多约束驱动下驻人月球科研站建筑设计目标体系

李书颀[1]，梅洪元[1,2]

（1. 哈尔滨工业大学 建筑与设计学院，哈尔滨 150001；2. 哈尔滨工业大学 复杂环境建筑研究院，哈尔滨 150001）

摘　要：针对驻人月球科研站建筑设计面临极端环境、匮乏资源与高负荷人机协同的多重约束，当前概念设计缺乏系统性评价框架的问题，整合系统工程学方法论，利用功能分析系统技术解构了科研站生存–利用–活动的功能架构；进而引入功能–原理–行为–结构（Function Principle Behaviour Structure，FPBS）框架，推演了从驻留需求到物理载体的映射机制；最终构建了以安全、高效、可居为核心的多维建筑设计目标体系与评价矩阵，并提出基于耦合协调度的量化评估路径。研究成果旨在为月球人居环境的方案比选与设计优化提供系统性的评价框架参考。

关键词：月球科研站；建筑设计；系统工程；功能分析系统技术；功能–原理–行为–结构

中图分类号：TU-024　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-9287(2026)04-0355-11

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20260004

引用格式：李书颀，梅洪元. 多约束驱动下驻人月球科研站建筑设计目标体系[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（4）：355-365.

Reference format: Li S Q，Mei H Y. Architectural design objective system for manned lunar research station driven by multiple constraints[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（4）：355-365.

引　言

随着探月工程“绕”“落”“回”三期任务的圆满收官[1-2]，月球探测将正式迈入“有人参与”的新阶段，国际月球科研站（International Lunar Research Station，ILRS）的建设成为这一时期的核心任务[3]。作为人类在月球表面开展长期科学研究、资源开发与技术验证的综合性实验基地，月球科研站不仅是地外生存的物理屏障，更是支持高强度科研任务的复杂人机环境系统。

月球探测遵循从“无人值守”向“有人参与”演进的规律。在无人探测工况下，掩蔽体的核心目标是保障装备在强辐射与极端温差下可自主运行；而进入有人探测工况后，系统需求发生跃升，既包含支持基础作业的开放型人机协作空间，也包含维持生命保障的高安全等级封闭型空间。随着运载与建造技术的突破，其功能由单一设备防护向复杂人类生存支撑更迭。

驻人月球科研站的建筑系统发展呈现出递进态势，研究路线如图1所示。初期科考站阶段，以短期驻人、长期自动运行为特征，侧重于基础科学探索与生存验证；中期前哨点阶段，建筑规模与功能扩展，旨在支持原位资源开发利用、再生生保系统测试及地月运输中转；远期栖息地阶段，建筑演变为高度自给自足的长期生活聚落，具备闭环的资源内循环能力，并有望成为向火星等深空目的地拓展的战略发射枢纽。从生存到定居的阶段性演进，决定了月球建筑在不同时期面临着动态变化的约束条件与设计优先级。

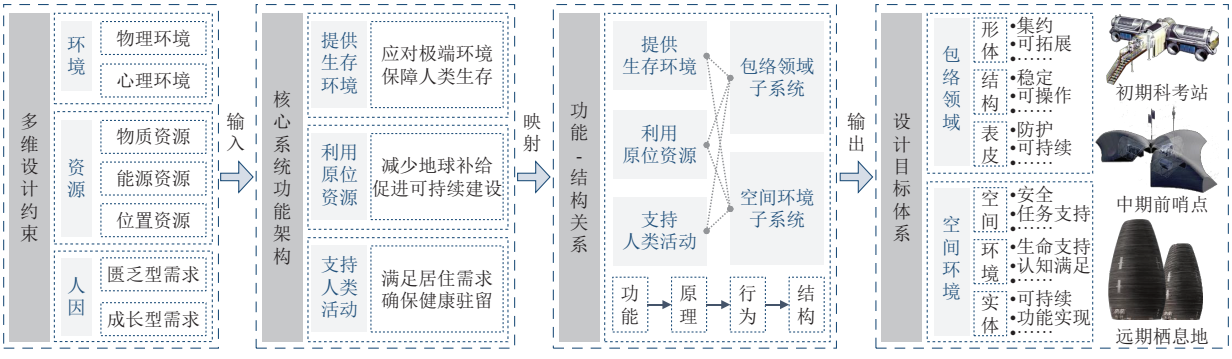


图 1　研究技术路线图

Fig. 1　Research technology roadmap

收稿日期：2026-01-08　修回日期：2026-04-22

基金项目：国家自然科学基金（52238002），国家资助博士后研究人员计划（GZB20260413）

本文驻人月球科研站指上述定义中的科考站与前哨点阶段，其设计面临真空、强辐射、微流星体撞击等极端环境约束，受到严苛的运载能力与稀缺资源约束限制，同时需满足航天员在长期封闭隔离环境下的人因约束需求。这些高度耦合的多元约束使得科研站建筑呈现出设计边界严苛、系统组成复杂、验证迭代困难的典型复杂系统特征。在此，建筑是指为航天员提供维持生理稳态、保障心理健康及支持高效科研任务的物理载体，在结构上划分为外层包络领域与内层空间环境两大核心子系统。

传统的建筑设计方法论往往侧重于形态与功能的直接映射，难以有效应对月球极端环境下多目标权衡难题。面对这一挑战，必须超越单一学科的局限，将其视为一个由环境、资源、人因要素共同驱动的有机整体。不同于美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）、欧洲航天局（European Space Agency，ESA）侧重于具体构型建造概念方案的提出或生命保障系统的研究，本文旨在构建多约束驱动下月球科研站建筑设计的目标体系，利用系统工程方法论整合构建系统性的评价体系框架，将月球设计约束转化为可定量测度的多维目标矩阵，为未来科研站建筑方案决策与性能评估提供框架支撑与方法论指导。

1 客观约束条件界定

月球科研站建设受从宏观到微观的政策、技术及环境的多层次制约。在探讨其设计的基本约束时，需区分不同类型制约因素对设计决策的影响程度与作用机制。本研究选择重点分析环境、资源与人因三类核心约束，因其具有高度的客观性与稳定性，是月球科研站存在与运行的基础性前提。相比之下，政治经济因素与技术发展水平虽同样重要，但其本质具有较强的动态性与主观性。因此，优先围绕不可更改的客观约束展开分析，有助于形成更具普适性与前瞻性的设计框架（图2）。

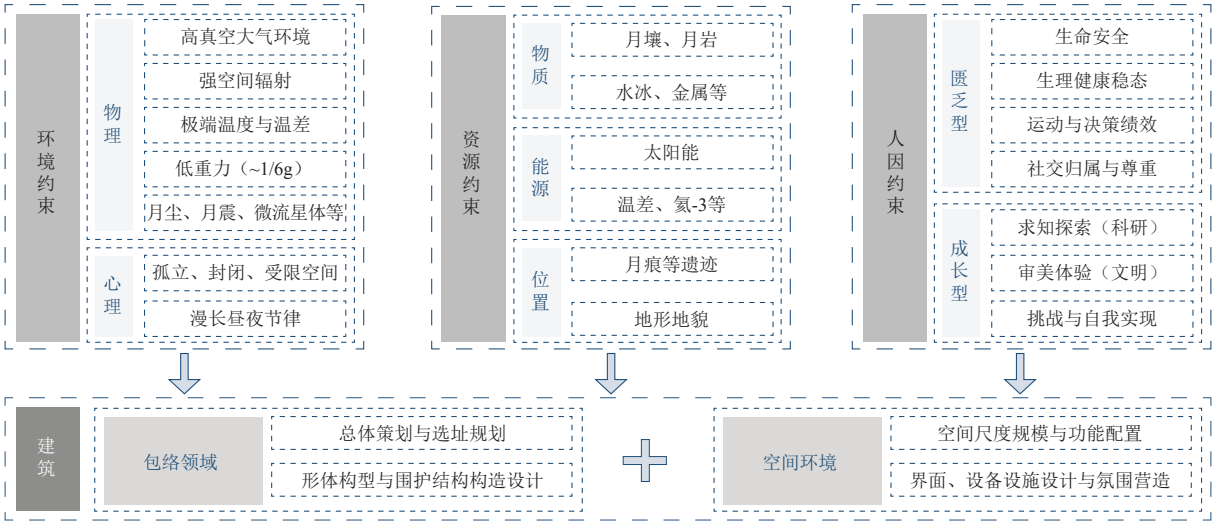


图 2 驻人月球科研站建筑设计约束条件

Fig. 2 Constraints in manned lunar research station architectural design

1.1 物理与心理层面的环境约束

月球环境不仅包含客观物理条件，更涵盖主观心理感知，二者共同构成“双重约束”。

物理环境呈现为高真空、强辐射、微流星体、1/6微重力及极端温差，且伴有高侵蚀性月尘与月震威胁[4]。这要求建筑必须构建严苛的物理屏障，重点解决辐射屏蔽、热稳定控制、气密性维持及结构抗冲击等生存性难题。

心理环境则源于隔离、受限、极端（Isolation Restraints Extreme，ICE）环境的驻留特质，长期封闭空间易诱发社会隔绝、昼夜节律紊乱（28天周期）及高压焦虑。建筑设计需超越单纯的生存庇护，通过模拟地球自然光律、引入生物亲和要素及优化公私空间布局，构建具备“疗愈性”的深空人居环境，以支撑航天员的心理韧性与科研工作[5]。

1.2 物质、能源、位置的资源约束

基于原位资源利用（In-Situ Resource Utilization，ISRU）的月球科研站是降低对地依赖、实现可持续驻留的关键，其资源体系主要涵盖物质、能源与位置三个维度，共同约束并导向建筑规划选址、结构选型与

建造演化[6]。

物质资源的核心功能用途是作为实体质料用于建筑材料转化与生命保障，以月壤与水冰为核心。月壤储量丰富，不仅可通过3D打印与烧结转化为建筑基材，还可提取金属、硅及氧气；极区永久阴影区的水冰则是生命保障系统（Bioregenerative Life Support System，BLSS）[7]与燃料制备的源头，直接决定了建筑的选址逻辑与材料工艺。

能源资源是转化为电能、热能等以驱动系统进行运行的。首先以太阳能为主导，极区的高光照率区域是理想的能量获取点。此外，可利用月表剧烈温差进行热电转换，或开发氦–3及小型核能作为补充，这要求建筑设计实现能源捕获、转化与储存的一体化集成。

位置资源涉及地形地貌与特殊环境，主要提供独特的空间场域。低重力与真空环境利于大跨度结构建造与精密实验；熔岩管道与月坑提供天然辐射屏蔽；月海与高地的地形差异影响工程难度；探月历史遗迹则具有独特的文化和旅游价值[8]。

1.3　匮乏型与成长型的人因约束

人因是地外建筑设计的核心，旨在通过“人–建–环”的平衡实现可居住性。月球极端环境直接导致人体出现骨丢失、空间定向混乱、睡眠节律障碍、社会隔绝感等问题[9]。

基于马斯洛需求层次，月球人因需求可划分为两类。基础生存保障的匮乏型需求涵盖生理稳态（生命支持、热/辐射防护）与心理安全。设计需构建完善的物化环境以保障生命，并通过分级空间布局（公共/私密）与虚拟现实技术，满足受限环境下的社交互动与情感归属需求[10]。潜能激发的成长型需求涉及认知探索与自我实现。建筑需提供科研实验、航天员舱外探索（Extra Vehicular Activity，EVA）及精神反思空间，支持航天员在极端环境下实现科学突破与自我超越。同时，通过融合地球文化记忆与宇宙美学的空间形态，回应人类深空探索的审美与精神追求。

2　核心系统功能架构

2.1　功能分析系统技术应用路径

鉴于月球建筑面临的运载质量、体积受限及在地维修困难等多重制约，设计需遵循“以精简结构满足系统功能”的原则。因此，在方案概念设计前期，采用功能分析系统技术（Function Analysis System Technique，FAST）构建系统的顶层逻辑架构至关重要。该方法旨在将设计目标与具体物理解决方案解耦，通过抽象化的功能定义，明晰系统必须做什么、应该做什么、为什么这样做以及如何这样做[11]。

FAST的应用路径首先始于功能的标准化定义，即采用“动词 + 名词”的形式，如“屏蔽辐射”“维持气压”，精准描述系统目的。在此基础上，区分“基本功能”与“次要功能”，前者是系统存在的核心，不可删除；后者是支持核心功能的附加项，具有优化空间。随后，构建双轴驱动的逻辑图解。横向水平轴为功能轴，遵循“如何（How）—为何（Why）”的推演机制，从左至右展示功能“如何”实现，代表具体化过程；从右至左阐释“为何”需要该功能，代表抽象化过程。同时兼顾功能执行的时间与流程顺序，以纵向垂直轴为细化层级，将复杂功能逐级分解为子功能，以呈现系统的分层与复杂度。

2.2　约束条件下的总体系统功能

在FAST逻辑谱系中，确立了以提供生存环境为基础、利用原位资源为支撑、支持人类活动为导向的三大核心功能支柱（图3）。

环境约束维度的核心功能是提供生存环境，旨在构建抵御地外极端物理条件的生命防线。具体而言，针对强辐射与微流星体威胁，需实现高效的屏蔽与物理防护；针对昼夜巨大的极端温差，需建立主动与被动结合的热控制系统；针对真空环境，需维持舱内气压恒定与氧气分压适宜；针对月尘侵蚀与月震风险，需集成防尘气密设计与结构减震功能。这些功能模块共同作用，确保物理实体的完整性与内部环境的稳定性。

资源约束维度的核心功能是利用原位资源，旨在降低地月运输依赖，促进基地可持续建设。功能链涵盖能源与物质的双重利用：一方面，通过部署太阳能阵列、开发温差发电或小型核能，结合高效储能与分配管理，确保持续能源供给；另一方面，利用月壤烧结或3D打印制备建材，提取极区水冰与矿物资源，并开发熔岩管道等位置资源，实现从建筑建造到生命保障的物资在地化循环。

人因约束维度的核心功能是支持人类活动，旨在保障ICE环境下，乘员身心健康与任务效能。除建立固–液–气闭环生保系统满足基础生理代谢外，重点关注低重力环境下的空间工效设计，通过营造舒适的温湿度、光环境及合理的公私分区，缓解心理压力。同时，系统需深度支持核心科研任务，为舱内实验、EVA及数据传输提供功能接口与空间载体，实现从生存需求向自我实现需求的跨越。

在初步构建功能架构后，需进行严格的完整性与

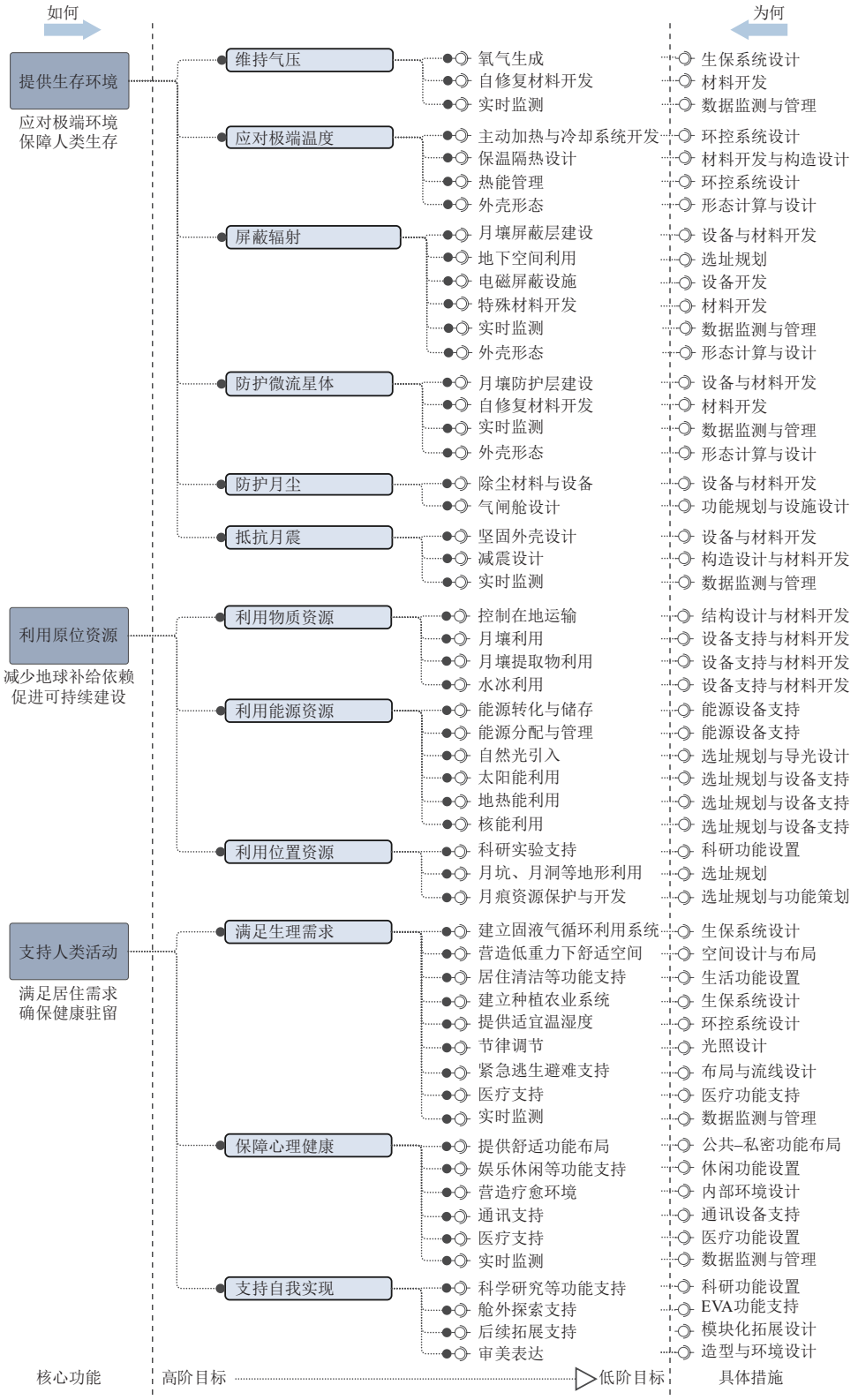


图 3 驻人月球科研站建筑FAST图

Fig. 3 FAST map of manned lunar research station architecture

协调性评估。一方面，检查功能链的闭环逻辑，例如确认辐射防护措施不干扰热排散系统的运行；另一方面，评估系统的可扩展性与长期运维需求。这一结构化的功能生成机制，指导后续概念设计中将抽象功能转化为具体模块，并支持各模块的独立开发与集成测试。通过仿真模拟与原型验证，设计团队可识别出在

系统集成后未满足极端工况下所需目标性能的缺陷，并进行针对性参数修正与方案优化。而后在运营阶段基于数据反馈进行持续迭代。这种从基础生存到复杂科研支持的系统演进路径，不仅满足了当前的建设目标，更为月球科研站未来的功能拓展提供了清晰的理论框架与技术接口。

3　功能-结构映射机制推演

在确立月球科研站的总体功能架构后，需引入功能–原理–行为–结构（Function Principle Behavior，Structure，FPBS）框架，以实现从“设计意图”到“物理实体”的科学映射。与传统设计模型相比，FPBS不仅关注功能的实现，更聚焦于系统在极端环境下的科学原理与动态行为，能够有效应对月球昼夜温差、强辐射等动态约束，确保设计方案的可靠性与前瞻性。在科研站设计语境下，FPBS各要素的内涵如下。

功能（Function）：指设计意图或系统必须实现的基本任务[12]，即前序FAST分析确定的“提供生存环境、利用原位资源、支持科研活动”三大核心目标。

原理（Principle）：指实现功能所依赖的科学依据与技术路径，涵盖保障结构稳定性的安全性原理、维持声光热环境的舒适性原理，以及空间规划的功能性原理，共同指导建筑师在设计过程中做出平衡与科学的决策。

行为（Behavior）：描述系统在特定月球环境条件下的响应与表现[13]，如，结构在极端温差下的热胀冷缩、材料在辐射环境下的老化特性等，可以帮助预测建筑在各种极端环境下的表现[14]。

结构（Structure）： 是承载功能的系统组件及其拓扑关系，既包含墙体、设备等物质实体，也涵盖空间与策划等影响系统效能的非物质要素。

FPBS的应用遵循“功能映射原理–原理决定行为–行为推演结构”的逻辑。设计过程首先依据核心功能确定对应的技术原理，继而基于原理分析系统在月球环境下的行为特征；最终根据行为需求推导出具体的结构要素（见表1）。这一过程具有显著的动态演化特征，通过不断完善功能与结构之间的映射关系，形成能协同工作、适应极端环境的月球科研站系统方案（图4）。

3.1　提供生存环境

在月球极端环境下，建筑的首要任务是构建一个能抵御外部威胁并维持内部稳态的空间包络系统。其设计核心在于将环境防护的科学原理转化为具体的建筑结构与材料响应。

表 1　驻人月球科研站建筑功能–原理–行为–结构关系

Table 1　Functional-principle-behavioral-structural relationship of manned lunar research station architecture

层次		功能	原理	行为	结构
环境	E1	维持气压	围护结构气密性	压力调节	材料构造 连接节点
	E2	应对极端温度	热控制	热环境	总体策划 材料构造 复合设备/设施
	E2	屏蔽辐射	屏蔽与防护	辐射防护	总体策划 结构构件 材料构造 复合设备/设施
	E4	防护微流星体	屏蔽与防护 结构稳定性	结构	总体策划 结构构件 形态构型
	E5	防护月尘	创新材料技术 屏蔽与防护	结构	材料构造 复合设备/设施 连接节点
	E6	抵抗月震	屏蔽与防护 结构稳定性	结构	形态构型 结构构件 材料构造
资源	R1	利用物质资源	化学还原与提取技术 3D打印等建造技术	资源提取效率	总体策划 结构构件 材料构造 内部设备/设施
	R2	利用能源资源	能源获取与储存技术 能源分配与管理技术	能源系统响应	总体策划 复合设备/设施 内部设备/设施
	R3	利用位置资源	屏蔽与防护 设计策划功能性	辐射防护行为 空间使用与适应	总体策划 功能需求
人因	H1	满足生理需求	设计策划功能性 人因工效	资源循环利用 空间使用与适应	物理环境 内部设备/设施 尺度规模 功能需求 组织布局
	H2	保障心理健康	设计策划功能性 美观性 人因工效	环境认知行为 空间使用与适应	尺度规模 感知环境 界面 内部设备/设施 功能需求 组织布局
	H3	支持自我实现	设计策划功能性 美观性	空间使用与适应	功能需求 组合方式 形态构型 感知环境

功能—结构矩阵		包络领域子系统			空间环境子系统		
		形体	结构	表皮	空间	环境	实体
提供生存环境	屏蔽辐射	×	×	×			
	应对极端温度		×	×			×
	防护微流星体		×	×			
	维持气压			×			×
	防护月尘			×	×		
	抵抗月震	×	×	×			×
利用原位资源	利用物质资源		×	×			×
	利用能源资源	×		×			×
	利用位置资源	×			×		
支持人类活动	满足生理需求			×	×	×	×
	保障心理健康				×	×	×
	支持自我实现	×			×		×

图 4　驻人月球科研站建筑功能–结构矩阵聚类

Fig. 4　Manned lunar research station architecture function-structure matrix

空间包络系统原理涉及多学科的交叉应用。首先是围护结构气密性原理，需通过高精度的密封设计维持舱内气压恒定。其次是热控制原理与屏蔽与防护原理，前者要求结合多层隔热材料（Multi Layer Isolation，MLI）与主动热排散系统以应对高达300 ℃的昼夜温差，后者则通过引入高密度材料层、覆土掩蔽或利用天然熔岩管，阻断宇宙辐射与微流星体的物理侵袭，并结合电动防尘技术应对月尘粘附。此外，结构稳定性原理指导设计能够适应低重力环境并抵抗月震冲击的刚性或柔性复合结构。

行为为建筑在动态环境下的响应特征，包括材料在长期辐射下的性能衰减率、结构体在极端热循环中的热胀冷缩幅度，以及气密系统在内外压差波动下的压力调节响应。结构行为还需涵盖在突发月震或撞击事件中的应力分布与能量吸收表现。

结构是上述原理与行为的物质载体，主要由空间包络领域组件构成。在总体策划层面，选址需优先考虑天然地形屏障。在建造层面，采用预制刚性模块、可折叠展开结构或原位3D打印的月壤壳体作为物理屏障。在细部构造上，外部表皮集成反射涂层与散热设施，连接节点采用多重密封技术，并复合静电屏蔽设施以形成完整的防护体系。

3.2 利用原位资源

原位资源利用是降低地月运输成本、实现科研站可持续运行的关键。该系统旨在通过物理化学手段，将月球本地的物质、能源与位置资源转化为建筑建造与运行的基础支撑。

原理主要涵盖三大技术路径：化学还原与提取技术利用热还原或电解法，从月壤中制备氧气与金属，并从极区永久阴影区提取水冰；建造技术基于增材制造原理，利用月壤烧结或聚合物粘合进行3D打印，实现结构构件的本地化生产；能源获取与管理技术则依赖光电转换与热电效应，通过太阳能阵列与温差发电系统建立能源供给网络。

行为聚焦于资源转化的效率与稳定性：包括在不同光照与温度条件下，月壤挖掘与水冰提取的产出率；能源系统在长月夜期间的储能响应与调峰能力；及其通过原位建造带动的空间拓展行为，即利用本地资源逐步扩大建筑规模的过程。

结构涉及外部资源开采设施与内部能源管理组件的集成。总体策划需依据氦–3、水冰及光照分布进行选址。设备设施包括月壤挖掘机、化学反应釜等提取装置，以及太阳能电池阵列、核能辅助模块等能源捕获设备。结构构件则表现为由月壤基复合材料构建的防护外壳或道路设施。此外，对月痕遗迹与特殊地貌的保护性开发，也属于该系统功能规划的重要组成部分。

3.3 支持人类活动

人因系统是月球科研站建筑的最终服务对象，旨在极端环境中，通过空间设计保障航天员的生理健康、心理韧性及科研工效。

原理以人因工效原理为核心，针对低重力环境下的特殊人体姿态，重新定义空间尺度与操作界面，确保科研与生活操作的便利。设计策划的功能性原理要求精准匹配生理与心理需求。同时，美观性原理强调通过界面色彩、材质与光环境设计，在物理空间中注入人文关怀与审美意涵，以缓解长期封闭带来的心理压力。

行为涵盖从生理代谢到认知心理的多维响应。资源循环行为表现为提高生保系统对水、气的闭环处理效率。环境认知行为涉及乘员在特殊光照与空间尺度下的感知反馈与情绪波动。空间适应行为则描述了在不同任务模式下，人员对空间灵活性与私密性的动态需求。

结构主要集中于内部空间环境，物理环境组件包括温湿度控制与空气循环设备。功能布局上，需明确划分科研工作区、私密休息区与公共社交区，并设置健身与医疗模块以对抗微重力效应。界面与设施涉及适应微重力的多功能家具、VR/AR辅助训练系统及信息交互终端，共同构建一个安全、高效且具有疗愈性的深空人居环境。

4 设计目标体系

总结驻人月球科研站建筑需要实现的目标有三类——安全、高效、可居，安全指建筑系统抵御极端环境并保障人员生命底线的能力；高效指在运载受限条件下，通过模块复合与原位资源转化等实现系统成本最低与工效最大化；可居是指通过在人因生理行为与心理感知层面，支持航天员保持长期身心健康与认知活力的能力。每项具体功能均可纳入三类总体目标中，通过功能与原理、系统行为的耦合分析，将功能传递到结构层面，从而确定不同的子系统及构件执行每项确定的功能。在此基础上，基于月球环境、资源、人因三项设计约束得到月球建筑系统要素–目标评价矩阵，即月球科研站建筑在包络领域、空间环境子系统与三类设计目标之间的耦合关系如表2所示，目的在于提供一套针对不同阶段、不同选址等情况下的通用准则。

表 2　驻人月球科研站建筑系统要素–目标评价矩阵

Table 2　Evaluation matrix of manned lunar research station architecture

要素						目标		
维度		内容	类型		测度方法	安全	高效	可居
月球建筑系统	包络领域子系统	形体 集约度	客观	正向	体积、面积、材料质量比	○	○	
		形体 可拓展度	客观	正向	接口数量与方向统计	○	○	
		形体 审美表现	主观	正向	主观评分			○
		结构 稳定性	客观	逆向	不同工况应力分析	○		
		结构 可持续性	客观	逆向	材料、成本计算		○	
		结构 可操作性	客观	逆向	耗时、成本计算		○	
		表皮 防护性	客观	逆向	不同工况破坏程度分析	○		
		表皮 可持续性	客观	逆向/适度	成本、体积、面积计算		○	○
	空间环境子系统	空间 安全逃生度	客观	正向	空间句法计算	○		
		空间 任务支持度	客观	正向	空间句法计算		○	
		空间 功能满意度	主客观	正向	主观评分 空间句法计算 人因工效模拟			○
		环境 生命支持度	客观	适度/逆向	模拟与实测	○		○
		环境 认知满足度	主客观	正向	主观评分 生理指标实验		○	○
		实体 可持续性	客观	正向/逆向	质量、成本计算	○	○	
		实体 功能实现度	主观	正向	人因工效模拟 主观评分			○

其中，评价矩阵中的要素分为三种：客观测度型包括形体集约度、材料与结构的可持续性、防护性等，通过Unity + Anylogic仿真、Jack人因仿真、空间句法、Ansys有限元等计算得出；主观评价类型包括审美表现、认知满足度、功能实现度等，选择航天员、极地科考队员、相关领域专家等配合VR技术通过李特克五级量表进行打分评定；部分要素为主客观评价相综合，如功能满意度，需要综合空间公共–私密梯度、不同空间可达性等客观指标与功能配置完整性与丰富度等主观指标。此外，不同指标具有正向、逆向、适度的特性，如净居住体积与运输质量之比越大，证明形体集约度越高，为正向指标；月震、微流星体撞击下结构表现中局部受应力越大，证明结构稳定性越差，为逆向指标；温度、湿度、气压等物理环境指标有适宜的区间，在一定区间内舒适度更高，为适度指标。

为通过建筑设计师、航天工程师、政府等不同利益相关者对各项要素重要性的判断，确定目标体系中各项要素之间的权重，利用层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）通过专家的主观重要度排序确定，研究收集了来自航天工程、建筑与土木工程等不同领域的12位专家的有效问卷，针对驻人月球科研站稳态有人驻留工况进行设计要素的重要性评分，得出权重（图5）。且两个层级的数据一致性指标CR值均小于0.1，具有较满意的一致性。

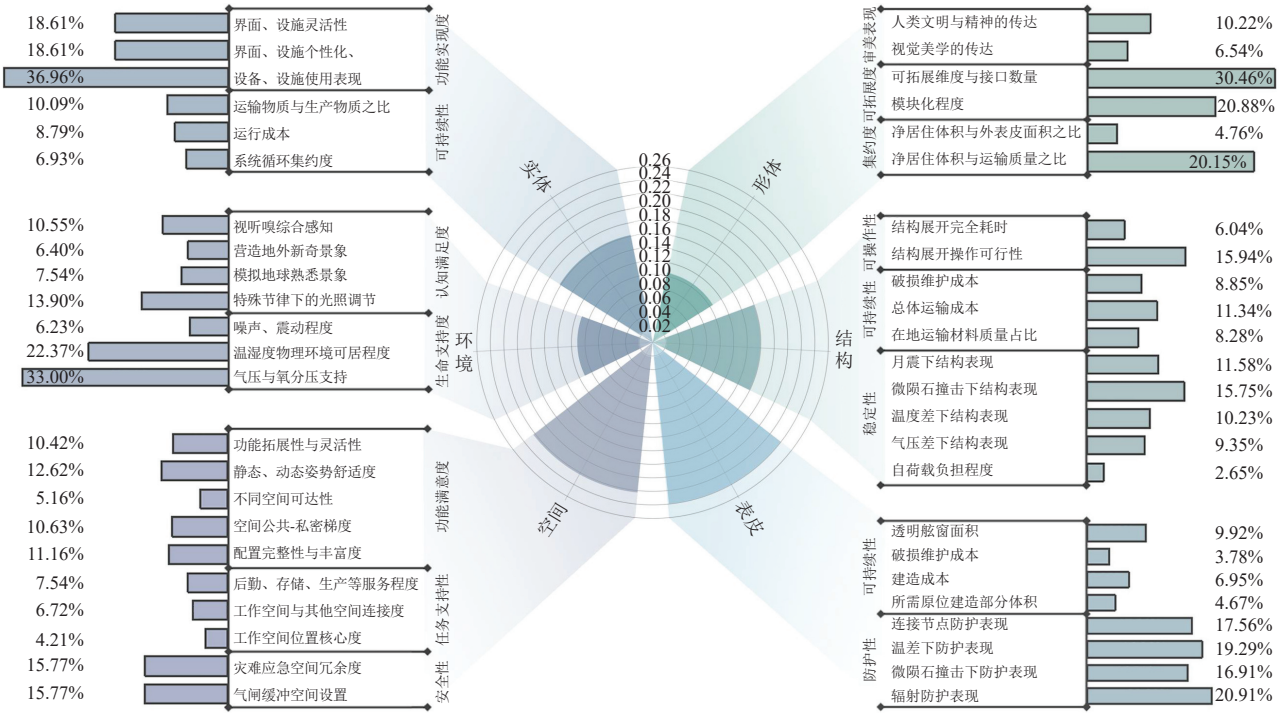


图 5　驻人月球科研站建筑设计目标及权重分配

Fig. 5　Weight distribution of manned lunar research station architectural design objectives

在不同技术路线方案比选过程中，表2的测度方法与图5的要素权重将共同为不同方案在包络领域与空间环境具体设计要素的表现形成单项与总体得分。安全性项下的指标为底线性依据，是方案能否被采纳的根本；高效性项下的指标衡量了经济性与技术可行性；可居性项下的指标与前二者综合协同，对相近表现的方案进行差异化甄别优选。

此外，月球科研站设计目标的权重分配还具有显著的任务阶段性特征。在初期建设阶段，生存安全（气压维持、辐射防护）与建设效率（原位资源利用、快速部署）占据绝对主导，此时安全目标为底线约束；在稳定驻留阶段，随着航天员留轨时间延长，心理健康与工作绩效对可居性的需求大幅提升，成为保障任务顺利完成的核心刚需。本文图5展示的权重分布主要针对稳态有人驻留工况下的目标均衡，实际工程应用中应根据不同任务阶段动态调整各子系统权重。

受限于目前月球建筑运行数据的缺失，本文采用AHP法确立的权重反映了当前跨学科专家的先验判断，旨在为初期方案设计提供逻辑基点。但有限样本的主观意见在工程客观支撑上存在局限。未来随着驻人科研站仿真与模拟数据及真实驻留反馈的积累，应引入离差最大化等客观赋权法，对不同任务需求及不同规模与时长的设计目标进行精准迭代。

4.1 安全性目标：多维防护与冗余保障

针对真空、强辐射、微流星体撞击、月尘侵蚀、极端温差等多重致命威胁，安全性目标的实现依赖于结构可靠性、功能冗余性与设备保障性三者的深度耦合与协同防御。

4.1.1 可靠性结构与表皮

月球建筑的围护结构需具备全周期的环境隔离能力，通过主动响应与被动防护的互补机制确保系统鲁棒性。

被动式防护作为第一道防线，通过利用月球原位资源降低外部能耗。在选址方面，优先考虑利用熔岩管道或地下空间，借助天然地质屏障屏蔽辐射并维持热环境稳定[15]；在建造方面，采用原位3D打印的月壤厚层覆土结构，复合多层隔热材料与抗冲击缓冲层，有效应对微流星体和热冲击。

主动式响应则引入智能感知与动态调节机制。通过嵌入式光纤传感器网络实时监测结构应力与微撞击损伤，联动局部电磁场生成或机器人增材制造进行自我修复。例如，在舷窗等薄弱部位部署动态挡板或充气式聚乙烯屏蔽舱，在太阳粒子事件（Solar Particle Events，SPE）期间提供应急增强防护[16]。

4.1.2 冗余性功能与构件

基于故障导向安全原则，通过物理隔离与功能备份提升系统的容错能力。

空间层面，构建多重连接路径与独立加压舱段，确保单一模块失压或火灾时，人员可通过最短路径撤离至气闸舱或应急避难所。关键生活舱与节点舱可互为备份，利用双向承压舱门阻断风险蔓延。

设施层面，针对供能、通讯及生保系统实施异构备份。例如，采用光伏与核能双源供电，设置独立储水罐与固态化学制氧设备，防止因共模故障导致全系统瘫痪。

4.1.3 保障性设备设施

内部设备设施聚焦于对抗低重力、长周期、高真空带来的次生安全威胁。

环境调控维度，集成全光谱动态照明模拟地球节律，抑制生物钟紊乱；利用主动流体循环与相变材料墙体维持舱内微气候稳态。

健康与除尘维度，配置人工重力离心机与阻力训练设备对抗骨肌流失；在气闸舱部署静电除尘、负压吸附与超声波清洁系统，阻断月尘对呼吸系统与精密仪器的危害。

闭环生保系统维度，从初期的开环携带逐步过渡到基于原位水冰提取与动植物培养的闭环再生模式[17]，结合多频段通信与远程医疗接口，构建全方位的生命支持网络。

4.2 高效性目标：资源复用与系统适配

月球科研站的高效性不仅意味着在建造阶段以最低的运载成本实现高质量产出，更要求在运行阶段通过空间与资源的极限利用提升科研工效。通过构件–空间复用、功能–环境适配、模块–集群生长三个层面耦合实现。

4.2.1 双重利用的构件与空间

鉴于高昂的地月运输成本，单一物理实体的多功能化是提升效率的关键。

构件集成是指采用结构–设备一体化设计策略，将折展结构与生命保障管网融合。例如，围护结构中的储水层兼具防辐射屏蔽与热排散功能[18]。

空间复用是指依据功能连接矩阵[19]分析不同任务的时空重叠性，如将备餐与用餐合并、如厕与清洁集成，实现空间效能倍增。

4.2.2 适配功能的空间环境

高效的空间环境需精准匹配科研任务与生理行为，通过物理环境调控防止人为失误。

流线组织方面，基于任务依赖性与环境干扰性，

构建分级流线体系。明确划分隐私/公共、清洁/污染区域，并优化纵向交通以适应月球低重力下的跳跃式移动。

环境响应是指针对不同任务场景定制环境参数。在科研区，建立照明与温控基准以提升专注力；在应急逃生路径中，利用荧光导引与触觉警示带提供双重方向指引，克服低重力下的空间定向障碍；在立体农业区，采用自适应调节层架，随植物生长动态调整高度与光照，极限利用加压空间。

4.2.3　交互式拓展模块集群

为应对未来任务规模的不确定性，建筑系统需从静态容器转向可生长的有机体。

部件标准化指建立统一的机械对接、电路耦合与数据互通接口，实现围护结构与内部设备的“即插即用”。如MIT设计的MOMO模块[20]，其高密度聚乙烯腔体可根据需求灵活替换为气闸、舷窗或实验舱，且支持局部受损后的快速更换。

集群拓扑指采用柏拉图或阿基米德多面体作为几何原型[21]，利用其优秀的密铺特性与力学性能，支持建筑群落的涌现式拓展，使得科研站能随着任务升级，从初期的单体实验舱平滑演进为大规模的科研聚落或熔岩管内的复杂支撑结构。

4.3　可居性目标：身心感知与场景支持

随着任务周期的延长，舒适性成为保障航天员生理健康、心理韧性及社会适应的关键指标，其实现依赖于基于人体工效的尺度重构、基于场景强化的功能组织以及基于感官代偿的氛围营造。

4.3.1　基于人体包络的尺度与形态

月球低重力环境深刻改变了人体的静态构造与动态功能尺寸，要求建筑尺度需进行精准修正。

首先，针对现有微重力数据的局限性[22]，需通过水下或悬吊模拟建立动态行为数据库。考虑脊柱伸长、步幅增大及关节重心偏移等生理变化，引入功能修正量与心理修正量，对最小功能尺寸与最佳功能尺寸进行重新定义。

而后，利用Jack等虚拟人仿真平台，结合人体反向运动学算法[23]，对穿着舱内/外航天服后的可达域、视域及关节受力进行工效学分析，确保空间形态满足极端受限环境下的操作极限与舒适度需求。

4.3.2　生活场景强化的功能与布局

遵循可用性、宜居性、灵活性[24]原则，针对4大核心生活场景进行功能强化设计。

睡眠区通过全光谱动态照明模拟地球昼夜节律，并支持界面装饰的个性化定制以增强归属感；卫生区采用高密闭循环系统，并引入微型植物景观，在满足清洁功能的同时提供心理舒缓；餐饮区采用嵌套式集约设计，注重用餐氛围营造以对抗味觉迟钝；休闲区利用VR/AR扩展现实技术打破物理边界，提供沉浸式的感官刺激与社交互动支持，缓解因感官剥夺带来的心理压力[25]。

4.3.3　特殊感知环境与氛围

针对长期封闭隔离环境导致的认知窄化与社会隔绝问题，构建身体–空间–意识三元互构的感知代偿系统。

视觉环境方面，建立基于安全导航、认知刺激与仿生模拟的视觉体系。利用流线与界面的视觉锚点重建低重力下的空间定向认知；通过动态、全光谱光照调整特殊节律[26]；通过界面色彩、纹理的多样性组合提供必要的感官输入[27]。

同时，融合虚拟与现实，在物理空间受限的前提下，利用虚拟窗口投射地球自然景象或宇宙景观，构建人工自然与文化记忆的复合场景，营造跨感官通道氛围，提升乘员的整体福祉与任务效能[28]。

5　结束语

月球科研站建筑设计的安全、高效、可居三大目标并非孤立存在的离散要素，而是通过跨尺度、跨学科的知识集成，深度耦合于系统功能的实现过程中。单一物理实体往往承载着多维目标诉求，如原位建造的月壤防护壳体，既需构筑辐射与微流星体的坚固屏障（安全），又需追求低能耗建造与材料最小化（高效），同时还需营造适宜的声学与空间感知环境（可居）。

这种耦合机制深刻体现在三个层面：安全与高效通过物理空间与功能流的复用，实现了系统集约化；安全与可居通过物理性能向心理感知的映射，将冗余的防护转化为宜居的体验；高效与可居则通过行为流线与物质流的契合，将运行效率的提升转化为乘员体验的优化。

未来的研究将进一步聚焦于上述目标间的定量关系，通过多目标优化算法对相互制约的要素值域进行寻优，以实现月球驻留系统在极端约束下的全局价值最大化。

参考文献

[1]　欧阳自远. 中国探月工程的科学目标[J]. 中国科学院院刊，2006，21(5)：370-371.
Ouyang Z Y. The scientific goal of China’s lunar exploration project[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2006，21(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. 国际月球科研站路线图(V1.0)[EB/OL]. (2021-6-16)[2026-1-8]. http://www.clep.org.cn/n5982341/c6812157/content.html.

[4] 果琳丽，王平，朱思涌，等. 载人月球基地工程[M]. 北京：中国宇航出版社，2013.

[5] Compton W D，Benson C D. Living and working in space：a history of skylab[M]. Washington，DC：NASA，1983.

[6] 袁勇，赵晨，胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. 深空探测学报(中英文)，2018，5(4)：374-381.
Yuan Y，Zhao C，Hu Z Y. Concept of lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(4)：374-381.

[7] 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. Analysis and study on mass flow regulation of controlled ecological life support system in lunar base of China[J]. Manned Spaceflight，2017，23(5)：680-687.

[8] Inspired P. Apollo 11 Moon landing maps[EB/OL]. (2023) [2025-12-08]. https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/apollo-11-moon-landing-maps.

[9] 李书颀，梅洪元. 基于人因工程学的月球建筑空间设计框架构建[J]. 世界建筑，2023(12)：55-60.
Li S Q，Mei H Y. Construction of lunar architectural space design framework based on human factors engineering[J]. World Architecture，2023(12)：55-60.

[10] Häuplik-meusburger S，Bishop S. Space habitats and habitability：designing for isolated and confined environments on Earth and in space[M]. Cham：Springer，2021.

[11] Pahl G，Beitz W，Feldhusen J，et al. Engineering design：a systematic approach[M]. 3rd ed. London：Springer-Verlag，2007.

[12] Gero J S. Design prototypes：a knowledge representation schema for design[J]. AI Magazine，1990，11(4)：26-36.

[13] Rosenman M A，Gero J S. Purpose and function in design：from the socio-cultural to the techno-physical[J]. Design Studies，1998，19(2)：161-186.

[14] Gero J S，Kannengiesser U. The situated function-behaviour-structure framework[J]. Design Studies，2004，25(4)：373-391.

[15] Diaz-flores A，Pedersen C，Raj A T，et al. First steps towards the lunar ark concept：Saving life on Earth from a future catastrophe[C]//Proceedings of Accelerating Space Commerce，Exploration，and New Discovery conference，ASCEND 2021. [S. l]：AIAA，2021.

[16] Dyke S J，Marais K，Bilionis I，et al. Strategies for the design and operation of resilient extraterrestrial habitats[C]//Proceedings of Sensors and Smart Structures Technologies for Civil，Mechanical，and Aerospace Systems. California：SPIE，2021.

[17] NASA. Spaceflight human-system standard volume 2：human factors，habitability，and environmental health[EB/OL]. (2026-3-19)[2026-6-16]. https://www.nasa.gov/reference/nasa-std-3001v2/.

[18] Cohen M M，Flynn M T，Matossian R L. Water walls architecture：massively redundant and highly reliable life support for long duration exploration missions[EB/OL]. (2026-6-15)[2026-6-22]. https://www.nasa.gov/general/water-walls-highly-reliable-and-massively-redundant-life-support-architecture.

[19] Rodrigues E，Gaspar A P，Gomes A，et al. An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique[J]. Automation in Construction，2013，35：482-498.

[20] Fernandez M，Dunnell K，Boldi A，et al. MIT media lab develops self-assembling lunar habitat “MOMO”[EB/OL]. (2024-05-26) [2025-12-18]. https://www.designboom.com/technology/momo-self-assembling-lunar-habitat-mit-media-lab-05-26-2024/.

[21] Lynch P. Nine Visions of Lunar Architecture from Moontopia Competition[EB/OL]. (2017-01-17) [2026-01-01]. https://www.dezeen.com/2017/01/17/nine-visions-lunar-architecture-moon-moontopia-competition/.

[22] NASA. Anthropometry，biomechanics，and strength[S]. OCHMO-HB-004. Houston：NASA，2022.

[23] 陈鹏，王春慧，周前祥. 基于Jack的穿舱外服航天员工作空间研究[J]. 计算机仿真，2007，24(2)：37-40.
Chen P，Wang C H，Zhou Q X. Research on workspace of astronaut wearing EVA spacesuit based on JACK[J]. Computer Simulation，2007，24(2)：37-40.

[24] Häuplik-meusburger S. Architecture for astronauts[M]. Berlin：Springer，2011.

[25] Oungrainis K A，Liapi M，Kelesidi A，et al. Intelligent spacecraft module[J]. Acta Astronautica，2014，105(1)：242-253.

[26] Caballero-arce C，Vigil D I，BENLLOCH M J. Lighting of space habitats：Influence of color temperature on a crew’s physical and mental health[C]//Proceedings of 42nd International Conference on Environmental Systems. San Diego，CA：AIAA，2012.

[27] Ono A，Schlacht I，Masali M. Lunar zen garden; natural design as a key for reliability in space extreme environment[C]//Proceedings of 58th International Astronautical Congress. Hyderabad：IAC，2007.

[28] Balomenaki C，Chrysochoou I，Tsilia A，et al. Proposition for modular space habitat[C]//Proceedings of 75th International Astronautical Congress (IAC). Milan：IAC，2024.

作者简介：
李书颀(1997–)，女，副研究员，主要研究方向：极端环境建筑设计。
通信地址：黑龙江省哈尔滨市南岗区黄河路73号(150090)
E-mail：lishuqi@hit.edu.cn
梅洪元(1958–)，男，院士，博士生导师，主要研究方向：寒地建筑、超极端环境建筑。**本文通信作者**。
通信地址：黑龙江省哈尔滨市南岗区黄河路73号(150090)
电话：(0451)86289306
E-mail：meihongyuan@hit.edu.cn

Architectural Design Objective System for Manned Lunar Research Station Driven by Multiple Constraints

Li Shuqi[1]，Mei Hongyuan[1, 2]

（1. School of Architecture and Design，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China；
2. Complex Environment Architecture Research Institute，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China）

Abstract：The Lunar Research Station is regarded as a strategic pivot for future deep space exploration. Its architectural design is constrained by multiple factors，including extreme environments，resource scarcity，and high-load scientific research tasks. To construct a scientific design guidance and evaluation system，the functional architecture of the station is delineated using the Function Analysis System Technique（FAST），based on three core objective constraints：environment，resources，and human factors. Furthermore，the Function-Principle-Behavior-Structure（FPBS）framework is introduced to deduce the mapping mechanism from scientific residency requirements to physical entities. On this basis，a multi-dimensional objectives evaluation matrix centered on "Safety，Efficiency，and Habitability" is established，and the synergistic relationships among these targets are quantified by a coupling coordination degree model. Theoretical support is provided by this study for the scheme decision-making and performance evaluation of the Lunar Research Station.

Keywords：Lunar research station；architectural design objectives；systems engineering；Functional Analysis System Technique (FAST)；Function-Principle-Behavior-Structure (FPBS)

Highlights：

- Three core objective constraints（environment, resources，and human factors）are identified to construct the boundary conditions for the station design.
- FAST and FPBS frameworks are integrated to deduce the scientific mapping mechanism from residency requirements to physical entities.
- A multi-dimensional design target system and evaluation matrix centered on “Safety，Efficiency，and Habitability” are established.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]