

可重复使用空间站补给方案设计

东华鹏, 王亚军, 安雪岩

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 提出了一种基于我国现有液体上面级的可重复使用太空补给方案, 可用于空间站补给运送货物及废弃物转运清理。分析了空间站补给运送的任务模式及工作流程。在总结应用特点的基础上, 提出了基于上面级的可重复使用空间站补给的发展路线。最后, 对相关关键技术进行了初步分析。

关键词: 空间站; 补给; 上面级

中图分类号: V412

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 02-0022-05

The Conception of Reusable Space Station Replenishment

DONG Huapeng, WANG Yajun, AN Xueyan

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on the scheme of liquid upper stage, a scenario of the reusable space replenishment is provided, which can be used for the cargo transportation and garbage disposal of the space station. The mission of space station replenishment using the space transporter is analyzed, and several steps of replenishment is put forward. In terms of the feature of the application, the developing methods of reusable space station replenishment are proposed. Finally, key technologies of the space transporter are analyzed.

Key words: Space station; Replenishment; Upper stage

0 前言

空间站通常包括核心舱、实验舱等多个核心舱段, 通过交会对接和舱体转位组装构成空间站基本构型。空间站通常采用高度为 340km~450km 的近圆轨道^[1-2], 轨道倾角为 42°~43°, 具有通过维护维修延长使用寿命的能力。

空间站的在轨维护和维修需要发射一定规模的补给舱(货运飞船), 提供空间站在轨维护和维修用的设备、仪器以及航天员的生活补给品等物资。目前, 国际上通常采用的补给方案是^[3]: 由火箭发射一艘一次性使用的货运飞船, 货运飞船

的服务舱具备空间姿轨控能力, 可实现飞船的轨道控制、姿态控制、交会对接、货舱环境条件控制等功能, 当完成补给任务后, 货运飞船离轨再入地球大气烧毁, 服务舱无法重复使用, 补给任务的灵活性、经济性受到一定影响。

上面级具备较强的轨道机动能力^[4], 基于这一特点, 可利用上面级配合实施空间站补给的发射任务, 补给舱由上面级转运摆渡至空间站, 是一种可以依赖现实工程保障条件, 具备较强工程成熟度和可靠性, 以多次重复使用提高补给发射任务经济性的有效途径, 为开展空间站在轨补给工作提供了更多选择, 可以有效提升空间站在轨补给水平。

收稿日期: 2017-12-23; 修订日期: 2018-03-06

基金项目: 863 计划 (2013AA7045042)

作者简介: 东华鹏 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天运输系统型号及预先研究工作。E-mail: dhpsir@sohu.com

1 方案设想

采用轨道转移级 (Orbit Transfer Stage, OTS) 转运摆渡补给舱至空间站, 待补给货物在轨利用和消耗结束之前, 将废弃物装填至补给舱, 再利用上面级将补给舱送入再入轨道, 补给舱离轨烧毁不再使用之后, 上面级抬升轨道, 等待下一次补给舱发射, 并与之对接, 实现新一轮对空间站的补给。轨道转移级与补给舱组合体示意图 1。

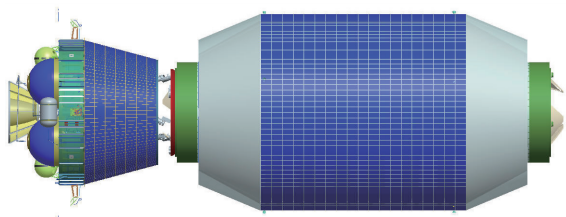


图 1 轨道转移级与补给舱组合体示意图

Fig. 1 Combination of OTS and supplying cabin

补给舱 (见图 2) 可根据需求采取密封、半密封和全开放等 3 种货舱构型, 能够进行空间站各类补给品和设备的上行货物运输、推进剂补加, 也可以运输太阳能电池帆板及其他在轨需用物资。

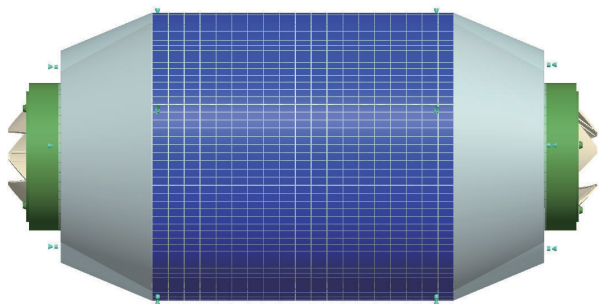


图 2 补给舱示意图

Fig. 2 Supplying cabin

补给舱两端均有一个交会对接机构, 其中一个与上面级连接, 附有被动式辅助相对导航装置, 另一个与空间站连接, 也附有辅助相对导航装置, 与空间站连接的对接口可用于航天员进舱开展工作。补给舱也可根据需要在侧面开口以提供开放式货物存放和搬运功能。补给舱表面贴太阳能电池片, 具有较简单的在轨供配电能力, 采用小型集成化电气系统实现在轨姿态控制功能。

轨道转移级在现有液体上面级^[5]的基础上改进而来。在上面级本体上安装有补给舱支架、交会对接机构、敷设太阳能电池片、增加姿控推进

剂携带量, 配套完善控制系统和统一供配电功能、测控系统提供指令上行能力, 使上面级具备在轨交会对接和转运摆渡补给舱的能力。

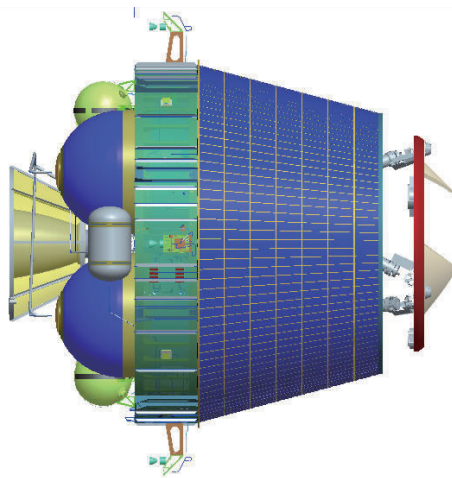


图 3 轨道转移级示意图

Fig. 3 Orbit Transfer Stage

轨道转移级的初步质量分配见表 1, 其起飞质量约为 4600kg。

表 1 轨道转移级质量分配

Tab. 1 Mass composition of space transporter

序号	项目	质量/kg
1	上面级本体	1100
2	主动力推进剂加注量	2600
3	姿控推进剂加注量	500
4	交会对接机构	300
5	支架及太阳能电池	100
6	总计	4600

采用所提出的技术方案, 补给舱只须在对接前进行姿态阻尼即可, 不需要配置复杂的导航装置和动力系统, 也不需要太多的太阳能电池贴片。与现有的空间站货运方案相比, 货运能力有所提升。由于轨道转移级可长期在轨重复使用, 补给舱成本较低, 并可选择更为经济的运载火箭发射补给舱, 从成本角度也具有一定优势。

2 任务模式与工作流程

基础级火箭将轨道转移级与补给舱组合体发射至近地点高度 200km、远地点高度 400km 的 LEO 轨道, 之后轨道转移级将补给舱转运至约 400km 高度的空间站圆轨道位置, 完成补给任务

后,上面级与携带废弃物的补给舱离轨进入远地点高度 400km、近地点高度 50km 的再入轨道,然后轨道转移级与补给舱分离,补给舱再入烧毁,

轨道转移级抬高轨道至近地点高度 200km、远地点高度 350km 的中间轨道停泊,等待下一次在轨补给任务。首次任务工作流程示意图 4。

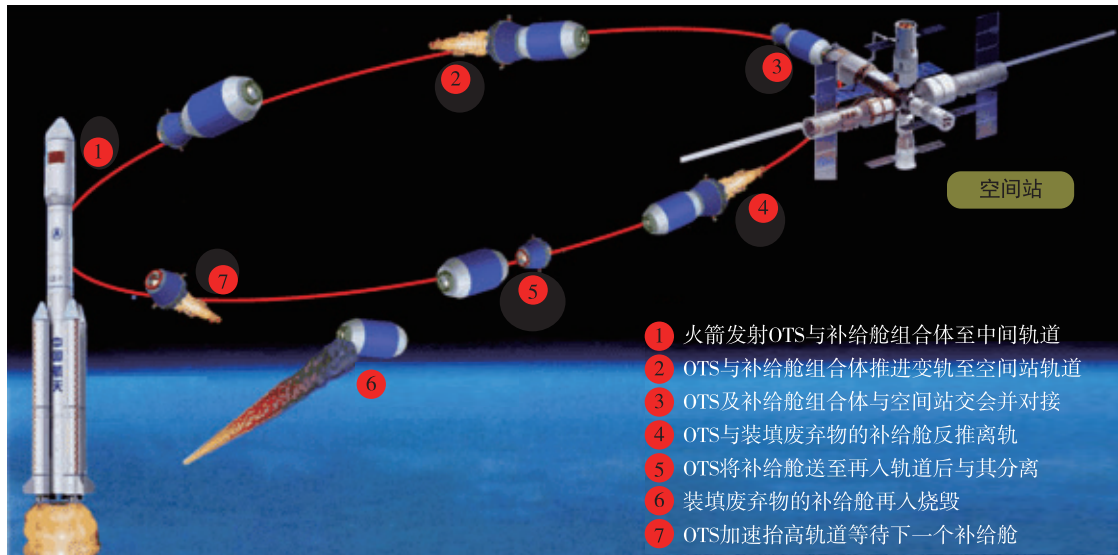


图 4 首次任务工作流程

Fig. 4 Flow chart of first mission

后续任务发射补给舱进入近地点高度 200km、远地点高度 350km 的中间轨道,在轨停泊。补给时,轨道转移级机动到补给舱附近并实现交会对接,之后,轨道转移级与补给舱组合体变轨至 400km 高度的空间站圆轨道位置,并实现与空间站的交会对接和第 2 次补给,完成补给任务后,轨道转移级与携带废弃物的补给舱离轨进入远地点高度 400km、近地点高度 50km 的再入轨道,然后轨道转移级与补给舱分离,补给舱再入烧毁,轨

道转移级抬高轨道至近地点高度 200km、远地点高度 350km 的中间轨道等待下一次补给任务。后续补给任务工作流程示意图 5。经初步分析计算,按照补给舱 8t、废弃物 2t 的规模,整个任务流程需消耗推进剂约 750kg,考虑在轨运行期间轨道维持的推进剂消耗,轨道转移级 2600kg 的加注量可进行 3 次空间站补给任务。相比现有的空间站货运补给方案,有较大的经济成本优势。

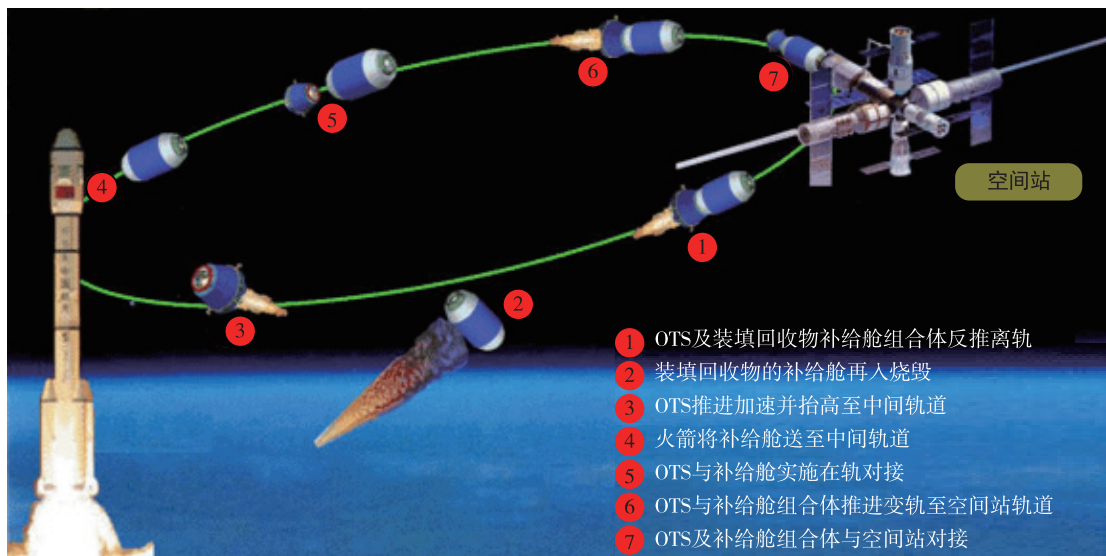


图 5 后续任务工作流程

Fig. 5 Flow chart of later mission

3 应用特点与发展路线

基于上面级的可重复使用空间站补给方案具有如下工程应用特点:

- 1) 轨道转移级基于现役型号改进, 任务保障性好;
- 2) 补给舱方案简单, 可形成一定的模块化研制能力;
- 3) 轨道转移级在轨可重复使用, 发射可采用低成本运载火箭, 任务经济性好。

可重复使用空间站补给方案可采用如下“三步走”的发展路线:

第 1 步, 研制补给舱, 改进轨道转移级, 具备摆渡运输补给舱和停靠对接至空间站的任务能力;

第 2 步, 轨道转移级具备长期在轨能力及在轨加注能力, 实现在轨多次使用, 可长期在轨承担转运摆渡补给舱任务;

第 3 步, 根据可能的任务需要, 轨道转移级为空间站提供轨道维持等辅助能力。

以现有液体上面级为基础, 需要开展的主要改进工作包括:

- 1) 新增抓捕对接机构系统;
- 2) 新增相对导航系统, 配置交会对接传感器;
- 3) 供配电系统能源由锌银蓄电池改为“太阳能+锂离子电池”方案;
- 4) 根据交会对接及目标姿控稳定性和精度要求, 适应性改进姿轨控系统;
- 5) 针对长期在轨任务适应性改进热控措施;
- 6) 综合任务需求, 优化姿轨控推进剂加注量。

4 关键技术分析

4.1 适应长期在轨滞留后发动机再启动技术

轨道转移级长期在轨工作期间, 为确保发动机结构可靠性, 应尽可能使发动机各组件、非金属件、特别是起动箱半膜组件避免长期接触推进剂, 这就需要对发动机的工作模式、控制时序及系统参数进行相应的优化设计和改进。从系统上提高发动机各组件对长期在轨工作的适应性, 包括总装气路全焊接技术、涡轮泵氧化剂端面密封技术、阀门长期在轨密封技术、羧基亚硝基氟橡胶长期在轨工作可靠性研究。

4.2 轻质化结构优化设计技术

为提升轨道转移级箭体结构效率, 需进行结

构轻质化设计技术研究。轻质化结构优化技术的主要目的在于寻求既经济又适用的结构形式, 以最少的材料、最低的造价实现结构的最佳性能。实施轻质化结构优化技术, 需要解决 3 个优化问题, 包括尺寸优化问题、形状优化问题和拓扑优化问题。同时, 由于轻质化结构不可避免地会带来异型结构形式, 为实现该类异型结构的复杂加工和装配, 并尽可能降低制造成本, 还需要解决必要的工艺优化问题。

4.3 长期在轨自主导航技术

轨道转移级在轨运行期间, 惯性器件长期漂移产生的精度误差不可忽略。需有效利用卫星导航和星光定姿信息, 开展组合导航模式分析, 并进行组合导航信息融合算法研究, 进行惯性误差系数在线标定和误差补偿, 并开展故障情况下导航模式切换技术研究。根据补给舱入轨参数、姿态等输入条件, 轨道转移级自主制定最优交会对接方案, 实现与补给舱及空间站的交会对接, 提高空间站补给任务的自主能力。

4.4 综合电子系统集成化技术

为降低质量和功耗, 综合电子系统采用一体化设计方案, 所有的控制与管理工作的, 包括飞行任务管理、程控和遥测、数据采集与处理、实时姿态控制、热控管理、系统故障诊断、时间管理等, 都集中在任务管理组合执行, 使得任务管理与控制集中统一。这样不但减轻了相应模块的质量, 也减少了低频电缆网的质量。为保证长期在轨期间的高可靠性, 关键部件/模块引入冗余设计技术, 当系统有故障出现时, 将故障部件隔离开, 启动备份部件, 以保证系统继续可靠运行。

4.5 鲁棒自适应姿态控制技术

轨道转移级与补给舱完成对接后, 组合体构形变化和载荷的移动会导致组合体质量特性参数的改变, 该参数不能通过地面实验准确获得, 只能进行在线辨识。此外, 组合体的控制主要由上面级承担, 坐标系和构形变化引起的推力重新分配等问题难以采用传统 PID 算法进行有效控制。因此, 需开展基于参数不确定性和控制输入受限情况下的鲁棒自适应控制方法的研究。

5 结论

本文提出了一种基于我国现有液体上面级的

可重复使用空间站补给方案,可用于空间站补给运送货物及废弃物转运清理。建议围绕空间站补给,先行对采用轨道转移级转运摆渡补给舱的对接机构形式、补给发射周期、补给发射任务保障条件、补给方案与货运飞船补给方案的关系等开展进一步的论证分析工作。

参考文献

[1] 杨涛. 空间站轨道参数选择 [J]. 弹道学报, 1995,

4: 1-6.

[2] 范剑峰. 空间站轨道高度选择 [J]. 中国空间科学技术, 1991, 11 (4): 1-8.

[3] 葛姗姗, 曲晶. 后航天飞机时代国际空间站运输服务的新选择 [J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (4): 28-31.

[4] 林木. 运载火箭上面级功能与技术发展分析 [J]. 上海航天, 2013, 30 (3): 33-38.

[5] 唐军刚, 陈塞崎, 陈益, 等. 国内外运载火箭上面级发展现状分析 [J]. 中国航天, 2012 (9): 5-10.