“鹊桥二号”中继星综合数据处理与传输关键技术研究与实现

雷维宁[1]，璩泽旭[1,2]，王秋平[1]，熊 亮[3]，徐 进[1]，党 妮[1]，戴梓怡[1]，王洪泽[4]，张 超[1]

（1. 西安空间无线电技术研究所，西安 710000；2. 西安电子科技大学 空间科学与技术学院，西安 710126；
3. 航天东方红卫星有限公司，北京 100094；4. 西安微电子技术研究所，西安 710054）

摘 要：面向“鹊桥二号”中继通信载荷需满足深空探测多次任务提供中继通信服务等需求，提出一种高性能、高集成、高可靠的综合数据处理与传输设计方法，主要完成前端多源数据调度管理、上注重构与最小系统设计、大容量固存均衡磨损等关键技术的研发。经地面测试及在轨验证，该系统实现了探月多次任务多器和地面站之间的中继通信服务。深空探测超8 Gb/s存算控一体化技术，能支持软件在轨重构，对地回传速率首次覆盖1～500 Mb/s，并有效支撑了“嫦娥六号”人类首次月球背面采样返回任务的顺利实施，可为后续深空探测任务数据处理与传输设计提供参考。

关键词：“鹊桥二号”中继星；综合数据处理与传输；一体化；可重构；最小系统

中图分类号：TN925 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2026)02-0107-10

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250043

引用格式：雷维宁，璩泽旭，王秋平，等. “鹊桥二号”中继星综合数据处理与传输关键技术研究与实现[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（2）：107-116.

Reference format: LEI W N，QU Z X，WANG Q P，et al. Research and implementation of key technologies for integrated data processing and transmission of Queqiao-2 relay satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（2）：107-116.

引 言

“鹊桥二号”是针对探月四期月球着陆任务所研制的月球中继卫星，支持月球探测多任务实施，实现月球背面及极区多次任务及多器（“嫦娥六号”“嫦娥七号”“嫦娥八号”、月球科研站等）与地球之间的中继通信等服务，支持深空甚长基线射电干涉仪（Very Long Baseline Interferometry，VLBI）等科学载荷，在轨开展科学探测。其中，中继通信载荷综合数据处理及传输设备是中继通信载荷的关键和核心[1-2]，负责完成所有探测器数据及科学载荷数据调度、中继存储转发等，其示意图如图1所示。

为保障前端数据能快速、灵活、高可靠地传输至地面，本文提出将核心载荷——中继通信载荷数据处理、下位机、伺服控制、高级在轨系统（Advanced Orbiting System，AOS）编码和大容量存储等功能集成一体，实现小型化、轻量化、模块化设计的综合数据处理与传输设备，以实现深空探测多用户数据接收、8 Gb/s数据处理和大容量中继存储转发能力，同时软件具备在轨可重构的功能。

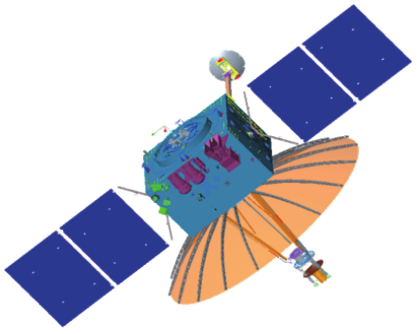


图 1 “鹊桥二号”中继星示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Queqiao-2 relay satellite

文献[3]提出了标准化、智能化、模块化的数据处理与传输分系统，数据通道采用超大规模并行处理和多线程流水技术，以实现高速数据带宽和同时读写的要求。文献[4]提出一种基于实时坏块检测、标注和坏块数据自主搬移、坏块自主回收的固态存储器坏块管理方案，降低了再生超级坏块数据的错误扩散和重复错误的概率。文献[5]采用存储空间映射的方法实现对非易失闪烁存储器（FLASH）坏块故障的屏蔽，保证了长期工作时数据存储的高可靠性。然而大容量固存

收稿日期：2025-06-10 修回日期：2025-09-04

基金项目：国家自然科学基金（62271399）；中国科协青年人才托举工程（2023QNRC001）

因反复擦写导致寿命末期存在存储容量下降的问题，对于NAND FLASH的均衡磨损开发还很匮乏。文献[6]提出一种基于RS422总线和控制器局域网络（Controller Area Network，CAN）总线，开发设计了具有可靠数据接收校验手段及多协议分发通道的软件重构系统，可确保重构目标单机准确无误地接收到正确的重构数据。但校验手段只能检测出误码，而不能对误码纠错。

针对探月四期任务“鹊桥二号”中继通信载荷多用户接口、多数据类型、多速率转换的需求，提出基于多源数据调度管理技术的解决方案，实现多用户节点动态接入与退出、多任务协同调度、数据实时路由转发与动态缓存优化，以解决突发访问的不确定性、随机时延与丢包的问题，目的是保障地月信息传输的高可靠性。为满足地月在轨中继通信设备长寿命、在轨可重构的需求，提出基于软件可重构的最小安全系统方法，支持应用程序（APPlication，APP）快速上注至卫星，实现异常状态〔如单粒子翻转（Single-Event Upsets，SEU）〕下系统的自恢复。针对卫星寿命末期存储容量需求，设计基于多阈值的磨损均衡（Multi-Threshold Wear Leveling，MTWL）算法，通过多阈值回收机制与冷热数据分离策略，显著降低额外擦除代价。结果表明，MTWL算法可确保8年寿命末期存储容量，满足任务要求，且擦写寿命优于现有典型算法。

1 中继系统架构设计

综合数据处理器（综合数据处理与传输设备）做为中继通信分系统能源流、控制流和数据流的中枢产品，功能复杂、集成度高，将供配电管理、下位机、AOS复接、低密度奇偶校验码（Low Density Parity Check Code，LDPC）/RS（Reed-Solomon）编码、固态存储、伺服控制等功能集成于一体，并管理整星前向链路、返向链路、对地数传链路的供配电、遥控遥测、数据处理等功能，以及测控链路共13台设备的软件上注重构，其系统原理框图如图2所示。

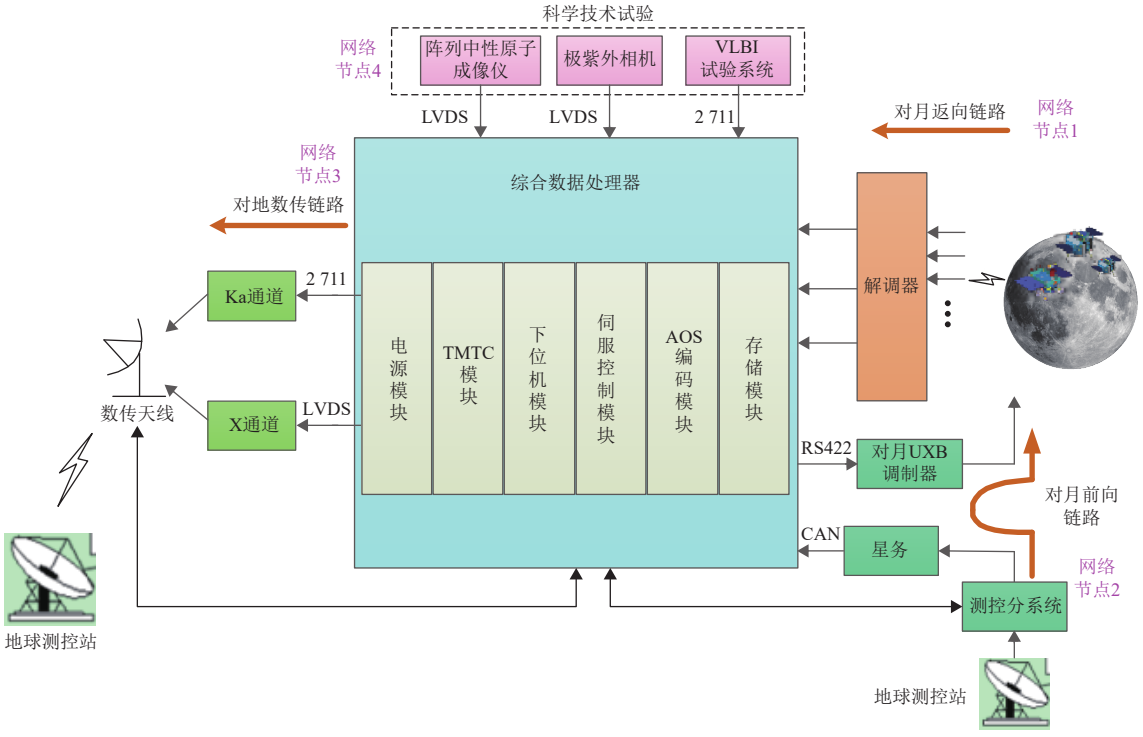


图 2 综合数据处理与传输设备系统框图

Fig. 2 Block diagram of integrated data process and transmission equipment system

综合数据处理器作为中继通信分系统数据流和控制流的中心节点，对外与科学载荷分系统、星务分系统、天线分系统、制导、导航与控制（Guidance Navigation，and Control，GNC）分系统、测控分系统5大分系统设备保持通讯，对内与对月调制器、对月解调器、对地Ka调制器等分系统设备相连，完成分系统供配电及指令控制，以及信道编码、存储、伺服等功能。

单机通过底座12块插板式结构实现轻量化、低功耗与高可靠，结构框图如图3所示，核心模块包括：电源板，支持 + 30 V至多级电压转换，保障分系统供电；遥测遥控（TeleMetry and TeleCommand，TMTC）

板，基于RS422总线实现遥控遥测与软件重构功能；伺服控制单元，驱动数传天线两轴电机，反馈位置信息；下位机，通过CAN总线与星务平台通信，完成分系统内各单机的间接指令控制和遥测功能；AOS编码单元，接收科学载荷和月球探测器等数据，生成AOS帧码流，支持8 Gb/s数据吞吐、实时或延时传输；固存单元实现数据记录、回放、边记边放、文件管理等功能。

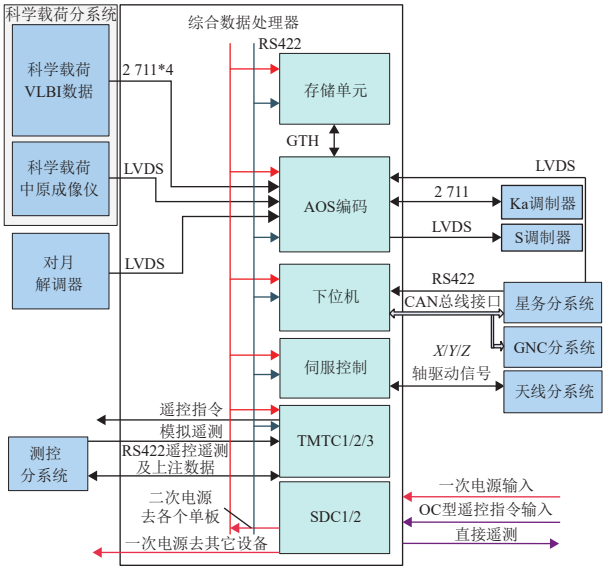


图 3　综合数据处理器结构框图

Fig. 3　Principle block diagram of integrated data processor

系统架构既保留了传统数传分系统的功能，又减少了单机数量。这种高集成度设计优化了系统的组成与单机间接口，实现了产品体积、重量及互联电缆的减小，并降低了联试难度、提高了测试效率。一体化系统架构设计如图4所示。

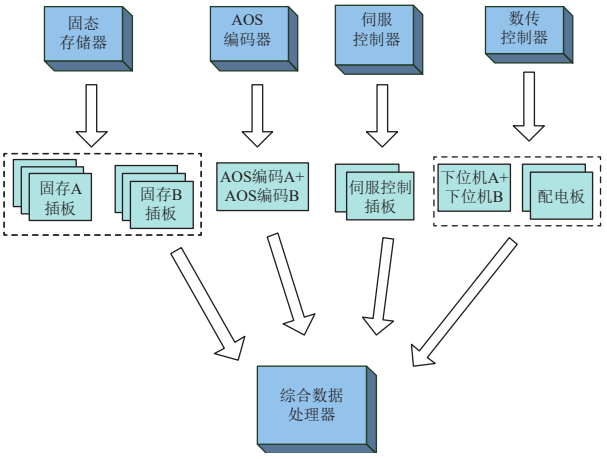


图 4　一体化系统架构设计

Fig. 4　Integrated system architecture design

单机内高集成度设计引入了电磁兼容（Electro Magnetic Compatibility，EMC）和热设计难题。在EMC电磁兼容设计方面，通过规划单机内部功能模块的分布，梳理单机内部所有的低频时钟、高频时钟使用条件，分组布局、规划，在信号流向、电源和地的分布等方面进行有效设计，以保证单机内部良好的电磁兼容特性。在热设计方面，集成度高、单机散热面积小，加上突发的科学载荷数据率高，部分模块的热设计面临严峻的考验[7-8]。本文主要从单机使用模式和针对性散热措施两个方面解决热设计问题。对工作过程中产生热耗较大的现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array，FPGA）、存储器、电源模块等采取降低热阻、增大热传导面积的方法，将热尽快传导出去，使发热器件结温满足降额的要求[9-10]。

2　中继星综合数据处理

2.1　多源数据调度管理

“鹊桥二号”中继星需同时处理来自探测器的关键工程、遥测以及各类科学载荷的观测数据。综合数据处理与传输设备前端数据源信息数据种类多、码速率差异大、各种源数据需独立异步工作可变性强，如何有序调度管理前端数据源，是综合数据处理与传输设备面临的一大挑战[11]。这些数据具有速率各异、突发性不同、重要性等级分明的特点。其中，探测器数据具有数据率低但优先级高的特性，而科学载荷数据则通常数据率很高但优先级相对较低。中继通信载荷采用7系列FPGA和高速2711接口，产品在轨长期开机，针对单粒子翻转问题，为保证数据的高可靠性，提出一种基于优先级链的硬件轮询状态机制，并为其集成了三模冗余（Triple Modular Redundancy，TMR）表决系统，在保证极高可靠性的同时，实现了严格按优先级次序的服务质量（Quality of Service，QoS）与高效地利用带宽。核心设计思路：以“优先级链式查询”为核心，以“虚拟信道数据单元（Virtual Channel Data Unit，VCDU）帧满”为调度触发事件，辅以动态缓存管理，并在最关键的控制路径采用TMR加固。

1）输入缓存与异步处理

各信源数据通过高速接口送入FPGA后，首先写入独立的异步先进先出（First In First Out，FIFO）缓冲区。此设计旨在隔离不同速率的源端，吸收突发数据。每个FIFO的深度经过精心设计，确保其写入带宽（各信源峰值速率之和）小于读出带宽（下行链路编码后速率），此为避免缓存溢出的根本条件。一旦FIFO深度超过预设阈值，将触发警告，并写入存储单

元，从根本上杜绝因调度不及时导致的丢失问题。

2）基于优先级链的硬件轮询调度器

（1）优先级固定次序

调度器按照预先烧录的固定优先级次序（从高到低） 进行循环查询，即始终从优先级最高的探测器数据队列开始。

（2）“帧满”触发传输

查询判断逻辑极为简洁，检查当前队列对应的FIFO中有效数据是否足以组成一个完整的VCDU帧。若满足条件，则立即启动该队列数据的读出、组帧和发送流程。

（3）“帧不满”则轮询

若当前最高优先级队列数据不足一帧，则状态机并非等待，而是立即切换到次高优先级队列进行相同的“帧满”判断。此过程直至找到满足“帧满”条件的队列为止。

此机制确保了高优先级业务因其数据量小，当集满一整帧，具备优先中断轮询过程并获得服务，天然实现低时延。同时，当高优先级业务间歇时，低优先级的高速业务能充分利用空闲时段组成整帧并被发送，极大地提高了信道的利用率。该实现无需计算虚时间或进行排序，复杂度极低，非常适合高速硬件流水线处理。

3）高可靠三模冗余设计

为应对空间单粒子效应，对整个轮询调度状态机、优先级次序寄存器及相关的控制逻辑进行三模冗余设计。即使用3套完全相同的逻辑并行运行，并通过一个多数表决器（Voter）对输出控制信号（如读使能、多路选择信号）进行最终裁决。单一模块因单粒子翻转发生的错误输出会被另外两个正确模块纠正，从而保证调度功能的持续正确。

4）虚拟信道映射与输出

被调度选中的数据块随后被组装成空间数据系统咨询委员会（Consultive Committee for Space Data System， CCSDS）标准的VCDU格式[12]，并映射到对应的虚拟信道。高优先级数据固定映射至专属虚拟信道（High-Priority Virtual Channel，VPVC），其VCDU发送请求享有绝对优先权。低优先级数据共享另一虚拟信道（Low-Priority Virtual Channel，LPVC），其发送机会由上述轮询调度器决定。提高数据传输质量、降低误码率、CCSDS标准格式组装器可对发送数据进行循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check，CRC）、差错编码等一系列编码控制。其标准格式组装器原理框图如图5所示。

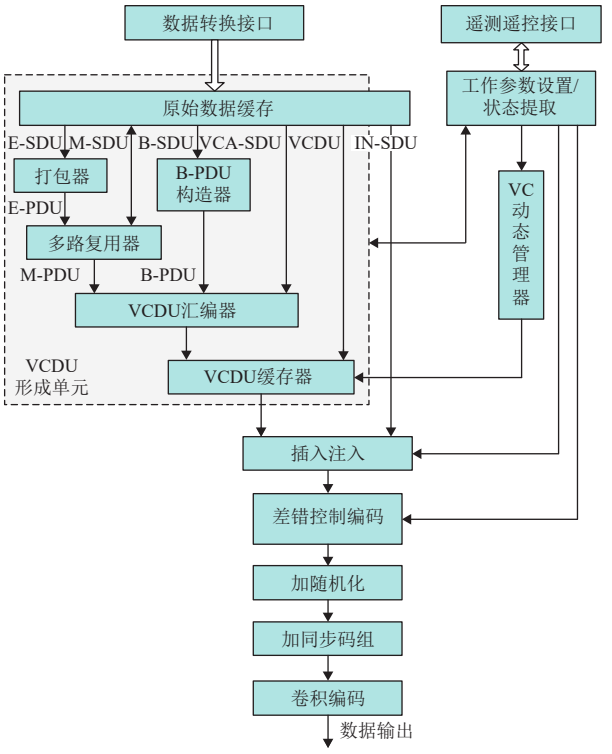


图 5 CCSDS标准格式组装器原理

Fig. 5 Principle of CCSDS standard format assembler

2.2 上注重构与最小系统设计

与“鹊桥一号”中继星相比，“鹊桥二号”中继星增加了上注重构功能，提升了卫星在轨配置的灵活性，以适应未来更多场景的中继服务需求。不同于地面环境，卫星APP软件上注需利用宝贵的星地链路，传输时间受限，且存在误码或中断等异常情况，同时卫星受到空间单粒子的影响，已注入存储器的APP在轨存在单粒子翻转的概率。假如存储区的APP产生错误，可能引起硬件加载失败，进而导致卫星功能失效[1]。针对该问题，本文提出软件上注重构的最小安全系统技术，目的是保证在上注异常或发生单粒子翻转时，系统依然安全、可靠。

为满足中继星软件可重构及处理参数上注的要求，必须具备程序和数据上注的通道，通过可靠的途径将配置和目标数据从地面传输到星上，目前可用的传输途径有测控信道、业务信道及专用信道。综合数据处理器通过接收不同的配置数据来实现不同的管理与处理算法配置，即以软件方式实现中继星数据处理的功能，并经过地面验证样机仿真验证生成可配置程序文件的重构体，进而适应不同探测器的中继需求[13]。

综合数据处理的硬件平台完全可重构，硬件平台由控制单元（下位机）和功能单元（AOS编码单元、

存储单元、返向解调器等）两大部分组成，控制单元负责载荷平台的指令接收、遥测采集上报、APP软件更新和集中存储等功能。功能单元可根据用户需求，灵活进行配置，涵盖了FPGA、中央处理器（Central Processing Unit，CPU）等高性能可编程器件，上注重构系统方案如图6所示。

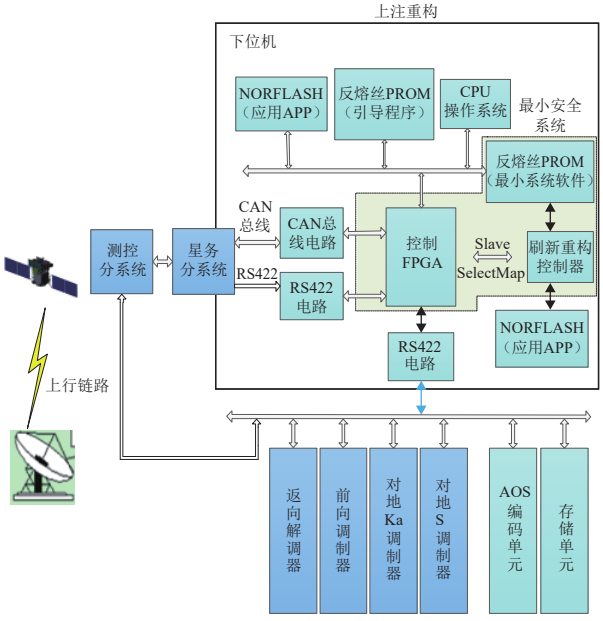


图 6　上注重构系统方案

Fig. 6　Refactoring system solution for upward annotations

本文提出基于刷新重构控制器 + 可编程只读存储器（Programmable Read-Only Memory，PROM）+ NOR FLASH的容错架构，解决空间环境中单粒子翻转导致的系统失效风险。

1）多层级冗余防护机制

汉明码（72，64）+ 三模冗余，其中汉明码（72，64）具备纠一检二的能力，选取的（72，64）码型的码率高，信息位为字节的整数倍，且抗干扰能力强。根据相同的一组硬件单元同时出现错误的概率要比在单一硬件单元出错的概率较小的原理，增加了三模冗余，采用三取二的多数判决以此作为系统的正确输出[14-15]。

2）自适应故障切换与自恢复

如果系统上电后，从NOR FLASH读取的APP软件发生翻转，且经过汉明码 + 三模冗余后仍然存在错误。为解决该问题，本文设计高可靠的反熔丝PROM电路。那么刷新重构控制器可自动获取失败信息，并自适应切换到PROM读取，完成控制FPGA加载。最小安全系统的执行流程如图7所示。

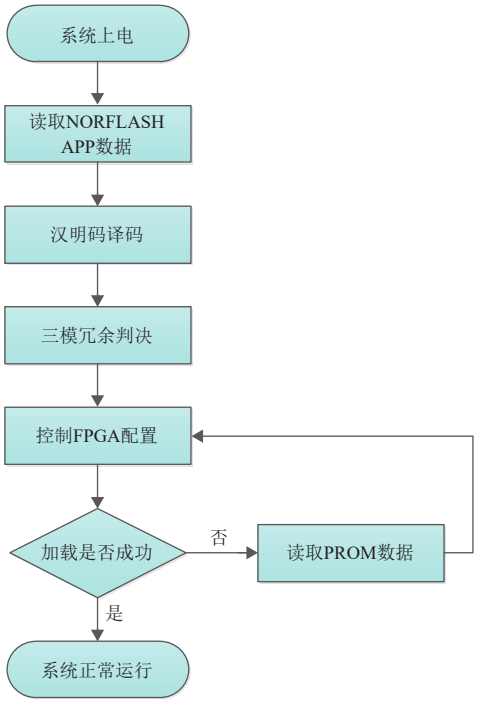


图 7　最小安全系统执行流程

Fig. 7　Minimum security system execution process

本文设计的刷新重构控制器 + PROM + NOR FLASH架构，既满足了“鹊桥二号”中继星具备在轨重构能力，又保障了系统的高可靠性。

2.3　基于多阈值的静态磨损均衡算法

面对探测器及科学载荷的大数据量接收及转发，需综合数据处理且传输设备具备大容量数据存储的能力以满足任务需求，尤其在存储设备的寿命末期，如何采用磨损均衡技术进行扩大容量存储。现有磨损均衡技术分为动态与静态两类：动态均衡聚焦热数据管理，算法简单但难以实现全局均衡；静态均衡通过冷数据迁移优化全局磨损，但存在数据迁移开销大、资源占用高的问题[16-18]。基于MTWL算法提出以下优化策略：多阈值回收机制，动态选择擦除次数最小的块回收，权衡数据搬移代价与均衡效果；双向链表空闲块管理，优化冷数据迁移与新数据分配，减少无效擦除操作；冷热数据分离策略，识别并隔离冷热数据，抑制块翻转现象，降低突发负载的影响。

MTWL的核心目标并非追求实时均衡，而是确保存储寿命末期所有块的擦除次数趋近一致。该算法通过多阈值协同控制，显著降低资源的消耗，同时提升全局磨损均衡效率与存储寿命[19-20]。

2.3.1　基于阈值的回收块选择策略

针对YAFFS2算法在回收块选择中的不足，引入块年龄（*age*）参数优化评估机制，综合衡量数据更新频

率与写放大效应，即

$$\frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}} = age \times \frac{1-u}{2u} \tag{1}$$

其中：age为块从分配至当前的时间跨度，擦除后清零；U为块内有效数据占比，反映数据搬移开销。

策略核心：优先选择age最大且有效数据最少（即Benefit/Cost比值最高）的块回收。但实际场景中，高age块常存储冷数据（有效数据占比高），导致比值偏低。为此，设定阈值Th1，筛选满足：$\left(\frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}}\max - Th_1\frac{\text{Benefit}}{\text{Cost}}\max\right)$的块纳入回收池，并按擦除次数降序执行回收，直至满足系统空闲块需求。该机制通过延迟高磨损擦除，显著降低写放大效应，延长存储寿命。

2.3.2 基于双向列表的空闲块管理机制

将回收后的干净块插入clean_list链表，本文提出使用有序双向链表来管理空闲块，空闲块按照擦除次数由小到大排列，采用二分法查找搜索算法确定当前回收块的插入位置。每次写入新数据时选择表头元素标记的物理块分配，而进行冷数据搬移时则选择表尾元素标记的物理块，这样可将热数据写入擦除次数较小的块，同时将冷数据搬移到磨损最大的块，而且插入回收块的算法时间复杂度为$O(\log_2 N)$（其中N为列表的长度）[21-22]。

2.3.3 冷热数据分离策略

对于YAFFS2（Yet Another Flash File System）中冷热数据混存的问题，本文提出引入冷热数据分离策略。冷热数据分离策略不仅能收集冷数据，有效避免热数据更新时冷数据被迫更新的现象，还可有效解决冷数据突然变热或者热数据突然变冷的块反转情况。在系统运行过程中，一旦检测到块的最大、最小擦除次数差值达到阈值$Th2$，将擦除次数最小块的有效冷数据搬移到擦除次数多的块。当冷池中的块被热数据占据或者热池中块被冷数据占据时，冷热数据分离策略也能处理这类块反转问题。数据的冷热程度对块的擦除次数会产生直接影响，因此冷热数据分离策略通过块擦除次数来判断数据温度。具体操作步骤如下。

1） 初始化：剔除初始坏块后，将NAND FLASH中剩余块按3∶1分为两个部分，前者放到冷池，后者放入热池。

2） 数据交换：找出热池中擦除次数最多的块A（用max_wear表示擦除次数），冷池中擦除次数最少的块B（用min_wear表示擦除次数）。当max_wear-min_wear > $Th2$时，立即进行数据搬移。首先将块A的有效数据转存到空闲块链表clean-list的表头块，擦除该块后将块B收集的冷数据拷贝到块A，最后擦除块B并根据擦除次数将块B插入到clean-list。利用冷数据不易更新的特点来降低热块的磨损程度，同时选择clean-list中擦除次数最小的块存储新写入的数据，从而达到磨损均衡的目的。

$$Th_2 = 0.1 \times (100\ 0 - \max_{\text{wear}}) \tag{2}$$

3）块反转：当热池中的某个块突然被冷冻时，由于冷数据很少更新导致该块被滞留在热池且逐渐成为热池中最冷的块。针对上述情况，引入第3个阈值$Th3$。当热池中擦除次数最多的块Hmax（用max_wear1表示其擦除次数）和热池中擦除次数最少的块Hmin（用min_wear1表示其擦除次数）擦除次数满足max_wear1-min_wear1>$Th3$时，进行热块反转操作，将块Hmin放到冷池。另外当冷池中的某个块突然变热逐渐成为冷池中最热的块时，同样如果冷池中擦除次数最大的块Cmax（用max_wear2表示其擦除次数）与擦除次数最小的块Cmin（用min_wear2表示其擦除次数）间的擦除次数差值满足max_wear2-min_wear2>$Th4$时，将块Cmax归入热池。

3 仿真验证

综合数据处理及传输设备经过方案及正样阶段的研制，在地面与“嫦娥四号”“嫦娥六号”“嫦娥七号”科学载荷设备长期进行了各项功能、性能测试，与地面站对地传输链路的功能、性能测试，经测试综合数据处理及传输设备设计均满足中继通信任务需求，测试结果满足指标要求。

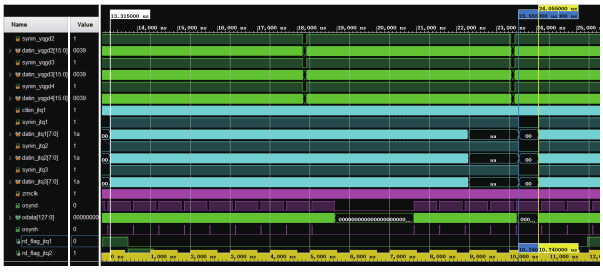
3.1 多源数据调度管理验证

综合数据处理与传输系统接收多种科学载荷数据，以及对月返向解调数据，输入总速率超过8 Gb/s，经过多任务协同调度，最后路由至存储单元进行记录，根据指令选择对地回传速率，并向存储单元按照1～500 Mb/s码速率快速检索相应的回放数据，8 Gb/s存算控一体化设计仿真结果如图8所示，表示输入探测器、载荷等数据（图8中绿色），输出AOS复接帧数据（图8中蓝色）。记录模式下，AOS复接帧数据通过高速串行接口写入存储单元（图8中紫色），数据帧完整、正确，未出现丢帧、错帧等异常问题。1～500 Mb/s对地回传仿真波形如图9所示。采用RS（Reed-Solomon）级联（码速率<10 Mb/s）和低密度奇偶检查码（Low-Density Parity-Check，LDPC）（码速率≥

10 Mb/s）编码2种方式，1 ~ 10 Mb/s低码速率编码后输出仿真波形如图9（a）所示，10 ~ 500 Mb/s高码速率编码后输出仿真波形如图9（b）所示。



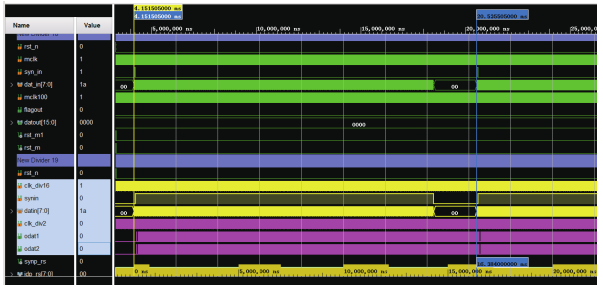
（a）多路载荷介入和调度



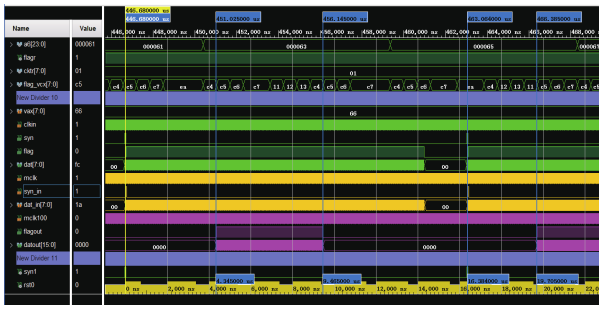
（b）多路载荷记录

图 8　8 Gb/s存算控一体化设计仿真验证

Fig. 8　Simulation verification of integrated design of 8 Gb/s storage calculation and control



（a）1~10 Mb/s低码速率



（b）10~500 Mb/s高码速率

图 9　对地1 ~ 500 Mb/s回传仿真波形

Fig. 9　1-500 Mb/s ground feedback simulation waveform

3.2　上注重构及最小系统设计验证

为验证“鹊桥二号”中继星上注重构及最小系统功能，一方面验证汉明码对单粒子翻转的纠错能力（单比特纠错、双比特检错）；另一方面验证TMR在单模块故障时维持系统功能的能力，同时在NOR FLASH发生较多数据错误的故障时，即汉明码和三模冗余均不能完成纠错，系统可自动切换至PROM加载，确保了任务的连续性。

通过向NOR FLASH写入特定的数据，覆盖所有定义的SEU模式（数据区、校验区、控制逻辑），模拟故障注入场景，故障类型包括单比特错误、双比特错误、单模块错误、多模块错误。故障的注入场景具体如表1所示。

表 1　故障注入场景

Table 1　Fault injection scenario

故障类型	注入方式	目标
单比特SEU	随机修改NOR FLASH数据区或校验区1个bit	验证汉明码纠错能力
双比特SEU	随机修改同一汉明码字中2个bit	验证汉明码及TMR容错
单模块SEU	在TMR单模块中同时注入不同bit错误	验证TRM投票机制有效性
多模块SEU	在TMR三模块中同时注入不同bit错误	触发PROM切换机制

无故障状态下，记录NOR FLASH加载时间、系统启动成功率（100%基准）；注入单比特错误，验证汉明码自动纠错（恢复原始数据）；注入双比特错误，验证汉明码及TMR投票机制，屏蔽错误模块；监测纠错耗时和系统功能的完整性；单模块SEU注入不同bit错误，验证剩余模块能否维持输出的正确性；多模块SEU注入不同的bit错误，观察系统是否自动切换至PROM加载，并监测切换后系统的恢复时间及稳定性。测试结果见表2，结果满足任务需求。通过试验验证，“鹊桥二号”中继星设计的汉明码 + TMR + 最小系统设计，可全面证明系统在SEU容错与故障切换方面具有较高的可靠性。

表 2　测试数据表

Table 2　Test data

试验场景	注入次数	纠错成功率/%	TRM屏蔽成功率/%	PROM切换成功率/%	平均恢复时间/ms
单比特SEU	500	100	-	-	9 ± 2
双比特SEU（TMR触发）	300	0（检错）	100	-	16 ± 3
多模块SEU	50	-	-	100	90 ± 10

“鹊桥二号”中继星自2024年3月发射以来，综合数据处理及传输设备在轨工作状态良好，可靠性高，为“嫦娥六号”探测器在月球背面采样返回任务提供了稳定可靠的中继传输服务，圆满完成了人类首次月球背面采样返回任务。综合数据处理及传输设备在地面测

试验证过程充分，保证了在轨工作的稳定，功能性能正常。通过地面和在轨持续测试表明，综合数据处理及传输设备所提供的多源数据调度管理、存储均衡磨损的高可靠设计、上注重构与最小系统设计技术能够满足任务需求，各项指标优越，设计方案合理有效。

3.3 基于多阈值的静态磨损均衡算法验证

3.3.1 寿命比较

当NAND FLASH设备出现一个坏块后，该坏块不仅不能继续用于存储数据，而且会引起其它块迅速坏掉。为保障数据的稳定，通常情况下NAND FLASH设备中出现一个坏块后不会继续使用。试验中块的擦除寿命是10万次，若每天需要做400次擦除操作，在YAFFS2文件系统下，NAND FLASH仅有5%的块轮流更新，那么可以得到闪存设备的使用寿命[19]为

$$\frac{100\,000\times100\times90\%\times5\%}{400\times365}=3.08 \tag{3}$$

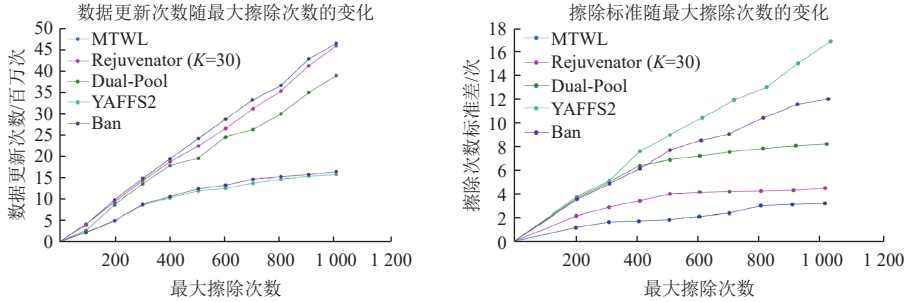
在MTWL文件系统下，NAND FLASH有20%的块轮流更新，而磨损均衡需要付出额外14.05%的擦除代价，得到闪存设备的使用寿命为

$$\frac{100\,000\times100\times90\%\times25\%}{400\times1.140\,5\times365}=13.51 \tag{4}$$

由式（3）和式（4）可知，MTWL文件系统将把NAND FLASH设备的使用寿命延长为原来的4.386倍。

3.3.2 均衡磨损效果比较

本文选择复壮磨损均衡算法（Rejuvenation Wear Leveling Algorithm）、双池均衡磨损算法（Dual-pool Wear Leveling Algorithm）、第二代闪存文件系统YAFFS2（Yet Another Flash File System 2）、均衡磨损算法（Ban Algorithm）4个典型算例作为比较，结果如图10所示，本文提出的MTWL方法在可靠性提升与资源消耗之间取得了很好的平衡。试验表明，该方案仅需付出14.05%的额外擦写操作代价，即可将存储器的耐久寿命提升至原有水平的4.08倍，显著优化了存储单元的整体寿命周期。



（a） 闪存可以执行的数据更新次数　　（b） 擦除次数分布

图 10　各典型算法均衡性能比较

Fig. 10　Comparison of balancing performance of typical algorithms

4 结　论

本文针对“鹊桥二号”中继星多源异构数据可靠传输需求，提出一种基于FPGA的硬件化优先级链式轮询调度方法与TMR容错架构，可重构系统架构及多层级容错机制解决方案、大容量固存均衡磨损方法，实现了性能与可靠性的高效权衡，创新性地实现了基于硬件优先级链的实时调度策略、可上注重构的软件定义功能，以及抗单粒子翻转的汉明码与三模冗余协同容错结构，显著提升了系统在空间环境中的可靠性、灵活性和任务适应性，为未来深空探测中继任务提供了具备自主维护与功能演化能力的重要技术途径。

后续可结合人工智能技术实现调度策略的智能优化与故障模式的自主诊断，以进一步提升系统在复杂深空环境中的自适应能力。

参考文献

[1] 刘子杰，闫国瑞，高若辰，等. “鹊桥二号”星务分系统信息传输多路径设计[J]. 先进小卫星技术(中英文)，2024，1(4)：41-51.
LIU Z J，YAN G R，GAO R C，et al. Multi-path information transmission design of housekeeping subsystem for Queqiao-2 satellite[J]. Advanced Small Satellite Technology，2024，1(4)：41-51.

[2] 张立华，熊亮，王鹏，等. “嫦娥4号”中继星任务分析与系统设计[J]. 深空探测学报(中英文)，2018，5(6)：515-523.
ZHANG L H，XIONG L，WANG P，et al. The mission analysis and system design of Chang’e-4 lunar relay communication satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(6)：515-523.

[3] 李潇然，朱红，赵妍，等. 北京三号B卫星数据处理与传输分系统设计与验证[J]. 航天器工程，2023，32(3)：117-122.
LI X R，ZHU H，ZHAO Y，et al. Design and verification of data processing and transmission subsystem for BJ-3B satellite[J]. Spacecraft Engineering，2023，32(3)：117-122.

[4] 张朗，张建华，王鸣涛，等. 适用于FPGA与Nand flash阵列星载固态

存储器的坏块管理方法[J]. 空间电子技术，2023，20(4)：98-103.
ZHANG L，ZHANG J H，WANG M T，et al. A novel bad block management methodology suitable for FPGA and Nand flash array based spaceborne solid-state memory[J]. Space Electronic Technology，2023，20(4)：98-103.

[5] 李耀楠，田巍，郝维宁，等. 大型载人航天器数据存储服务系统设计与应用[J]. 航天器工程，2024，33(3)：9-15.
LI Y N，TIAN W，HAO W N，et al. Design and application of data storage service system for large manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering，2024，33(3)：9-15.

[6] 陈昌麟，王旭，李娟，等. 星载软件在轨重构系统设计方法[J]. 航天器工程，2024，33(4)：71-75.
CHEN C L，WANG X，LI J，et al. Design method of spaceborne software on-orbit reconfiguration system[J]. Spacecraft Engineering，2024，33(4)：71-75.

[7] 刘适，李炯卉. 多器联合月球极区探测通信系统设计[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(4)：384-390.
LIU S，LI J H. Analysis and design of the communication system for multi-probes joint lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(4)：384-390.

[8] 王元乐，张建华，杨玉辰，等. 一种敏捷卫星高集成数传控制单元设计与验证[J]. 空间电子技术，2022，19(5)：88-92.
WANG Y L，ZHANG J H，YANG Y C，et al. Design and verification of control unit for data transmission subsystem on agile satellite[J]. Space Electronic Technology，2022，19(5)：88-92.

[9] 王元乐，杨玉辰，方火能，等. 一种可重构的星载高性能智能异构计算系统[J]. 空间控制技术与应用，2022，48(5)：125-132.
WANG Y L，YANG Y C，FANG H N，et al. A reconfigurable on-board high-performance intelligent heterogeneous computing system[J]. Aerospace Control and Application，2022，48(5)：125-132.

[10] 王民建，朱新波，何春黎，等. “天问一号”环绕器测控数传通信系统设计与验证[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(1)：28-36.
WANG M J，ZHU X B，HE C L，et al. Design and verification of TT&C and data transmission integrated system for Tianwen-1 Mars orbiter[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(1)：28-36.

[11] 李恒恒，胡泽明，岳春生，等. 基于YAFFS2的静态磨损均衡算法设计[J]. 计算机应用研究，2016，33(4)：1091-1095.
LI H H，HU Z M，YUE C S，et al. Design of static wear-leveling algorithm based on YAFFS2[J]. Application Research of Computers，2016，33(4)：1091-1095.

[12] 李超，焦义文，傅诗媛，等. 软件定义测控系统体系架构与关键技术[J]. 中国空间科学技术(中英文)，2023，43(3)：14-24.
LI C，JIAO Y W，FU S Y，et al. Software defined TT&C system architecture and key technology[J]. Chinese Space Science and Technology，2023，43(3)：14-24.

[13] XU G X，WANG M M，LIU Y B. Swap-aware garbage collection algorithm for NAND FLASH-based consumer electronics[J]. Consumer Electronics IEEE Transactions on，2014，60(1)：60-65.

[14] TESHOME S，CHUNG T S. A Tri-pool dynamic wear-leveling algorithm for large scale FLASH memory storage systems[C]//Proceedings of International Conference on Information Science and Applications. Jeju，Korea：IEEE，2011.

[15] 王晶燕，孙泽洲，饶炜，等. 我国深空探测器可靠性安全性技术发展[J]. 航天器工程，2024，33(6)：62-71.
WANG J Y，SUN Z Z，R W，et al. Development of reliability and safety technology for China’s deep space probes[J]. Spacecraft Engineering，2024，33(6)：62-71.

[16] 刘彦伟，赵振昊，杨佳欣，等. 大型载人航天器载荷数据传输系统设计[J]. 航天器工程. 2023，32(5)：91-97.
LIU Y W，ZHAO Z H，YANG J X，et al. Design of payload data transmission system of large manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering，2023，32(5)：91-97.

[17] KWON O，LEE J，KOH K. EF-greedy：a novel garbage collection policy for flash memory based embedded systems[C]//Proceedings of 7th International Conference. Beijing：ICC，2007.

[18] CHANG Y H，HSIEH J W，KUO T W. Endurance enhancement of flash-memory storage，systems：an efficient static wear leveling design[C]//Proceedings of ACM/IEEE Design Automation Conference. Diego，CA，USA：IEEE，2007.

[19] 徐楠，李朝阳，王兆琦，等. 高轨卫星星载计算机优化设计与实现[J]. 中国空间科学技术(中英文)，2020，40(1)：94-100.
XU N，LI Z Y，WANG Z Q，et al. Optimization design and realization of GEO satellite onboard computer[J]. Chinese Space Science and Technology，2020，40(1)：94-100.

[20] AJWANI D，MALINGER I，MEYER U，et al. Characterizing the performance of flash memory storage devices and its impact on algorithm design[C]//Proceedings of 7th international conference on Experimental algorithms Provincetown MA USA ：Springer-Verlag，2008.

[21] KANG S H，KOO D H，KANG W H，et al. A case for FLASH memory SSD in Hadoop applications[J]. International Journal of Control & Automation，2013，6：1075-1086.

[22] 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 P P，CAO Y T，ZHANG C T，et al. High functional density avionics system for satellite[J]. Chinese Space Science and Technology，2020，40(1)：87-93.

作者简介：
雷维宁(1979–)，女，高级工程师，主要研究方向：卫星有效载荷总体设计技术。
通信地址：西安空间无线电技术研究所(710000)
璩泽旭(1988–)，男，研究员，主要研究方向：天基智能云计算及星上处理技术。**本文通信作者**。
通信地址：西安空间无线电技术研究所(710000)

Research and Implementation of Key Technologies for Integrated Data Processing and Transmission of Queqiao-2 Relay Satellite

LEI Weining[1]，QU Zexu[1,2]，WANG Qiuping[1]，XIONG Liang[3]，XU Jin[1]，DANG Ni[1]，
DAI Ziyi[1]，WANG Hongze[4]，ZHANG Chao[1]

（1. Xi’an Institute of Space Radio Technology of Space Technology，Xi’an 710000，China；
2. School of Aerospace Science and Technology，Xidian University，Xi’an 710126，China；3. DFH Satellite Co., Ltd.，Beijing 100094，China；
4. Xi’an Microelectronic Technology Institute，Xi’an 710054，China）

Abstract：As To meet the requirements of the Queqiao-2 relay communication payload for multiple deep-space exploration missions and relay communication services，a design method for comprehensive data processing and transmission with high performance，high integration, and high reliability was proposed. he research and development of key technologies such as front-end multi-source data scheduling and management，on-board reconfiguration and minimal system design，and wear leveling of large-capacity solid-state storage have been mainly completed. Through ground testing and on-orbit verification，this system has realized relay communication services between multiple lunar mission spacecraft and ground stations，as well as deep space exploration storage-computing-control integrated technology exceeding 8 Gb/s. It supports software on-orbit reconfiguration，and for the first time achieves a downlink data rate to Earth covering the range of 1–500 Mb/s. Moreover，it effectively supported the successful implementation of the world's first sampling return mission from the far side of the Moon—China's Chang'e-6 mission. This work can provide a reference for data processing and transmission design in future deep space exploration missions.

Keywords：Queqiao-2 relay satellite；integrated data processing；integration；reconfigurable；minimum system

Highlights：

- A hardware-based priority chain round-robin scheduling method with triple modular redundancy（TMR）is proposed for multi-source heterogeneous data transmission in deep space relay satellites.
- A reconfigurable system architecture with multi-level fault tolerance and an adaptive failover mechanism is designed to ensure reliable on-orbit software reconfiguration under single-event upset（SEU）conditions.
- A multi-threshold wear leveling（MTWL）algorithm is developed to extend NAND flash lifetime，achieving a 4.386-fold endurance improvement with only 14.05% additional erase cost.
- An integrated data processing and transmission system supporting over 8 Gb/s storage-calculation-control capability and 1-500 Mb/s downlink rates is implemented and validated in orbit.
- The proposed solutions have been successfully applied in the Queqiao-2 relay satellite，providing reliable communication support for the Chang’E-6 mission and offering a reference for future deep space exploration data systems.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]