DOI：10.3724/zrht.1674-5825.2025060

在轨人居系统空间组构类型分析与启示

王婧瑶[1,2]，潘文特[1,2*]，袁 帅[3]

（1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院，哈尔滨 150001；2. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室，哈尔滨 150001；3. 哈尔滨工业大学航天学院，哈尔滨 150001）

摘 要： 针对规模化空间站设计需求以及如何优化舱体组构方式，以提升整体的使用效能等关键问题，系统性归纳了在轨空间站的空间组构类型，选取典型案例建立三维模型并进行空间拓扑关系转译，应用空间句法对其进行基于全局整合度、选择度、连接度、总深度等核心指标的量化分析，并依据分析结果综合比较不同组构方案的优劣，从可达性、总深度值与可理解度3个角度提出了在轨人居系统的设计启示，强调中心辐射式与鱼骨式空间组构类型在整体可达性与可理解度上的优势，并通过优化关键舱体拓扑深度、构建短路径减少组构层级、合理配置节点舱数量与位置，以支持更高效的在轨作业。

关键词： 在轨人居系统；在轨空间站；空间句法；拓扑结构；微重力环境

中图分类号：V49; TU204 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5825(2026)01-0145-10

Analysis of Spatial Configuration Types for In-orbit Habitation Systems and Its Enlightenments

WANG Jingyao[1,2], PAN Wente[1,2*], YUAN Shuai[3]

(1. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin, 150001, China; 3. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the design demands of large-scale space stations and the optimization of module configuration strategies for improving operational efficiency, this study systematically categorizes the spatial configuration types of orbital stations. Representative cases are selected for three-dimensional modeling and topological translation, followed by a quantitative analysis using space syntax based on core indicators such as integration, choice, connectivity, and total depth. Comparative evaluation of different configuration schemes is conducted according to the analytical results, from which design insights for in-orbit habitation systems are proposed from the perspectives of accessibility, total depth, and intelligibility. The findings highlight the advantages of radial and fishbone configuration in enhancing overall accessibility and intelligibility, and indicate that optimizing the topological depth of key modules, establishing short paths to reduce hierarchical levels, and appropriately configuring node modules can further support more efficient in-orbit operations.

Key words: in-orbit habitation system; in-orbit space station; space syntax; topological structure; microgravity environment

收稿日期：2025-04-15；修回日期：2025-11-19

基金项目：国家自然科学基金项目(52308017)

第一作者：王婧瑶，女，硕士研究生，研究方向为地外建筑。E-mail：2443164960@qq.com

* 通讯作者：潘文特，男，博士，副教授，研究方向为地外建筑、寒地建筑。E-mail:panwente@hit.edu.cn

引用格式：王婧瑶，潘文特，袁 帅. 在轨人居系统空间组构类型分析与启示[J]. 载人航天，2026，32(1)：145-154. Wang J Y，Pan W T，Yuan S. Analysis of spatial configuration types for in-orbit habitation systems and its enlightenments[J]. Manned Spaceflight，2026，32(1)：145-154.

1 引言

地外空间探索与开发是人类文明延续和进化的必然选择，随着航天科技的不断进步，在轨空间站的建设与发展正朝着长期驻人、功能多元化的方向推进，各航天国家积极推进地外空间探索计划，并取得了显著进展[1,2]。自20世纪70年代初苏联发射礼炮1号以来，已建成包括俄罗斯和平号空间站、美国与多国合作的国际空间站以及中国天宫空间站。在轨空间站的内部空间逐步从最初的简易结构、单一功能、少数舱体向复杂结构、多功能、舱体集群演变[3]。此外，主要航天大国还提出一系列在轨空间站方案。在美国2017年提出的阿尔忒弥斯计划中，包含在月轨建立长期驻留空间站——Gateway，作为探索月球的中转站。俄罗斯提出了ROSS计划，致力开发俄罗斯轨道服务站并在太空对其领土进行高频观测。这些计划不仅要求在轨空间站具备更长的驻留能力，还需要在空间使用效率、功能组合方式等方面做出进一步优化[4]。

如何通过在有限的空间内根据任务特点合理配置各功能区域、优化空间布局，增加空间可达性和可理解度，以达到提升在轨空间站的空间利用率和航天员工作效率的目的，已成为构建在轨人居系统的重要目标[5,6]。因此，研究并分析在轨空间站的空间类型与组合模式，提供更加适应长期任务需求的在轨空间站优化设计方案，具有重要的理论价值与实践意义[7]。

本文构建典型在轨空间站三维模型，对不同类型空间站在可达性、深度值与可理解度方面进行量化比较，揭示其空间组织规律，并提出面向长期任务的在轨人居系统优化设计策略。

2 在轨空间站发展现状

2.1 在轨空间站空间组构发展现状

本文梳理已建成在轨空间站的发展历程，具体如图1所示。可以发现，其空间组构从简单集中式布局逐步演变为复杂的多舱段组合布局，并且在舱体之间的连接与空间拓扑关系方面体现出明显的阶段性特征。

1)第一代在轨空间站的空间组构以功能单元的集中式布局为主，如苏联的礼炮系列(1~5号)和美国的天空实验室[8]。这类空间站通常采用单舱体结构，功能区域集中，拓扑关系简单，空间利用效率较

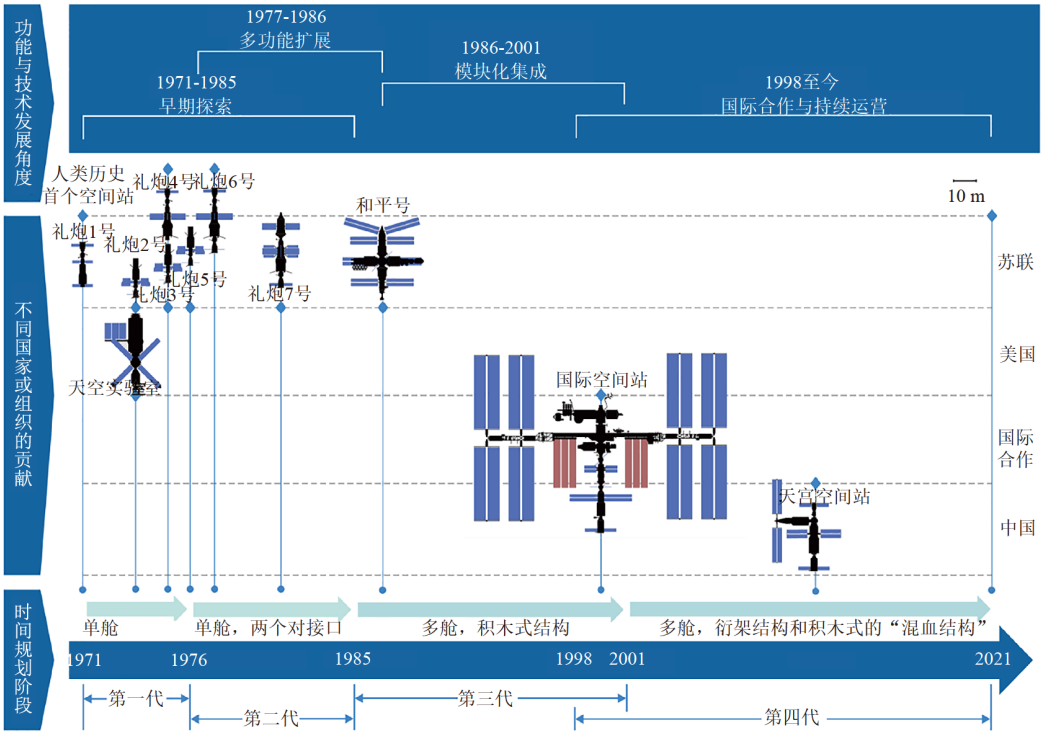


图 1 已建成在轨空间站发展历程图

Fig. 1 Development timeline of established in-orbit space stations

低,缺乏后续扩展能力。

2)第二代在轨空间站空间组构逐渐发展为单舱串联布局,例如礼炮6号和礼炮7号空间站[9]。这类空间组构增加了舱体之间的线性连接接口,初步实现了空间的拓展能力,使空间具备了一定的任务灵活性,但整体布局仍以线性单一拓扑形式为主。

3)第三代、第四代在轨空间站的空间组构转向模块化与多节点组合。内部空间开始呈现以核心舱为中心的多节点组合模式,拓扑结构逐步由单一线性形式转变为网络化的空间连接关系。和平号空间站采用节点舱连接核心功能区域;国际空间站则引入了节点舱和衍架结构等多种连接形式,大大提升了空间的适应性和布局复杂程度[10,11];中国天宫空间站延续了复杂化的趋势,舱体模块设计更加精细,核心舱和实验舱等功能区域的拓扑连接得到了优化,从而在空间布局上实现了较高的适配性与效率,满足了长期驻人任务的空间需求[12]。

本文梳理在轨空间站设计方案发展历程如图2所示。众多新型在轨空间站设计方案体现出模块化与空间扩展能力的趋势[13-15]。这些设计方案强调通过标准化接口实现舱体的灵活组合,逐步发展出更多元、更灵活的空间连接方式,凸显了在轨空间站未来空间组构模式的多样化潜力。

总体来看,在轨空间站的空间组构发展经历了从简单到复杂、从单一线性到网络化拓扑关系的演变过程,展现了人类对空间布局优化和功能整合的持续探索,也为后续深入分析各在轨空间站的具体拓扑特征、归纳空间组构模式提供必要的背景信息。

2.2　典型在轨空间站三维模型建立与空间拓扑关系转译

选取典型既有在轨空间站及在轨空间站设计方案进行三维建模,涵盖各舱体的空间相对位置及连接关系。选择航天员主要活动平面作为主投影面,其法线方向作为辅面,投影展开为二维拓扑关系平面图。利用Depthmap绘制Convex Map,使用link指令将处于不同维度的舱体或功能空间建立连接,确保三维空间逻辑在二维拓扑关系平面中的完整性(表1)。该方式有助于直观地展示在轨空间站内部的功能区域布局,为后续绘制拓扑结构分析图、归纳不同在轨空间站组构类型、进行可达性量化分析奠定基础。

2.3　典型在轨空间站拓扑结构分析与空间组构类型归纳

为把握在轨空间站空间结构的本质特征,忽略

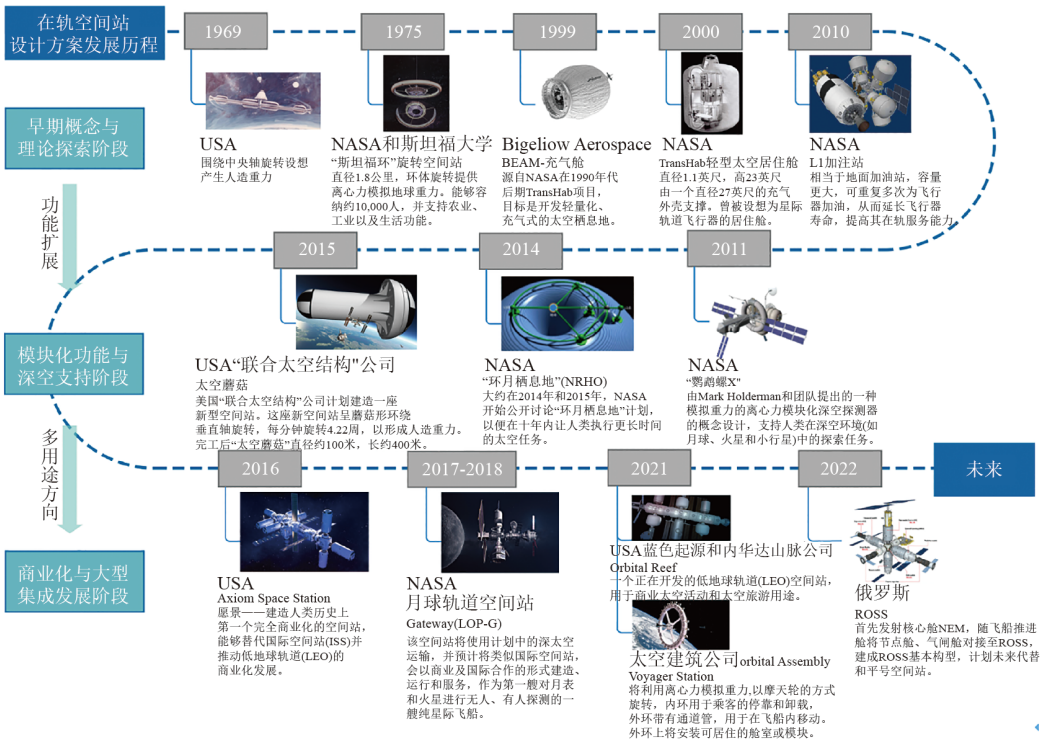
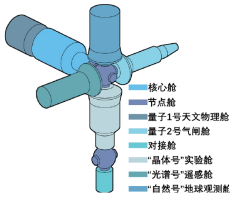
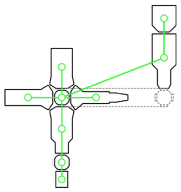
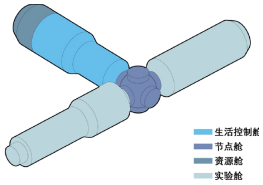
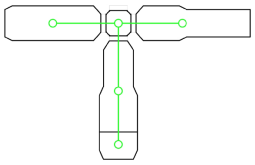
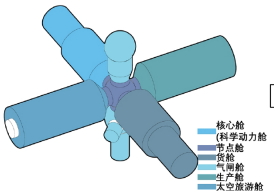
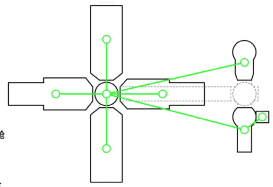
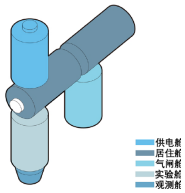
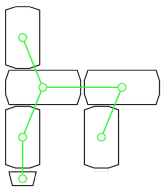
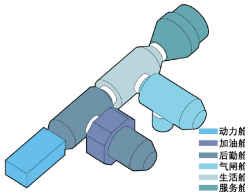
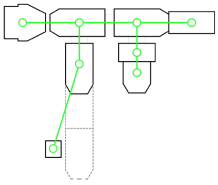
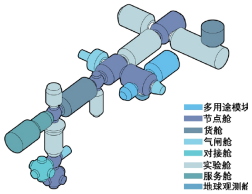
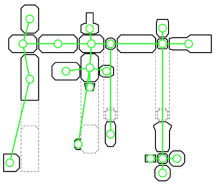


图 2　在轨空间站设计方案发展历程图

Fig. 2　Development timeline of in-orbit space station design schemes

表 1 在轨空间站三维空间结构与二维拓扑关系转译
Table 1 3D spatial structure and 2D topological relationship translation of in-orbit space stations

在轨空间站	三维功能轴测图	二维拓扑关系平面图
Mir		
Tiangong		
ROSS		
Axiom		
Gateway		
ISS		

舱体空间的尺寸以及方位,将每个舱体或功能空间抽象为点,利用直线将2个相邻的空间连接,选取各在轨空间站关键舱体或功能区域绘制拓扑结构图。通过选取6个典型既有在轨空间站与设计方案,归纳出3种具有代表性的空间组构类型(表2)。

1)中心辐射式(星型拓扑)结构。以某个舱体为中心,连接多个功能舱体向外辐射[16]。这种结构提供了简单而直接的舱体连接方式,可以高效地组织多个功能区,提高航天员任务执行效率。天宫空间站、和平号空间站、ROSS采用了此类型空间组构模式,同时满足多任务需求。

2)鱼骨式(树状拓扑)结构。类似树木主干和分支,由主干舱体和多个分支舱体组成,主舱体通常承担主要功能,分支舱体则根据任务需要进行扩展[17]。Gateway、Axiom采用了此类型空间组构模式,功能舱与分支舱体相连,能够根据任务需求灵活调整舱体组合和空间布局。

3)根茎式拓扑结构。多指去中心化、非线性、多向连接的网络结构,其高效的空间分配结构系统,使不同舱体可以相对独立运行同时协调运作[18]。国际空间站采用了此类型空间组构模式,通过多个节点舱组合其他功能舱体,形成了网络状连接。

以和平号空间站为例,节点舱(CN)是和平号空间站的关键交通枢纽,直接连接核心舱、实验舱、遥感舱与气闸舱,形成中心辐射式(星型拓扑)结构,有效降低了周边舱体的深度值。核心舱(C)作为主要生活与工作区域,通过节点舱向外辐射连接实验舱、气闸舱等,既保障了功能分区的独立性,又通过节点舱实现动态协调,形成了高效的空间系统。对接舱(D)作为飞船接驳点,其使用频率相对较低,深度值为所有舱体中最大,反映了对接舱具有较强的任务专属性的功能定位。气闸舱(A)作为出舱活动的必经节点,具有局部交通优势,避免路径冗余,确保紧急情况下航天员能够快速响应。实验舱(L)作为高频使用区域,与核心舱的连接需经节点舱中转,导致其深度值偏高,可能增加航天员的操作耗时。

3 典型在轨空间站空间组构量化分析

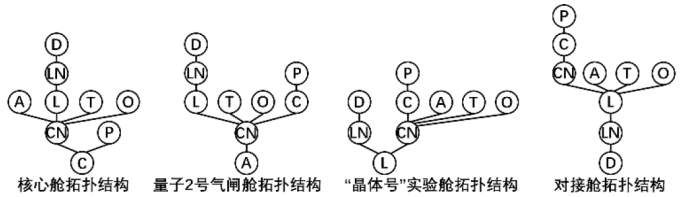
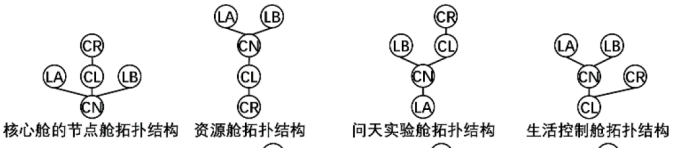
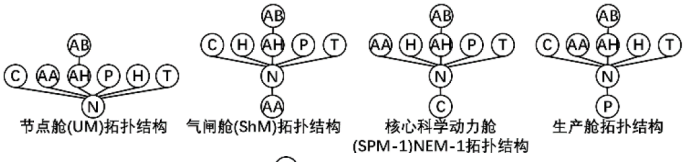
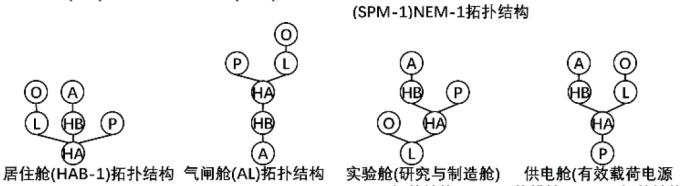
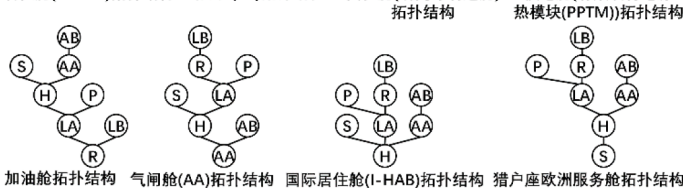
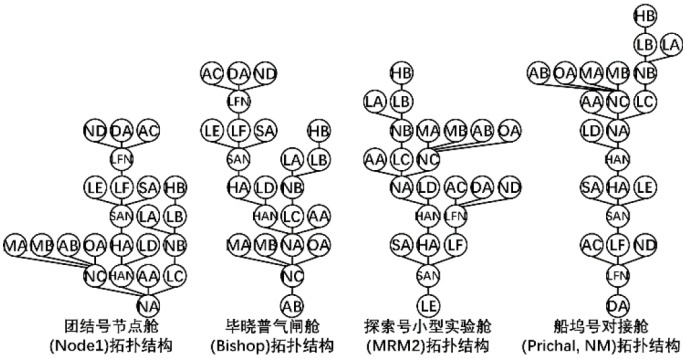
在轨空间站的构型设计以科学研究、工程可行性和人因需求为核心目标,空间组构作为一种潜在影响航天员行为效率和操作舒适度的重要因素,有必要进行结构层面的系统性量化分析。

本文以空间句法作为切入点,关注不同空间组构模式在拓扑可达性与空间组织逻辑上的差异,旨在为后续规模化在轨人居系统的空间优化设计提供补充性的决策参考。

在轨空间站的空间组合模式复杂,舱体之间相对位置和连接关系呈现多维度特征,选取能反映关键功能舱布局的合适方向,将三维舱体转译为二维拓扑关系平面总结空间组构类型。通过绘制关键舱体或功能区域的拓扑关系图并利用Depthmap软件进

表 2　在轨空间站拓扑结构与空间组构类型

Table 2　Topology structure and spatial configuration types of in-orbit space stations

在轨空间站	拓扑结构图	拓扑图缩写释义
Mir 中心辐射式 (星型拓扑)		C-核心舱;CN-核心舱的节点舱;P-量子1号天文物理舱;A-量子2号气闸舱;D-对接舱;L-晶体号实验舱;LN-“晶体”号实验舱的节点舱;T-光谱号遥感舱;O-自然号地球观测舱
TianGong 中心辐射式 (星型拓扑)		LA-问天实验舱;LB-梦天实验舱;CR-资源舱;CL-生活控制舱;CN-节点舱;
ROSS 中心辐射式 (星型拓扑)		N-节点舱(UM);AA-气闸舱(ShM);AB-科学气闸舱(ShK);AH-货物气闸舱; C-核心科学动力舱(SPM-1)NEM-1;H-科学能源储存舱NEM-2;P-生产舱;T-旅游舱
Axiom 鱼骨式 (树状拓扑)		HA-居住舱(HAB-1);HB-居住舱(HAB-2);A-气闸舱(AL);L-实验舱(研究与制造舱); O-观测舱(天文台);P-供电舱(PPTM)
Gateway 鱼骨式 (树状拓扑)		P-动力舱;AA-气闸舱(大);AB-气闸舱(小);H-国际居住舱(I-HAB);LA-居住与后勤舱(HALO);LB-后勤系统SpaceX;R-加油舱(ESPRIT);S-猎户座欧洲服务舱
ISS 根茎式		MA-永久多用途模块(PMM);MB-毕格罗可扩展活动模块(BEAM);NA-团结号节点舱(Node1);NB-和谐号节点舱(Node2);NC-宁静号节点舱(Node3);ND-码头号节点舱(CO1);HA-曙光号功能货舱(FGB);HAN-曙光号功能货舱(FGB)的节点舱;HB-希望号货舱(JEM-hold);AA-寻求号气闸舱(A/L);AB-毕晓普气闸舱(Bishop);AC-科学号气闸舱;DA-船坞号对接舱(Prichal, NM);LA-哥伦布号实验舱(COL);LB-希望号实验舱(JEM);LC-命运号实验舱(LAB);LD-晨曦号小型实验舱(MRM1);LE-探索号小型实验舱(MRM2);LF-科学号多功能实验舱(MLM);LFN-科学号多功能实验舱(MLM)的节点舱;SA-星辰号服务舱(SM);SAN-星辰号服务舱(SM)的节点舱;OA-穹顶号地球观测舱(Cupola)

行可达性分析,量化不同舱体或功能区域的可达性,最终在三维模型中进行可视化映射、转译与分析流程图见图3。

3.1　不同类型在轨空间站可达性分析

在轨人居空间系统可达性指航天员在空间系统中从某一空间达到另一个空间的便捷程度[19]。各种空间组构类型的在轨空间站在结构设计上各有特点,分别在满足不同任务需求、优化空间利用率、提升航天员工作效率和舒适度等方面展现出不同优势。利用Depthmap选取全局整合度、选择度、连接度、总深度指标对在轨空间站空间关系进行量化分析,对各类空间组构模式进行可达性评价,具体指标含义见表3。全局整合度基于空间句法中相对不对称值(RA)进行标准化计算,在不同规模在轨空间站间具备可比性。选择度、连接度与总深度主要用于分析各组构类型空间站内部路径分布、局部连通特征及深度层级结构。在DepthMap中导入转译后二维拓扑关系平面图,量化各舱体或功能区域之间的联系(表4)。

以和平号空间站为例,计算出各个功能空间的全局整合度、选择度、连接度以及总深度,具体如下:

1)全局整合度(*Integration*)。核心舱附属的节点舱

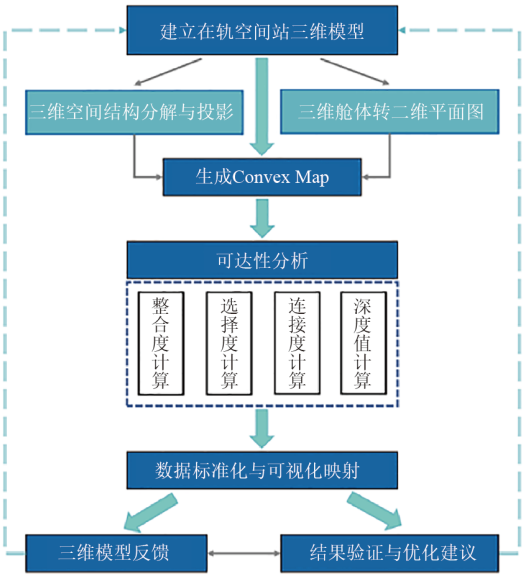


图 3 在轨空间站三维空间转译与分析流程图

Fig. 3 Workflow of 3D spatial translation and analysis for in-orbit space stations

表 3 各量化指标的定义[20]

Table 3 Definitions of various quantitative indicators[20]

指标	定义
全局整合度	指舱体或功能区域的集聚、离散程度, 反映其中心性
选择度	指舱体或功能区域被航天员穿越的可能性与重要性
连接度	指舱体或功能区域与其他舱体或功能区域的连接数量, 反映其渗透性和影响力
总深度	指舱体或功能区域到其它所有舱体或功能区域的最短路径的总和, 反映空间的可达性层级

(*Integration*=2.217)作为和平号空间站内的核心枢纽,整合度最高,可达性最优。对接舱(*Integration*=0.467)用于飞船的对接和停泊,航天员需要通过多个中介区域才能到达该舱体,整合度最低,可达性较差。

2)选择度(*Choice*)。核心舱附属的节点舱(*Choice*=48)选择度最高,作为连接核心舱、实验舱、观测舱、遥感舱和气闸舱的关键舱体,是航天员穿行的高频区域。遥感舱、气闸舱、观测舱、天文物理舱和对接舱(*Choice*=0)选择度最低,在空间站内作为执行专属任务的功能区域,减少了航天员不必要的流动,提升了航天员的操作效率。

3)连接度(*Connectivity*)。核心舱附属的节点舱(*Connectivity*=5)连接度最高,此功能区域与周围其他功能区域的联系密切,航天员能通过较少的步伐或路径迅速到达该区域。遥感舱、气闸舱、观测舱、天文物理舱和对接舱(*Connectivity*=1)连接度最低,位于和平号空间站尽端,对周围的功能区域的影响力弱。

4)总深度值(*Total Depth*)。对接舱(*Total Depth*=27)总深度值最大,其相对于其他区域的位置较为边缘化,使用频率较低。核心舱附属的节点舱(*Total Depth*=12)总深度值最小,其在空间站中的位置相对更为中心,与其他功能区域的连接更为直接,使用频率较高。

3.2 不同类型在轨空间站总深度值分析

在一个拓扑结构中,一个节点到其他所有节点的最短路径步数之和越大,意味着该节点的全局拓扑深度越深。总深度值作为空间句法的核心参量之一,其数值直接反映舱体在空间网络中的可达性层级,在轨空间站内各舱体或功能区域的总深度值因为其所处拓扑结构位置与空间组构类型不同呈现差异性变化(图4)。

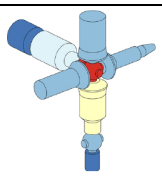
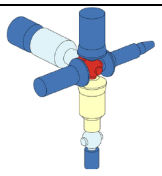
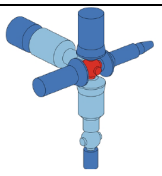
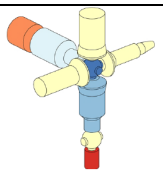
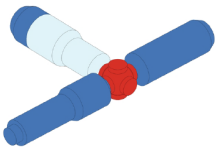
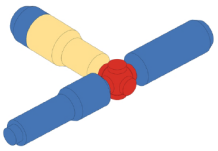
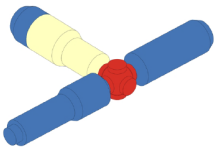
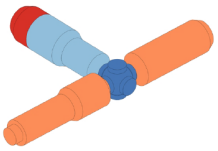
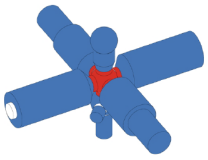
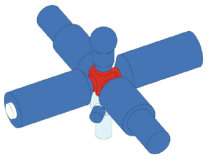
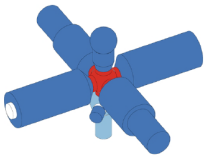
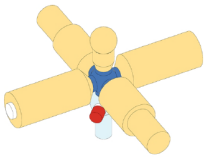
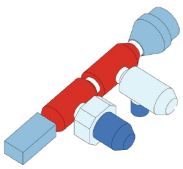
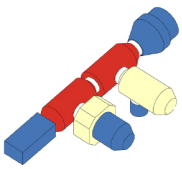
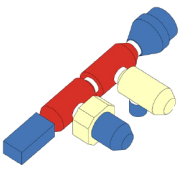
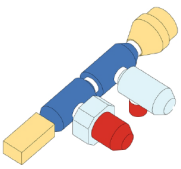
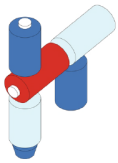
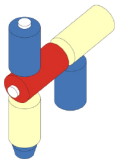
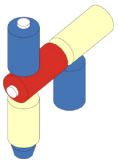
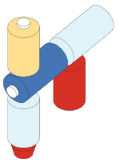
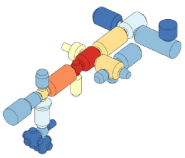
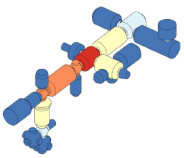
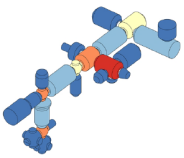
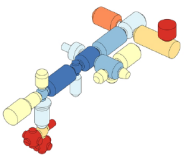
通过观察各组构类型在轨空间站内部舱体的深度分布特征,从各典型在轨空间站的总深度值分布图4可见,功能性强但使用频率较低的舱段,例如气闸舱与对接舱,其深度值普遍高于核心功能区,反映其任务驱动性与访问需求的低频特性。动力舱由于承担持续性的能量与推进供应,其深度值也相对较大,体现为低访问属性。资源舱与货舱通常布置在末端位置,深度值最高,与补给飞船的单向功能关联明显。相比之下,核心舱段在各类型空间站中均表现为深度值最低的节点,处于中心位置,符合其作为控制、指挥及高频任务区的功能需求。居住舱与生活舱的深度值普遍略高于核心舱但仍属于低深度值舱体,需要保持与核心舱的近距离连接,以支持航天员频繁往返。实验舱的深度值在不同空间站中相对较低,其任务频率较高、访问路径需保持相对直接,以保障科研活动的效率。此外,在根茎式空间组构类型在轨空间站中,各舱体深度值波动显著,反映其长路径、层级深以及空间组织较为松散的特征;而中心辐射式与鱼骨式类型的空间站各舱体深度值波动更为集中,呈现路径短、组织紧凑的特点。

3.3 不同类型在轨空间站可理解度分析

可理解度表明了在轨空间站局部空间和整体空间的关联程度,作为反映连接度(*Connectivity*)与全局整合度(*Integration*)关系的整体性指标,具有尺度不敏感性,在不同规模在轨空间站间亦具有可比性。在可理解性低的空间系统中,连接性舱体不能很好地融合到整个空间系统中,可能误导航天员在该空间系统中的方位认知。

表 4　在轨空间站量化指标的三维可视化映射

Table 4　The 3D visual mapping of quantitative metrics for in-orbit space stations

在轨空间站		整合度	选择度	连接度	总深度
中心辐射式(星型拓扑)	Mir				
	Tiangong				
	ROSS				
鱼骨式(树状拓扑)	Gateway				
	Axiom				
根茎式	ISS				

注:红色为最大值,深蓝色为最小值,中间颜色从冷色到暖色依次渐变代表数据变大

本文研究以空间系统Rn-CN关联分布图(图5)反映典型地外既有在轨空间站以及在轨空间站方案的可理解度。其空间形制不尽相同,通过比较R-Squared值,归纳不同空间形制与在轨空间站空间系统可理解度之间的联系(表5)。

采用中心辐射式(星型拓扑)结构和鱼骨式(树状拓扑)结构的在轨空间站*R-Squared*值普遍大于0.5,说明这2种结构的可理解度相对较高,航天员在这类结构的在轨空间站中可以相对容易地建立起对整个空间系统的辨别和认知,利于航天员的高效移动与任务执行。

4　在轨人居系统设计启示

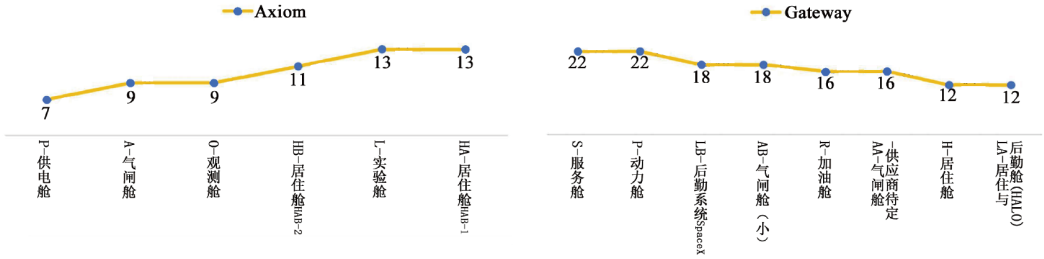
在总结量化分析结果的基础上,本文从可达性、总深度值与可理解度3个角度出发,提出以下在轨人居系统设计启示。

1) 选择可理解度高的空间组构类型以提升空间-任务适配程度。未来的在轨人居系统设计中,可以采用中心辐射式(星型拓扑)结构和鱼骨式(树状拓扑)结构等适应性强的空间组构类型,以提高整个空间系统的可理解度,从而提高在轨人居系统的空间-任务适配程度,最终提升航天员在系统中的生活舒适度与任务执行效率。

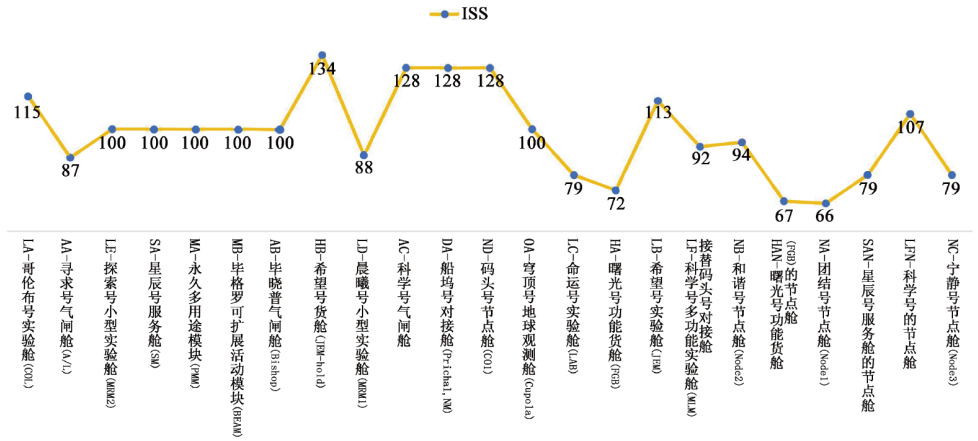
2) 降低空间拓扑深度以适配功能需求。在设计人居系统时,应根据各功能区域的任务需求合理配置舱体的拓扑深度。对于低使用频率且任务导向明确的舱体,可将其安排在空间系统的外围,降低与高频使用舱体或功能区域的冲突;而高频使用舱体或功能区域应布局在拓扑深度较浅的位置,减小与核心交通流线的距离。



(a) 中心辐射式（星型拓扑）结构在轨空间站各舱体深度值
(a) Depth values of modules in a centrally radiating (star topology) orbital space station



(b) 鱼骨式（树状拓扑）结构在轨空间站各舱体深度值
(b) Depth values of modules in a herringbone (tree topology) orbital space station



(c) 根茎式结构在轨空间站各舱体深度值
(c) Depth values of modules in a rhizomatic topology orbital space station

图 4 不同空间组构类型在轨空间站各舱体或功能区域Total Depth分析图

Fig. 4 Total depth analysis of different spatial configuration types for in-orbit space station′s modules or functional areas

3）减少组构层级以优化空间可达性系统。在轨空间站的三维空间系统特性引入了更复杂的路径分叉与层级关系，通过设立多个节点舱，将不同舱体和功能区域之间的连接关系转化为网状结构，形成的短路径使各舱体之间的连接更加紧凑、直接以减少组构层级。航天员在微重力环境下的移动不再受到传统线性布局的限制，而是通过多条短路径迅速连接不同舱体或功能区域，最终形成环形立体网状三维结构。

4）提高多连接舱体比例以增强空间可达性。节点舱作为联接在轨空间站各功能舱体的关键舱体，能够有效地提升在轨空间站整体可达性。通过在核心交通流线上多设节点舱，充分利用其进行多叉连接，提升其舱体连接数量，能够在不增加过多路径冗余的情况下，减少周边舱体的深度值，增强空间可达性。节点舱的设置使得不同舱体之间的连接更为高效，有助于航天员快速移动，提高任务执行效率。

5 结论

本文聚焦在轨空间站空间组构问题，分析不同类型在轨空间站的内在差异。基于对典型在轨空间站的拓扑转译及量化分析，研究发现，中心辐射式与鱼骨式结构相比根茎式结构整体可理解度更强；通过选择合理组构类型、优化空间拓扑结构、减少组构层级、提高多连接舱体比例能够有效提升在轨空间站的整体可达性和航天员任务执行效率，为推动长期地外任务的关键枢纽与可操作的实践基地提供参考。

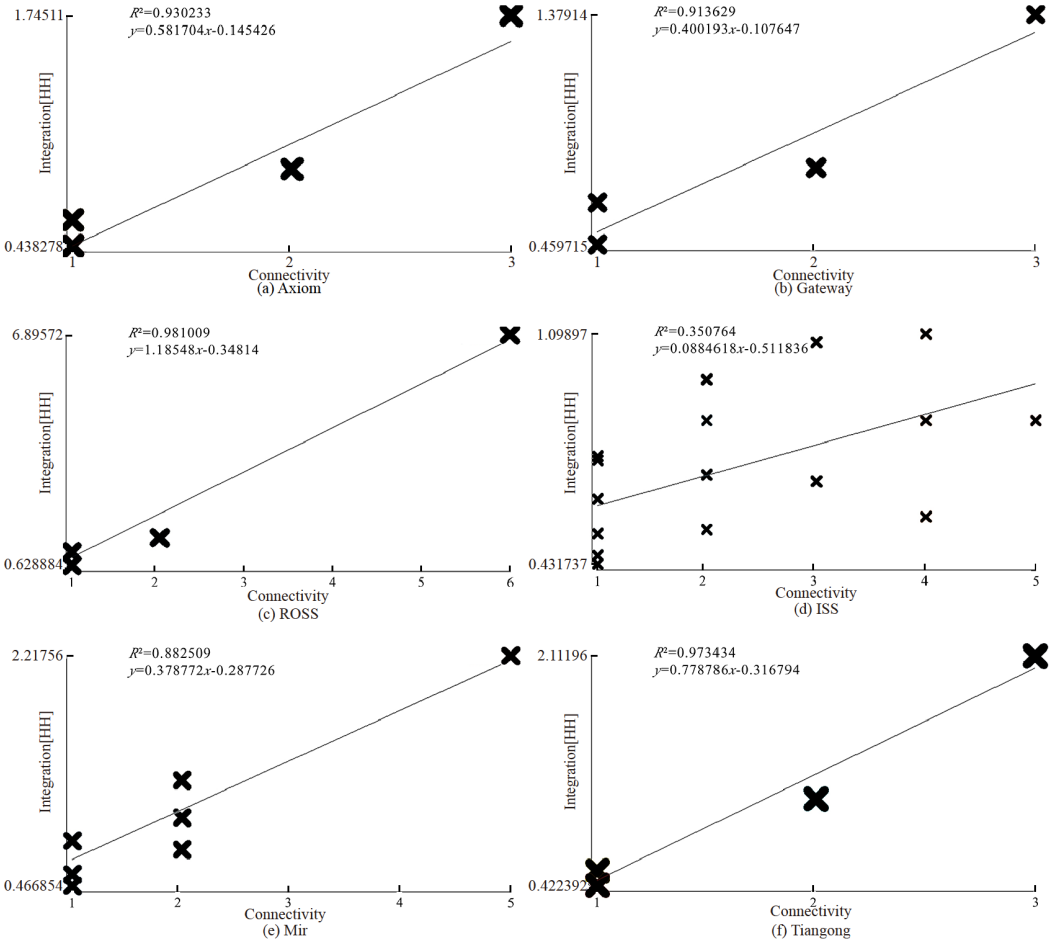


图 5　典型地外既有在轨空间站以及在轨空间站方案Rn-CN 关联分布图

Fig. 5　Rn-CN correlation distribution map of typical existing in-orbit space stations and in-orbit space station scheme

表 5　不同空间组构类型在轨空间站可理解度数值表

Table 5　Comprehensibility values of in-orbit space stations with different spatial configuration types

序号	方案	可理解度/R-Squared	空间组构类型
1	ROSS	0.981009	中心辐射式(星型拓扑)
2	Tiangong	0.973434	中心辐射式(星型拓扑)
3	Axiom	0.930233	鱼骨式(树状拓扑)
4	Gateway	0.913629	鱼骨式(树状拓扑)
5	Mir	0.882509	中心辐射式(星型拓扑)
6	ISS	0.350764	根茎式

今后在实际设计中需结合任务功能、工程可行性与人因标准等多元因素综合考量,以期为构建适宜航天员工作生活的在轨人居系统,优化策略和定量分析方法提供借鉴。

参考文献(References)

[1] Lim S,Prabhu V L,Anand M,et al. Extra-terrestrial construction processes - advancements,opportunities and challenges[J]. Advances In Space Research ,2017,60(7):1413-1429.

[2] 刘益清,梅洪元,刘鹏跃,等.月球环境下建筑设计策略研究[J].当代建筑,2022,(1):21-24.
Liu Y Q,Mei H Y,Liu P Y,et al. Research on architectural design strategies under the lunar environment [J]. Contemporary Architecture,2022,(1): 21-24(in Chinese).

[3] 景海鹏,辛景民,胡伟,等.空间站:迈向太空的人类探索[J].自动化学报,2019,45(10):1799-1812.
Jing H P,Xin J M,Hu W,et al. Space station: Human exploration towards outer space [J]. Acta Automatica Sinica,2019,45(10): 1799-1812(in Chinese).

[4] 中国载人航天工程办公室. 国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年)[EB/OL]. (2024-10-16)[2025-11-16]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10617325/content.html.
China Manned Space Agency. Medium and long-term development plan for national space science (2024–2050)[EB/OL]. (2024-10-16)[2025-11-16]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10617325/content.html(in Chinese).

[5] Rai B ,Kaur J .Human factor studies on a Mars analogue during crew 100b international lunar exploration working group euromoonmars crew: Proposed new approaches for future human space and interplanetary missions[J]. North American Journal of Medical Sciences,,2012,4(11):548-557.

[6] 杨宏.载人航天器技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018:

169-174.
Yang H. Manned Spacecraft Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2018: 169-174(in Chinese).

[7] 潘文特,李书颀,江家扬,等. 驻人月球科研站建筑设计系统工程研究[J]. 深空探测学报,2023,10(5): 503-511.
Pan W T,Li S Q,Jiang J Y,et al. System engineering research on the architectural design of a crewed lunar scientific research station [J]. Journal of Deep Space Exploration,2023,10(5): 503-511(in Chinese).

[8] David L. International space station: Becoming a reality.[J]. Aerosp Am,1999,37(7):S1-S15.

[9] Harland D M . The Story of Space Station Mir[M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd.,2005 : 119-120.

[10] Fuente H D,Raboin J,Valle G,et al. TransHab-NASA′s large-scale inflatable spacecraft[C] //41st Structures,Structural Dynamics,and Materials Conference and Exhibit,2000: 1822.

[11] Penley N J,Schafer C P,Bartoe J D F. The International Space Station as a microgravity research platform[J]. Acta Astronautica,2002,50(11):691-696.

[12] 王翔,王为.我国天宫空间站研制及建造进展[J].科学通报,2022,67(34):4017-4028.
Wang X,Wang W. Development and construction progress of China′s Tiangong space station [J]. Chinese Science Bulletin,2022,67(34): 4017-4028(in Chinese).

[13] Young L ,Yajima K ,Paloski W. Artificial gravity research to enable human space exploration[EB/OL]. (2009)[2024]. https://spacearchitect.org/pubs/IAA-SG22-FinalReport.pdf.

[14] Seedhouse E. Bigelow's Space Station[M]. Bigelow Aerospace: Colonizing Space One Module at a Time. Cham: Springer International Publishing,2014: 121-139.

[15] Adams C ,Jones R . Alpha: From the international style to the International Space Station[J]. Architectural Design,2014,84(6): 70-77.

[16] 王立夫,高聪,郭戈,等.异构多智能体网络拓扑可辨识性[J].自动化学报,2025,51(3):559-569.
Wang L F,Gao C,Guo G,et al. Topology identifiability of heterogeneous multi-agent networks [J]. Acta Automatica Sinica,2025,51(3): 559-569(in Chinese).

[17] Marais J,Malekian R,Ye N,et al. A Review of the topologies used in smart water meter networks: A wireless sensor network application[J]. Journal of Sensors,2016,2016(1): 9857568.

[18] 金广君,刘松茯,朱海玄.基于德勒兹"根茎"理论的生态城市形态审美研究[J].城市建筑,2011,(6):122-124.
Jin G J,Liu S F,Zhu H X. Aesthetic study of eco-urban morphology based on Deleuze's "rhizome" theory [J]. Urbanism and Architecture,2011,(6): 122-124(in Chinese).

[19] 刘抚英,刘艺蓉,郭赵薇.基于"空间句法"的工业建筑遗产空间再生评价研究——以沈阳市"铁西1905文化创意园"为例[J].低温建筑技术,2019,41(6):35-41+56.
Liu F Y,Liu Y R,Guo Z W. Evaluation of spatial regeneration of industrial architectural heritage based on space syntax: A case study of "Tiexi 1905 Cultural and Creative Park" in Shenyang [J]. Low Temperature Architecture Technology,2019,41(6): 35-41+56(in Chinese).

[20] Hillier B. Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1996: 74,87-95,224-226.

(责任编辑:孙京霞)