

引用格式:石龙龙,林宝军,王正凯,等.基于龙芯的高可靠性卫星数据处理系统[J].微电子学与计算机,2021,38(7):25-29.
[SHI L L, LIN B J, WANG Z K, et al. High reliability data processing system of satellite based on Godson [J].
Microelectronics & Computer, 2021, 38(7): 25-29.]

基于龙芯的高可靠性卫星数据处理系统

石龙龙^{1,2}, 林宝军^{1,2}, 王正凯^{1,2}, 祁见忠^{1,2}, 涂珍贞^{1,2}

(1 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201203;

2 上海微小卫星工程中心, 上海 201203)

摘 要: 为满足长寿命中高轨卫星对数据处理系统的可靠性和系统更新能力的高要求, 提出了基于龙芯的高可靠性数据处理系统设计方案. 系统以"龙芯+双 NorFlash"为硬件架构, 设计软件在轨重构方案, 采用双冗余总线子板交叉备份设计, 实现了系统软件可在轨重构升级, 并且显著提高系统可靠性. 该系统在 MEO 卫星上进行了在轨验证. 通过在轨运行数据分析, 验证了设计的有效性和高可靠性.

关键词: 数据处理; 龙芯; 高可靠性; 在轨重构; 交叉备份

中图分类号: G312; V19

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)07-0025-05

High reliability data processing system of satellite based on Godson

SHI Longlong^{1,2}, LIN Baojun^{1,2}, WANG Zhengkai^{1,2},

QI Jianzhong^{1,2}, TU Zhenzhen^{1,2}

(1 Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

2 Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China)

Abstract: High reliability and system updating ability of data processing system are required for long-life medium high orbit satellite. a high reliability data processing system based on Godson is proposed. The system takes "Godson + double NorFlash" as the hardware architecture, designs the software reconstruction scheme on orbit, and adopts the cross backup design of sub boards based on dual redundant bus. The system software can be reconstructed and upgraded on orbit, and the system reliability is significantly improved. The system has been verified in orbit on some MEO satellites. The effectiveness and high reliability of the design are verified through the analysis of the on orbit operation data.

Key words: data processing; Godson; high reliability; reconstruction on orbit; cross backup

1 引言

卫星数据处理系统采集卫星在轨工作状态,对星上单机、整星能源系统和热控系统等数据进行数据采集和控制,是保障卫星在轨正常运行的重要部分. 国内航天综合电子系统核心部分多采用进口芯片,受国外出口管制,成本高昂,并且产品安全不可控. 一般的卫星综合电子系统多采用双机冷备份设计以提

高可靠性,系统软件在发射前固化^[1]. 中高轨长寿命卫星所处空间电磁环境复杂,设计寿命长,对数据处理系统可靠性和可升级能力要求更高. 本文充分考虑了基于自主可控的高性能核心架构的国产化需求,以及 MEO 中高轨长寿命卫星对系统升级和可靠性的要求,提出了一种基于龙芯的核心架构完全自主可控,在轨系统软件可重构,双冗余内总线子板交叉备份等内容的高可靠性中高轨卫星数据处理系

统设计,并通过在轨运行状态的分析对数据处理系统设计进行验证和总结.

2 国产化龙芯自主架构

北斗三号工程 MEO 轨道卫星综合电子系统采用“集中管理、分散控制”设计.星载计算机进行整星管理,数据处理系统采集星上工程遥测,接收星载计算机的遥控指令,对整星能源系统和热控系统进行数据采集和管理,对整星关键数据进行备份和恢复.是星载计算机功能的重要延伸和整星数据采集和处理的关键系统.

传统卫星综合电子系统多采用“ERC32 + PROM”架构.ERC32 CPU (Atmel TSC695) 是一颗高可靠性,高性能,具有容错,抗辐射功能的 32 位 RISC 结构的 CPU,在国外主要是用在航空航天等领域. PROM 是反熔丝高可靠性程序存储器.这两种核心器件均依赖进口并受国外出口管制.本文提出一种基于国产 CPU 龙芯 LS1E 和双 NorFlash 存储器的星上数据处理系统新架构,实现系统自主可控,提高系统安全性.

龙芯 1E(简称 LS1E)是中科院龙芯中科技术有限公司研发的宇航级芯片,是以龙芯 1 号处理器为运算中心的高性能应用处理器 SOC. 存储控制器提供增强 ECC 校验,支持 SDRAM、ROM、FLASH 等航天系统常用的主流存储器^[2].

数据处理系统采用“龙芯 1E+双 NorFlash”架构.以龙芯 LS1E03 处理器为核心器件,采用复旦微电子宇航级 NorFlash 作为程序存储器;针对系统软件,采用双片可擦写 NorFlash 存储器结构,同时设计软件在轨可重构功能.此架构设计解决了 NorFlash 存储方式的高轨抗辐照问题,实现全软件在轨可重构,使得系统可靠性、可升级能力大幅提高.龙芯 1E 芯片内有 SDRAM 控制器,该 SDRAM 支持 EDAC 功能,在使能 ECC 的情况下,如果某个 SDRAM 存储单位发生一位翻转,龙芯 CPU 对该地址单元读操作时,可以自动纠正发生翻转的数据,并回写至该地址单元.数据处理系统硬件框图如下图.

龙芯 CPU 外围设备是由 NorFlash、SDRAM、龙芯 LS1F 和看门狗电路以及 OC 控制器等构成.系统启动后,将 NorFlash 中的操作系统和应用程序搬移到 SDRAM 中运行.

图 1 中黑色方框内部为数据处理系统主控单元,是整个系统的控制中枢,控制系统内部外围设备并与星载计算机和载荷设备等进行信息交互.系统

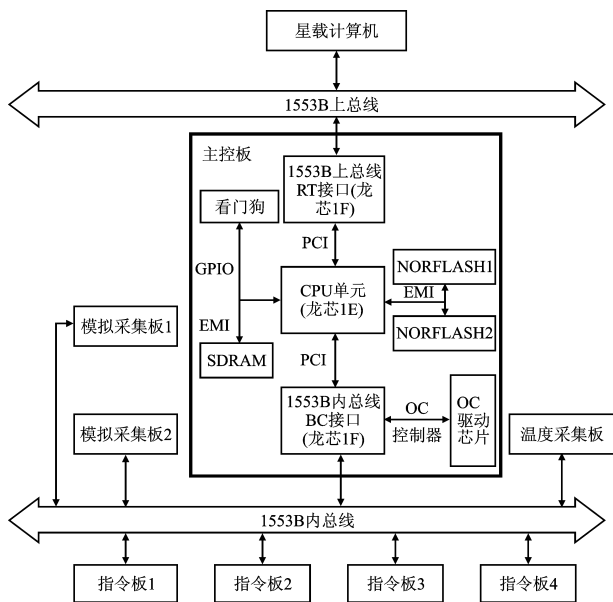


图 1 数据处理系统硬件组成框图

使用龙芯 1F (LS1F04) 实现 MIL-STD-1553B 总线接口.龙芯 1F 是龙芯 1E 处理器的配套 IO 桥芯片,集成了航天领域常用的遥测遥控接口和外围接口,满足航天领域核心芯片自主化的需求.使用龙芯 1F 实现 1553B 上总线 RT 接口和 1553B 下总线 BC 接口.上总线 RT 接口负责与星载计算机通信,作为 1553B 总线的 RT 挂在平台 1553B 总线上,通过该模块接收星载计算机指令,反馈遥测量和对卫星关键数据进行备份和恢复.1553B 接口内总线 BC 接口负责系统主控单元和内部板卡(子板)相关状态数据的采集和各子板数据的通信.

整个系统由主控板和指令板、模拟采集板和温度采集板等子板组成,主控板与各板卡之间通过 1553B 内总线通信.龙芯 1F 通过 PCI 接口与 CPU 连接,工作于 PCI 桥片模式.

3 在轨软件可重构设计

一般卫星软件在发射时固化,在轨不再更新.长寿命卫星需要根据任务变化或故障处理进行软件更新和升级^[3].航天器软件多使用 PROM 芯片进行存储. PROM 是反熔丝芯片,软件一旦固化不能更改,并且受国外出口管制.基于自主化、系统可升级和提高可靠性需求,本文提出一种基于双 NorFlash 的软件存储和在轨可重构方案.

3.1 双 NorFlash 软件存储设计

数据处理系统在轨软件可重构设计使用两片互为备份的 NorFlash 存储系统软件,并且可通过地面

实现在轨重构,提高系统可靠性,同时解决了 NorFlash 抗辐照问题.此方案使用国产复旦微电子的抗辐照 NorFlash 芯片,实现核心芯片自主可控.软件存储和运行设计框图如图 2 所示.

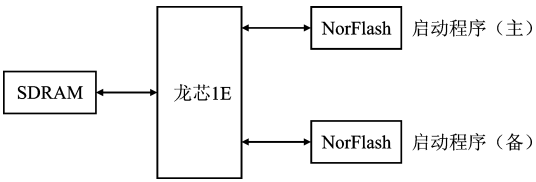


图 2 软件存储和运行设计框图

系统采用双机冷备设计,每个单机分别设计两份代码存储器:主份 NorFlash 和备份 NorFlash.系统启动时按照预设逻辑进行^[4].

在两片 NorFlash 中分别存储相同代码,软件运行在 SDRAM 中.两份 NorFlash 软件运行策略为:系统冷启动后运行主份 NorFlash;若软件看门狗咬复位,或收到软件复位指令后自动切换到备份运行;备份软件运行时,软件狗咬复位或收到软件复位指令后重新启动软件,但仍然运行备份 NorFlash.系统软件运行时定时对两份 NorFlash 中代码进行校验.若校验值与预存校验值不一致,可以利用当前运行软件由地面上注来重构该份 NorFlash 中软件.为防止两份 NorFlash 中的程序全部重构失败而无法启动,重构功能设计为:当主份程序启动时,只能对备份程序进行重构;当备份启动时,只能对主份进行重构. NorFlash 片选信号配合看门狗信号和上电复位信号实现对 NorFlash 的主备份选择^[5].程序存储器选择逻辑如图 3 所示.

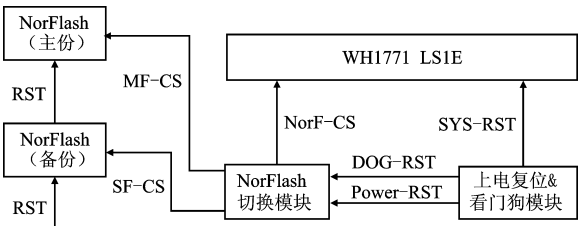


图 3 程序存储器选择逻辑框图

系统冷启动时,上电复位信号与 NorFlash 片选信号在电路切换模块进行逻辑运算后选择主份 NorFlash;系统在看门狗复位时,看门狗复位信号和 NorFlash 片选信号在电路切换模块进行逻辑运算后选择备份 NorFlash.

3.2 系统软件重构设计

系统软件分为三部分:boot、操作系统和应用软件.主备份 NorFlash 中存储相同代码构成备份,增

加系统软件可靠性.同时,按照特定的数据格式,系统可以接收星载计算机的软件重构数据,对 NorFlash 中软件进行在轨重构.

3.2.1 软件启动设计

系统冷启动或者看门狗复位后,根据硬件逻辑决定启动主份或备份 NorFlash.硬件复位完成后,处理器首先从 NorFlash 中读取代码,完成初始化后,计算代码校验和,并与预存校验和进行比较,具体流程如图 4 所示.

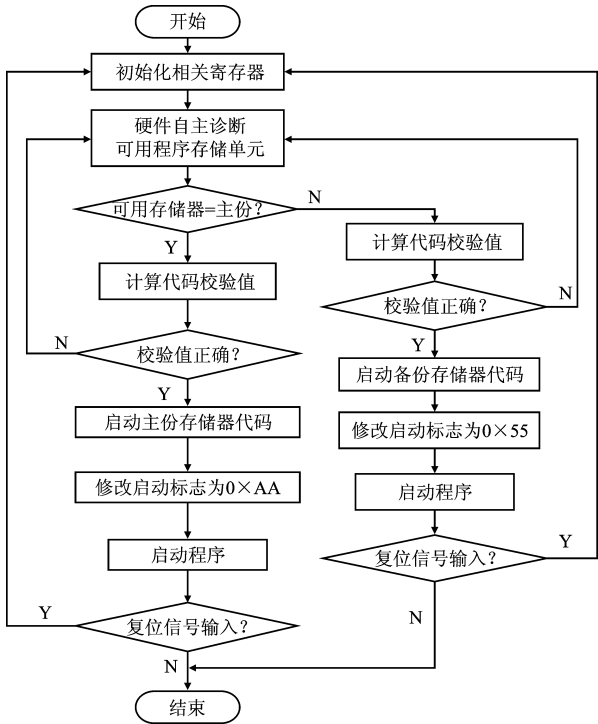


图 4 软件启动流程图

Boot 软件通过读取逻辑电路的 GPIO 信号识别启动的程序存储器.计算代码校验值,与预存校验值进行比较,若不一致则回到判断可用存储器单元;若一致则启动对应的存储器中代码,同时修改启动标志字,用于识别当前工作的存储器并进行遥测下发.程序运行中若接收到复位信号则重新启动系统.

3.2.2 软件重构数据格式

软件重构数据按照特定格式打包成数据帧,按照通信协议识别星载计算机发送的重构数据,进行拼包组成重构有效数据放在缓冲区.接收完毕后写入 NorFlash.数据帧包括以下部分:

帧序号:对数据帧进行编号;上注帧数:数据帧的数量,用于判断是否接收完毕;起始地址:表示重构的起始地址,用于系统程序分块重构;长度:表示每一帧数据的长度;校验和:指整个数据块的校

验和。

系统收到该数据后立即取走数据,以免被下一次数据覆盖。采取措施防止写入存储器时间过长而影响正常功能。系统收到数据后返回“重构帧序号”,用于判断块内数据上注情况。

重构帧序号是连续数据帧的序号最大值,用于补注漏帧。重构帧序号等于上注帧数表示上注完整。

3.2.3 软件重构流程

系统软件按操作系统、boot 和应用程序分块存储在 NorFlash 中不同地址空间,可单独进行上注。减小修改量,提高重构安全性。可以每个周期上注一部分软件,软件重构过程不影响系统在轨任务。具体上注步骤如下:

- (1)确定上注数据的首地址和长度,防止破坏正常的软件运行;
 - (2)地面确认无动作状态后从第一帧开始发送注数包,之后初始化接收缓冲区,设置“上注状态”为‘注数中’,开始新的拼包动作;
 - (3)发送完数据包后,根据“重构帧序号”遥测量补发缺漏的数据包。在检查接收到所有的数据包之后,将“上注状态”变为‘写入中’,并开始向 NorFlash 分次写入,此时不允许再次注入数据;
 - (4)写入完成后,将“上注状态”设置为‘无动作’。在‘无动作’的情况下收到非第一帧重构数据会自动丢弃。“上注状态”在‘注数中’时,如果重新发送第一帧数据之后,清除上次注数,重新开始上注;
 - (5)上注完成后系统选择启动应用程序。
- 利用“上注存储器标识”,确定当前上注的存储

器。软件重构流程图如图 5 所示。

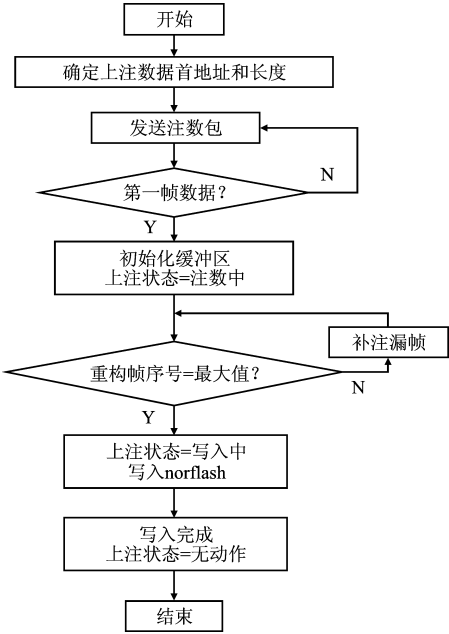


图 5 软件重构流程图

4 基于 ASIC 芯片串行总线交叉备份架构设计

航天综合电子系统单机多采用双机冷备份设计以提高可靠性。主备份单机在同一机壳内部,共用接口。北斗三号工程卫星数据处理系统由 11 块板卡组成,系统复杂度高,若采用传统冷备切机方案,每块板卡出现故障后必须切换至备份,可靠性低。本文设计一种双供电双冗余交叉备份方案,有效提高系统可靠性。系统硬件组成如图 6 所示。

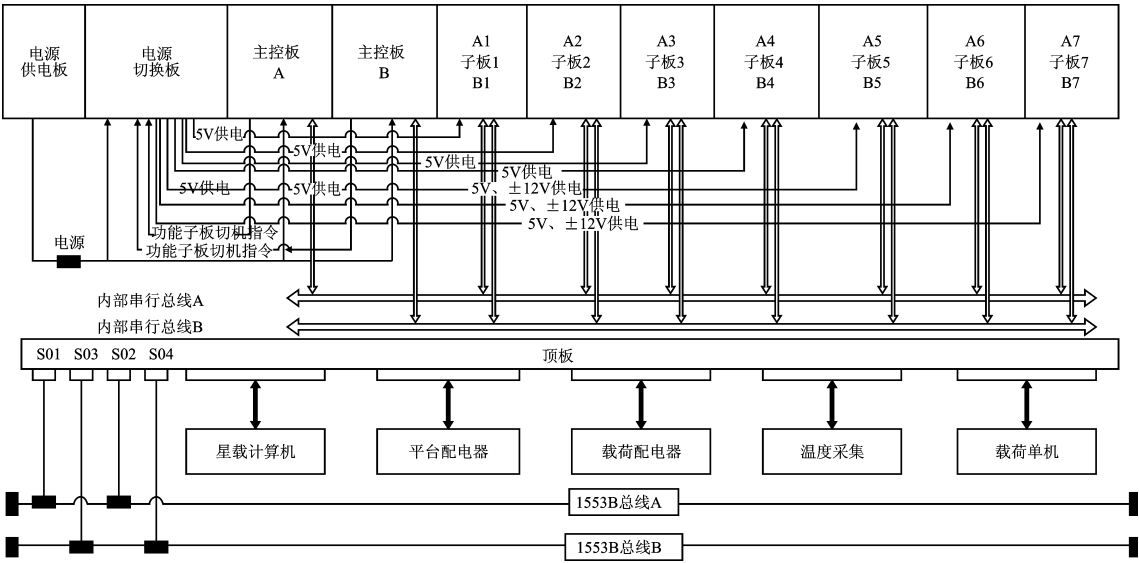


图 6 数据处理系统硬件框图

系统采用双机冷备设计,主控板由板间 A、B 单元形成同构冷备关系,其他板卡由板内 A、B 单元形成同构冷备关系。主控板通过电源切换板对子板内各单元供电进行切换控制。

主控板上实现外总线 1553B 的 RT 功能、内总线 1553B 协议的 BC 功能,采用 RS485 电平 1553B 协议的板间总线完成对子板内各单元的交叉访问以及电源切换板供电切换指令输出。

数据处理系统内部板间通信采用基于 RS485 电平的 MIL-STD-1553B 总线协议,通信方式为命令/响应型,时分复用多路信号。按照总线协议,主控板作为总线控制器(BC),其他板卡作为远置终端(RT)。1553B 总线传输速率为 1 Mbps,采用双余度冗余总线,具有错误检测、通讯消息自动重试、局部总线故障隔离等多种容错功能。

主控板与各子板之间通过 1553B 内总线通信,数据处理终端各子板之间采用交叉备份,即主控板 A 和主控板 B 可以交叉控制各子板的 A 单元和 B 单元。当某一板卡出现故障时,可以单独把该子板切换至备份,提高系统可靠性。

5 在轨验证

本文设计的基于龙芯的高可靠卫星数据处理系统已应用于北斗三号工程型号 10 颗 MEO 卫星,用于整星数据采集和处理、关键数据备份、整星热控和能源控制。在轨已累计稳定运行超 18 万小时,完成 10 余星/次在轨软件升级重构;单粒子防护有效,满足复杂电磁环境下可靠性要求。各项性能指标满足整星需求,系统运行正常。

6 结束语

针对中高轨长寿命卫星对数据处理系统高可靠性、自主国产化等需求,提出了一种基于国产龙芯芯片的高可靠性数据处理系统架构。系统采用全新的“龙芯+双 NorFlash”架构,完全替代进口方案;系统软件采用在轨可重构设计,可以根据任务需求变化或者故障处理需要实时在线更新系统软件,并且不影响在轨任务;提出基于双冗余总线的子板交叉冷备份设计方案,替代传统单机双机整机冷备份设计,大大提高系统可靠性。数据处理系统经在轨验证,系统运行稳定可靠,可完全满足中高轨卫星在复杂电磁环境下对数据处理系统的可靠性要求。采用国产核心芯片的数据处理系统设计合理可靠,为后续卫星数据处理系统提供经验。

参考文献:

- [1] 徐帅,林宝军,刘迎春,等. 基于龙芯宇航级芯片的 BSP 开发和移植[J]. 计算机工程与科学, 2002, 42(4): 571-579. DOI: 10.3969/j.issn.1007-130X.2020.04.001.
XU S, LIN B J, LIU Y C, et al. Development and transplantation of BSP based on Godson aerospace chip[J]. Computer Engineering & Science, 2002, 42(4): 571-579. DOI: 10.3969/j.issn.1007-130X.2020.04.001.
- [2] 中国科学院计算技术研究所. 龙芯 1E 处理器用户手册[M]. 北京: 龙芯中科技有限公司, 2017.
Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. User manual for Godson 1E processor [M]. Beijing: Loongson Zhongke Technology Co., Ltd, 2017.
- [3] 王战强,翟盛华. 星载处理设备软件在轨重构技术研究[J]. 空间电子技术, 2013, 10(1): 7-13. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2013.01.002.
WANG Z Q, ZHAI S H. Research on software on-orbit reconfiguration of space-borne processing equipment[J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(1): 7-13. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2013.01.002.
- [4] 黄超,陈勇,林宝军. 基于抗辐照龙芯的星载计算机容错启动研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(11A): 532-535.
HUANG C, CHEN Y, LIN B J. Research of fault-tolerant booting for on-board computer based on anti-radiation Loongson[J]. Computer Science, 2016, 43(11A): 532-535.
- [5] 吕岩. 一种低成本高可靠的星载计算机存储器容错方法[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(3): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1579.2020.03.010.
LV Y. A fault-tolerant method for space computer memory with low-cost and high-reliability[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(3): 66-71. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1579.2020.03.010.

作者简介:

石龙龙 男, (1987-), 硕士, 工程师. 研究方向为嵌入式系统。

林宝军(通讯作者) 男, (1963-), 博士, 研究员. 研究方向为计算机控制与应用. E-mail: linbaojun@aoe.ac.cn.

王正凯 男, (1986-), 工程师. 研究方向为嵌入式系统。

祁见忠 男, (1985-), 硕士, 工程师. 研究方向为卫星综合电子。

涂珍贞 女, (1988-), 硕士, 工程师. 研究方向为卫星综合电子。