

模块化航天器的发展演化

满万鑫^{1,2}, 肖国放¹, 成炯豪¹, 崔孝¹

¹中国航天科工飞航技术研究院磁电总体部, 北京

²北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京

收稿日期: 2025年5月14日; 录用日期: 2025年6月23日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

传统航天器从满足单一用途到多功能集成, 使得系统复杂程度和质量急剧攀升。其烟囱式设计, 静态构型逐渐的向着模块化设计, 动态可重构的方向发展。文章从模块化航天器的相关理念入手, 从静态形式的模块化航天器、支持可展开的模块化航天器和模块化可重构航天器这三个方面介绍了航天器在模块化方面的进展。其次, 梳理总结了航天器模块化方面的关键技术。最后从未来发展趋势上, 介绍了模块化航天器快速生成技术、软件定义可重构、融合数字孪生的混合现实仿真技术发展建议。

关键词

模块化航天器, 可重构, 在轨服务

The Development of Modular Spacecraft

Wanxin Man^{1,2}, Guofang Xiao¹, Jionghao Cheng¹, Xiao Cui¹

¹Institute of Magnetic Levitation and Electromagnetic Propulsion, China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing

²School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing

Received: May 14th, 2025; accepted: Jun. 23rd, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

Traditional spacecraft have increased dramatically from meeting single-purpose to multi-function integration. Its "stovepipe" design and static configuration have gradually evolved towards modular design and dynamic reconfiguration. Starting with the related concepts of modular spacecraft, the article describes the progress of spacecraft in modularization from three aspects: static modular spacecraft, space deployable spacecraft and modular reconfigurable spacecraft. Secondly, the key technologies of spacecraft modularization are summarized. Finally, in terms of future development trend, the development suggestions of modular spacecraft rapid generation technology, recon-

figurable software definition and mixed reality simulation technology with digital twinning are introduced.

Keywords

Modular Spacecraft, Reconfigurable, On-Orbit Servicing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1957 年前苏联的第一颗人造卫星成功发射以来，人类对于太空的探索不断的深入。以需求为中心的整体式航天器设计理念[1]在随后的 50 多年里一直占据着主导地位，航天器呈现高度定制化的任务设计模式，这种被设计为高度集成的“烟囱式”系统[2]。随着任务程度的加深，传统航天器的质量和体积变得很庞大，设计成本、复杂程度、研制周期等都在不断地增加。从航天器研制任务制定到最终投入使用，往往会经历几年的时间周期，在此期间任务可能不断地变化，但定制的航天器却不能适应这种变化，使得应用设备严重滞后于现代需求。在此过程中人们也逐渐的认识到，不能将所有的鸡蛋都放在一个篮子里，90 年代美国的科学家倡导“更快，更好，更便宜”的卫星设计理念，卫星的设计趋势向着小卫星转变[3]。小卫星确实能很好的起到一定的弥补作用，但功能受到质量体积的严格限制，使得小卫星的实际应用情况不容乐观。同时随着在轨服务的发展，要求航天器具有一定的可服务性，而按照传统理念设计的航天器很难对其操作，不便于维修。

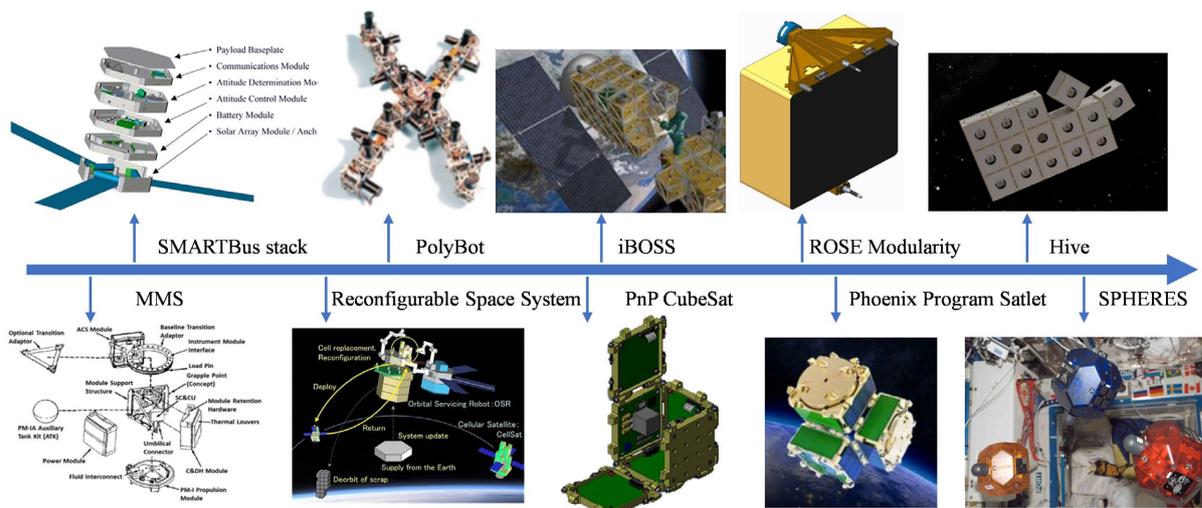


Figure 1. Development and change of space modular design

图 1. 空间模块化设计发展变化

诸如此类的弊端，使得现有航天器设计模式需要改变，航天器模块化设计也逐渐的得到关注。在上世纪 70 年代，美国 NASA 戈达德空间飞行中心(GSFC)提出了多任务模块化航天器 MMS 的设计概念[4]，在此基础上又提出了模块化、自适应、可重构系统的 MARS 概念[5]。美国空军研究实验室提出了航天即

插即用体系, 设计了具有即插即用功能的航天器 PnPSat [6]。AeroAstro 公司通过线性堆栈的方式快速组合开发了智能模块化平台 SMARTBus [7]。日本东京大学提出了可重构空间系统(RSS)的概念[8]。DARPA 凤凰计划应用细胞化和形态学重构概念设计了细胞卫星来实现卫星体系结构的模块化功能[9]。德国航空航天中心(DLR) iBOSS 项目借鉴乐高积木的思想, 通过“搭积木”模式来实现模块化和可维修的设计方法, 以提高航天器的性能[10]。这些设计理念支持可持续, 可维护和升级, 能够重新配置和扩展航天器结构。以上相关概念如图 1 所示。

本文将对模块化航天器的发展和一些关键技术进行介绍, 并给出一些发展建议。文章具体的组织如下。在本节之后, 第 2 节总结了与模块化航天器相关的基本概念和术语。在第 3 节中, 对模块化航天器的国内外发展进行介绍, 详述了模块化航天器的发展脉络。第 4 节将详细阐述模块化航天器的一些关键技术。第 5 节给出模块化航天器相关的发展建议。第 6 节总结全文。

2. 模块化航天器相关概念

为了理解模块化航天器的能力和局限性, 我们首先对模块化, 模块化航天器的相关概念进行介绍。

2.1. 模块及模块化

通常将模块定义为一个独立的块, 该块在其内部高度集成, 与系统的其余部分松散连接[11]。从物理结构上划分, 模块可分为三种类型: 功能模块、结构模块、单元模块。

模块化是系统体系结构和体系结构设计原则的一种属性, 其原理是将系统功能映射到物理组件, 这种映射可以是一对一, 一对多或多对一[12]。模块化过程包括将系统分解为模块和将模块组合成系统。模块化体系结构包括功能结构中的功能元素到产品的物理组件的映射, 这种映射介于完全模块化与完全整体式, 并指定组件之间的连接接口。根据 Ulrich [13]介绍, 模块化系统结构可以被分成六种: 组件共享性模块化, 核心模块可跨系统共享; 组件替换型模块化, 不同组件组合在一个模块内; 量体裁衣型模块化, 其中一个或多个组件或模块可以在预设或实际限制条件下变化; 总线模块化, 标准结构或接口接受不同组件作为模块; 组合型模块化, 其中任何组件或模块可通过标准接口直接连接到任何其他组件或模块; 以及涵盖上述类型任何组合的混合模块化。

2.2. 可重构系统

可重构系统可以被定义为那些可以通过改变系统形式或功能可逆地实现不同配置或状态的系统, 以便在可接受的重构时间和成本内实现期望的结果[14]。可重构系统中, 系统形式的属性、外部传递的功能、功能的属性都会受到重构过程的影响。任何可重构系统设计的最终目标都是由可重构性原理驱动的, 即可重构系统的理想设计是每个状态, 配置与相应的优化设计的固定系统紧密匹配。

2.3. 模块化航天器

模块化航天器是借助模块化设计方法, 将航天器功能映射到模块和组件, 并通过标准接口连接模块。注意这里的连接, 不完全是物理上的机械连接, 这种连接也可以是纯信息的。航天器模块可以是一个集通信、控制、驱动、传动一体化的单元[15], 也可以仅具备其中的某一种或几种功能, 这完全取决于设计者根据任务需求而选择的模块化程度。例如, 芯片、卡, 盒, 子系统, 系统, 这些都是模块可以具有的不同集成级别。从模块的表现形式上来看, 模块可以是同构或异构, 从运行状态上看, 模块可以是静态或动态的。在文献[16]中, 对航天器的模块化程度进行了介绍, 如图 2 所示, 从高度整体式设计到高度模块化, 从组件到子系统级别都有所尝试。航天器组件被集成到模块中后, 在集成测试和在轨服务方面都有很大的便利。在文献[17]中, 从组件级别对卫星子系统进行了分解, 如图 3 所示。

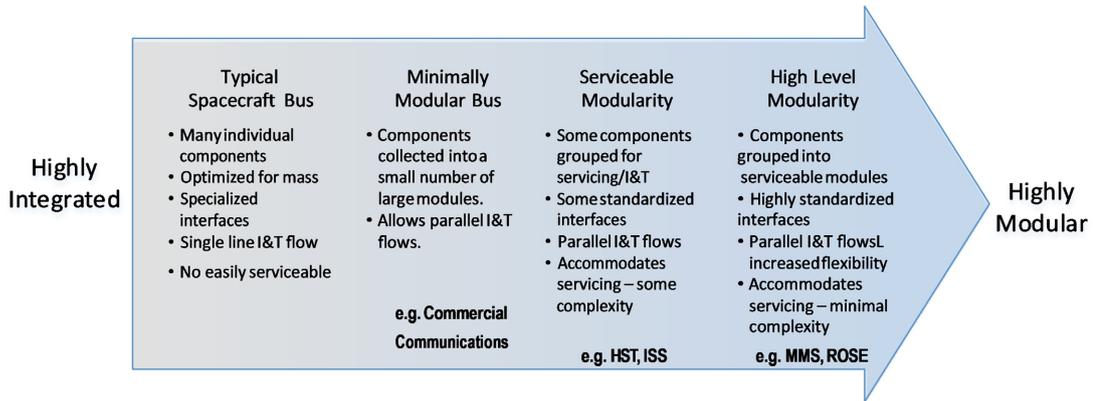


Figure 2. Modularity spectrum
图 2. 模块化频谱

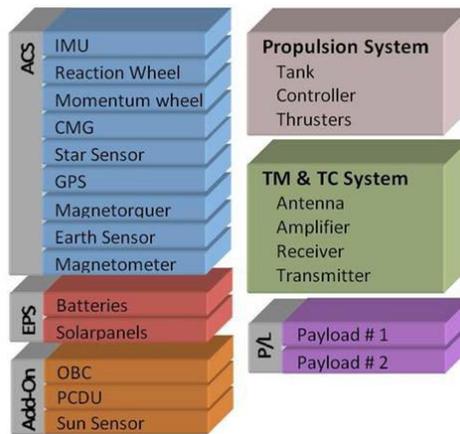


Figure 3. Breakdown of satellite subsystems on component level
图 3. 组件级别的卫星子系统分解

值得注意的是，这里的模块化是一种广义模块化，不局限于模块的外形结构，也涉及到其他层面，诸如软件和控制，但目前的大多数研究可能更多的是从模块集成和组件模块化的角度去讨论。

3. 国内外研究现状

航天器在模块化方面经历了不断的探索，诸如，最初简单的子系统分解组装，到组件级别的子系统分解，从静态形式到动态变构。有些关键技术已经得到了验证，不同形式模块化体系航天器理念也有了重大突破。本节将对各国一些典型的模块化航天器方面的研究进行简单的梳理。

3.1. 静态形式的模块化航天器

3.1.1. CubeSat

CubeSat 概念是 1999 年由加州理工州立大学和斯坦福大学联合提出，每个标准尺寸单元称为 1 U，每个 U 是 10 厘米的立方，常见的立方体卫星规格包括 1 U、1.5 U、2 U、3 U 等[19]，如图 4(a)。小尺寸的立方星模糊了传统卫星平台和载荷之间的物理区别[20]，代表了传统航天工业的模式转变，在某些方面可以取代大卫星的一些应用[21]。通过 CubeSat 可以进行空间科学研究和教学，搭载载荷任务，对新技术进行在轨演示验证。由于其标准化、模块化、通用性强，易于技术更新，研制周期短，经济成本低等的优点，近些年已在多领域实现业务化应用。

3.1.2. 即插即用模块化卫星

即插即用(Plug-and-Play)在计算机领域取得了极大的成功, 后来被引进航天领域。在 2004 年美国空军研究实验室(AFRL)提出了空间即插即用电子标准[22], 更是在此基础上发起了即插即用卫星(PnPSat)计划, 研制了基于即插即用和模块化的快速响应卫星平台[23]。PnPSat 通过结构面板之间的铰链折叠成立方体, 在面板上包含 SPUA 集线器和多种连接插座, 支持面板上卫星部件和结构面板之间的任意连接, 如图 4(b)所示。由于所有部件都是基于相同、自描述的接口, 对不同模拟器和仿真器的需求大幅度减少, 集成和装配过程非常的简单。即插即用的探索, 也使得航天器模块内部以及模块间的信息沟通渠道更加的顺畅。在以后的航天器设计中, 即插即用也成为了标配。

3.1.3. SMARTBus 线性堆栈结构

线性堆栈结构是将航天器的不同子系统, 分别布置在形状相似或相同的机械结构块中, 通过堆叠的方式组装在一起, 模块之间通过标准接口相连。典型的如 AeroAstro 公司开发的智能模块化平台 SMARTBus, 对各个模块采用即插即用的连接, 这种类型的卫星能够快速响应太空任务, 快速部署并具有很好的经济效益[24]。基于此平台开发的 FEBSS 卫星的各模块横截面采用六边形, 每个模块的顶端和底端采用具有电子的中枢连接器, 通过公口和母口的配合实现模块组装, 如图 4(c)所示。

3.1.4. MRHE 卫星

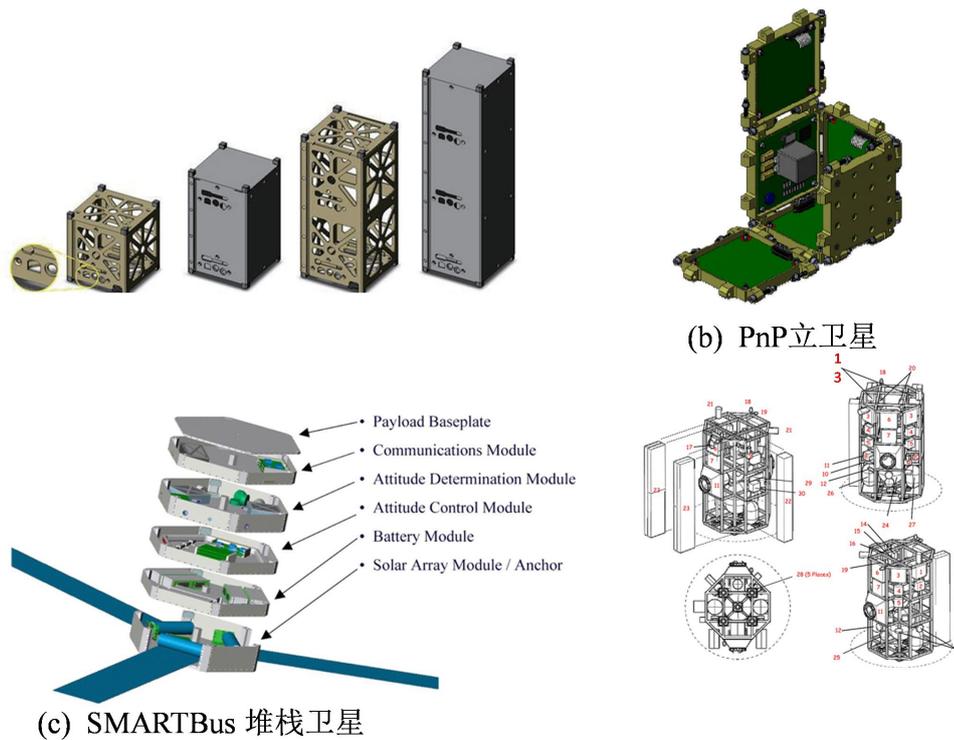


Figure 4. Legend of static modular spacecraft
图 4. 静态形式模块化航天器图例

模块化可重构高能科技(MRHE)卫星是 NASA 高能空间系统(HESS)的一个项目。MRHE 涉及六大关键技术, 其中与模块化航天器相关的技术主要有三个, 分别是: (1) 模块化、可重构航天器空间组装的自主交会对接(AR&D)技术; (2) 模块化空间系统的机器人装配; (3) 模块化、可重构的分布式航空电子技术 [25]。MRHE 卫星是典型的抽屉式结构, 平台结构的横截面为八边形, 三个垂直隔间的主要结构采用了纵

梁框架-面板结构。航天器平台为平台和有效载荷运行提供了主要服务。这些包括动力、命令和数据处理、通信、姿态和轨道控制、热控制、航天器交会对接以及有效载荷的更换和重新配置[26]。主要 MRHE 组件如图 4(d)所示。

3.2. 可展开的模块化航天器

对于整体式的航天器，在轨展开通常是针对航天器的某一个部件，例如太阳能电池板，其主结构则保持不变。支持在轨展开的航天器多是采用面板式多边形结构设计，通过线性堆栈部署进行发射，很好的解决了发射装载效率和堆栈扩展的限制。同时随着立方星的快速发展，基于多个立方星来构建大型太空建筑物的构想层出不穷。

3.2.1. PETSAT

PETSAT 是由东京大学，大阪大学和东大阪制造商社区等合作开发的由许多可互相插入的可展开功能面板组成的分布式冗余卫星[27]。SOHLA-2 卫星是 PETSAT 概念的实现，它由 6 个立方体面板组成，面板间通过机构铰链和锁销进行连接[28]，如图 5 所示。由于每个面板都是通过“插入式”接口连接，则机、电、热、数据的可靠沟通是其中的重点。根据任务的不同，可以恰当选择面板的数量，灵活布置发射时的堆栈形式，从而在空间中展开成需要的构形。

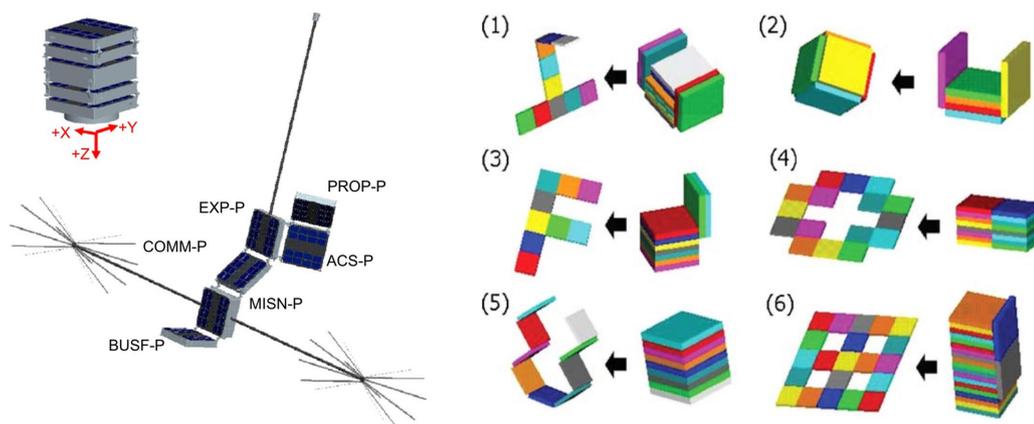


Figure 5. PETSAT plate extension satellite and various configurations
图 5. PETSAT 板块延展卫星及多种构型

3.2.2. HEXPAK

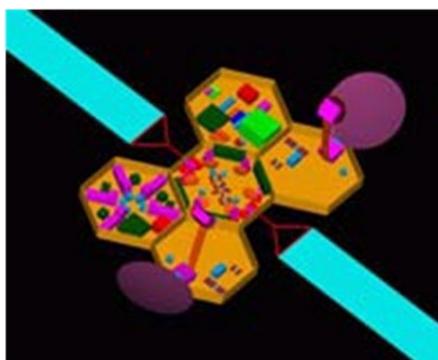


Figure 6. HEXPAK satellite
图 6. HEXPAK 卫星

HEXPAK 是一种可展开的空间结构[29], 由六角形托架组成, 托架上部署了有效载荷和总线组件, 通过铰链和闩锁将托架之间连接, 如图 6 所示。由于提供了很大的平面结构, 可支持大孔径有效载荷的部署。该结构可以通过适合的接口使六角形托架自动的变构, 连接和分离, 重新配置。

3.2.3. 链式模块化可重构机器人

链式模块化可重构机器人是通过铰接将模块连接以形成树状或闭环环, 可以潜在地到达空间中的任何点或方向[30]。比较典型的链式机器人如 Conro [31], PolyBot 系列[32] [33], CKBot [34], SuperBot [35] 等。以 PolyBot 系列为例, 该机器人包含主动模块和节点模块等两种基本模块, 前者具有两个接口; 后者是刚性的立方体, 六个面都具备可连接功能, 但自身不具备运动能力, 如图 7 所示。连接接口采用雌雄同体的锥孔式连接形式。模块使用红外测距系统引导闭环对接。系统可以轻松执行自我重新配置, 实现诸如滚动、蛇形、四足机器人的形态转换。



Figure 7. The PolyBot chain reconfiguration system
图 7. PolyBot 链式重构机器人

3.3. 模块化可重构航天器

模块化可重构航天器是指航天器具有重新配置系统的能力, 包括硬件模块之间的连接、软件的安装和调整以及其功能的更改[36]。模块化设计是可重构的先决条件, 通过改变模块间的拓扑关系可以改变系统的结构和功能。

3.3.1. 细胞卫星

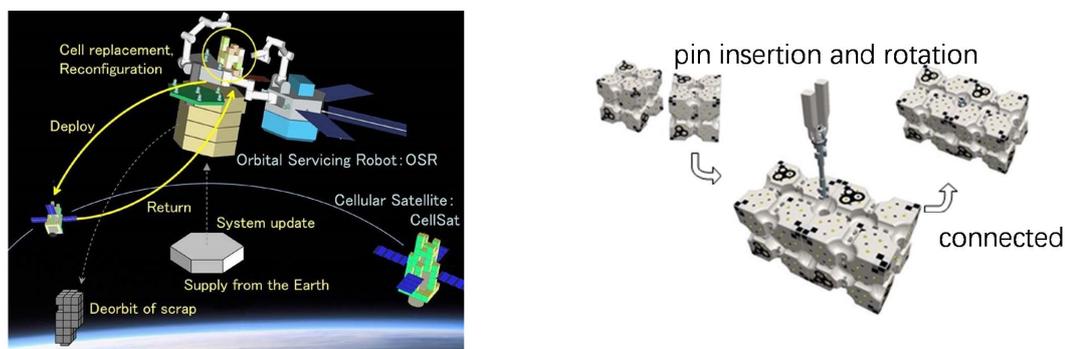


Figure 8. Example of RSS and cells connection using a connector-pin
图 8. RSS 例子及使用连接销进行细胞卫星组装

日本东京大学提出了可重构空间系统(RSS)的概念来使航天器在轨重新配置以达到空间基础设施的可重构[37]。其中细胞卫星(CellSat)和轨道服务机器人(OSR)是两个关键组成部分。CellSat 通过“细胞化”, 将功能单元切割成更小的单元模块, 模块化的程度更加的基础。细胞与细胞之间则是用连接销来

加以连接[38]。最后,借助轨道服务机器人来将体积比 CubeSat 还小的模块化组件 CellSat 进行组装形成集成航天器,如图 8 所示。

3.3.2. SPHERES

美国 MIT 大学研制了 SPHERES 试验台,该试验台的最初目标是用于演示和验证分布式卫星系统(DSS)的编队飞行和对接技术。随着研究的深入,MIT-SSL 确定了六大主要研究主题领域:计量、控制、自主、人工智能、通信和人机界面[39]。SPHERES 测试台由多个微卫星或 Sphere 组成,它们可以在 6 自由度环境中控制其相对位置和方向。每个 SPHERE 都是独立的,具有所有必需的子系统来自主运行[40]。通过该试验台开发了一系列控制算法,诸如:姿态控制算法,模块飞行编队控制算法,对接技术控制算法。SPHERES 在 KC-135 飞机中进行了多次试验,并且在国际空间站的 Expedition13、14、15 等多次任务中成功应用,如图 9 所示。



Figure 9. SPHERES operated in ISS
图 9. 在国际空间站运行的 SPHERES

3.3.3. iBOSS 积木块

德国航空航天中心(DLR)的 iBOSS 项目则是借鉴乐高积木的思想,试图通过“搭积木”模式和“蜂巢”模式将传统的卫星子系统转换为特定的标准化组件,以此来替代传统的卫星设计,如图 10 所示。它支持可持续,可维护和可升级性,能够重新配置和扩展,可以很好的实现在轨服务(OOS),在轨制造(OOM)和在轨组装(OOA)[41]。与此同时,在该项目中还制定了包含结构和功能要素的标准化模块目录,开发了用于机械耦合、电源和数据传输以及热互连的标准化的多功能四合一智能空间系统接口(iSSI),通过计算机辅助卫星设计和验证过程[42][43]。

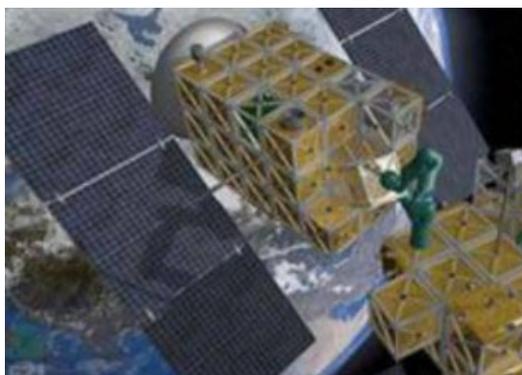


Figure 10. iBOSS project concept
图 10. iBOSS 项目概念

3.3.4. Satlet

2012 年 DARPA 启动了凤凰计划，其中提出了一种应用细胞形态学重构概念的细胞卫星构建块 Satlet，试图通过 Satlet 的聚集来打破卫星建造体系，重新定义成本 - 质量 - 性能函数[44] [45]，如图 11 所示。Satlet 不必具有整个卫星系统的全部功能，可以是一个简单的功能模块、独立分系统、多个分系统的组合，甚至是一个具备与其他细胞卫星进行聚集黏附的小卫星[46]。通过搭载地球静止轨道商业卫星将 Satlets 发射到 GEO 轨道，利用服务航天器将 Satlets 安装到退役卫星的可用零部件上，从而对退役卫星部件重用，减少空间系统研制和发射成本。



Figure 11. Satlet and its built satellites
图 11. Satlet 及其构建的卫星

3.3.5. 空间细胞机器人

空间细胞机器人(CSR)是由西北工业大学提出的新型空间机器人，如图 12 所示。空间细胞机器人是典型的异构模块化自重构航天器。西北工业大学提出的空间细胞机器人，仿照多细胞生物的生物组织系统组成航天器的系统架构，根据功能和位置，将细胞模块划分为脑细胞、执行器细胞、传感器细胞、通信细胞、电源管理细胞、有效载荷细胞、操作细胞等[47] [48]。操作细胞是空间机器人实现重构的关键功能模块，操作细胞是一个类似机械臂末端执行器的小型机器人，包含一个旋转关节和末端适配器，操作细胞可以对接抓取细胞模块，操纵、搬运细胞到指定位置，操作细胞也可以作为末端执行器为其他的航天器提供在轨服务，因此，空间细胞机器人不仅具有自重构的能力，也可以为其他航天器提供在轨服务。



Figure 12. CSR concept figure
图 12. 空间细胞人概念图

3.3.6. Hive 项目

2018年2月,美国航空航天公司宣布开展Hive项目,研究利用智能单元模块按需在轨自组装创建多种航天器平台[49]。智能单元模块可能被做成立方体或环状以便于相互连接,可执行翻滚、跳跃、换位、爬升等动作。通过在轨交会对接后连接锁定成航天器平台。平台运行时可互相传递电力、数据,并进行热传导。

Hive的设计理念来源于MIT的M-Blocks[50],由小型,智能,可批量生产的多功能单元组成。卫星模块的棱边上分布有电磁力吸附条带,通过电磁力吸附来实现卫星模块间的连接。卫星模块的特定面上配置有可以旋转的电磁吸附盘,使卫星模块之间可以相互旋转。至于模块的重新配置则是利用多个反作用轮的协同动作来实现的。Hive的另一个创新点在于智能卫星模块搭载的有效载荷。Hive的智能卫星模块具有小型太阳能电池板、高增益天线、携带微推进器的SAR传感器单元、VIS/SWIR相机四种有效载荷,如图13所示。这四种有效载荷被集成到具有一个旋转自由度的转向器上,转向器旋转即可改变四种有效载荷的指向位置。Hive的不同在轨构型与四种有效载荷的不同组合方式可全面提升空间系统的任务。

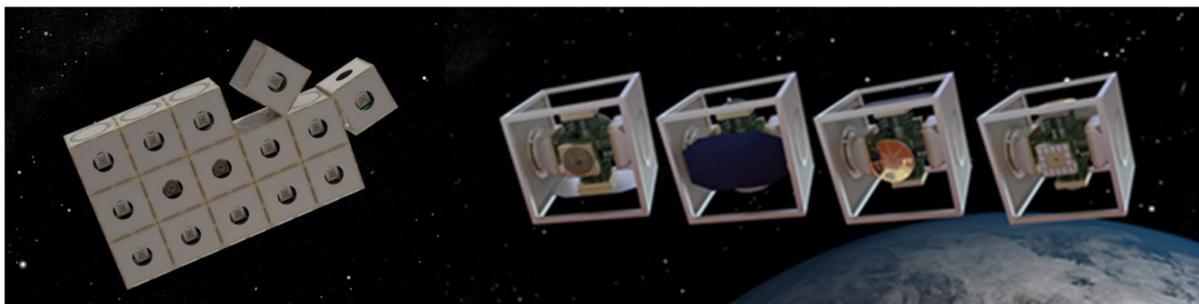


Figure 13. Hive satellite

图 13. Hive 卫星

3.3.7. MOSAR

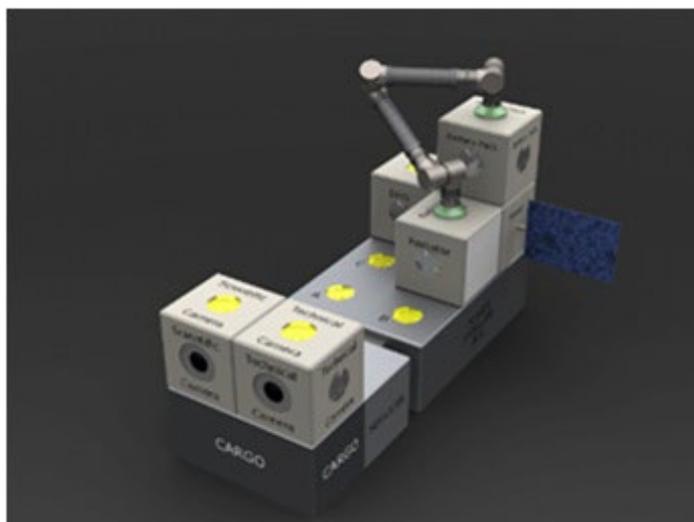


Figure 14. MOSAR demonstrator setup

图 14. MOSAR 演示装置

为了制定可持续、高性能、可扩展、灵活的空间发展方案,欧盟资助了HORIZON 2020 MOSAR计

划。MOSAR 开始于 2016 年，致力于为在轨模块化和可重构卫星系统开发地面演示器[51]。该项目目标是整合和展示在未来空间任务中设计和部署卫星的范式发生根本转变所需的技术。MOSAR 包括：一组可重复使用的立方体航天器模块、可重新定位的对称行走机器人机械手、标准机器人接口 HOTDOCK [52]、功能工程仿真环境和设计工具。MOSAR 的每个航天器模块相当于卫星平台的分系统，将专用于控制，电源，热管理，传感器等特定功能，航天器模块组装后可以实现完整的卫星系统。对称式行走机械手可以捕获，操纵、定位航天器模块和在模块间行走。对称式行走机械手使得 MOSAR 具备自重构的能力。标准机器人接口 HOTDOCK 为模块、模块和机械手之间的互连提供机械、数据、电源和热传递。MOSAR 计划中意义显著的工作是开发了功能工程仿真环境和设计工具，可以在多物理场引擎的支持下，为模块设计、系统配置和运行规划提供帮助。2021 年 7 月，MOSAR 成功演示航天器在轨组装和重新配置，包括装配与重新配置、热管理、视觉检测、电源、数据与软件重新配置等所有项目场景，如图 14 所示。

3.3.8. AAReST

AAReST 是加利福尼亚理工学院和萨里大学 - 萨里航天中心合作开发的一种自组装太空望远镜[53]，如图 15 所示。AAReST 任务包括两颗 3 U 的纳米微卫星，一个中央 15 U 的微型卫星，它们分别携带一个可变形的镜面载荷和一个中央镜面载荷。中央卫星还携带有一个安装在可展开的碳纤维复合吊杆上的相机包。AAReST 的纳米微卫星和中央卫星均具有独立飞行和重新连接的能力，并依靠电磁对接装置在不同的构型中分离和重新连接。



Figure 15. The configuring process for AAReST

图 15. AAReST 的在轨重构过程

3.3.9. F6 分离卫星

DARPA 的 F6 计划是一个无线连接的模块化航天器例子[54]。该项目中采用以价值为中心的设计思想代替传统以需求为中心的设计思想，试图将一个整体卫星分成异构的多个模块，这些分离模块携带有与航天任务相关的不同功能或资源，通过无线互联的方式将这些模块集群沟通起来构成一颗虚拟大卫星来完成特定任务或者支持多样化的天基基础保障设施，如图 16 所示。其中涉及六大关键技术：模块化技术、无线通信技术、无线能量传输技术、编队飞行控制技术、网络化技术、分布式计算技术[55]。虽然该项目因为某些技术不成熟的原因在 2013 年被终止，但其中以价值为中心的设计思想，为可重构模块化航天器的发展起到了积极的推动作用。正如模块化就是将系统功能映射到物理组件，只要这种分布式异构组件能够满足我们的最终功能需求，并且有它独到的优点，都是未来可以大量尝试发展的技术方向。



Figure 16. Concept of F6 system
图 16. F6 计划设想示意图

4. 关键技术分析

不同于地面装置，航天器需要满足恶劣的空间环境，在品质要求上本身就很高，同时进入太空的发射成本也很高昂，所以在体积和质量上的要求也很苛刻。模块化设计方法的引入，在设计模式产生了变革，但要实现所有组件的高级模块化，依然有很长的路要走。为了充分利用模块化的好处，相应的硬件、软件和控制方面需要全面考虑。

4.1. 结构拓扑

模块化技术支持航天器模块的重构和扩展，在结构上可以通过模块的不同布置方案构成适应任务需求的航天器构型。这样的系统可能是一个大型的冗余系统，但可能具有更好的鲁棒性。该系统需要对不同的基本运动模式和操纵能力进行控制，由于这种额外的复杂性，系统必须比常规任务系统具有更好的自主性[56]。对于所面临的空間环境，还应随环境条件变化和自我修复。

模块可以具有不同程度模块化水平，从而构建在更复杂的模块上。但一定要满足空间要求，比如紧凑性和轻便性以减小开支，同时需要具有基本的鲁棒性，通用性和适应性。可以从前文中的相关介绍中了解到，模块结构可以是地面构建好的静态形式也可以通过链式连接，利用空间机械臂在轨组装拓扑以及模块自我驱动重构。

除此之外，用于结构拓扑的模块可能是异构的。因为符合空间环境要求的机械和电气产品需要按照严格的制造标准，并受到技术的限制。因此，在许多情况下，它们的形状、大小和连接性无法标准化为模块化的外形。增材制造技术可以在一定程度上为此提供解决方案。

4.2. 对接和连接接口

模块的内部组件连接可以多元化，但是模块间的连接则必须标准化和通用化，以便模块在组装、重构过程中快速的连接和分离。连接接口需要确保模块间可靠连接，同时，从可服务性的角度来讲，模块应该能够被空间机器人进行操作。接口的连接功能，除了机械连接外，还应具备一些其他功能，如信息的交互，热量的传递以及电能的输送等。鉴于空间模块体积的限制，对各功能独立设计接口将不是一个划算的选择。需要开发一套针对机械，数据，电气和热连接等多功能集成且经过内在优化的标准接口，以保证模块与航天器，模块与空间机器人末端执行机构之间的连接[57]。

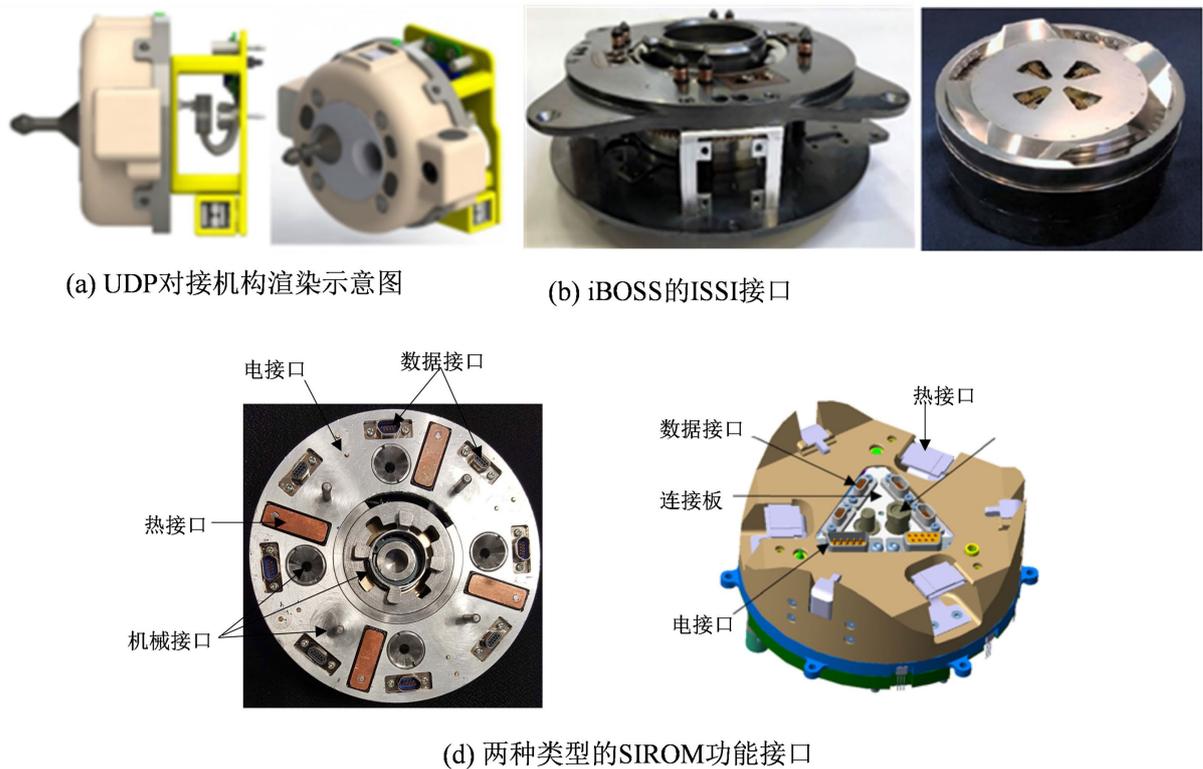


Figure 17. Several docking interfaces

图 17. 几种对接接口

考虑到模块化航天器的总体要求以及轨道应用中的使用要求，空间系统模块化连接器的理想特性清单包括以下[58] [59]。

1) 机械传动(大多数连接器的基本要求); 2) 传输电能的能力; 3) 传输数据的能力; 4) 热传递能力; 5) 传输燃料的能力(在某些情况下需要); 6) 通过执行机构主动锁定和解锁; 7) 被动对接或捕获能力，以简化零重力交会计时; 8) 雌雄同体连接; 9) 旋转对称性; 10) 单侧可断开，以应对模块发生故障时的故障保护; 11) 结构刚度; 12) 对接时的不对中偏差; 13) 功能冗余，可靠性更高; 14) 自动对接的跟踪能力; 15) 连接器本身的可重复使用性。

由于这一广泛的要求，模块连接接口的设计成为了模块化航天器系统中最复杂和关键的部分。没有一个单一的接口可以同时满足所有的这些要求，也不可能在本成本和复杂性的限制下满足，但必须以适合模块化要求的方式进行权衡。目前也有一些比较优秀的接口被开发出来，例如 SPHERES 的通用对接接口 UDP，iBOSS 的智能空间系统接口 ISSI，未来空间任务有效载荷机器人操作标准接口 SIROM 项目的两种接口，MOSAR 的 HOTDOCK 等。

SPHERES 的 UDP 是一种探针式异体同构小型对接机构，具备机械和电传输功能，采用主动电磁吸力进行柔性捕获，降低了捕获难度，同时可利用电磁斥力实现分离。机械连接则是利用两个反向转动的圆盘来卡住和锁紧对面的探针头，如图 17(a)所示。

iBOSS 的智能空间系统接口 ISSI 的设计经历了三代，能够实现机、电、热和数据的传输，如图 17(b)所示。其中机械连接部分采用雌雄同体的旋出插入式四盘式卡扣组件，组件的运动主要依靠导向销与静态导向组件、驱动组件上导向槽的相互作用。连接组件周围安装了 4 个可伸缩的导向锥和 4 个接纳锥，在对接时通过伸出实现径向定位功能，同时在对接完成后导向锥停留在另一对接机构的接纳锥内，能够

承受较大的扭转力矩，防止对接机构意外分离。电力传输是通过 4 组弹簧加载的导电导向锥来进行的。数据传输则是通过对接机构中心轴向通道的短程光学通信接口来完成的。热量传输则是采用分布在对接机构最外侧的特殊铜合金材料实现的。

MOSAR 的 HOTDOCK 是一种雌雄同体连接接口，集机械、电源、数据和流体传输于一体，可以在小位置或旋转误差下进行连接和断开，如图 17(c)所示。它也是密封、自对准的，并提供单侧断开功能。

SIROM 项目团队分别设计了两种类型的接口，这两种接口都采用了雌雄同体的机械接口设计，分别采用了泵送流体回路和金属热传导形式的热传输形式，以及多对电，数据接口[60][61]，如图 17(d)所示。

4.3. 电子系统的模块化系统优化

现有的控制系统可分为两大类：集中式系统和分布式系统。几乎所有的空间硬件都基于高可靠和冗余的集中式系统设计，例如三模冗余。用于模块化航天器的控制系统很适合冗余形式的分布式控制。冗余分散系统大大简化和降低了单个组件的成本。虽然模块化和分散在一定程度上增加了系统设计的复杂性，但它对于实现未来空间系统高模块化至关重要，同时也有利于在其他领域使用分散的系统，如综合模块化航空电子系统。

在分散和可重构系统中，管理多个模块配置的代表方法包括编码、装配关联矩阵、有向图和配置矩阵。所使用的配置设计需要进行优化，并且在被选为目标配置之前应满足性能测试。蛮力优化、模拟退火算法、遗传算法和其他众所周知的方法用于模块化航天器的配置，并且随着这一领域的进一步工作，这些方法有可能在空间中得到应用[56]。目前还没有通用的自重构规划算法，因为特定的模块结构设计会导致不同的规划结果。

4.4. 综合模块化航空电子系统

模块化航天器呈现分布式特点，其电子系统目前正过渡到综合模块化航空电子系统(IMA)。所有 IMA 系统都被认为具有以下特征[62]：

- 基于商用货架产品或特定领域标准的通用软硬件。
- 按带宽、性能、安全和保密划分的网络、模块和输入输出设备集成。
- 分层软件架构，使用标准编程接口层将硬件和应用程序相互隐藏，实现代码重用和可移植性。
- 模块应用程序的重构。这可以是静态重构或动态重构。
- 采用操作系统和中间件去管理应用程序。
- 根据子系统未来功能的概念路线图配置处理增长。
- 更新关键接口，并与旧有接口之间建立桥接。
- 允许应用程序运行的保护机制由关键级别插入和共享资源。
- 针对每个可行的配置，以及当系统跨端到端分布式处理链升级时，确定的调度可以满足所有应用程序的最后期限。
- 设计人工制品以促进模块的增量认证，以进行初始认证和未来的增长。

IMA 体系架构的挑战在于将平台系统和子系统级实时、安全和可靠的映射到处理器、网络和软件组件的可用目标体系结构中。目前，所有部署的 IMA 系统都是静态模块化的。由于验证和规划的复杂性，完全自主重构尚未用于飞行系统。有两种降低自重构代价的即插即用航空电子设备的方法，分别是基于模型配置和自动配置。前者将配置存储在特定域模型中，并应用自动检查、完成和转换来消除歧义。后者可以从系统架构数据中生成大部分配置，并应用模型转换语言从这些数据中生成桩代码[63][64]。

4.5. 通信系统

当前,在航天器模块化发展的过程中,系统也从完全集中式处理向分布式处理转变。对于通信系统数据总线需要满足高带宽,可扩展,低延迟,高实时性,低质量,低成本,低功耗、可容错,抗干扰等要求。目前已经应用于航空航天或比较有价值的数据总线有 1553B 总线,RS232、RS422 和 RS485 标准化串行总线,CAN 总线,IEEE1394,SpaceWire,实时以太网,光纤通道等。

随着宇航系统向网络化和智能化发展,以总线为主流的通信方式逐渐向以网络为主流的通信方式过渡[65],光纤通道(FC)和实时以太网将是未来航天发展的主要数据总线。在航空电子中,美国在 JAST 计划研究中就将 FC 作为统一网络的总线标准。FC-AE-1553 更是在兼容 MIL-STD-1553B 协议终端的基础上,又具有了 FC 极高的网络性。以太网标准为高速信号传递提供了最合适的基础,但可能需要诸如冗余运行和物理时钟等特性,其中 AFDX 和 TTEthernet 是两种比较热门的可以满足航天应用的以太网类型。

4.6. 健康管理系统

健康管理系统是用于航天器软件和数据收集、故障检测、健康报告生成和故障恢复的综合系统[66]。随着航天器航空电子系统的功能和复杂性的增加,航天器自主健康管理和容错重配置能力受到越来越多的关注。文献[67]提出了一种多维动态可配置的航天器自主健康管理系统设计和实现方法,可以将已有的大量人工管理方法和策略转换为故障模型,植入航天器形成支持动态配置的规则库,实现自主健康管理。文献[68]提出了基于机器学习建模的航天器健康管理设计平台。目前,随着人工智能技术的快速发展,基于分布式传感、多源数据融合、数据挖掘和数字孪生等技术的智能健康管理方法将在航天器中发挥巨大的作用。

5. 发展建议

航天器模块化为空间系统规模受限问题提供了解决方案,同时空间系统中各模块间的就地可连接性显著增强了空间探索和维修任务的灵活性、适应性和鲁棒性。模块化航天器作为未来空间系统发展的重要方向,给未来航天器的发展提供新的解决方案,为此本文提出以下发展建议。

5.1. 模块化航天器快速生成技术

模块化设计的关键是根据任务进行功能映射和集成,这体现了模块化的程度。航天器的设计本身有很多的规则,标准和要求需要去遵守。而模块化在设计航天器及其模块时仍然很复杂,尤其当安装,放置和集成多个组件时,每个构建块之间都存在着相互约束限制[69]。航天器每个阶段都需要建模,验证和进一步分析。为了使建模过程自动化,航天器的所有可用电子元件,组件,模块等都需要集成在一个电子知识库中,并且提供多种工具,帮助用户选择、撰写和评估想要的航天器配置。用户可以根据设计要求,构建成本等要素通过所提供的优化软件快速选择最优的元件,构建块,并可可视化的显示所构建的模型,帮助用户初步构建航天器。

5.2. 软件定义可重构

模块化航天器的通用化、标准化接口,模块化硬件,分布式航空电子系统和通信系统为软件定义提供了得天独厚的条件。软件定义航天器的概念主要包括软件定义总线和软件定义有效载荷。由欧洲航天局、欧洲卫星公司和空中客车防务航天公司联合开发的欧洲通信卫星量子系列卫星是携带软件可重构负载的实验通信卫星。它们可以在轨调整波束覆盖范围、频段和功率,还可以改变轨道位置以实现在轨功能重建[70]。由中国科学院软件研究所开发的天智一号软件定义卫星于 2018 年发射升空,已通过软件上

传的方式成功开展了 10 余次在轨实验,包括智能测量与运行控制、智能数据压缩、智能信息处理等方面[71]。软件定义航天器的核心思想是消除航天器产品软硬件之间的耦合,使航天器软件能够独立演化、按需加载、动态重构[72]。在相同硬件的情况下可以通过动态软件编程重构来完成不同的功能,打破了系统功能定制化、固化的局面,实现了功能的重构和升级。

5.3. 融合数字孪生的混合现实仿真技术

模块化航天器研制过程涉及设计与仿真分析、制造集成、测试试验、在轨管理等多个环节,迫切需要建立虚拟可视化、虚实结合的数字化协同设计制造能力。数字孪生是以数字化方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型,并借助实时数据再现物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等数字化信息技术[73]。混合现实是包含虚拟现实和增强现实的一个更广泛概念。以数字化方式,将各类异构数据接入到虚拟环境中,将纳入虚拟环境中的数据按照空间关系进行正确的叠加显示,快速构建虚拟场景,支撑三维数字样机协同设计、机构产品运动过程仿真、虚拟装配和工艺仿真、飞行过程和场景仿真等工作,提升航天器任务分析、数字样机设计、机构运动及飞行过程虚拟仿真分析、人机功效分析等能力[74]。

6. 结论

模块化航天器在未来航天系统中的潜力不可估量,但模块化的空间应用仍然处于起步阶段。介绍了模块化航天器的相关概念,从静态形式,支持可展开,可重构这些角度介绍了模块化航天器的发展脉络。考虑模块化航天器软硬件,介绍了相关关键技术。从模块化航天器设计,仿真和可重构的角度建议大力发展模块化航天器快速生成技术、软件定义可重构和融合数字孪生的混合现实仿真技术。

参考文献

- [1] Brown, O. and Eremenko, P. (2006) The Value Proposition for Fractionated Space Architectures.
- [2] Selva, D., Golkar, A., Korobova, O., Cruz, I.L.I., Collopy, P. and de Weck, O.L. (2017) Distributed Earth Satellite Systems: What Is Needed to Move Forward? *Journal of Aerospace Information Systems*, **14**, 412-438. <https://doi.org/10.2514/1.i010497>
- [3] McCurdy, H.E. (2004) *Faster, Better, Cheaper: Low-Cost Innovation in the U.S. Space Program*, Johns Hopkins University Press.
- [4] Bartlett, R.O. (1978) NASA Standard Multimission Modular Spacecraft for Future Space Exploration. American Astronautical Society and Deutsche Gesellschaft fuer Luft-und Raumfahrt.
- [5] Esper, J. (2005) Modular, Adaptive, Reconfigurable Systems: Technology for Sustainable, Reliable, Effective, and Affordable Space Exploration. *AIP Conference Proceedings*, **746**, 1033-1043.
- [6] Orogo, C., Enoch, M. and Flaggs, D. (2006) Development of Plug-N-Play (Flight) Control Systems for Responsive Spacecraft. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7243>
- [7] Deborah, M., Grau, J., et al. (2004) Modular Spacecraft Standards: Supporting Low-Cost, Responsive Space.
- [8] Tanaka, H., Yamamoto, N., Yairi, T. and Machida, K. (2005) Autonomous Assembly of Cellular Satellite by Robot. *56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, Fukuoka, 17 October-21 October 2005. <https://doi.org/10.2514/6.iac-05-d1.2.04>
- [9] Barnhart, D., Hill, L., Fowler, E., et al. (2012) Changing Satellite Morphology through Cellularization. *AIAA Space 2012 Conference and Exposition*, Washington, 22-24 May 2012, 52-62.
- [10] Weise, J., Briß, K., Adomeit, A., et al. (2012) An Intelligent Building Blocks Concept for On-Orbit-Satellite Servicing. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS)*, Turin, 4-6 September 2012, 1-8.
- [11] Hölttä-Otto, K. and de Weck, O. (2007) Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. *Concurrent Engineering*, **15**, 113-126. <https://doi.org/10.1177/1063293x07078931>

- [12] Ulrich, K. (1995) The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm. *Research Policy*, **24**, 419-440. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00775-3](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00775-3)
- [13] Ulrich, K. (1994) Fundamentals of Product Modularity. In: *Management of Design*, Springer, 219-231. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1390-8_12
- [14] Siddiqi, A. and de Weck, O.L. (2008) Modeling Methods and Conceptual Design Principles for Reconfigurable Systems. *Journal of Mechanical Design*, **130**, Article 101102. <https://doi.org/10.1115/1.2965598>
- [15] 庞羽佳, 李志, 陈新龙, 等. 模块化可重构空间系统研究[J]. 航天器工程, 2016, 25(3): 101-108.
- [16] Rossetti, D., Keer, B., Panek, J., Ritter, B., Reed, B.B. and Cepollina, F. (2015) Spacecraft Modularity for Serviceable Satellites. *AIAA Space 2015 Conference and Exposition*, Pasadena, 31 August-2 September 2015, 1-12. <https://doi.org/10.2514/6.2015-4579>
- [17] Adomeit, A., Reimerdes, H., Lakshmanan, M., Schervan, T. and Dafnis, A. (2013) Structural Concept and Design for Modular and Serviceable Spacecraft Systems. 54th *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Boston, 8-11 April 2013, 1575. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1575>
- [18] Lange, C., Witte, L., Rosta, R., Sohl, F., Heffels, A. and Knapmeyer, M. (2017) A Seismic-Network Mission Proposal as an Example for Modular Robotic Lunar Exploration Missions. *Acta Astronautica*, **134**, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.02.004>
- [19] California Polytechnic State University (2012) CubeSat Design Specification Rev.12. http://www.cubesat.atl.Cal-Poly.edu/images/developers/cds_rev12.pdf
- [20] Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco, A.J. and Hertzfeld, H. (2011) Cubesats: Cost-Effective Science and Technology Platforms for Emerging and Developing Nations. *Advances in Space Research*, **47**, 663-684. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.009>
- [21] Swartwout, M. (2004) University-Class Satellites: From Marginal Utility to ‘Disruptive’ Research Platforms. *Proceedings of AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, 10 August 2004.
- [22] Lyke, J., Fronterhouse, D., Cannon, S., et al. (2005) Space Plug-and-Play Avionics. *Proceedings of the AIAA 3rd Responsive Space Conference*, Long Beach, 30 August-1 September 2005, 1-5.
- [23] McNutt, C., Vick, R., Whiting, H., et al. (2009) Modular Nanosatellites-(Plug-and-Play) PnP CubeSat. *7th Responsive Space Conference 2009*, Los Angeles, 27-30 April 2009, 4003.
- [24] Westley, D., Grau, J., Jordan, L. and McDermott, S. (2004) Modular Spacecraft Standards: Supporting Low-Cost, Responsive Space. *Space 2004 Conference and Exhibit*, San Diego, 28-30 September 2004, 6098. <https://doi.org/10.2514/6.2004-6098>
- [25] Howell, J.T., Mankins, J.C. and Carrington, C. (2005) Modular, Reconfigurable, High-Energy Systems Stepp. *56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, Fukuoka, 17-21 October 2005, 1-11. <https://doi.org/10.2514/6.iaac-05-d3.2.04>
- [26] Carrington, C. and Howell, J. (2007) Modular, Reconfigurable, High-Energy Technology Development. 2007 *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, 3-10 March 2007, 1-18. <https://doi.org/10.1109/aero.2007.352663>
- [27] Higashi, K., Nakasuka, S., Sugawara, Y., et al. (2006) Thermal Control of Panel Extension Satellite (PETSAT). *25th International Symposium on Space Technology and Science*, Kanazawa, 4-11 June 2006, 951.
- [28] Sugawara, Y., Sahara, H., Nakasuka, S., Greenland, S., Morimoto, T., Koyama, K., et al. (2008) A Satellite for Demonstration of Panel Extension Satellite (Petsat). *Acta Astronautica*, **63**, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.12.016>
- [29] Hicks, M., Enoch, M., Capots, L., et al. (2005) HEXPAK—A Flexible, Scalable Architecture for Responsive Spacecraft. *3rd Responsive Space Conference*, Los Angeles, 25-28 April 2005.
- [30] Seo, J., Paik, J. and Yim, M. (2019) Modular Reconfigurable Robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, **2**, 63-88.
- [31] Castano, A. and Will, P. (2001) Representing and Discovering the Configuration of Conro Robots. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, Seoul, 21-26 May 2001, 3503-3509. <https://doi.org/10.1109/robot.2001.933160>
- [32] Yim, M., Zhang, Y., Roufas, K., et al. (2002) Connecting and Disconnecting for Chain Self-Reconfiguration with PolyBot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **7**, 442-451.
- [33] Yim, M., Roufas, K., Duff, D., Zhang, Y., Eldershaw, C. and Homans, S. (2003) Modular Reconfigurable Robots in Space Applications. *Autonomous Robots*, **14**, 225-237. <https://doi.org/10.1023/a:1022287820808>
- [34] Yim, M., Shirmohammadi, B., Sastra, J., et al. (2007) Towards Robotic Self-Reassembly after Explosion. 2007 *IEEE/RSJ*

International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, 29 October-2 November, 2767-2772.

- [35] Shen, W., Salemi, B. and Moll, M. (2006) Modular, Multifunctional and Reconfigurable Superbot for Space Applications. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7405>
- [36] Andreev, A.S., Leonova, A.V. and Popov, A.M. (2020) Demand for Satellite Reconfigurability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **822**, Article 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/822/1/012036>
- [37] Tanaka, H., Kawahara, Y., Yairi, T., *et al.* (2004) Research on Reconfigurable Space System using Orbital Servicing Robots and Cellular Satellites. *Proceedings of the 24th International Symposium on Space Technology and Science*, Miyazaki, 30 May-6 June 2004.
- [38] Tanaka, H. (2005) Autonomous Assembly of Cellular Satellite by Robot for Sustainable Space System. *International Astronautical Congress*, Fukuoka, 17-21 October 2005.
- [39] Kong, E.M., Saenz-Otero, A., Nolet, S., *et al.* (2004) SPHERES as a Formation Flight Algorithm Development and Validation Testbed: Current Progress and beyond. Goddard Space Flight Center.
- [40] Nolet, S., Kong, E. and Miller, D.W. (2004) Autonomous Docking Algorithm Development and Experimentation Using the SPHERES Testbed. In: *Spacecraft Platforms and Infrastructure*, International Society for Optics and Photonics, 1-15.
- [41] Schervan, T., Kortmann, M., Schroder, K., *et al.* (2017) iBOSS Modular Plug & Play-Standardized Building Block Solutions for Future Space Systems Enhancing Capabilities and Flexibility, Design, Architecture and Operations. *68th International Astronautical Congress (IAC)*, Adelaide, 25-29 September 2017.
- [42] Kortman, M., Ruhl, S., Weise, J., *et al.* (2015) Building Block Based iBoss Approach: Fully Modular Systems with Standard Interface to Enhance Future Satellites. *66th International Astronautical Congress (Jerusalem)*, Jerusalem, 12-16 October 2015, 1-11.
- [43] Oberländer, J., Uhl, K., Pfozter, L., *et al.* (2012) Management and Manipulation of Modular and Reconfigurable Satellites. *ROBOTIK 2012 7th German Conference on Robotics*, Germany, 21-22 May 2012, 1-6.
- [44] 陈罗婧, 郝金华, 袁春柱, 等. “凤凰”计划关键技术及其启示[J]. *航天器工程*, 2013, 22(5): 119-128.
- [45] Barnhart, D., Hill, L., Fowler, E., *et al.* (2013) A Market for Satellite Cellularization: A First Look at the Implementation and Potential Impact of Settles. *AIAA Space 2013 Conference and Exposition*, San Diego, 10-12 September 2013, 5486.
- [46] Barnhart, D., Hill, L., Fowler, E., *et al.* (2013) DARPA Phoenix Payload Orbit Delivery System (PODS). *AIAA Space 2013 Conference and Exposition*, San Diego, 10-12 September 2013, 5484.
- [47] Chang, H., Huang, P., Lu, Z., *et al.* (2016) Cellular Space Robot and Its Interactive Model Identification for Spacecraft Takeover Control. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, 9-14 October 2016, 3069-3074.
- [48] Chang, H., Huang, P., Lu, Z., Zhang, Y., Meng, Z. and Liu, Z. (2017) Inertia Parameters Identification for Cellular Space Robot through Interaction. *Aerospace Science and Technology*, **71**, 464-474. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.09.044>
- [49] Helvajian, H. (2020) Hive: A New Architecture for Space. *Proceedings of the 70th International Astronautical Congress (iac-2019)*, Washington, 21-25 October 2019.
- [50] Romanishin, J.W., Gilpin, K., Claici, S. and Rus, D. (2015) 3D M-Blocks: Self-Reconfiguring Robots Capable of Locomotion via Pivoting in Three Dimensions. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, 26-30 May 2015, 1925-1932. <https://doi.org/10.1109/icra.2015.7139450>
- [51] Letier, P., Yan, X.T., Deremetz, M., *et al.* (2019) MOSAR: Modular Spacecraft Assembly and Reconfiguration Demonstrator. *15th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*, Noordwijk, 27-28 May 2019, 1-7.
- [52] Letier, P., Siedel, T., Deremetz, M., *et al.* (2020) HOTDOCK: Design and Validation of a New Generation of Standard Robotic Interface for On-Orbit Servicing. *71st International Astronautical Congress*, Location 12-14 October 2020, 1-8.
- [53] Underwood, C., Pellegrino, S., Lappas, V.J., Bridges, C.P. and Baker, J. (2015) Using Cubesat/Micro-Satellite Technology to Demonstrate the Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (Aarest). *Acta Astronautica*, **114**, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.04.008>
- [54] 吴勤. 美国 F6 计划概况[J]. *国际太空*, 2008(5): 1-5.
- [55] Brown, O., Eremenko, P. and Collopy, P. (2009) Value-Centric Design Methodologies for Fractionated Spacecraft: Progress Summary from Phase I of the DARPA System F6 Program. *AIAA Space 2009 Conference & Exposition*, Pasadena, 14-17 September 2009, 6540. <https://doi.org/10.2514/6.2009-6540>
- [56] Post, M.A., Yan, X. and Letier, P. (2021) Modularity for the Future in Space Robotics: A Review. *Acta Astronautica*, **189**, 530-547.
- [57] Yan, X.T., Brinkmann, W., Palazzetti, R., *et al.* (2018) Integrated Mechanical, Thermal, Data, and Power Transfer

- Interfaces for Future Space Robotics. *Frontiers in Robotics and AI*, **5**, Article 64.
- [58] Brunete, A., Ranganath, A., Segovia, S., *et al.* (2017) Current Trends in Reconfigurable Modular Robots Design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **14**, Article 1729881417710457.
- [59] Wenzel, W., Palazzetti, R., Yan, X.T., *et al.* (2017) Mechanical, Thermal, Data and Power Transfer Types for Robotic Space Interfaces for Orbital and Planetary Missions—A Technical Review. European Space Agency.
- [60] Jankovic, M., Brinkmann, W. and Bartsch, S. (2018) Concepts of Active Payload Modules and End-Effectors Suitable for Standard Interface for Robotic Manipulation of Payloads in Future Space Missions (SIROM) Interface. 2018 *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, 3-10 March 2018, 1-15.
- [61] Vinals, J., Urgoiti, E., Guerra, G., *et al.* (2018) Multi-Functional Interface for Flexibility and Reconfigurability of future European Space Robotic Systems. *Advances in Astronautics Science and Technology*, **1**, 119-133.
- [62] Gaska, T., Watkin, C. and Chen, Y. (2015) Integrated Modular Avionics—Past, Present, and Future. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **30**, 12-23.
- [63] Fraboul, C. and Martin, F. (1998) Modeling and Simulation of Integrated Modular Avionics. *Proceedings of the Sixth Euromicro Workshop on Parallel and Distributed Processing*, Madrid, 21-23 January 1998, 102-110.
- [64] Li, X. and Xiong, H. (2009) Modelling and Simulation of Integrated Modular Avionics Systems. 2009 *IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference*, Orlando, 25-29 October 2009, 7.B.31-7.B.38.
- [65] 赵沛, 闫涛, 陶淑婷. 宇航总线网络技术的发展[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会. 第六届航天电子战略研究论坛论文集. 2019: 32-37.
- [66] Zhang, Z., Li, X., Li, Y., Hu, G., Wang, X., Zhang, G., *et al.* (2023) Modularity, Reconfigurability, and Autonomy for the Future in Spacecraft: A Review. *Chinese Journal of Aeronautics*, **36**, 282-315.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.04.019>
- [67] 杨柳青, 张亚航, 袁珺, 等. 航天器多维动态可配置健康管理系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(12): 10-13+28.
- [68] 房红征, 年夫强, 罗凯, 等. 基于机器学习建模的航天器健康管理平台研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 112-118.
- [69] Buettner, T., Tanev, A., Pfozter, L., *et al.* (2018) The Intelligence Computer Aided Satellite Designer iCASD-Creating Viable Configuration for Modular Satellites. 2018 *NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, Edinburgh, 6-9 August 2018, 25-32.
- [70] Wlaker, J.L. and Mckinnon, D. (2015) Future Digital Flexible and Software Defined Payload Systems for Commercial Space. *AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition*, Queensland, 7-10 September 2015, 2-13.
- [71] 赵军锁, 吴凤鸽, 刘光明, 等. 发展软件定义卫星的总体思路与技术实践[J]. 卫星与网络, 2018(4): 44-49.
- [72] He, X., Li, J., Bai, F., Jia, X., Huang, X. and Xu, M. (2023) Avionics System Architectures for Software-Defined Spacecraft. In: *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer, 150-164. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34497-8_13
- [73] 崔玉福, 刘质加, 王靖. 数字孪生卫星技术发展展望[J]. 国际太空, 2021(10): 27-31.
- [74] 王璐, 赵寒, 宋文龙, 等. AR/VR 仿真建模技术在航天器研制中的应用探索[J]. 制造业自动化, 2017, 39(8): 138-141.