

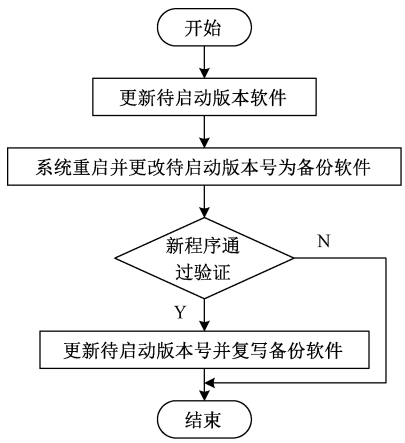


图 10　软件重构全流程

Fig. 10　The whole process of software refactoring

5　系统设计在轨验证

大型光学遥感卫星高可靠高性能综合电子系统设计的成果和关键技术,在某型号卫星项目中得到了全面的应用。该卫星重量约 1 300 kg,主载荷为一台离轴三反光学相机,星下点幅宽不小于 135 km。卫星以综合管理单元为控制核心,采用三总线主备冗余的 CAN 网络作为主干信息网络,实现整星数据采集和功能集成。卫星运行在约 500 km 的太阳同步轨道,成像数据率高达 15 Gbps,通过 12 通道 TLK2711 传输至星上存储单元。卫星图像

数据可直接下传,也可压缩后下传,数传系统采用极化复用技术最高速率可达 1.8 Gbps。

卫星硬件系统设计进行了部件级、分系统级和系统级冗余备份,软件上采用了三模冗余和在轨动态重构等容错技术,保证了卫星在轨运行的高可靠性。卫星设计的健康管理系统可对常见故障进行自主诊断、自主处置,并形成飞行日志供事后故障定位分析。卫星任务管理系统为地面运控系统提供简单清晰的任务接口,接口规定了卫星任务姿态、执行时间、主要参数配置等关键信息,卫星接收到地面任务指令后,自主完成任务分解和执行,并且允许高优先级任务抢占执行,大大提高卫星运管的便捷性和卫星运行的高效性。

该卫星自发射以来一直稳定在轨开展业务,平均每天完成 21 次成像和 11 次数传,如表 3 所示,平均单日拍摄面积高达 110 万平方公里,最长连续无故障运行时间超过 6 个月。该卫星在轨高水平的稳定运行,验证了综合电子系统设计的合理性和有效性,为卫星获取高性能影像数据提供了坚实保障。

表 3 连续 15 日拍摄情况统计

Table 3 Statistics for 15 consecutive days

日期	成像时长/s	成像次数	数传时长/s	数传次数	拍摄面积/万 km^2
2021 年 4 月 15 日	1 213	24	5 131	11	115.48
2021 年 4 月 14 日	1 282	18	5 796	12	122.05
2021 年 4 月 13 日	1 225	20	5 296	12	116.62
2021 年 4 月 12 日	1 154	20	5 047	11	109.86
2021 年 4 月 11 日	1 174	22	5 137	11	111.76
2021 年 4 月 10 日	1 215	23	5 076	11	115.67
2021 年 4 月 9 日	1 178	19	4 871	11	112.14
2021 年 4 月 8 日	1 205	19	5 086	11	114.72
2021 年 4 月 7 日	1 163	21	5 235	11	110.72
2021 年 4 月 6 日	1 334	24	5 752	12	126.99
2021 年 4 月 5 日	1 192	24	5 355	12	113.48
2021 年 4 月 4 日	1 108	20	4 682	10	105.48
2021 年 4 月 3 日	968	15	4 225	10	92.15
2021 年 4 月 2 日	1 283	27	5 301	12	122.14
2021 年 4 月 1 日	1 144	20	4 908	11	108.91

6 结 论

综合电子系统是卫星在轨稳定运行和好用易用的关键。相较于集中式体系架构,分布式体系架构在系统容错能力和扩展性方面具有优势,更能符合大型光学遥感卫星高可靠高性能的应用需求。本文针对大型遥感卫星应用,设计了一种分布式综合电子系统,并且以系统好用易用和可靠运行为根本出发点,详细探讨了卫星运行管理和系统容错机制等关键设计技术。最后,介绍了所设计综合电子系统在某型号卫星上的在轨应用情况,验证了综合电子系统设计的合理性和有效性。

参考文献

[1] 刘振星. 面向遥感卫星的综合电子系统研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
LIU ZH X. Research on integrated avionics for remote sensing satellite [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.

[2] 彭宇,孙树志,姚博文,等. 微小卫星星载综合电子系统技术综述[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(8):1-11.
PENG Y, SUN SH ZH, YAO B W, et al. Review on integrated electronic system technology of micro satellite [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(8):1-11.

[3] 盖建宁,樊友诚,沈莉,等. 萤火一号火星探测器综合电子分系统方案[J]. 上海航天, 2013, 30(4): 139-146.
GAI J N, FAN Y CH, SHEN L, et al. Design of integrated electronic subsystem of yh-1 mars probe [J]. Aerospace Shanghai, 2013,30(4):139-146.

[4] 李于衡,王学梅,孙海忠,等. Dove 卫星高速数传技术分析[J]. 无线电通信技术,2021,47(1):104-109.
LI Y H, WANG X M, SUN H ZH, et al. On high speed data transmission technologies of Dove satellites [J]. Radio Communications Technology, 2021, 47 (1): 104-109.

[5] DigitalGlobe, Inc.; Digital globe selects SSL to build industry-leading worldview legion satellite constellation[J]. Defense & Aerospace Week,2017.

[6] 刘帅,王虎妹. 卫星综合电子系统体系结构总体技术研究[J]. 空间电子技术,2015,12(6):90-94.
LIU SH, WANG H M. Overall design technology of

integrated electronic system configuration for next generation satellites [J]. Space Electronic Technology, 2015,12(6):90-94.

[7] 贾卫松,曾连连,李露铭,等. 北斗三号卫星综合电子系统设计[J]. 宇航总体技术,2020,4(6):50-55.
JIA W S, ZENG L L, LI L M, et al. Design of BeiDou-3 satellite avionics system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020,4(6):50-55.

[8] 陈忠贵,武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(6):835-845.
CHEN ZH G, WU X J. General design of the third generation BeiDou navigation satellite system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020,52(6):835-845.

[9] 刘伟伟,程博文,汪路元,等. 一种分布式航天器综合电子系统设计[J]. 航天器工程,2016,25(6):86-93.
LIU W W, CH B W, WANG L Y, et al. Design of distributed spacecraft avionics system [J]. Spacecraft Engineering, 2016,25(6):86-93.

[10] 李峰. 中国新一代大型地球同步轨道卫星公用平台——东方红五号卫星平台[J]. 国际太空,2020(4):27-31.
LI F. Dongfanghong-5 satellite platform—a public platform for china ′s new generation of large geosynchronous orbit satellites [J]. Space International, 2020(4):27-31.

[11] 雷勇,王文平,张宏宇,等. 资源一号 02D 卫星信息系统总体设计[J]. 航天器工程,2020,29(6):35-42.
LEI Y, WANG W P, ZHANG H Y, et al. Information system design of ZY-1-02D satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2020,29(6):35-42.

[12] 史简,宋智,李国军. “天绘一号”卫星星务分系统研究与实现[J]. 遥感学报,2012,16(S1):74-77.
SHI J, SONG ZH, LI G J. Implementation of mapping Satellite-1’s house keeping system [J]. Journal of Remote Sensing, 2012,16(S1):74-77.

[13] 冯田雨,陈健,王峰. 微纳卫星高性能综合电子系统设计[J]. 光学精密工程,2020,28(9):2056-2064.
FENG T Y, CHEN J, WANG F. Design and implementation of high performance reconfigurable integrated electronic system for micro/nano-satellite [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28 (09): 2056-2064.

[14] 苏星,王慧泉,金仲和. ZDPS-2 实时高可靠综合电子系统的逻辑架构设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(3):628-636.
SU X, WANG H Q, JIN ZH H. Logical architecture design of integrated electronic system with high real-time and reliability in ZDPS-2 pico-satellite [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(3):628-636.

[15] 董静怡,庞景月,彭宇,等. 集成 LSTM 的航天器遥测数据异常检测方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7):22-29.
DONG J Y, PANG J Y, PENG Y, et al. Spacecraft telemetry data anomaly detection method based on ensemble LSTM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2019,40(7):22-29.

[16] 王德波. 基于 FPGA 和 CPU 综合控制星上时间管理系统设计[J]. 电子测量技术,2020,43(10):24-29.
WANG D B. Design of satellite time management system based on FPGA and CPU [J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(10):24-29.

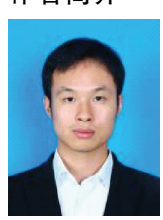
[17] 吴红卫,李铎,顾思洪. 小波滤波在时间同步系统中应用研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):182-189.
WU H W, LI D, GU S H. Research on application of wavelet filtering in time synchronization system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(2):182-189.

[18] 王文平,元勇,王颖,等. 实践十号返回卫星时间同步系统设计与验证[J]. 计算机测量与控制,2017,25(8):237-240.
WANG W P, YUAN Y, WANG Y, et al. Design and verification of time synchronization system of SJ-10 reentry satellite [J]. Computer Measurement & Control, 2017,25(8):237-240.

[19] 李强,李会锋,孙先伟,等. 近地卫星长期 SEU 事件退火分析[J]. 光学精密工程,2019,27(2):458-468.
LI Q, LI H F, SUN X W, et al. Annealing analysis to long term SEUs for LEO satellite [J]. Optics and Precision Engineering, 2019,27(2):458-468.

[20] 孔令波,陈茂胜,等. 商用卫星姿控反作用飞轮控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(12):167-172.
KONG L B, CHEN M Sh, et al. The design and realization of commercial satellite attitude control reaction flywheel control system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (12): 167-172.

作者简介



孔令波,2013 年于电子科技大学获得学士学位,2016 年于中国科学院大学获得硕士学位,现为长光卫星技术有限公司中级工程师,主要研究方向为卫星综合电子和姿控组件研制。

E-mail: kongling_bo@163.com

Kong Lingbo received his B. Sc. degree in 2013 from University of Electronic Science and Technology of China, received his M. Sc. degree in 2016 from University of Chinese Academy of Sciences. Now he is a mid-level engineer in Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. His main research interest includes research of satellite avionics and attitude control components.

陈茂胜(通信作者),2007年于南京理工大学获得学士学位,2012年于中国科学院大学获得博士学位,现为长光卫星技术有限公司副研究员,主要研究方向为卫星姿控系统及其部件的研究。

E-mail: chenms0911@yahoo.com

Chen Maosheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2007 from Nanjing University of Science and Technology, received his Ph. D. degree in 2012 from University of Chinese Academy of Sciences. Now he is an associate researcher in Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. His main research interest includes research on satellite attitude control system and its components.

郑惠中,2013年于吉林大学获得学士学位,2016年于吉林大学获得硕士学位,现为长光卫星技术有限公司中级工程师,主要研究方向为卫星星务软件设计。

E-mail: zhenghuizhong@charmingglobe.com

Zheng Huizhong received his B. Sc. degree in 2013 from Jilin University, received his M. Sc. degree in 2016 from Jilin University. Now he is a mid-level engineer in Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd. His main research interest includes design of house-keeping software for the satellite.