

五、项目研究结题报告

火星基地的设计及 3D 打印

张瀚琪，屠远，张展博，张戈

裘俊 副教授，博士生导师

【摘要】该项目旨在研究在火星上建设基地的可行性和详细步骤，流程化地描述基地建设方案、发展轨迹和一系列延伸内容，并对关键建筑及器物进行 3D 打印。该项目以大量文献和图像资料为基础，利用建筑学和理工科知识，通过科学的逻辑推理与合理的想象创新，提出相关方案。成员们设计了火星基地建设的五个阶段，即“火星五步走”：无人探测与科考、初期基地建设、小规模火星社区、火星城市、火星地球化；火星基地的选址及建筑方案；两种主要的无人机器人：探测用风滚草机器人、综合型模块化机器人；三个科学系统：能源系统、生命保障系统、原位资源利用系统；火星太空法，组合形成了一个较完善的设计方案。综合可得出，火星具有长期居住的可能性，而此项目给出了一个相对可行的发展计划。

【关键词】火星基地；火星五步走；总体方案；3D 打印

1.课题背景

1.1 我们为什么要扩大家园

天文学家卡尔·萨根写过一篇优美的散文《暗淡的蓝点》：

人类为自身的文明成就感到骄傲，然而从宇宙的视角来看，我们存在的全部辉煌历史和人间一切的悲欢离合，都不过是在一颗微不足道的“暗淡蓝点”上演绎而已，地球如此渺小脆弱，只是在广袤宇宙中漂浮的一粒微尘。全球变暖、核战争、变异的流行病毒、小行星撞击...种种灾难性的事件，都可能把这个暗淡的蓝点从太空中抹去，让人类难逃灭亡的厄运。

在互联网管理中，任何数据中心都不会只集中部署在一台服务器上，而是采用有多点灾备系统的分布式网络部署，这样才能避免出现“单点失效”（Single Point of Failure）的风险，从而使得整个网络服务更为可靠。

类比于此，我们也应当意识到，在发生过数次物种大灭绝发生的地球上，人类要维持较长甚至永恒的繁衍，唯一的选择就是走出家园，寻找“另一个装鸡蛋的篮子”。人类必须勇敢地迈出地球的摇篮，将自己的足迹踏上其它的星球，成为跨行星物种。太空探索是为人类购置的一项长期保险，是我们新的诺亚方舟，只有当我们在宇宙中的存在从单点变成网络时，人类才有可持续的未来。

有人不解，地球上充斥着各种灾难，疾病，饥饿，战争，为什么不能把目光稍微从遥远的天空移到我们身边，专注于解决好地球上的矛盾？对此，历史可以给我们答案，15 世纪土耳其垄断了东西方的贸易路线，欧洲人无论是在陆路上还是海路上均已被土耳其封死，欧洲成了一个闭塞的区域。试想当年哥伦布等到欧洲变成太平盛世才开始探险的话，他永远也发现不了新大陆。“如果我们要等到地球上的全部问题都解决再前往火星的话，那么人类永远也到不了火星”（埃隆·马斯克），开拓新边疆所带来的希望，才会反过来帮助我们改变旧世界。

太空是人类尚未开发的巨大宝库。

太空中可利用的资源比地球上可利用的资源要多得多。仅从太阳系范围来说，在月球、火星和小行星等天体上，有丰富的矿产资源，在类木行星和彗星上，有丰富的氢能资源；在行星空间和行星级空间有真空资源、辐射资源、大温差资源，那里的太阳能利用效率也比在地球上高得多。利用航天器的飞行，还可派生出轨道资源和微重力资源等。

月球表面不仅储存有丰富而清洁、安全的核聚变燃料氦3，而且还富含硅、铝、钙、钠、铁等元素矿物资源；在一些小行星上发现了丰富的铁、镍、铜等金属和宝贵的稀土元素，特别是在月球和火星上，探测到存在大量水冰，储量有上亿吨。

英国探险家乔治·马洛里生前被问及为何要攀登珠穆朗玛峰时（马洛里后来在尝试攀登珠峰途中丧生），他简练地说道：“因为它就在那儿”。如此荡气回肠的回答，已经成为了探险家们的标志。

航天事业的发展，也昭示着人类仍存有的像孩子般的好奇心和民族的探险家精神。作为一个物种，“起初他小心翼翼地穿过大气层，然后便去征服太阳系”（齐奥尔科夫斯基）。

最后，引用习近平总书记的一段话：

发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦。希望同志们总结经验、再接再厉，精心做好各项后续工作，确保任务取得全面胜利，在实现航天梦的征程中谱写新的壮丽篇章。

1.2 火星概述及宜居性讨论

在太阳系中，火星是独一无二的，因为它不仅拥有支持生命所需的所有原材料，而且拥有人类文明的新分支所需的所有原材料。将火星与月球进行比较，这就会最清楚地体现这种独特性。

与月球相比，这颗红色星球富含碳，氮，氢和氧，且都以生物可获得的形式出现，例如二氧化碳气体，氮气，水冰和永久冻土。而除了在超低温的永久性阴凉极地陨石坑，碳，氮和氢仅以百万分之一的数量存在于月球上，氧在月球上含量丰富，但只以氧化物的形式存在，如二氧化硅（SiO₂），氧化亚铁（Fe₂O₃），氧化镁（MgO）和氧化铝（Al₂O₃）。有研究表明，如果火星所有的冰和永久冻土都融化成液态水，整个行星将被超过100米深的海洋覆盖。而对比之下月球非常干燥，如果植物可以在月球上的温室中生长（这是一个不太可能的提议），那么大部分生物质材料将需要进口。

月球还缺乏工业社会需要的大约一半的金属（例如铜），以及许多其他的元素如硫和磷。而火星拥有丰富的所有必需元素。此外在火星上发生了类似地球上的水文和火山过程，这些过程很可能将各种元素整合到了当地高品位矿石的浓度中。相比之下，月球几乎没有水或火山作用的历史，它基本上由垃圾岩组成，几乎没有分化成矿石。

我们可以使用太阳能电池板在月球或火星上发电，月球比火星更清晰的天空和更接近太阳的优势大致平衡了月球28天光明/黑暗周期产生的大储能需求的缺点。但是如果想制造太阳能电池板，从而创造一个自我膨胀的电力基地，火星拥有巨大的优势，因为只有火星拥有生产光伏电池板和其他电子产品所需的纯硅所需的大量碳和氢供应。此外，火星具有月球显然不具备的风力发电的潜力。氘在火星上的常见度是地球上的五倍，是月球上的数万倍。从长远来看，火星将享有电力丰富的经济，其基础是利用其用于聚变反应堆的大量氘燃料。

火星大气层足够保护地表生长的作物免受太阳耀斑的影响，由无压抗紫外线硬塑料屏蔽圆顶保护的薄壁充气塑料温室可用于在火表上快速开垦农田。但对于无大气层的月球，假设没有太阳耀斑和长达一个月的昼夜周期的问题，仅从温室效应产生的高温来说，这种简单的温室也是不切实际的。相比之下，在火星上，这种圆顶产生的强烈温室效应正是在内部产生温带气候所必需的。

与任何其他已知外星体上的殖民者不同，火星殖民者将能够生活在地表，而不是隧道中，并在白天自由移动并种植庄稼。火星是一个人类可以生活并大量繁殖的地方，用由本土材料制成的各种产品来支持自己。因此，火星是一个可以发展实际文明的地方，而不仅仅是一个采矿或科学前哨。

对于我们这一代人，以及即将到来的人来说，火星就是新世界。

1.3 各国探火登火计划现状

在 2018 年 6 月 10 日，机遇号火星漫游车停止工作，留下火星科学实验室，也就是好奇号和毅力号继续在火星上工作。同时，在轨道上还有 2001 火星奥德赛号、火星快车号、火星侦察轨道卫星、火星轨道探测器、火星大气与挥发物演化任务和火星微量气体任务卫星 6 搜航天器。固定在表面的“洞察号”正在调查火星的深层内部。没有试图前往火星的标本返回任务。

另有 4 个火星探测项目正在进行，包括美国宇航局的火星 2020 探测车任务、中国的天问一号、阿拉伯联合酋长国的希望号火星探测器和印度的火星轨道探测器 2。而俄罗斯和欧洲空间局合作的 ExoMars 罗莎琳德·富兰克林探测车将推迟至 2022 年发射。

未来的火星基地建设任务计划如下表：

国家	计划提出时间	预计实现时间
美国(马斯克)	2017	2024
俄罗斯	2005	2030
日本	2016	2040

表 1 未来火星基地建设任务计划时间表

2. 课题研究内容与方法

本项目主要研究在火星上建设基地的可行性和具体步骤，梳理整合出完整的火星基地建设的流程与脉络，在大局上把握基地建设与发展的方向，对部分关键节点与体系进行深入研究与探讨，并将典型建筑和器物建模，以 3D 打印实体的形式呈现。

由于火星基地的建设是一个相对漫长的过程，未来可能发展出更优越、更合适的科学技术，本项目将在现实的基础上，进行合理的逻辑推理与想象，以求给出更完善、具有前瞻性的基地建设方案。且火星环境有别于地球，本项目将在查阅整理大量学术论文、相关书籍的基础上，开展课题研究。

3.研究结果

3.1 “火星五步走”战略



图 1 “火星五步走”概念图

第一阶段：技术准备阶段

无人探测与科考

目的：支持长时间、较大规模的无人自主科学探测和初期的火星资源利用实验，确定基地选址，便于制定并完善后续有人基地建设方案，建立小型火星科研站。

周期：约 2030s

概述：以人类已经发射过的火星探测器收集数据为理论支撑，选定若干着陆点，以月球基地作为探索的前哨基地，从月表发射多组火箭，搭载多种类探测机器人（陆地机器人、飞行机器人）、能源、科研设备及仪器等，对着陆点及其附近宜居性进行深入细致的考察（如地下管道分布、水文体系、辐射强度、土壤成分分布等），尤其是熔岩管体内部的考察，通过对传回的大量数据和取回样品的分析，确定初期基地选址，制定完善下一步基地建设具体方案，在着陆点建立小型科研站，完成长期探测任务。

核心组成：

科学探测/实验平台：“天问”系列探测器，火星探测机器人

能源系统：光伏太阳能发电站，制氢储氢可再生发电技术，放射性同位素温差发电，氢氧燃料电池

关键技术：

初级原位资源利用技术：采样和原位分析，氧气制备

通信与信息技术：基地局部的通信/传导/遥感，机器人遥感操作，多机器人协作

能源保障技术：制氢储氢可再生发电技术

环境保障技术：极度寒冷、沙尘暴等极端环境的设备安全保障

地面模拟和实验技术：火面综合环境试验系统，研究火星基地装备长期服役失效机理与寿命预测

第二阶段：载人火星计划

基地建设初期及完善

目的：开展载人登火等技术实践，扩展火星科研站，满足至少 2 名航天员 26 个月以上（地火霍曼转移轨道窗口期）的值守，完成基地长期自主运行的目标，服务大规模火星开发和进一步火星探索。

周期：2040s~2060s

概述：选拔地球上或驻月球基地中 3~4 名先锋航天员支援火星基地建设并短驻火面基地，同时携带大量工业机器人、食物、能源、生活物资、仪器设备（需详细列出实物清单，如太阳能板、水泵等），开始若干月以火箭本身为临时居住所，搭建地表能源设备，在熔岩管体内建设短期内（至少两年）能实现自给自足的基地生态。

核心组成：

居住系统：居住舱，实验舱（包括温室植物栽培等）

能源系统：光伏太阳能发电站，制氢储氢可再生发电技术，放射性同位素温差发电机，氢氧燃料电池，核能多能互补发电、冷-热-电联供

交通系统：载人增压移动车

科学探测/实验平台：火星探测车

关键技术：

载人登火技术：大推力运载火箭和登火系统总体设计

能源保障技术：太阳能与制氢储氢多能互补发电系统，冷-热-电联供技术

生命保障技术：火面极端环境下航天员健康保障，可再生生命保障系统，高效率的水和氧气循环回收利用技术

设备安全保障技术：火面极端环境下设备损耗减免

通信与信息技术：高宽带/连续/大范围通信与导航、人机协作，商业化行星际互联网，一体化通信与导航

高级原位资源利用（ISRU）技术：火星极地水、氧、推进剂开发技术大规模验证和系统集成，大气水吸附技术，商业品原位制造

原位建造技术：火面挖掘与平整，土壤 3D 打印

第三阶段：火星移民的技术实践

小规模火星社区

目的：开展火星移民技术实践，拓展初期基地为小规模火星社区，满足较多移民（10~1000 人）在火星长期稳定生存的需求，控制机器人完成资源采集任务，为最终形成地球-月球-火星经济圈做铺垫。

周期：2060s~2100s

概述：在拥有成熟的载人往返技术且基本建成初期基地后，在较长的一段时间里，露天任务将主要由机器人承担，基地中的居民负责整合调控机器人的工作，并将基地拓展为拥有相对完善的机器人维护及控制体系的火星社区。同时根据已勘探的火星各类资源的分布情况，设置相应的资源采集点，获取可靠的新能源资源及矿产资源。

核心组成：

居住系统：居住科研单元群落，微生态系统

能源系统：太阳能与制氢储氢，核能多能互补发电和冷-热-电联供

交通系统：载人增压移动车，火表地形车，航班化发射平台

工业系统：原位资源开采、提炼和存储设施

科学探测/科学平台：火表科研站，天文观测站等

关键技术：

高级运输技术：将航天员和大型货物运送到火星表面的 EDL 系统以及成熟返回系统

能源保障技术：钍核反应堆技术, 冷-热-电联供技术, 太阳能与制氢储氢, 核能多能互补发电系统

生命保障技术：宜居环境设计与维护, 火星土壤无害化技术

第四阶段：地球-月球-火星经济圈形成阶段

火星城市

目的：火星探索后期阶段，通过前期火星社区的建设铺垫拓展为火星城市，大规模接纳地球移民，并且使火星环境得到改造，使其满足人类长期生存居住的要求。使人类文明能够在火星上延续，并衍生出新的火星人类文明。

周期：21世纪末~22世纪

概述：火星五步走的后期，在不污染环境的前提下，以经济、可扩展的方式在火星上建立火星城市，以实现火星上的可持续发展。火星城市预计能容纳1万火星住民；该城市在具备优良的抗辐射、抗尘暴、抗低压的基础上，能几乎完全实现资源和能源的自给自足。从整体看，火星城市类似于一个成功的生物圈2号。

核心组成：

交通系统：hyperloop 超级高铁、航班化发射平台

城市系统：多区位联动的人居社区、工业社区、农业社区

关键技术：

高级运输技术：hyperloop 超级高铁技术

能源保障技术：可控核聚变技术, 钍核反应堆技术, 高转化效率的光热电材料

电力损耗减免技术：常温超导材料

第五阶段：火星地球化

火星上的地球文明

目的：将火星彻底改造为适合人类生存的星球。

周期：未知

概述：火星将成为人类第二个真正的家园，通过核弹爆炸、聚光升温、温室效应等途径升高火星大气温度，大范围改变火星环境，使地表富集水冰融化，流经地表形成河流湖海。

3.2 基地选址分析

3.2.1 水资源分布

火星本身有着足够丰富的水资源，现场采集是更经济合理的方法。

南北极和中纬度地区分布着大量水冰。南北极冰盖的水冰部分裸露在地面，易于获取；

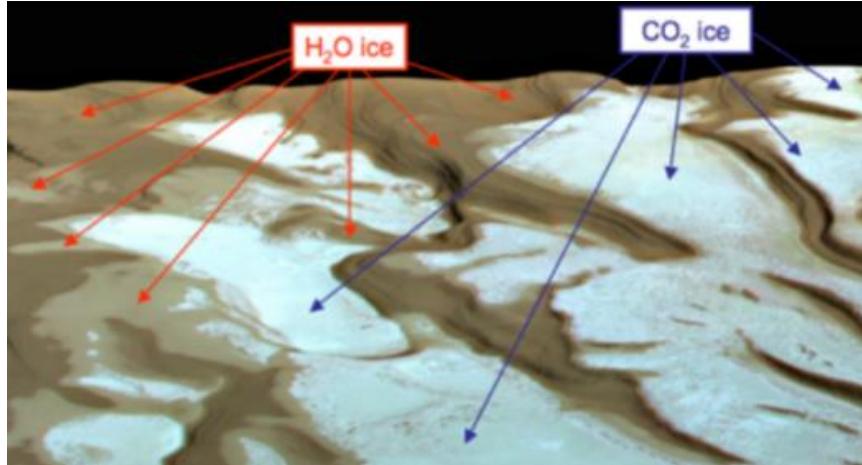


图 2 极冠中含有水冰和二氧化碳干冰

而中纬度地区的水冰资源主要集中在地下约 1~2 公里处，初期采集较困难，需利用特殊钻头。

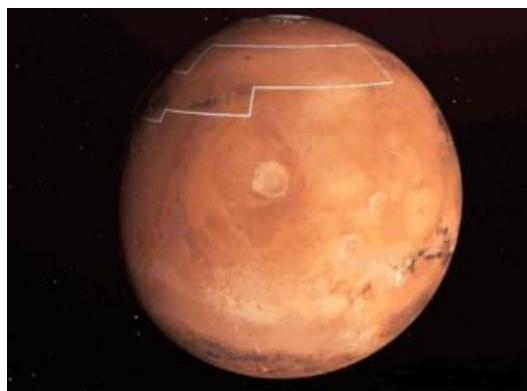


图 3 火星表面水冰分布图

如图，白色框出的区域为 NASA 飞船发现近地表水冰的地方，水冰在此埋藏较浅，人类可以简便采集。

火星地下可能是由混合有火山熔岩流的撞击坑溅射物组成的。这些熔岩大概率为玄武岩质。火星地下岩石也被认为由于撞击和构造扩张而发生了破裂和角砾化，深达 10-20km。由于星壳层不能通过板块构造来进行反复循环，因此，这些破裂目前应仍是蓄水的水库。据科学判断与估计，永冻层是存在的，它们在两极厚达 8km 左右，而在赤道则厚约 3km。火星基地地下部分或可利用。

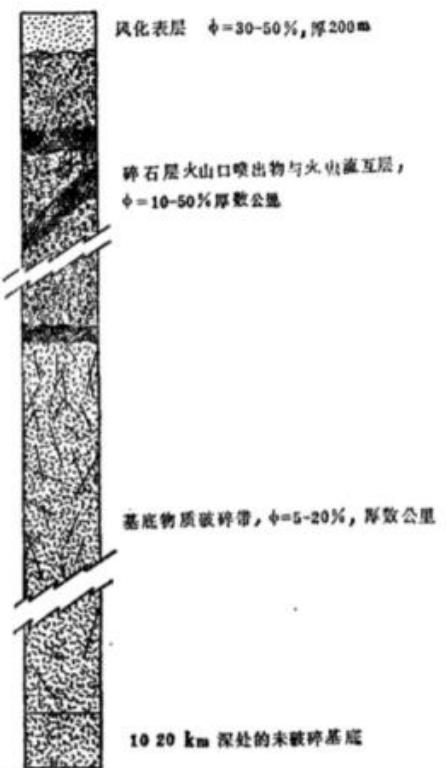


图 1 火星的综合地层柱状图
(据 S.M.Clifford, 1980)

图 4 火星的综合地层柱状图

水资源在火星土壤中含量也较为丰富。但是在不同区域含水矿物的数量也有区别。

根据火星快车在近红外的探测，火星的含水矿物主要分布在水手谷（Valle Marineris）南北热带区间，伊希底斯盆地（Isidis Planitia）和环海拉斯（Hellas）火山省区域，以及塞壬高地（Terra Sirenum）。

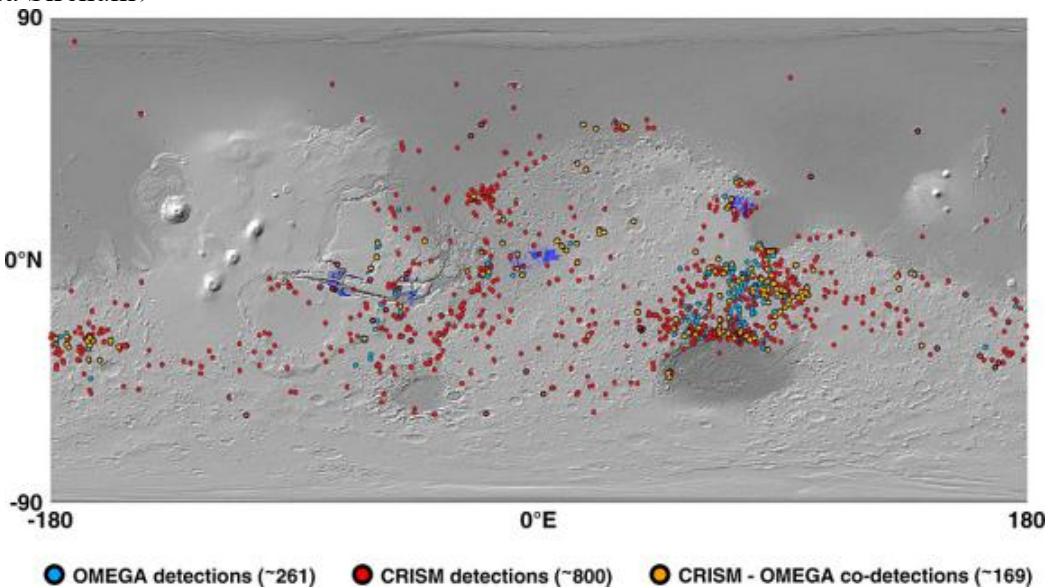


图 5 火星含水矿物探测全球地图

3.2.2 矿物资源分布

火星土壤表面成分分布也影响着基地的选址。

目前火星上探测到的含水矿物主要有层状硅酸盐（黏土矿物为主）、水合二氧化硅、硫酸盐、碳酸盐等，主要分布在南部高地。裸露在地表的含水矿物以黏土矿物为主，目前已观测到黏土矿物中最为常见的是层状铁镁硅酸盐，其次为绿泥石、高铝黏土。

火星撞击坑中有容易获得的含铁/镁层状硅酸盐（如蒙脱石、云母、绿泥石、葡萄石和蛇纹石）、含铝层状硅酸盐（如高岭石）和水合二氧化硅等物质，可用于提取金属材料，用于建造舱室、作为设备维修替换材料等。

火星表面主要含水矿物全球分布见图 5。

3.2.3 大气

火星低层大气特征温度约为 200K，而表面白昼温度可达到 250K，近地表能量传输依靠对流。而由于火星大气极度稀薄，火星昼夜温差极大。火星大气的主要成分为二氧化碳，有少量氮气氧气和水。由于火星大气环境并不存在区域性差异，对选址影响不大，但可以通过检测大气的 CH₄ 含量来判断火山活动甚至生物活动。

火星大气中的水主要由极冠贡献。水在极冠和大气间季节性输送，导致不同半球含水量不均，并通过土壤吸收水分来平衡。土壤中水源的可能存在为居住地水资源自给增加了可能性。

3.2.4 气候条件

与地球相似，火星气候总体差异是沿纬度产生的。

低纬度的光照充足，有利于太阳能发电，温度更高相对更舒适，近日点附近，正午赤道温度可达 290K，温度随纬度增加而降低。

火星也有分明的四季，同时北半球的夏季对应远日点，南半球的夏季对应远日点。火星上风的诱因主要是：季节，尘暴和日变化。火星全球性风暴发生在近日点附近，即北半球处在冬季时。这种季节性的尘暴常发生在极冠边缘地区，哈德莱环流的上升支流携带尘埃，加热大气，进而可能产生全球性风暴。而火星南半球中纬度早春到到早秋，旋风活动常见，通常是区域性的。

根据气候环境，可以得出北半球中低纬度和南半球低纬度区域比较适合建设设施。另外，考虑到温度因素，火星科考及生产活动一般可能选择夏季，而在北半球的夏季可以避免全球性风暴。

3.2.5 交通

居住地周围应当平缓，否则将不利于地表载具活动。

第一批火星殖民聚居地主要考虑天地运输需要。发射场的纬度越低，越节约发射能源。对于火星而言纬度低意味着发射低倾角航天器更容易，有利于前往火星卫星和行星际飞行。

3.2.6 通讯条件

通讯方面，在人类登陆火星的初期，居住地数量较少，距离较近，地面通讯可采用有线传输，也可以避免火星气候的影响。

天地通讯则可以考虑在静止轨道，拉格朗日点上设立中继站。由于火卫一和二轨道倾角均在 1° 内，能够保证全天候通讯条件，也可以选择在卫星上设置通讯中继。这三种方法都要求居住地尽量地靠近赤道。

3.2.7 能源

核燃料可以考虑采用火星本土的钍元素。钍经过中子轰击可得到铀-233，可以作为一种潜在的核燃料。能否应用火星本土的原料进行核反应，这也依赖于核能技术的发展。主要分布在北方大平原、阿西达里亚平原、伊希底斯盆地以及南半球达达里亚平原。

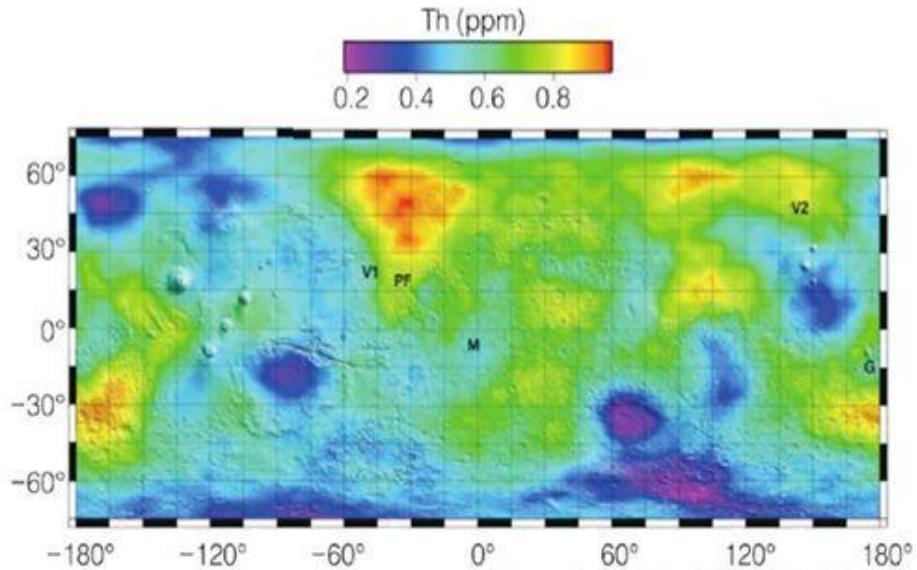


图 6 火星表面钍元素分布图

3.2.8 光照

光照资源则沿纬度线性变化，在赤道附近条件最优。

3.2.9 磁场环境与辐射

与地球不同，火星并没有全球性内禀磁场，磁偶极矩仅为地球的 $1/1000000$ 之一。因此在火星地表活动，每天受到的辐射可达 0.22mSv 。所以居住地设施一般考虑建设在地下，用岩层隔绝。火星有较强的岩石圈磁场，火星的岩石圈磁场分布南北半球差异显著。

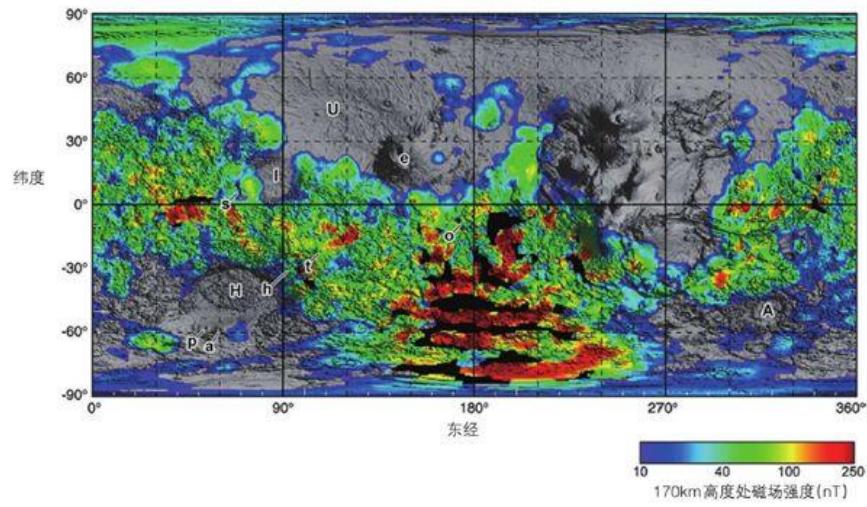


图 7 火星表面 170km 高度处磁场强度

北半球地势低洼平缓，磁场变化也较为平缓；南半球地势较高，遍布撞击坑，磁场变化剧烈，磁异常现象强。

南半球磁力线在过低的高度闭合，太阳风产生的等离子体，日冕抛射物等等，很容易到达火星大气层，北半球则少很多。考虑到电磁防护，科研，导航等目的，居住地最好设在磁场较弱，磁异常情况较少的区域，如北方大平原（Vastitas Borealis），海拉斯盆地（Hellas Planitiae），乌托邦平原（Utopia Planitiae），伊希底斯盆地（Isidis Planitiae）等。

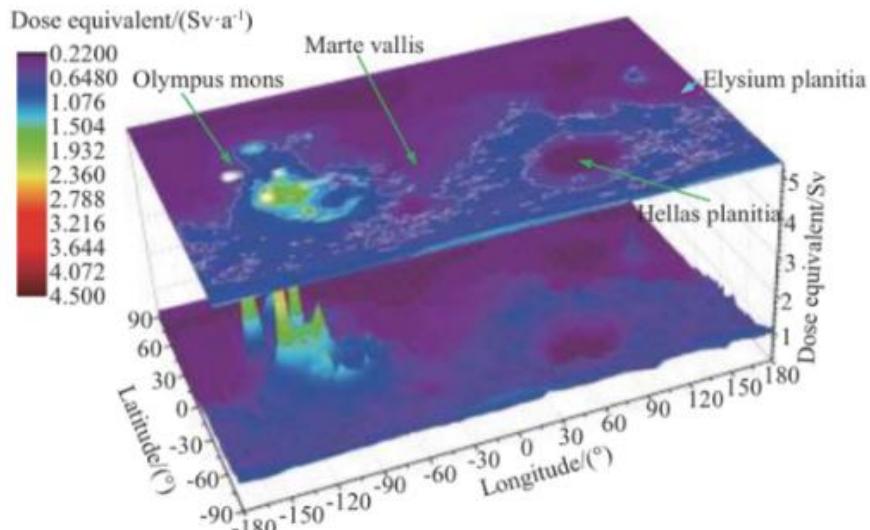


图 8 火星表面不同位置处人体皮肤辐射剂量当量

从图中可以看出，在火星的几处高山(例如海拔最高的奥林匹斯山)，航天员皮肤辐射剂量较大，接近或达到了剂量限值；而在希腊平原(巨大的撞击盆地)，皮肤遭受的辐射剂量较小，约为剂量限值的 1/10。

3.2.10 地质地貌与构造活动

火星表面起伏严重，最大高程差达 29.429km，最高点奥林匹斯山（Olympus）(21.229km)，最低点为海拉斯（Hellas）盆地 (-8.200km)。总体上看，南半球普遍高于海平面，平均 1.5km，

北半球低于海平面，平均-4km。南半球地形复杂，坡度变化大，且分布大量负地形，落差大，北半球分布有大部分火山省和大量平原。

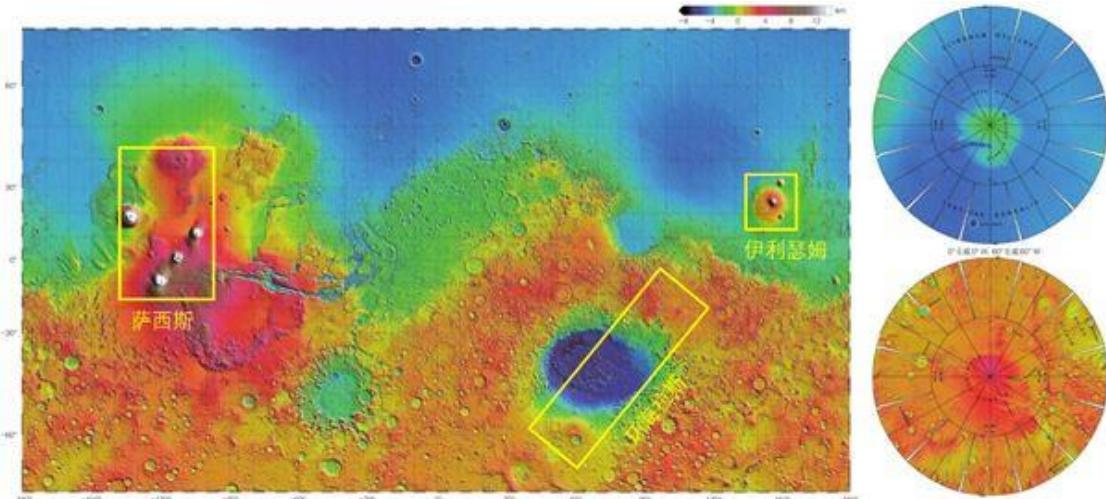


图9 火星地形

地球上的地震发生在由板块运动产生的断层上。火星没有板块构造，但它持续的冷却和收缩过程会产生压力，当这种压力积累到足够大，就可以打破地壳，引发火星地震。

震级	描述	麦加利地震烈度	一般地震影响	平均发生频率（全球）
少于2.0	极微	I	微震，一般人无法察觉，地震仪可记录。	持续 / 每年数百万次
2.0-2.9		I-II	一些人略微感觉到，但不损伤建筑物。	每年超过100万次
3.0-3.9		II-IV	大部分人有感觉，但很少造成伤害，室内物体晃动明显。	每年超过10万次
4.0-4.9	轻微	IV-VI	室内物体明显晃动，大多数人在受影响地区感觉，在外面稍微感觉到。通常会导致无人最小的损伤，中度至显著损害则不太可能，某些物件可能从货架掉落或打翻。	每年1-1.5万次
5.0-5.9	中等	VI-VIII	可对建造不佳的建筑物引起不同严重程度的损坏，但对其他所有建筑物只造成无或轻微损坏，每个人都感觉到。	每年1000-1500次
6.0-6.9	强烈	VII-X	在人口密集的地区，对一定数量的建造优良的建筑物造成损坏。抗震结构承受轻度到中度损伤，设计不佳的结构造成中度至严重的伤害。在更广泛的领域都感觉到地震，从震中到数百英里或千米。于震区中有强至剧烈摇晃。	每年100-150次
7.0-7.9	震灾		导致大面积地面损坏，有的部分或全部地表受到严重损坏。设计优良的结构也可能造成损坏。在很远的距离都有震兆发生，但主要局限于震中250千米内。	每年10-20次
8.0-8.9		VIII或以上	建筑物严重损坏，基础设施可被破坏。会对城市和居民建筑造成中度至严重损坏。在很远的距离造成损坏。在非常大的地震时造成灾难。	每年不足

图10 地震震级与影响表格，图示标出火星地震常出现级数范围

目前人类在火星上记录的火星震最大震级为4.2级，多数在3.7-4.2级之间，4.2级地震在地球上最多只能算是有感震，不会过度危及到人类安全以及造成建筑损毁。除萨希斯地区外，火星从亚马孙纪（31亿年前至今）以来，大部分地区处于一种干，冷，地质活动趋于停止和撞击事件极少或没有的状态，故不必考虑大规模地质灾害的问题。

3.2.11 表面地质与岩层

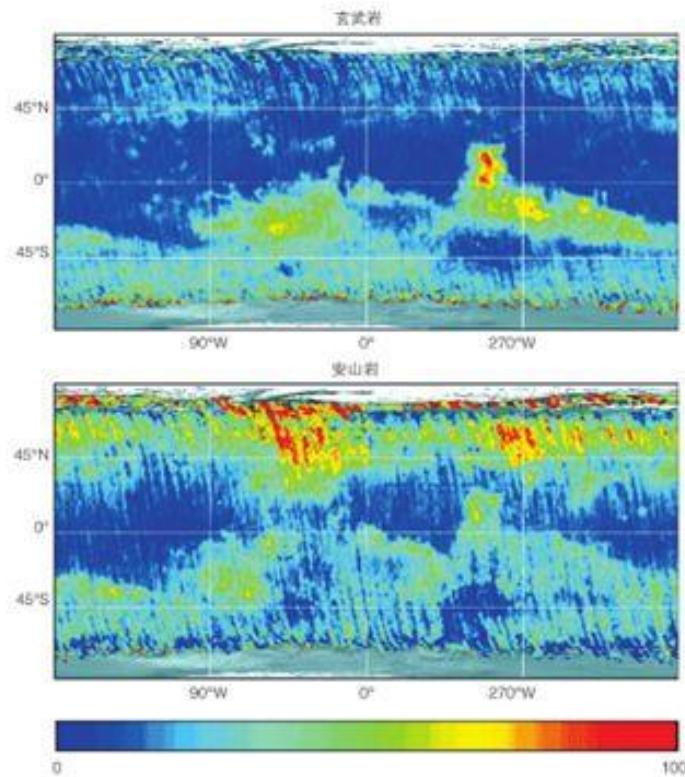


图 11 火星表面玄武岩与安山岩分布特征

火星表面岩石矿物主要由玄武岩和安山岩覆盖。若基地主体被设置在地下，需要考虑大规模土方作业工程量的问题。安山岩主要成分是斜长石，普氏硬度在 8-12 之间，属于一般坚固岩石，玄武岩普氏硬度达到 20-25，属于极坚硬岩石，相对来讲，选择安山岩为主要地质组成的区域进行建设能相对降低工程难度。此外，近期研究显示，安山岩经过适当处理对作物根系有较好稳固作用，能作为作物培养基，因此选择安山岩为主要岩石成分的区域或可能利于居住地农业生产。

两种矿物分布基本与火星南北二元结构对应，北半球的平原以安山岩为主，南半球古老的高地富玄武岩，从南半球延伸至北半球的高地以及萨希斯火山省也同样富玄武岩，即北半球相较于南半球和萨希斯地区更容易进行土方作业，修建居住地。

3.3 基地选址方案

东方传统哲学思想善于运用“减法”策略，合理利用自然条件以适应环境是人类以及生物界普遍的法则。利用火星既成地貌可降低建设成本，减少不必要的损耗，甚至建成更理想的基地环境。

火星地表下方的熔岩管体的体积十分庞大，足以容纳建设太空基地。意大利研究人员对火星数十亿年前形成的地下穴洞展开分析，研究表明穴洞可以屏蔽宇宙辐射，火星熔岩管的体积可达地球上的 1000 倍。而且这些熔岩管空间开阔，环境稳定，能在极大程度上保护人类。在此基础上，基地可以以熔岩管体为掩体，内部舱室可为充气自展或机械扩展。

以下为具体选址信息

名称	Pit Crater near Elysium Mons
经度 (东)	149.909°
纬度 (居中)	23.210°
采集者	亚利桑那大学HIRISE相机
采集时间	2015年10月16日 火星本地时间14: 48
地属	极乐平原 (埃律西昂平原)

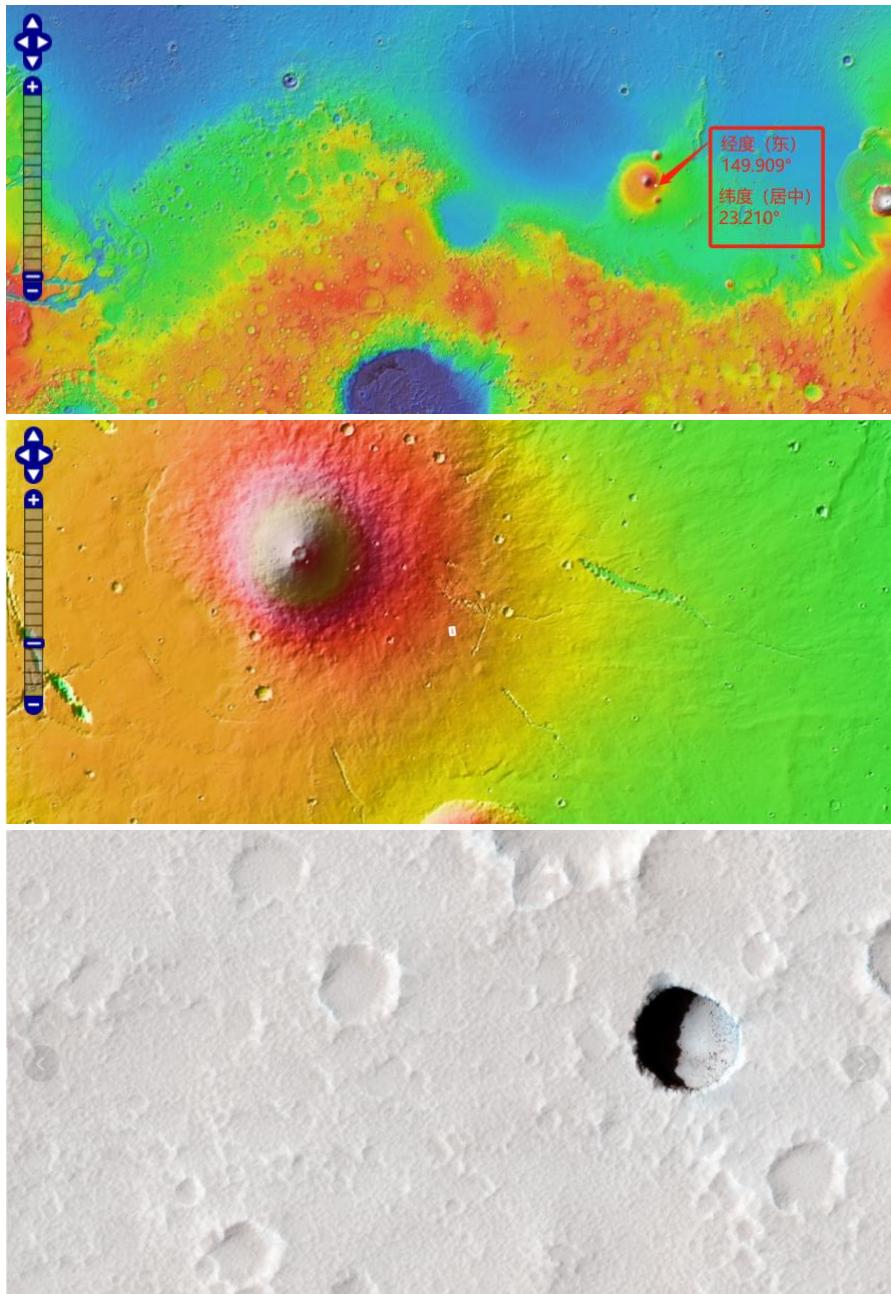


图 12,13,14,15 图片技术支持与信息来源：亚利桑那大学行星与月球研究所

该熔岩管体天窗在极乐世界火山东南侧下侧的一个区域。在中心是一个直径约 130 米的黑色原始小坑，在众多被尘埃和沉积物严重覆盖的小撞击坑中清晰可见。这些陨石坑通常出现在较年轻的塔尔西斯火山区，但这是在较老的极乐世界火山区最早看到的陨石坑之一。



图 16 图片技术支持：亚利桑那大学行星与月球研究所

选址理由如下：

- (1)熔岩管体内部容易获得水冰，若发现大量水冰则可解决水资源问题；
- (2)纬度较低，光照充足，有利于太阳能发电且相对更舒适；
- (3)地域夏季尘暴较少；
- (4)附近地表较为平缓，有利于交通设施搭建；
- (5)磁感线较疏，辐射剂量小；
- (6)极乐平原地壳活动较缓，不易发生大型地震等灾害；
- (7)该天窗西临高山，有利于建设风氢耦合发电技术设备；
- (8)东临平原，有利于后期扩建基地，形成社区；
- (9)天窗直径适中，有利于建筑遮蔽。

在接下来的部分中，我们将详细描述及分析火星基地各阶段建设与发展的过程。

3.4 飞行轨道及着陆方案

下述为火星基地载人任务中飞行器的飞行轨道及着陆火星、返回地球的具体方案。无人探测与科考阶段与其类似，飞行器将提前数年搭载数种机器人抵达火星，展开载人任务的前期准备工作，在此不再赘述。

3.4.1 载人火星飞行轨道方案

我们计划从月球发射两艘飞行器（包括环绕飞行器、上升飞行器、火星表面居住舱、地球返回舱）分别搭载宇航员和货物、设备等，可考虑分批发射飞行器的组件至月球近地轨道，在轨道上完成组装工作，从而获得较充足的时间调整飞行器的状态；也可直接发射完整飞行器。两艘飞行器可在不同批次不同时段飞抵火星，如货船沿最小能量出航轨道（半径小，速度慢）飞行，载人飞船沿快速转移轨道飞行，从月球出发，经由霍曼转移轨道历时约六个月到达火星轨道附近。

飞行器接近火星轨道后，利用气动捕获的方式入轨，即飞行器被火星引力捕获后，在进入火星大气时打开气动减速防热罩，通过一次穿越大气减速到入轨速度。借势飞出火星大气，通过一次变轨抬升，进入环绕火星的停泊轨道。

结束火星任务后，宇航员乘坐上升飞行器（若基地建设状况理想，可考虑携带原位生产推进剂，即氢氧燃料等），与环绕飞行器对接，脱离上升飞行器或令其继续在轨道飞行等待二次利用，进入返航轨道返回地球。在进入地球大气前，脱离环绕飞行器，用地球返回舱完成返回任务。

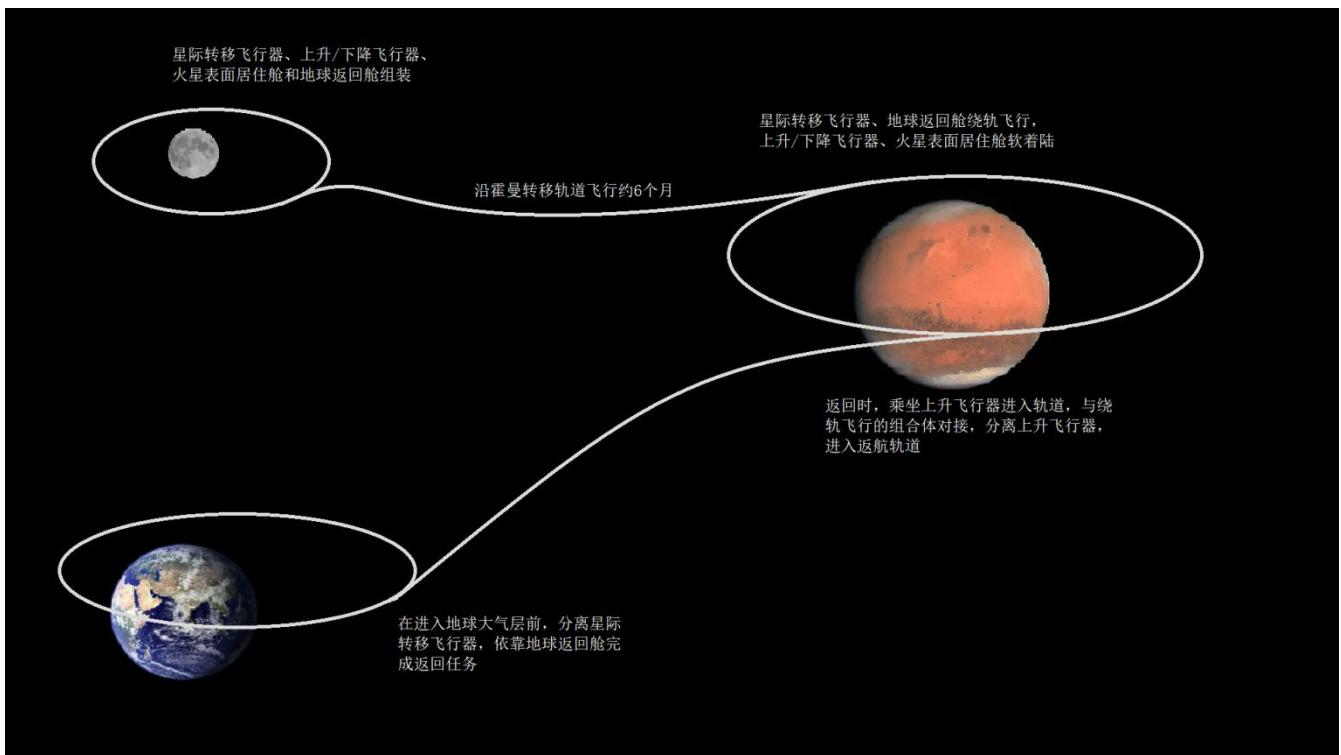


图 17 载人火星飞行轨道示意图

3.4.2 载人火星着陆方案

着陆时环绕飞行器和返回舱的组合体将留在停泊轨道上，完成地表勘测任务，上升飞行器和居住舱在火星表面完成软着陆，过程如图所示。

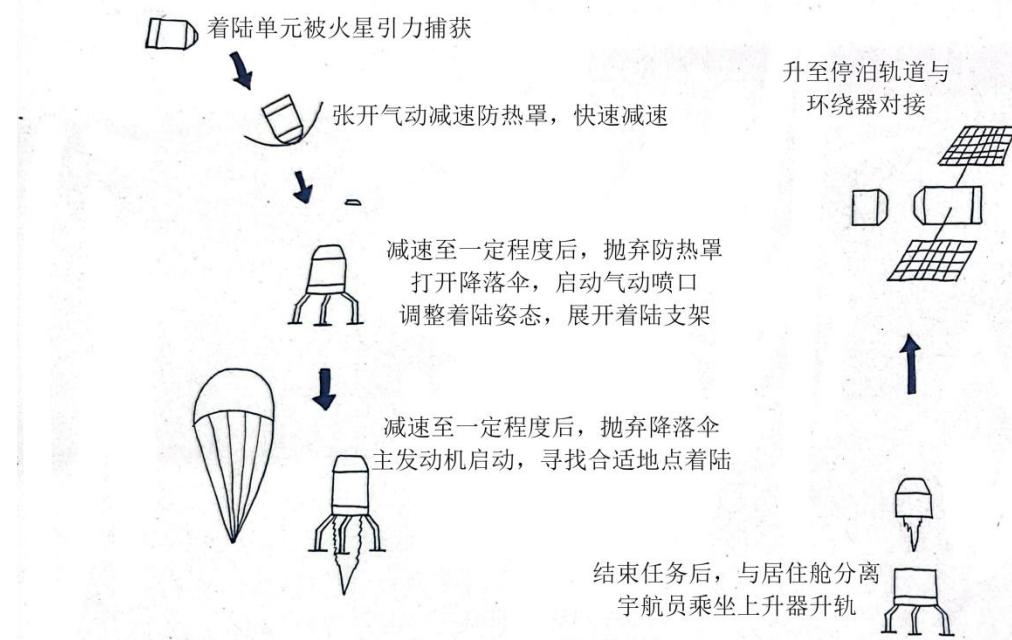


图 18 载人火星着陆示意图

3.4.3 未来火星经济圈的可能轨道方案

在发展经济圈时，可考虑使用循环轨道，这是一类高风险低成本的轨道方案

主要由行于星际航行轨道上的大型转移飞行器和用于实现地球或火星表面与转移飞行器进行人员和物资交换的小型滑行飞行器组成。将转移飞行器作为移动式的站点，每当其来到地球或火星附近时，小型滑行飞行器从地球或火星表面起飞，在双曲轨道上与转移飞行器交会对接，完成物质交换后，滑行飞行器返回地球或火星表面。

3.4.4 火星各类轨道的可能功能

(1)火星静止轨道

高度约 20000km，周期约 24.6h，速度约 1.45km/s，可用于对某一固定位置的持续观测及信息传输，如保持在地人员与火星基地的日常联络，太空发电站也可使用这一类轨道。

(2)火星太阳同步轨道

其主要特点是太阳照射轨道面的方向在一年内基本不变。此轨道经过同一纬度时，太阳对火星表面光照条件一致，便于相机对火星观测成像。且火星的空间温度更低，太阳同步轨道有利于卫星热控系统的设计，保证卫星的能源供应，有利于其长期在轨运行。

(3)火星低轨道

可实现对火星近距离、高精度的观测，获得高分辨率火星三维图像。但是近火轨道卫星会受到火星大气耗散效应的明显影响。

(4)火星临界椭圆轨道

其远火点始终位于北极或南极上空，可对该地区进行深入的观测和分析，更加详细地观测南北极冰盖的分布和特点。

3.5 无人基地机器人设计

3.5.1 模块化机器人

多功能综合型机器人。鉴于火星任务的随机性、环境的复杂性，我们计划设计一种标准化机器人单元，发挥其强大的适应能力，可组装不同类型的功能插件，以完成不同的任务，如勘测、搬运、3D 打印等。主体部分长宽约 30cm，高约 14cm，总高约 40cm，使用铝镁合金外壳，质量较轻而强度较高，采用滚轮式轮胎，地形适应性较强。机器人单元互相之间还可拼接，组成更大规模的工作平台，承担较为复杂的任务。主体一侧可放置小型共轴双旋翼飞行机器人，可用于勘探深谷、峭壁等复杂地形。

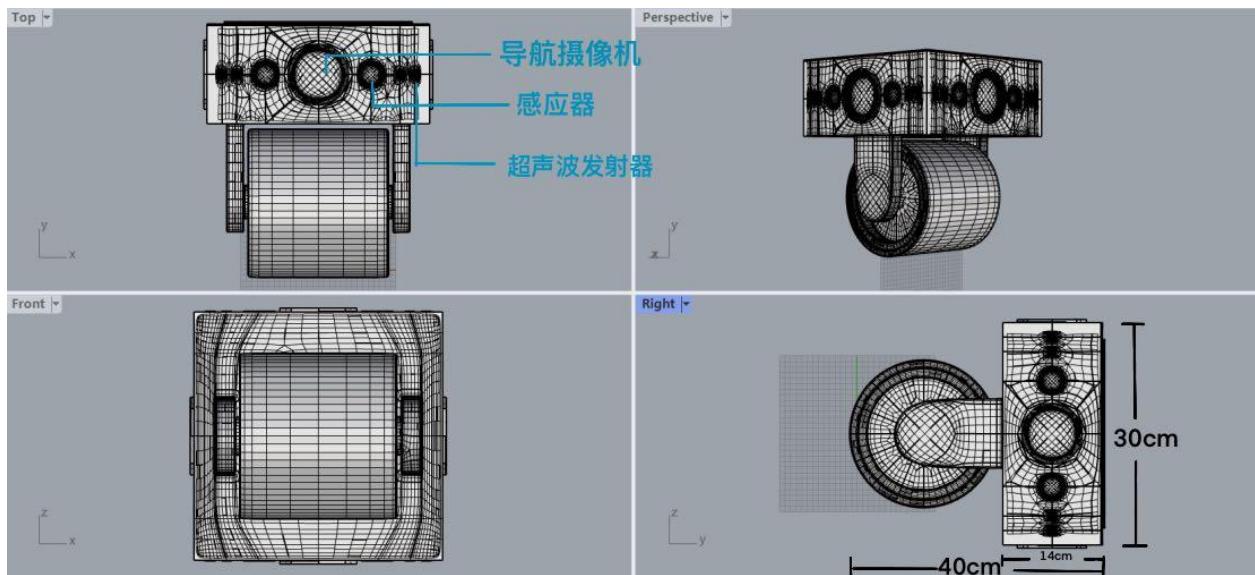


图 19 模块化机器人建模图

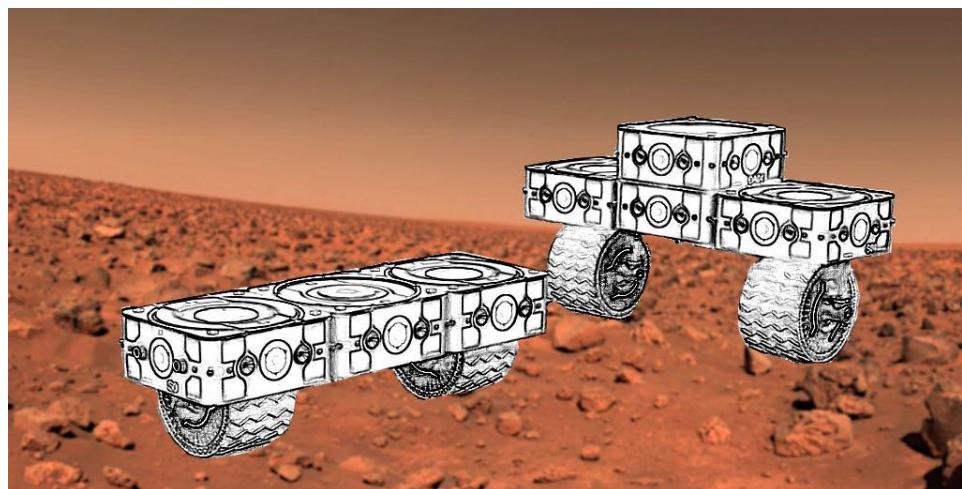


图 20 模块化机器人工作效果图

考虑火星大气稀薄，飞行机器人设计采用双层大叶螺旋桨，底部置有探头等设备。



图 21 飞行机器人建模图

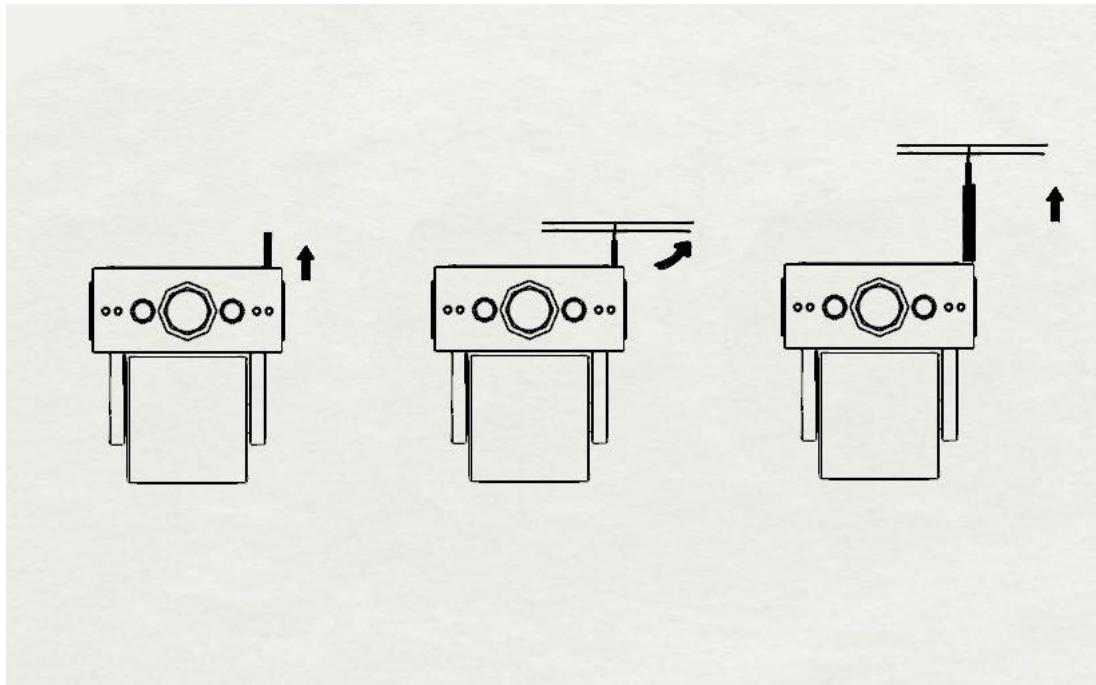


图 22 飞行机器人与模块化机器人分离示意图

3.5.2 风滚草机器人

消耗型侦察机器人，用于在基地建设前期完成较远距离、较大范围的探测任务，可分多次多方向大量抛出，依靠风力驱动，随机勘测火星地质地貌，实时传输拍摄图像及视频，最终将其整合为较完整的火星地质地貌图。以球形碳纤维结构为框架的机器人，直径约 2m，外表包裹塑性透明薄膜，内置抽气装置、广角摄像头、声波探测器、平衡装置、配重、小型放射性同位素电池、火星全球定位系统。此机器人优点在于耗能低，全自动化工作，探测范围广，采用了宽波段的光声耦合探测方法，两者相互叠加弥补，覆盖缺陷，更加精准。

3.5.2.1 结构及部件功能

球形碳纤维结构：控制机器人的外形为球状，更利于其翻越火星的复杂地形。

塑性薄膜：质量轻，保护性较好，可使机器人内部保持良好气密性。

抽气装置：球体不使用时可放出空气减小其体积，便于运输和携带；需要使用时，利用抽气装置将空气充入球体，使其恢复球形。

广角摄像头：通过光学成像原理，拍摄火星地形及具体地貌图；也可通过检测不同波段的光来探测地质。

声波探测器：通过声学成像原理，探测火星地下矿物质及水资源分布情况。

平衡装置：保持广角摄像头及声波探测器的相对位置稳定，提高拍摄效果。

配重：使机器人具备足够的质量，控制机器人的质心位置，防止其运动状态失控。

小型放射性同位素电池：为摄像头及磁悬浮装置的运行提供动力。

火星全球定位系统：通过卫星确定风滚草机器人的具体位置，将其拍摄图片组合为完整地形地貌图。

3.5.2.2 可能方案

此机器人旨在探测火星的地质地貌情况，因此摄像头拍摄的照片及视频效果是影响此机器人工作效能的关键因素。要想其拍摄出易于识别、易于后期拼接、相对连续的照片及视频，需要在尽可能减小装置质量的前提下，解决摄像头在机器人主体全角度滚动过程中稳定成像的问题。由此提出两类可能的解决方案：

(1)内置陀螺仪核心。球形碳纤维结构外包裹透明塑性薄膜，便于内部摄像头光学成像；内接陀螺仪，陀螺仪以双重环状环绕在摄像头周围，摄像头被固定在垂直于陀螺仪的平面上，此装置可使摄像头在球体呈现任意姿态时都保持在相同位置。声波探测器和摄像头连接，垂直于地平面，便于其对地下矿物分布的探测。

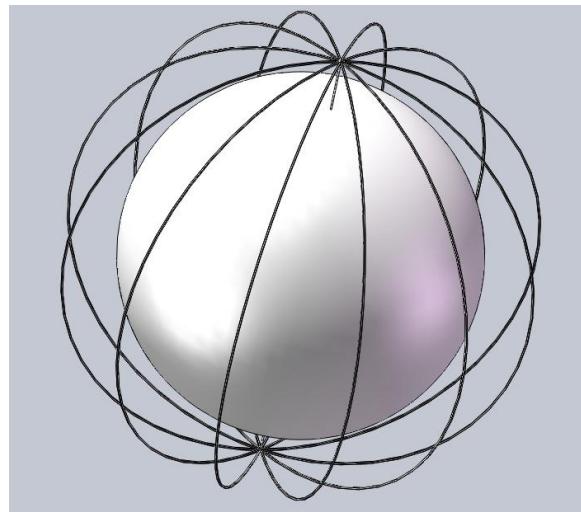


图 23 风滚草机器人外壳骨架

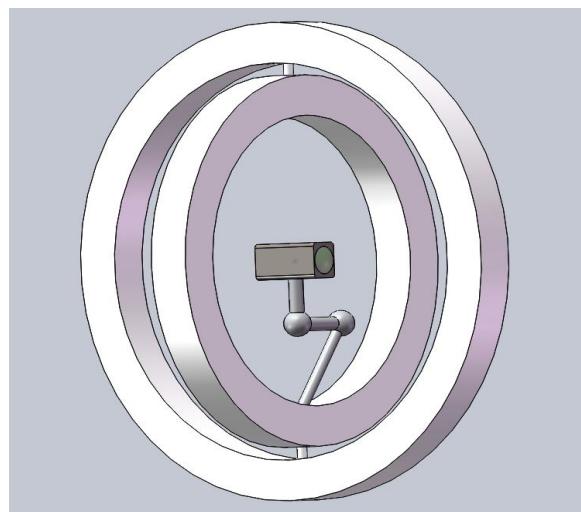


图 24 陀螺仪内核

(2)外置磁悬浮平台。球形碳纤维结构外包裹塑性薄膜（无需透明，可根据不同颜色薄膜的抗辐射性、性能决定其具体颜色），在球形碳纤维结构内安装磁悬浮装置，球体上方放置配套磁悬浮平台，使平台位置始终保持在球体正上方。平台上搭载两个不同朝向的摄像头，增大拍摄范围；搭载一个声波探测器，通过光电耦合获得更全面的信息。

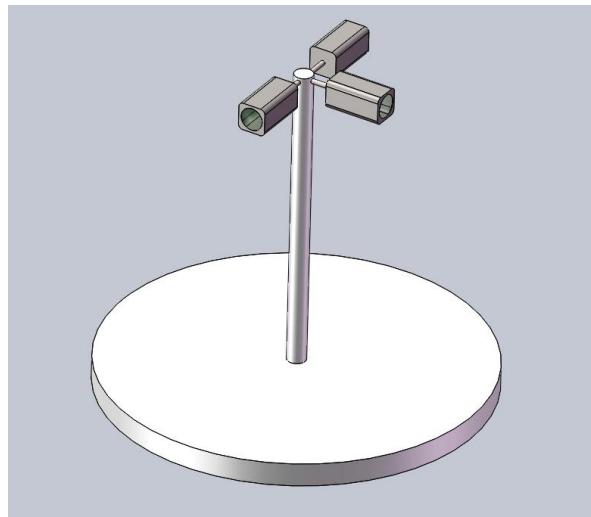


图 25 磁悬浮平台

3.6 能源系统

3.6.1 无人探测与科考阶段

机器人可利用光伏太阳能板、放射性同位素电池获取能源。目前各国的火星探测器均使用太阳能。以洞察号为例， 7.6 m^2 的太阳能板可以提供约 600W 的功率。光伏太阳能发电安全可靠、效率可观，适合无人阶段使用；放射性同位素温差发电较稳定，受环境因素影响小，但能量转换效率较低，可作为备用能源，弥补无光照时的能源空缺，保障紧急条件下机体的基本性能。

3.6.2 初期基地阶段

地球人均年耗电 8mwh，若类比于火星，人均光伏设备占地面积将达 64m^2 。考虑维生系统，农业等消耗的额外电力，以及火星稀薄但富温室气体大气等影响，总光伏设备面积需要达到 8km^2 以上。因此，宇航员登火后，应逐步建立基地电力储存系统及电解水系统，利用太阳能板的多余电能电解水获得氢气及氧气，分别贮存于储氢罐、储氧罐中，电力需求超载荷或无光照时可作为氢氧燃料电池使用，在此循环体系搭建完成后，可将机器人、移动车等主要能源替换为功率较高的燃料电池，以承担更高强度任务。可考虑在山坡建造叶面大而薄的风力发电机，结合组成风氢耦合发电系统，将无规律、不稳定的风力资源转化为优质电能。

3.6.3 小规模火星社区阶段

在基地发展到一定规模后，上述电力系统无法满足扩建后的基地供电需求时，可建造核裂变反应堆，功率大，寿命长，发电稳定，核燃料可以考虑采用火星本土的钍元素，钍经过中子轰击可得到铀-233，是当今核反应堆的主要燃料之一。

3.6.4 火星城市阶段及未来技术展望

在未来，可以期待可控核聚变技术与热光电转换技术的发展与成熟，可控核聚变反应堆将作为各类用电装置的电源，保证火星基地乃至火星社区的正常运行，同时，利用热光电

转换技术高效地将余热转化为电能，极大幅度提高电能利用效率，还可达到控制设施温度的目的。

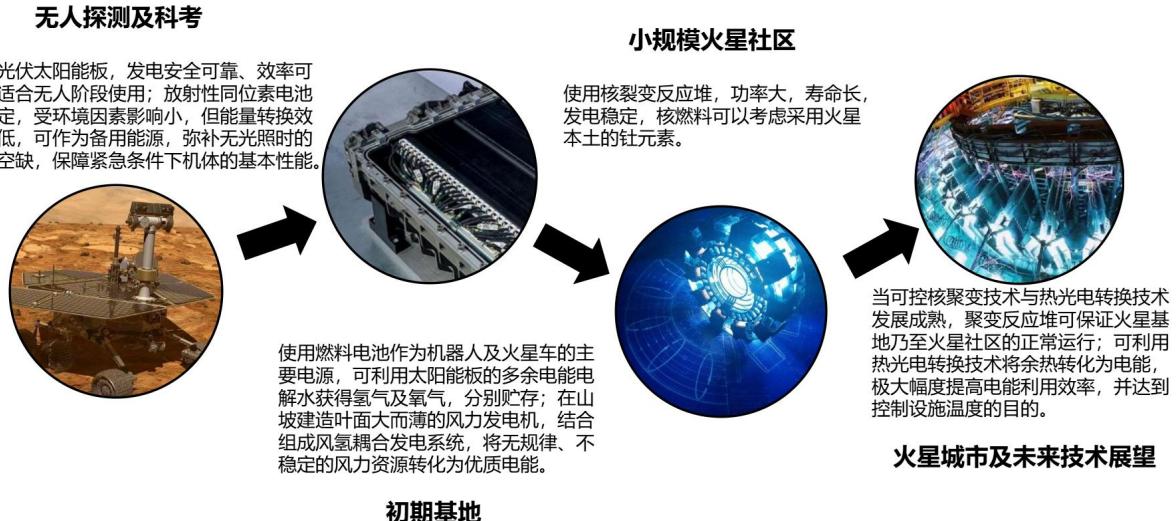


图 26 能源系统发展“四步走”概念图

3.6.5 太空光伏发电站的基本构想

随着火星基地建设的推进，对能源的需求将会不断增长。而火星上可利用的原位资源十分有限，就火星地表上的太阳能利用来说，受到许多因素尤其是沙尘的限制。所以目前迫切需要一种新型高效的光伏发电方式。这里提出一种基于静止轨道空间站的光伏发电解决方案。

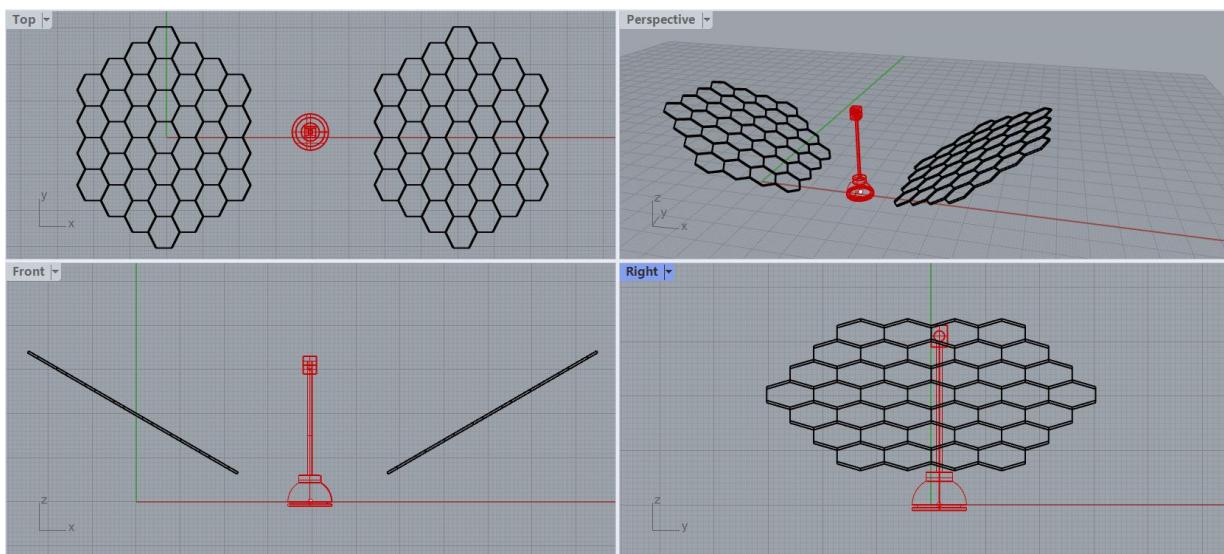


图 27 太空光伏电站建模图

3.6.5.1 太空光伏系统的结构

太空光伏发电系统从目前的技术来说是可以实现的。已经存在的空间光伏能源就是各大空间站正在使用的硅基太阳能板。但是要向地面传输能源，这几乎是不可能的。目前可靠的无线能量传输方式仅有电磁无线充电，考虑到火星大气层强烈的干扰，通过这个手段进行天地能量传输是不可行的。这里设想了另一种方式——激光传输，这就可以规避以上问题。这种情况下，空间站就不需要太阳能板进行能量转化，转而将太阳光直接投射到地面。

同时要实现能量传输，也必定需要地面站来接收空间站的能量。下节将具体阐释空间站和地面站部分的结构和原理。

3.5.6.2 空间站结构与原理

空间站的有效结构分为集中器，激光发生器，发射器以及其配套的各种辅助系统。

考虑到环境友好和对于人类的生活作息，空间站应当设定为白日（处在日照面）工作。为了更高效的接收、集中阳光，本系统将采用可自主调节的反射镜。每个单位镜面都会安装上传感器以保证实时以最大效率完成对阳光的接收采集。

激光发生器可采用现有的泵浦激光器。该激光器的核心元件是掺钕钇铝石榴石晶体，可将光子激发到高能级，从而在发射器处实现相干性好稳定的激光柱，便于瞄准地面站。同时也方便地面站的建设与能量采集。

发射器主要作用是用于瞄准地面站，而为了将激光投射点维系在同一地面站。发射器需要较高偏转能力。

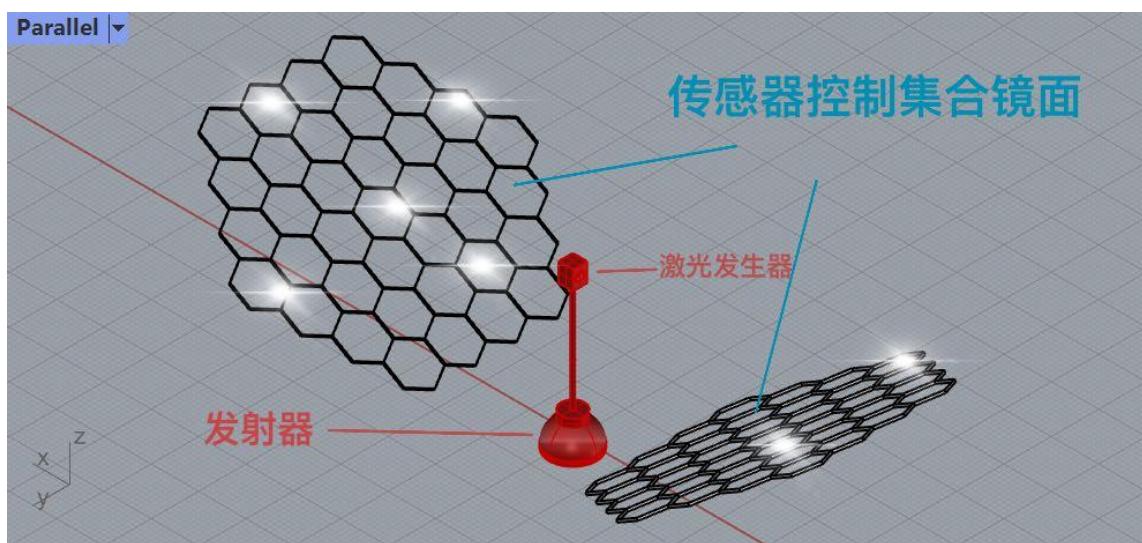


图 28 太空发电站结构分析图

为了保证稳定地向一个地面站输送激光，空间站的轨道应当选择静止轨道。而为了保证持续电力输出，必须要设置多组空间站与地面站。在只设置两组的情况下，当两组空间站运行到晨昏线附近时，反射面将难以实现阳光采集，所以至少应该采用三组空间站-地面站系统。三者应呈 120° 等角分布于静止轨道上。

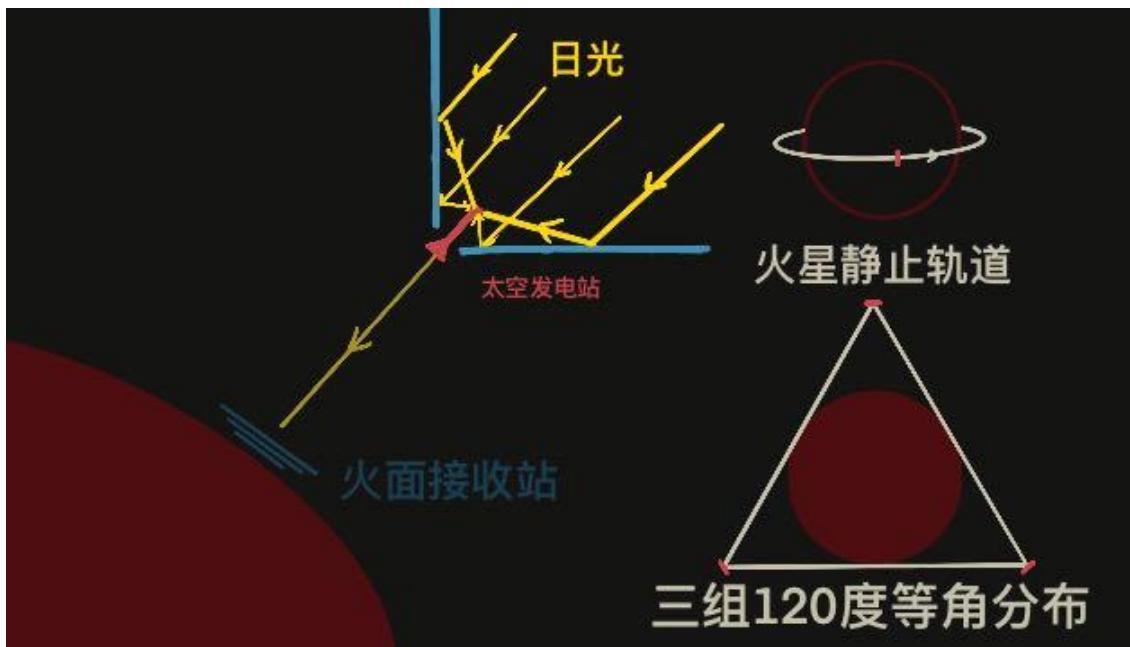


图 29 太空发电站原理分析图

由于空间站面积巨大，小行星，太空垃圾和微流星体均能对系统的功能造成威胁。那么辅助系统就必须包括预警系统和防御系统。考虑到来袭的威胁物体具备有高速，小型的特点，预警系统应该具备 3000km 以上的预警范围，同时有较高的角度分辨力，至少能判断出直径 3cm 以上来袭物体。而防御系统可以直接利用激光对目标进行破坏或者使其丧失危害。

同时，为了防止系统计算机宕机或者一些其他计算机无法处理的情况，每个空间站应当配备 1-2 名宇航员进行监控和调整。这样一来，空间站的辅助系统中还需添加宇航员的维生系统。

3.5.6.3 地面站结构与原理

关于选址，地面站应当尽量位于该空间站的地面投影内，并给予空间站足够的冗余进行发射角度调整。

关于地面站的结构，基本构型为多个围绕空间站激光投影中心点的同心圆。最大圆半径不超过 100 米。关于接收方式，这里有两种可能性。一种方式是，每个圆上均匀分布有三米高的吸光材料，内层面分布加热管，热源来自激光。加热管与地下冷却部分形成循环，传热，用工质推动涡轮机。另一种可能方式，是利用分光装置，降低光强，再把能量分布在第二级太阳能板上。需要注意的是，激光的照射角度一直在发生变化，所以地面的接收系统需要配置一种追踪装置，用于对准激光。

单组装机容量（12h/d 工作）预计可达到 2MW。三组将满足目前地球上绝大部分民用和工业用电需求。

对于这种装机容量巨大的发电设施，如果功率变化过大，电网可能难以承受负载（例如两个空间站同时处在向阳侧时的功率远大于单个空间站处在向阳侧）。建议在地面站接入电网前，加装蓄电设施。这样也可以保证夜晚或沙尘期间的基本用电。

3.5.6.4 太空光伏发电站的优势及用途

相较于传统光伏发电站，太空中的空间站可以忽略季节和天气变化带来的不稳定日照变化。同时太空中环境对设备损耗较少。激光作为介质传输能量也可以忽略大气不稳定带来的影响。另外，超大功率的装机容量，才是这套系统最大的优势，它的出现，将有效缓解火星基地的能源问题。同时它巨大的施工量带来的国际合作给人类社会带来的进步也是不容小觑的。

同时，太空光伏发电站也可以作为冶炼矿物的设备，把耗材堆到一个点，通过其发出的高能激光高温加热融化，经浇筑后降温固化。考虑到将太阳光转化为激光会损失大部分的能量，也可以直接通过多面镜将太阳光汇聚到一个点上，这样将大幅提高冶炼矿物时太阳能的利用率。通过这两种方法可以完成绝大多数火星矿物的冶炼和设施的建设。此方法在地球不可用是因为对环境和生物影响过大，而在月火星表面不存在生态问题。

3.5.6.5 太空光伏发电站的管理及维护问题

太空光伏发电站系统就目前看来，以国家为单位进行建设，难度太高，因其选址地区不发达，相对落后，而有能力建设的国家，纬度又往往过高。而且该系统带来的负面影响，应当由多个国家共同承担。产生的电能也不能有少数国家垄断，否则会引起战争，恐怖袭击等问题。本章主要就空间站的管理及维护问题进行讨论

3.5.6.6 对空间站安全与维护问题

空间站所在的空间环境由真空，电磁辐射，高能粒子辐射，等离子体和微流星体等组成。微流星体的应对方案在论述防御系统时已经提到。对于电磁以及高能粒子方面的威胁，可以考虑在空间站周围制造强磁场，诱导带电的粒子偏离。由于空间环境低温真空的特点，强磁场可以利用环绕空间站装配的大规模超导体来产生。

空间站具备的大范围覆盖，高能量，自带防御系统的特性使其具备成为战略武器的潜质。这要求空间站的操作系统应当具备防止入侵的能力。

3.7 生保系统

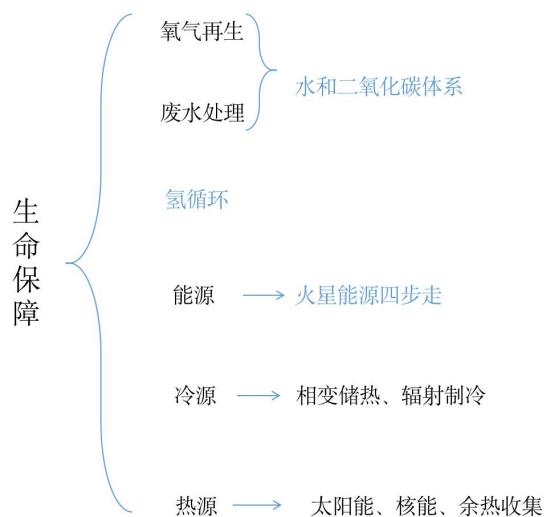


图 30 生保系统体系

3.7.1 氧气再生

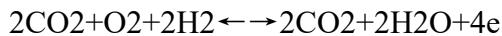
实现氧气再生使用的闭路循环包含 3 个主要的技术模块：CO₂ 的收集浓缩、CO₂ 的还原和电解制氧。国内外围绕这些技术进行了多方面研究，在综合分析后，我们选择了以下较成熟的方案。

3.7.1.1 CO₂ 的控制

按工作原理, CO₂ 的控制技术可分为吸收-解吸方法、电化学方法和膜扩散方法等。

由于火星和地球间物资运输困难、火箭载荷有限、基地建设初期电力获取途径有限，因此我们选择电化学去极性 CO₂ 浓缩器（EDC），它的优点在于具有最少的重量、体积、功耗，且可以做到连续去除 CO₂。EDC 由一系列电池构成，电极是含有碳酸盐溶液的多孔材料。含有 CO₂ 的大气通过电池的阴极，含氢气体通过阳极。由于浓缩的 CO₂ 与氢气在阳极预先混合，特别有利于与 Sabatier 反应器相连。

在阴极，碱性电解质吸收大气中 CO₂ 形成碳酸盐及重碳酸盐离子，这些离子透过多孔材料从阴极进入阳极，由于 pH 的变化，碳酸盐分解，CO₂ 再释放出来，发生如下总的反应：



3.7.1.2 CO₂ 的还原

CO₂ 还原产物的形式的不同而分为:Bosch 反应系统 (BCRS) 、Sabatier 反应系统 (SCRS) 、改进的 Sabatier 反应系统 (ASCRS) 。Bosch 反应式如下: $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$

Sabatier 反应克服了 Bosch 的缺点，它采用钌催化剂，产物为甲烷与水。由于是一个放热反应，一旦加热启动反应后，它能自维持在 600℃左右的反应温度。它的优点就是单程反应转化率高，能达 99%，系统简单、可靠，催化剂能长时间使用，对负荷变化的适应性强，能承受 3 倍正常状态的负荷容量。Sabatier 反应式如下: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Sabatier 反应器是一种在催化剂作用下的加氢甲烷化反应，从反应式可知，它的不足主要在于它是一个不充分的反应，部分氢将损失于甲烷之中。

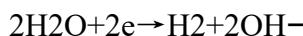
改进的 Sabatier 反应 (ASCRS)，实际上综合了 Sabatier 与 Bosch 的优点，它在 Sabatier 反应后加上一级成碳反应，对甲烷进行裂解，其反应如下: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$

成碳反应的反应温度为 850℃，碳沉积在石英纤维反应芯体上，生成密集而多孔的产物。维持连续运行需 2 个反应器。ASCRS 运行温度更高、重量更大、功耗更高，与 Bosch 一样，它也需更换反应芯体，但它形成的碳密度较高，解决了碳污染环境的问题及减少了存放体积，它保证了 CO₂ 的完全还原。

3.7.1.3 电解制氧

电解制氧按电解质类型、状态及供水方式来分有多种方案，但我们准备用于火星基地的电解制氧方案主要是流动碱性电解池。

流动碱性电解池采用高电导率的 KOH 溶液作电解质，按如下反应电解。



3.7.2 氢循环

电解制氧的同时能够产生大量的氢气，氢气作为一种清洁无污染且高效的能源，具有明显的优势：它用途广泛，不仅能作为一种可靠的能源，还是水循环和物质自封闭不可缺少的重要物质，以下为氢循环的示意图。

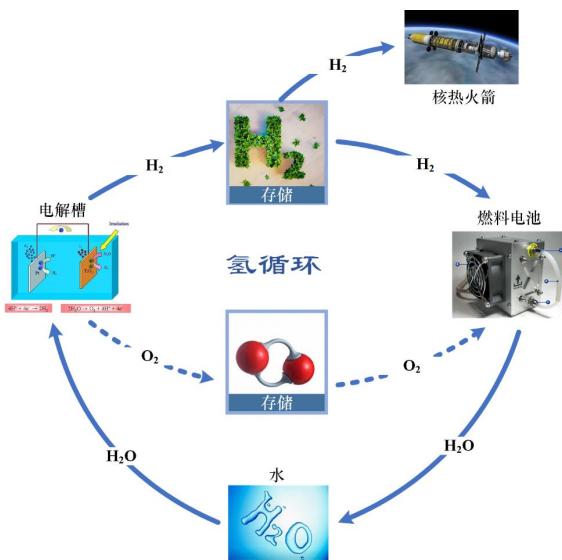


图 31 氢循环示意图（特别需要注意的是，生成的氢气须低温存储）

3.7.3 土壤水

对火星水资源探测研究表明,火星地表的水资源主要存在于火星北极与南极的冰冠以及火星的土壤中。火星近地表面是指火星表岩层顶部到地下最多 2 m 处,理论模型和探测数据的结果非常有力地说明了近地表面的 H₂O 在火星高纬度地区分布广泛,并且探测数据显示 H₂O 在某些区域已接近赤道纬度附近。

对于土壤水的获取,土壤光热取水方法在地球上是可行的,然而能否在火星上有效应用,尚需在地球表面进行模拟实验验证。国外曾搭建过小行星水提取模拟实验装置,并进行了相应的实验验证;国内开展火星原位资源利用的相关研究较晚,内容也较少。

可行性分析

火星全年平均温度处于-60~-50 °C之间,平均气压相当于 0.006 个大气压,约为 600 Pa,低于水三相点处的气压,因此提高土壤温度到大约-10 °C以上,便可使土壤中以结晶水形式存在的水分得以升华。根据克劳修斯-克拉贝龙方程可得到冰升华温度 T_s 与气压较为准确的关系。

升华水蒸气的扩散遵从菲克定律。火星大气压力仅为 0.006 个大气压,平均密度为 0.0166 kg/m³,其中水的含量为 0.03%,水蒸气在此条件下的扩散速率大于在地球大气压下的扩散速率,并接近于在真空中的扩散速率。倘若升华且快速运动的水蒸气到达一个温度足够低的表面,则将大部分凝结于此,所形成的霜则能够被有效收集。

据此,以火星表面太阳光辐照为热源加热浅层土壤,致其水分升华扩散,进而进行凝结收集的方法。设想将一个特别设计的罩体置于需取水的土壤上,该罩体既有保持结构形状的强度性能,又有高红外透过率特性。利用太阳光辐射能量加热罩内的土壤,使其升华并冷凝成霜,则可进一步实现水的收集,此方法原理见图 1。在一块区域内进行了一段时间的水收集操作之后,再移动至下一块区域继续进行;霜积累到一定厚度后,通过刮取或者加热融化予以收集。

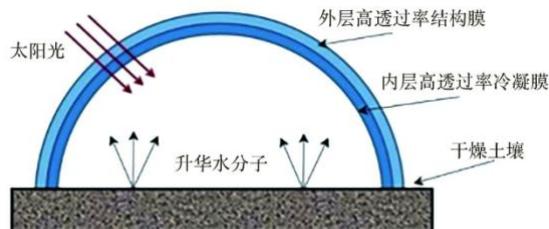
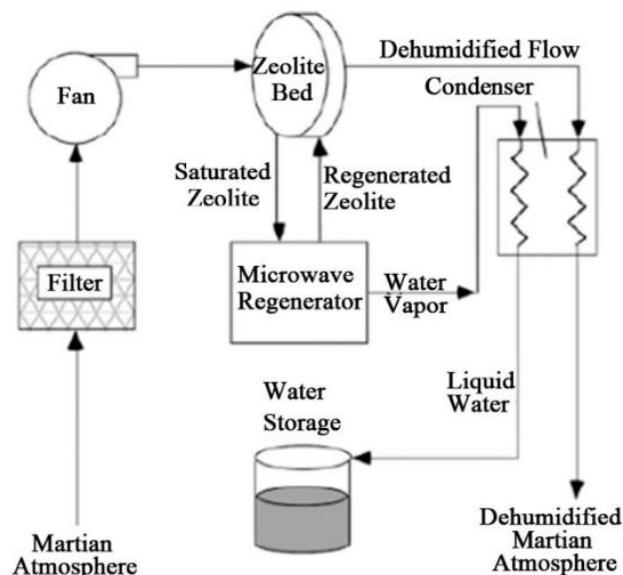


图 32 土壤水分升华凝霜过程示意图

理论计算结果表明,使土壤内所有水分升华需要 2.1 h,据此推断该方法具有可行性。

3.7.4 大气水

1997 年,华盛顿大学亚当·布鲁克纳教授和学生开发了一个从火星“空气”中吸收水气的概念,如下图 a 所示,该设计仅具有六个部件:过滤器、风扇、吸附床、再生单元、冷凝器和主动控制系统。目前,该设计主要处于理论阶段,且通过大气取水量是有限的,因此仍需研究其他的方式。



(a) 大气取水流程图

图 33 大气取水流程图

3.7.5 水冰

目前的研究显示,火星上的熔岩管内很有可能存在裸露的水冰,火星南北极冠也存在丰富水冰资源,可以直接供火星基地采集利用。

3.7.6 火星基地的废水处理技术

从火星基地这一密闭环境中收集到的废水主要有冷凝废水、卫生废水及生理废水。结合大气再生来看，还有一种水源是 CO₂ 还原产水，这种水有可能受 CO₂ 气体的不纯性的影响，也需处理才可饮用。

根据水源的特性以及再生水的用途，火星基地的废水处理系统分有冷凝废水（包括 CO₂ 还原产水）、卫生废水和尿液废水处理系统。

3.7.6.1 冷凝废水及卫生废水处理

冷凝废水是排入座舱空气中各种水蒸汽在温湿度控制系统中冷凝的水，它的水质接近蒸馏水，其污染主要是由于环境中溶解性污染物引起的，其分子量较小，处理方法基本上是吸附/催化。

处理系统的核心由 3 部分组成：灭菌组件、多层过滤组件和挥发物除去组件。卫生废水比冷凝废水的污染严重。对它的处理方案主要有反渗透法与吸附催化法。比较这 2 种方案，吸附催化法系统简单、运动部件少、可靠性高、能耗低以及水回收率高，更适合空间卫生废水的处理。它的流程及主要部件和冷凝废水处理系统完全相同，由于废水水质的关系，它的水回收率只有 95% 左右。

3.7.6.2 尿液废水处理

尿液废水是火星基地废水中最复杂的废水，其污染物主要有尿素、氯化钠及各种酸，占总重的 3%~4%，因而处理的难度最大，处理流程有反渗透法、电渗析法及蒸馏法，最有效地保证净化后的水质要求的方法是低温蒸馏技术，目前研究得比较成熟的技术是膜蒸馏技术与蒸汽压缩蒸馏技术。

俄罗斯的膜蒸馏尿处理系统由 3 部分组成，第一部分是尿液的分离与储存，包括动态尿液/空气分离器、预处理装置及尿液的存储与运送部件；第二部分是蒸馏净化部分，它包括平板膜蒸发器、循环水泵与风机、加热器、热交换器、膜式水/气分离器与净化水水泵等部件；第三部分是后处理部分，主要有过滤器、电导、水箱等。

蒸馏净化部分是这一系统的核心，它由尿液废水与气体两个闭路循环构成。净水经后处理及冷凝废水处理系统后，水质能够达到饮用水标准。

这种气体吹扫的膜处理方法处理强度较低、能耗高，因此对它进行了改进，发展了热电膜蒸发系统。另一种尿液处理技术是蒸汽压缩蒸馏（VCD），它也是一种包括蒸发与冷凝两个过程的废水处理系统，通过对蒸汽的压缩来提高饱和温度，再把这种过热蒸汽冷凝在与蒸发器有直接接触的金属表面，冷凝潜热直接传递给另一侧的废水，促进与冷凝液等量的水蒸发。

综上，我们提出了水和二氧化碳体系，如下图所示：

水和二氧化碳体系

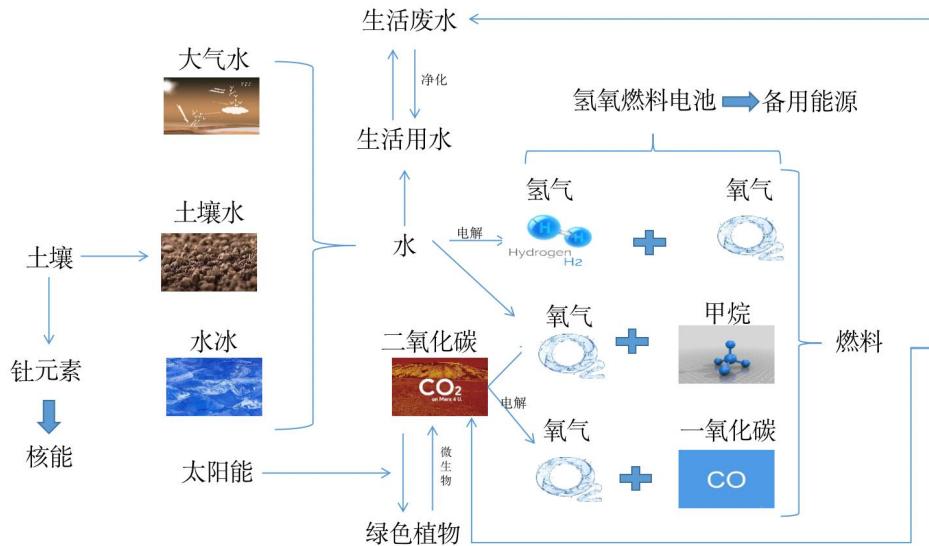


图 34 水和二氧化碳体系示意图

3.7.7 冷热源方案

3.7.7.1 热源方案

一方面，可利用其他能源如太阳能、He-3、核能向舱内供热，另一方面，可以利用日常产生的余热加以储存，在需要的时候将其释放出来：一种可行的构想是利用同位素温差发电，将余热转化为电能加以储存，并在需要的时候转化为热能。

3.7.7.2 冷源方案

可考虑相变储热材料（或特殊制冷系统）向舱内供冷。因制冷系统综合造价昂贵，建议舱体外表面采用热辐射吸收率低的材料，并在技术经济比较成熟后尽量加大保温层的厚度。

由于空间应用的特点，火星基地的大气再生与废水再生系统技术难度大，经过长期的研究与实际应用的检验，研究方向已趋于明朗。水的处理方面，无论是美国，还是俄罗斯对处理技术的定位基本趋于一致，冷凝废水与卫生废水采用吸附、催化技术，尿液废水处理采用蒸汽压缩蒸馏与渗透膜蒸发技术。大气的再生方面，为降低能耗、重量以及实现CO₂的回收，4床分子筛技术将被固态胺CO₂控制技术以及憎水性2床分子筛技术替代，从再生的经济效率上分析，CO₂还原主要依赖Sabatier技术，在长寿命、高可靠及安全性方面，固体聚合物电解质制氧技术远好于流动碱式电解技术，同时，空间应用的氧源，不但需要提供乘员用氧，还将要求满足火星基地的推进系统(2~20 MPa)以及出舱活动的氧气瓶充气(30 MPa)的要求，只有固体聚合物电解质膜的高压电解池具有这种能力，因此，SPE技术也将取代现有电解制氧技术。总之，新技术、新材料的发展将不断更新火星基地长期生活的再生保技术。

3.7.8 食物

3.7.8.1 航天食物概述

航天食物的供给可归于生命保障系统，但鉴于火星情况的特殊性、载人任务的长时性、地外环境的恶劣性，在此将其单独说明。

食物种类（按处理方式分类）

(1)即食食品。如压缩饼干等。

(2)复水食品。由脱水冷冻干燥食品复水后食用。

(3)热稳定食品。经过加热灭菌处理的软包装和硬包装罐头类食品，在太空飞行失重条件下；完全可以用普通餐具由开口容器中取得食物。

(4)冷藏食品。这类食品是在地面上冻好带进太空的，融化后即可食用。

(5)辐照食品。经过放射线灭菌后的食品，防止微生物导致的新鲜食物的腐烂变质，能长期保持原有口感。曾在美国航天飞机飞行中少量使用过。

(6)自然型食品。未经过处理的食品，如新鲜水果、蔬菜、面包、果酱和调料等。

由于火星任务前期水资源匮乏，脱水食物无法满足宇航员的需求，且任务周期长，要求食物有较长保质期，因此，热稳定食物、辐照食物是较理想的选择。

食物来源

(1)地球运输

(2)月球基地运输

(3)火星本土种植畜养

3.7.8.2 在火星上获得食物

火星上没有天然食物，也无法简单高效地用其上的原料来制造食物。而饲养动物以提供奶制品和肉类的想法，短期内无法在火星上成为现实，因为将它们运送到太空会面临诸多挑战。由于火箭载荷有限，初期运输食物较少，除自带宇航食物外，应考虑人工种植可食用食物。

我们需建立温度、湿度恒定、光照规律的温室，同时利用已进行预处理的火星土壤，或利用无土栽培、水培的方法种植植物，宇航员的生活排泄物将成为植物栽培的良好肥料。值得注意的是，我们仍需要大量实验及理论计算筛选适宜火星种植的高收获指数、高蛋白质、高维生素含量、高产量的植物品种，且火星土壤中上长出的植物可能含有重金属元素等，暂无法保证其安全性。

此外，我们可以建立昆虫养殖场并在实验室培育肉类。

昆虫非常适合“火星人”，它们繁殖速度快，能在较恶劣环境中存活，而且单位体积的昆虫就可以提供大量蛋白质和卡路里。比如 100 克蟋蟀可提供 8-25 克蛋白质、121 卡路里、5 克脂肪，它是最有希望成为食用昆虫的品种之一。

而对于不喜欢昆虫的人来说，“细胞农业”——利用实验室培养的细胞制作的食物或许可以成为他们的备选方案。利用细胞培养的技术，从藻类到肉类和鱼类，再到无牛牛奶和无鸡鸡蛋，一切皆有可能实现。另外，我们还可以用牲畜或鱼类的肌肉细胞群培养出鲜肉。美国研究人员已展开实验，从金鱼身上取下新鲜的肌肉组织，放入营养液中进行培养，一个星期后，肌肉组织的质量增加了 14%。

3.7.8.3 各国研究现状

美国宇航局制作了一个名为“蔬菜盒子”的植物生长系统，“蔬菜盒子”大约有一个双屉柜的大小，其内有为蔬菜种子提供土壤和化肥的培育垫层和营养素，并在底部设计了特殊的灌溉系统，以解决太空中不能浇水的问题，盒子则利用一组 LED 灯为蔬菜种子提供光照。另外，盒子的特殊构造还能从太空舱内吸收热量和二氧化碳，为蔬菜种植构造了一定的生态循环。

美国研究人员还称，经过基因改造的转基因浮萍适合火星生长，而且将是火星旅游者的理想食物，因为每克浮萍比大豆拥有更多的蛋白质。此外，浮萍生长速度很快，一天的时间就能成倍生长。用这些特殊培植的浮萍可制成新鲜的糕点，有利于旅游者及时补充营养。

美国康奈尔大学的食品专家花费了几年的时间，利用小麦、西红柿、土豆、大豆、胡萝卜等蔬菜为原料，为未来的火星旅游者配制出了 200 余种素食食谱，最终选择了 15 种可以利用在火星上培育的植物作为原料的食谱。

欧洲宇航局的食品科学家已经精选出西红柿、莴苣、土豆、大豆、菠菜、洋葱、小麦和大米这 8 种蔬菜和粮食，它们能为火星旅游者提供充足维生素、蛋白质和碳水化合物，而且可循环利用程度很高。这些蔬菜和粮食的做法也极具可塑性，厨师们已经设计出 70~80 份食谱。

俄罗斯也进行了火星食谱的探索工作，他们正在筹备仿真火星载人飞行的封闭生存实验，6 名志愿者将参加持续 500 天的实验。实验室内的一个不大的厨房，几间很小的卧室和几个小实验室。在进行实验时，志愿者必须学会适应狭小的生存空间，减少运动，对水和氧气进行回收利用，并且还要在小型温室中种植蔬菜，以保证自己的食品供应。

3.8 建筑概述

3.8.1 火星建筑发展历程



图 35 火星建筑发展历程

3.8.2 火星建筑设计策略

原位建造策略

(1) 原位材料利用

在地建造中注重就地取材，合理利用周围环境现有资源，是实现高效能建造的必然途径，可利用火壤、火岩、金属、非金属等原位资源开发火星建材，实现在火取材与在火建造。

(2) 原位环境利用

东方传统哲学思想运用“减法”策略，合理利用自然条件适应环境是人类以及生物界的普遍的法则。对于火星环境，应充分利用掩蔽场所，适应外部严酷环境。

地火结合策略

核心舱在地预制、展开舱在火展开、基地穹顶与基地单体在火建造。

模块拓展策略

(1) 临时基地的充气式拓展

展开舱通过压缩空气在火展开，设置工作舱、生活舱及生物舱。

(2) 永久基地的单元化拓展

蜂窝状单元基地联动形成整体，在初期和后期不断拓展形成“蜂巢”。

人机分离策略

将母舱与航天员分2次运载至火星，将轨道器和返回器的载荷全部分配至母舱，实现母舱的质量最大化。

母子联动策略

母舱体独立具备载人功能，是科研站核心站的核心部分。子舱体各具功能，承担不同任务。母舱体可与子舱体组合联动，形成整体。

3.8.3 居住形式

对于火星基地的建设，我们仍能从地球原始居民居住形式中得到启发：

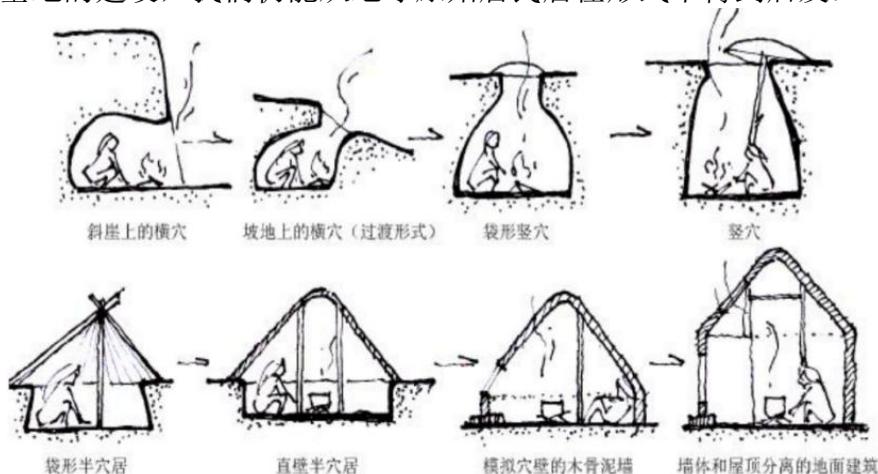


图 36 穴居的演变发展：穴居-半穴居-地面建筑

在过去的几十年里，CNSA、NASA、Space X 等机构已经初步设计了地外居所的方案。这些地方应该足够安全，并具备一定面对多种危险因素的适应能力，如辐射，温度波动和陨石撞击等。与地表相比，地下生存环境受危险因素影响较弱，因此地下区域可以为临时任务以及永久人类住区提供更安全的庇护所。

火星地表的大气密度只有地球地表大气密度的 1%，平均温度只有 -20°C。但是如果深入火星的地壳下，大气压会上升，温度也会上升。在地球上，每向下深入 100 米，温度就会上升 1°C。而在火星的地壳下也有类似的升温规律。在火星地下某处空间，存在着温度为 20°C 且气压接近 105KPa 的宜居环境，是有可能的。

根据目前人类对火星的勘测与研究，科学家们认为火星地下可能存在巨大裂隙，火星上的水或许渗入了地壳的深处，因此熔岩管体内一般被认为最有可能存在大量水冰。

3.8.4 建筑结构形式

关于建筑结构形式，大自然可以给予我们启发和灵感。

蜂窝结构的优点主要有：承受力强，构造精巧、适用而且节省材料。

蜜蜂所做的六角六面状窝，因多墙面的排列和一系列连续的蜂窝形的网状结构，可以分散承担来自各方的外力，使得蜂窝结构对挤压压力的抵抗能力比圆形或正方形要强得多。科学家对蜂窝结构的研究发现，即使非常纤薄的材料，只要把它制成蜂窝形状，就能够承受很大的压力。

蜜蜂的蜂窝构造精巧、适用而且节省材料。房孔的底既不是平的，也不是圆的，而是尖的。这个底是由三个完全相同的菱形组成的。相邻的房孔共用一堵墙和一个孔底，非常节省建筑材料；房孔是正六边形，而蜜蜂的身体基本上是圆柱形，因此它们在房孔内既不会有多余的空间又不感到拥挤。



图 37 蜂窝结构示意图

蜂窝结构在航天领域早有应用，我国的天舟一号货运飞船采用适用于蜂窝板的预埋封边梁方法，巧妙地消除了蜂窝板结构锐边，既避免划伤人手，又解决了蜂窝边缘薄弱、易破坏的问题。为了不断挑战承载极限，设计师还精心设计了一种大承载轻量化预埋结构，既能适应传统刚性结构安装，又能适应柔性束缚带的连接承载。

3.8.5 建筑语言意象

当代科幻小说大师金·斯坦利·罗宾逊（Kim Stantly Robin-son）创作的关于人类太空移民计划的科幻小说“火星三部曲”，包括《红火星》《绿火星》《蓝火星》，三种颜色代表了火星发展的三个阶段，在最后一部《蓝火星》中，火星出现了蔚蓝的大海。

《火星时代》(Mars Season)是由国家地理频道携手 Imagine Entertainment、Radical Media 共同打造的纪实娱乐大片。其中登陆火星的宇航员面对密闭枯燥的环境，曾有如此的对话：“你还在想吗，大海？”“是的，每天都想，好像每想一次，海浪就更安静一些。”

在火星这颗荒凉的红色星球上，比绿色植物更值得期待的，是海——它是人们的心之所向。

由此，且出于凸显中国特色的考虑，我们选择中国特有海洋动物中华鲟作为基地的建筑语言意象，并将其作为“红岸”项目的代表动物。



图 38 中华鲟，被誉为“水中大熊猫”

3.8.6 光导照明系统 (Tubular Daylighting System)

又称为导光管采光系统，这是一种无电照明系统，采用这种系统的建筑物白天可以利用太阳光进行室内照明。其基本原理是，通过采光罩高效采集室外自然光线并导入系统内重新分配，再经过特殊制作的导光管传输后由底部的漫射装置把自然光均匀高效的照射到任何需要光线的地方，从黎明到黄昏，甚至阴天，导光管日光照明系统导入室内的光线都很充足。



图 39 光导照明系统采光罩

该系统由四部分组成：采光装置、导光装置、调光器、漫射装置。

- (1) 采光装置：采光罩一般采用 pc 材质，透光性能好、抗冲击性能优异，耐老化。
- (2) 导光装置：多采用反射率高的材料制作，目前国际通用的有纳米反射材料和金属镜面反射材料。
- (3) 调光装置：专利的调光器，可以在八秒钟之内使光线从 100% 调至 1.5%，使室内照明强度可根据使用需求进行调整。
- (4) 漫射装置：使用了光学透镜的漫射器以前所未有的方式传递日光，使光线更加柔和、均匀，不会产生眩光。



图 40 光导照明系统示意图

夜晚或无光状态时，可利用储存的太阳能进行发电。

光导照明系统优点：

- (1) 照明时间比较长，只要室外有自然光就可以进行照明，并不局限于直射光。
- (2) 照射面积大，是较为舒适的面光源，不会产生局部聚光现象。
- (3) 特有的防盗螺丝可以有效防止外来人员从采光罩的开孔中进入。
- (4) 使用寿命长，超过 25 年。

3.8.6.1 在火建设意义

基地选址纬度低，光照相对充足，若能直接利用阳光进行照明会节省部分能源。

在火星初期的基地，航天员在熔岩管体下很少能上到地面上，因此接触到的阳光很少，把阳光引入室内，根据人因环境心理学，将对宇航员心理产生很大的积极意义。

3.8.6.2 系统表面玻璃罩材料概述

(1) 火星大气较为稀薄，不能完全阻隔有害辐射，表面玻璃罩需要经过特殊处理以过滤辐射，但由于通光管道材料采用铝膜，在高能粒子波段，铝膜是透明材料，因此管道本身也具有过滤有害辐射的作用。

(2) 传统采光结构对新涂层不断增加的需求和火星恶劣的尘暴气候是限制光导照明系统在火利用的因素，而具有自清洁能力的阳光透明和辐射冷却材料，可以为室外采光结构的冷却和清洁提供一站式解决方案。基于尺寸依赖性光谱响应和疏水仿生学的理论，这种具有高效日间辐射冷却和强大的自清洁性能的太阳能光透明纳米复合薄膜可以为之所用。

该纳米复合薄膜经溶液处理制备，由随机分布的 SiO 组成 2TPX 基质中的纳米球（20nm）。含有 22.6 体积%纳米球的 50 微米厚的纳米复合薄膜显示平均红外（波长：2.5 至 13 微米）发射率值大于 0.85，太阳辐照度（波长：0.3 至 1 微米）透射率为约 90%。纳米复合薄膜涂层的这种高太阳能光透明度导致裸露和涂层太阳能电池在单次闪光测量中分别具有 14.79% 和 14.71% 的几乎相同的功率转换效率（PCE）。

此外，纳米复合薄膜涂层可以在阳光直射下将硅太阳能电池的温度降低多达 5°C，从而提高其电功率输出。与裸电池供电相比，由涂层太阳能电池供电的发光二极管（LED）负载的平衡温度提高了 14°C，从而验证了增强的功率输出。纳米复合材料涂层的这种良好性能是由于其在太阳光区域的高透射率和在 LWIR 透射窗口中的高发射率（如下图）。

纳米复合薄膜具有强大的自清洁能力，并在各种类型的模拟极端环境条件下保持其性能，包括射流冲击，pH 值从 1 到 13 和长期户外暴露。

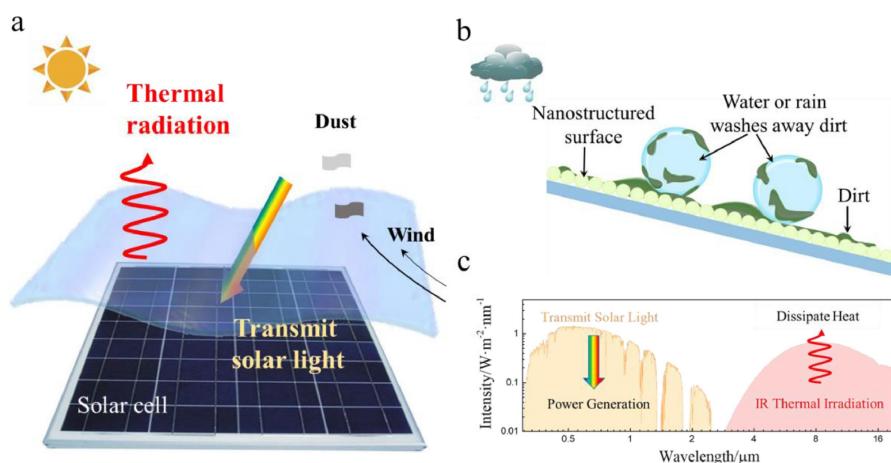


图 41 自清洁和透明纳米复合膜，用于辐射冷却。复合薄膜具有辐射冷却和自清洁功能的示意图。

3.8.7 充气自展开

1961 年，NASA 提出充气栖息地并实测；

1965 年，苏联充气闸舱实现宇宙行走；

2016 年，NASA 发射 BEAM 充气模块到达国际空间站。

充气自展开技术已在国际空间站成功应用，该技术可有效结合地火资源，成为实践性较强的太空建造技术。



图 42 充气自展开概念图

3.8.8 3D 打印 SSS 技术

SSS 是一种粉末烧结型 3D 打印工艺, 能够使用包括聚合物、金属、以及陶瓷在内的多种材料。不过其制造对象并非“轮廓工艺”那样层层挤出的结构, 而是一个个可以互相咬合的砖块结构, 或是功能性的金属部件。

通过将 NASA 约翰逊航天中心开发的能模拟月球与火星土壤的复合材料与高熔点陶瓷(如也存在于月球与火星上的氧化镁)混合, 美国南加州大学 Khoshnevis 及团队已经成功通过这种新技术打印出了砖块结构。它们的强度足以抵御住宇宙飞船降落时产生的高温和高压。

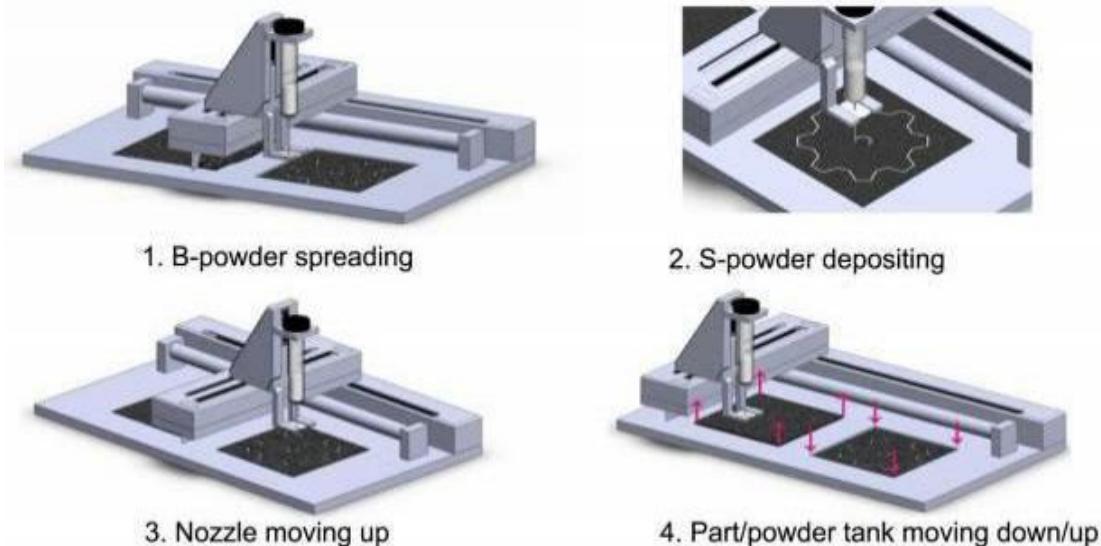


图 43 SSS 打印技术示意图 (图片来源: 互联网)

3.9 初级基地设计

阶段一：临时基地

概述：临时性火星基地由七个分系统组成：核心舱、气闸舱、火星实验舱、火星居住舱、环控生保系统、火星资源利用设备、表面机动系统（含漫游车）和光伏发电系统。临时性火星基地的所有设备都由无人飞船提前发射到火星，着陆在火星表面，自动展开、组装和调试，机器人自动开展探测及建筑工作，直到航天员完成火星探测任务后离开火星、返回地球。因此，临时性火星基地应具有高度的自主性，具备一定维修故障的能力。

当航天员到达火星时，登陆仓下降至熔岩管体天窗底部表面，地表机器人将已打印完毕的基地穹顶移到天窗口处，由在地研制的柔性舱体充气展开充当最早一批航天员的临时基地。

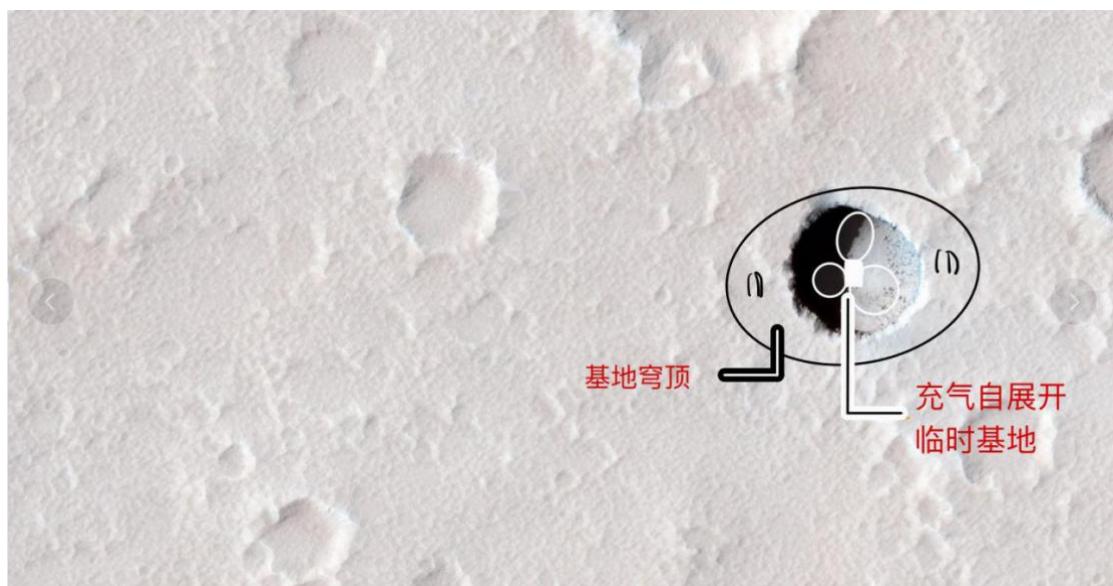


图 44 基地俯视示意图一

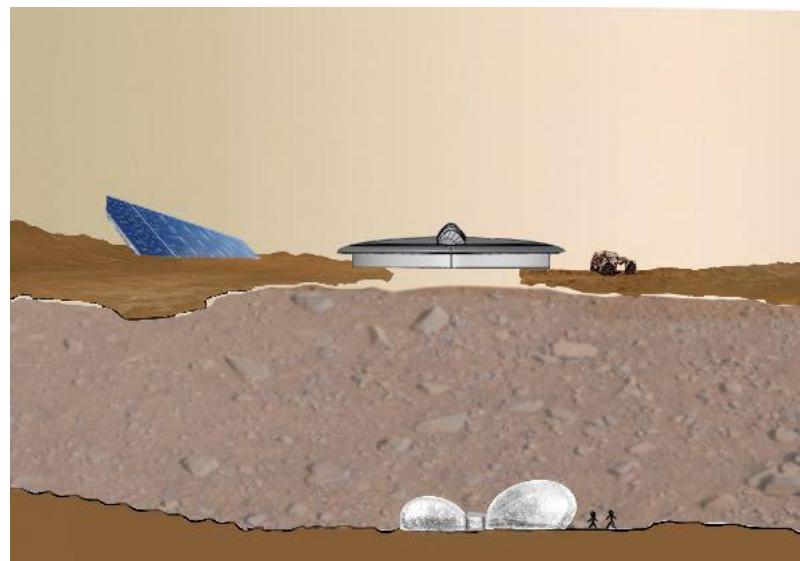


图 45 基地效果图一（出于简洁考虑图中省略光导照明通道和垂直电梯）

基地穹顶以中华鲟为原型，上部突起为特殊导光透明棱镜，将地表光引入地下，其他部分为火星本土金属或土壤的3D打印，正常情况宇航员从气闸舱进出，由于考虑到大型设备或飞行器进出的需要，穹顶设有如图所示的展开状态。

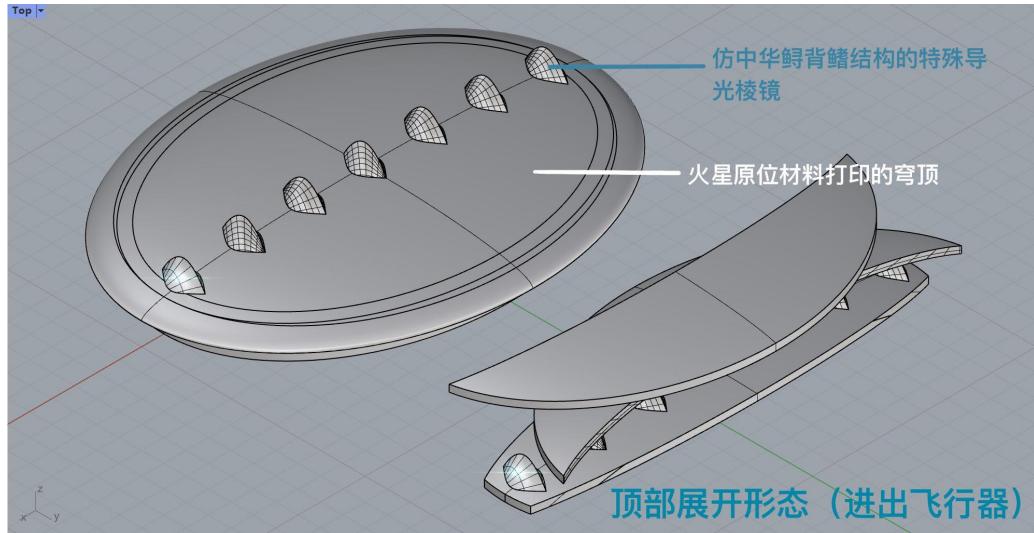


图 46 基地穹顶结构图（右侧为其展开形态）

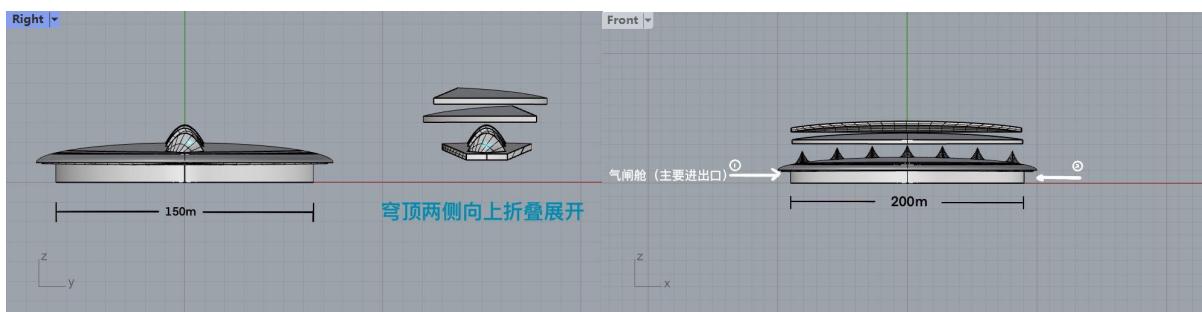


图 47 基地穹顶水平示意图



图 48 基地充气自展开过程（类比）

系统参数（生活用量）

(1) 人体氧气需求量约 0.84 千克/人/日，二氧化碳释放量约 1 千克/人/日 (NASA 研究数据)。本方案按生活用氧的 50%由生物舱 (25 平方米) 内植物 (按红叶生菜、小麦、其他蔬菜计) 在温度 23.5-25.5°C 及相对湿度 50-70% 的条件下经光合作用获取，即每日 1.68 千克供 4 名宇航员使用，其余氧气以电解水方法供应。

(2) 用水量

2.5 升/人/日，即每日 10 升可供 4 名宇航员使用。

(3) 用电量及舱内照度

核心舱：照明用电 $20\text{w}/\text{m}^2$ ；办公等辅助 $100\text{w}/\text{m}^2$ ；照度 500lx

工作舱：照明用电 $20\text{w}/\text{m}^2$ ；办公等辅助 $150\text{w}/\text{m}^2$ ；照度 500lx

生活舱：照明用电 $10\text{w}/\text{m}^2$ ；辅助用电 $70\text{w}/\text{m}^2$ ；照度 300lx

植物舱：照明用电 $10\text{w}/\text{m}^2$ ；辅助用电 $50\text{w}/\text{m}^2$ ；照度 300lx

阶段二：永久基地及扩展

概述：永久基地将在临时基地的基础上增加生物舱、水和氧气回收循环体系，为航天员提供较长时间的生命保障；增加电力储存及电解水体系，使基地拥有较稳定的电力来源、较大功率的电力输出和可靠的电力保障；增加休息和娱乐区域，调节航天员的心理状态，更高效率地工作。同时扩建临时基地，横向延伸出多个类似蜂窝结构的建筑体，用于生活与科研。

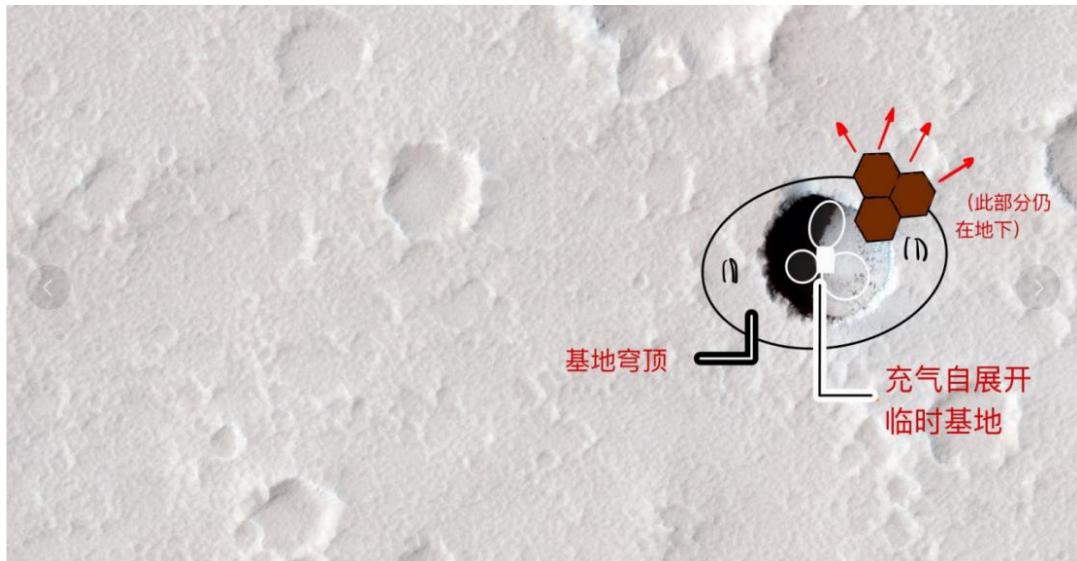


图 49 基地俯视示意图二



图 50 基地效果图二（出于简洁考虑图中省略光导照明通道和垂直电梯）

地下单体建筑：形态为六边形体块，其边长为 12 米，共五层，层高 3 米，以 3D 打印技术建造。照明采用光导照明系统，将管道通入地上部分。

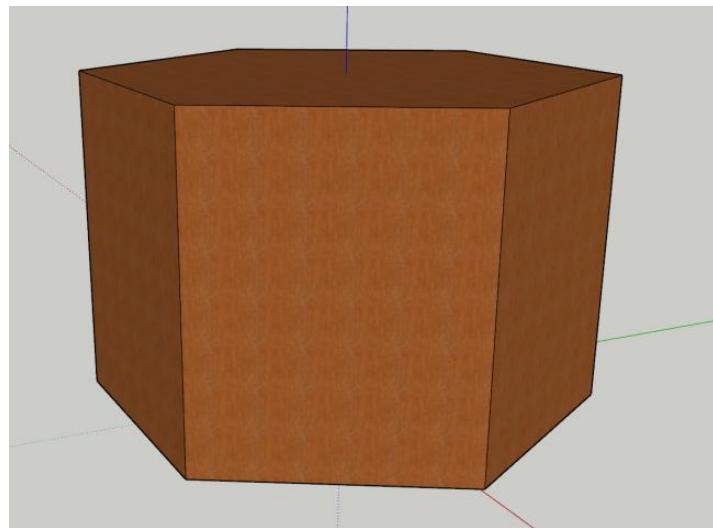


图 51 “蜂窝”基地单体建模图

为使航天员受到最小限度的辐射，居住区置在最底层，居住面积： 367.2m^2 。

二层为公共娱乐空间及种植区，种植区面积： 245m^2 ，公共娱乐空间面积： 122m^2

三层仍包括 122m^2 的种植区，以及 122m^2 的健身娱乐空间，健身娱乐空间的平台上旁不设地面，与二层公共娱乐空间相通。

四层五层整体用于科研室，储藏室，控制室等，面积 734.4m^2 。

永久扩展基地系统参数（生活用量）与临时基地相同。

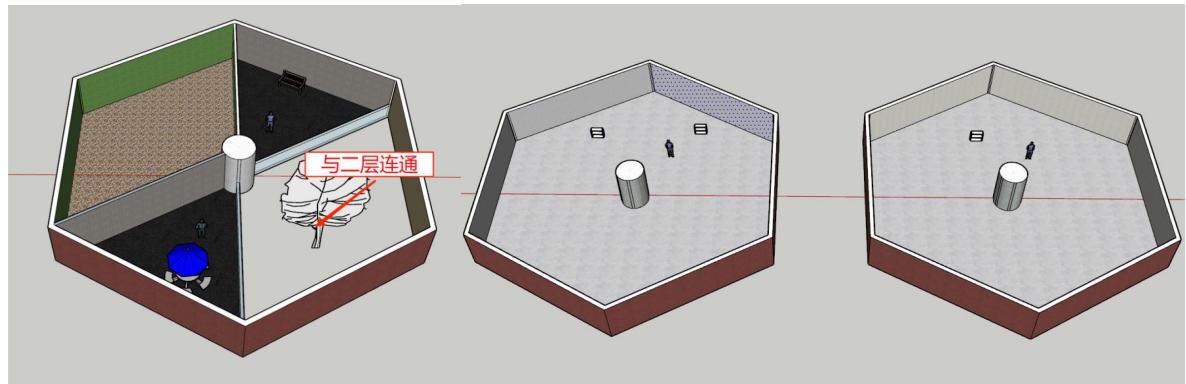
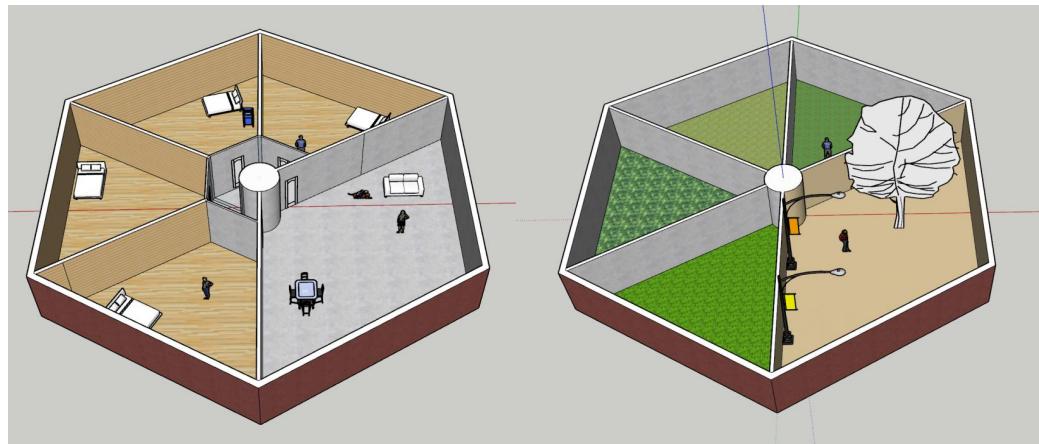


图 52 基地一到五层分解图（按顺序）

阶段三：小规模火星社区

概述：火星社区居住科研单元以子母舱联动，分为机器人社区与人居环境社区，由于矿物分布不均，工业工厂的区位因素可暂不考虑，由资源分布决定。火星社区将在初期基地的基础上进行扩建，社区中机器人数量远多于人类，人类控制大量机器人外出进行环境勘测工作、资源采集工作和外部设备维护工作，社区将添加大量为机器人服务的设施，如维修站、能源补给站、机库等。因此，良好地构建和划分人居环境与机器人社区仍是一个重要的课题。火星社区应当是地上与地下一齐发展，人类与机械协作的星际殖民地、资源采集地。



图 53 基地效果图三（出于简洁考虑图中省略光导照明通道和垂直电梯）

社区中母舱独立具备载人功能，是科研与生活的核心，子舱主要起拓展母舱和交通连接作用，各具不同功能。火星社区单体连接以此为策略，铺设更多单体，满足人类更多生产生活和开采开发的需求。

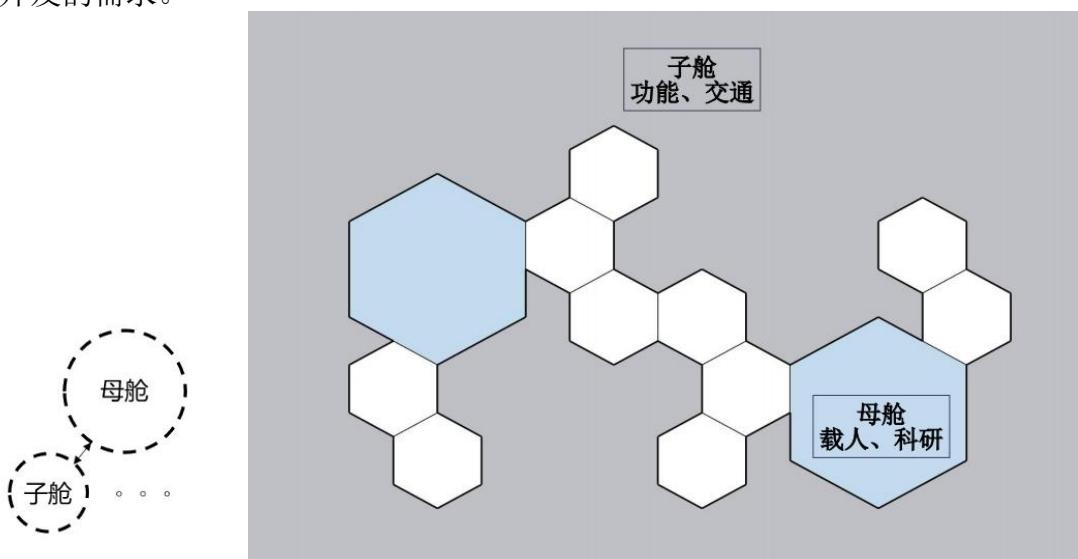


图 54 母子舱联动示意图

阶段四：火星城市（略）

阶段五：火星地球化（略）

3.10 火星空间法

3.10.1 序言

如果人类登陆火星，并建立拓殖基地。地球上国家政府的法律，在司法实践领域几乎不可行。因为火星窗口期时间间隔为 26 个月，很难设想：地球上某警局，会训练一批星际战警、乘坐星舰、来回往返航行 14-16 个月去火星抓捕一名疑犯。

因此，未来“星际执法”只能是“属地原则”：由外星当地司法机构就地执行，所以必然出现人类拓殖者的外星警察、法庭、监狱。

火星距地球在 5500 万-4 亿公里之间，地球上任何警局都无法去火星执法，那为何要执行地球上某地法律？火星拓殖者，来自于人类不同国家、各个族群，又以哪国法律为准？人类社会没有统一法。所以，人类走向太空，必然会产生“太空立法”。而太空立法就是要解决宇宙中的这些问题。

目前在空间探索方面仍需解决的问题：

(1) 外空军事化，武器化趋势不断加剧

人类从开启太空探索时代之初就带有明确的军事目的，外层空间的军事利用始终存在。现有国际空间法及国际裁军，军控机制对军事卫星利用没有明确具体的规范。

其次，美国为了维护其地位近年来不断强化其外空军事利用力度，特朗普上台后强力推进太空军事化 2017 年 12 日发布的《国家安全战略》 2018 年 1 月发布的《国防战略》和 3 日发布的《国家航天战略》等反复提及增强外空作战能力的法案去推动大空军事体制变革，2019 年 12 月 20 日美国国会通过的《2020 年国防授权法案》由特朗普签署生效，该法案授权组建美国天军，初步规划了天军的组织架构和基本职能。2020 年 8 月，美国天军发布名为《太空力量》的大空作战顶层文件，美台上相关政策和组天军的行动显示美国在讲一步落实其将太空作为独立作战或的构想空间对抗已从幕后到台前。2020 年 6 月美国国防部发布《国防太空战略》，该战略中妄称中国和俄罗斯的空间战略意图与外空军事能力对美国保持自身空间优势构成紧迫威胁。在美国的影响和带动下，法国、日本、印度、英国和德国也相继组建天军。

(2) 外空活动长期可持续性面临威胁

随着外空活动的增加和外空活动主体的增多，外空活动的长期可持续性受到威胁，空间碎片环境恶化，卫星轨道和频率资源紧张，当前空间碎片问题给航天事业发展带来了隐患，已成为

外空活动和空间资产安全的主要威胁，太空环境治理已成为亟需国际社会加以重视的全球治理领域。

(3) 外空活动商业化发展迅速

近年来，航天商业价值愈发凸显，吸引了大量新兴力量，产生了航天领域新的活动上的商业模式。这同时也给过去以规范国家外空活动为主的国际空间法体系带来冲击，产生了需要重新深入思考的难题。

因此该法律将着重解决这方面的问题，并且解决一些相关普遍问题。

3.10.2 第一部分 主体条约

探索和利用外层空间（包括火星和其他天体），应为所有国家谋福利和利益，并应为全人类的开发范围。

所有国家可在平等、不受任何歧视的基础上，根据国际法自由探索和利用外层空间，自由进入天体的一切区域。

所有国家应有对外层空间进行科学考察的自由；各国要促进并鼓励这种考察的国际合作。各国不得通过主权要求、使用或占领等方法，以及其他任何措施，把外层空间（包括火星和其他天体）据为己有。

各国在进行探索和利用外层空间的各种活动时，应遵守国际法和联合国宪章，以维护国际和平与安全，促进国际合作与发展。

各国保证：不在绕地球轨道放置任何携带核武器或任何其他类型大规模毁灭性武器，不以任何其他方式在外层空间部署此种武器。

各国必须把探索火星和其他天体绝对用于和平与发展的目的。禁止在天体建立军事基地、设施和工事；禁止在天体试验任何类型的武器以及进行军事演习。

各缔约国应把宇航员视为人类派往外层空间的使节。在宇航员发生意外、遇难、等情况下，各国应向他们提供一切可能的援助。宇航员若紧急降落后，应立即、安全地被交还给他们本国国家。

在外层空间和天体进行活动时，任一国家的宇航员应与其他国家的宇航员互帮互助，禁止一切威胁对方宇航员安全的行为

各国对其在外层空间（包括火球和其他天体）所从事的活动，要承担国际责任。并应负责保证本国活动的实施，符合本条约的规定。

凡进行发射或促成把实体射入外层空间（包括火星和其他天体）的缔约国，及为发射实体提供领土或设备的缔约国，对该实体及其组成部分在地球、天空、或外层空间（包括火星和其他天体）使另一缔约国或其自然人或法人受到损害，应负国际上的责任

各国探索和利用外层空间（包括火星和其他天体），应以合作和互助原则为准则；各国在外层空间（包括火星和其他天体），所进行的一切活动，应妥善照顾其他国家的同等利益。各缔约国从事研究、探索外层空间（包括火星和其他天体）时，应避免使其遭受有害的污染

为提倡和平探索和利用外层空间（包括火星和其他天体）的国际合作，凡在外层空间（包括火星和其他天体）进行活动的缔约国，同意以最大的可能和实际程度，将活动的性质、方法、地点及结果的情报，通知给联合国秘书长、公众和国际科学界。联合国秘书长接到上述情报后，应准备立即切实分发这种情报资料。

火星和天体上的所有驻地、设施、设备和宇宙飞行器，应以互惠基础对其他缔约国代表开放。

因国际政府间机构探索和利用外层空间（包括火星和其他天体），而产生的任何实际问题，要由该国与主管国际机构解决

发射国在发射一个外空物体进入或越出地球轨道时，应以登入其所须保持的适当登记册的方式登记该外空物体。

每一登记国应在切实可行的范围内登入其登记册的每一个外空物体的下列情报：

发射国或多数发射国的国名；

外空物体的适当标志或其登记号码；

发射的日期和地域或地点；

基本的轨道参数，包括：

波节周期，

倾斜角，

远地点，

近地点。

外空物体的一般功能。

本协定各国，注意到各国在火星和其他天体的探索和利用方面所获得的成就，决心在平等基础上促成各国在探索和利用火星和其他天体方面合作的进一步发展，切望不使火星成为

国际冲突的场所，铭记着开发火星和其他天体的自然资源所可能带来的利益，回顾关于各国探索和利用包括火星和其他天体在内外层空间活动的原则条约。

本协定内关于火星的条款也适用于太阳系内地球以外的其他天体。

为了本协定的目的，“火星”一词包括环绕火星的轨道或其他飞向或飞绕火星的轨道。

以及火星上的一切活动。火星应供各国专为和平目的而加以利用。

在火星上使用武力或以武力相威胁，或从事任何其他敌对行为或以敌对行为相威胁概在禁止之列。利用火星对地球、火星、宇宙飞行器、宇宙飞行器或人造外空物体的人员实施任何此类行为或从事任何此类威胁，也应同样禁止。

缔约各国不得在环绕火星的轨道上或飞向或飞绕火星的轨道上，放置载有核武器或任何其他种类的大规模毁灭性武器的物体，或在火星上或火星内放置或使用此类武器。

禁止在火星上建立军事基地、军事装置及防御工事，试验任何类型的武器及举行军事演习。但不禁止为科学的研究或为任何其他和平目的而使用军事人员。也不禁止使用为和平探索和利用火星所必要的任何装备或设备。

火星的探索和利用应是全体人类的事情并应为一切国家谋福利，不问它们的经济或科学发展程度如何。应依照联合国宪章规定，充分注意今世与后代人类的利益、以及提高生活水平与促进经济和社会进步和发展的需要。

为此目的，缔约各国特别可以：

在火星上降落及从火星发射外空物体；

将它们的人员、外空运载器、装备、设施、站所和装置放置在火星的表面或表面之下的任何地点。

人员、外空运载器、装备、设施、站所和装置可在火星表面或表面之下自由移动或自由被移动。

各国应采取一切实际可行的措施，以保护在火星上的人的生命和健康。为此目的，各国应视在火星上的任何人为关于各国探索和利用包括火星和其他天体在内外层空间活动的原则

火星及其自然资源均为全体人类的共同财产。火星不得由国家依据主权要求，通过利用或占领，或以任何其他方法据为已有。火星的表面或表面下层或其任何部分或其中的自然资源均不应成为任何国家、政府间或非政府国际组织、国家组织或非政府实体或任何自然人的财产。在火星表面或表面下层，包括与火星表面或表面下层相连接的构造物在内，安置人员、外空运载器、装备设施、站所和装置，不应视为对火星或其任何领域的表面或表面下层取得所有权。

3.10.3 第二部分 各国探索和利用外层空间活动的法律原则宣言

现郑重宣告，各国在探索和利用外层空间时，应遵守下列原则：

探索和利用外层空间，必须为全人类谋福利和利益。

各国都可在平等的基础上，根据国际法自由探索和利用外层空间及天体。

外层空间和天体决不能通过主权要求、使用或占领、或其他任何方法，据为一国所有。

各国在探索和利用外层空间时应遵守合作和互助的原则。各国在外层空间进行各种活动，应妥善考虑其他国家的相应利益。

凡登记把物体射入外层空间的国家，对该物体及所载人员在外层空间期间，仍保持管理及控制权。

向外层空间发射物体的国家或向外层空间发射物体的发起国家，对所发射的物体或组成部分在地球、天空或外层空间的设备或物品应承担相应责任

各国应把宇宙航行员视为人类派往外层空间的使节。在他们如因意外事故、遇难、于外国领土或公海紧急降落时，各国应向他们提供一切可能的援救措施。紧急降落的宇宙航行员，应安全迅速地交还给该国。

火星上各个群体或国家（组织）均应遵守此法律，从而保证火星的平稳开发与和平发展。

3.11 3D 打印部分成果展示

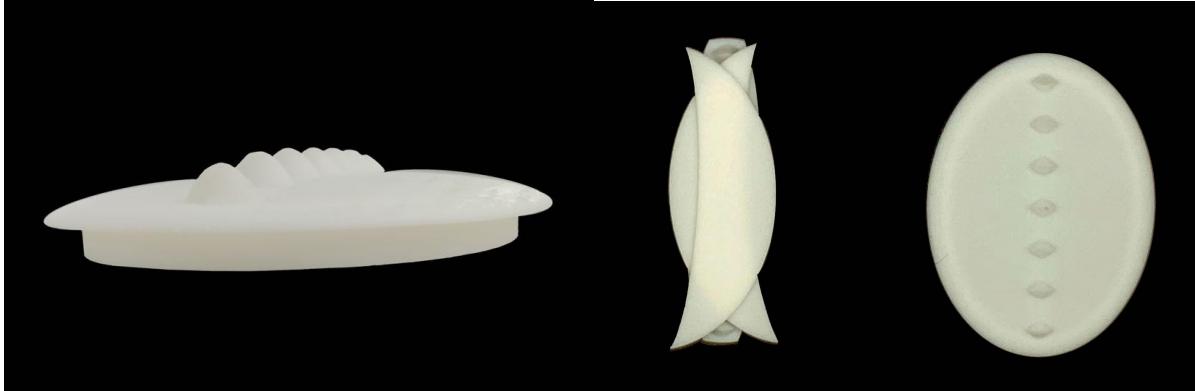


图 55 基地穹顶 3D 打印成品照片

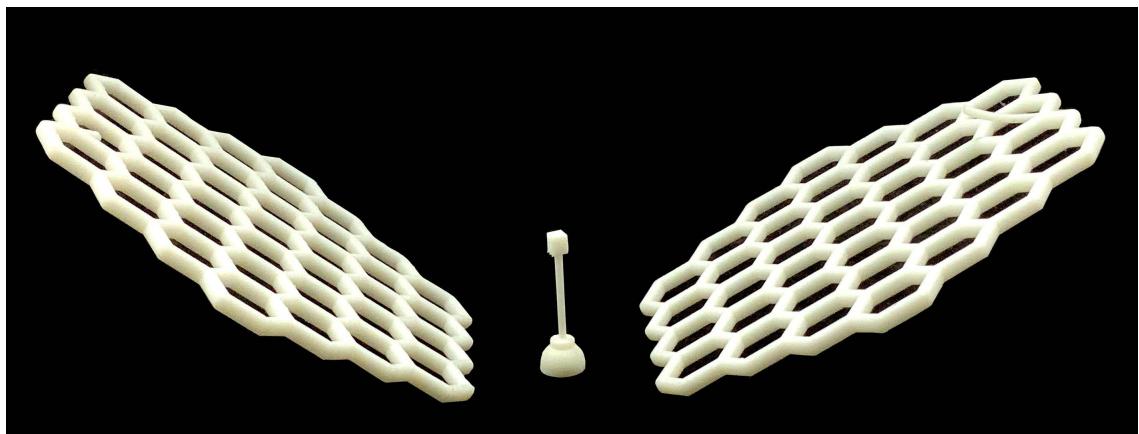


图 56 光伏太空发电站 3D 打印成品照片



图 57 凤滚草机器人摄像头两种方案 3D 打印成品照片

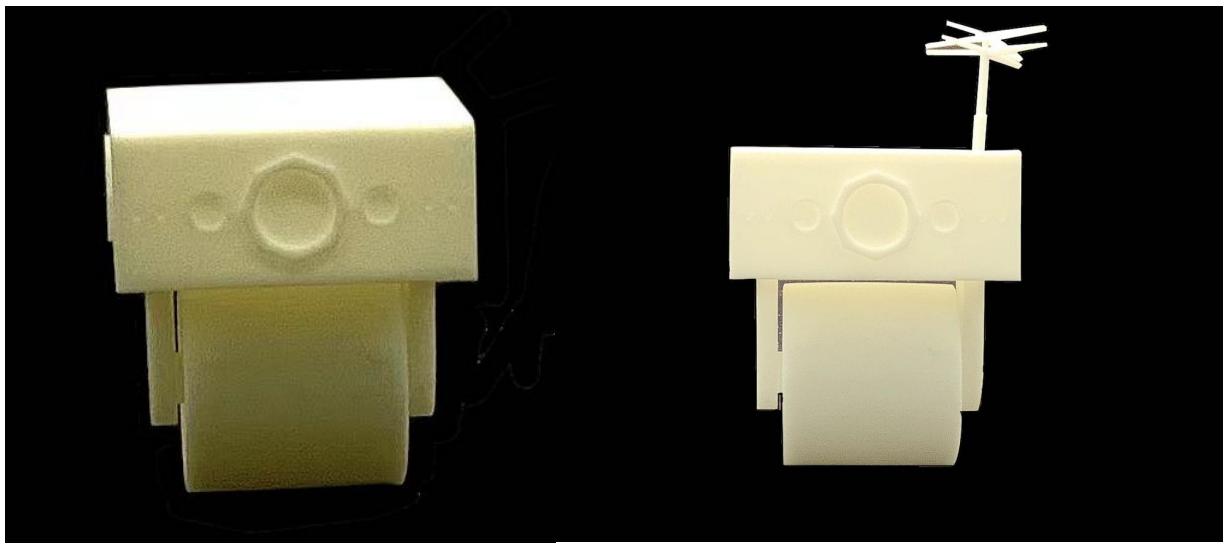


图 58 模块化机器人与飞行机器人 3D 打印成品照片

3.12 项目文化

3.12.1 “红岸” 命名

在科幻小说《三体》中，红岸基地是在冷战背景下，为对抗苏修和美帝的太空计划的绝密国防工程，代号“红岸”。其主体单元是一面巨大的抛物面天线，对外宣称是监听与摧毁敌国卫星等太空目标，实际上是用来寻找地外高智慧文明。

我们既惊叹于刘慈欣过人的想象力与《三体》宏大的世界观，又留意到实际上此项目又何尝不是一篇更加理性的硬科幻小说，在现实的基础上，进行合理的逻辑推理与想象，预测并描述国家未来拓展外空领域的计划布局。

火星由于富含氧化铁物质而呈现出一片赤色，为概括人类对新家园的期待，本项目基地命名为“红岸”，取“红色彼岸”之意，并致敬小说《三体》。

3.12.2 logo 及设计理念



图 59 “红岸” 项目 logo

蜷缩的中华鲟包围着基地单体群和项目基地英文名“Red Coast”，象征着基地的设计意向“大海”，彰显中国特色。中华鲟的嘴与眼睛被六边形“蜂窝”建筑替代，象征基地单体为六棱柱，圆形红色的外缘象征火星，雷达似乎在从基地发出讯号，昭示着人类从此跨越行星际，探索更广阔的宇宙。

3.12.3 科幻小说

科幻小说是由成员自发的，以项目成果为背景进行编写，在项目结束之后积极联系出版社出版。目前编写工作已接近尾声，进入最后的修补阶段，预计 2022 年末出版。

小说将以 2055 年为时间节点，通过人物对话与经历还原 2024 年-2055 年的历史，第一部内容主体以人类在火星上第一次失败的政权独立的悲剧为主导线索，通过合理想象描述未来人类在火的生活，因地球发生核武器战争，导致火星部分人对国家概念的绝望，试图利用火星到地球最长 20 分钟的通信延迟（光速），联合科学家与军方，夺取太空轨道发电器等大型重要设施，要挟地球政府与地面火星科学协会，但以失败告终，第一部将以第三人称视角编写。

节选

“请你务必仔细考虑，如今这项工程，祖国很需要你们这些年轻的力量。”

他躺在床上，却怎么也睡不着，脑子里的谢副局的声音一遍一遍地重复着，什么“红岸”，什么“火星”，他想起来父亲的故事。

2007 年 9 月 24 日，国防科学技术工业委员会向中央提交了一份题为《关于地外永久性基地建设工程》的文件：

2004 年，时任美国总统乔治·W·布什提出载人航天项目“星座计划”，主张重返月球，并在月球建立永久基地，为登陆火星做准备。我国若想在国际空间竞争中取得一席之地，就必须现在开始相关立项准备。

文件提出了工程立项的可能性、必要性、紧迫性，以及具体实施计划的大纲和预算。但由于预算过高，没有受到国务院的重视，2008 年，美国总统奥巴马实质结束了重返月球的计划，“星座”计划流产，同年 3 月，国防科学技术工业委员会被解散，该文件逐渐被搁置遗忘。

他的父亲当时就是参与草拟文件的人，这件事是他上了高中以后才知道的，按照父亲当年的话来说，“月球就是钓鱼岛，火星就是黄岩礁，如果现在不上去的话，未来子孙后代会怪我们的”，他知道父亲是一位伟大的工程师，但是从没想过走父亲的道路，又或许他只是不愿去想，他不愿意子女和自己一样在孤独的童年中长大。在月色中，他撑起身子，回忆起白天谢副局的模样，谈到“红岸”时，他的表情是那样严肃，眼神中却透露出期许与激动。

1111 工程，代号“红岸”，取红色彼岸之意，于 2030 年立项，是由国防部与航天局共同主导，26 所高校、207 家企业或部门直接参与的国家重大工程，旨在以月球基地为跳板，完成载人登火任务并在火星建立永久居住地。2032 年，美国再次登月，并占领一部分中俄月球科研站计划用地，此举引发中俄两方强烈抗议，1111 工程被推向前所未有的高度。

第二天一早，裴老师径直朝着谢宏斌的办公室走去。

.....

4.创新点

- (1) 原创总结出了火星基地发展的五个阶段，给出相应界限。
- (2) 给出了一个相对全面的火星基地建设方案。
- (3) 设计了适用于火星环境的模块化机器人和风滚草机器人，并建模、进行 3D 打印。
- (4) 提出了太空光伏发电站的理念，设计了可能的方案并建模、进行 3D 打印。
- (5) 基地外壳仿照中华鲟的造型，展现中国的特色。
- (6) 根据现有法律，提出了火星太空法。
- (7) 命名基地“红岸”并设计项目 logo 以及在项目结束之后出版小说。

5.结束语

2021 年 3 月 9 日，经两国政府批准，中国国家航天局局长张克俭与俄罗斯国家航天集团公司总经理罗戈津通过视频会议签署《中华人民共和国政府和俄罗斯联邦政府关于合作建设国际月球科研站的谅解备忘录》。自 2021 年起，项目建设共分为“勘、建、用”三个阶段，时间跨度达 15 年，计划于 2035 年建成；项目还为国际伙伴在各阶段以及阶段各层级的参与划定了 5 种合作类型。

我们的学业和事业期正处于国家地外基地航天计划的发展阶段，对此深感幸运，又同时感到身负重任，在年度项目近一年的磨练中，我们明晰了地外基地的概念，运用自学的知识，预测国家和世界科研的发展方向，时刻了解国家航天战略的前沿，准备着成长为能为未来祖国航天战略贡献出自己的力量的人。

感谢学校提供了如此广阔的平台，使得我们团队有机会在老师的指导下，初窥科学的研究的道路，为将来投身科研打下坚实的基础。

感谢多位学长与老师在项目进行过程中的答疑解惑和无私帮助，你们的帮助将使我们终身受益。

感谢四名组员团结一心，各司其职，弥补彼此的不足，花费各类假期及在校时间全身心投入其中，定期频繁开展任务汇报工作，互相督促勉励，最终圆满完成了这个项目，甚至从项目延申，自发地编写有关未来火星殖民的科幻小说。

在此特别感谢裘俊老师的悉心指导，在我们陷入瓶颈时指点迷津，循循善诱，多次积极交流沟通，支持并肯定我们的研究，裘老师多次带我们参观自己的各种实验室，为项目提供了 3D 打印的技术与设备支持，不厌其烦地反复为我们讲解国际科技前沿，关心督促我们的学分绩，我们收获的不只是项目内的知识，而是未来如何去成长为一个对国家有用的科研人，裘俊老师是一位真正令人尊敬的，教书育人的教授。

6.参考文献

- [1]张唯诚. 火星上使用太阳能依然前景广阔[N]. 大众科技报,2008-12-28(A03).
- [2]食物或是最难在火星上制造的东西，未来移民火星可能得吃虫子[J].华东科技,2019(10):80.
- [3]月球和火星地下熔岩管体或可建设太空基地[J].科学 24 小时,2020(12):34.
- [4]吴长锋. 火星岩石用处多：既能遮风尘 也可挡辐射[N]. 科技日报,2021-08-18(003).
- [5]刘洋,吴兴,刘正豪,邹永廖.火星的地质演化和宜居环境研究进展[J].地球与行星物理论评,2021,52(04):416-436.
- [6]J.K.Risner ,李凤仪.火星水文地质[J].地质地球化学,1991(01):49-54+68.
- [7]李衍存,郑玉展,郝志华,王建昭,呼延奇,曲少杰,蔡震波.火星表面辐射环境分析[J].航天器环境工程,2019,36(06):558-564.
- [8]刘洋,刘正豪,吴兴,覃朗,武雨纯,张朝琳,赵振兴,周翔,邹永廖.火星的水环境演化[J].地质学报,2021,95(09):2725-2741.
- [9]郝剑,李丹明,党文强,李居平,王仕发.火星二氧化碳及水资源利用的研究进展[J].真空与低温,2018,24(05):289-296.
- [10]张宁,陆希,赵健楠,王江,彭玉明,刘汉生,肖龙.火星风力资源的研究现状及利用途径[J].载人航天,2020,26(03):381-388.
- [11]贾阳,刘振春,崔尚文.火星宜居化技术验证设想[J].国际太空,2017(09):52-57.
- [12]傅小林,薛重生.火星与地球岩石化学成分对比[J].地质科技情报,1997(S1):29+35.
- [13]付剑豪,叶雨辰,陈昊.太空极端条件下的人性化建筑营造——以火星建筑为例[J].建筑与文化,2018(12):159-162.
- [14]安利.五种令人大开眼界的火星建筑设计[J].百科知识,2018(02):24-25.
- [15]Jackie Mcguinness.NASA Outlines Challenges, Progress for Artemis Moon Missions[N].NASA, 10 November 2021(1)
- [16]任德鹏,李青,许映乔.月球基地能源系统初步研究[J].深空探测学报,2018,5(06):561-568.DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.06.009.
- [17]李桢. 载人火星探测任务轨道和总体方案研究[D].国防科学技术大学,2011.
- [18]周旭东.载人火星飞行轨道方案的设计和计算[J].载人航天,2012,18(04):56-62.DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2012.04.012.
- [19]刘玥. 火星探测器近心点制动与轨道保持优化设计[D].哈尔滨工业大学,2011.
- [20]朱毅麟. 载人火星航行方案初探[C]//.中国空间科学学会空间探测专业委员会第十四次学术会议论文集.[出版者不详],2001:78-88.
- [21]王燕,张晓岚. 美国载人登陆火星方案研究[C]//.中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集（上册）.[出版者不详],2012:78-84.
- [22]王伟,方宝东,褚英志. 环火星探测器常用轨道的选择及特点[C]//.中国宇航学会深空探测技术专业委员会第六届学术年会暨 863 计划“深空探测与空间实验技术”重大项目学术研讨会论文集.[出版者不详],2009:71-76.
- [23]侯倩.国外空间站环控生保分系统研究现状和发展趋势分析[J].国际太空,2015(01):51-57.
- [24]王康,高峰.载人航天器环控生保系统 50 年研制回顾与展望[J].航天医学与医学工程,2011,24(06):435-443.DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2011.06.013.
- [25]汤兰祥,高峰,邓一兵,傅岚,董文平,周抗寒.中国载人航天器环境控制与生命保障技术研究[J].航天医学与医学工程,2008(03):167-174.DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2008.03.005.
- [26]月球和火星地下熔岩管体或可建设太空基地[J].科学 24 小时,2020(12):34.

- [27]吴长锋. 火星岩石用处多：既能遮风尘 也可挡辐射[N]. 科技日报,2021-08-18(003).
- [28]刘洋,吴兴,刘正豪,邹永廖.火星的地质演化和宜居环境研究进展[J].地球与行星物理论评,2021,52(04):416-436.
- [29]J.K.Risner ,李凤仪.火星水文地质[J].地质地球化学,1991(01):49-54+68.
- [30]李衍存,郑玉展,郝志华,王建昭,呼延奇,曲少杰,蔡震波.火星表面辐射环境分析[J].航天器环境工程,2019,36(06):558-564.
- [31]Guo, J., Zeitlin,C.,Wimmer-Schweingruber,R.F. et al.未来人类在火星表面探索的辐射环境：目前基于 MSL/RAD 剂量测量的理解. Astron Astrophys Rev 29,8 (2021) .<https://doi.org/10.1007/s00159-021-00136-5>
- [32]Carter J, Poulet F, Bibring J P, et al. 2013. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: Updated global view. Journal of Geophysical Research: Planets,118: 831-858
- [33]Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F, et al. 2004. Mars crustal magnetism. Space Science Reviews, 111: 1-32
- [34]Huang J,Xiao L,刘勇胜.爆发式火山活动可能是火星早期火山作用的主要方式[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(04):836.
- [35]Bandfield J L, Hamilton V E, Christensen P R.2000. A global view of Martian surface compositions from MGS-TES. Science, 287: 1626-1630
- [36]Adilson Celimar Dalmora,Claudete Gindri Ramos,Marcos Leandro Silva Oliveira,Luis Felipe Silva Oliveira,Ivo André Homrich Schneider,Rubens Muller Kautzmann. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: Evidence of sustainability[J]. Journal of Cleaner Production,2020,256.
- [37]Bandfield J L, Hamilton V E, Christensen P R. 2000.compositions from MGS-TES. Science, 287: 1626-1630 A global view of Martian surface
- [38]世纪之交空间法的回顾与展望(下)[J]. 黄惠康. Aerospace China. 2000(10)
- [39].能为火星供食物,中国兴起“智能植物工厂”[J].蔬菜,2016(07):53.
- [40]陈勇. 美国科学家设计“火星植物”[N]. 新华每日电讯,2005/10/27(008).DOI:[10.28870/n.cnki.nxhmr.2005.004610](https://doi.org/10.28870/n.cnki.nxhmr.2005.004610).
- [41]郝剑,李丹明,党文强,李居平,王仕发.火星二氧化碳及水资源利用的研究进展[J].真空与低温,2018,24(05):289-296.
- [42]李丹明,李毅.火星土壤中水分提取方法研究及模拟实验[J].载人航天,2021,27(01):10-14.DOI:[10.16329/j.cnki.zrht.2021.01.002](https://doi.org/10.16329/j.cnki.zrht.2021.01.002).
- [43]周抗寒,李俊荣,刘成良,沈力平.空间站废水的处理及管理[J].空间科学学报,2002(02):169-176.
- [44]徐一帆. 面向污水回用的超滤-纳滤双膜法深度处理与膜污染研究[D].哈尔滨工业大学,2019.DOI:[10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004158](https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004158).
- [45].食物或是最难在火星上制造的东西，未来移民火星可能得吃虫子[J].华东科技,2019(10):80.
- [46]谷利源.“受控生态生命支持系统”试验——美国科学家研究未来火星移民食物[J].瞭望周刊,1993(21):45.
- [47]Appropriation in outer space: the relationship between land ownership and sovereignty on the celestial bodies[J] . Virgiliu Pop. Space Policy . 2000 (4)
- [48]A fresh look at soft law[J] . H Hillgenberg. European Journal of International Law . 1999
- [49]Guoliang Chen, Yaming Wang, Jun Qiu, Jianyun Cao, Yongchun Zou, Shuqi Wang, Jiahua Ouyang, Dechang Jia, Yu Zhou,A visibly transparent radiative cooling film with self-cleaning function produced by solution processing,Journal of Materials Science & Technology,Volume 90,2021,Pages 76-84,ISSN 1005-0302, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.092>.