在轨建造中的关键力学问题

丁继锋^{1*}, 高峰¹, 钟小平², 王罡^{3*}, 梁东平¹, 张也驰¹, 李伟杰¹

1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;

3. 清华大学机械工程系, 北京 100084

*联系人, 丁继峰, E-mail: djfnpu@163.com; 王罡, E-mail: gwang@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2018-11-05; 接受日期: 2018-11-12; 网络出版日期: 2019-01-07

国家重点研发计划(编号: 2016YFB1100800)资助

摘要 在轨建造是指在空间轨道或者地外天体上就地取材或者利用携带的材料、组件通过加工、组装形成航天器及其部组件的过程. 由于无需经历发射段苛刻的力学环境, 不受运载火箭整流罩空间的限制, 因此, 在轨建造能够有效降低航天器结构的重量, 实现百米甚至千米级空间设施的建设. 本文首先分析了在轨建造的技术优势和航天领域的工程需求. 其次, 分析了空间微重力、高真空和极端温度环境下加工过程中材料的受力和运动行为, 以及对制件特性的影响; 再次, 分析了空间超大型结构在轨建造全过程的激励和扰动源、动力学分析与控制的力学问题; 最后, 梳理了面向在轨建造的空间大型结构设计的力学约束, 给出多级空间桁架结构在轨建造的优化设计模型.

关键词 在轨组装, 空间3D打印, 动力学, 面向在轨建造的结构优化设计

PACS: 45.80.-r, 46.15.-x, 46.40.-f, 46.70.-p

1 引言

在轨建造是在目标轨道或地外天体上, 由制造装置将原材料或建造模块通过加工、组装形成空间设施的过程. 在轨建造的空间设施由于无需通过运载火箭发射入轨, 空间结构也就不需要抵御苛刻的发射段力学环境, 同时也不受运载火箭包络尺寸的限制, 从而大大拓展了空间设施结构优化设计的可行域, 实现传统技术无法完成的超大型空间结构的建造^[1]. 另一方面, 微小航天器和部组件的在轨制造, 主要体现在应

急维修和部署等方面, 有望突破受运载火箭发射时机限制的问题. 因此, 在轨建造技术被认为是一项改变未来航天器设计模式的颠覆性技术.

在轨建造技术在航天工程中具有以下优势.

(1) 原位建造, 有效降低空间设施的结构重量和运载火箭的发射成本.

虽然航天器工作时处于微重力状态, 结构承受的外载荷几近于零; 但是, 通过地面建造、发射入轨的情况, 航天器必须经历运载火箭发射段苛刻的力学环境. 以准静态载荷为例, 航天器试验条件规定为6g, 设

引用格式: 丁继峰, 高峰, 钟小平, 等. 在轨建造中的关键力学问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 024506

Ding J F, Gao F, Zhong X P, et al. The key mechanical problems of on-orbit construction (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 024506, doi: [10.1360/N092018-00367](https://doi.org/10.1360/N092018-00367)

计人员通常会采用1.5倍余量,以提高结构可靠性和安全性,造成运行于微重力状态的航天器结构需要经历9g准静态过载考核,导致为了抵御十几分钟的发射段载荷,却需要将结构“死重”背在身上数十年.在轨建造将大大减轻空间结构的重量,从而降低运载火箭的发射成本.

(2) 突破运载火箭发射包络空间的限制,实现百米甚至千米级空间结构建设.

目前,航天器发射必须放置于运载火箭的整流罩内,由于受到运载火箭整流罩尺寸的限制,空间大型结构需在发射阶段收拢,入轨后展开.在轨展开需要一系列复杂技术,不但增加了技术复杂度,更降低了系统的可靠性.另一方面,据报道美国在轨服役的最大展开结构尺寸为150 m^[2],这几乎已经达到在轨展开结构的尺寸上限.运载火箭的包络尺寸已成为空间结构大型化发展的瓶颈.

在轨建造技术则能够将空间大型设施“化整为零”,通过运送材料或者单元模块入轨,甚至在空间原位通过回收利用或者原位材料提取获得在轨建造的材料和模块,实现空间设施的建造.这能够突破运载火箭发射空间限制,实现传统模式下无法完成空间超大型设施的建造.

(3) 按需定制,满足应急需求.

轨道上服役或者地外天体上的空间设施一旦发生故障或者突发损伤,或者为了应对战时、救灾等紧急任务而需要立即发射微纳卫星.在轨建造可按需定制零部件,乃至组装应急卫星,实现即时维修和快速响应,避免造成重大损失.特别是对于空间站、在轨服务站以及未来的月球基地等长期在轨运行的航天基地,传统上需要大量上行物资和货物的储备.在轨建造将从根本上改变太空基地的运行和物资补给模式,有效降低太空基地的运行成本,提高可靠性、抗风险和抗打击能力.

2 在轨建造的需求分析

2.1 超大型空间设施的在轨建造需求

超大型空间设施是指由运载火箭单次发射(含在轨展开)难以完成整个系统建造任务的空间设施,主要是指空间站、空间太阳能电站、在轨服务站以及超大口径的天线和相机等有效载荷.

我国空间站采用舱段拼装的结构,国际空间站的主承力结构则采用了桁架式龙骨结构在轨组装.未来,空间太阳能电站、在轨服务平台等空间超大型平台,其结构尺寸将达到了百米甚至千米级,承力结构将以可扩展、轻质大体积比(体积质量比大)的桁架式结构为主.而超大型桁架无法通过单次发射入轨,因此,在轨建造是未来大型空间平台发展重要技术途径^[3].

与之类似,随着现代军事对侦察、预警等需求的不断提高,空间天线的口径也在不断增加,达到百米甚至更大,其支撑结构形式也以空间桁架为主.以地球同步轨道电子侦察卫星为例,按照侦察信号不同,星载天线的口径也有所不同,但大多数天线口径都达到几十米,甚至突破百米^[4];双天线干涉SAR是发展全球三维地形测绘的一种有效手段,按照实现3 m高程精度的要求,双天线干涉SAR的单侧基线(支撑结构)应该至少为100 m^[5],传统的在轨展开模式同样难以满足工程需求.因此,空间大型天线的发展,亟需在轨建造技术的突破.

天基光学侦察载荷随着分辨率的提高,其口径也不断变大.以静止轨道2 m分辨率的光学遥感器为例,其光学口径需要达到10 m.由于受到重力的影响,轻型可展开和衍射薄膜方案的超大型光学系统,都具有理论上的口径上限;而在轨建造方案的集成制造成本低,发射、安装效率高;能够克服地面所固有的重力变形,光学面形精度和整体刚度可调、可控,可达到接近衍射级理想光学状态.因此,在轨建造是未来大型空间光学遥感系统发展的重要技术途径.

综上所述,未来超大型空间设施,包括有效载荷和空间平台,其结构尺度都远大于运载火箭的包络尺寸,且都是采用体积质量比较大的空心桁架结构,传统上地面制造、在轨展开的模式难以满足发展的需求,因此,空间大型设施在轨建造成为未来发展的一项关键技术.

2.2 在轨应急制造的需求分析

(1) 应急维修维护中零部件的制造

在轨长期运行的航天器特别是空间站和在轨服务平台等,运行时间长,系统复杂,运行期间不可避免地会发生故障.目前,为了应对突发故障,空间站需要提前在轨储备一定的备件和工具.然而,空间站上存储空间的限制,不可能也没有必要将所有备件和工具在轨存储.未来长期在轨运行的空间设施会更多,在轨故

障也不可避免. 当发生故障时, 由地面根据故障的具体形式, 设计在轨维修所需的零部件和工具, 并将三维模型上传到在轨制造的装置中, 在轨进行维修工具和备件的制作. 这样既可以满足应急维修的需求, 同时可以减小备件、工具上行和在轨长期储备造成的资源浪费, 降低空间设施运行成本.

(2) 应急部署微纳卫星的需求

微纳卫星具有“模块化、微型化、自助化、可定制”等特点, 是卫星发展的一个重要方向, 然而, 微纳卫星一般都需要搭载发射, 往往是等待合适的搭载机会的时间大于卫星研制的时间, 严重限制了微纳卫星的发展. 未来战争和应急救援, 具有突发性强、持续时间短等特点, 需要快速进入、利用和控制空间. 特别是当面临敌对势力等对空间设施的破坏、应急救援所需的资源调配等情况时, 都需要紧急部署具有一定功能的微纳卫星. 基于快速响应的空间微纳卫星在轨制造技术, 无需地面组织发射, 能够在短时间内按需建立起基本的空间系统供作战和救灾使用, 成本低, 效率高, 是实现空间应急响应的有效途径.

3 在轨建造中的力学问题概述

如前所述, 在轨建造可突破运载火箭发射能力(空间和重量等)的限制, 拓宽空间结构设计的可行域. 但是, 这一技术会受到空间环境下建造的约束限制, 特别是空间微重力、高真空和极端温度等环境约束, 使得在轨建造从微观材料的热、力学行为, 到宏观结构建造的受力与控制, 再到系统级结构设计的力学约束, 相较于传统的航天器设计、建造都发生了较大变化.

首先, 从微观材料成形方面考虑, 在轨制造多采用材料利用率较高的增材制造工艺. 由于空间微重力、高真空等特殊环境, 在轨增材制造包括材料加工成形过程控制、材料在固-液-固态转变动力学行为以及真空环境下成形结构的散热和热应力等问题, 成为在轨增材制造控形控性的关键.

然后, 从宏观的建造过程考虑, 空间超大型结构在轨制造和组装的过程中, 结构是一个逐渐增长的过程, 其质量、惯量以及动力学特性都是逐渐变化的. 在轨建造过程中, 材料的成形、模块的组装以及建造机器人的移动都不可避免地对空间结构造成激励. 为此, 大柔性、渐变结构在轨弱阻尼环境下的动力学分析与

控制是关系在轨建造任务成败的核心力学问题.

最后, 从系统设计层面考虑, 在轨建造空间大型结构的设计与传统结构设计的力学约束发生了根本的改变. 传统方法需要考虑火箭发射段的力学环境; 而在轨建造的空间结构则需要满足空间结构承载与支撑、在轨可实施的要求, 并尽可能发挥增材制造的优势, 因此, 还需要重新构建在轨建造空间结构的优化设计模型.

综上所述, 在轨建造中典型的力学分析和设计问题包括: (1) 空间环境下材料成形的力学问题; (2) 在轨建造全过程的动力学分析与控制; (3) 面向在轨建造的空间结构轻量化设计.

4 空间环境下材料成形的力学问题分析

4.1 微重力和高真空环境下材料成形的力学行为

在轨制造过程中, 材料在微重力和高真空环境下熔融成形, 经历温度、载荷及运动等共同作用. 空间微重力环境下, 液体和粉体材料都难以控制. 目前, 在轨制造主要以丝材为主的熔融沉积工艺(FDM). 在微重力条件下, 液体的力学行为主要由表面张力控制. 液滴总是向着表面能降低的趋势发展变化, 变化速度由液体黏度决定, 零重力条件下有发展为球形的趋势, 在Helmholtz自由能最小时达到平衡状态^[6]. 液体在固体表面的铺展状态可以用平衡接触角来定义, 用杨氏方程可描述为

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta, \quad (1)$$

式中, γ_{SV} 表示固-气界面自由能, γ_{SL} 表示固-液界面自由能, γ_{LV} 表示液-气界面自由能, θ 表示液体达到平衡状态时的接触角, 杨氏方程示意图如图1所示.

少量液体在光滑固体表面展开成薄膜的吉布斯函数变为

$$\Delta G_s = \gamma_{SL} - \gamma_{SV} + \gamma_{LV}. \quad (2)$$

图1 (网络版彩图)杨氏方程示意图

Figure 1 (Color online) Schematics of Young equation.

由杨氏方程, 将式(1)代入式(2)可得到

$$\Delta G_s = \gamma_{LV}(1 - \cos\theta). \quad (3)$$

微重力下FDM成形的关键在于使每一层都形成连续的固体, 此过程中, 表面张力在液体铺展过程中起主导作用. 因此需要液滴与表面产生浸润, 才不致使液滴成为球形.

国内外在轨增材制造非常关注微重力环境下液滴的动力学行为, 目前已经开展了大量的理论和试验研究. 2011年, 美国NASA联合Made in Space公司系统地开展了微重力条件下增材制造的研究^[7,8], 对3种不同的3D打印机及多个独立组件, 进行了3次微重力飞行试验, 完成了400多次抛物线测试. 研究表明, 重力对于3D打印的平均层高影响极大, Made in Space公司通过对打印机参数调整, 成功实现了不同重力条件下的层高一致. 此外, 美国NASA兰利研究中心^[9]、欧洲ESA(http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Europe_s_3D_printer_set_for_Space_Station)以及中国科学院等分别独立开展微重力环境下3D打印材料成形工艺研究, 积累了有效的试验数据. 2014年美国NASA在国际空间站上完成了首次舱内微重力3D打印试验, 2015年, NASA第2次在国际空间站进行微重力3D打印试验, 成功打印了扳手工具(https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1115.html), 这也标志着微重力环境下在轨3D打印的工艺方法取得突破.

4.2 高真空环境下热致应力分析

增材制造中需要将材料加热熔融, 然后再冷却凝固. 由于空间高真空环境没有热对流, 制件冷却、结晶的散热需要通过热辐射和热传导实现. 目前在轨制造主要采用导热率较低的非金属材料, 制件内部容易形成较大的温度梯度, 从而造成制件根部的应力集中. 在这方面, Lin等人^[10]研究了真空环境条件下, 增材制造过程中随着材料层的堆积, 导热不均造成制件根部的应力集中问题. 空间大型桁架结构及其单元在轨3D打印一般都是从基础开始, 以悬臂的形式逐层堆叠增长, 桁架结构根部会存在应力集中. 因此, 在轨增材制造中热应力的分析和控制, 对于空间结构的在轨建造成形具有重要意义.

此外, 空间设施建造完成以后, 需要长期在轨服

役, 在轨服役过程中由于不断地进出地影或者姿态的变化, 结构整体或者局部的热分布将会发生较大的变化, 增材制造堆叠过程中残余应力也可能造成结构的变形. 因此, 建造过程中残余应力分析也是需要重点关注的问题.

5 在轨建造全过程动力学分析与控制

空间超大型结构的在轨建造, 是一项复杂的航天任务, 常见的方案有3种: (1) 地面制造桁架的单元模块, 在轨组装; (2) 在轨增材制造单元模块, 在轨组装; (3) 结合空间机器人和增材制造技术, 在轨整体建造空间桁架.

在整个在轨建造任务的执行过程中, 在轨建造的目标结构从无到有、逐渐增长, 最终形成一个包络尺寸远大于建造装置(在轨3D打印或装配机器人)的空间结构. 在轨建造全过程的动力学分析, 不仅包括建造完成后空间大型结构整体在轨服役期间的动力学分析, 还应考虑建造过程中复杂激励下变构型、变结构的动力学分析与控制.

5.1 空间超大型结构动力学分析与控制

(1) 全柔性的动力学分析与分布式控制策略

在轨建造空间大型结构一般远大于建造设备和运载火箭的包络尺寸. 建造设备需要在目标结构上移动, 进行物资和组件的转运. 通常情况下, 在轨建造大型结构还需要满足在轨扩展、模块更换、在轨维修, 甚至为其他航天器提供在轨服务等任务. 总之, 此类空间结构尺度大、系统复杂, 系统的基频无法通过地面试验获得, 其支撑的任务又需要更高精度的动力学分析. 因此, 现有中心刚体加柔性附件的动力学分析方法和控制策略都不再适用, 需要建立全柔性的动力学分析方法, 完成空间此类结构的动力学分析, 为制定合理的控制策略提供依据.

(2) 结构密频与重频问题

为了建造实施的方便, 在轨建造超大型结构一般采用模块化、易扩展的桁架结构, 由大量相同的单元模块组成, 并具有良好的对称性. 这些特点造成结构的局部模态频率相近, 甚至相同. 在结构的动力学分析中, 其整体模态可能会在几个相近的频率上出现, 模态有效质量分散在相近频率的模态上, 使得一方面

在对结构进行振动抑制和姿态控制时变得困难, 另一方面外界的扰动和控制激励又容易将结构的局部模态激励, 进而造成结构共振.

(3) 热致振动问题分析

空间超大型结构长期在轨服役, 受到空间环境、特别是太阳的照射. 在轨建造的非金属结构导热率较低, 受照面和背阴面温差较大, 结构上具有很大温度梯度, 材料热胀冷缩会造成空间超大型结构的变形. 对于频繁进出地影的空间大型结构, 结构的热胀冷缩造成结构变形, 进一步导致结构振动, 甚至系统姿态的变化. 这些都需要全柔性的结构动力学分析与全新的分布式控制策略.

(4) 连接的非线性动力学分析^[11]

两个或多个部件的接触问题是典型的非线性问题. 对于在轨组装的空间大型结构, 需要大量的结构单元通过在轨装配而成, 因此不可避免地存在大量连接和间隙. 随着在轨组装结构规模和连接的不断增加, 连接非线性已经成为影响结构动力学特性不可忽略的重要部分. 从力学上说, 连接问题的分析需要准确跟踪接触前后多个物体之间的相互作用; 然而, 由于连接表面的接触和分离未知, 以及存在摩擦, 大大增加了连接问题的分析难度.

5.2 空间超大型结构在轨建造过程的动力学分析与控制

与传统空间结构在轨展开可以等效为瞬态过程不同, 在轨制造和在轨组装中, 空间结构的质量、惯量和动力学特性都是时变的, 全部建造过程都需要对空间结构进行有效的姿态控制. 另一方面, 在轨建造过程存在诸多扰动和激励, 包括结构随机振动、建造装置(空间3D打印或装配机器人)移动造成扰动、模块装配发生的碰撞、冲击以及局部3D打印扰动等因素. 这些复杂激励一旦与结构的非线性特性耦合, 将可能产生复杂的结构振动, 甚至造成结构姿态的变化甚至失控. 因此, 超大型空间机械系统在轨建造过程动力学分析方法和数值化仿真模型, 是空间超大型机械系统在轨建造的设计、实施以及过程控制必须解决的问题, 关系到在轨建造任务的成败.

6 面向在轨建造的空间大型结构轻量化设计

现有空间结构必须经过运载火箭发射才能进入目标轨道, 而火箭发射主动段的力学环境极其苛刻, 远大于在轨运行的力学载荷. 因此, 火箭发射主动段的力学环境是传统空间结构设计的关键约束. 在轨建造模式可有效去除此类力学约束, 大大拓宽了空间结构优化设计的可行域. 在轨建造过程中, 空间结构既是建造的目标结构, 也是建造装备移动的空间路径^{[12][1]}, 因此, 在轨建造的可实施性成为了空间结构拓扑构型设计的一个新的约束条件.

由于采用了增材制造技术, 灵活性高, 几乎能够实现任意构型的结构形式, 比如内流道、多层级结构. 多级结构一方面能够增加结构的承载能力, 另一方面又可降低结构重量, 便于结构在轨组装和扩展. 因此, 为了充分发挥在轨增材制造的优势, 还可以进一步对给定拓扑构型的条件下进行微结构的精细优化, 降低结构重量, 提高材料的利用率, 节约建造成本.

在轨建造空间多级桁架结构建议采用两级优化策略: 第一级, 考虑建造可实施性约束条件下(去除星箭力学环境约束), 开展宏观构型的拓扑优化; 第二级, 在给定宏观构型条件下, 进行微结构的精细优化. 其中, 第一级的结构构型拓扑优化, 是在均匀分布材料空间寻求最优材料分布, 实现结构刚度在设计空间的最优分布. 该级的优化可采用如下模型进行描述:

$$\begin{aligned} & \text{find } f(\mathbf{x}), \\ & \min W = \iiint_{\Omega} f(\mathbf{x}) \rho, \\ & \text{s.t. } g(\mathbf{x}, E, u, \dots) \leq 0, \\ & \quad \mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u. \end{aligned} \quad (4)$$

上述模型是在设计域 Ω 内找到一个外形描述函数 $f(\mathbf{x})$, 将结构的拓扑构型定义出来, 包括结构外部边界、结构中空洞边界等, 使得结构的重量最小, 可采用较成熟的变密度法或渐进结构优化法^[13-15]进行求解. 模型中的约束条件 $g(\mathbf{x}, E, u, \dots)$ 包括结构刚度要求、建造可实施性的要求. 其中, 建造可实施性的建模是该阶段优化问题的重点和难点, 其中大连理工大学Liu等人^[16]考虑了增材制造中连通性的约束, 面向在

1) Hoyt R, Cushing J, Slostad J. SpiderFab™: Process for on-orbit construction of kilometer-scale apertures [EB/OL]. [2016-12-01]. http://www.nasa.gov/directorates/spacetechniac/2012_phase_I_fellows_hoyt_spiderfab.html#_VyBroyws8jA

轨增材制造的拓扑设计还需要进一步考虑建造装备可到达建造位置的需求.

在第一级优化获得结构拓扑构型的基础上, 为了进一步发挥增材制造进行点阵结构制造的优势, 建议开展微结构的优化, 以获得承载效率更高的空间多级桁架结构. 微结构的优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x}, \\ & \min \mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}, \\ & \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0, \\ & \quad \mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}$ 为结构的总体柔度, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 包括结构基频要求.

在进行第二级的微结构优化时, 由于需要对拓扑构型不同部位的微结构采用特征参数进行描述, 使得优化设计变量急剧增多、计算量随之增大, 可以通过求解大规模优化问题的高效优化算法, 如内点法^[17]、GCMMA^[18], 以及并行计算技术, 实现对微结构的精细优化.

7 结论

从国际航天技术发展来看, 在轨建造是未来航天器设计的一种颠覆性技术. 由于空间的特殊环境, 在

轨建造从材料局部成形、在轨建造宏观过程控制, 最终到机械系统顶层设计, 航天器的受力和运动行为都与传统模式发生了较大变化. 在轨建造中力学问题的准确定义和突破, 将为空间机械系统的总体方案设计、工程实施提供强有力的支撑. 建议未来重点攻关以下问题:

(1) 空间特殊环境下材料成形的热力行为研究. 空间的微重力条件下, 材料熔融态受到表面张力的控制形成的特殊动力学行为, 以及真空环境下结构局部热应力是最终在轨制造控形控性的关键因素和工艺研究的重点问题.

(2) 在轨建造全过程的动力学分析问题. 这主要指两方面内容: 在轨建造完成后(超)大型、全柔性空间结构动力学建模与分析, 必须考虑尺度大、系统复杂、低刚度、强非线性等特点, 以及服役过程复杂环境的作用; 在轨建造任务执行过程中, 结构在外载扰动下(制造装置的随机振动以及组装的碰撞、冲击等), 变结构、变构型的动力学建模与控制技术.

(3) 面向在轨建造的空间大型结构轻量化设计. 由于无需经历主动段苛刻的力学环境, 在轨建造模式大大拓宽了空间结构设计的可行域. 另一方面则需要考虑在轨制造, 特别是在轨增材制造工艺的优势和约束, 扬长避短, 实现地面无法建造的超大型空间机械系统的设计与建设.

参考文献

- 1 Ding J F, Wang G, Ren L, et al. Concept of on-orbit 3D printing on solar power station in space (in Chinese). In: CASTC: Annual Scientific Seminar on General Technology of Space Ship, 2014, 10: 89–98 [丁继锋, 王罡, 任磊, 等. 空间太阳能电站在轨3D打印方案设想. 见: 航天科技集团公司科技委航天器总体技术专业组2014年学术研讨会, 2014, 10: 89–98]
- 2 Ma X F, Li Y, Xiao Y, et al. Development and tendency of large space deployable antenna reflector (in Chinese). Space Electron Tech, 2018, 2: 16–26 [马小飞, 李洋, 肖勇, 等. 大型空间可展开天线反射器研究现状与展望. 空间电子技术, 2018, 2: 16–26]
- 3 Xu H B, Han X Z, Chen Y, et al. Discussion on the on-orbit construction technology of space large load platform (in Chinese). Space Electron Tech, 2018, 2: 42–48 [许焕宾, 韩修柱, 陈燕, 等. 空间大型载荷平台在轨构建技术探讨. 空间电子技术, 2018, 2: 42–48]
- 4 Davis G L, Tanimoto R L. Mechanical development of antenna systems. In: Imbriale W A, ed. Spaceborne Antennas for Planetary Exploration. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 425–454
- 5 Wang G. Structure optimization design of large-scale space antenna deployable truss (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006 [王刚. 大型空间天线伸展臂的结构优化设计. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2006]
- 6 Yu C, Zhang C B, Chen Y P, et al. Spreading of droplet on a rough solid surface (in Chinese). J Eng Thermophys, 2014, 1: 145–147 [于程, 张程宾, 陈永平, 等. 液滴在粗糙固体表面上的铺展特性研究. 工程热物理学报, 2014, 1: 145–147]
- 7 Crockett R, Petersen D, Cooper K. Fused deposition modeling in microgravity. In: Proceedings of the 1999 Solid Freeform Fabrication Symposium, 1999. 671–678

- 8 Snyder M, Dunn J, Gonzalez E. Effects of microgravity on extrusion based additive manufacturing. In: AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, 2013. AIAA 2013-5439
- 9 Taminger K M B, Hafley R A. Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process. In: Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference, 2003. 9–10
- 10 Lin S Y, Hoffman E K. Modeling of distortion and residual stress control in unitized 2219 aluminum stiffened structure produced by electron beam free form fabrication. In: AeroMat Conference 2007, June 25–28, 2007, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, USA
- 11 Hu H Y, Tian Q, Zhang W, et al. Nonlinear dynamics and control of large deployable space structures composed of trusses and meshes (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43: 390–414 [胡海岩, 田强, 张伟, 等. 大型网架式可展开空间结构的非线性动力学与控制. *力学进展*, 2013, 43: 390–414]
- 12 Hoyt R. SpiderFab: An architecture for self-fabricating space systems. In: AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, 2013. AIAA 2013-5509
- 13 Rozvany G I N. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 2009, 37: 217–237
- 14 Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches. *Struct Multidisc Optim*, 2013, 48: 1031–1055
- 15 Deaton J D, Grandhi R V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: Post 2000. *Struct Multidisc Optim*, 2014, 49: 1–38
- 16 Liu S, Li Q, Chen W, et al. An identification method for enclosed voids restriction in manufacturability design for additive manufacturing structures. *Front Mech Eng*, 2015, 10: 126–137
- 17 Andrei N. Continuous Nonlinear Optimization for Engineering Applications in GAMS Technology. Cham: Springer, 2017. 415–435
- 18 Svanberg K. A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM J Optim*, 2002, 12: 555–573

The key mechanical problems of on-orbit construction

DING JiFeng^{1*}, GAO Feng¹, ZHONG XiaoPing², WANG Gang^{3*}, LIANG DongPing¹,
ZHANG YeChi¹ & LI WeiJie¹

¹ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

² School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

³ Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

On-orbit construction is an space mission to construct spacecraft and modules on spatial orbits or objects outside the Earth, which would be manufactured and assembled with the local or carry-on materials. Since it is not necessary to undergo the severe mechanical environment during the rocket launching and not constrained by the limit room in rocket dome, on-orbit construction can reduce the weight of the spacecraft effectively and complete the construction of ultra-large space facility in hundreds or even thousands meters. It shows the tremendous potential for human space exploration. However, some challenging mechanical factors need to be considered for this exciting plan. In this paper some key mechanical problems were discussed about the concept and process of on-orbit construction with the complete concept on demand, material requirements, space environment, dynamics, and mechanical constrains. The technical advantages and the practical demand are introduced for the on-orbit construction in the aerospace engineering. And the methodology on material processing were proposed. Some unique chareacteristics of space enviroment were considered, e.g. microgravity, high vacuum and extrame temperature conditions, along with the change on physical properties. The material property is fundamental and challenging for the construction. Furthermore, the dynamic analysis and control strategy were analyzed in all fabricating process for ultra-lage structures. The possilbe excitors and source of fluctuation were discussed. At last, the mechanical constrains were clarified for large space sturcture in on-obrit construction. And a two steps optimization model was defined for structure topology and construction path. Some suggestions were given on the key mechanical problems in the field of on-orbit construction.

assembly on-orbit, 3D printing in space, dynamic modeling, on-orbit construction oriented optimization

PACS: 45.80.-r, 46.15.-x, 46.40.-f, 46.70.-p

doi: [10.1360/N092018-00367](https://doi.org/10.1360/N092018-00367)