

一种开放式模块化星载综合电子系统的设计与实现

刘伟伟, 于俊慧, 穆 强, 张 溢, 冯国平
(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 为了提升卫星综合电子系统的标准化、通用化设计能力以及智能化、网络化应用水平, 本文提出并设计了一种开放式模块化星载综合电子系统, 通过了工程型号的实际应用验证。该综合电子系统以层次化的总线体系结构以及通用化的硬件模块、软件构件为基础构建形成一套标准服务功能包, 能够根据不同的任务场景按需选装所需的功能单元, 显著提升综合电子系统的货架式集成组装研制能力, 同时借助统一的信息通信服务网络和软硬件基础组件, 为综合电子系统的模块化升级扩展、设备级的功能重构与重组、系统级的故障容忍和恢复能力奠定了坚实的基础, 为实现航天器整体的高质量、高效率、效益研制与运行提供了有力的技术支持。

关键词: 航天器; 综合电子系统; 硬件模块; 软件构件; 标准化; 通用化

中图分类号: V443; TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0053-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220920001

引用格式: 刘伟伟, 于俊慧, 穆强, 等. 一种开放式模块化星载综合电子系统的设计与实现[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 53-60.

Design and implementation of an open modular onboard avionics system

LIU Weiwei, YU Junhui, MU Qiang, ZHANG Yi, FENG Guoping
(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper proposes and designs an open modular onboard avionics system to improve the standardization and generalization design capability as well as the intelligent and networked application level, which has passed the engineering application verification. The avionics system is built on the basis of hierarchical bus architecture and generalized hardware modules and software components to form a set of standard service function packages, which can be selected and installed according to different mission scenarios, significantly enhancing the shelf integration and assembly development capability of the avionics system, and at the same time, with the help of unified information and communication service network and hardware and software base components, a solid foundation is laid for modular upgrade and expansion of avionics system, device level functional reconfiguration and reorganization, and system level fault tolerance and recovery capabilities, and a strong technical support is provided for the overall high-quality, high-efficiency and effective development and operation of the spacecraft.

Keywords: Spacecraft; Avionics system; Hardware module; Software component; Standardization; Generalization

Citation: LIU Weiwei, YU Junhui, MU Qiang, et al. Design and implementation of an open modular onboard avionics system [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 53-60.

引 言

随着天基信息系统的智能化、网络化发展趋势, 对航天器的功能性能以及快速批产、组批发射、组网系统能力提出了更加严苛的要求。

首先, 在系统架构方面, 综合电子系统需要摒弃传统航天器定制设计的思路, 转而实现一种开放兼容的顶层架构, 并在此基础上开展软硬件

产品的设计和研制, 以满足不同型号产品的任务需求实现灵活便捷的按需扩展和升级。其次, 在信息服务方面, 综合电子系统需要从传统的数据处理向信息处理方向转变^[1], 以层次化的总线网络架构实现不同类型平台以及载荷产品的灵活接入, 并作为信息处理中枢, 完成对不同产品生成信息的融合处理, 从而为航天器的自主运行、自主管理、自主决策提供支撑, 实现航天器智能化、自

主化水平提升。第三，在软件服务方面，需要综合电子具备软件定义以及灵活高效的软件在轨重构、升级、维护能力，以适应航天器日益复杂的功能任务变迁和更新^[2,3]。最后，在产品的设计方面，需要综合电子向批量化、产品化、货架式方向发展，一方面可以通过标准产品的选配快速形成所需的功能设备，实现研制效率的提升以及产品可靠性的稳定提升，另一方面可以通过标准产品的选配降低定制产品验证、试验所需的各项支出，达到降低研制成本的目的。

目前，美国以及欧洲等航天强国已经针对综合电子系统建立了相对完善的体系架构和设计规范。欧洲提出的航天电子系统开放式接口体系架构(SAVOIR, Space Avionics Open Interface Architecture)采用空间数据系统的新体制，通过合理的系统架构、信息处理流程、协议和软硬件接口来实现系统的灵活性、高可靠性、高功能密度和高效率^[4]，达到对航天器信息管理、资源管理、运行管理和危机管理的自主管理与运行能力。美国提出的航天通用模块化架构(SUMO, Space Universal Modular Architecture)通过建立标准规范实现航天器电子系统开发成本和研制周期降低的目的，并在此基础上建立空间即插即用体系架构(SPA, Space Plug-and-Play Avionics)，通过标准的软硬件接口和产品实现系统服务的按需加载和自主配置^[5,6]。

因此，综合电子系统作为航天器信息处理与管理的中枢，势必要向着标准化、通用化、智能化、自主化、软件化、轻量化的方向发展，以满足未来复杂、多变、灵活的任务需求。

1 开放式模块化综合电子系统体系架构

综合电子系统采用去中心化的分布式体系架构，以分布式并行处理实现综合电子系统通信能力、计算能力和存储能力的显著提升，从而实现以数据处理为中心向以信息处理为中心的转变，以及从卫星平台的单一管理向卫星平台和载荷一体化的综合管理、全局的任务规划与资源调度的转变。

分布式综合电子系统中，所有设备具有统一的底层硬件支撑、总线体系结构及信息网络服务机制，为航天器提供统一的通信、处理、存储能力，同时也实现了准无主系统设计，系统中的各设备在一定程度上功能对等，可相互替代，具备在各设备之间进行任务迁移、系统重构、协作配合的能力。

1.1 混合触发模式的一体化总线网络系统

总线网络系统是保障综合电子系统通信能力的重要支撑，为实现标准的总线互联架构，便于通过硬件模块的组装形成特定功能的电子设备，建立了一套时间+事件混合触发模式的一体化综合电子总线体系结构。如图1所示。

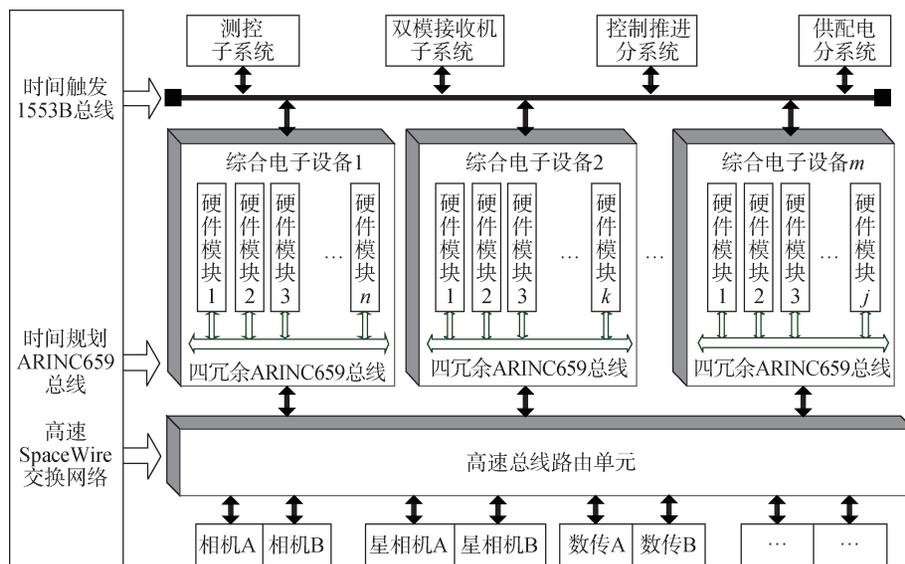


图1 综合电子系统总线体系架构

Fig.1 Bus architecture of avionics system

ARINC659总线作为设备内部硬件模块之间的通信总线，采用时间规划通信方式，将模块之间的数据通信排列形成独立的通信窗口，参与通信的模块和数据收发地址均在窗口中明确规定，使ARINC659总线除了“分时”特性，也具备了“分区”特性，避免了多源数据通信冲突与丢失问题，提升了故障隔离与容忍能力，硬件模块间数据通信效率提升10倍以上。

综合电子系统设备之间以及系统之间，面向不同类型业务数据的传输，采用了1553B与SpaceWire结合的高低速混合异构总线网络结构^[7]。在SpaceWire总线网络中，采用无阻塞直传路由方式克服了星载缓存资源受限瓶颈，单个SpaceWire链路速率达200 Mbps，支持SpaceWire链路接口的按需扩展，解决了平台与载荷大量设备间高速并发数据交互传输难题。同时，针对传统型号1553B总线通信效率较低的问题，设计实现了一种时间规划与突发平衡的时间同步1553B总线控制方法，对通信帧时隙进行多种利用，解决了通信冲突，保证了重要和关键任务以及数据的传输实时性，如图2所示。

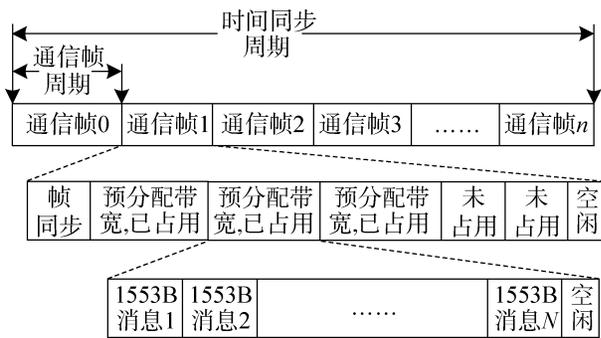


图2 时间同步1553B总线通信机制
Fig.2 Time synchronized 1553B bus communication mechanism

基于时间同步1553B总线通信机制最基本的特点就是通过通信同步服务，把一个时间同步周期内的数据传输划分为若干个通信帧，通过约定特定的数据在特定的通信帧内传输获得确定的传输延迟，并达到均衡总线资源分配的效果^[8]。

1.2 统一信息服务协议体系

为实现对各类设备提供统一的信息服 务以及综合电子系统的分布式信息处理，以国军标、CCSDS、ECSS制定的航天器接口业务标准为核心，

整合、规范、确定了综合电子通信协议体系，采用层次化模型建立了统一的空间通信协议标准体系结构，实现星地、星内通信一体化设计，如图3所示。

基于空间通信协议标准体系，建立了统一的星载网络对象寻址命名机制，通过网络层协议为卫星平台和载荷应用过程提供统一的信息网络寻址路由服务，实现全网范围内的端到端透明信息交换；并基于SOIS标准通过汇聚协议将1553B、SpaceWire等常用星载外部总线、串行数据传输接口、专用硬件接口等通信设备汇聚成具有相同对上业务接口的组件^[9]，根据系统的实际需要进行组装、增加、删除和替换。

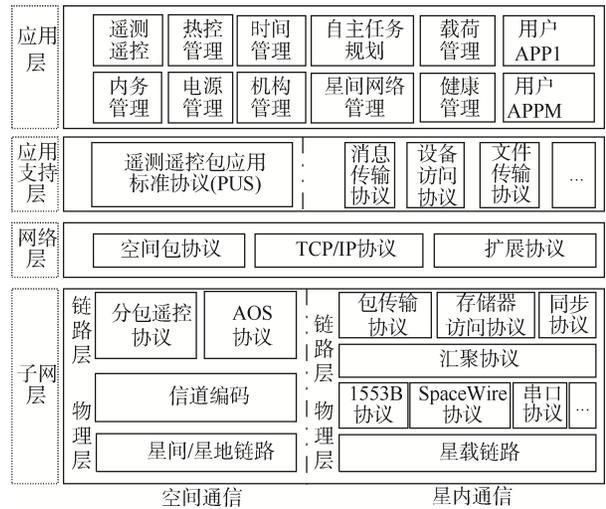


图3 综合电子系统信息服务体系架构

Fig.3 Information service system architecture of avionics system

层次化以及统一的信息服 务通信协议模型为应用程序的升级、分布式信息处理、任务迁移和系统重构奠定了基础，并实现了各层次软件构件的标准化设计，解决了星载软件复用的难题。

1.3 多任务通用、轻小型、模块化硬件产品设计

传统综合电子采用定制化研制模式，不同型号综合电子系统技术状态差异较大，难以实现多场景和多模式应用下可靠性的提升，也难以实现由单批次定制向产品化批量生产模式的升级。

为此，综合电子系统对任务功能进行深入分析和抽象综合，采用硬件模块化(图4)和软件构件化(见表1)的设计模式为综合电子系统提供统一的基础产品支撑，建立统一的电气、机械、测试、集成规范。

表 1 综合电子系统标准软件构件

Table 1 Standard software component for avionics systems

类型	名称
标准协议	VC 处理构件、空间包构件、TC 空间链路协议构件、TC 主信道帧管理构件、TC 虚拟信道帧、1553B 总线管理构件、分时 1553 总线通信协议构件、RMAP 构件
通用基础功能	数据池管理构件、指令序列管理构件、元素周期选择构、延时遥测管理构件、同步异步调度构件、遥控池构件、哈希表构件、缓存池构件
特定功能	事件记录构件、热补丁构件
公共算法	内存操作构件、动态链表处理、IO 缓存管理、队列管理、公共算法库构件、链表构件

在电气及测试规范方面，硬件模块按照通用化框架设计，由功能组件、测试维护及容错电路、电源电路、通用的物理接口电路以及可选的网络层接口组成。其中硬件模块中的功能组件决定了硬件模块的种类以及所能够实现的具体功能，而其他部分组件作为通用的支持单元，将具有特定功能的硬件模块融入到整个系统中，实现硬件模块之间的信息交互以及系统交互；在机械设计以及集成规范方面，制定了以 6 U 标准尺寸为基础的模块和机箱设计规范、设备背板设计规范。

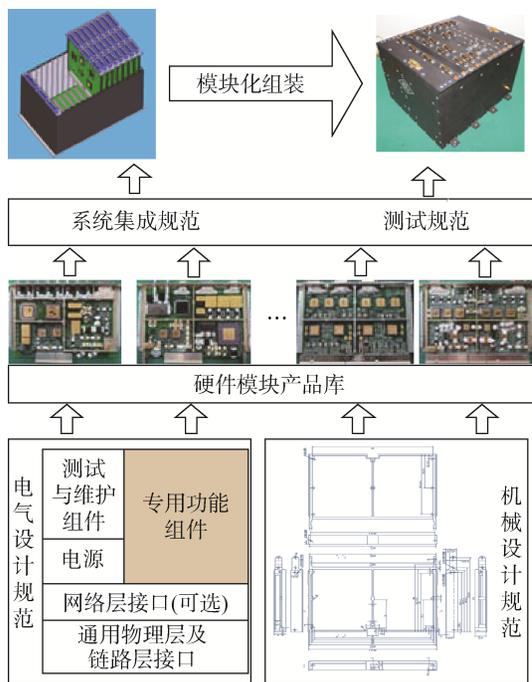


图 4 综合电子系统模块化设计模式

Fig.4 Modular design model for avionics systems

通过对综合电子系统的任务功能分解，形成了处理器模块、存储复接模块、信道关口模块、加解密模块、指令模块、容错模块、遥测采集模块(主)、遥测采集模块(子)、热控管理模块、电源

模块在内的 10 种标准化、高集成硬件模块产品，并且采用 ARINC659 总线作为硬件模块标准的物理层及链路层接口组件，支持其他扩展硬件模块的灵活接入和扩展。如图 5 所示。

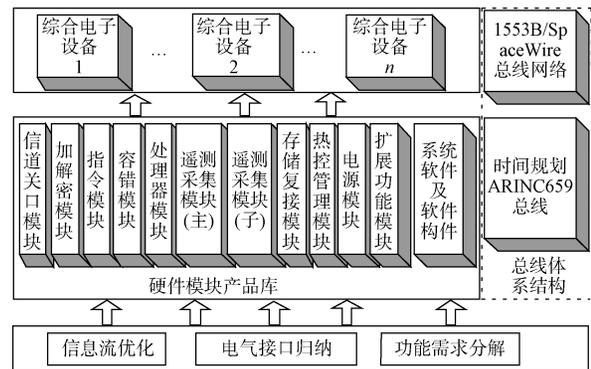


图 5 综合电子系统模块化硬件产品

Fig.5 Modular hardware products for avionics systems

2 综合电子系统软件在轨重构设计

2.1 软件重构网络架构

星载软件重构网络架构如图 6 所示，主要由 SpaceWire 网络、串行数据总线、综合电子计算机以及其他计算机、传感器和执行机构等终端设备组成。综合电子计算机作为星地通信的管理中枢以及 SpaceWire 网络和串行数据总线的主控计算机，完成卫星-地面通信、SpaceWire 路由表维护、任务规划、健康管理、能源管理等功能。综合电子计算机内部集成的存储复接模块作为整个航天器平台的共享存储资源池，实现对小载荷数据、航天器运行日志数据、软件 APP 等数据的存储。其他计算机以及传感器与执行机构作为终端设备，通过 SpaceWire 网络或者串行数据总线接收星载软件重构及升级数据。

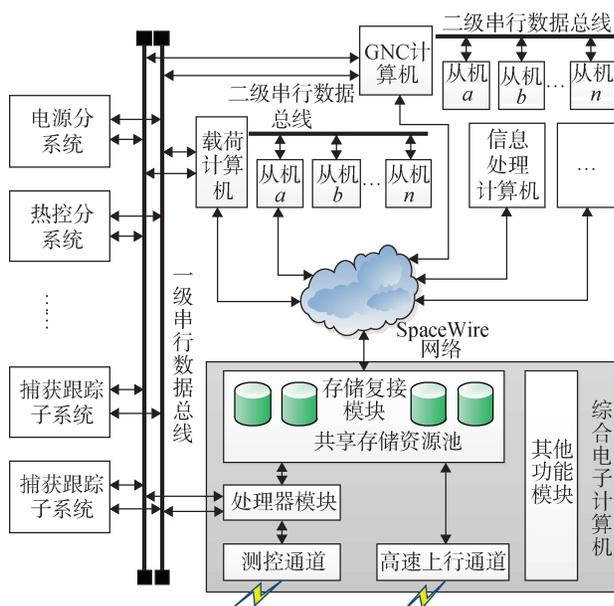


图6 星载软件重构网络架构

Fig.6 Onboard software reconfigures network architecture

当需要对航天器进行软件重构或升级更新时，地面站可通过测控信道将软件重构数据发送至航天器综合电子计算机，由综合电子计算机中的处理器模块进行处理后，通过串行数据总线进行分发或者交给存储复接模块通过 SpaceWire 网络进行分发。地面站也可通过高速传输信道直接发送至存储复接模块，由存储复接模块通过 SpaceWire 网络进行分发，或者由存储复接模块首先进行存储，在合适的时机再将其分发到所需的设备中。

2.2 航天器共享存储资源池

在航天器软件重构网络中，存储复接模块作为整个航天器平台的共享存储资源池对星载软件的重构与升级具有至关重要的作用。存储复接模块既是软件重构与升级数据的存储中心，也是进行软件分发的中转中心。因此，为了提升不同类型数据在存储复接模块中进行存储的好用性与易用性，并且保证各类数据之间的相互隔离以提升存储的可靠性，在存储复接模块中设计实现了一种混合文件系统，可实现静态文件与动态文件两种不同类型文件的管理^[10]，如图7所示。

混合文件系统基于 NAND Flash 的并行以及流水设计，具有完备的容错机制，对存储数据进行纠错编码，Flash 存储块的坏块自动替换等。其中，静态文件支持循环写入、边擦边记，存储容量在

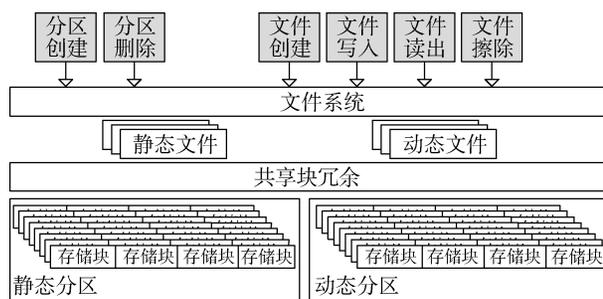


图7 混合文件系统结构框图

Fig.7 Hybrid file system architecture block diagram

轨可调整，用于长期日志数据记录；动态文件根据在轨存储需求实时创建，用于注入程序、环境监测数据的记录，容量根据写入数据量需求自动追加，使用完毕后自动删除。

同时，针对大容量存储模块还设计了统一的访问控制指令集，实现所有文件统一访问接口，屏蔽了 NAND FLASH 的底层访问细节，大幅提升了用户对大容量存储模块访问的便捷性。

2.3 软件维护控制器的设计

软件维护控制器位于各个终端设备中，能够在终端设备正常运行过程中，接收重构或升级的软件数据，完成软件的在线维修、升级、检错、纠错等功能，实现对星载软件的无感重构，还可完成对 CPU、DSP、FPGA 等器件的软件 APP 选择、启动以及加载配置管理等功能。并且采用标准化的格式实现对软件维护数据的包装，实现不同设备和软件维护信息接口的统一化，简化了软件在线维护操作复杂度，提升航天器电子系统软件在轨维护的效率和可靠性。

软件维护控制器主要由网络通信接口单元、CPU 接口单元、FPGA 接口单元(包括 SEFI 检测单元、FPGA 动态刷新单元、FPGA 定时回读单元、FPGA 加载配置单元)、存储器接口单元、控制寄存器以及状态寄存器等几部分组成，如图8所示。

软件维护控制器通过对 CPU/DSP 的复位控制实现软件加载控制，通过 SelectMAP 接口实现 FPGA 加载配置，对非易失存储器的控制包括擦除、编程、读取等功能，并可根据接收到的指令选择非易失存储器的读取区域，将该区域的软件加载到 CPU、DSP 或者 FPGA 中，实现对软件 APP 的选择管理，提升航天器对多任务处理以及软件定义能力的支持。

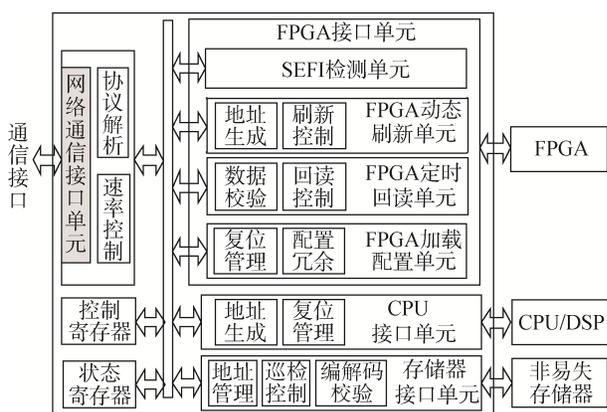


图 8 软件维护控制器组成框图

Fig.8 Block diagram of software maintenance controller

软件维护控制器提供了 SpaceWire、UART、SPI 接口，通过 SpaceWire 接口可使软件维护控制器直接接入星载软件重构网络，通过 UART、SPI 接口可使软件维护控制器通过桥接电路接入 SpaceWire 网络或者 1553B 等串行数据总线。网络通信接口的连接关系如图 9 所示。

借助于软件维护控制器提供的 UART 以及 SPI 接口，使之能够在不直接连接到 SpaceWire 交换器的情况下使用，一方面可以降低对 SpaceWire 交换器接口数量的需求，另一方面可以在只有 1553B 等总线接口的设备中使用，保证了软件控制器具有更加灵活的接入手段和更加广泛的应用环境。

3 综合电子系统任务迁移与重组设计

综合电子系统统一的货架模块组装及信息服务体系使综合电子系统计算机集群成为物理上分离、逻辑上统一的一体化电子系统，能够在故障情况下实现集群内的功能迁移和信息流重定向，系统重构后能够保证逻辑功能不变，用户无感。首先，混合触发模式的一体化总线网络系统以及统一的信息服务协议体系能确保故障设备的功能迁移至其他设备后，仍然能够保证系统信息流的正常运行；其次，软件在轨重构功能确保设备接管故障设备的功能后，能够在必要的时候进行软件任务以及功能的调整，确保综合电子系统关键及核心的任务功能不丢失、不降级。

① 系统管理功能迁移：综合电子系统正常工作期间，多台设备中仅有一台设备(系统管理单元)作为系统管理核心，当该设备故障后，可由其他

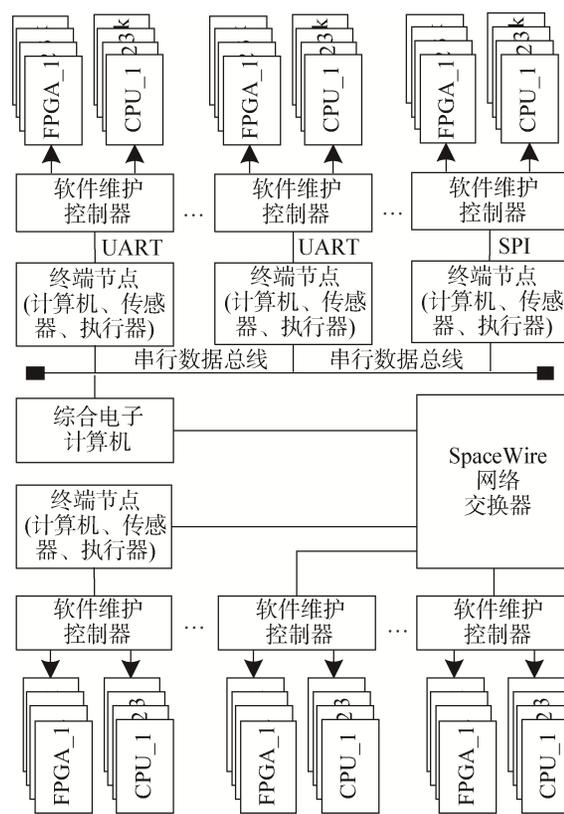


图 9 软件维护控制器网络通信接口连接关系示意图

Fig.9 Diagram of communication interface connection relationship of the software maintenance controller

设备(接口管理单元)接管系统管理核心功能，包括总线协议的管理、数据管理、遥测遥控、任务管理、健康管理等，如图 10 所示，接口管理单元 1 接管系统管理单元功能后，首先接管 1553B 总线的 BC 功能，实现对卫星 1553B 总线通信的管理，同时直接从上行注入分发单元中接收地面上注的指令和数据，并将卫星的工作状态进行遥测组帧后直接通过下行遥测合路单元传输到地面。

② 星-地通信数据流重定向：综合电子系统正常工作期间，系统管理单元通过测控链路接收地面上注的指令和数据，并负责直接指令的输出，当测控链路故障后，系统管理单元可通过中继链路进行地面指令和数据的接收，并将直接指令输出迁移至间接指令输出。接口管理单元工作期间负责间接指令的输出，当间接指令通道故障或者接口管理单元处理器故障时，可由地面通过直接发送直接指令的方式实现对故障间接指令通道的接管，如图 11 所示。

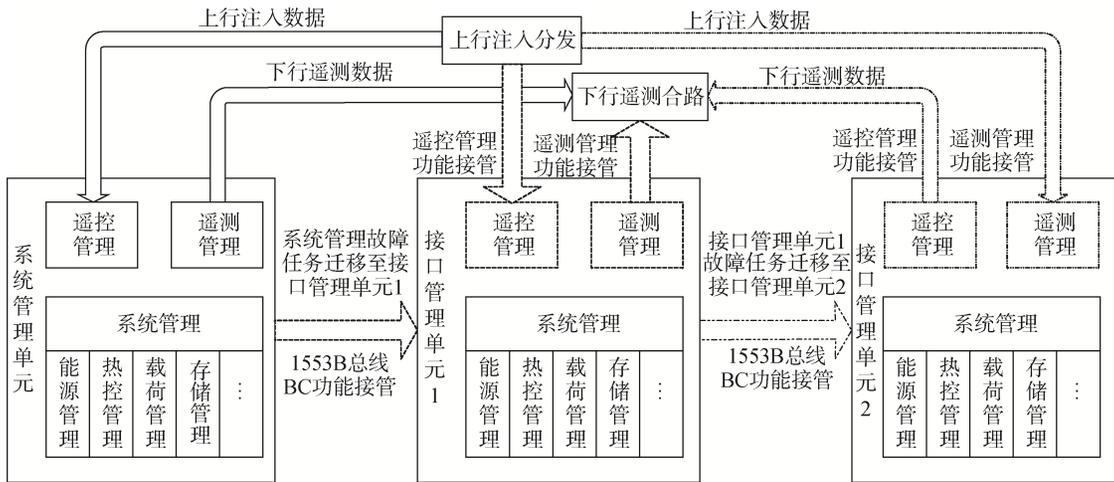


图10 系统功能任务迁移及信息流重定向

Fig.10 System functional task migration and information flow redirection

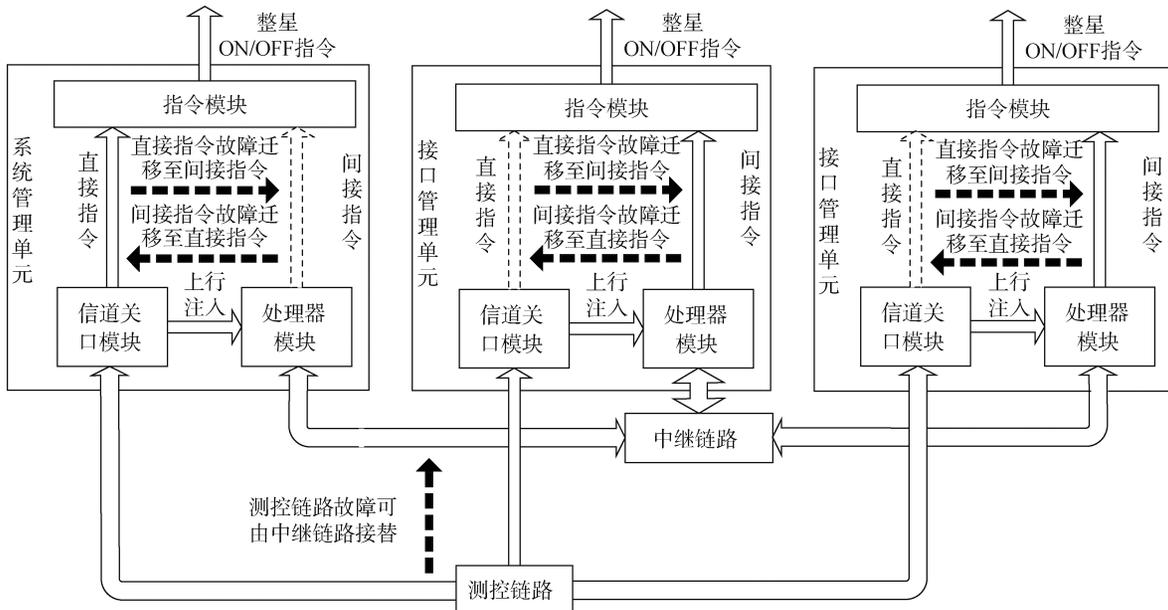


图11 测控及指令任务迁移及信息流重定向

Fig.11 Measurement and control and instruction task migration and information flow redirection

③ 分布式存储系统信息流重定向：存储复接模块处理可通过 ARINC659 总线受本设备内部的处理器模块进行管理与控制之外，还可直接通过 SpaceWire 网络接受其他设备的控制和管理，当本设备内部的处理器模块故障后，可将存储系统的控制单元迁移至其他设备，实现海量数据管理的动态迁移。

4 结束语

综合电子系统通过从顶层用户业务到底层设备全过程进行体系化的分层规划，提出了星载综

合电子系统去中心化体系结构，建立统一的电气、机械、测试、集成设计规范，形成了完整的业务和协议框架、研制了标准化通用的核心芯片与软硬件货架式产品，经过了多个工程型号的飞行验证，实现了基于标准硬件模块和通用软件构件组装形成综合电子系统产品的研制模式，使综合电子系统重量体积均降低 30% 以上，产品复用率达 100%，显著提升了型号研制效率和可靠性，并首次提出面向时间触发及高低速混合的总线网络系统，使数据通信速率提升 10 倍以上。同时，构建了以综合电子系统为核心的集成航天器软件高速

上注、集中存储及异步加载的软件在轨重构体系, 解决了航天器大型软件难以实施在轨升级的难题。通过任务迁移以及信息流重定向机制实现了故障自主管理与恢复, 大幅提升航天器的自主运行管理能力。

参考文献

- [1] 赵和平. 以综合电子技术构筑航天器智能化坦途[J]. 航天器工程, 2015, 24(6): 1-6.
ZHAO Heping. To build a highway to spacecraft intelligentization with avionics technology[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(6): 1-6.
- [2] 詹盼盼, 曹雅婷, 张翠涛, 等. 卫星高功能密度综合电子系统设计[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(1): 87-93.
ZHAN Panpan, CAO Yating, ZHANG Cuitao, et al. High functional density avionics system for satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(1): 87-93.
- [3] 邢卓异, 朱舜杰, 黄晓峰, 等. 软件定义航天器系统架构设计[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 1-7.
XING Zhuoyi, ZHU Shunjie, HUANG Xiaofeng, et al. Design on software-defined spacecraft system architecture [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(5): 1-7.
- [4] 吕良庆, 黄永辉, 安军社. 基于 CCSDS-SOIS 的航天器数据管理系统体系架构的探讨[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(3): 506-514.
LYU Liangqing, HUANG Yonghui, AN Junshe. Discussion on onboard data management system architecture based on CCSDS-SOIS[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2018, 54(3): 506-514.
- [5] 汪明晓, 岳晓奎, 马卫华, 等. 基于转换模块的空间即插即用综合电子系统研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(11): 118-123.
WANG Mingxiao, YUE Xiaokui, MA Weihua, et al. Research on space Plug-and-Play integrated electronic system based on the conversion module[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(11): 118-123.
- [6] 顾常青, 李一, 田宏存. 美国即插即用卫星应用对小卫星综合电子发展的启示[J]. 国际太空, 2016, (3): 16-22.
GU Changqing, LI Yi, TIAN Hongcun. Enlightenment of U.S. plug and play satellite application on small satellite Integrated Electronics[J]. Space International, 2016, (3): 16-22.
- [7] 于俊慧, 穆强, 牛跃华, 等. 基于 1553B 和 SpaceWire 组合网络的星载数据管理软件设计[J]. 航天器工程, 2021, 42(4): 53-59.
YU Junhui, MU Qiang, NIU Yuehua, et al. Onboard OBDH software design based on combined network of 1553B and SpaceWire[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 42(4): 53-59.
- [8] 于俊慧, 袁珺, 张红军, 等. 基于时间同步 1553B 总线通信协议的总线监视与仿真软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 136-139.
YU Junhui, YUAN Jun, ZHANG Hongjun, et al. Bus monitor and simulation software design based on time synchronization 1553B communication protocol[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(12): 136-139.
- [9] 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 Weisong, ZENG Lianlian, LI Luming, et al. Design of Beidou-3 Satellite Avionics System[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(6): 50-55.
- [10] 穆强, 牛跃华, 于俊慧, 等. 应用 SpaceWire 网络的航天器分布式存储系统设计[J]. 航天器工程, 2019, 28(2): 78-84.
MU Qiang, NIU Yuehua, YU Junhui, et al. Design of Spacecraft Distributed Storage System Using SpaceWire Network[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(2): 78-84.

[作者简介]

刘伟伟 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为星载综合电子设计和高性能计算技术。

于俊慧 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间数据系统和星载软件设计。

穆强 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间数据系统和航天器数据管理。

张溢 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为星载综合电子系统设计。

冯国平 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为星载综合电子系统设计。

(本文编辑: 潘三英)