

驻人月球科研站建筑设计系统工程研究

潘文特, 李书颀, 江家扬, 王继先

(哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 驻人月球科研站是实现中长期月球深度探测的重要基础设施, 同时是一项具有多重复杂挑战的系统工程。从建筑学视角出发, 首先剖析了宏观、中观、微观层面的设计约束条件, 而后引用系统工程为驻人月球科研站建筑设计提供实施方法, 包含4个层面: 总体目标为安全、可持续、智能, 应用思想包括流程一体化、模型可视化、设计模块化, 应用优势为高效、准确、整合, 应用框架分为应用层、模型层、数据层, 最终构建了包含时间维、逻辑维、知识维的建筑设计系统工程三维结构模型, 综合体现了各阶段中各项工作内容与相关科学知识的立体结构, 旨在为未来驻人月球科研站的建设提供新视角和新思路。

关键词: 驻人月球科研站; 月球建筑设计; 系统工程

中图分类号: V476.3; P184

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)05-0503-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230048

引用格式: 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(中英文), 2023, 10(5): 503-511.

Reference format: PAN W T, LI S Q, JIANG J Y, et al. Research on architectural design system engineering of manned lunar research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 503-511.

引言

中国的月球探测规划分为“探、登、驻”3个阶段^[1], 目前已完成“无人月球探测”中的“绕、落、回”三期任务^[2], 并在2021年正式启动了国际月球科研站项目^[3]。月球科研站是进行月球探索和开发的重要基础设施, 是实现中国航天强国战略的重要标志, 适时开展有关月球科研站建筑设计研究具有重要意义。驻人月球科研站的主要功能在于为精密探月设备提供掩蔽空间, 为航天员提供稳定生存环境, 能够实现短期有人值守和长期自主运行。其建筑设计是一个复杂的系统工程, 在过程中具有大量复杂耦合信息, 设计组成复杂、设计约束苛刻、设计验证困难, 具有周期长、风险大、管理复杂等特点。因此, 面对此复杂特殊的建筑系统, 本文以系统工程视角研究驻人月球科研站建筑设计, 提供全新思路, 指导设计从时空分离走向统一, 从局部走向整体, 从离散走向系统。

1 研究概述

1.1 驻人月球科研站

1959年人类首颗月球探测器的成功发射拉开了第一轮探月高潮的帷幕^[4], 随后, 人类从未停止对月球的

探索。伴随航天科技的不断发展、任务阶段的不断深入, 世界各国及组织争相提出相对切实可行的月球建筑实施计划: 2015年, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出月球村倡议^[5], 为月球可持续发展制定战略, 并开展一系列原位建造研究; 2018年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出“阿尔忒弥斯”(Artemis)重返月球计划^[6], 计划分别在2024年和2028年实施两次载人登月, 并建立较为长期的驻人月球基地; 2021年, 中国发布了《国际月球科研站路线图》^[3], 计划于2035年前建成第一阶段的月球科研站。随着各国月球探索计划的实施, 航天机构牵头, 高校与建筑事务所参与的月球建筑设计涌现出大量经典方案(表1)。

1.2 系统工程

系统是由两个以上相互联系、相互作用的要素构成的具有特定功能、结构和环境的整体, 具有整体性、关联性、环境适应性、目的性、层次性等特征^[7]。系统工程是对系统理论的应用研究, 为组织管理系统的规划、研究、设计、制作、试验和使用提供了一套科学的方法。系统工程最早出现在机械、通信、航天、军事等以定量分析、设计、优化为主的硬系统工

表 1 高校与建筑事务所参与的月球建筑设计方案
 Table 1 Universities and architectural firms participating in lunar habitat design scheme

设计年份	设计名称	参与方
2010	SinterHab项目	国际空间大学
2010	Moon Capital栖息地	Andreas Vogler事务所
2013	月球建筑	Foster + Partners事务所
2016	月球基地	鹿岛建设+京都大学等
2018	月球村	SOM事务所 + 麻省理工学院
2020	Olympus月球建筑	ICON公司 + BIG事务所
2020	三叶草与中国星	哈尔滨工业大学
2022	LINA基础设施	AI Space Factory公司

程领域。从20世纪八九十年代开始，以社会、经济、管理等学科衍生的软系统工程与中国科学家钱学森教授引领的东方系统方法论开始出现在人们的视野中。研究者通过大量工程问题的研究总结出一系列系统工程理论与方法，如硬系统代表的霍尔三维结构^[9]（图1），以及软系统工程代表的切克兰德方法论（图2）。新一轮科技革命与产业革命中，智能化与数字孪生的背景（物联网、智能建造、元宇宙等）下衍生的智能制造系统工程成为数字技术、工业技术、管理技术等深度融合的复杂系统工程。

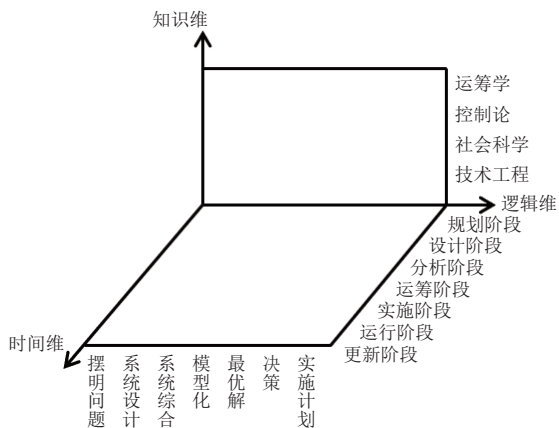


图 1 霍尔三维系统结构图
 Fig. 1 Hall 3D system structure diagram

本文所研究的驻人月球科研站建筑工程是软硬兼具的复杂系统工程，既存在环境、结构、材料等硬性要素，又存在政策、法规、管理等软性要素，同时伴随环境与功能的变化在长期发展上处于动态变化之中。因此本文旨在从系统工程视角解决月球建筑复杂系统总体设计问题。

2 驻人月球科研站建筑设计约束条件

2.1 宏观层面地月战略约束

世界航天现已进入以卫星互联网星座、太空资源开发与利用、载人月球探测和大规模深空探测等为代表的新阶段。各航天大国在近地空间、月球空间与地月转移空间积极开展地月活动^[9-10]，其战略行为主要分为3个方面：在轨服务与维修、太空旅游、系统能源、太空医疗等太空经济战略行为；空间站科学与技术实验、行星探测与实验等科技战略行为^[11]；法律政策、太空威慑架构等安全战略行为^[12]。月球科研站的建设作为地月战略系统中的重要环节，其建设过程受经济战略、科技战略、安全战略三方面的促进与制约。经济战略如稳定低成本的基础空间能力直接影响建设物资运输与建筑建造，地月经济开发决定建筑的规模与成本；科技战略如在月面微重力、高真空等空间环境下开展的有关研究在建筑结构、能源、生保系统等中产生技术突破；安全战略如月球资源开发、利用与治理等目标对建筑本身的战略意义、功能定位、建设周期等提出了要求。

2.2 中观层面复杂环境约束

月球具有复杂的物理环境，如微重力、长昼夜、大温差、强辐射、易发生流星撞击等危险因素。其中，月球微重力环境虽对于结构极限跨度、竖向功能组织等方面起到积极作用，但也对工程设计的可靠性与稳定性、物理原型的实验验证、人体健康与行为模式的设计研究提出了挑战。月表日间平均温度107℃，夜间平均温度-153℃，极端温度条件对于建筑结构的热应变、热稳定性，以及建筑材料的隔热与散热性能有更高的要求。由于月球外层不存在大气层的缓冲，辐射射线和微流星体不仅会破坏电子设备元器件、结构与材料，同时威胁在月人员安全。此外，月球存在着许多可利用的资源，如月壤、稀有金属与清洁能源等。原位资源可供开发利用于施工建设与后期运维，月壤、月岩可制造建材，氦-3可用于建设核电站以供给能源^[13]。同时，月球具有复杂的地质条件，起伏的月陆与月海，以及地下熔岩管道结构，如月球赤道区域的高原洞穴、月海空穴^[14-15]，为建筑设计抵御环境冲

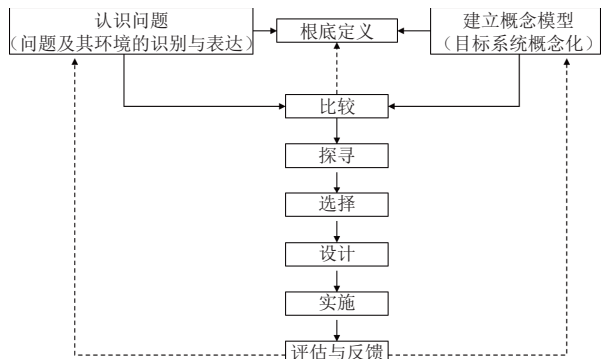


图 2 切克兰德方法流程图
 Fig. 2 Flow chart of the Checkland method

击提供了更为有利的地形条件。

2.3 微观层面关键技术约束

建筑运输与建造、结构与防护、建筑能源与生保相关的关键技术是实现驻人月球科研站从建立、运行到发展的基础, 技术发展也制约着建筑设计的结果。其中, 物资运输技术如重型运载火箭^[16]、月球着陆器^[17]等决定建筑尺寸与建造方式; 结构选型与围护结构材料开发等关键技术^[18]、月壤混凝土加工技术^[19]、原位建造技术^[20-22]等影响建筑建造方式与性能; 能源中的光伏表皮供能技术^[23]、热控制技术^[24]、月壤温差发电技术^[25]、氦3核聚变发电^[13]以及清洁能源转化储能技

术^[26]等影响建筑从建造到运维的能量来源, 进而影响建筑与科研站其他分系统之间的空间与信息关系; 建筑生命保障系统中的物质流循环调控技术^[27]、人体健康监控技术等影响建筑功能的确定及其组织, 以及内部环境的适人性设计^[28]。

3 驻人月球科研站建筑设计系统工程实施方法

3.1 总体目标

驻人月球科研站建筑设计具有安全、可持续与智能等总体目标(图3)。

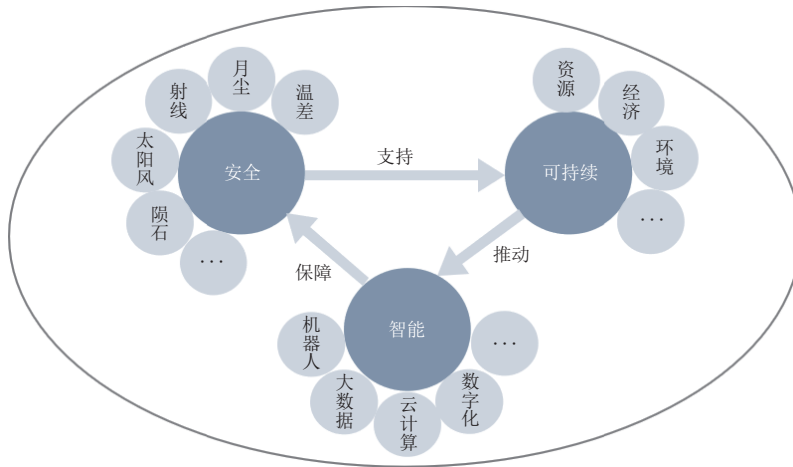


图3 驻人月球科研站建筑设计总体目标

Fig. 3 General objectives of architectural design of manned lunar research station

1) 安全

驻人月球科研站建筑设计的首要目标是确保科研站人员的安全。月球环境对地球生命的生存极为不利, 陨石、太阳风和银河宇宙射线、月尘、极端温度都可能给人类生命造成威胁^[29]。驻人月球科研站建筑设计需要对月表极端环境采取应对措施, 保障人员安全。同时应具备一定的灵活性和冗余性, 避免因某个舱段出现故障而影响到其它舱段的安全, 要确保每个舱段进入安全区域的路径尽可能短且途径尽可能多^[30]。

2) 可持续

由于建设月球科研站是一项耗资巨大的工程, 其设计达到资源、经济、环境等维度上的可持续十分必要。在建造和维护过程中尽可能利用月球原位资源, 能够减少对地球资源的依赖, 节省高昂的运输费用, 有利于推动月球探索的可持续发展。从更远的角度看, 随着地球资源逐渐枯竭, 开发月球资源将不可避免, 研发原位资源利用技术, 也有利于地球环境的保护和人类社会的可持续发展^[1]。

3) 智能

由于月球环境极端危险, 大量人工干预的施工方式并不适用, 因此月球科研站的建造过程需全部自主或半自主建造^[1], 人机协同的遥操作建造技术是满足智能建造目标的基础。此外, 运维过程需借助大数据、云计算、数字孪生等先进技术, 在信息世界构建与物理世界对应的数字模型, 实现虚拟与现实的动态交互, 反复优化设计和建造过程, 实现建筑全生命周期的数字化、网络化和智能化。

3.2 应用思想

驻人月球科研站建筑设计系统工程应用思想包括流程一体化、模型可视化、设计模块化(图4)。

1) 流程一体化

驻人月球科研站建筑设计采用系统工程的方法和手段, 以需求分析、系统定义、系统设计、功能分解、产品实现、系统集成、验证和确认、在月建造与运维等一系列完整流程逐步推进。同时, 按照系统、分系统、单机和部组件的产品结构, 从上至下逐级传递、分解、补充和定义, 从下至上逐级实施、反馈、

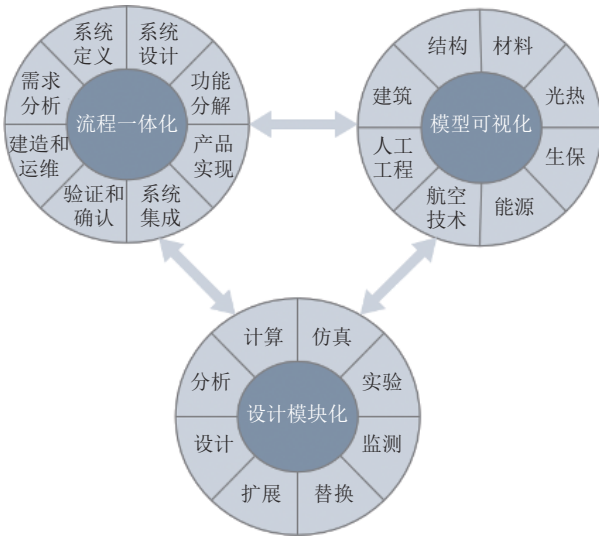


图 4 驻人月球科研站建筑设计应用思想

Fig. 4 Application of architectural design ideas for manned lunar research station

确认和综合^[3]。

2) 模型可视化

采用模型可视化的管理方式对项目进行计划和控制, 协调多专业交叉合作, 涵盖航天、建筑、结构、材料、生保、能源、人因工程等专业领域, 提升对项目周期、费效和质量的控制。同时系统管理项目中的要素, 如人员、物料、设备、知识、信息、过程等, 从而实现信息和物理两个维度的联动。

3) 设计模块化

为了实现驻人月球科研站的灵活性和可扩展性, 应对其进行模块化设计和管理。不仅有利于驻人月球科研站监测和替换故障舱段, 同时更好地与后期扩展舱段衔接配合。在研制期间, 除了需要进行大量模拟仿真, 也需对各模块投产样品进行实验验证和确认。

3.3 应用优势

1) 高效

基于各类模拟仿真工具, 集合各领域知识, 对建筑功能、性能、质量、进度和造价等进行综合权衡, 为驻人月球科研站建筑设计系统工程高效决策提供数据支持。

2) 准确

从多学科视角和多实施阶段建立高保真度建筑信息模型, 并与现实场景联动, 保障驻人月球科研站建筑实体的特征、性能、全生命周期过程与在地验证阶段基本一致。

3) 整合

根据系统级、分系统级、单机级、部件级级的不同建筑信息生成模型, 通过分解与集成保持信息共享一致, 便于不同专业人员的协同合作。

3.4 应用框架

驻人月球科研站建筑设计系统工程的应用框架由应用层、模型层、数据层构成 (图5)。

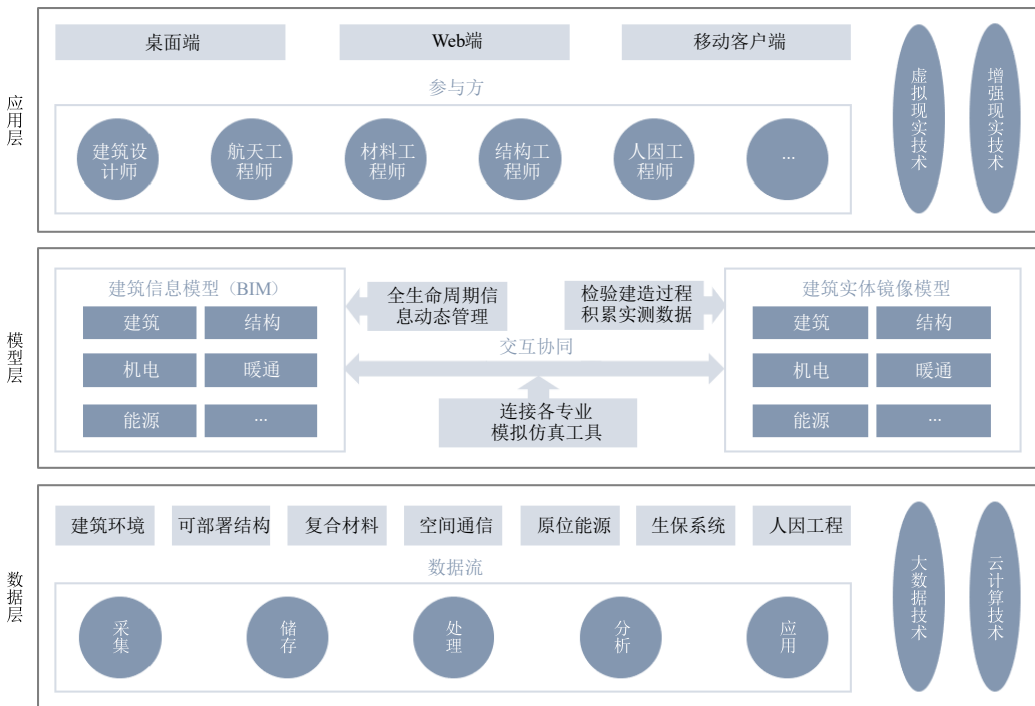


图 5 驻人月球科研站建筑设计系统工程的应用框架

Fig. 5 Application framework of architectural design system for manned lunar research station

1) 应用层

建筑设计师、结构工程师、机电工程师、暖通工程师、项目管理人员、生产与测试人员等驻人月球科研站建筑设计人员通过应用层提供的各业务操作界面来完成各自任务。充分考虑参与人员的使用场景与操作需求, 提供桌面应用、Web应用和移动类应用的端口^[31]。在需要时, 可采用虚拟现实 (VR) 或增强现实 (AR) 技术, 模拟参与人员与虚拟建筑的交互^[32]。

2) 模型层

包括信息世界中设计开发所生成的定义模型和物理世界中实物生成的镜像。建筑信息模型 (BIM) 是建筑信息数字化表达的关键技术, 可集合建筑、结构、机电、暖通、材料、能源等多学科信息, 实现驻人月球科研站全生命周期信息的动态管理。同时, 建筑信息模型可连接各专业的模拟仿真工具, 打破各学科领域模型的链路, 实现交互协同^[33]。此外, 建造建筑实体镜像模型是驻人月球科研站研究的必要环节, 在实验环境下检验建造过程的合理性, 积累实测数

据, 为在月建造积累经验。

3) 数据层

包括建筑信息模型和建筑实体镜像模型的有关数据。借助大数据和云计算技术, 采集、存储、处理与分析驻人月球科研站建筑、结构、材料、环境等维度的数据, 从而实现智能决策。

4 驻人月球科研站建筑设计系统工程三维结构模型

驻人月球科研站建筑设计的全过程包含着多专业技术人员的协作配合, 也包含着全生命周期的系统复杂性与动态性, 霍尔的系统工程三维结构为其提供了系统展示各项工作内容的立体结构模型。对于驻人月球科研站建筑设计而言, 总体三维结构如图6所示, 其时间维是从设计初始到结束按照时间顺序排列的任务流程; 逻辑维是在每一阶段内为进行各项决策而遵循的思维程序; 知识维是在各项任务中应用的科学知识。

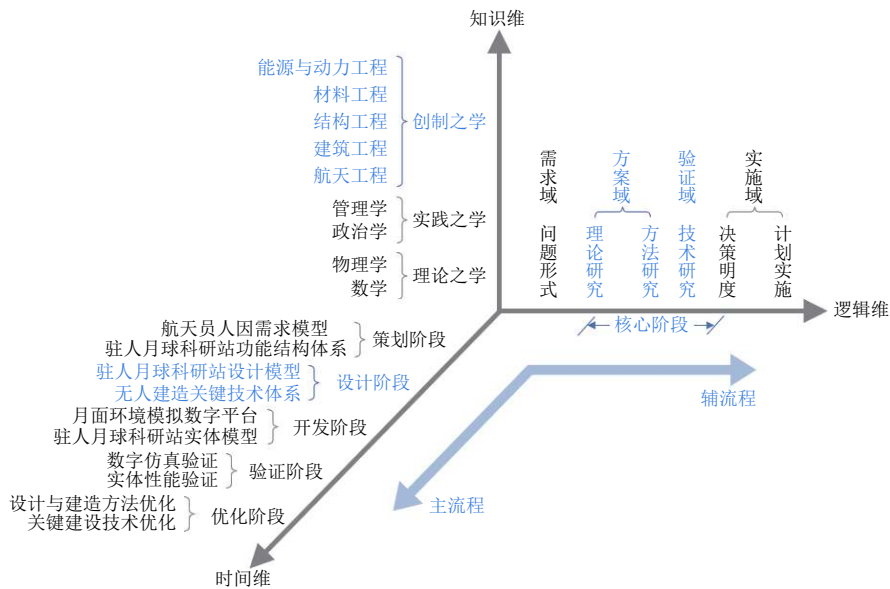


图 6 驻人月球科研站建筑设计系统工程三维结构模型

Fig. 6 3D structural model of architectural design system of manned lunar research station

4.1 时间维

由于驻人月球科研站涉及多层次的约束条件与多专业的技术支撑, 其建筑设计是一个广义的设计过程, 不仅指狭义上的建筑方案设计, 还包含着前期的需求明确与建筑策划, 以及后期的技术验证与方法优化。总体而言, 为形成清晰高效的设计流程指导, 可以利用V字模型将驻人月球科研站建筑设计过程划分为5个阶段, 包括策划阶段、设计阶段、开发阶段、验

证阶段、优化阶段 (图7)。每一阶段内的任务仍可以继续细分, 其间的关系有串行、并行、耦合3种, 因此, 应在设计开始前对所有工序尽可能做出具体安排, 提前预测问题并留出动态调整的空间。

在建筑方案策划阶段, 需要以使用需求、宇航员人数、驻月天数以及驻月目标为依据, 以近月空间环境、月面环境以及地月距离等相关资料与数据为基础, 把驻人月球空间站建筑设计的规划、设计、施工

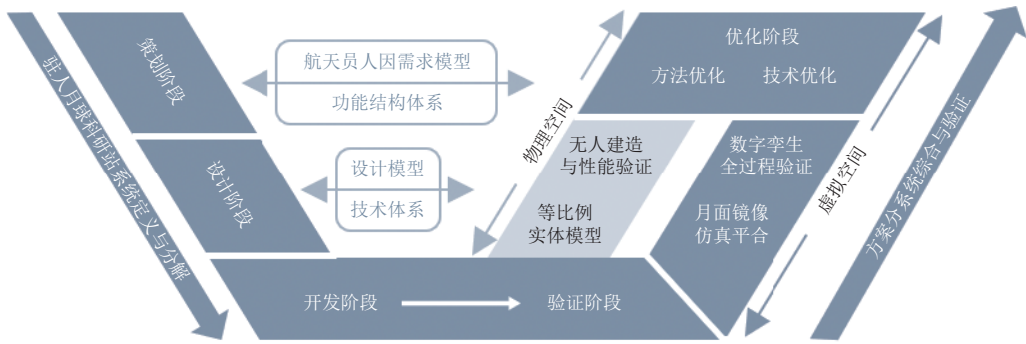


图7 驻人月球科研站建筑设计流程V字模型

Fig. 7 V model of architectural design process of the manned lunar research station

图结合起来,进行可行性分析,从而制定综合了安全、可持续、智能等建设目标,并将总体目标逐层细化,最后集成科研舱、生活舱、生物舱等各项功能。进行建筑方案设计时,工程师需要在策划的基础上形成物化方案,BIM可以将各种信息整合于一个三维模型信息数据库中,这一阶段建立的驻人月球科研站建筑信息模型不仅包含了建筑工程的各项构件几何信息、专业属性等内容,还为后续阶段的多方协同工作过程中提供了高度集成的共享平台。为优化信息与空间建设的参数关联,需要进行整体方案与关键技术的验证,因此,后续的开发、验证、优化需要基于设计阶段的BIM模型进行仿真分析以及实体模型制造。一方面,搭建月面原位环境镜像平台,辅以系统仿真、动态模拟等技术手段,进行初步的力学与热力学性能模拟,以及建造全流程的可视化验证,从而调整设计方案。另一方面,建立局部以及全尺度的实体模型。通过实验平台实现月球环境要素的在地模拟,针对真空、微重力环境下的月壤混凝土与砌块制造、机械臂3D打印与砌块建造、刚性与柔性折展结构的展开等进行材料制备技术与建造技术的验证实验,从而分析建造方法的可行性。接下来进行围护结构的力学与热力学性能测试,从而可以优化构造的相关参数。在局部大样优化测试后,进行全过程整体建筑的建造与运行。完成在地远程操作的无人建造后,验证整体安全性与可靠性,并派航天员进行在地测试,对生理、心理、社会健康进行封闭式模拟并优化内部环境。最终,以全方位模拟在月运行状态,建立数字孪生物理-信息交互模型保证未来在月的顺利建设。

4.2 逻辑维

逻辑维是进行时间维中各阶段工作的程序和步骤,在每一任务阶段遇到的问题都应有明确的解决问题从而做出决策的逻辑,具有逻辑性的框架能够为项目的推进提供思路,同时,可以根据过程的动态性,

不断完善整体的三维结构。结合系统工程与建筑学研究逻辑,驻人月球科研站建筑设计的逻辑维由问题形成、理论研究、方法研究、技术研究、决策明确、计划实施6个逻辑过程构成。

在逻辑维中,除前期的问题形成与后期的决策明确、计划实施以外,中间的理论、方法、技术3个层次的研究是解决问题的核心步骤。理论研究重要的是通过厘析影响要素、影响机制等问题形成后续操作的指导基础。例如在策划阶段,通过解析包括月球位置资源、环境资源、物质资源在内的不同层次的约束条件,以及既有地月关系下各国探月工程的目标、现状、趋势,以建筑策划工作流程为支点,进行地月建设差异的对比分析。从适用原则、应用原理等方面深入分析复杂适应系统、环境适应、智能建造等相关理论,确定设计目标体系集,并解析人、建筑、环境间的互构协同模式,从功能关系、形态关系、位置关系等层面研究人-建-环体系内的互馈关系,构建信息集成框架,解析各要素间的联结基础及互动内涵,建立耦合关系模型。方法研究中旨在提供计划实施的具体操作。其中,在设计阶段,为得到设计方案,需在理论研究的基础上,对每一子系统均提出具体的设计策略与方法。例如,对于围护结构系统而言,综合利用涌现生成、性能模拟、评价优化等技术手段,确定全方位设计导向,包括多层耦合、智能应变等。技术研究旨在分析各阶段的实施方法是否合理有效,比如在设计阶段,需要开发利用多层表皮的材料技术、可部署结构技术等;在验证阶段,虚拟模型的建立需利用数字孪生、仿真模拟等计算机技术,同时,实体模型的建立也需利用机械臂建造路径生成、双机械臂联动协同操作等建造技术。

4.3 知识维

驻人月球科研站作为拥有众多子系统的复杂系统,在知识维层面,为了实现时间维中不同阶段的有

序推进,实现逻辑维中不同程序的研究决策,其设计过程需要多专业、多学科的协同配合^[34]。亚里士多德从人类的实践活动出发把知识分为理论之学(theoria)、实践之学(praxis)和创制之学(poiesis)三大类^[35]。

其中,理论之学是纯粹理性的对不变的事物的认识,在驻人月球科研站建筑设计过程中,包括数学、物理学等。在前期策划阶段,空间科学为建筑设计提供了月球这一极端复杂环境的有关参数,从而影响建筑选型、围护结构设计、空间组织等问题。在后期验证与优化阶段,数学、物理学等知识为环境性能、结构性能的仿真与数字孪生提供了计算基础。实践之学是关于人类行动,即所做之事的认识,包括政治学、管理学等。探月工程的路线制定涉及政策支撑、法规制定的相关问题,因此驻人月球科研站的建筑设计会受政治、经济、法律等约束,从而影响空间尺寸、建筑材料、建造方式等问题。此外,驻人月球科研站建设是一项复杂的系统工程,需要航天总体设计以及系统工程的有关知识。创制之学是关于创作与生产,即所造之物的认识,在驻人月球科研站建筑设计过程中,包括航天工程、建筑工程、结构工程、材料工程、能源与动力工程等多个领域的工程技术。具体而言,在结构与材料层面需验证充气与机械折展等结构技术以及高性能材料的应用,智能建造中需验证空间环境中利用月壤等原位资源进行3D打印、机械臂砌筑等建造技术,在机电与能源层面需验证不同地形环境下的月面移动技术、建筑围护结构折展与应变技术以及多源供能技术,生命保障与后期运维的系统中需验证物质循环技术以及相关信息技术。

5 结 语

本文以建筑学视角对驻人月球科研站设计这一复杂系统工程开展研究,引入系统工程研究方法对这一复杂问题中的关键要素进行解构和系统梳理,以明晰其所含要素及其耦合关系。本文通过梳理既往研究,分析约束条件,建立实施方法,从而构建包含时间维、逻辑维、知识维的驻人月球科研站建筑设计系统工程三维结构模型,为未来驻人月球科研站建设提供新视角和新思路。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 欧阳自远:中国探月工程的科学目标[J]. 中国科学院院刊,2006(5):370-371.
OUYANG Z Y. Ouyang Ziyuan: the scientific goal of China's lunar exploration project[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012(5):370-371.
- [2] 吴伟仁,刘继忠,唐玉华,等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报(中英文),2019,6(5):405-416.
WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5):405-416.
- [3] 中国国家航天局,俄罗斯国家航天集团公司. 国际月球科研站合作伙伴指南(V1.0)[C]//国际月球科研站路线图全球网络论坛. 圣彼得堡:国际宇航联合会,2021.
China National Space Administration, Roscosmos. International lunar scientific research station partner guide (V1.0) [C]//Proceedings of International Lunar Scientific Research Station Roadmap Global Network Forum. Saint Petersburg: International Astronautical Federation, 2021.
- [4] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2005.
- [5] SHERWOOD B. Space architecture for Moon Village[J]. Acta Astronautica, 2017, 139:396-406.
- [6] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, et al. The Artemis program: an overview of NASA's activities to return humans to the moon[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2020: 1-10.
- [7] 汪应洛. 系统工程[M]. 第五版. 北京:机械工业出版社,2015.
- [8] SCHLAGER K J. Systems engineering-key to modern development[J]. IRE Transactions on Engineering Management, 1956(3):64-66.
- [9] BAO W M, WANG X W. Develop highly reliable and low-cost technology for access to space, embrace the new space economy era[J]. Aerospace China, 2019, 20(4):23-30.
- [10] 宋国梁. 2021年国外载人航天发展综述[J]. 国际太空, 2022(2):15-19.
SONG G L. An overview of human spaceflight developments abroad in 2021[J]. Space International, 2022(2):15-19.
- [11] 包为民,汪小卫. 地月空间探索与开发的思考[J]. 宇航学报, 2022, 43(6):705-712.
BAO W M, WANG X W. Some thoughts about cislunar exploration and exploitation[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(6):705-712.
- [12] 李扬,徐海玲. 美国地月空间战略的发展态势与分析[J]. 国际太空, 2022(9):50-55.
LI Y, XU H L. Development and analysis of the US Earth-Moon space strategy landscape[J]. Space International, 2022(9):50-55.
- [13] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等. 月球某些资源的开发利用前景[J]. 地球科学, 2002, 27(5):498-503.
OUYANG Z Y, ZOU Y L, LI C L, et al. Prospects for the development and utilization of certain resources on the Moon[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5):498-503.
- [14] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. Icarus, 2017, 282:47-55.
- [15] 肖龙,黄俊,赵佳伟,等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. 中国科学, 2018, 48(11):87-100.
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. The significance and preliminary ideas of lunar lava tube cave exploration[J]. Chinese Science, 2018, 48(11):86-99.
- [16] 牟宇,樊晨霄,何兆伟. 运载火箭新技术驱动构型优化规律研究[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2022(6):57-63.
MOU Y, FAN C X, HE Z W. Research on the law of launch vehicle configuration optimization driven by innovative technology[J]. Missile and Space Vehicles, 2022(6):57-63.
- [17] 贾山,周向华,陈金宝,等. 可移动月球着陆器系统设计与实验

- 证[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(1): 29-41.
- JIA S, ZHOU X H, CHEN J B, et al. System design and experimental verification of mobile lunar lander[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(1): 29-41.
- [18] 果琳丽, 李志杰, 齐玢, 等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(6): 1-10.
- GUO L L, LI Z J, QI B, et al. A comprehensive manned lunar base overall plan and construction planning idea[J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2014, 35(6): 1-10.
- [19] HU Z, SHI T, CEN M, et al. Research progress on lunar and Martian concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343: 128-117.
- [20] CESARETTI G, DINI E, DE K X, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 430-450.
- [21] KHOSHNEVIS B, YUAN X, ZAHIRI B, et al. Construction by Contour Crafting using sulfur concrete with planetary applications[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22(5): 848-856.
- [22] GOULAS A, HARRIS R A, FRIEL R J. Additive manufacturing of physical assets by using ceramic multicomponent extra-terrestrial materials[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 10: 36-42.
- [23] 范新宇, 吴松梅, 张飞宇, 等. 基于数字化的光伏建筑一体化设计方法研究[J]. *建筑学报*, 2019(S2): 44-47.
- FAN X Y, WU S M, ZHANG F Y, et al. Research on design method of building integrated photovoltaics based on digitalization[J]. *Architectural Journal*, 2019(S2): 44-47.
- [24] 文金远, 许安易, 李鹏, 等. 基于单相回路及热泵回路的月球居住舱热控系统对比分析[J]. *载人航天*, 2021, 27(5): 543-548+573.
- WEN J Y, XU A Y, LI P, XU X H. Analysis and comparison of thermal control system for lunar habitat based on single-phase fluid loop and heat pump loop[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, 27(5): 543-548+573.
- [25] 任德鹏, 李青, 任保国. 月球基地温差电源的应用研究[J]. *电源技术*, 2019, 43(5): 845-848.
- REN D P, LI Q, REN B G. Application research on thermoelectric power supply of lunar base[J]. *Power Technology*, 2019, 43(5): 845-848.
- [26] 刘建忠, 李雄耀, 朱凯, 等. 月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(6): 907-918.
- LIU J Z, LI X Y, ZHU K, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(6): 907-918.
- [27] 郭双生. 我国月球基地受控生态生保系统物质流调控分析研究[J]. *载人航天*, 2017, 23(5): 680-687.
- GUO S S. Analytic study on material flow regulation in CELSS of future Chinese lunar base[J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(5): 680-687.
- [28] 陈善广. 中国载人航天催生的新学科—航天医学工程学[J]. *中国科学基金*, 2010, 24(3): 135-140.
- CHEN S G. A new discipline arising from CHINA's manned space project—space medico-engineering[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2010, 24(3): 135-140.
- [29] 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.
- [30] 李志杰, 果琳丽, 梁鲁, 等. 有人月球基地构型及构建过程的设想[J]. *航天器工程*, 2015, 24(5): 23-30.
- LI Z J, GUO L L, LIANG L, et al. Conception of the configuration and construction process of a manned lunar base[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 23-30.
- [31] 王建军, 向永清, 赵宁. 基于精益协同思想的航天器系统工程研制管理平台[J]. *系统工程与电子技术*. 2018, 40(6): 1310-1317.
- WANG J J, XIANG Y Q, ZHAO N. Spacecraft system engineering development and management platform based on lean collaborative thought[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(6): 1310-1317.
- [32] TAO F, SUI F Y, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3935-3953.
- [33] 张庆君, 刘杰. 航天器系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 515-523.
- [34] 李书顺, 梅洪元, 刘鹏跃, 等. 宇航建筑学教育体系研析及其启示[J]. *新建筑*, 2022(5): 130-134.
- LI S Q, MEI H Y, LIU P Y, et al. Study on education system of space architecture and its enlightenment[J]. *New Architecture*, 2022(5): 130-134.
- [35] SMEETON J. From Aristotle to Arendt: a phenomenological exploration of forms of knowledge and practice in the context of child protection social work in the UK[J]. *Qualitative Social Work*, 2017, 16(1): 14-28.
- 作者简介:
潘文特(1988—), 男, 助理教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 极端环境建筑、地外建筑。
 通信地址: 哈尔滨市南岗区黄河路73号, 哈工大建筑设计院323室 (150001)
 E-mail: panwente@hit.edu.cn

Research on Architectural Design System Engineering of Manned Lunar Research Station

PAN Wente, LI Shuqi, JIANG Jiayang, WANG Jixian

(School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The manned lunar research station is an important basic facility for achieving medium- and long-term deep lunar exploration, and at the same time is a system project with multiple complex challenges. In this paper, from an architectural perspective, design constraints at macro, meso, and micro levels were analyzed first, and an implementation method for the architectural design of the manned lunar research station was provided using systems engineering, which consisted of four dimensions: the overall goal is “safety, sustainability, and intelligence”; the application ideas included process integration, model visualization, and design modularity; the application advantages are high efficiency, accuracy, and integration; the application framework was divided into application layer, model layer, and data layer. Finally, a three-dimensional structural model of architectural design system engineering was constructed, which included time dimension, logic dimension and knowledge dimension, and comprehensively embodied the structure of each task and related scientific knowledge in each stage, aiming to provide new perspectives and new ideas for the construction of manned lunar research station.

Keywords: manned lunar research station; lunar architecture design; system engineering

Highlights:

- The development of manned lunar research station is systematically sorted out.
- The implementation method of design system is established at four levels: overall goal, application idea, application advantage, and application framework.
- A three-dimensional structural model of design system is constructed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]