

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104285

微小卫星星载综合电子系统技术综述

彭 宇 孙树志 姚博文 崔秀海 刘连胜
(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150080)

摘 要:随着微小卫星技术的提高,高功能密度、低成本并且能够快速研制的微小卫星已经成为现代航天领域的研究热点之一。但传统的微小卫星电子系统集成度较低,板间连线复杂,可靠性较低,质量、体积、功耗和性能等多方面需求相互制约,逐渐不能满足微小卫星发展的需求。微小卫星星载综合电子系统的提出,实现了其在体积、质量有限的情况下,可靠性、功耗和性能等方面的全面提高。在微小卫星综合电子系统发展历程和研究现状的基础上,分析了微小卫星综合电子系统在通用化和柔性化设计中应用的关键技术,并总结其目前的挑战和未来的发展趋势。

关键词:微小卫星;星载综合电子系统;通用化;柔性化

中图分类号:V446 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**590.30

Summary of the technology of integrated electronic system on board microsatellite

Peng Yu Sun Shuzhi Yao Bowen Cui Xiuhai Liu Liansheng
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: With the improvement of microsatellite technology, microsatellites with high functional density, low cost and rapid development have become research hotspots in the modern aerospace field. However, the traditional electronic system in the microsatellite is low in integration. The wiring between boards is complicated and the reliability is low. Due to the mutual constraints on quality, volume, power consumption, and performance, it is gradually unable to meet the development requirements of microsatellites. The proposed onboard integrated electronic system for microsatellites has achieved an overall improvement in reliability, power consumption and performance under the condition of limited size and quality. This article describes the development history and research status of the integrated electronic system of microsatellites. Then, it analyzes the key technologies applied in the general and flexible design of the integrated electronic system of micro-satellites. Finally, it summarizes current challenges and future development trend.

Keywords: microsatellite; onboard integrated electronic system; universal; flexible

0 引 言

自 20 世纪 80 年代末,随着微电子技术发展,微小卫星逐渐进入历史的舞台^[1]。随着微小卫星技术的提高,高功能密度、低成本并且能够快速研制的微小卫星已经成为现代航天领域的研究热点之一,在科研、观测、军事等重要领域得到了广泛的应用^[2]。全球微小卫星发射数量从 2017 年开始出现快速增长^[3],2019 年共发射 385 颗小卫星,截至 2020 年 11 月,小卫星发射数量更是突破 1 100 颗。目前,微小卫星发射数量已经占发射总数量的

70%以上,由此可见,微小卫星已经成为目前空间应用的主流^[4]。

微小卫星的快速发展,与其星载综合电子系统的发展密切相关。微小卫星星载综合电子系统采用星上总线网络将星载功能模块互相连接,实现微小卫星平台的模块集成、资源重组优化以及内部信息共享和综合利用。综合电子系统是微小卫星的核心组成部分,是整星的信息和控制中心。包括遥控遥测管理系统、载荷管理系统、热控管理系统和姿轨控管理系统等,是一个包含信息采集、处理、分配和存储的综合管理系统^[5]。微小卫星星载综合电子系统的发展,减小了电子系统的体积和单机复

杂的连接关系,提高了集成度和可靠性。

随着微小卫星技术的发展,微小卫星星载综合电子系统的概念、内涵和关键技术也发生了相应的变化。微小卫星原有的电子系统集成度较低,板间连线复杂,可靠性较低,质量、体积、功耗和性能等多方面需求相互制约,逐渐不能满足微小卫星发展的需求。而最新发展的微小卫星星载综合电子系统相比于传统星载电子系统具有小型化、模块化和一体化的特点,可扩展、高可靠和软件重定义是其未来发展方向^[6]。随着研究的深入,微小卫星星载综合电子实现了通用化的硬件平台与可配置、柔性化的软件应用的有机组合。其可以通过软件定义不同的星务任务,从而实现微小卫星资源有限条件下的任务重构,还可以通过在轨升级应用和软件,适应多样的应用场景^[7]。

随着面向微小卫星星载综合电子系统新需求的涌现,国内外在一体化、通用化、柔性化设计,即插即用技术、实时操作系统技术、任务调度技术以软件定义卫星技术等方面展开了丰富的研究工作。鉴于此,本文将阐述国内外微小卫星综合电子系统的发展历程和研究现状,但相比之下国内的研究和实现还有一定差距,为了我国未来独立自主的微小卫星星载综合电子系统的设计,本文归纳和总结其核心关键技术,力求为研究者提供设计与研究参考,并探求其未来发展趋势和主攻方向。

1 微小卫星星载综合电子系统概述

1.1 基本概念和技术内涵

根据卫星质量对卫星进行划分,小卫星质量为100~500 kg,微卫星质量为10~100 kg,纳卫星质量为1~10 kg,皮卫星质量为0.1~1 kg,飞卫星质量为0.1 kg^[8]。与大卫星相比,微小卫星具有先进、快速、低廉、可靠等特点。虽然微小卫星质量轻、体积小,但其集成了先进的微小卫星技术,通过集群化作业也能实现超精密的作业^[9],高集成度的星载综合电子系统是实现上述微小卫星特点的关键。

微小卫星星载综合电子系统融合了卫星大多数电子系统,承载了卫星大部分功能,在实现遥测遥控、授时校时以及星上自动控制外,还控制整星的有效载荷,为整星提供高效服务,是卫星任务处理和调度的中心。其是一个工作在复杂、恶劣空间环境下,对微小卫星进行信息综合和功能综合的高集成度的系统^[10]。微小卫星星载综合电子系统采用了一体化的设计思想,摒弃了分布式设计方案,利用星上总线网络将传统微小卫星的星务系统、遥测系统、电源控制系统、姿轨控制系统等分系统集成在系统内,由标准连接器实现各分系统连接和交互,利用核心的异构多核星载计算机模块^[11]对各分系统模块进行

统一规划管理。如何实现综合电子系统的高性能、高可靠性、可扩展性以及灵活性的设计,已经成为国内外研究的重点。

1.2 微小卫星星载综合电子系统的组成

微小卫星星载综合电子系统采用分层模块化开放式体系结构^[12],分为硬件层、固件层以及操作系统层。硬件层包括作为控制中心的星载计算机模块,还包括通信模块、采集模块、供电模块、接口模块以及扩展模块等功能模块。固件层包括星上时间管理、在轨通信、姿态控制、一体化管理等。操作系统层包括硬件和固件驱动实现、任务调度以及不同的软件应用。综合电子系统根据功能划分单元,然后按照模块化设计,软硬件接口采用标准化设计,实现接口统一,系统功能由软件定义,任务调度由操作系统完成,具体架构如图1所示。基于同一综合电子系统,不同的微小卫星可以根据具体的卫星任务选择合适的功能单元进行组合,在完成硬件系统的设计基础上也可以通过重构不同的软件模块实现卫星功能重构。

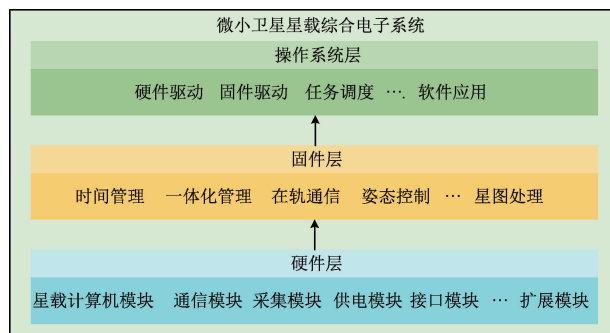


图1 综合电子系统架构

Fig. 1 Integrated electronic system architecture

微小卫星星载综合电子系统的硬件平台采用高度集成的模块化设计,将整星集成解耦成不同功能的分系统,然后对各分系统进行技术梳理,统一设计方案和技术方法,最终形成模块化的综合电子系统^[13]。系统硬件综合技术包括制定标准化模块规范,在综合电子系统设计时,利用已有标准进行内外接口电气属性、通信协议等方面的设计;采用“商用货架产品”,缩短设计、生产时间,形成批量化生产的模块单元,尽可能将传统电子设备模块化,同时还要不断开发新的标准模块。

随着微小卫星星载综合电子系统硬件平台的综合化,软件系统的设计变得更加重要^[14]。文献[15]将综合电子系统软件架构分为垂直层和横向层,垂直层包括应用层、服务层和底层软件层,负责实现综合电子系统的各项功能,横向层为基本服务层、软件框架层和操作系统抽象层,负责垂直层各层数据连接和功能支持,如图2所示。垂直层,应用层主要执行航天器模式和任务管理、健

康资源控制、子系统管理、系统级重构和系统级故障检测;服务层包含通用数据处理服务以及集中式数据包利用标准服务(packet utilization standard, PUS);所有硬件控制器都分组在硬件抽象层中,为综合电子系统的输入、输出和通信总线提供接口;低级软件层包括实时操作系统和访问双冗余中央处理器主板和输入、输出板的综合电子系统硬件驱动程序软件。横向层,软件框架层包含

软件总线最基本的功能,可以通过消息协议访问中央数据库和软件组件之间的连接;实时操作系统封装在操作系统抽象层(os operating system abstraction layer, OSAL)中,它允许对任务执行时间进行监控,以防止死线遗漏或潜在的过度运行^[16];基本服务层包含所有可由任何软件组件使用的通用对象、数据库以及队列或列表管理。

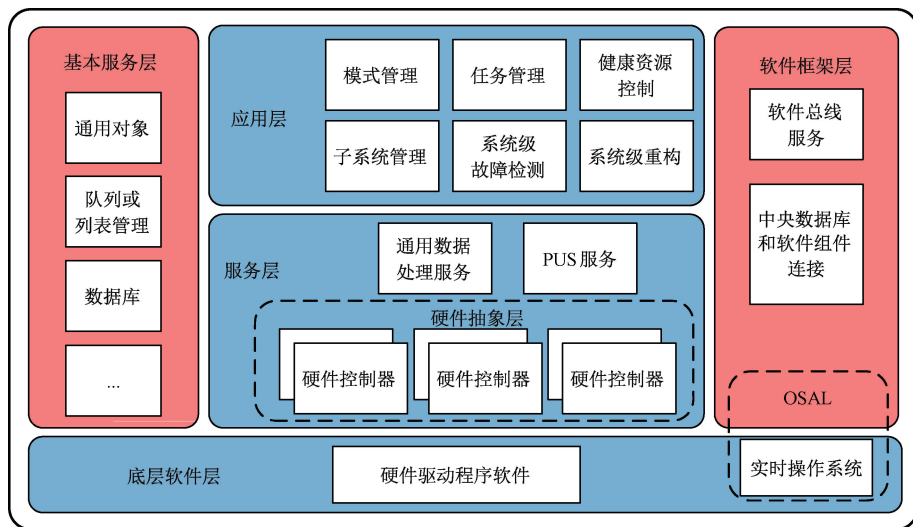


图 2 综合电子软件系统^[15]

Fig. 2 Integrated electronic software system^[15]

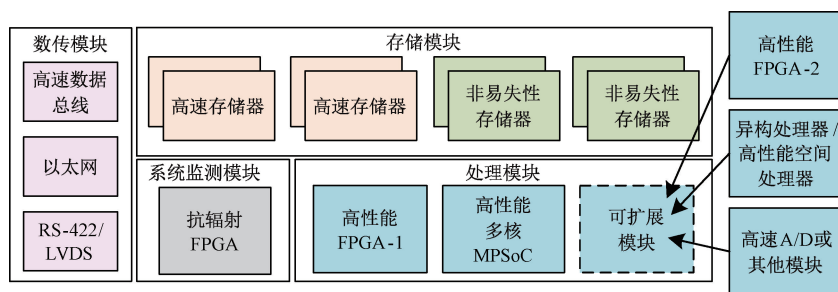
2 国内外发展历程及现状简析

微小卫星的星载电子系统经过了星载数管系统到星载计算机系统,再到星载综合电子系统的演变^[17]。综合电子系统最早源于 2005 年提出的航空综合模块化电子(integrated modular avionics, IMA)体系结构标准^[18],它是所有电子系统的控制中枢,负责整体的管控和信息交互。随着 IMA 技术的成熟,微小卫星的设计与开发中逐渐引入该技术,形成了微小卫星星载综合电子系统的雏形。在此基础上,欧洲航天局(european space agency, ESA)和美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)都提出了各自的技术体系和产品路线。

ESA 对星载电子系统的研究经历了 4 个阶段^[19]:1) 1975 年以前,研究处于第 1 阶段,重点是研发单个的电气器件,用独立的星载电气器件实现简易功能;2) 1975~1990 年,开始第 2 阶段研究,研发相互独立的电气和电子系统,研究重点是利用系统组合完成更多的功能;3) 1990~2005 年,进入第 3 阶段研究,该阶段的研究重点是系统集成,即每个系统实现星上某一部分的特定功能,这些系统分别由不同供应商提供,最后集成在一起实现整

星功能;4) 2005 年以后,进入了研究星载综合电子系统的第 4 阶段,该阶段将星载电子系统进行模块化、标准化设计,统一了研发的电子工程环境,强调了接口标准化和功能模块化,研究重点是实现整星的总体功能定义。

NASA 戈达德太空飞行中心(goddard space flight center, GSFC)于 2006 年开始研发基于现场可编程门阵列的星载综合电子系统——SpaceCube。具有可重构性、模块化、一体化的特点,目标是在降低功耗和成本的同时,大幅提高可靠性和算力^[20]。SpaceCube 的概念始于 2006 年,自 2006 年开始研发 SpaceCube v1.0 一直到 2019 年的 SpaceCube v3.0 经历了 3 代,不同版本的 SpaceCube 已经执行了许多成功的飞行任务,包括 HST-SM4、SMART、MISSE-7/8、STP-H4/H5、RRM3,以及最近的 STP-H6/CIB 和 NavCube(STP-H6/XCOM)。文献[21]从 SpaceCube v2.0 开始,描述了其综合电子系统可重构能力的扩展,I/O 扩展接口功能的自重构,以及通过重新配置处理器卡上的底层可编程元件,使其与不同 I/O 板卡连接,以适应不但出现的系统新需求的过程。SpaceCube v3.0 的硬件系统^[22]如图 3 所示。SpaceCube v3.0 由存储模块、系统监测模块、处理模块、数传模块以及扩展模块组成,存储模块实现大批量数据快速存储、读取以及关键数据的保护,数传模块实现星上信息高效交

图 3 SpaceCube v3.0 硬件系统框图^[22]Fig. 3 Spacecube V3.0 hardware system block diagram^[22]

互,用高度集成化的设计,将星上主要任务集中在处理模块,并采用可重构设计,利用可扩展模块实现星载综合电子系统的柔性设计。

我国对星上综合电子系统的研究起步稍晚于国外,但经过多年发展也取得了很大的进展。1999 年,我国发射了首颗采用公用平台的微小卫星实践五号,设计过程中首次提出星务系统的概念,该系统基本具备综合电子系统的雏形。其从整星的角度统一管理分配星务管理任务,统一使用软硬件资源^[23],通过星上网完成星载计算机与其他下位机之间的信息交互。2011 年,我国独立研制了第一颗火星人造卫星“萤火一号”探测器,其具有高度集成的综合电子系统。该综合电子系统集成姿控、数管、时间管理、配电管理、推进器控制与驱动和热控等功能^[24],其采用双 CPU 冷备份的设计形式,既满足了小型化的要求,又满足了可靠性要求。另外,该综合电子系统具备故障自主判别、系统重构等功能。2014 年,上海交通大学重新设计了综合电子系统的遥测信息流、遥控信息流及能源流,制订了系统各接口的传输协议,提高了系统的可靠性^[25]。2020 年,北京宇航系统工程研究所设计了一种新型综合电子系统,其以星载计算机为核心,辅以多种功能模块及控制机构的综合电子系统,并成功在 LH-2 微小卫星上应用^[26]。

3 微小卫星星载综合电子系统关键技术

微小卫星综合电子系统的设计方法经过了 3 个阶段^[27]。早期微小卫星采用分系统设计,导致质量大、体积大、成本高、研发周期长。随着微小卫星技术的发展,星上系统设计进入第 2 阶段,分成了公共平台和有效载荷两大部分,公共平台负责多个星上任务的实现,有效载荷负责单一功能的实现。但该设计方法耦合程度过高,随着星上任务和载荷逐渐多样化的需求,逐渐限制了微小卫星的发展。如今,微小卫星的设计进入第 3 阶段,即一体化设计,设计包括功能化模块和有效载荷支撑系统。一体化设计采用了模块化思想,对星上任务进行分析和

划分,设计出不同的功能模块,然后根据需要组合成不同的综合电子系统,实现微小卫星的快速设计。这里的模块指柔性的,能够独立实现功能的单元模块,如星载计算机模块、电源模块、姿轨控模块、通信模块等等。有效载荷支撑系统可以承接控制系统和用于不同场景、实验的有效载荷,提供灵活的对内和对外接口,实现柔性化设计。

一体化设计的关键技术包括通用化设计和柔性化设计^[28]。通用化设计指综合电子系统的各分模块预先完成设计、制作和测试,可根据实际任务和环境选择适合的模块进行组合,以实现特定任务的微小卫星综合电子系统。柔性化设计指星载综合电子系统能够根据特定的环境和应用需求对内部模块做出相应的动态配置,来保证系统对不同任务、不同环境的适配性。

一体化体系结构打破了传统卫星分系统的功能界限,不再把卫星的各种功能分解至各个分系统,并由相应单机实现,而是将卫星作为整体从系统层面进行统一的设计和资源配置权衡。通过一体化综合设计可以有效实现卫星高功能密度,大幅度地降低成本,缩短研制周期。

3.1 通用化设计

通用化设计是一种按照开放式的标准化、模块化设计,快速集成综合电子系统的硬件模块和软件程序的设计方法。其硬件方面主要包括功能模块的模块化和模块间的即插即用设计,设计完成综合电子系统各分模块和可扩展模块;软件方面主要包括实时操作系统的标准化和可移植性的软件设计,实现综合电子系统软件环境的快速搭建。所有设计和制作都可以预先完成,经过充分测试的各模块可以保证随时替换,在需要时完成综合电子系统的功能重构。

1) 即插即用技术

即插即用 (plug-and-play, PnP) 技术指跳过接口设计和软件配置等流程,通过对外接模块的动态监测和识别,利用模块化空间组件实现功能快速重组和扩展^[29]。即插即用技术采用标准化、模块化、软硬件复用等设计思想,是综合电子系统实现高功能密度和多功能通用化应

用的关键。针对电气连接、通信链路和电源接口等各个方面,通过统一协议和标准,可以实现综合电子模块的快速替换和即插即用。

2015年美国的“作战响应空间计划”提出,产生了即插即用卫星的概念,之后美国空军研究实验室(air force research laboratory, AFRL)对接口硬件和软件进行统一标准化设计,实现基于微小卫星的即插即用和快速集成。AFRL对微小卫星即插即用技术展开深入研究,成功完成了“空间即插即用电子系统”(space plug-and-play avionics, SPA)项目^[30]。AFRL还与所有生产厂商一起制订了空间即插即用架构。美国NASA和美国国家海洋和大气管理局(national oceanic & atmospheric administration, NOAA)的联合计划于2016年将SpaceWire总线选为星载综合电子系统的科学数据总线^[31],并与1553B和CAN总线进行总线集成,实现星上总线的标准化设计,进一步推动了即插即用技术的发展。

国内也开展了很多标准化设计研究。浙江大学在2017年设计了ZDPS-2卫星综合电子系统,实现处理器与所有模块总线数据的高效交互^[32]。并在2020年针对星载模块在轨升级时可更换模块接口受限的问题,提出了一种卫星综合电子系统多总线融合接口设计方法^[33],该融合总线通用接口融合了4种常用通信总线,对我国卫星在轨模块更替以提高在轨升级卫星性能有重要意义。

即插即用技术能够缩减大部分的重复性功能,实现微小卫星的快速组建。采用可配置的标准化接口,各模块也可以实现自组织和自描述^[34],即模块利用自带属性实现自动识别和匹配,大大简化模块间互连的流程,提高互换的效率。

2) 实时操作系统技术

实时操作系统(real time operating system, RTOS)是能实时响应事件并实现对应功能的操作系统,微小卫星星载综合电子系统就需要实时操作系统的支持。开发通用化的实时操作系统可以简易程序开发,支持星上的多任务,还可以进行通用化的软件配置和驱动设计,在便于维护的同时还能提高系统的稳定性和可靠性,已经成为综合电子系统的重要组成部分^[35]。

目前,星载实时操作系统主要包括国外的VxWorks^[36]、RTEMS^[37]、QNX、Integrity-178B、Linux^[35]以及国内的EVTOS、ASOS等。随着微小卫星的兴起,占用空间更小,执行效率高的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、eCOS和FreeRTOS^[38]也得到广泛应用。此类操作系统应具备微小化、强时效性、高稳定性、可裁剪性和代码可固化的特点^[39]。文献[40]评估了针对微处理器的9种RTOS,并选择了4种RTOS在同一微控制器系统上进行性能基准测试,最后选择 $\mu\text{TKernel}$ 进行多任务应用程序开发。

“flying laptop”微小卫星综合电子系统设计了一种通过中间件实现的实时操作系统BOSS^[41],可以支持容错性设计。SpaceX开始他们的飞行软件开发时,将VxWorks用于主计算机,Linux用于运行通信网关,但在对Linux调度程序和内核实时补丁进程感到满意后,开始在任何地方使用高度定制的Linux^[42]。

随着微小卫星星载综合电子系统日益复杂,需要面向异构多核综合电子系统设计一种支持多核处理器的星载分区操作系统^[7]。利用可分区的实时操作系统实现多核处理器实时任务调度,应用软件高效开发和复用,以及面向未来软件定义微小卫星,实现软件动态扩展和功能升级。

3.2 柔性化设计

柔性化设计可以根据具体任务和与外界环境对整体系统做出适配性调整,保证了对不同任务通用性的扩展。综合电子系统是微小卫星的核心,首先需要保证自身在恶劣环境下的可靠性,同时应具有动态重构能力,通过软件定义适应未来任务和环境的多样性。软硬件系统的通用化设计是实现柔性化设计的基础,据此再利用星上任务调度和软件定义技术,可以实现星上功能的灵活变更以及系统的灵活扩展。柔性化设计主要包括硬件可重构、模块的可扩展、系统软件化、接口可配置以及软件可裁剪。

1) 任务调度技术

综合电子系统需要实时处理星载数据,收发遥测指令,控制微小卫星各个模块,为了更有效地完成这些任务,就需要任务调度算法。微小卫星星载综合电子系统是多核系统,面向多核处理器的任务调度分为同构系统任务调度和异构系统任务调度两种。面向同构多核处理器的任务调度技术已经十分成熟,比如轮询调度算法(round robin, RR)、动态优先级调度算法(dynamic priority, DP)、完全公平调度算法(completely fair scheduler, CFS)等。但对于异构多核处理器,以上的任务调度算法存在不足,需要更适合的任务调度算法。异构多核环境下的任务调度主要分为静态和动态任务调度两种类型^[43]。

静态任务调度适用于任务数量确定且资源消耗确定的情况,需要提前确定任务优先级、运行时间和任务转换的承接关系以及多核处理器的性能参数和核间的拓扑关系。程序开始运行后,任务调度就会将任务分配到适合的处理器,任务分配后不能更改。异构静态任务调度算法复杂程度由硬件资源决定,基于这一前提Barthou等^[44]提出了SPAGHETTI算法。动态任务调度会根据处理器内核实时所占资源分配合适的任务,以实现任务调度的消耗最优或者负载最优^[45]。Chronaki等^[46]提出的关键路径动态调度算法,在不调用先前任务调度信息的

情况下,可以实时的基于发现的信息实现任务调度,在异构多核系统里,该调度算法可以动态地将关键任务分配到高性能处理器上,实现整体性能的提升。

2) 软件定义卫星技术

因为微小卫星体积和质量小、资源受限,现有的绝大部分微小卫星星载综合电子系统仍受到以下限制^[47]:在制作完成后,功能就被限定,功能模式单一;系统是软、硬件紧耦合的架构,硬件逻辑无法更改,软件在固定的硬件基础上也很难更新;系统的寿命提高多采用宇航器件和模块多模冗余等方法,可靠性提高的措施付出代价较高。软件定义卫星技术的出现,为微小卫星的进一步发展提供了方向。

软件化定义微小卫星能灵活地实现不同任务,既可以进行整颗卫星任务的重定义,也可以实现综合电子系统的部分模块功能的重构^[48]。将综合电子系统软、硬件分解为通用模块和可变模块,然后将各可变模块进行组合,通过通用模块和可变模块的搭配实现综合电子体系架构可配置重构^[49]。软件定义的综合电子系统具有需求可定义、功能可重构、硬件可重组、软件可重配的典型特征^[50]。

通过软件定义卫星技术,可以在有限的硬件资源下,实现综合电子系统在轨功能维护和更新^[51]。面对高辐射的空间环境,星载综合电子系统通过软件定义技术实现原有硬件系统的在线更新,在尽可能少地增加冗余硬件资源的情况下,完成重构发生错误的模块以达到容错的目的。星载综合电子系统能够重构不同的软、硬件功能完成复杂多变的工作任务,具有优秀的适应性和灵活性。通过软件定义技术还能够重构不同的接口,实现不同模块的交互,以增强其扩展性。星载综合电子系统能够通过软件定义技术实现最新技术的应用更新。

近年来,国内外对软件定义卫星技术展开了研究。欧洲量子卫星(Eutelsat-Quantum)项目就是对软件定义卫星技术的探索,是首颗真正意义上的软件定义卫星^[52],通过软件重新定义相控阵的幅度和相位系数,确保更有效地利用波束,进而提高卫星资源的利用率。国外已经发射的软件定义卫星还有洛克希德马丁公司的SmartSat,美国银河天空公司的GSky-1,萨里空间中心(SSC)的STRaND-I^[53],空中客车公司的OneSat,泰雷兹·阿莱尼亚空间公司的Space Inspire,波音公司的702X等。中国发射的“天智一号”是国内首颗软件定义卫星,在轨期间已完成多项在轨试验^[54]。2017年9月9日,中国120余家成员单位成立了软件定义卫星技术联盟,旨在逐步建立软件定义卫星相关的技术标准和规范,推动传统卫星向智能卫星演进。

虽然软件定义卫星技术近十年经历了较快的进步,但其尚处于发展初期,不过可以肯定的是软件定义技术

作为新兴航天技术将对微小卫星星载综合电子的改进提供现实和直接的技术驱动。

4 挑战与展望

对于微小卫星来说,高性能、低成本、快速响应是其核心要求,其综合电子系统也同样。与大卫星相比,质量、体积、功率等方面相差一个甚至多个数量级,系统可利用资源和空间非常有限,是制约微小卫星综合电子系统发展的国际性难题。微小卫星综合电子系统被严格限制了尺寸、质量、功率等设计参数,对系统可靠性和可扩展性设计、智能化设计、通信、星座、星群运行控制等方向提出了挑战。

1) 系统可靠性和可扩展性

面对恶劣、复杂的空间环境以及微小卫星任务的多样化,急需提高微小卫星星载综合电子系统的可靠性和可扩展性^[55]。如何在有效时间内和有限资源、空间下提高系统抗辐射能力和扩展性是微小卫星星载综合电子系统的一大挑战^[56]。和大卫星不同,微小卫星在轨任务时间相对较短,但任务复杂的同时,其综合电子系统需要满足小体积、轻质量和低功耗的特点,就不能像大卫星一样采用多数器件多模冗余的设计,也不能冗余太多功能单元^[57]。同时,因为降低成本和追求高性能原因,多采用COTS器件替代宇航器件,器件本身的可靠性需要提高。可重构技术的提出对增强系统可靠性和可扩展性提供了有效思路^[58]。未来在多数系统模块支持可重构的情况下,还可以实现功能集成和可复用,能够有效利用重构的方法实现在轨修复和升级。未来将对星上各功能模块进行基于软件定义的软硬件设计,实现未来真正的软件定义卫星,达到一星多用和一星多能。

2) 智能化和高性能计算

智能化是微小卫星星载综合电子系统未来的发展方向,也是面临的挑战^[59]。未来微小卫星的星务任务越来越复杂和多样化,现有的综合电子系统多为定制化设计,在轨期间针对不同情况需要地面强干预,缺乏普适性和智能化。为了提高综合电子系统的控制精度,增强系统故障自检和处理能力,实现系统智能化设计,就需要空间的高性能计算能力^[60]。未来云计算、5G、大数据以及人工智能等高新技术都会应用在综合电子系统上,综合电子系统的处理器性能也在逐代提高,制造商如何充分开发这些技术,以及如何将技术精确合理地部署在微小卫星综合电子系统上是极大的挑战。国内外已经开始在信息与通信技术、云计算、虚拟化^[61]等前沿技术领域展开研究,构建智能化的技术体系。

3) 在轨通信

微小卫星通讯相对于大卫星在体积、质量和能源等

方面受到很大限制,很多大卫星的通讯技术不适用于微小卫星^[62]。而微小卫星大多以几颗到几百颗的星座方式运行,面临的通信压力更大,由于发射功率低、信道容量小等特点,传统的通信方式和地面支持也不适用和利于微小卫星的灵活管理。近几年有适用于微小卫星星载综合电子系统的通信技术被提出,如激光通信技术^[63]、天线阵列等,但这些技术还处于实验研究阶段,没有在实践阶段得到充分的验证。但也因为微小卫星发射成本低,可以将更多的新型技术投入到微小卫星任务中,来验证技术的可行性。2020年8月,“行云二号”成功验证星间激光链路技术,实现了国内微小卫星物联网星座激光通信的新突破。针对微小卫星的激光通信技术已处于开发阶段,其正成为热点研究课题也是未来的挑战。

4) 星座、星群运行控制

多星组网和星座计划能通过协作更好地发挥微小卫星的优势,但如何利用微小卫星星载综合电子系统进行星座、星群的组网和运行是一大挑战^[64]。美国 SpaceX 星链计划已经有 1 000 多颗卫星在轨道上,并计划至少再发射 10 000 颗,将实现全球覆盖^[65]。微小卫星星座的不同卫星要完成不同任务,如测控能力,需要单星综合电子系统同时进行多星测控,并进行数据处理。这就需要强大星上算力、控制算法以及路由技术等^[66]。面对不断增加的任务量和用户^[67],组网运行控制压力更大,如何有效利用相对于大卫星性能有限的微小卫星综合电子系统,是未来研究的新方向。

5 结 论

微小卫星发展至今已经经历了 5 次发展浪潮^[68],而微小卫星星载综合电子系统是其重要组成部分。未来卫星和火箭的制造成本将持续降低,微小卫星星载综合电子系统将会更加轻量化、规模化、标准化,卫星发射需求逐渐提升,微小型、微纳型卫星星座也会逐渐成为主流需求。目前中国微小卫星综合电子系统尚未出现统一的平台,系统多种多样,集成度和标准化方面不足,给卫星带来挑战,不利于综合电子系统的应用和推广,在这一背景下,高功能密度、标准化、可扩展的综合电子系统成为研究的热点。微小卫星星载综合电子系统可以整合整星软硬件系统,大幅度提高系统的性能^[69],将是我国微小卫星架构设计的发展方向。

参考文献

[1] 张召才,何慧东. 2015 年全球小卫星发展回顾[J]. 国际太空, 2016(2): 49-56.
ZHANG Z C, HE H D. 2015 year in review: Global small satellites [J]. Space International, 2016(2):

49-56.
[2] 安君帅,张生玥,肖跃. 国内外小卫星的发展现状及前景[C]. 第十二届卫星通信学术年会, 2016: 8.
AN J SH, ZHANG S Y. Development status and prospect of minisatellites at domestic and overseas[C]. The 12th Annual Conference on Satellite Communication, 2016: 8.
[3] 唐亮,刘鸿鹏,何慧东. 全球小卫星现状及发展[J]. 国际太空, 2019(6): 36-41.
TANG L, LIU H P, HE H D. Status and development of global small satellites [J]. Space International, 2019(6): 36-41.
[4] 林来兴. 微小卫星技术发展和应用前景[J]. 国际太空, 2019,(6): 46-48.
LIN L X. The development and application prospects of microsatellite technology [J]. Space International, 2019, (6): 46-48.
[5] 褚佳承. 皮卫星柔性综合电子系统技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 1-55.
CHU J CH. Research of flexible composite electronic systems for pico-satellite systems for pico-satellite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 1-55.
[6] SCHWENK K, ULMER M, PENG T. ScOSA: Application development for a high-performance space qualified onboard computing platform [C]. High-Performance Computing in Geoscience and Remote Sensing VIII, 2018: 1079205.
[7] 詹盼盼,齐征,张翠涛,等. 支持多核处理器的星载分区操作系统设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(01): 47-53.
ZHAN P P, QI ZH, ZHANG C T, et al. Design of onboard partition operating system supporting multi-core processor[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(1): 47-53.
[8] 李明. 微小卫星发展的若干思考[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 1-5.
LI M. Perspective on development of micro-small satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 1-5.
[9] 何异舟. 小卫星技术与产业发展研究[J]. 电信网技术, 2017(10): 29-33.
HE Y ZH. Research on small satellite technology and industry development [J]. Telecommunications Network Technology, 2017(10): 29-33.
[10] FENG Y, HAN X, XU N, et al. Development of heterogeneous computing and virtualization in spaceborne IMA uring 2010 - 2020 [C]. Signal and Information Processing, Networking and Computers, 2021: 374-383.
[11] PLLANA S, XHAF A F. Programming multicore and

- many-core computing systems [M]. John Wiley & Sons, 2017.
- [12] 李庆, 韦锡峰, 俞佳江. 卫星综合电子系统环境试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 95-100.
LI Q, WEI X F, YU J J. Environment test method for satellite integrated electronic system [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 95-100.
- [13] 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): 17-22.
GU CH Q, LI Y, TIAN H C. Enlightenment of U. S. plug and play satellite application on smali satellite integrated electronics [J]. Space International, 2016(3): 17-22.
- [14] MAVRIDOU A, STACHTIARI E, BLIUDZE S, et al. Architecture-based design: A satellite on-board software case study [C]. International Workshop on Formal Aspects of Component Software, 2016: 260-279.
- [15] WENKER R, LEGENDRE C, FERRAGUTO M, et al. On-board software architecture in MTG satellite [C]. 2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), 2017: 318-323.
- [16] WEN-MEI W H. Heterogeneous SYSTEM ARCHITECTURE: A New Compute Platform Infrastructure [M]. Morgan Kaufmann, 2015.
- [17] 郭朝华. 多处理器并行的星上计算机系统设计[D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2000: 1-88.
GUO CH H. Design of a multi-processor parallel satellite computer system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Metallurgy, Academy of Sciences of China, 2000: 1-88.
- [18] BLASCH E, KOSTEK P, PACES P, et al. Summary of avionics technologies [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(9): 6-11.
- [19] 刘利军. 微型卫星综合电子系统设计与实现[D]. 上海: 东华大学, 2015: 1-93.
LIU L J. System design and realization of micro-satellite avionics abstract [D]. Shanghai: Donghua University, 2015: 1-93.
- [20] PETRICK D, ESPINOSA D, RIPLEY R, et al. Adapting the reconfigurable spacecube processing system for multiple mission applications [C]. 2014 IEEE Aerospace Conference, 2014: 1-20.
- [21] PETRICK D, GILL N, HASSOUNEH M, et al. Adapting the SpaceCube v2.0 data processing system for mission-unique application requirements [C]. 2015 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), 2015: 1-8.
- [22] GEIST A C B, DAVIS M, FRANCONI N, et al. Flatley. SpaceCube v3.0 NASA next-generation high-performance processor for science applications [J]. 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2019, SSC19-XII-02.
- [23] 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 X T. “Shijian-5” satellite management system [J]. Chinese Space Science and Technology, 2000(5): 30-35.
- [24] 侯建文, 衡岗, 陈昌亚. 萤火一号火星探测器技术创新点[J]. 上海航天, 2013, 30(4): 1-5.
HOU J W, HENG G, CHENG C Y. YH-1 mars probe technology innovation [J]. Aerospace Shanghai, 2013, 30(4): 1-5.
- [25] 陆荣. 卫星综合电子系统方案研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 1-79.
LU R. A study on integrated electronic system solution for satellite [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 1-79.
- [26] 徐喆垚, 陈宇坤, 张义超, 等. LH-2 微小卫星综合电子系统设计与姿态控制研究[J]. 载人航天, 2020, 26(1): 88-93, 81.
XU Z Y, CHEN Y K, ZHANG Y C, et al. Study on integrated electrical system design and attitude control of microsatellite LH-2 [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(1): 88-93, 81.
- [27] 张科科, 朱振才, 夏磊. 小卫星模块化设计技术分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(6): 107-115.
ZHANG K K, ZHU Z C, XIA L. Analysis of small satellite modular design technology [J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(6): 107-115.
- [28] SUGAWARA Y, SAHARA H, NAKASUKA S, et al. A satellite for demonstration of panel extension satellite (PETSAT) [J]. Acta Astronautica, 2008, 63(1): 228-237.
- [29] 李长春. 航天器即插即用技术及开放网络架构的研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 1-91.
LI CH CH. Research on and Implementation of an open network architecture and PNP technology for spacecraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 1-91.
- [30] MARTIN M, SUMMERS J, LYKE J. AFRL plug-and-play spacecraft avionics experiment (SAE) [C]. 2012 IEEE Aerospace Conference, 2012: 1-6.
- [31] ANDERSON W, KRIMCHANSKY A, BIRMINGHAM M, et al. The geostationary operational satellite R series spacewire based data system: Session: SpaceWire networks and protocols, long paper [C]. 2016

- International SpaceWire Conference (SpaceWire), 2016: 1-6.
- [32] 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.
- [33] 熊青玉, 王慧泉, 金仲和. 卫星综合电子系统多总线融合接口设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(01): 40-46.
- XIONG Q Y, WANG H Q, JIN Z H. Multi-bus fusion interface design of satellite avionics system[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(1): 40-46.
- [34] FRONTERHOUSE D, LYKE J, ACHRAMOWICZ S. Plug-and-play satellite (PnPSat)[C]. AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, 2007: 2914.
- [35] LEPPINEN H, NIEMELÄ P, SILVA N, et al. Developing a linux-based nanosatellite on-board computer: Flight results from the Aalto-1 mission[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(1): 4-14.
- [36] TUBBAL F E M, ELARABI A, ETABEB A, et al. The design requirements for Libyan imaging mini-satellite (LibyaSat-1)[C]. 2015 1st International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 2015: 1-7.
- [37] JENKINS A, KUZMINSKY S, GIFFORD K K, et al. Delay/disruption-tolerant networking: flight test results from the international space station[C]. 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010: 1-8.
- [38] LAMICHHANE K, KIRAN M, KANNAN T, et al. Embedded RTOS implementation for twin nano-satellite STUDSAT-2[C]. 2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2015: 541-546.
- [39] 王永恒, 廖明宏. 小卫星星载操作系统内核的设计[J]. 计算机工程, 2002, (11): 111-113.
- WANG Y H, LIAO M H. Design of a small satellite operating system kernel[J]. Computer Engineering, 2002 (11): 111-113.
- [40] TAN S, ANH T N B. Real-time operating system (RTOS) for small (16-bit) microcontroller[C]. 2009 IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics, 2009: 1007-1011.
- [41] SULAIMAN N, OBAID Z A, MARHABAN M H, et al. Design and implementation of FPGA-based systems-a review[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2009, 3(4): 3575-3596.
- [42] LEPPINEN H. Current use of linux in spacecraft flight software[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017, 32(10): 4-13.
- [43] YANG S, DEYU Q. Study on static task scheduling based on heterogeneous multi-core processor[C]. 2017 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA), 2017: 180-182.
- [44] BARTHOUD, JEANNOT E. SPAGHETTI: Scheduling/placement approach for task-graphs on HETerogeneous architecture[C]. European Conference on Parallel Processing. Springer, Cham, 2014: 174-185.
- [45] HU Q, WU K, LIU P. Exploiting multi-band transmission line interconnects to improve the efficiency of cache coherence in multiprocessor system-on-chip[C]. 2015 28th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), 2015: 390-395.
- [46] CHRONAKI K, RICO A, CASAS M, et al. Task scheduling techniques for asymmetric multi-core systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 28(7): 2074-2087.
- [47] 黄佳, 陈夏, 李宗德. 基于软件定义的微纳卫星综合电子设计与实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(2): 30-32, 40.
- HUANG J, CHEN X, LI Z D. Design and realization of software-defined micro-satellite satellite synthesized electronic system[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(2): 30-32, 40.
- [48] 严明强, 冯围新. 基于遗传算法的可重构星载计算机永久性损伤容错技术研究[J]. 新技术新工艺, 2014(2): 78-83.
- YAN M Q, FENG W X. Research on self recovery from permanent damage of reconfigurable OBC[J]. New Technology And New Process, 2014 (2): 78-83.
- [49] 赵军锁, 吴凤鸽, 刘光明. 软件定义卫星技术与展望[J]. 卫星与网络, 2017 (12): 46-50.
- ZHAO J S, WU F G, LIU G M. Development and prospect of software defined satellite technology[J]. Satellite & Network, 2017 (12): 46-50.
- [50] 张璵敏. 软件定义: 开启卫星应用新时代[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2019(2): 8-10.
- ZHANG Y M. Software definition: opening a new era of satellite applications[J]. Satellite TV and Broadband Multimedia, 2019 (2): 8-10.
- [51] KACPURA T J, EDDY W M, SMITH C R, et al. Software defined radio architecture contributions to next generation space communications[C]. 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015: 1-12.
- [52] FENECH H, AMOS S, WATERFIELD T. The role of array

- antennas in commercial telecommunication satellites [C]. 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2016: 1-4.
- [53] BRIDGES C P, YEOMANS B, IACOPINO C, et al. Smartphone qualification & linux-based tools for CubeSat computing payloads [C]. 2013 IEEE Aerospace Conference, 2013: 1-10.
- [54] 李莉. 软件定义卫星 智能引领航天[J]. 中国科技奖励, 2019(1): 26-28.
LI L. Software-defined satellite intelligence leads aerospace[J]. China Science and Technology Awards, 2019(1): 26-28.
- [55] 王鑫, 张妍, 尹玉明, 等. 微小卫星标准化现状的分析及思考[J]. 中国航天, 2018(12): 36-40.
WANG X, ZHANG Y, YIN Y M, et al. Analysis and thinking on the status Quo of microsatellite standardization [J]. Aerospace China, 2018(12): 36-40.
- [56] 于功敬, 熊毅, 房红征. 健康管理技术综述及卫星应用设想[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 227-232.
YU G J, XIONG Y, FANG H ZH. Survey of prognostics and health management technology and application idea for satellite[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 227-232.
- [57] DUMITRIU V, KIRISCHIAN L, KIRISCHIAN V. Decentralized run-time recovery mechanism for transient and permanent hardware faults for space-borne FPGA-based computing systems [C]. 2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), 2014: 47-54.
- [58] WANG W, ZHANG Y, WANG X, et al. Design of reconfigurable real-time telemetry monitoring and quantitative management system for remote sensing satellite in orbit [C]. 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2018: 1293-1297.
- [59] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
LIU W R, TAO FM CHENG J F, et al. Digital twin satellite: Concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [60] SCHMIDT A G, WEISZ G, FRENCH M, et al. SpaceCubeX: A framework for evaluating hybrid multi-core CPU/FPGA/DSP architectures [C]. 2017 IEEE Aerospace Conference, 2017: 1-10.
- [61] BUGNION E, NIEH J, TSAFRIR D. Hardware and software support for virtualization[J]. Synthesis Lectures on Computer Architecture, 2017, 12(1): 1-206.
- [62] 陆震. 小卫星和微纳卫星应用现状与挑战[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 1-7.
LU ZH. Status and trends of the small satellite and micro-nano satellites[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering 2018, 39(6): 1-7.
- [63] 任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(02): 143-150.
REN J Y, SUN H Y, ZHANG L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 143-150.
- [64] 孔令波, 陈茂胜, 曲云昭, 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, CHENG M SH, QU Y ZH, et al. Design and realization of commercial satellite attitude control reaction flywheel control system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 167-172.
- [65] GONZALO J L, COLOMBO C. On-board collision avoidance applications based on machine learning and analytical methods [C]. 8th European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, Virtual Conference, 2021: 20-23.
- [66] 郑戈, 余显勇, 和东生, 等. 微纳卫星系统技术发展趋势与建议[C]. 第三届航天电子战略研究论坛, 2017: 5.
ZHENG G, YU X Y, HE D SH, et al. The development trend and suggestion of micro-nano satellite system technology [C]. 3rd Aerospace Electronics Strategic Research Forum, 2017: 5.
- [67] FUJIMURA T, KIMURA T, OGAWA T. Small optical sensor satellite "asnaro" and series of small earth observation satellites [C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012: 229-232.
- [68] 张晓敏, 杨志, 刘钢, 等. 现代小卫星发展的五次浪潮[J]. 国际太空, 2016(10): 54-57.
ZHANG X M, YANG ZH, LIU G, et al. Five waves of modern small satellite development [J]. Space International, 2016(10): 54-57.
- [69] GEORGE A D, WILSON C M. Onboard processing with hybrid and reconfigurable computing on small satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 458-470.

作者简介



彭宇, 2004 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为虚拟仪器和自动测试、故障预测与健康管理、可重构计算等。

E-mail: pengyu@hit.edu.cn

Peng Yu received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2004. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Harbin Institute of Technology. His main research fields include virtual instruments and automatic test technologies, prognostics and system health management, and reconfigurable computing, etc.



孙树志, 2019 年在山东大学(威海)获得学士学位, 2021 年在哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为星载计算机系统设

E-mail: sunshuzhi@hit.edu.cn

Sun Shuzhi received his B. Sc. degree

from Shandong University in 2019, M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2021. His main research interest is the on-board computer system.



姚博文(通信作者), 分别于 2015 年和 2018 年在哈尔滨理工大学获得学士和硕士学位, 现为哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为领域定制计算方法、软硬件协同的高能效计算方法、星载计算硬件系统。

E-mail: bwyao@hit.edu.cn

Yao Bowen (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Harbin University of Science and Technology in 2015 and 2018, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Harbin Institute of Technology. His main research interests include domain-specific computing, energy-efficient computing with software/hardware co-design, and the on-board computing hardware system.