

# 面向在轨服务的可重构细胞卫星关键技术与展望

黄攀峰<sup>1,2</sup>, 常海涛<sup>1,2</sup>, 鹿振宇<sup>1,2</sup>, 王 明<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学航天学院智能机器人研究中心, 西安 710072; 2. 西北工业大学航天飞行动力学技术重点实验室, 西安 710072;  
3. 北方自动控制技术研究所, 太原 030006)

**摘 要:** 为解决传统航天器设计模式所面临挑战, 本文分析了当前航天器设计的技术现状和体系结构不能满足在轨服务要求等突出问题。以“凤凰重生”的设想为代表, 提出了面向在轨装配任务的可重构细胞卫星技术, 分析了细胞卫星的内涵和结构及接口设计理念。针对面向空间装配的在轨服务所面临的挑战, 提出了可重构细胞卫星的关键技术, 包括构型优化、信息融合、多细胞结构的控制和针对精细装配的空间遥操作等。最后针对我国的技术现状, 提出了我国开展细胞卫星研究所需解决的问题和未来发展建议。

**关键词:** 在轨服务; 在轨装配; 可重构; 细胞化; 凤凰计划

**中图分类号:** TP731      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2016)01-0001-10

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.01.001

## Key Techniques of On-Orbit Service-Oriented Reconfigurable Cellularized Satellite and Its Prospects

HUANG Pan-feng<sup>1,2</sup>, CHANG Hai-tao<sup>1,2</sup>, LU Zhen-yu<sup>1,2</sup>, WANG Ming<sup>3</sup>

(1. Research Center of Intelligent Robotics, School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to cope with the various challenges of the traditional spacecraft design mode, outstanding problems such as the insufficiency of the technical status and the satellite morphology are analyzed. For the representative idea of ‘Phoenix Rising’, satellite cellularization for on-orbit assembly are described in this paper and the connotation and design principle of the reconfigurable cellularized satellites are presented. In the face of the challenges for on-orbit assembly tasks, the key techniques of the cellularized satellites such as architecture optimization, information fusion, control for multicellular architecture and precise teleoperation are summarized. Finally, outstanding issues for the future research on cellularized satellites are summarized and the research prospects are proposed based on the technical status of China.

**Key words:** On-orbit service; Space assembly; Reconfigurable; Cellularization; Phoenix project

### 0 引 言

空间技术发展日新月异, 人造地球卫星得到了广泛的应用。截止到2015年8月31日的统计数据显示, 目前在轨运行卫星共1305颗<sup>[1]</sup>, 近年来, GEO轨道年均发射量约25颗<sup>[2]</sup>, 但依然难以满足迅猛增长的需求。卫星发展至今, 其基本体系结构并未发

生根本的变化, 均由电源、推进、姿态控制等组成<sup>[3]</sup>。卫星种类、功能和大小不一, 在目前研制模式下, 需要根据任务不同对系统进行设计和测试, 传统模式面临以下四方面挑战:

卫星部件重用: 长寿命 GEO 卫星的平均设计寿命为15年, 小卫星的设计寿命则更短<sup>[1]</sup>。但是退役卫星上有很多部件的使用寿命远大于卫星整体设计

寿命,如天线的使用寿命超过 100 年。目前 GEO 轨道有超过 1300 颗大型卫星,其中天线重量约 20000 kg,价值约 3000 亿美元<sup>[4]</sup>,这些部件无法重复利用,造成了极大的浪费。

**快速响应:**目前一颗大型卫星的研制周期长达 5~10 年时间,其中一半以上时间用于测试<sup>[5]</sup>。一旦失效,重新部署的时间成本极大。在军事对抗、灾害应急等应用中,需求提出到发射准备的响应时间需要缩短到数月乃至数周,目前难以实现。

**降低成本:**卫星技术发展至今,其制造成本并未有本质性下降,其中重要原因是重复设计和重复测试现象严重,难以实现标准化、批量化生产。在不改变当前航天器设计模式下,难以实现成本大幅压缩<sup>[6]</sup>。目前降低成本的重要手段是发展质量较轻的小卫星<sup>[7]</sup>。然而,小卫星是以牺牲系统性能为代价的,难以满足许多应用的高性能要求。

**在轨服务:**大量卫星退役的原因是由于燃料耗尽而非部件故障,为延长高价值卫星的服役寿命,在轨服务技术成为了学者的研究热点,各国航天机构也开展了多项在轨服务研究计划<sup>[8]</sup>。目前的研究多关注服务航天器,且当前在轨运行的航天器种类多、标准不一,面临目标非合作的难题<sup>[9]</sup>。

由于以上原因,如何利用空间装配实现低成本、快速部署成为在轨服务研究的新方向,Tanaka 等提出了细胞卫星的概念<sup>[10]</sup>,将卫星按照典型子系统拆分为多个标准化的“细胞”,如反作用飞轮、电源、推力器等,将合理数量和类型的细胞装配在一起形成集成卫星。并完成了样机设计,进行了细胞卫星的机器人精确装配方法研究<sup>[11]</sup>。

利用细胞卫星在轨装配的优势,可以实现卫星部件的重用,实现批量生产以及快速和低成本部署;细胞卫星的标准化结构还降低了装配、维护等的难度。可见该方法是解决卫星部件重用、快速响应、降低成本和在轨服务等问题的可行新概念。从已公开的文献看,此项技术已经受到 DARPA 和 DLR 的关注,分别开展了 Phoenix 和 iBOSS 计划。

凤凰计划(Phoenix Project)是美国 DARPA 于 2011 年启动的一项研究计划<sup>[4]</sup>。该计划的目标是在 GEO 轨道回收利用失效卫星的可用零部件,利用空间机器人技术在轨装配新的航天器系统,通过卫星部件的重用实现减少空间系统研制和发射成本。

iBOSS(Intelligent Building Blocks for On-orbit-Satellite Servicing)是在德国 DLR 的支持下,针对在轨服务对象的研究项目,主要思想是将传统卫星平台分解为在轨服务智能建造块<sup>[12-13]</sup>,通过在轨装配和维护延长航天器寿命减少太空垃圾产生。

我国在卫星部署数量与美欧有相当大的差距,近年来需求逐渐增加,当前研制模式将导致投入大幅增加。细胞卫星这种新的设计模式有望改变卫星的设计和研制的格局,可以有效降低研制成本,缩短响应时间。相对美国和欧洲,我国对此的研究尚处于开始阶段,因此有必要开展相关技术研究。

本文首先阐明了细胞卫星的概念和内涵,通过凤凰计划和 iBOSS 对细胞卫星的特点及优势进行了介绍;从细胞卫星的结构、接口等方面介绍了细胞卫星的设计理念;然后着重提炼出了细胞卫星发展的关键技术,包括细胞卫星的构型优化、信息融合、多细胞结构的控制技术和针对精细装配的空间遥操作等技术;最后结合我国的技术发展现状和技术基础,提出了我国发展细胞卫星研究的展望和建议。

## 1 细胞卫星的内涵

细胞卫星的概念打破了目前卫星的架构和设计模式,将卫星的组件或子系统进行拆分,设计成标准化的细胞,然后仿照生物器官的形式将这些模块进行装配,组成多细胞结构,单个模块可以称之为“细胞星”或“细胞”。和生物器官一样,由细胞星组合的空间系统具有以下共同特点:

- 1) 基本组成细胞种类有限;
- 2) 细胞数量庞大;
- 3) 单个细胞结构和功能简单;
- 4) 细胞间存在资源共享与传递;
- 5) 组合系统可实现复杂功能。

细胞卫星的典型研究计划有 DARPA 的凤凰计划和 DLR 的 iBOSS。

凤凰计划提出一种称为“Satlet”的细胞卫星,这种细胞卫星可以在发射大型商业卫星时将其搭载发射<sup>[14]</sup>,利用 FRENED 机械臂将其和废弃卫星的天线相结合组成新的航天器系统,如图 1 所示。

DARPA 期望利用“细胞化”和“重构”打破卫星建造体系,利用细胞卫星实现小型化、可维护和可重构。David Barnhart 对凤凰计划进行了经济分

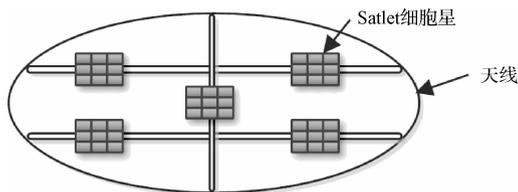


图1 凤凰计划中 Satlet 和天线的结合

Fig.1 Combination of Satlets and Antenna in Phoenix

析<sup>[15]</sup>,认为该方案可降低卫星研制成本。目前已经完成样机设计和地面演示验证,进行了一系列的样机测试<sup>[16]</sup>。

iBOSS 的主要思想是将传统卫星平台分解为标准化的智能建造块,利用空间机器人在轨装配形成新的空间系统,实现卫星的模块化和可重构。

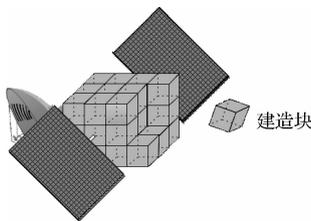


图2 iBOSS 中利用建造块构造卫星示意图

Fig.2 Build a satellite with blocks in iBOSS

与传统卫星的构架相比较,细胞卫星具有以下几点优势<sup>[10,12]</sup>:

1) 标准化:细胞星的结构和接口设计标准化,因此针对不同任务仅需要设计载荷细胞星,可以避免重复设计。

2) 可重构:细胞星由标准接口互连,可通过添加或替换细胞星实现系统结构和功能重构。

3) 市场需求量大:不同大小和功能的航天器都可以由细胞星装配而成,仅目前全球卫星发射量完全细胞化后每年约需要 1~4 万个<sup>[6]</sup>,便于批量生产。

4) 发射要求简单:细胞星结构标准化、尺寸小,可以减少运载火箭种类需求,降低发射成本。

5) 面向在轨服务:细胞星的设计基于在轨装配任务需求,可以实现细胞更换等在轨维护。

6) 系统弹性化:通过细胞星的重构可以实现系统结构和功能的弹性化。

## 2 设计理念

传统航天器的设计是面向任务的,由需求驱动

定制生产。细胞星的设计理念是针对不同功能设计多种细胞,利用细胞的组合构成不同的系统。在模块化机器人领域已有众多有参考价值的设计案例,模块化机器人可分为同构和异构两类,目前的研究多针对同构模块<sup>[17]</sup>,如 M-TRAN<sup>[18]</sup> 以及 PolyBot<sup>[19]</sup>。不同种类的细胞星的功能不一致,但其结构和接口都是一致的,因此结构上属于同构系统。细胞星的设计目标是采用标准化手段保证细胞星灵活在轨装配和重组,以下分别从结构和接口两方面对细胞星的设计理念和原则进行阐述。

### 2.1 结构设计

细胞星作为在轨服务的对象,可操作性和易用性是其基本需求,应遵循以下原则<sup>[10,12]</sup>:

1) 结构标准化:标准化可以降低生产成本,减少重复设计,降低在轨装配的难度。

2) 便于机器人操作:抓持机构、标定器等支持。

3) 热控可行性:应考虑单个细胞星的热控,细胞星间的热辐射、热传导效应以及结构热变形对细胞装配的影响等。

4) 细胞装配的灵活性:包括装配组合的灵活性和装配方向的灵活性。前者保证细胞星间连接拓扑的多样化,后者保证某些具有方向性的机构如反作用飞轮的多方向复用。

5) 结构轻质化:同步轨道发射成本达每千克 4~6 万美元<sup>[15]</sup>。采用轻质结构可大幅降低发射成本。

6) 足够的内部空间:足够的内部空间以容纳星载计算机、有效载荷等设备。

7) 保证可靠连接:细胞结构设计应能够承受对接机构静态载荷和发射、机动等动态载荷。

### 2.2 接口设计

细胞化的体系结构将各个细胞星集成起来形成具备复杂功能的空间系统。要满足细胞星之间的能源、信息甚至推进剂等的共享,因此需要设计相应的接口。以 iBOSS 为例,图 3(a)为一种 iBOSS 样机,其接口的位置分布如图 3(b)所示。

为实现灵活重组和装配,机械接口、电源接口和数据接口的设计都应具备有以下共性需求:

1) 异体同构

异体同构的对接机构,对接双方没有主动与被动的区别,构造一致,可以满足任意不同细胞的两两

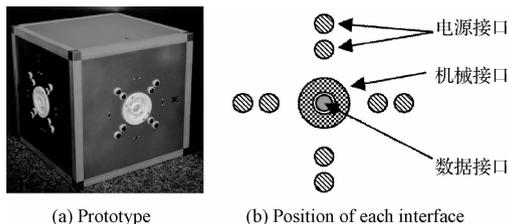


图 3 iBOSS 各接口示例<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Demonstrator of the iBOSS Interface<sup>[12]</sup>

对接组合,保证了对接拓扑的多样性和灵活性。

## 2) 轴对称

轴对称接口可以实现两个对接细胞沿对接中心轴线以多种角度对接,保证了对接方向的多样性和灵活性。此外,细胞星的机械接口、电源接口和数据接口的设计还有其他需求。

### 2.2.1 机械接口

机械接口,即对接机构,为保证结构稳定性,机械接口是必需的,同时需要满足以下几点要求:

#### 1) 对接机构可释放

对接机构可释放,可保证集成系统的可重构。对接机构分为被动式<sup>[10]</sup>和自主式<sup>[12]</sup>两种,其中自主式对接机构的锁紧和释放由自身电机驱动,被动式对接机构则由在轨服务空间机器人驱动。相比主动式,被动式对接机构无需电子部件,结构相对简单,因此容易实现较高的可靠性和较长的使用寿命;反之,主动式对接机构结构复杂,但可以减少空间机器人的辅助拆分等复杂接触作业。

#### 2) 连接稳定性

对接机构应保证系统在重力梯度力矩、卫星姿态控制、轨道控制等载荷下的稳定性。

Tanaka 为 CellSat 所设计的对接机构采用连接针作为独立连接件将两个相邻细胞星连接,如图 4 所示,并设计了启发式机器人装配算法。

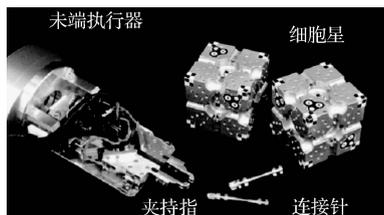


图 4 CellSat 的细胞结构设计及其连接针<sup>[10-11]</sup>

Fig. 4 Cell and connect pin for CellSat<sup>[10-11]</sup>

Adomeit 等分析了独立连接件、磁力、螺钉、钩和卡销等多种对接机构。通过冗余性、重量、体积、对接难度等因素的综合考量,选用了图 5 所示的对接机构。该机构是周边式机构,因此可以将数据接口配置在其中心,起到一定的保护作用。

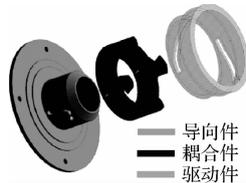


图 5 iBOSS 的机械接口设计<sup>[20]</sup>

Fig. 5 Mechanical interface designs of iBOSS<sup>[20]</sup>

### 2.2.2 电源接口

电源接口保证太阳能帆板所产生的电力分布到整个系统。电源接口应当满足传输功率、电压等需求,并考虑电源分配的可行性。

图 6 为 iBOSS 所设计的电源接口,通过触点接触传输电能,而电能分配则采用的是电源总线技术。iBOSS 电源总线传输 100 V 的未调节电压,每个细胞根据自身的电压需求通过 DC - DC 转换降压<sup>[12]</sup>。

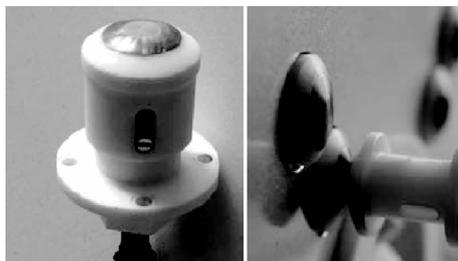


图 6 弹簧金属触点式电源接口<sup>[12]</sup>

Fig. 6 Data interface of spring loaded contact and counter piece<sup>[12]</sup>

### 2.2.3 数据接口

数据通信通过数据接口完成,保证在空间环境下的数据传输的可靠性和高效性。在模块化机器人中,常采用的数据通信方式有串口、CAN 总线等。iBOSS 采用“光纤 - 透镜”的形式<sup>[12]</sup>,可实现可靠、高效的数据传输。

数据调度采用总线技术,由于其连接拓扑结构使得数据总线固有冗余特性,使得数据包从发送端到接收端可能存在不同的路径,因此需要路由、网络管理等协议的支持。

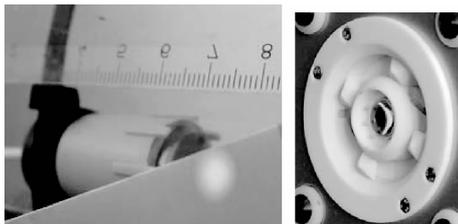


图7 光纤-透镜式数据接口<sup>[12]</sup>

Fig.7 Data interface of lens fitted on the cables<sup>[12]</sup>

### 3 关键技术

#### 3.1 构型优化

基于细胞星的设计模式下,应做好细胞星和集成后的系统之间的权衡。解决细胞星的构型优化的问题,主要包含以下三方面:

- 1) 应采取何种细胞化程度,是以部件、子系统、多子系统还是全系统为细胞单位;
- 2) 不同种类细胞间的功能如何分配;
- 3) 不同连接构型下,系统的成本、可靠性、性能如何评估。

细胞化程度介于单一功能和全功能之间<sup>[3]</sup>,单一功能细胞仅具备子系统某一项功能,全功能细胞星具备卫星的所有功能的独立完整系统<sup>[21]</sup>。Talbot Jaeger 和 Mirczak<sup>[22]</sup>将凤凰计划中的细胞分为构件细胞、单子系统细胞、多子系统细胞和系统细胞。进行了 SWAP(Size, Weight And Power)、灵活性、可靠性和成本分析。SWAP 方面,结构简单的单子系统细胞由于零部件数量较少占优势,而在可靠性、灵活性和成本方面,系统细胞均占较大优势。

Kerzhner 等<sup>[23]</sup>为分析细胞化类型、功能分配以及部件类型等因素对细胞星设计的影响,将航天器所有功能分类,并利用基于模型的搜索方法,得到的帕累托最优方案是将主要功能分配到两类细胞:一类为具备计算、数据处理的姿态传感器和通信等的细胞,另一类为具备执行器以及姿态角速度测量等的细胞。除此之外,还应包括有效载荷细胞和连接支撑作用的细胞。

文献[22]与文献[23]的分析结论基本一致,然而前者认为应该在保持细胞同质化的基础上提高集成程度,而后者认为,由于成本和复杂度呈指数关系,适当的组装测试成本下,采用一定程度的异构细胞,可以降低细胞级的复杂度从而获得更高的效益。

不同构型下系统的评估是一项复杂的课题,Weise 等<sup>[12]</sup>对 iBOSS 的构型优化问题设计了基于贪婪算法的计算机辅助设计软件,实现了构型的自动优化。

总体来讲,目前针对细胞星构型优化的研究尚少,细胞化程度等问题并无公认的确切定论,该项研究涉及多个学科领域,尚处于摸索阶段。

#### 3.2 信息融合

系统中大量细胞星上安装有传感器,为了达到感知结果的准确性和可靠性,需要进行信息融合,除了对传感器得到的状态信息进行直接融合之外,由于细胞星本身具有一定的处理能力,这样通过传感器接收到的数据就可以直接进行处理,得到对象模型的参数信息,然后再对参数信息进行融合,由于融合的各细胞星之间具有相同的对象模型,这些模型之间的参数可以被认为是细胞星之间的耦合参数,通过参数信息融合可以得到更好的参数估计。

##### 3.2.1 状态信息融合

信息融合技术针对单源和多源的数据和信息进行关联、相关等处理,以得到精准的状态信息和身份估计或完整和及时的态势评估的过程。

在多传感器信息融合领域,目前已有相当多的研究,涌现出大量不同的融合方法,并应用到导航、遥感、图像处理、模式识别等领域。信息融合的方法可以分成三大类:一是基于随机模型;二是基于最小二乘法;三是智能算法<sup>[24]</sup>。

基于随机模型的算法主要有加权平均法、贝叶斯推理、证据理论、鲁棒估计等理论;基于最小二乘法的融合方法主要有卡尔曼滤波、最优理论;智能型的融合方法主要有模糊逻辑、神经网络、遗传算法、粗集理论、支持向量机、小波分析等<sup>[25]</sup>。

多个细胞星之间通过数据接口共享数据,每个细胞可能含有不同的传感器,可以测量不同信息,这些传感器可能会冗余配置。因此,可以将不同传感器的不同信息进行结合、相关、估计和组合以实现更准确的状态估计。细胞与细胞之间,传感器与传感器之间是分布的,因此分布式信息融合和传感器网络相关技术有重要借鉴意义。

##### 3.2.2 参数信息融合

耦合参数辨识就是一种参数信息融合方法。这种方法由丁锋等<sup>[26-27]</sup>提出,依照参数耦合的程度不

同,可以将耦合参数辨识分为部分参数耦合辨识和全耦合辨识。将存在相同或部分相同对象模型的细胞星视为一个子系统。通过将估计出的参数信息在子系统之间依次传递,根据传递结果对本子系统的参数进行估计,并传递给下一子系统。通过参数的传递运算,抵消噪声影响,使所有子系统具有估计参数,从而实现参数信息的融合。这种耦合参数辨识(参数信息融合)用于细胞星上相同模型参数的估计,并通过融合降低单个细胞的参数估计误差。

考虑到细胞星的分布式网络结构,针对复杂系统的网络信息融合和网络辨识问题也是近年来的研究热点之一。Olfati-Saber 等<sup>[28]</sup>提出了多 Agent 网络一致性算法的理论框架,Irshad<sup>[29]</sup>研究了网络环境存在时延、丢包等情况下系统辨识问题,王乐一等<sup>[30]</sup>对基于网络的辨识、随机非线性系统的辨识等问题进行了深入的讨论。这些基于复杂网络的信息融合与辨识理论对未来大规模细胞星群的研究都是有一定意义的。

### 3.3 多细胞结构的控制

空间系统由多个细胞星集成而成。Singh 等<sup>[31]</sup>对凤凰计划的控制结构进行了分析,将姿态控制系统分为集中控制和分散控制,将传感器和执行器分为并列和非并列等情况。本文考虑细胞星的构型符合大系统规模庞大,结构复杂,功能综合的特性,且细胞星分解过程与大系统分解为若干个子系统相似,参照模块化机器人和多机器人协作的控制方法<sup>[32]</sup>,根据系统分解控制结构的不同,归纳出三种方案:集中控制,分散控制和递阶控制<sup>[33]</sup>。

#### 3.3.1 集中控制

集中控制采用辐射式拓扑结构,具有系统协调性好,控制有效性高等优点,需要存在控制中心对各子系统进行集中控制,适用于规模较小,实时性好,控制精度要求高且控制中心保障可靠的场合。

集中控制要求存在一个中央控制细胞,对各执行器细胞进行控制,需已知各个细胞的传感器和执行机构的准确布局位置。集中控制由于依赖于中央控制细胞,硬件冗余差。因此适用于小规模细胞星组合及要求实时性好,控制精度和协调性高的场合。

另外集中控制中的多个细胞任务分配也是值得研究的方向之一,常用方法有:荷尔蒙法<sup>[34]</sup>、市场法及其改进<sup>[35]</sup>、人工免疫系统 AIS<sup>[36]</sup>等。

#### 3.3.2 分散控制

分散控制用于对协调性要求低,规模大且分布较广的大系统控制,分散控制具有控制有效性高,灵活性好,运行可靠,容易设计和拓展,维护方便,单个控制器成本低等优点,West-Vukovieh 等<sup>[37]</sup>利用分散控制解决了挠性空间机构的控制问题。

细胞星个体本身具有一定的智能性,自治性,反应性,主动性和社会性,单纯的分散控制理论并不能满足分布式人工智能技术的要求,如果将每个细胞星视为一个 Agent,通过 Agent 之间数据交互、命令发布等协调达到控制要求,因此可以采用基于多 Agent 技术的分散控制方法,兼顾系统的控制要求和子系统的自主性。

考虑大规模细胞星的构建,分散控制是理想的控制方案。这种控制方案满足细胞星“离散化”和“可重组”的要求,方便失效细胞星更新和维护。

#### 3.3.3 递阶控制

递阶控制采用上级-下级递阶式控制结构,下级各分散的局部控制器,分别完成对应子系统的局部控制,上级协调器通过对各局部控制器的协调间接的对系统进行全局控制。

目前这种控制已经用于重构机器人的模糊神经网络控制器设计中,顶层应用学习控制补偿因重构而产生的系统动力学变化,底层 PID 控制参数的更新由顶层的功能模块决定<sup>[38]</sup>。

递阶控制兼顾集中控制和分散控制的优点,当协调器失效时,递阶控制退化为分散控制,所以相比于集中控制和分散控制,递阶控制的可靠性更好

在大规模的细胞星组合体中,采用单纯的集中控制和分散控制不能满足系统实时性、可靠性的要求,而递阶控制这种将系统进行分解-协调的控制方案无疑是理想的,根据细胞星群不同性能的要求,将细胞星划分为不同的群组,称之为功能单元,在执行具体任务时,首先向不同的单元发出控制指令,然后单元内部的各组成细胞星再分配各自的任务。

#### 3.3.4 网络控制

随着网络应用技术的发展,网络控制也成为当前研究的一个重要方向<sup>[39-40]</sup>,相比于分散控制和递阶控制,网络控制在可拓展性,设计简易性和可维护性方面上更灵活,也更容易实现系统的大规模化,目前,网络控制在以下两个研究领域较为活跃。

1) 网络化控制系统, 主要研究网络通信时延、丢包等对系统镇定性的影响。

2) 多智能体一致性问题研究, 主要研究智能体状态一致性收敛状态和速度。

在细胞星组合系统中, 随着细胞星规模的增加, 连接结构也更复杂, 细胞星之间通过网络进行通信。因此具备结构网络化、节点智能化、功能分散化等网络控制系统的特点。在细胞星的控制中, 需综合考虑以上两类网络控制问题。

首先细胞星组合系统中存在多种异构细胞, 从控制系统功能可以划分为传感细胞星, 执行细胞星和控制细胞星等, 通过网络组成控制回路, 由于存在时延, 丢包和错乱等问题。且在细胞星系统中, 传感器、控制器和执行器的复杂拓扑关系是目前网络控制中少有研究的。

另外, 在细胞星组合系统中, 相同的单元往往需要共同作用, 以完成整个组合系统的控制任务, 各细胞星需要相互协调, 达到同步控制的目的。细胞星可视作智能体, 多智能体一致性控制目的是实现多智能体系统中某一状态量趋于一致<sup>[41]</sup>。但是在细胞星组合系统中, 集合系统中细胞星除信息耦合外, 还存在动力学耦合特性, 从而带来更大的挑战。

### 3.4 针对精细装配的空间遥操作

细胞星的装配、重构和维护需要空间机器人操作完成, 限于目前智能技术, 不可能由空间机器人完全自主完成细胞星的在轨装配, 充分利用遥操作完成精细空间装配任务是一个重要研究课题。

遥操作是指在人与机器人之间具有远距离跨度的约束下, 为实现人与机器人同步交互操作的需求, 从而帮助人类实现感知能力与行为能力延伸的一种操作方式<sup>[42]</sup>。

遥操作领域目前已有大量学者开展了卓有成效的研究, 文献[43-44]作了较为全面的综述。目前的主要研究方向有: 大时延和时延波动下的双边控制技术<sup>[45]</sup>; 预测显示技术以及利用虚拟夹具和虚拟管道等提高遥操作临场感的技术<sup>[46-48]</sup>。

在细胞星装配和重构操作中, 目前的遥操作技术在灵巧性、接触操作等方面依然不足, 这将是未来研究的重点。另外目前遥操作采用的手控器、操纵杆等交互方式不够直观, 难以进一步提升临场感和沉浸感, 随着目前人机交互技术的发展, 未来可采用

新型的更加自然的交互方式降低操作员的操作负担, 也是未来的重要研究方向之一。

## 4 发展建议

细胞星开启了一种新型的卫星研制模式, 这种模式未来有望改变卫星的构架设计格局, 使得部件重用以及低成本、快速部署可维护的空间系统成为可能。针对细胞星的研究, 美德已开展了凤凰计划和 iBOSS, 通过细胞星计划美德有望在未来大幅提升其空间操作和快速部署能力。

2013年7月20日, 我国发射了创新三号、试验七号、实践十五号卫星, 开展了空间碎片观测和空间机械臂操作等一系列空间维护技术科学试验, 开启了在轨服务技术研究的先例, 未来的相关研究将面向空间装配、空间生产等更复杂任务。细胞星是目前实现空间装配行之有效的新方式, 未来我国针对细胞星及其相关的在轨服务技术的研究还需要解决一些难题, 为此, 本文提出以下发展建议。

### 4.1 统一标准下的技术细分与深化

在细胞星的设计中, 标准化过程涉及的学科领域很多, 包括机械、电气、控制、计算机、通信及热控等等, 根据目前卫星的体系, 对卫星功能和结构分解, 研究细胞星模块化, 通用接口, 模块通信, 功能协调等总体设计技术, 开展多领域、多学科的建模和分析, 根据分析结果确定和推行合理的标准。

细胞星标准的确定, 将释放以往重复设计所浪费的研制能力, 进而促进技术的细分和深化, 加快细分技术迭代速度的同时促进相关理论的研究, 包括信息感知和融合、多体控制、构型设计等。

### 4.2 GEO 轨道在轨服务

GEO 轨道运行的卫星多为高价值卫星, 实施在轨服务的经济效益更加明显<sup>[49]</sup>, 目前在 GEO 轨道上实现轨道服务的只有美国的 MiTEX, 实现了 GEO 轨道的在轨检测任务。欧洲也提出了 OLEV、DEOS 等 GEO 轨道在轨服务的计划。目前在轨运行的 GEO 轨道卫星 481 颗<sup>[1]</sup>, 其中美国 181 颗, 中国 39 颗, 近年来我国 GEO 轨道卫星数量增加明显, 未来针对 GEO 轨道的在轨服务的需求更加迫切<sup>[50]</sup>。GEO 轨道在轨服务除了能够对高价值航天器进行维护以延长其使用寿命以外, 还可以对废弃卫星进行辅助离轨, 以节省宝贵的 GEO 轨道资源。

### 4.3 在轨发射技术

在轨发射指从空间平台发射各种航天器。在细胞星组合航天器的维护任务中的替换性和升级性操作,需要新的细胞星的补充,为保证响应速度,应采用从空间发射平台进行在轨发射,而空间发射平台的细胞星则由地面定期发射补充。

在轨发射可借助空间站等大型航天器,但在针对 GEO 轨道航天器的在轨装配和维护的任务时,从 LEO 轨道变轨燃料消耗过大,因此从 GEO 轨道附近无人照料的空间发射平台进行自主在轨发射更具优势,但对制导、导航和通信等提出了更高的要求。

### 4.4 在轨装配技术

细胞星在应用中的根本优势是便于实现在轨装配,空间目标抓捕和精细操作是其技术支撑,包括两种对象:其一是合作目标,主要实现手段是灵巧机械臂;其二是非合作目标,实现手段可以是机械臂也可以是空间柔性飞网、空间绳系机器人等。在轨装配技术需要解决以下三大问题。

1) 抓捕机构的设计:尤其是针对非合作目标,如何设计抓捕和对接机构是一个基本问题,目前主要针对远地点发动机喷嘴或星箭对接环等结构<sup>[51]</sup>。

2) 接触碰撞动力学建模:对于在轨装配操作,空间微重力环境下的接触碰撞问题不可避免。接触动力学参数不确定性给接触操作带来困难。

3) 装配后组合体的参数辨识:细胞星与目标形成新的组合体后都需要进行动力学参数辨识,这对后续操作是至关重要的。

### 4.5 高度自主控制和遥操作相结合

遥操作的出现是为了解决目前自主控制能力不足的问题,若全程由遥操作方式实现给操作员带来更多的操作负担,自主控制仍然是很有必要的。自主控制可以分为以下两类:

1) 自主识别、跟踪、接近和停靠:有其对于非合作目标精确停靠的难度和意义都更大;

2) 细胞星组合航天器的自重构:细胞星配备辅助重构模块,使得自重构称为可能,自重构将提升组合航天器的功能自主性和灵活性。

对于自主控制无法适应的操作,遥操作技术仍十分必要,近年来遥操作技术受到越来越多的关注,如何将自主控制和遥操作技术更好的结合是未来发展的重要方向,目前常用的控制方法是共享控制,整

合机器人的自主能力和操作员的主观能动性,使操作员可以干预自主控制,充分发挥二者优点。

## 5 结束语

本文对细胞星的发展和未来的技术点进行了总结和讨论,探索了涉及构型优化、控制、信息融合、遥操作等的若干技术问题。未来细胞星在快速低成本部署、航天器重构以及超大型航天器组建方面的作用是不容忽视的。

细胞星是当前空间技术的一个新的课题,它提供了新的设计思路,不只以功能为主要设计目标,同时考虑到卫星设计的经济效益。细胞星一方面在降低卫星成本和提升空间平台可维护性方面起到关键作用,对目前多种航天技术进行了融合,同时对相关空间技术和课题的发展提出了更高的要求,可促进和刺激空间技术的发展;另一方面细胞星作为一种用于空间装配和维修的模块化成品,可以看作航天技术向通用技术发展风向标,随着航天技术的通用化会促进人类对宇宙的进一步探究。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Grimwood T. The UCS satellite database, union of concerned scientists(UCS), cambridge, massachu-sets, US [EB/OL]. 2015 [2015 - 10 - 02]. [http://www.ucsusa.org/satellite\\_database](http://www.ucsusa.org/satellite_database).
- [ 2 ] Benedict B L. Rationale for need of in-orbit servicing capabilities for GEO spacecraft [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, US, September 10 - 12, 2013.
- [ 3 ] Barnhart D, Hill L, Turnbull M, et al. Changing satellite morphology through cellularization [C]. AIAA SPACE 2012 Conference and Exposition, Pasadena, US, September 11 - 13, 2012.
- [ 4 ] DARPA. DARPA - BAA - 12 - 02 [EB/OL]. (2011 - 12 - 22) [2014 - 04 - 02]. <http://www.darpa.mil>.
- [ 5 ] Cohan L E, Chambers R-D, Lee R K, et al. Analysis of modular spacecraft bus design for rapid response missions [C]. The 4th Responsive Space Conference, Los Angeles, USA, April 24 - 27, 2006.
- [ 6 ] Barnhart D, Hill L, Fowler E, et al. A market for satellite cellularization; a first look at the implementation and potential impact of satlets [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [ 7 ] Rendleman J D. Why smallsats? [C]. AIAA SPACE 2009 Conference and Exposition, Pasadena, USA, September 14 - 17, 2009.

- [ 8 ] 崔乃刚, 王平, 郭继峰, 等. 空间在轨服务技术发展综述 [J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 805 - 811. [ Cui Nai-gang, Wang Ping, Guo Ji-feng, et al. A review of on-orbit servicing [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 805 - 811. ]
- [ 9 ] 梁斌, 杜晓东, 李成, 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展 [J]. 机器人, 2012, 34(2): 242 - 256. [ Liang Bin, Du Xiao-dong, Li Cheng, et al. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft [J]. Robot, 2012, 34(2): 242 - 256. ]
- [10] Tanaka H, Yamamoto N, Yairi T, et al. Reconfigurable cellular satellites maintained by space robots [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2006, 18(3): 356 - 364.
- [11] Tanaka H, Yamamoto N, Yairi T, et al. Precise assembly by autonomous space robot using skill acquisition learning [C]. The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space - ISAIRAS, Munich, Germany, September 5 - 8, 2005.
- [12] Weise J, Brieth K, Adomeit A, et al. An intelligent building blocks concept for on-orbit-satellite servicing [C]. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Turin, Italy, September 4 - 6, 2012.
- [13] Goeller M, Oberlaender J, Uhl K, et al. Modular robots for on-orbit satellite servicing [C]. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China, December 11 - 14, 2012.
- [14] Sullivan B, Barnhart D, Hill L, et al. DARPA phoenix payload orbital delivery (POD) system: "FedEx to GEO" [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [15] Barnhart D, Sullivan B R. Economics of repurposing in situ retired spacecraft components [C]. AIAA SPACE 2012 Conference and Exposition 2012, Pasadena, USA, September 11 - 13, 2012.
- [16] Barnhart D, Sullivan B, Hunter R, et al. Phoenix project status 2013 [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [17] Kamimura A, Murata S, Yoshida E, et al. Self-reconfigurable modular robot - experiments on reconfiguration and locomotion [C]. 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, USA, October 29 - November 3, 2001.
- [18] Murata S, Yoshida E, Kamimura A, et al. M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 431 - 441.
- [19] Yim M, Roufas K, Duff D, et al. Modular reconfigurable robots in space applications [J]. Autonomous Robots, 2003, 14(2 - 3): 225 - 237.
- [20] Adomeit A, Lakshmanan M, Schervan T, et al. Structural concept and design for modular and serviceable spacecraft systems [C]. The 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Boston, USA, April 8 - 11, 2013.
- [21] Johnson L K, Hollman J, McClellan J, et al. Utilizing cubesat architecture and innovative low-complexity devices to repurpose decommissioned apertures for RF communications [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [22] Jaeger T, Mirczak W. Satlites - the building blocks of future satellites - and which mold do you use ? [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [23] Kerzhner A A, Khan M O, Ingham M D, et al. Architecting cellularized space systems using model-based design exploration [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [24] Sasiadek J Z. Sensor fusion [J]. Annual Reviews in Control. 2002, 26(2): 203 - 228.
- [25] 王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述 [J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 518 - 522. [ Wang Yao-nan, Li Shu-tao. Multisensor information fusion and its application: a survey [J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 518 - 522. ]
- [26] Ding F, Liu G, Liu X P. Partially coupled stochastic gradient identification methods for non-uniformly sampled systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1976 - 1981.
- [27] Ding F. Coupled-least-squares identification for multivariable systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(1): 68 - 79.
- [28] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215 - 233.
- [29] Irshad Y, Mossberg M, Soderstrom T. System identification in a networked environment using second order statistical properties [J]. Automatica, 2013, 49(2): 652 - 659.
- [30] 王乐一, 赵文斌. 系统辨识: 新的模式、挑战及机遇 [J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 933 - 942. [ Wang Le-yi, Zhao Wen-xiao. System identification: new paradigms, challenges, and opportunities [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 933 - 942. ]
- [31] Singh L, Fritz M, Bhatt S, et al. On the phoenix ADCS-M<sup>3</sup>D architecture [C]. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego, USA, September 10 - 12, 2013.
- [32] Terada Y, Murata S. Automatic assembly system for a large-scale modular structure - hardware design of module and assembler robot [C]. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004.
- [33] 涂序彦, 王枫, 郭燕慧. 大系统控制论 [M]. 北京: 北京邮

电大学出版社, 2005.

- [34] Shen W-M, Salemi B, Will P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for CONRO self-reconfigurable robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 700 - 712.
- [35] Dias M B, Zlot R, Kalra N, et al. Market-based multirobot coordination: a survey and analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(7): 1257 - 1270.
- [36] Hofmeyr S A, Forrest S. Architecture for an artificial immune system. [J]. Evolutionary computation. 2000, 8(4): 443 - 473.
- [37] West-Vukovich G S, Davison E J, Hughes P C. The decentralized control of large flexible space structures [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, 29(10): 866 - 879.
- [38] Melek W W, Goldenberg A A. Neurofuzzy control of modular and reconfigurable robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3): 381 - 389.
- [39] 席裕庚. 大系统控制论与复杂网络 - 探索与思考 [J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1758 - 1768. [Xi Yu-geng. Large-scale systems control and complex networks - exploration and thinking [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1758 - 1768.]
- [40] 陈关荣. 复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战 [J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 312 - 321. [Chen Guan-rong. Problems and challenges in control theory under complex dynamical network environments [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 312 - 321.]
- [41] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control-theory and applications [M]. London, Springer-Verlag, 2008.
- [42] Sheridan T B. Telerobotics [J]. Automatica, 1989, 25(4): 487 - 507.
- [43] 李成, 梁斌. 空间机器人的遥操作 [J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95 - 98. [Li Cheng, Liang Bin. Teleoperation of space robotics [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1): 95 - 98.]
- [44] 王永, 谢圆, 周建亮. 空间机器人时延遥操作技术研究综述 [J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 299 - 306. [Wang Yong, Xie Yuan, Zhou Jian-liang. A research survey on teleoperation of space robot through time delay [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 299 - 306.]
- [45] Hokayem P F, Spong M W. Bilateral teleoperation: an historical survey [J]. Automatica, 2006, 42(12): 2035 - 2057.
- [46] 孙汉旭, 胡欢, 贾庆轩, 等. 遥操作系统中预测显示技术研究 [J]. 宇航学报, 2013, 34(11): 1502 - 1508. [Sun Han-xu, Hu Huan, Jia Qing-xuan, et al. Research on predictive display in teleoperation system [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(11): 1502 - 1508.]
- [47] 丁炳源, 黄攀峰, 刘正雄, 等. 速度型虚拟夹具辅助空间遥操作技术研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1436 - 1444. [Ding Bing-yuan, Huang Pan-feng, Liu Zheng-xiong, et al. Research on space teleoperation technology assisted with velocity-based virtual fixture [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 36(4): 1436 - 1444.]
- [48] 张斌, 黄攀峰, 刘正雄, 等. 基于虚拟夹具的交互式空间机器人遥操作实验 [J]. 宇航学报, 2011, 32(2): 446 - 450. [Zhang Bin, Huang Pan-feng, Liu Zheng-xiong, et al. An interactive space robot teleoperation experiment based on virtual fixtures [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2): 446 - 450.]
- [49] 梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 1 - 13. [Liang Bin, Xu Wen-fu, Li Cheng, et al. The status and prospect of orbital servicing in the geostationary orbit [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 1 - 13.]
- [50] 翟光, 张景瑞, 周志成. 静止轨道卫星在轨寿命技术研究进展 [J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 849 - 859. [Zhai Guang, Zhang Jing-rui, Zhou Zhi-cheng. A review of on-orbit life-time extension technologies for GEO satellites [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(7): 849 - 859.]
- [51] 卢山, 徐帷, 刘宗明, 等. 面向高轨航天器的在轨操控技术 [J]. 宇航学报, 2014, 35(4): 425 - 431. [Lu Shan, Xu Wei, Liu Zong-ming, et al. On-orbit manipulation technique for spacecraft in HEO [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(4): 425 - 431.]

作者简介:

**黄攀峰**(1974 - ), 男, 博士, 教授, 主要从事空间机器人动力学与控制、空间遥操作技术等方向研究。

通信地址: 陕西省西安市友谊西路127号西北工业大学583信箱(710072)

电话: (029)88460366

E-mail: pfluang@nwpu.edu.cn

**常海涛**(1987 - ), 男, 博士研究生, 主要从事空间机器人动力学与控制、空间细胞机器人等方向研究。本文通信作者。

通信地址: 陕西省西安市友谊西路127号西北工业大学583信箱(710072)

电话: (029)88460366

E-mail: changht@mail.nwpu.edu.cn