月球科研站构建与运营之关键设备

杨建中[1]，潘 博[1]，李林凌[1]，刘 卫[1]，徐赵东[2]

（1. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094；2. 东南大学 土木工程学院，南京 210096）

摘 要：首先阐述了月球科研站构建与运营所需的关键设备研究与应用面临的共性问题，然后结合相关设备需求的紧迫性、技术可行性和成熟度，对关键月球科研站设备的主要类别、基本功能及其组成特点进行探讨及论述，进一步提出了这些设备协同工作面临的问题及应对策略，为相关设备研究、研制与应用提供参考。

关键词：月球科研站；月球探测；驻留；月球科研站设备

中图分类号：V11 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2025)06-0559-10

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250059

引用格式：杨建中，潘博，李林凌，等. 月球科研站构建与运营之关键设备[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（6）：559-568.

Reference format: YANG J Z，PAN B，LI L L，et al. Key equipment for construction and operation of lunar research station[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（6）：559-568.

引 言

月球科研站的构建与运营可有效促进月球的长期深度探测、资源开发与原位利用，并为载人登月及人员在月面的中短期驻留或走向更远的深空提供有力支撑。在不久的将来，构建月球科研站，已成为各航天强国或组织进一步实施月球探测的重要目标和手段。美国提出了“阿尔忒弥斯”（Artemis）计划，其目标是在月球南极建立基地，实现月面资源的原位利用，并为开展火星任务提供支撑[1]。

2021年中国发布了《国际月球科研站合作伙伴指南》，提出了国际月球科研站计划，该计划以“和平利用、平等互利、共同发展”为宗旨，通过国际合作在月球表面及轨道构建长期自主运行、短期有人参与的综合性科学试验设施[2]。中国正在实施的探月四期“嫦娥七号”任务，拟对月球南极永久阴影区内可能存在的月壤水冰进行原位详查；“嫦娥八号”任务也将着陆于月球南极地区，开展月壤资源原位利用技术验证。通过“嫦娥七号”和“嫦娥八号”任务的实施，构建月球科研站的基本型，为后续国际月球科研站的规模化构建与高效益运营奠定基础[3]。

针对月球极区探测的科学技术问题以及月球科研站构建与运营的选址、科研站形态、能源供给等问题，许多学者及工程技术人员提出了自己的观点和见解[4-8]。为实施月球科研站的全面构建，首先需要研制关键设备，并将这些设备由地面发射投送至月面，支撑月球科研的构建及后续运营工作。构建及运营活动包括设备物资的投送与运输、构建及运营作业、基础设施保障、资源勘查或探测、资源利用、生命物资保障等。完成这些活动所需要的关键设备包括月面投送缓冲及运输设备、月面作业机器人、月面共用基础设备、月面探测设备、月面资源原位利用设备、月面生物培养设备等。

月面投送缓冲及运输设备主要包括月面公共缓冲与运输平台以及相应的运输机器人，通过这些设备实现相应设备在月面投放过程中的缓冲，并将投放后的设备从着陆地点安全运送到指定位置，或将设备从一个地点运送至另一个地点。月面作业机器人主要用于科研站构建或月面科学试验过程的各种作业，以及科研站运营过程相应设备的维修与维护。月面共用基础设备包括月面能源供给与传输设备、人员生活舱等，为科研站构建与运营提供能源，并为人员在月面的中短期驻留提供生活保障。月面探测设备主要包括观测相机、钻取设备、挖掘设备、光谱分析设备、月震测试设备等，是在月面实施探测的物质基础，其技术水平的先进性与可靠性直接决定了月球探测的深度与广度，此类设备的研究起步较早，研究基础较好，并取得了一定的应用成果。月面资源原位利用设备主要包括月壤原位成型设备以及月壤水冰等资源的提取、转

收稿日期：2025-07-07 修回日期：2025-10-17

基金项目：国家自然科学基金区域创新基金（U24A20176）

化或熔炼设备等，为实现科研站构建及人员在月面驻留提供原位物资保障。月面生物培育设备包括植物培育设备、昆虫培育设备等，为人员在月面驻留探索稳定的食物供给渠道。关键月球科研站设备类别及其所包含的主要设备如表1所示。

表 1 关键月球科研站设备类别及组成

Table 1 Key lunar equipment categories and components

序号	设备类别	设备组成
1	月面投送缓冲及运输设备	月面公共缓冲与运输平台、运输机器人等
2	月面作业机器人	作业机器人（构建、科学试验、维护机器人等）
3	月面共用基础设备	月面能源供给与传输设备、人员生活舱等
4	月面探测设备	观测相机、钻取设备、挖掘设备、光谱分析设备、月震测试设备等
5	月面资源原位利用设备	月壤原位成型设备、月壤水冰提取设备、矿物资源熔炼设备等
6	月面生物培育设备	植物培育设备、昆虫培育设备等

与近地轨道载人航天技术的发展相似，月球科研站的构建与运营也要遵循先无人后载人的发展原则，且由无人值守到短期有人照料要经历数年的时间，以验证相应的关键技术，获得、积累必要的客观数据。因此，涉及无人及载人活动共用设备的研制应尽早开展，而载人专用设备的研制可以适当推后。另外，到目前为止月壤水存在的具体方式尚存在争议，其存在也未得到原位证实[9]，因此，月面水资源的提取方法或手段难以确定。在人员对科研站的短期照料过程中，航天员登陆月球时的密封舱可作为其月面短期活动的生活舱，后续可用多层膨胀展开密封舱作为其生活舱，多层膨胀展开密封技术已经得到在轨验证[10]，因此，已有基础研究可满足人员在月面短期生存的需要。

基于先考虑无人及载人活动所共用设备的研制，后考虑载人专用设备的研制这一基本思路，本文首先阐述上述关键设备研究与应用面临的共性问题，然后结合月球科研站构建与运营过程相关设备需求的紧迫性、技术可行性和成熟度等，对月面公共缓冲与运输平台、作业机器人、月面能源供给传输装置、观测相机、月壤原位成型设备、月面植物培育设备等的功能与组成进行简单论述，进一步提出这些设备协同工作的基本策略，为相应设备的工程研制及应用提供参考。

1 关键月球科研站设备研究与应用面临的共性问题

尽管不同关键月球科研站设备研究与应用面临的问题有很大差别，但也有相似之处，其中的共性问题如下。

1）已有的技术基础比较薄弱

月球科研站是人类构建的第一个地外天体表面科研站，其构建与运营过程所面临的挑战大、创新性强，任何国家或组织都没有成功实施的经验，月球科研站构建与运营所需关键设备的研制技术基础薄弱，技术风险高，需要一个相对较长的攻关阶段才能突破相应的关键技术。

2）设备长期生存与稳定运行面临的挑战大

为更好地发挥月球科研站的科学技术价值，取得更多的科学发现及技术突破，其建设地点拟选在月球的南极地区。该区域具有太阳高度角低、光线易被遮挡、某些区域太阳能获取困难、夜间温度更低等显著特点。太阳能获取相对困难，使得设备工作所需能源的限制更加严格。极低温环境下许多材料会出现低温脆性，甚至不可恢复的性能衰减。因此设备长期生存及稳定运行面临的挑战很大。

3）复杂环境条件下设备自主协同工作与故障修复难度大

在月球科研站构建与运营过程中，相关的月面操作，包括设备运输与吊装；资源勘探、开采与利用；基础设施建造、运营与维护；有效载荷部署、维护与试验实施等。几乎所有的月面活动均需依靠各月球科研站设备的协同工作才能顺利实施。但月面的地理环境特性并未全部明确，加之月面信息感知手段的有限性，给多设备自主协同工作带来了很大的困难。同时，信息感知手段的有限性也给设备故障预判及修复带来很大挑战。以上问题的解决，需要较长时间的探索和经验积累。

4）设备性能的地面模拟验证及寿命评估极其困难

月面综合环境条件的复杂性及设备的长寿命要求，给月球科研站设备性能的地面模拟或等效加速验证带来较大的困难。同时，欠充分的模拟也使得月球科研站设备寿命评估难以准确实施。因此，如何结合已有的经验及等效理论，在地面进行验证，积累必要的数据，保证设备在月面的可靠工作，是一项极其重要的工作。

5）国际间的合作需求更加迫切

正是由于上述问题的存在，导致单一组织或国家难以承受全部设备研制的代价或难以在短时间内成功研制出科研站构建与运营所需的关键设备，因此迫切需多个国家或组织联合起来，发挥各自的技术或经济优势，通过有效的合作完成设备研究与研制工作，支撑月球科研站的构建与运营，实现人类共同探测月球、建设月球家园的宏伟目标。

2　关键月球科研站设备的功能与组成特点

探索关键月球科研站设备的功能与组成特点，有利于进一步认识、理解其研究的必要性和重要性，并为全面开展相关研究提供参考方案，给出研究思路。

2.1　月面公共缓冲与运输平台

月球科研站构建初期所需的设备都必须由地面制造，然后发射、投送至月面。目前所有在月面着陆的设备，都是通过位于月面着陆器的着陆腿先进行缓冲，然后再通过着陆器的巡视器实现相应的行走或移位探测。这种方式要求每一个着陆器需根据自身的着陆质量、速度等的不同，配置相应的着陆腿。着陆完成后，相应的着陆腿就相当于一套固定的支架，将着陆器支撑在原位。因此，着陆腿所固有的高承载、抗冲击性能没有得到进一步发挥。为降低月面软着陆及运输的成本，亟需研制月面公共缓冲与运输平台，实现不同设备在月面投放时的着陆缓冲，进而利用着陆腿所固有的高承载、抗冲击性能实现设备从着陆点向科研站构建地点的平稳运输及卸载，以满足科研站构建与运营的需要，即该平台的着陆腿具备缓冲及行走的复合功能。

公共缓冲与运输平台可携带必要的设备先行投放至月面，此后便作为公共平台，实现不同设备在月面投放时的缓冲及安全、平稳运输。就公共缓冲与运输平台的缓冲功能而言，通过传统的4腿模式即可实现，但考虑到行走的平稳性、控制的方便性，采用六腿行走的方式更优，这样可始终保证行走过程中有3条腿同时与月面接触，形成稳定的三角形支撑，同时，承载能力也更强。

一种6腿式公共缓冲与运输平台的基本组成如图1所示[11]，其组成核心为6条着陆腿，另外还有支撑环、锁紧机构以及卸放机械臂、太阳翼、天线等。

图1中，6条着陆腿上实现设备的缓冲及行走运输；支撑环为标准对接环，其上设有多块缓冲垫，在相应设备着陆时，缓冲垫首先与设备接触、碰撞，并实现设备的一级缓冲；锁紧机构对着陆后的相应设备锁紧，避免运输过程中由于颠簸而导致设备的滑落，以保证运输过程安全；两条机械臂通过独立或协同作业，实现相应设备的抓取或卸放；着陆腿实现设备着陆时的二级缓冲，缓冲结束后通过行走完成设备的运输，并在卸放时通过着陆腿的伸缩获得设备的姿态调整；太阳翼为公共缓冲平台工作提供能源，并根据任务需要竖起或收拢；天线实现与其它设备或科研站控制中心的通信。

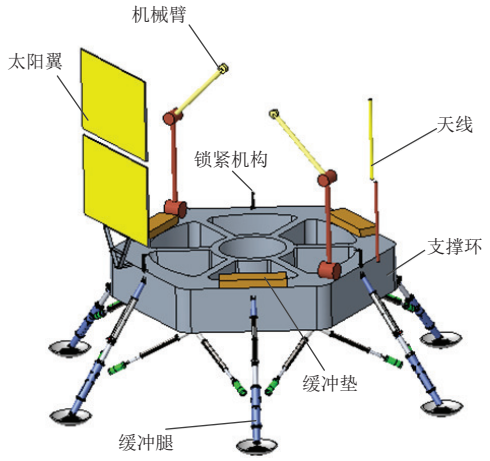

图 1　一种6腿式公共缓冲与运输平台
Fig. 1　A six legged public buffer and transportation platform

着陆腿的组成如图2所示，包括足垫、主腿以及两条辅腿，就其组成形式而言与“嫦娥”系列着陆器的着陆腿相似[11]，其构型与结构设计、主要材料选择及地面缓冲试验方法可完全继承“嫦娥”系列的着陆腿。所不同的是“嫦娥”系列的着陆腿只包含缓冲器，而该着陆腿的主腿及副腿均由电机驱动装置和相应的缓冲器共同组成。

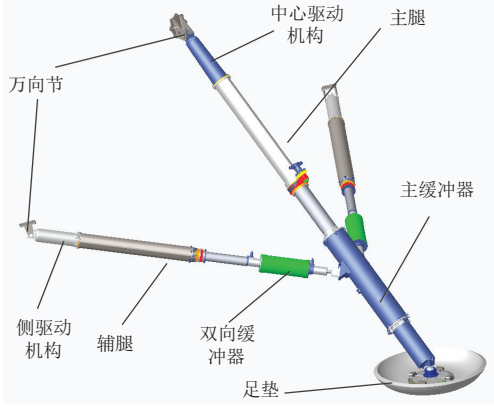

图 2　着陆腿的组成
Fig. 2　Composition of buffer leg

为便于电机供电及控制电缆的走线，减小月面温度变化对电机的影响及公共缓冲与运输平台首次月面着陆时电机的冲击防护，主腿及辅腿的电机都安装在支撑环附近。对低温环境敏感的控制器集中安放在位于支撑环内部的箱体内，便于进行温度控制，实现低温防护。通过主、辅腿各自的驱动机构，实现相应主、辅腿长度的伸缩，进而实现抬腿、迈腿行走或平台姿态的调整[11]。

月面公共缓冲与运输平台研究涉及的关键问题及应对措施如表2所示。表2中相关关键问题及其应对措施具有一定的普遍性，其它设备研制过程中也要考虑类似问题的解决，后文不再赘述。

表 2　月面公共缓冲与运输平台研究涉及的关键问题及应对措施

Table 2　Key issues and countermeasure in research of public buffer and transportation platform on lunar surface

序号	关键问题	应对措施
1	低温环境防护	控制器放在支撑环内部的箱体内，集中热控制，电机等进行独立热控制 关键承载零件的材料选用可耐受低温的材料，如钛合金、低温合金
2	着陆冲击防护	电机等布置在远离足垫的位置，降低首次着陆时的冲击影响 在支撑环设有可重复使用的缓冲垫，降低设备着陆时受到的冲击过载及其对电机的冲击影响
3	能源供给	通过自身携带的可竖起、收拢的柔性太阳翼及相应的蓄电池供电
4	月尘磨损防护	对于主、辅腿相对伸缩的两部分，通过包覆柔性波纹状热控材料，实现热及月尘的一体化防护，避免月尘进入关键驱动环节。同时通过波纹的展开、叠合，满足主、辅腿的伸缩需要
5	可靠性验证	已有“嫦娥”系列着陆腿构型与缓冲方式较为成熟，相应的缓冲可靠性验证可以继承已有的方法 行走可靠性验证需在参考其它空间机构的基础上进一步研究

2.2　作业机器人

作业机器人的任务包括巡视详查、采样分析、物资搬运、科学试验、设施构建及设备维护等。这些作业任务的对象、地点不同，操作的精度及所需的灵活性也不一样。为保证多种作业需要，作业机器人要具备灵巧性、通用性、精准性及可移动性。

一种适合月面工作的作业机器人如图3所示。轮式主动悬架与半人形机器人的结合，可完成月面移动巡视及灵巧作业任务。与双足行走相比，轮式主动悬架具有移动速度快、稳定性好、技术成熟等优点，且具备一定的地形适应性，便于实现上半身作业时的稳定支撑。中国已有的“玉兔号”月球车及“祝融号”火星车都曾采用轮式行走方式。

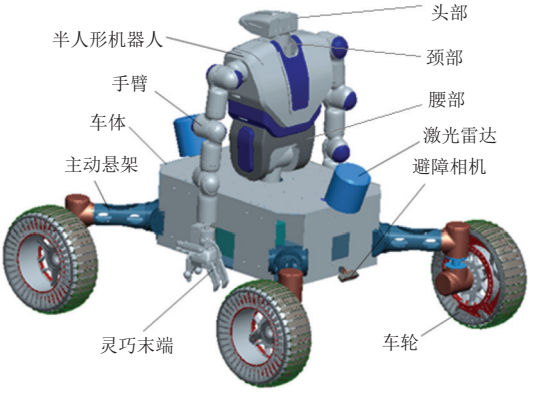

图 3　可移动灵巧作业机器人

Fig. 3　Mobile and agile operation robot

作业机器人的头部集成了双目视觉等传感器，以实现相应的感知。颈部具有两个自由度，可实现低头及转头动作，扩大了双目视觉的可视范围。腰部具有偏航和俯仰两个自由度，能实现±180°左右转身以及90°弯腰作业，有效提升了作业的可达空间及灵活性。手臂具有7个自由度，与人的手臂自由度相似，保证作业灵活性，满足两只手臂协同或独立作业的需要。灵巧末端即灵巧手具有4个自由度，可有效完成基本的抓握动作，这些类人的自由度及相应视觉，可有效保证灵巧作业能力。

为有效降低系统的质心，提高移动及作业的稳定性，同时便于热控措施的集中实施，并应对月夜极低温环境的影响，作业机器人的电池及电子设备布置在车体内部。

车轮及悬架具有3个自由度，包括俯仰、转向和驱动旋转，如图4所示。俯仰、转向和驱动关节依次串联，结构简单，可靠性高；俯仰范围大，对月面起伏地形的适应能力强，运动平稳；转向角度大，易于实现原地360°旋转，满足运动灵活性需要。考虑到月面路况的复杂性，车轮为金属弹性筛网结构，胎面由钢丝编织而成，在保证轻质要求的前提下，具有良好的耐磨性、柔顺性，同时还具有较好的弹性、减震性能以及良好的低温环境适应性，为作业机器人在崎岖月面实现长时间、长距离的平稳行驶提供有力支撑。

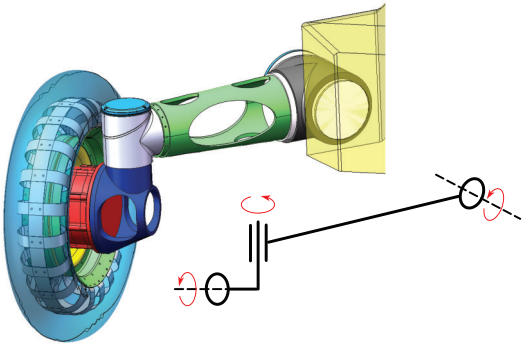

图 4　车轮及主动悬架

Fig. 4　Wheels and active suspension

与作业机器人路径规划、避障、车体状态估计等相关的传感器布局如图5所示。激光雷达提供大范围的路况及障碍物空间位置信息，便于作业机器人及早进行路径规划，提高行进速度和作业效率。避障相机实现对目标障碍物的识别和分类，便于作业机器人及时避障，保证作业安全。惯导测量单元（Inertial Measurement Unit，IMU）实现车体位姿信息的测量，为车体的主动控制提供信息，避免行进或作业过程中可能发生的倾覆现象。

上述车轮、悬架特点及传感器的布置方式，从多方面有效满足感知及稳定行走需要。

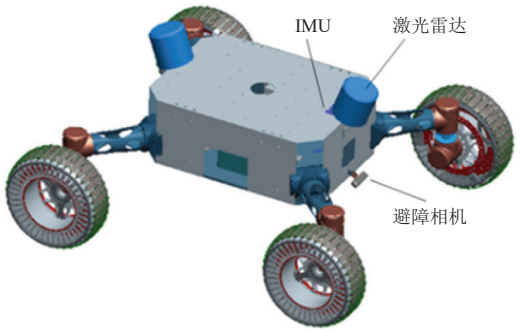

图 5　轮式主动悬架底盘传感器布置
Fig. 5　Layout of wheel active suspension chassis sensors

2.3　能源供给及传输设备

月球科研站的能源供给可通过光伏发电、核源、大规模储能电池等多种方式实现[8]。考虑到科研站设备在一定范围内的分散布局以及对不同区域探索的要求，采用类似地面的有线能源传输是不经济的，同时也难以实现对所有动态探测点的全覆盖。一种可行的方法是利用光学设备对太阳光汇聚，并通过光反射对特定位置的设备给予能源供给，例如对处于月球南极阴影坑内的相关探测设备提供能源供给。月球南极的大型阴影坑内，长期没有阳光照射，始终处于低温的环境，最有可能存在水冰[4,12-13]。因此，对此区域实施探测的科学与工程价值巨大。

在对阴影坑实施较长时间探测时，为解决探测过程中的能源供给问题，可采用如图6所示的方法。在阴影坑外的边缘位置布置聚光、反光及跟踪指向一体化设备，该设备包括由双轴跟踪器带动的抛物面共轴聚光镜及与其固连的二次聚光镜，实现对太阳的跟踪及太阳光的汇聚。还包括由另一双轴跟踪器带动的反射镜，实现太阳光的定向反射，使太阳光精准照射到阴影坑内探测设备的太阳翼，从而满足设备的能源供给需要。

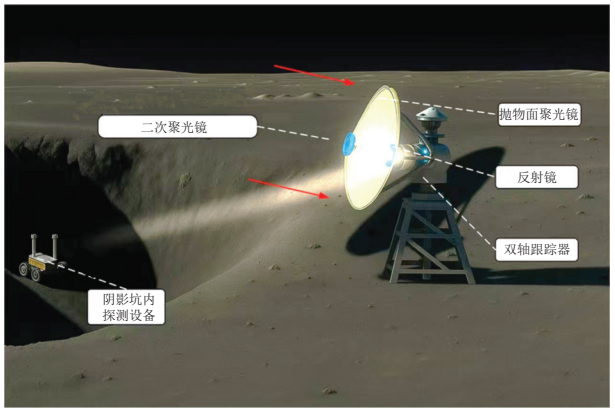

图 6　阴影坑内能源供给示意图
Fig. 6　Schematic diagram of energy supply plan for large shadow pits

为进一步满足阴影坑内移动探测设备对太阳能高效传输的需要，位于阴影坑外边缘位置的聚光、反光及跟踪指向装置也要随着移动，以便始终以最佳的反射角度实现太阳能的传输。其中聚光镜可采用充气式薄膜结构，如图7所示。

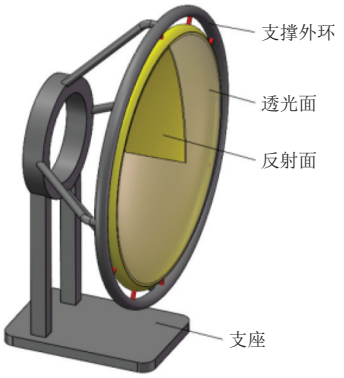

图 7　充气薄膜聚光镜系统组成示意图
Fig. 7　Schematic diagram of composition of inflatable membrane spotlight system

聚光镜系统由支撑外环、透光面、反射面以及支座等组成，其中的透光面与反射面的形状相同。支撑外环以及透光面与反射面组成的闭合体均为充气薄膜结构，前者的充气压力比后者稍大，因此前者充气展开后的刚度比后者大，以获得较好的支撑。考虑到月面的超高真空，只需极低的空气压力即可将充气式聚光镜展开，获得期望的形状。由于月面的低重力特性以及薄膜结构极低的面密度特点，月面重力对展开后反光镜的形状精度影响很小。充气薄膜聚光镜系统对月面环境及地月运输的适应性分析如表3所示。

表 3　充气薄膜聚光镜系统对月面环境及地月运输的适应性
Table 3　Adaptability of inflatable membrane spotlight system to lunar surface environment and Earth-Moon transportation

序号	月面环境特点或地月运输要求	对月面环境及地月运输的适应性
1	月面超高真空	充入极低的压力（10 Pa左右）即可实现展开，并保持期望的形状精度。展开所需携带的空气质量极小，相应气瓶的体积很小
2	月面低重力	重力对处于竖直状态使用的反射面形状精度影响很小
3	月夜极低温及月面辐射环境	采用可耐受–190 ℃低温环境及对辐射环境具有良好适应性的改性聚酰亚胺薄膜材料成型，其寿命可达5～10年[14]
4	包络小体积要求	薄膜材料的厚度只有10 μm左右，相对金属结构，其折叠状态的包络体积很小
5	系统小质量要求	聚酰亚胺薄膜材料厚度薄、密度小，因此，薄膜结构系统的质量小 考虑到系统的低压充气特点，所需的附加管路、气瓶的体积与质量也很小

由表3可知，月面超高真空、低重力以及聚酰亚胺薄膜材料对低温及辐射的适应性、薄膜结构包络体积

小、系统质量小的特点，使得充气薄膜聚光镜系统特别适合月面太阳能的反射及汇聚。

2.4 观测相机

观测相机是月球科研站构建与运营的核心载荷之一，根据观测目标和任务的不同，功能和组成有显著区别：如全景相机，对月表进行近距离三维立体成像与地形勘测，由两台性能一致的相机组成，构成双目立体视觉系统，主要用于月貌勘查、路径规划；轨道观测相机，核心是时间延迟积分型CCD（TDI-CCD）器件，与激光高度计协同工作，获取月表三维影像，主要用于绘制全月高精度地形图；工程监视相机，检测探测器自身部件的工作状态与过程，采用超广角镜头或长焦镜头，主要用于监视发动机、太阳翼、天线等工作，也可拍摄地月合影。

虽然观测相机功能不同，但在设计上都面临克服极端环境、轻量化与高可靠性、自主化、智能化等共同挑战，这些相机在月球探测过程中都得到了广泛应用。

2.5 月壤原位成型设备

月壤原位成型是指在月面将月壤加工成具有一定强度的结构单元，最典型的结构单元就是“月壤砖”。月壤原位成型是实现月面基础设施原位构建的重要基础之一。

“月壤砖”的成型有两种基本途径，一是利用热能，实现月壤的熔融，进而实现“月壤砖”的烧结成型；二是从地面携带必要的粘结剂，以极小的粘结剂占比实现月壤的粘结成型[15-18]。前者除了需专用的聚光成型设备外，不需要从地面运送任何其它原材料，随着“月壤砖”成型数量的增加，单块砖的成本将显著降低，适合未来大批量“月壤砖”的成型制造。后者随着“月壤砖”成型数量的增加，所需地月之间运送的粘结剂的数量及成本呈线性增加的趋势。因此，越来越多的学者及工程技术人员，倾向于第一种成型途径。对于“月壤砖”的熔融烧结成型，一种可行的方式就是直接通过太阳光的汇聚，实现较小区域的高功率加热，进而使月壤融化，进一步实现成型。该方式具有转化环节少，热效率较高的特点。另外一种方式是将太阳能转化为电能，进而将电能转化为微波，通过微波进行加热，该方式的能量转化环节多，热效率相对较低。直接利用太阳光汇聚的方法实现“月壤砖”成型的示意图如图8所示。该系统包括类似图7所示的反射薄膜聚光镜、月壤箱、二维滑轨等。与图7所示不同的是，为避免光线对月壤箱底部的照射，图8所示的反射镜为偏置反射镜，保证光线仅从月壤箱的顶部射入。月壤箱用来盛放月壤，其截面积及深度比“月壤砖”的尺寸稍大，以免太阳光直接汇聚至月壤箱的箱壁，造成能源的浪费以及月壤砖与箱壁之间的粘连，进而导致成型后脱模困难。月壤箱靠近聚光镜的一侧，侧板可沿竖直方向升降，既保证光线可顺利照射到聚光区，又避免月壤遗撒到月壤箱外部。“月壤砖”成型过程中通过作业机器人向月壤箱中添加月壤，然后通过二维滑轨调整月壤箱的位置，进而将月壤送至聚光区，实现月壤的熔融成型。根据“月壤砖”的截面积及每次可有效熔融的月壤厚度选择聚光镜的口径。当聚光镜的口径不能满足“月壤砖”成型截面要求时，可将二维滑轨改造为三维滑轨，以实现熔融平面内的分区成型。一块“月壤砖”成型完成后，通过作业机器人取出，并根据需要进行必要的整形，然后开始下一块“月壤砖”的熔融成型，未来可搭建相应的“月壤砖”熔融烧结生产线。

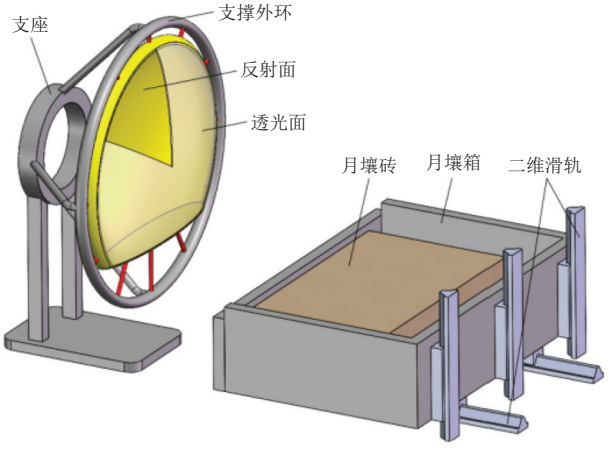

图 8 太阳光汇聚实现月壤砖成型的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of formation of sintered lunar soil bricks with concentrated sunlight

2.6 植物培育设备

植物培育设备是保证人员在月面中长期驻留的重要设备。在“嫦娥四号”进行了棉花培育的尝试[19-20]，把地面的土壤、水分、种子等带到月面，利用月面适当的月昼条件，实现了种子发芽，但由于资源有限，培育过程难以适应月夜的极低温条件，因此在月夜来临之前结束了相关的培育工作。针对地外天体表面的植物培育，在地面也开展了大量的模拟研究工作[21]，这些都为未来月面生物的培育奠定了良好的技术基础。

为实现月面植物的长期、连续、有效的培育，需解决一系列的问题，例如温度控制、阳光照射、月壤改良、水分供给、压力保持、空气成分调整与保持等，需要从系统的角度出发去思考这些问题的解决方法。

进一步探索的思路是：可采用类似地面构建温室大棚的方法，构造出植物培育密闭标准单元（以下简

称标准单元），如图9所示，参考尺寸长宽高2 m × 1 m × 1.5 m，标准单元盛放有改造后的月壤，其厚度不小于0.3 m，满足一般蔬菜类植物的生长需要。

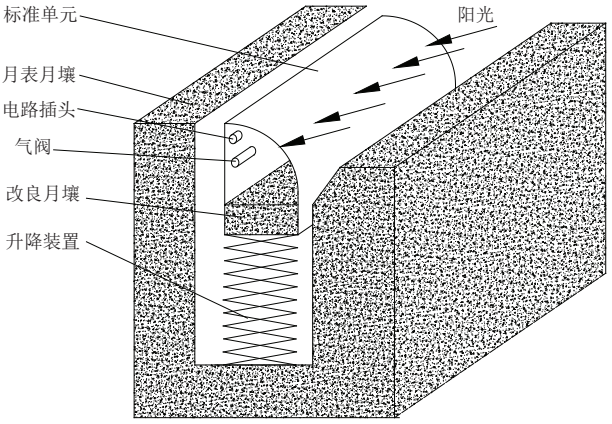

图 9　生物培育标准密闭单元
Fig. 9　Biological cultivation standard enclosed unit

标准单元的顶部弧形板为双层真空透明亚克力板，实现承压、透光及保温。左右侧板、前后侧板及底板可以是带有保温层的金属板，保证相应的承压刚度以及密封、保温需要。在侧板设有气阀及电路插头，满足标准单元打开、关闭、气体成分调整时充放气的需要以及供电、信号采集需要。后侧板可拆卸，以满足种植（养殖）、收获及标准单元密封的需要。在标准单元内设有模拟太阳光的照明灯，方便在月夜期间对生物照射、加温。同时在标准单元内还布置相应的传感器，感知相应的气体成分及温湿度等物理参数。不同的标准单元可以培育不同的生物。

考虑到在月表以下一定的深度范围内，温度具有一定的稳定性，可行的温度控制措施之一就是挖“地窖”或借助月面相应的沟壑，通过进一步修整，形成相应的“地窖”。月昼期间，通过升降平台实现标准单元的调整，进而实现对阳光的吸收及温度的初步控制。月昼高温阶段或月夜期间将标准单元降到“地窖”的底部，来实现保温，同时通过模拟阳光的照明灯对生物进行光照，并根据需要进行一定的加温控制，满足生物对光照及温度的需要。为进一步保证月夜期间的温度要求，可以通过作业机器人，利用柔性防热材料将“地窖”口遮盖。

压力保持通过舱体的密封即可实现。在收获时为防止空气及水分的过多散失，可将整个标准单元转移到柔性密闭结构，然后再打开标准单元的气阀放气，压力平衡后打开标准单元进行收获及再种植。也可以通过气阀及相应的气泵将标准单元的气体抽入另一个空置的标准单元，待目标标准单元的压力达到期望的数值后，打开气阀放掉残余的气体。种植完成后通过气泵与气阀将相应的气体再次充入目标标准单元，这样可有效实现资源的循环利用。空气成分的调整与保持也通过气阀完成。

月壤改良及验证问题可在地面利用取样返回的月壤来解决。水分的供给是制约生物培育的关键问题，必须首先解决月面水的勘查与提纯，否则，通过从地面携带水源来供给月面生物的培育需要是不现实的。但到目前为止，月面水的存在尚未获得原位证实，因此，月面水的勘查与提纯还有待进一步探索研究。

3　月球科研站设备的协同工作

通过对以上关键月球科研站设备的功能、组成特点的讨论分析可知，月球科研站设备的月面投送与运输，需要通过月面公共缓冲与运输平台等运输工具来完成，同时，设备相应功能的实现离不开能源的供给及作业机器人的协助。因此，要充分发挥各月球科研站设备的功能，提高工作效率，进而拓展各月球科研站设备的能力边界，实现系统能力的最大化，需要各系统组成一个有机的整体，在月面开展有效的协同工作。

3.1　协同工作面临的问题

受月球南极诸多复杂环境因素的影响，例如未尽知的月面形貌、松软月壤、细小月尘、低重力、超低温等，导致月球科研站设备在月面协同工作过程中面临如下问题。

感知偏差大。月球南极月面非结构化环境的光线遮挡、低温环境、月尘累积等因素的干扰与影响，将导致感知传感器如激光雷达、视觉相机的精度降低，感知偏差增大，进而导致不同设备的传感器对同一物理量的感知数据不一致，设备之间的协同难度增大。

作业精度低。松软月壤及月面低重力的影响，设备协同作业过程中易出现沉降、打滑、姿态失控等问题，进而导致协同抓取/装配的精度降低，控制难度增大，甚至导致协同作业失败、中断等严重后果。

通信不稳定。月球科研站构建早期，月面无固定通信基础设施，加之月面形貌未尽知，在月面阴影坑内工作的设备，通信信号易受遮挡、干扰而中断或延迟，由此导致设备间无法实现作业状态及环境信息的同步实时更新，难以形成合理、有效的协同作业。

路径规划难。月球科研站构建初期，无预设地图，月面相应障碍物的动态分布未尽知，多个设备协同过程中面临障碍随机以及相互碰撞的实时规避困难、操作目标特性未尽知等问题。因此，在月面有限

信息资源下传统路径规划算法难以应对“规划效率”与“有效避碰”之间的矛盾。

月夜能源供给困难。月面存在长达约14个地球日的月夜，期间月球科研站设备无法依靠太阳能供电，现有能源技术难以保障协同工作的月球科研站设备月夜工作的能源供给。因此，月夜能源供给是制约月球科研站设备独立及其协同工作的关键问题。

3.2 建议的应对措施

多措施并举提升感知可靠性。对于协同工作的设备采用多传感器融合，如采取激光雷达、视觉、IMU惯性测量单元等多传感器组合感知，通过感知数据的互补提升测量精度。同时采取相应的擦拭、抖动防尘及相应的加热防低温措施保障传感器的灵敏性，减小感知偏差。

提升月球科研站设备触月面积及附月能力。对于关键设备的关键作业环节，进一步通过轮（足）–爪（趾）相结合的触月方式，增大设备对月面的附着力，降低设备在松软月面的沉降深度。结合轮（足）与月表的触觉或力传感器信息，开展接触动力学特性辨识及分析，为相应作业的实施决策提供客观数据。

构建多级通信网络。通过地面通信站、地月中继卫星、月球轨道器、月球科研站设备之间的不同组合实现信息传递，形成“地面+地月中继+月球轨道+月面”的多级通信链路，同时提升设备的工作自主性，使得部分数据的处理由设备自身完成，降低对通信的依赖，减少通信遮挡或中断的影响。

路径规划模型学习训练。在地面模拟月面复杂场景，如月面光照、光线遮挡、月尘覆盖、相关障碍物及作业对象特性等多因素的影响，并通过构建相关学习模型，进行作业设备的强化训练，在训练过程中兼顾效率与协同安全的平衡。

构建月夜能源协同供给系统。在月球科研站构建初期，通过蓄电池、同位素温差电源等的协同工作，为月夜期间的设备供电、保温，确保设备能够在月夜可靠生存。月球科研站构建、运营后期，在大规模核电设施在月面构建完毕，或月球轨道能源星座构建完毕后，可利用月面核能或通过激光传输月球轨道太阳能的方式，持续稳定地为月球科研站设备提供能源，使得月球科研站设备在月夜的有效协同工作成为可能。

4 结束语

本文在对关键月球科研站设备类别及组成分析梳理的基础上，指出了关键月球科研站设备研究与应用面临的共性问题，给出了典型月球科研站设备的功能特点、工作模式与结构组成，进一步分析了设备之间协同工作的必要性以及协同工作面临的问题，并给出了应对策略。为保障月球科研站构建等重大任务的顺利实施，未来研究应加强以下几方面的工作：

1）在深入开展顶层规划的同时，进一步加强国际合作，以更好地集中多方优势力量攻克关键共性问题；

2）根据月球科研站设备需求的迫切性不同，制定针对性的研究计划，逐一突破各月球科研站设备关键技术，为工程研制的全面实施奠定技术基础；

3）从系统层面把握不同月球科研站设备之间功能与性能的匹配性，在保证单一月球科研站设备性能可靠的同时，通过系统级的冗余设计、设备之间功能的相互支撑与协同作业，拓展月球科研站设备的系统能力，实现月球科研站设备系统级功能与性能的最优化目标。

参考文献

[1] VONEHRENFRIED M D. The Artemis lunar program：returning people to the Moon[M]. Chichester：Springer，2020.

[2] 国家航天局. 国际月球科研站合作伙伴指南[EB/OL]. (2021- 06-16)[2024-02-05]. https：//www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6812148/content. html.

[3] 裴照宇，王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想[J]. 宇航学报，2024，45(4)：625-637.
PEI Z Y，WANG Q. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. Journal of Astronautics，2024，45(4)：625-637.

[4] 吴伟仁，于登云，王赤，等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(3)：223-231.
WU W R，YU D Y，WANG C，et al. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(3)：223-231.

[5] 杨建中，吴琼，于登云，等. 无人月球科考站构建与运行关键技术初探[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(2)：111-117.
YANG J Z，WU Q，YU D Y，et al. Preliminary study on key technologies for construction and operation of robotics lunar scientific base[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(2)：111-117.

[6] 冯永玖，唐盼丽，陈书睿，等. 月球科研站关键区域智能选址及其典型环境要素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2024，52(8)：1163-1170.
FENG Y J，TANG P L，CHEN S R，et al. Analysis of typical environmental elements in intelligently selected regions for international lunar research station[J]. Journal of Tongji University(Natural Science)，2024，52(8)：1163-1170.

[7] 潘文特，于泽峰，王继先. 极端热环境下驻人月球科研站形态选型研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(8)：146-152.
PAN W T，YU Z F，WANG J X. Research on morphological selection of manned lunar research station in extreme thermal environment[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Natural

Science Edition)，2024，52(8)：146-152.

[8] 裴照宇，彭兢，张明，等. 月球科研站能源系统关键技术及发展趋势[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8689-8701.
PEI Z Y，PENG J，ZHANG M，et al. Key technologies and development trend of power system for international lunar research station[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(22)：8689-8701.

[9] 张天，唐红，贺怀宇，等. 月球水冰资源综合开发技术研究概况[J]. 空间科学学报，2023，43(2)：273-290.
ZHANG T，TANG H，HE H Y，et al. Review of comprehensive exploitation technology of luna water ice resource[J]. Chinese Journal of Space Science，2023，43(2)：273-290.

[10] 科技日报. 中国首个充气式柔性密封舱完成在轨飞行验证[EB/OL]. (2024-11-21)[2025-7-1]. https：//www.stdaily.com/web/gdxw/2024-11/21/content_ 261908.html.

[11] 刘卫，张朴真，杨建中，等. 一种大承载的着陆缓冲行走一体化机构及其并联系统：中国，202211212171.1[P]. 2025-03-21.
LIU W，ZHANG P Z，YANG J Z，et al. A large-load-bearing landing buffer walking integrated mechanism and its parallel system：China，202211212171.1[P]. 2025-03-21.

[12] 邹永廖，欧阳自远，徐琳，等. 月球表面的环境特征[J]. 第四纪研究，2002，22(6)：533-539.
ZOU Y L，OUYANG Z Y，XU L，et al. Lunar surface environmental characteristics[J]. Quaternary Sciences，2002，22(6)：533-539.

[13] 程云志，程彬，宝音贺西. 微波加热开采月球水冰仿真研究[J]. 空间科学与试验学报，2025，2(3)：56-64.
CHENG Y Z，CHENG B，BAOYIN H X. Numerical simulation of lunar water ice extraction using microwave heating[J]. Journal of Space Science and Experiment，2025，2(3)：56-64.

[14] 石化联合会化工新材料专委会. “玉兔”，“嫦娥”都会用到它，一种高性能材料—聚酰亚胺[EB/OL]. (2025-07-01)[2019-01-15]. https：//mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzAxMzE1MDA0Nw==&mid=2650771261&idx=1&sn=c94f6e1fdc20a240aa29c05a49565239&chksm=83addd0db4da541b3e1686783f98edf5a235a763a80eab0688cd1815088b3bcb3a27778e34a2&scene=27.

[15] 王志浩，马子良，田东波，等. 基于激光烧结升温特性分析的月壤原位成型技术研究[J]. 装备环境工程，2020，17(3)：65-70.
WANG Z H，MA Z L，TIAN D B，et al. Lunar soil in-situ forming technology based on analysis of sintering temperature rising characteristics with laser irradiation[J]. Equipment Environmental Engineering，2020，17(3)：65-70.

[16] 张日晗，王统才，李亮，等. 面向月面原位制造/建造的月壤成型利用技术综述[J]. 宇航学报，2024，45(6)：815-830.
ZHANG R H，WANG T C，LI L，et all. In-situ manufacturing and utilization of lunar regolith for fabrication/construction on the lunar surface：a review[J]. Journal of Astronautics，2024，45(6)：815-830.

[17] 刘琛，李勇，周文，等. 模拟月/火星壤的原位成型技术研究进展[J]. 材料导报，2022，36(22)：10-16.
LIU C，LI Y，ZHOU W，et al. In-situ forming technology of lunar /martian soil simulant[J]. Materials Reports，2022，36(22)：10-16.

[18] 童小华，袁烽，郑虎，等. 月球资源勘测与原位利用进展及关键挑战[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2024，52(8)：1151-1162.
TONG X H，YUAN F，ZHENG H，et al. Progress and key challenges of lunar resource exploration and in-situ utilization[J]. Journal of Tongji University(Natural science)，2024，52(8)：1151-1162.

[19] 董卓益. 基于热电制冷技术的月面微型生态圈热控设计研究[D]. 重庆：重庆大学，2019.
DONG Z Y. Research on thermal control design of lunar micro-ecosphere based on thermoelectric refrigeration technology[D]. Chongqing：Chongqing University，2019.

[20] CASTELVECCHI D，TATALOVIĆM. Plant sprouts on the Moon for first time ever[J/OL]. Nature，2019，571(7763)：30657745. https://www.nature.com/articles/d41586-019-00159-0.

[21] 谢更新，梅闯，丁靖航，等. 基于地外星球洞穴构建密闭受控农场研究[J]. 华中科技大学(自然科学版)，2024，52(8)：101-112.
XIE G X，MEI C，DING J，et al. Research on construction of enclosed controlled farm based on extraterrestrial lava tubes[J]. Huazhong Universty of Science & Technology(Natural Science Edition)：2024，52(8)：101-112.

作者简介：

杨建中(1969－)，男，研究员，主要研究方向：航天器机构技术。**本文通信作者**。

通信地址：北京5142信箱365分箱(100094)

电话：(010)68745722

E-mail：jzyang1234@sina.com

Key Equipment for Construction and Operation of Lunar Research Station

YANG Jianzhong[1]，PAN Bo[1]，LI Linling[1]，LIU Wei[1]，XU Zhaodong[2]

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

2. School of Civil Engineering，Southeast University，Nanjing 210096，China）

Abstract： With the development of lunar exploration technology and continuous advancement of lunar exploration program，it has become a consensus among major space powers or organizations to build a lunar research station in future. First，common issues facing in the research and application of key equipment required for the construction and operation of the lunar research station were expounded. Then main categories，basic functions，and compositional characteristics of key lunar equipment were discussed and elaborated，in conjunction with the urgency of related equipment needs，technical feasibility and technological maturity. Furthermore, the issues faced by these devices working in synergy were addressed and countermeasures were proposed，providing a reference for the research，development，and application of related equipment.

Keywords： lunar research station；lunar exploration；residency；lunar equipment

Highlights：

- The main categories，basic functions，and compositional characteristics of key lunar equipment are discussed，in conjunction with the urgency of related equipment needs，technical feasibility and maturity.
- In the development process of key lunar equipment for the lunar research station，while developing top-level planning, international cooperation and integrating the strengths of multiple parties can overcome common key problems.
- Develop targeted research plans based on the urgency of lunar equipment，break through key technologies of each piece of lunar equipment one by one，and lay a technical foundation for comprehensive implementation of engineering research and development.
- With expanding system capabilities of the lunar equipment through system level redundancy design，mutual support and collaborative operation of device functions，the optimization of lunar equipment system level functions and performance can be achieved.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]