



基于火星环境的空间生命保障系统

2018年7月2日

目录

第一章 设计概况	6
1.1 生物再生生命保障系统	6
1.2 国内外研究现状	7
1.3 设计任务	7
1.4 火星概况	7
第二章 工程选址分析	9
2.1 火星地形分析	9
2.1.1 火星地形分布概况	9
2.1.2 火星主要地形分析	9
2.1.3 地形分析总结	14
2.2 基地选址确定	15
第三章 舱体设计	17
3.1 舱体设计	17
3.1.1 总体设计概况	17
3.1.2 设计细节说明	17
第四章 能源需求分析与备选形式	20
4.1 需求	20
4.2 备选	20
4.3 太阳能输出功率校核	22
4.4 初步选择	22
4.5 储电站设计	23
4.6 地热设备设计	23
4.7 太阳能设备设计	25

目录	2
4.8 植物栽培的聚光	27
第五章 动植物选择	29
5.1 主要作物的选择	29
5.2 其他作物的选择	30
5.3 动物的选择	31
第六章 废物利用与物质循环再生	32
6.1 主选方案	32
6.2 电池材料的选择	33
6.3 备选方案	34
第七章 工程和活动规划	36
7.1 人体在不同条件下活动的能量消耗	36
7.2 研究土壤转化	38
7.3 辅助人类作业的工程机械	39
第八章 环境控制系统	43
8.1 环境控制分析	43
8.2 控制系统设计	44
附录 A 营养分析	45
附录 B 设计图纸	54
B.1 舱体三视图	
冯聪	54
B.2 舱体立体图	
杨祖仪	56
附录 C 工程预算	57

插图

2.1 火星的沙漠和戈壁	10
2.2 火星上的火山	11
2.3 两极冰盖	11
2.4 水和冰川侵蚀形成的峡谷	13
2.5 火星上的陨石坑	13
2.6 奥林匹斯盾形火山及其火山坑	14
2.7 选址剖视图	15
2.8 选址俯视图	15
3.1 舱体顶盖细节图	18
3.2 采集板结构图	18
4.1 采光机构平面图	27
4.2 采光机构立体图	28
5.1 油莎豆营养成分	31
6.1 微生物燃料电池示意图	33
6.2 微生物燃料电池处理示意图	33
6.3 发酵处理示意图	35
7.1 不同活动时常和所处环境下的能量消耗	37
7.2 舱外的活动数据	37
7.3 一天的工作时间大致安排	38
7.4 火星土壤成分比例	38
7.5 火星车有效载荷配置	40
7.6 有可增压装置的载人月球车	41

7.7 火星车的选择	42
8.1 散热系统平面图	44
B.1 基地侧面剖视图	54
B.2 基地上层俯视图	55
B.3 基地下层俯视图	55
B.4 火星宫一期设计图	56
B.5 火星宫整体规划图	56

表格

2.1 三种成因形成的峡谷对比	12
3.1 舱体材料	19
A.1 Table of Oxygen Requirements	47
A.2 Hygiene water requirements	48
A.4 不同能量物质的食物热效应	50
A.3 chinese-activity 水平分级	50
A.5 Set values of Nutritional requirements of one crew-member	51
A.6 Nutrition requiremnts for long-duration missions	52
C.1 废物处理和物质循环利用	57
C.2 舱体预算	58
C.3 工程和活动规划预算	58
C.4 环境控制系统预算	59

第一章 设计概况

1.1 生物再生生命保障系统

生物再生生命保障系统（Bioregenerative Life Support System, BLSS）是基于生态系统原理将生物技术与工程控制技术有机结合，构建由植物、动物、微生物组成的人工生态系统。水和食物这些人类生活所必需的物质可在系统内循环再生，并为乘员提供类似于地球生物圈的生态环境。人进入这个人工生态系统中，成为生态系统的消费者链环同时发挥控制者的功能，构成闭合人工生态系统（Man-made Closed Ecological Systems, MCES）。

生命保障，是载人航天的一项关键技术，宇航员离开地球，在遥远的太空中生存，离不开空气、水和食物。在我国神舟系列飞船、国际空间站、苏联/俄罗斯和平号空间站中，通常会携带全部物资，或通过物理化学方式再生氧气和水，而宇航员吃的食物只能一次性携带充足，不能再生。然而，如果人类在不远的未来，进行更行长时间、更远距离的太空探索，例如构建月球、火星基地，由于路途遥远，食物完全通过携带储存供给，或进行地面定期补给将变得十分昂贵且很难实现。因此，仅仅依靠携带或物理化学再生方式满足生命保障需求，载人深空探索几乎不可能实现。解决办法是依靠“生物再生”的方式，在月球、火星基地，或是飞向火星的飞船中，构建一个类似地球生物圈的小型生态系统。科学家们把这样一个小型生态系统称为“生物再生生命保障系统”。

生物再生生命保障系统利用高等植物(如作物)和动物来生产食物、利用微生物处理废物，同时再生空气和水，为航天员生命活动提供物质保障的独立、完整、复杂的人工生态系统。它引入了生物技术和生态平衡理念，将工程控制技术和生物技术相结合创造出人工小型生态环境，实现在一定的密闭空间内人和其他生物之间氧气、水分和有机物的再生与循环利用，从而大大减少长期空间活动的地面补给，降低运行成本。另一方面，生物再生式生命保障系统能够控制舱内大气成分、温度、湿度以及压力等环境参数，控制舱内环境污染和有害微生物的繁殖，保持居住环境长期健康、稳定，为航天员创造一个舒适和安全的生活环境。

1.2 国内外研究现状

由于生物再生生命保障系统对深空探测的重要性，许多国家早在 20 世纪 70 年代就展开了 BLSS 有人系统构建和有人实验。70 年代俄罗斯建立了世界上第一个成功的 BLLS——BIOS-3，该系统实现了水和氧气基本完全的再生，以及系统内独立控制生态系统的能力。80 年代，美国进行了著名的“生物圈二号”实验（BIOSPHERE-2 试验），但是以氧气浓度下降、作物大面积歉收而失败。其后进行的实验还有欧洲的 MELiSSA 系统和俄罗斯的火星 500 天项目，均取得了不同程度的成功。

我国在生物再生生命保障系统上取得了长足进步。由北京航空航天大学刘红教授团队研发的地基综合实验系统“月宫一号”于 2014 年 1—5 月成功进行了我国首次长期高闭合度集成实验，密闭实验持续了 105 天，成功完成我国首次长期多人密闭试验，为我国的深空探测的生命保障系统提供了理论支持。

1.3 设计任务

本文提出了一种基于火星地表环境的生物再生生命保障系统的一期工程设计方案，称为“火星宫”。火星功能的主要功能是使人们能够在火星上生活，开展火星生命科学的研究以及火星资源勘探和开发工作。“火星宫”一期可容纳 10 人，主要开展火星生命科学的研究。

1.4 火星概况

火星是太阳系由内往外数的第四颗行星。火星直径约是地球的一半，体积为 15%，质量为 11%，表面积相当于地球陆地面积，密度则比其他三颗类地行星（地球、金星、水星）还要小很多。以半径、质量、表面重力来说，火星约介于地球和月球中间：火星直径约为月球的两倍、地球的一半；质量约为月球九倍、地球的 1/9，表面重力约为月球的 2.5 倍、地球的 2/5。

火星基本上是沙漠行星，地表沙丘、砾石遍布且没有稳定的液态水体。二氧化碳为主的大气既稀薄又寒冷，沙尘悬浮其中，每年常有尘暴发生。火星两极皆有水冰与干冰组成的极冠会随着季节消长。

火星的大气密度只有地球的大约 1%，非常干燥，温度低，表面平均温度零下 55 °C，水和二氧化碳易冻结。由于缺少地球的板块运动，火星无法使二氧化碳再次循环到它的大气中，从而无法产生意义重大的温室效应。

与地球相比，火星地质活动较不活跃，地表地貌大部份于远古较活跃的时期形成，有密布的陨石坑、火山与峡谷，包括太阳系最高的山：奥林帕斯山和最大的峡谷：水手号峡谷。另一个独特的地形特征是南北半球的明显差别：南方是古老、充满陨石坑的高地，北方则是较年轻的平原。

第二章 工程选址分析

2.1 火星地形分析

2.1.1 火星地形分布概况

火星上的地形地貌种类相对于地球较少，大部分的区域被沙漠和戈壁覆盖，两极被冰层覆盖，中间零星穿插着高地、山脉、峡谷和裂谷。另外，火星由于靠近小行星带，遭受的陨石撞击较多，所以也有很多的陨石坑。

2.1.2 火星主要地形分析

1、沙漠平原：

- 1) 基本情况：沙漠在火星上占了较大的比例，除两极外均有较广泛的分布，沙丘也将其他的地形阻挡开来，对地形之间的转移造成不便。
- 2) 气候：沙丘上均有沙尘暴，沙尘暴持续时间较短，强度较大。
- 3) 灾害：沙尘暴掩埋。
- 4) 原位资源：长期的沙尘暴气候使得可利用的地下资源除于深度掩埋和随机掩埋的状态，难以寻找和利用。
- 5) 舱体固定：沙漠地区的地质结构松散，舱体不便固定，只能选择大体积的组装舱或者充气舱，防止被沙尘暴吹走。除此之外，平原上的建筑不宜过高。

2、戈壁滩：

- 1) 基本情况：戈壁滩在火星上成片分布，总面积小于沙漠覆盖面积，戈壁滩地形较为稳固，少数地面偶有充满甲烷的孔洞。
- 2) 气候：戈壁滩的沙尘暴强度弱于沙丘，持续时间更短。
- 3) 灾害：除沙尘暴之外，在孔洞附近可能发生火灾或者爆炸。孔洞也可能引起地质沉降。
- 4) 原位资源：固态铁矿、甲烷孔洞内的甲烷。

5) 舱体固定：固态岩石使得在戈壁滩上建造有地基的建筑成为可能，若是建造有地基的建筑，就可以将不同功能的建筑分散，防止意外发生时成片影响。但是由于孔洞的存在，可能会有不稳定的地质活动。

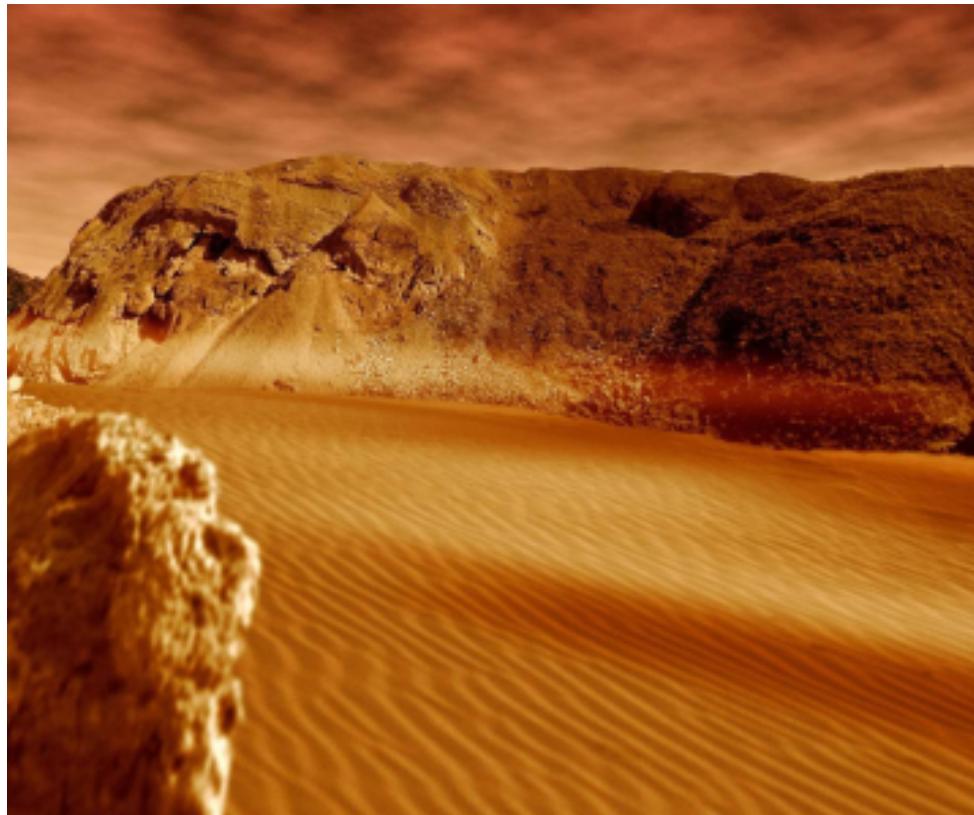


图 2.1: 火星的沙漠和戈壁

3、高地和火山：

1) 基本情况：火星上有很多的山脉，除开部分可能属于活动的火山之外，大多数山脉的海拔就较高，最高的超过 21000 米。拿火星上的奥林帕斯山举例，它的占地面积超过英国国土面积，坡度非常平缓，山体附近有许多裂纹，预计其附近的地质活动会比较剧烈。

2) 气候：高地可以阻挡沙尘暴等自然灾害。

3) 灾害：由于火星重力较低，山体附近的地质活动可能比较剧烈，驻地附近可能会出现裂缝等。

4) 原位资源：山体（尤其是部分火山）附近的甲烷含量会比较高，部分火山附近也有较多的甲烷孔洞，山体和山体附近具有较多的地热能（火星地壳较薄）溢出，对于能源的采集可能会有利。

5) 舱体固定：山体的固态岩石有利于建筑的固定，但是由于地质活动较为强烈，可能建筑体积不能太大，并且要易于迁移。

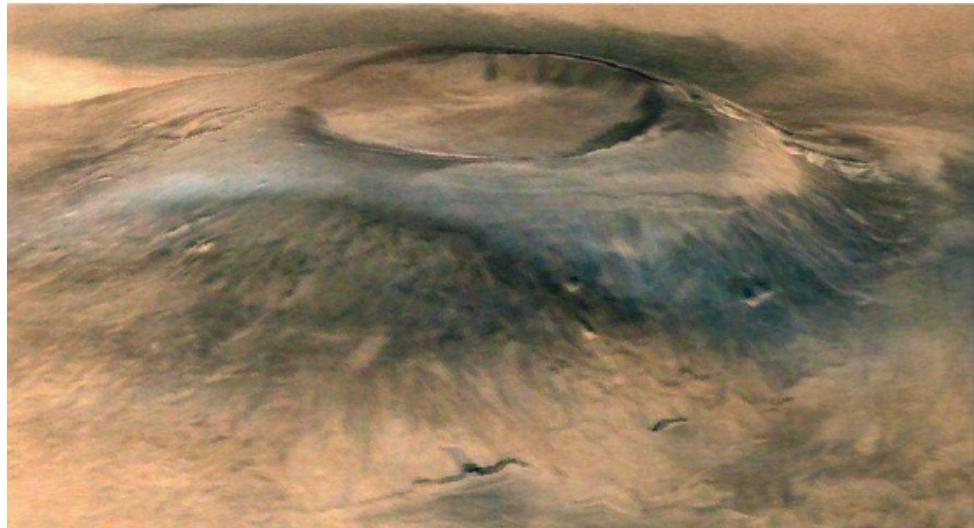


图 2.2: 火星上的火山

4、两极冰盖及附近:

- 1) 基本情况: 火星两极的冰盖主要由干冰和水冰构成, 呈现交互叠加的状态, 每层的冰盖较薄。
- 2) 气候: 平均气温较低, 有因自转因素形成的微弱气旋。
- 3) 灾害: 冰层较薄且混有干冰, 导致地质不稳定。
- 4) 原位资源: 干冰和水冰可采, 太阳能视季节可能不充足。
- 5) 舱体固定: 不稳定的地形导致舱体无法在冰盖上直接固定(干冰受基地热源影响易挥发导致地质沉降), 放置舱体的位置考虑选择在地形交接处(即冰盖的边缘固态岩石地区)。

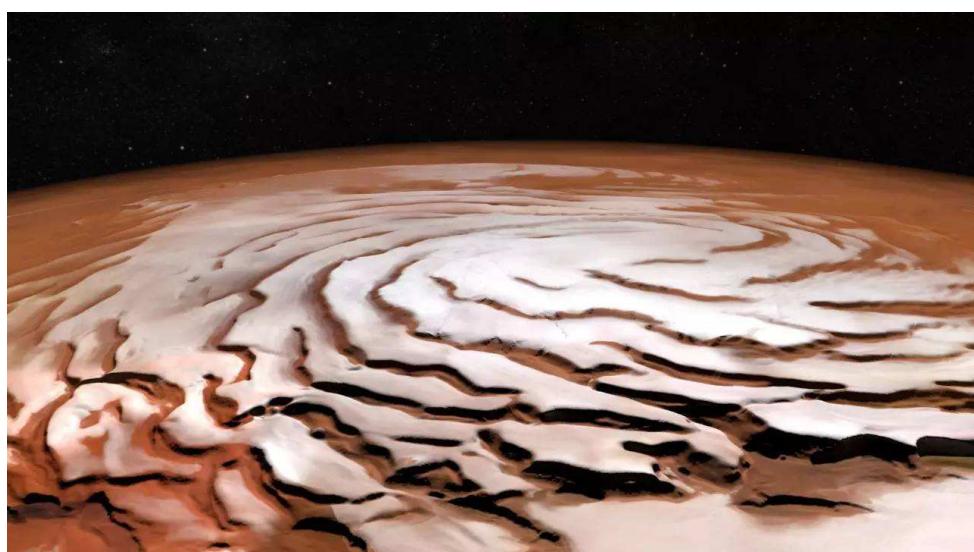


图 2.3: 两极冰盖

5、峡谷和裂谷：

1) 基本情况：火星上有一些峡谷，形成原因比较多样，包括地表侵蚀（水侵蚀、冰川侵蚀、火山活动引起的侵蚀）和地质活动。根据峡谷的成因不同，峡谷的情况可能差别较大，表 2.1 列举了三种裂谷的差异。

表 2.1: 三种成因形成的峡谷对比

水侵蚀和冰川侵蚀	灾害	地质活动相对于其他裂谷可能更少，强度也会更弱。
	原位资源	侵蚀点附近可能有较易采集的地下水和地下冰川资源（包括水冰和干冰）。
火山活动引起的侵蚀	灾害	处于火山附近，地质活动更剧烈，遭遇火山活动等情况时难以逃脱。
	原位资源	附近空气中的甲烷含量会比较高，部分火山附近也有较多的甲烷孔洞，附近有较多的地热能溢出，对于能源的采集可能会有利。
地质活动形成的裂谷	灾害	地质结构不稳定，地质活动非常剧烈，不可预测。
	原位资源	地壳较薄，可能采集更多的地下水、地下甲烷等资源，可利用一些地热能。

2) 气候和灾害：舱体置于峡谷中可阻挡沙尘暴（但峡谷太窄会有被掩埋的风险）。峡谷是地质不稳定地带，根据成因会有不同的地质灾害。

3) 舱体固定：峡谷内部属于地壳薄弱区域，加上火星本身的地壳就比较薄，所以在峡谷内部固定舱体可能会有较大的风险。



图 2.4: 水和冰川侵蚀形成的峡谷

6、陨石坑:

- 1) 基本情况: 火星上有一些陨石坑, 较大的陨石坑可以形成盆地地形。陨石坑的分布比较随机, 但稳定的陨石坑基本都处于固态岩石的地段。
- 2) 灾害: 陨石坑可以较好地阻挡沙尘暴的灾害。但较小的陨石坑有遭沙尘暴掩埋的风险。
- 3) 原位资源: 陨石坑的分布较为随机, 没有固定的原位资源可供利用。较大较深的陨石坑破坏了更多的地壳, 可能会较易采集到地下资源(包括地下甲烷、地下水、地下干冰等), 更易利用到地热能。



图 2.5: 火星上的陨石坑

7、火山坑:

1) 基本情况：火山坑是巨型火山的遗迹，规模最大的火山坑有 1200 平方公里，深度有 1750 米深。火星上完全活跃的火山不多，大多数的火山坑是处于不活动的状态。由于火星重力较低，火山坑的平均海拔要比地球上高。

2) 气候：火山坑的平均深度深于陨石坑（此结论源于对多个固态星球分析的结果，并非对火星单一的结论），考虑到火星火山的平均高海拔，火山坑内部的气压应该略低于地表气压，但由于火星的大气压非常小，所以气压的差异影响不会很大。除此之外，外界的气候对于火山坑内部几乎没有影响。

3) 灾害：火山坑最大的自然灾害威胁便是其活跃的地质结构和有害气体。火山坑内也有非常多的孔洞，会涌出含硫的有毒气体。

4) 原位资源：丰富也易于采集和保存的地热能，火山坑内的平均气温也远高于地表平均气温，有丰富的甲烷、硫化氢等气体可采集。

5) 舱体固定：活跃的地形会导致舱体的固定出现一些困难，由于受到外界气温的影响较小，可以考虑不建设地基，直接放置舱段。



图 2.6: 奥林匹斯盾形火山及其火山坑

2.1.3 地形分析总结

通过以上的分析，可以看出不同的地形是各有优劣的。总体来讲，沙漠是最平凡的地形，但几乎没有可利用的资源，不适合用于长期基地的建设，戈壁滩也有类似的问题。因此首先排除这两种地形。在剩下的地形里考虑选址。

2.2 基地选址确定

1、通过讨论和分析，我们决定将选址定在北纬 25° 附近火山坑道，选择此纬度是因为火星对应位置的风沙强度较小。标准的坑道尺寸拟定如下：

- 1) 面积：600 平方公里（最大火山坑道面积的一半）
- 2) 深度：1000 米
- 3) 海拔高度：4000 米（以坑底为基准）
- 4) 地质活跃度：低
- 5) 平均气温：5–10°C
- 6) 舱体位置：距离坑道边缘 5 公里处
- 7) 边缘升降装置：4 个，等距离分布在舱体附近的坑道边缘



图 2.7: 选址剖视图

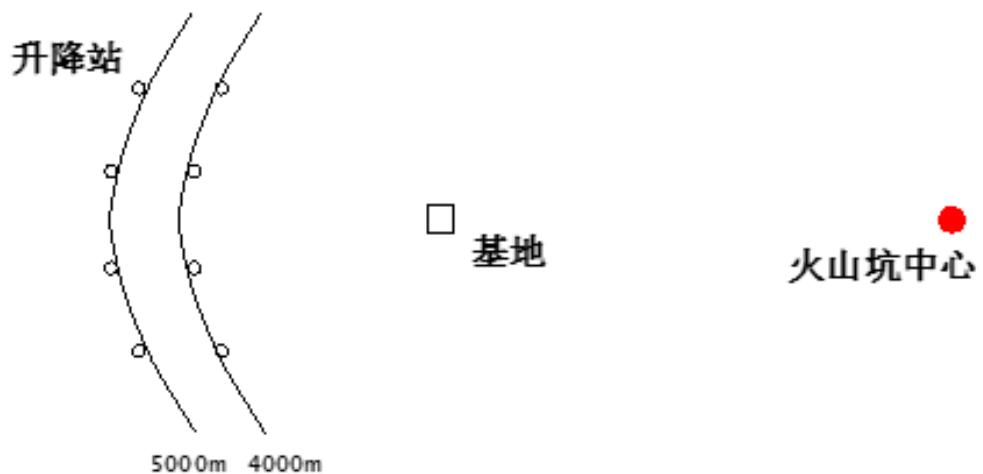


图 2.8: 选址俯视图

- 2、选址的理由：

- 1) 远高于地表的平均温度：就算是地质活跃度低的火山坑，其内部的平均温度也是远高于地表温度的，受到昼夜因素的影响也较小，非常有利于舱体的保温。
- 2) 最丰富的地热能：火山坑是所有可用地形中利用地热能机会最大的，并且其可利用的地热能也是最丰富的，采集也是最为容易的。这一点我们会在舱体设计和能源采集中体现。
- 3) 高海拔和坑道深度阻碍外界灾害：火山坑的分布特点决定了其几乎不受外界沙尘暴和气旋的影响。除了有害气体和可能的地质活动，火山坑没有其他灾害影响。但是在舱体设计方面，我们仍然会考虑舱体的除尘效果。

第三章 舱体设计

3.1 舱体设计

3.1.1 总体设计概况

我们设计的基地是单体地基式饼状结构，整个基地是一个顶部凸起的矮平圆筒，和地面的接触方式为贴附，采用高强度的钛合金材料固定。除了太阳能电池板和大型机械（探险车等）之外所有功能单位均集中在此圆筒内。筒的顶部有采光机构，筒内分为上下两层：上层是植物舱，主要用于种植植物，下层是生活区，按功能不同划分为若干扇形区域。上层和下层之间有 1 米厚的隔离段，下层和地基之间有 2 米厚的隔离段，除去采光机构外的基地高度为 13 米，直径为 28 米。单层有效面积为 615 平方米，总体有效面积为 1230 平方米。

3.1.2 设计细节说明

1、采光机构：

采光机构处于舱体顶部，分为反射器、聚光器、固定器三部分。反射器具有类似于天文望远镜式的开合功能，它并非一块整体结构，而是分成 12 块独立可动的花瓣形状。闭合的反射器将完全遮挡植物区，起到隔绝尘埃和有害射线的作用。由于火星的昼夜变化和地球相近，而植物需要不间断的光照以维持基地的氧气浓度，花瓣状的反射器可以自动调节俯仰角度，确保植物区接收到的光强适合植物生长。所有的反射器由固定器与舱体外周连接，12 个固定器等间隔地分布在舱体壁上，留出的间隔用于滤过风沙。由于火星表面的光强只有地球的 43%，反射器能很好地增加光强。聚光器是位于采光机构顶部中间的光学仪器，用于将来自反射器的光线聚合并散射到植物区。

2、基地上层：

基地上层为植物舱主要用于种植植物，外环为 1.4 米宽的环形通道，内部被纵横相交宽 0.8 米的走廊分为 4 个扇形区域，这 4 个扇形区域的总面积为 467 平方米，用于种

植植物。植物呈区块式种植，即 4 个区域又细分为各个种植某种植物的区域，具体种植的植物类型在植物的选育方面会专门提到。

基地上层的顶部是一个 4 米高的光滑透明凸面，分为内外两层，两层之间为真空状态。外层为高强度隔热透明玻璃，接触火星大气的那一面为光滑面，可以防止尘埃的滞留。内层为过滤面，具有防辐射的功能，可以过滤聚光器散射下来的太阳光线，滤除对植物有害的 α 射线、 β 射线等，保留对光合作用有益的波长部分。除此之外，内层玻璃的内面贴附有疏水性的光滑膜，防止植物呼吸产生的水汽在顶部凝结滞留，从而影响太阳光的透过。舱体顶部细节见图 3.1。

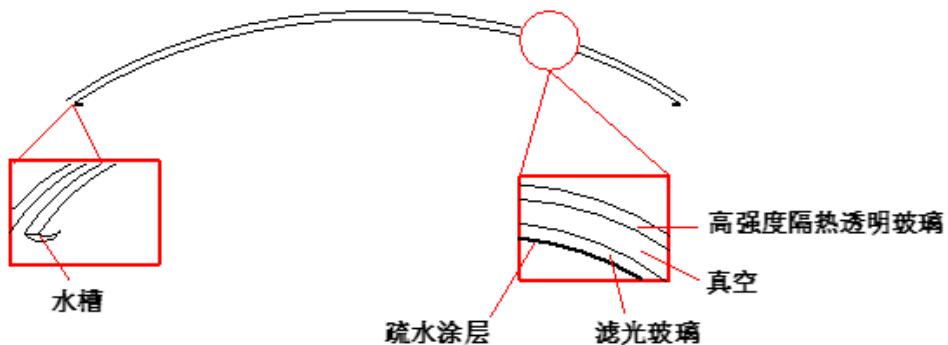


图 3.1: 舱体顶盖细节图

为了收集植物呼吸作用产生的水汽，各种植区域内部还竖立了强导热金属采集板（见图 3.2），采集板通过上下层之间的隔离带与外界低温联通，使其温度低于植物舱内部（约为 5–10°C），采集板上附有和疏水性的滑膜，可以使植物舱内的水汽接触采集板后冷凝滑落到采集板下方的收集槽中，再进入管道进行处理和循环。

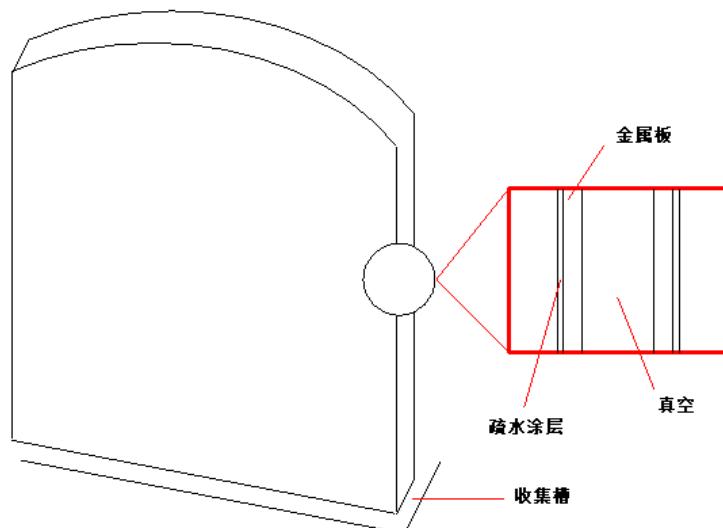


图 3.2: 采集板结构图

3、基地下层：

基地下层是人类活动的主要区域，包含的功能区有：厨房/餐厅、起居室、实验室、中央控制室、娱乐室、浴室、仓库。为人们的生活和工作提供必要的场所。

4、隔离带：

基地有两个隔离带，分别处于基地上下层之间和基地下层与地基之间，厚度分别为1米和2米。隔离带主要功能有两个：一是将不同的舱室隔离，将基地下层与地基隔离；二是铺设了大量的管道、处理系统和循环系统，便于将收集的物质进行集中处理和循环供应，除此之外下层的隔离带还具备采集坑道内的地热能的功能。

为了便于人在基地上下层之间移动，我们在上下层配有若干通行设施。其中下层中央控制室中心配有一个升降梯，用于运输较重的货物到上层。除此之外，起居室、实验室、娱乐室、仓库均有一个爬梯可让人们在上下层之间通行。这些通行设施会穿过隔离带，但是与隔离带内部的结构是隔离开的，隔离带上会有密封滑盖门，在危急的时候会关闭以彻底隔离上下层。

5、基地外壳：

基地上层的外壳厚度为1米，下层外壳厚度为2米，这是从减少下层承重负荷的角度来考虑的。外壳的最外层为镀金的钛合金材料，减弱各种宇宙射线并起到支持的作用。中层为钛合金和高强度低导热纤维材料，主要起到隔热和密封的作用。内层为钛合金材料，主要起支持的作用。

6、关于舱体其他结构的一些参数：表3.1给出了舱体其他结构的一些参数，舱体主要参数在图B.1-B.3给出。

表3.1: 舱体材料

部位	使用材料	参数
顶盖外层	高强度透明隔热玻璃	厚30厘米。
顶盖内层	滤光玻璃	中心部分厚15厘米，逐渐往四周变厚，边缘厚度为25厘米。
种植区	钛合金材料，表面覆有两层膜，内层为隔热的纤维膜，外层为疏水性的软膜	支架侧面厚度为20厘米，底层为30厘米，预留种植深度为1米。(人的操作高度为1.3米)。纤维膜厚度为1厘米，软膜厚度为5毫米。
采集板	金属层为高纯度的银，外层为疏水性软膜	金属层厚度为3厘米，软膜厚度为3毫米。

第四章 能源需求分析与备选形式

4.1 需求

1.
 - 环境控制用电：照明、水泵、气密加压、空调、气流流速；
 - 温控系统：形式电能，功率 10kW；
 - 压力控制系统：暂无。
2. 生活、实验用电：仪器等；。
3. 动力驱动：火星车，形式为电能。锂电池、燃料电池、同位素电池可供备选。功率 8–10kW，电压 300VDC。
4. 储能：面对紧急事故或长期无补给实验的能量储备。
5. 为地球提供能源。

4.2 备选

1、太阳能发电安全、易获得且取之不尽的优点，但存在着不稳定、维护、老化等缺点。由于火星轨道上阳光的光强仅为地球附近的 40%，即在火星上每平方米的平均光照功率仅约 550W，且火星表面的光强由于大气吸收、散射等原因，能量转化效率进一步下降，而且受尘暴的影响，光强变化范围较大。但从长期使用角度看，太阳能仍是纯净、取之不尽的。

- 2、风能：火星大气稀薄，气候不稳且设备运输困难。
- 3、火星开采：干冰、二氧化碳（为火星大气主要成分，可用于制作推进剂等）
- 4、长期实验或是居住时仅依靠太阳能等低效率能源对占地、维护、老化等情况的处理是不够的，故引入含有潜在危险但效率高的产能方式如下。

核能：适用于恶劣环境，受环境影响小。可与太阳能共同使用。泄漏产生危险大，运输成本大。分为裂变能、聚变能和衰变能。

衰变能：可转化为光能、电能、热能。已用于“勇气号”、“好奇号”等火星探测器。目前已知技术只能携带，或许随着对火星的研究探测，会发现可用的核能元素。

4.3 太阳能输出功率校核

地球每平方米日照平均功率约为 1366.1W/m^2 , 火星则为 546.4W/m^2 , 初取转换效率为的发电板, 火星地表发电效率峰值遵循下式。

$$P_p = \eta \times P_{in} \quad (4.1)$$

其中 P_p 表示峰值功率, η 为转换效率, P_{in} 为平均日照功率。即得每平方米的发电板所得到的峰值功率为 218.58W/m^2 。根据能量需求, 太阳能板的占地面积遵循下式:

$$A = \frac{P_{req}}{P_a} \times k \quad (4.2)$$

其中 A 表示发电板总面积, P_{req} 为需求功率, P_a 为平均发电功率, k 为安全系数即当用电需求不过载时, 能源产出可以满足且富余地提供能源。

4.4 初步选择

最简单的能源获得方式是太阳能。在火星表面, 可以利用火星光谱匹配的太阳电池阵, 通过光伏效应将太阳能转换为电能, 转换效率大于 30%, 可以辅助以聚光等手段, 提高单位面积太阳电池的能源转换效率。为了提高能源供应的稳定性, 考虑在火星轨道构建太阳能发电系统, 通过激光实现能量的定向传输。

除了光能的利用外, 核能的利用也必不可少, 同位素衰变的能量有限, 有发展前途的还是可控核聚变。为了最大程度实现能源利用, 还需要关注风能、温差发电、微生物燃料电池等能源获得方式, 但是在提高能源转换效率方面的技术难度都较大。例如, 火星表面气压很低, 其风能利用难度较大, 需要全方向适应的大尺寸风能转换设备。在能量的存贮方面, 还需要发展超级电容等高能量密度存储设备。

4.5 储电站设计

1 变压技术

提高变压技术,运用新型的变压器调节电压,使用新型的低耗变压器,使得电压器在用电高峰也能安全的高负荷运转。满足不同功率的电器对电压的需求。对导线的横街面积进行合理的调整,根据用电量和对电流的要求,适当调整导线的横截面积,节约资源的同时提高效率降低线损。使用节能环保的变压器也是一项有效的技术措施,供电企业应不断推出节能环保的变压器,从总体上控制电压状况,提高变压器的负荷量。

2 调整配置

调整整体的电力配置系统,根据用户的电力需求对电力网进行调整。提高电流的运行速度,提高效率。降低电能的整体消耗。完善电力网规划,合理分布供电枢纽,缩短供电线路,降低线损。在电力提供出与大型的用电端之间使用适当的补偿电容器,加强局部电压。合理分布补偿电容器的位置,提高功率。合理开支电压降低线损。

3 管理与设计方面

建立完善的线损监督与管理系统,对各路段设备的位置信息和设备的工作状况以及损耗程度等相关信息定期记录与更新。方便日后工作中的查找。对整个电力系统的线路进行定期的检查,同时对用户的电表进行核实,防止窃电行为,给整个电力系统带来危害,造成不同程度的线损。对供电量进行正确的估计,通过数据分析找到线损的原因并及时解决问题,将损失降到最低程度。

4.6 地热设备设计

区域浅层地热能资源评价应在完整的地热系统分析研究的基础上,以地热地质单元为基本计算单元进行。研究热(或水热)的补给、运移和排泄规律,研究地热能成因、热传导方式以及地温场特征,建立地热能形成的概念模型和数学模型。区域地热能资源量评价采用热流量法。根据大地热流计算浅层地热能可利用量。公式为:

$$Qh = aqM \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

式中:

Qh 是浅层地热能可利用量, kW;

a 是浅层地热能可利用系数;

q 是大地热流值, mW/m²。

M 是计算面积, m²

浅层地热能可利用系数 a 为单位面积浅层地热能可利用量与大地热流值之比。计算得出的浅层地热能可利用量是在采暖期的利用热量, 在一个水文年达到热均衡的条件下, 该热量是可持续利用的。大地热流值 q 应按照技术要求测定。采用热储法计算评价地热能储存量。

$$QW = WCW\omega Md\Delta T \quad (4.4)$$

式中: ρA 是水密度, kg/m^3 ; Cw 是水比热容, $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ω 是岩土体的含水量。

$$QA = \rho ACA(\phi - \omega)Md\Delta T \quad (4.5)$$

式中: ρW 是空气密度, kg/m^3 ; CW 是空气比热容, $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ 。

在含水层和相对隔水层中, 地热能储存量按下式计算:

$$QR = QS + QW \quad (4.6)$$

式中:

QR 是地热能储存总量, kJ ;

QS 是岩土体中的热储存量, kJ ;

QW 是岩土体所含水中的热储存量, kJ 。

QW 的计算公式如下:

$$QW = \rho WCW\phi Md\Delta T \quad (4.7)$$

在地下水中, 热的收入项有: 太阳照射热量、大地热流量、水补给带来的热量、侧向传导流入的热量等; 支出项有: 向大气散发的热量、水排泄带走的热量、侧向传导流出的热量等。这种方法需要有长期动态监测数据的支撑, 适用于评价地热能资源可利用量的保证程度。在调查评价时, 须注意查明各均衡项情况。恒温带以下, 热收入项中没有太阳照射热量。类比法利用已知地区的地热能热资源量来推算地热地质、水文地质条件相似的未知地区的地热能源量。地源热泵工程包括机房设备系统、室外换热系统和室内空调末端系统 3 部分组成。其中: 机房设备系统包括地源热泵机组、电器自动控制装置、循环泵组、全自动定压仪、软化水与补水系统装置和机房附属设备、管线、阀门等及安装。室外换热系统包括钻孔、换热管安装和换热地到机房地面联络管线等及安装。室内空调末端系统包括室内管道、风道、风机盘管等及安装。

4.7 太阳能设备设计

1、太阳能光伏发电系统的组成

太阳能光伏发电系统主要由光伏电池组件，蓄电池组，太阳能控制器，逆变器和DC-DC变换装置组成。

(1) 光伏电池组件：是光伏发电系统的基本单元。当太阳光照在光伏电池组件上时，电池吸收光能并产生光伏效应，将太阳能转化为直流电能。太阳能电池一般为硅电池，分单晶硅、多晶硅及非晶硅电池3种。

(2) 蓄电池组：将光伏电池组件产生的电能储存起来，当太阳光照不足或负载需求大于光伏电池组件所发的电量时，将储存的电能释放以满足负载的能量需求。蓄电池组是太阳能光伏发电系统的储能部件，一般由一定数量的蓄电池经由串、并联组合而成，其容量的选择需与光伏电池组件的容量相匹配。

(3) 太阳能控制器：对蓄电池组的充、放电条件加以规定和控制，并按照负载电源需求控制光伏电池组件和蓄电池组对负载的电能输出，保证光伏电池组件在任何日照和环境温度下都可以输出相应的最大功率。

(4) 逆变器：将光伏电池组件产生的直流电或蓄电池释放的直流电转化为负载需要的交流电。

(5) DC-DC变换装置：通过控制回路中功率器件的导通与关断，将光伏电池组件输出的低压直流电升压成高压直流电，保证在直流输入电压大范围变化的情况下输出稳定的高压直流电。

太阳能光伏发电系统的设计包括2个方面：容量设计和硬件设计。太阳能光伏发电系统的容量设计包括：负载用电量的计算，太阳能光伏电池组件的计算，蓄电池组容量的计算以及太阳能光伏电池组件安装最佳倾角的计算等。太阳能光伏发电系统的硬件设计包括：太阳能光伏电池组件的选型，支架设计，逆变器的选择，电缆的选择，控制相对比较简单，本文不作详细介绍。太阳能光伏电池组件、蓄电池组容量及太阳能光伏电池组件安装最佳倾角的计算是太阳能光伏发电系统设计的关键，下面以独立式太阳能光伏发电系统为例作着重介绍。

2、太阳能光伏电池组件的设计

太阳能光伏电池组件设计的基本思想就是满足年平均日负载的用电需求。

(1) 太阳能光伏电池组件的并联数量计算公式为：

$$\text{并联组件数量} = \frac{\text{日平均负载}(AH)}{\text{库仑效率} \times [\text{组件日输出}(AH) \times \text{衰减因子}]} \quad (4.8)$$

(2) 太阳能光伏电池组件的串联数量计算公式为：

$$\text{串联组件数量} = \frac{\text{系统电压}(V)}{\text{组件电压}(V)} \quad (4.9)$$

3、蓄电池组的设计

蓄电池组设计的基本思想是保证在太阳光照连续低于平均值的情况下负载仍可以正常工作。

(1) 蓄电池组容量的计算公式为：

$$\text{蓄电池组容量} = [\text{自给天数} \times \text{日平均负载}(AH)] / [\text{最大允许放电深度} \times \text{温度修正因子}] \quad (4.10)$$

(2) 蓄电池组的并联设计

根据计算出的蓄电池组容量，就可以决定选择多少个单体蓄电池加以并联得到所需的蓄电池组容量。为了尽量减少蓄电池之间的不平衡，建议并联的数目不要超过4组。太阳能光伏发电系统中常用2组并联模式，这样如果1组蓄电池出现故障，就可以断开该组蓄电池进行维修，而使用另1组正常的蓄电池，此时虽然电流有所下降，但系统还能保持在标称电压下正常工作。

4.8 植物栽培的聚光

火星的日照强度为地球的 0.43，阳性植物在直接采光的情况下是无法满足生长需求的。以自然光为直接光源的情况下，必须采用聚光的手段达到植物的光照需求。也就是要将 2.31 单位面积的光强聚集到 1 单位的面积上。简单的光学聚光方式有凸透镜、凹面镜等形式。由于凸透镜的实现可能性小，本方案采用凹面镜聚光。凹面镜聚光的原理为当自然光照射在凹面镜后汇聚至反射镜上，反射镜再将光平均地分散至温室范围，达到使温室日照增强的功能。下面给出方案示意图：

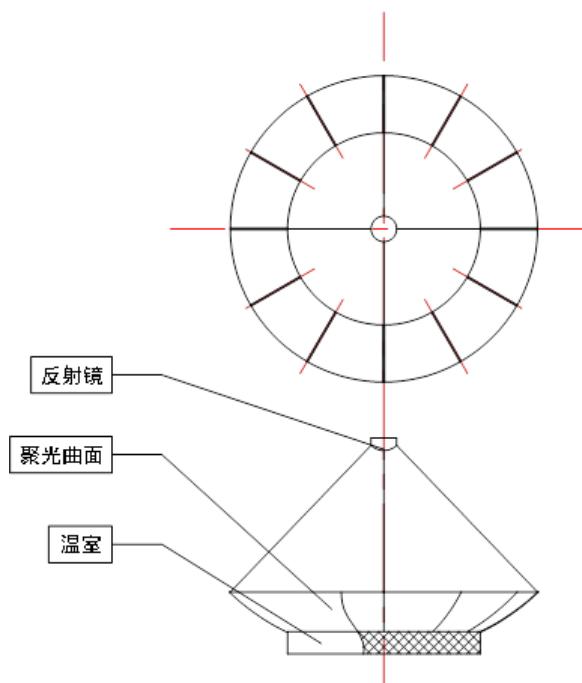


图 4.1: 采光机构平面图

根据反射面须使温室接收自身 2.311 倍的面积的光照，乘上 1.1 倍安全系数后，得到曲面对地投影的半径为 20.73 米。并且考虑到反射镜的高度，将凹面镜的曲率半径设为 30m。简图如下：

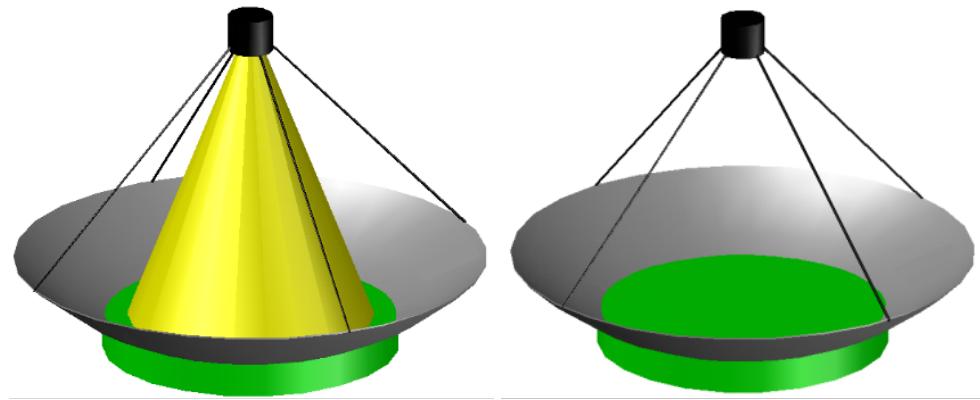


图 4.2: 采光机构立体图

曲面移动机构：由于使整个结构进行转动使之面向太阳是不理想的，故将凹面镜设计为凹面镜阵列系统，即每块子凹面镜都有其移动机构，使面镜在一个太阳日中光照较强的时候面向太阳，将效率最大化。镜体自清洁：用可移动通气杆喷射气体吹除的方式对凹面镜进行自清洁，至于反射镜则由类似于汽车雨刷的方式进行自清洁。移动机构及配气方案从略。

第五章 动植物选择

5.1 主要作物的选择

由于在火星表面的尘土里含有大量的硫酸盐和氯化物盐，这是液态水曾经存在的证据，但同时也意味着加水后土壤会呈现较强的酸性。总的来说土豆喜欢偏弱酸性的土壤，因此还算是一种不错的火星作物的候选者。但如果 pH 值低于 4.8，土豆就不能正常生长了。

种植土豆，从芽开始算起 15 天成苗、用 20 天长匍匐茎、用 30 天成块，基本两个多月就能收。而且它也容易种容易收，只要切成块，埋到土里就能长。唯一的要求是每个切块上必须要有芽眼。

植物发生不可逆的永久萎蔫时的土壤含水率。这个值因土壤类型不同而有很大差异，比如说砂土是 1.8–4.2%，粘土是 17.4–24%。土壤里的水含量比这些值低，植物就会干死。

根据每立方米土壤需要 40 升水灌溉。这 40 升水指的是“土壤有效水分”，必须浇在含水量高于萎蔫系数的土里才能被植物利用。对于原本不含液态水的火星土，每立方米 40 升水也就是大约 1.4% 的含水量，哪怕是砂质土最低的萎蔫系数也比这个值高。更何况火星土很大一部分是硅酸盐黏土，最终可能需要加水到土壤的 15%–20%。即使种植土豆来供给能量也并不是一个简单的工作。

同时要让土豆长好，光有粪便里的细菌还不够。在地球上，植物根际土壤里的微生物构成了一个小小的生态系统，植物依赖这些细菌吸收养分，甚至还能利用它们传递信息。土豆对微生物的依赖倒不像兰花什么的那样极端，但缺了终归不行。

火星土含有千分之几的高氯酸盐，而火星的液态水也的确是塞满了这些东西的强力卤水。所幸，这些盐类是溶于水的，必须先用水把土漂洗一遍，反正水是可以循环的。

还有需要考虑土壤的厚度。标准的土豆种植，至少要深翻 20 厘米，最好 30 厘米，这样才能给土豆留足空间长不了多久土豆们就要纷纷“出土”了。出土倒是不会变成土豆地雷，但就会接受光照，开始积累龙葵素。

土豆有个休眠期，不是埋进去就能发芽。靠谱的办法是用赤霉素来刺激土豆，可以在 5 天之内发芽。但如果指望自然发芽，那一般条件都得 25 天——一下子凭空加了一个月的周期。所以要计算好土豆收获周期和工作人员的能量需求也是一个十分严密，不能出错的环节。

5.2 其他作物的选择

番茄 我们栽培的番茄有两类：无限型番茄和矮株番茄。番茄颜色鲜艳，富含维生素和矿物质元素，番茄红素具有独特的抗氧化能力，营养价值颇高。番茄可生食、可入菜，酸甜可口，能给予乘员心理慰藉。我们的栽培方法采用的是水培法，辅以人工基质固定根系。先将番茄种子发苗，再将发育好的幼苗定植到栽培槽内，接下来便是定期循环处理营养液并补加养分和水。番茄便参与到了整个生命保障系统的循环运行中。

油莎豆 又名油莎草、虎坚果、油渣子、糖根果、地下板栗或地下核桃等，原产于非洲及地中海沿岸国家，属禾本科一年生植物。随着人们对油莎豆的深入研究，其又被誉为优质、高产、综合利用价值很高的油、粮多用新型作物，并被列为 BLSS 主要粮食作物的候选者之一，在主要作物职能是为乘员提供植物油。下面分析选择油莎豆作为油料作物的原因。

首先，油莎豆相较于其他油料作物更易栽培，对环境条件要求不苛刻。我国南北各地的沙滩、丘陵、林间等均可种植，且抗旱抗涝、易种易管，可以单种也可以与其他作物套种。其播种、管理、收获、贮藏与花生相似，喜光、好气、耐旱、抗盐碱，同时对光周期、温湿度等环境条件的要求不严格，年均气温在 20°C 以上即可。整个生长周期为 130 天左右，病虫害很少，是目前油料作物中产量最高的作物。

其次，油莎豆营养价值高。油莎豆含油率高达 38.7%，油质优于花生油和芝麻油，味道醇香，颜色透明，久放不变质，对降低血脂、防治心血管和肌体代谢疾病等，具有独特功效，除此之外，油莎豆还具有较高的可溶性糖（含量见图 5.1），因此油莎豆生食或熟食时味道香甜，目前已有油莎豆加工而成的糕点、糖果、咖啡等。具体分析其营养成分，发现油莎豆糖分主要有蔗糖、葡萄糖、果糖、棉子糖。其功效成分主要是脂溶性的功效成分，其中 VE 含量为 0.15%，甾醇含量为 0.53%，说明油莎豆油脂中营养成分较高。分析油莎豆的脂肪酸组成（图 5.1），油酸含量最高，出油率一般为 35%，其次是棕榈酸和亚油酸，其含量均在 20% 以上，说明油莎豆油脂是不干性油，具有很好的抗氧化性，其抗氧化性高于大豆油、菜籽油、花生油等。

由此可见，油莎豆高产，有助于提高 BLSS 系统内植物栽培系统的空间生产效率；

易于栽培和管理，有助于减少乘员对植物栽培系统的维护工作量；油脂含量高、营养价值高且含糖量高，在满足乘员对植物油所需的同时，有助于改善乘员的饮食结构和风味，进一步有助于乘员的身体健康。因此，选择油莎豆作为 BLSS 的主要油料作物是一种必然了。

当然，油莎豆还有一些缺点。它是采摘地下核状根茎果，果实表面有须状细根且凹凸褶皱，果皮坚硬，这些均增加了油莎豆的食用加工难度。为了便于清洗，减少清洗过程的耗水量，系统内采用水培的方式种植油莎豆。采摘后的油莎豆，可榨油，亦可干燥后食用。

成分 ^①	含量% ^②	糖分 ^③	层析板 1-Rf 值 ^④	脂肪酸组成 ^⑤	含量% ^⑥
蛋白质 ^⑦	8.00 ^⑧	蔗糖 ^⑨	0.29 ^⑩	棕榈酸 ^⑪	20.39 ^⑫
可溶性糖 ^⑬	23.42 ^⑭	果糖 ^⑮	0.42 ^⑯	十六碳烯酸 ^⑰	0.57 ^⑱
脂肪 ^⑲	26.50 ^⑳	棉子糖 ^㉑	0.15 ^㉒	硬脂酸 ^㉓	1.87 ^㉔
淀粉 ^㉕	23.24 ^㉖	葡萄糖 ^㉗	0.36 ^㉘	油酸 ^㉙	52.57 ^㉚
水分 ^㉛	7.60 ^㉜	半乳糖 ^㉝	0.37 ^㉞	亚油酸 ^㉟	20.10 ^㉟
—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	亚麻酸 ^㉟	0.79 ^㉟
—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	二十碳烷酸 ^㉟	0.95 ^㉟
—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	—— ^㉟	二十碳烯酸 ^㉟	0.46 ^㉟

图 5.1: 油莎豆营养成分

5.3 动物的选择

动物方面，我们选择培养和食用黄粉虫。

作用：1. 黄粉虫是一种国际上公认的安全的可食用的虫子，黄粉虫成虫含有高达 60% 的蛋白质，被誉为“蛋白质饲料宝库”，还含有磷、钾、铁等常量元素和多种微量元素，所以黄粉虫可为舱内志愿者提供动物蛋白。2. 黄粉虫可以处理系统中部分不可食生物量，例如小麦秸秆，蔬菜的老叶子等，这样就大大增加了系统的鲁棒性。3. 黄粉虫呼吸产生的二氧化碳，还为植物光合作用提供原料。

食用方式：1. 将黄粉虫放置于平底锅中炒至酥脆，然后与小麦一起粉碎至面粉中，发面蒸成馒头。2. 用植物油炒熟直接食用。

第六章 废物利用与物质循环再生

舱内固体废物包括乘员及黄粉虫粪便、植物不可食部分、餐厨垃圾等，其处理和再利用与系统闭合度密切相关。因此，固体废物处理是生物再生生命保障系统中重要的单元。

6.1 主选方案

我们设计的火星宫采用微生物燃料电池。微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)是一种利用微生物将有机物中的化学能直接转化成电能的装置。其基本工作原理是：在阳极室厌氧环境下，有机物在微生物作用下分解并释放出电子和质子，电子依靠合适的电子传递介体在生物组分和阳极之间进行有效传递，并通过外电路传递到阴极形成电流，而质子通过质子交换膜传递到阴极，氧化剂(一般为氧气)在阴极得到电子被还原与质子结合成水。参与传递电子的介体与微生物和阳极之间的作用形式有三种：

1. 微生物将氧化还原反应产生的电子直接传递给溶解在溶液中的介体，介体再将电子传递给电极；
2. 介体能进入到微生物体内，参加反应被还原，从微生物体内出来后再将电子传递给电极；
3. 微生物吸附在电极表面，它将反应产生的电子传递给在细胞表面的介体，再通过介体传递给电极。

优势：与现有的其它利用有机物产能的技术相比，微生物燃料电池具有操作上和功能上的优势：首先，它将底物直接转化为电能，保证了具有高的能量转化效率；其次，不同于现有的所有生物能处理，微生物燃料电池在常温环境条件下能够有效运作；第三，微生物燃料电池不需要进行废气处理，因为它所产生的废气的主要组分是二氧化碳，二氧化碳还可以用作促进植物生长；第四，微生物燃料电池不需要输入较大能量，因为若

是单室微生物燃料电池仅需通风就可以被动的补充阴极气体。舱内所产生的大部分固体与液体废物绝大部分可以使用 MFC 处理。

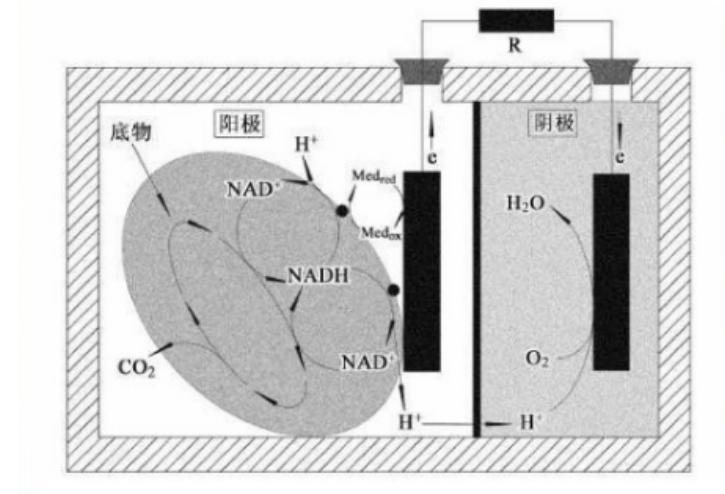


图 6.1: 微生物燃料电池示意图

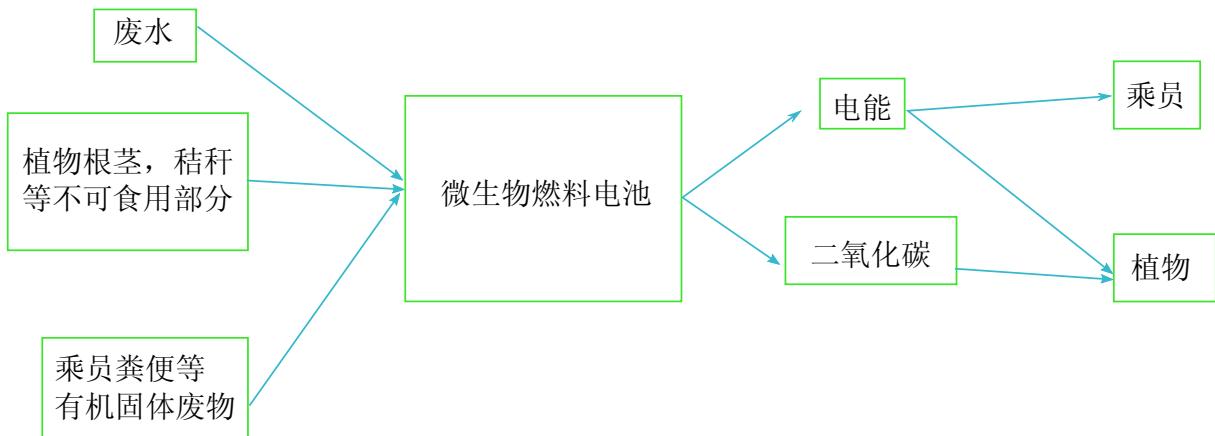


图 6.2: 微生物燃料电池处理示意图

6.2 电池材料的选择

阳极: 从 MFC 的构成来看, 阳极担负着微生物附着并传递电子的作用, 它决定 MFC 产电能力的重要因素, 同时也是研究微生物产电机理与电子传递机理的重要辅助工具, 所以 MFC 阳极主要是以碳为主要材料, 包括碳纸、碳布、石墨棒、碳毡、泡沫石墨以及碳纤维刷。

阳极是微生物氧化分解有机物的场所, 所以微生物的量也就能影响产电量。因此阳极材料的选择主要就是考虑材料的比表面积, 此外, 阳极除了材料还有就是阳极附着的微

生物，如希瓦菌、假单胞菌、泥细菌等。但是在应用范围内，很少使用纯菌，而多数使用的为混合菌群。相较于纯菌，混合菌具有抵抗环境冲击能力强、利用基质范围广、降解底物速率和能量输出效率高的优点。

膜：质子透过材料可以是盐桥，也要以是多孔的瓷隔膜，理想的材料是只允许质子透过，而基质、细菌和氧气等都被截留的微孔材料。我们选用的是质子交换膜 PEM。

阴极：阴极是制约 MFC 产电的主要原因之一。最理想的阴极电子受体应当是氧气，但是从氧气的还原动力学来看，氧气的还原速度较慢，这直接影响了 MFC 的产电性能。于是我们在阴极加入各种催化剂来提高氧气的还原速率。根据阴极催化剂的种类可以将 MFC 阴极分为非生物阴极和生物阴极。我们考虑选取生物阴极作为 MFC 的阴极。

非生物阴极：优点：氧气作为唯一电子受体，廉价易得。缺点：石墨电极需要加入催化剂，铂电极昂贵、易使催化剂中毒失效。**生物阴极：**优点：无需加入重金属催化材料和电子传递介质、不会引起催化剂中毒。缺点：产生的电流不稳定（暂不用作主力供电）。

6.3 备选方案

固体废物采用高温好氧发酵处理，处理后的产物可以作为有机肥施用，发酵过程中产生的二氧化碳也可以通入植物舱，作为植物光合作用的原料。固体废物的处理及利用过程如下：首先，筛选高温好氧微生物菌群，该菌群可以降解植物秸秆中的纤维素，降解效率越高产生的二氧化碳越多，有机肥腐熟程度越高，也对植物种植越有利。所以微生物菌群的筛选对实验的顺利开展至关重要。另外，微生物接种比例要保持在合适的水平，一般接种菌剂比例在 5% 到 10% 之间。其次，按照堆肥适宜的碳氮比（一般 30:1 或 35:1）计算乘员粪便和植物不可食部分合适的混合比例。其中，植物不可食部分主要为各种植物的秸秆和根类，进入发酵设备之前，首先将其移入综合舱内的储藏室晾干，再用植物粉碎机进行粉碎（为了保证发酵良好的通气性，一般粉碎粒径为 2–20 mm）。最后，将固废混合物加入到固废转化器中，调节初始含水率 50%–70%，温度 50–60 °C，并定时搅拌和通气。

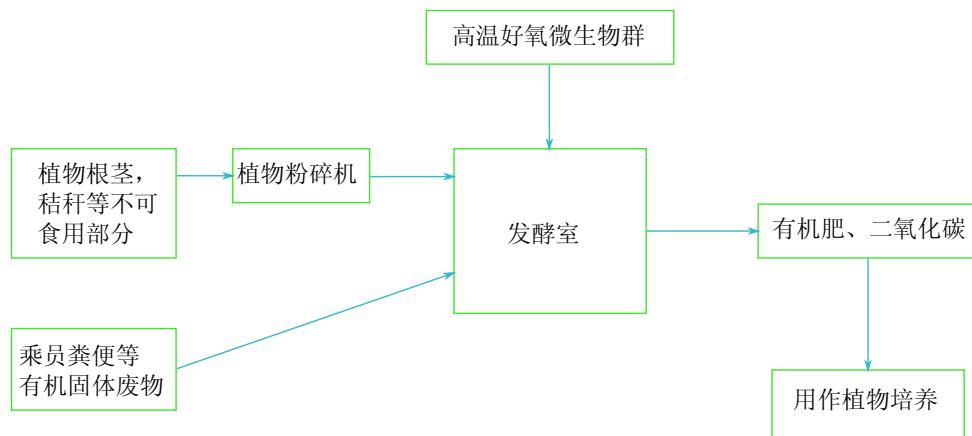


图 6.3: 发酵处理示意图

第七章 工程和活动规划

7.1 人体在不同条件下活动的能量消耗

成年人的新陈代谢指数（取决于性别与体重）：

Human Metabolic Rate Equation males > 19 years of age:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{622 - 9.53 \times \text{age}(years) + 1.25 (15.9 \times \text{mass}(kg) + 539.6 \times \text{ht}(m))}{0.238853 \times 10^2} \right) \\ & = \text{Energy} \frac{MJ}{CM - d} \end{aligned}$$

Human Metabolic Rate Equation females > 19 years of age:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{354 - 6.91 \times \text{age}(years) + 1.25 (9.36 \times \text{mass}(kg) + 726 \times \text{ht}(m))}{0.238853 \times 10^3} \right) \\ & = \text{Energy} \frac{MJ}{CM - d} \end{aligned}$$

1 Crew Member Activity Description	2 Duration of Activity (hr)	3 Sensible (dry) Heat Output kJ/hr (btu/hr)	4 Wet Heat Output (includes latent and sweat runoff) kJ/hr (btu/hr)	5 Total Heat Output Rate kJ/hr (btu/hr) ⁽²⁾	6 Water Vapor Output kg/min ³ 10 ⁻⁴ (lbm/min ³ 10 ⁻⁴)	7 Sweat Runoff Rate kg/min ³ 10 ⁻⁴ (lbm/min ³ 10 ⁻⁴)	8 O_2 Consumption ⁽⁴⁾ kg/min ³ 10 ⁻⁴ (lbm/min ³ 10 ⁻⁴)	9 CO_2 Output ⁽⁴⁾ kg/min ³ 10 ⁻⁴ (lbm/min ³ 10 ⁻⁴)
Sleep	8	224 (213)	92 (87)	317 (300)	6.30 (13.90)	0.00 (0.00) ⁽¹⁾	3.60 (7.94)	4.55 (10.03)
Nominal	14.5	329 (312)	171 (162)	500 (474)	11.77 (25.95)	0.00 (0.00) ⁽¹⁾	5.68 (12.55)	7.20 (15.87)
Exercise 0 - 15 min at 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	514 (487)	692 (656)	1206 (1143)	46.16 (101.76)	1.58 (3.43)	39.40 (86.86)	49.85 (109.90)
Exercise 15 - 30 min at 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	624 (591)	2351 (2228)	2974 (2019)	128.42 (283.13)	33.52 (73.90)	39.40 (86.86)	49.85 (109.90)
Recovery 0 - 15 min post 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	568 (538)	1437 (1362)	2005 (1900)	83.83 (184.82)	15.16 (33.43)	5.68 (12.55)	7.2 (15.86)
Recovery 15 - 30 min post 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	488 (463)	589 (559)	1078 (1022)	40.29 (88.82)	0.36 (0.79)	5.68 (12.55)	7.2 (15.86)
Recovery 30 - 45 min post 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	466 (442)	399 (378)	865 (820)	27.44 (60.50)	0.00 (0.00) ⁽¹⁾	5.68 (12.55)	7.2 (15.86)
Recovery 45 - 60 min post 75% $\text{VO}_{2\text{max}}$	0.25	455 (431)	296 (281)	751 (712)	20.40 (44.98)	0.00 (0.00) ⁽¹⁾	5.68 (12.55)	7.2 (15.86)
Total Per Day ⁽³⁾	24	7351 (6967)	4649 (4410)	12000 (11377)	1.86 (4.07)	0.09 (0.17)	0.82 (1.80)	1.04 (2.29)

图 7.1: 不同活动时常和所处环境下的能量消耗

Value	Units	low	nominal	high	Reference
Human Metabolic Rate During EVA	MJ /CM-h		1.06		1. Personal communication with M. Rouen in 2001
	W/CM		300		2. LAT2 (2007)
EVA Crewmember Hours per Week	CM-h /wk		80	80	3. High Mobility Scenario
EVA Sorties ¹⁶¹ per Week	Sorties /wk	7	10	14	
Cooling Water Losses (North & South Poles)	kg /CM-h	0.25	0.3375	0.5	
Cooling Water Losses (Equator)	kg /CM-h	0.4625	0.625	0.7625	
Oxygen Losses	kg /CM-h	0.069	0.092	0.110	
Airlock Volume	m ³	3.3	3.3	3.3	
Airlock Free-Gas Volume	m ³	2.9	2.9	2.9	
Airlock Cycles per Week	Cycles /wk	3.5	5	7	
Airlock Gas Losses per Cycle as a Percentage of Airlock Gas Volume ¹⁶²	%	5	10	10	

图 7.2: 舱外的活动数据

Activity	Weekday [CM-h / CM-d]	Weekend Day [CM-h/CM-d]
Daily Planning Conferences	0.5	0.0
Daily Plan Review / Report Preparation	1.0	0.0
Work Preparation	0.5	0.0
Scheduled Assembly, Systems, and Utilization Operations ⁶³	6.5	0.3
Meals ⁶⁴	3.0	3.0
Housekeeping, and Laundry	0.0	2.0
Post Sleep	0.5	0.5
Exercise, Hygiene, Setup / Stow	2.5	2.5
Recreation	0.0	6.0
Pre-Sleep	1.0	1.0
Sleep	8.5	8.5
Total	24.00	24.00

Variably-Scheduled Time
Invariably-Scheduled Time

图 7.3: 一天的工作时间大致安排

结论：可以根据活动情况得到大致的能量消耗，并且给出了一个活动的时间模板。

7.2 研究土壤转化

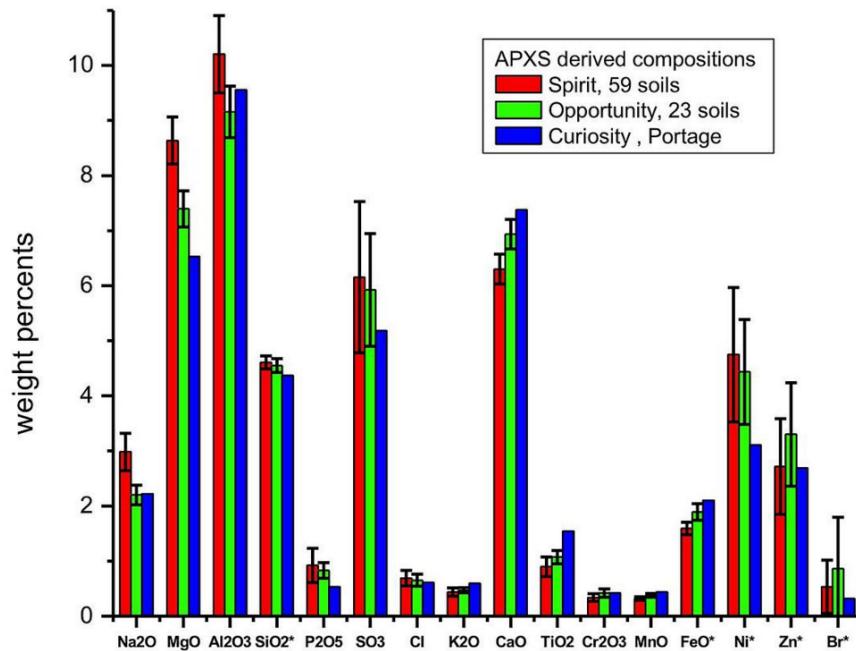


图 7.4: 火星土壤成分比例

高氯酸盐的转化方法：

1. 物理方法过滤：膜过滤和电渗析。
2. 化学方法：(1) 阴离子交换法 (2) 电化学还原法。微生物转化方法：科研人员现已发现了多种厌氧微生物（正好火星上没氧气）可将高氯酸盐降解成无毒的氯酸盐和氧气。

降解机理：高氯酸盐和氯酸盐的还原过程如下所示：

高氯酸盐还原为氯酸盐和氯酸盐还原为亚氯酸盐的过程都是由高氯酸盐还原酶来催化完成的。亚氯酸盐被亚氯酸盐歧化酶歧化生成氧气和氯离子。由于高氯酸盐降解菌兼性厌氧的本性，不会在过程中积累。1mol转化为1mol需要8mol电子，且需要细胞色素C作为电子传递体。

高氯酸盐降解菌在自然界中普遍存在，单菌多从含高氯酸盐的河流和土壤中分离得到。目前分离得到的56种高氯酸盐还原菌属于变形菌门种的 α , β , γ 和 ϵ 亚类。其中多数已知高氯酸盐降解菌属于 β -变形菌纲，可利用硝酸盐、高氯酸盐、氯酸盐和作为电子受体。高氯酸盐降解菌多数属于红环菌目种的红环菌科，为菌属Dechloromonas和Dechlorosoma。

但目前已知的这些高氯酸降解菌仍然太过娇气，需在温度为10度到35度环境下才能正常进行降解工作。对环境要求较为严格，适用于火星的微生物需要经过严格筛选。

3. 高温灭毒：高氯酸盐在高温下是强氧化剂，可用于火箭燃料。但这需要大量能源，而火星上能源缺乏。

结论：物理及化学方法需要较多的电力以及一些复杂的材料，操作过程也相对较为复杂。高温灭毒对于能源的要求过大。故微生物转化方法是最适合我们的方法，但是由于大部分微生物对生存环境的要求较高，需要根据火星的实际环境进行品种选择。

7.3 辅助人类作业的工程机械

有效载荷：参考了两个过去的无人火星车的载荷配置：

有效载荷	功能简介	科学探测任务及目标
导航地形相机	获取巡视区火星表面立体图像。	研究火星表面形貌和地质构造特征。
多光谱相机	获取巡视区火星表面可见光、近红外波段高分辨率多光谱图像。	研究火星表面形貌与物质类型分布。
火星车次表层探测雷达	获取火星地表和次表层超宽带全极化雷达回波数据。	研究巡视区火星表层、次表层地质分层结构与组成类型。
火星表面成分探测仪	对火星表面目标进行激光诱导离解光谱探测（LIBS），获取目标等离子体的紫外至近红外波段的高分辨率光谱特征信息。	火星表面物质的化学元素组成分析；火星表面矿物分析和岩石识别。
火星表面磁场探测仪	对火星表面磁场进行矢量测量。	探测研究着陆区火星磁场，确定火星磁场指数；与环绕探测配合，探测研究火星空间磁场，反演火星电离层发电机电流，研究火星电离层电导率等特性；尝试利用天然磁场跃变，探测火星内部局部构造。
火星气象测量仪	对火星表面环境温度和压力进行测量；测量火星表面风速、风向；拾取火星表面声音。	研究火星表面气候特征；对火星表面声音进行监测。
火星车载荷控制器	实现有效载荷系统一体化设计，完成对各科学探测有效载荷供电、运行控制、数据处理与传输以及与探测器系统的接口。	

图 7.5: 火星车有效载荷配置

俄罗斯福布斯探测器

1 等离子体-磁场探测系统 (PhPMS): 通过离子质谱仪对太阳风和行星粒子的分布进行探测；通过磁场探测器对变化的磁场进行探测。

2 掩星发射机。

3 微小粒子监视器 (METEOR): 用于研究微小粒子的物理动态参数，测量微小粒子的质量速度及空间密度分布等。

4 土壤及气质普分析系统：由取土器、热分解器 (TDA)、色谱分析器 (GC) 和质谱分析器 (MS) 等单机构成。科学目标是探测岩土内所含气体成分。测量土壤内水、二氧化碳、氮气、二氧化硫、惰性气体等化学物质和气体；探测土壤所含气体相态；探测土壤内所含有有机物；探测元素碳、氢、氧、氮 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}, \text{D/H}, ^{17}\text{O}/^{16}\text{O}, ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}, ^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) 和惰性元素的丰度；探测表面土壤所含矿物质成分。取土器安装在机械臂上，其余安装在内部。

5 GAMMA 分析仪：用于分析表面岩石的主要化学组成 (H-Fe) 及放射性物质 (K,Th,U)。

6 中子及 γ 射线分析仪：研究表面土层，用中子和 γ 射线分析有无与水相关的物质。

7 红外 (IR) 分析仪：探测甲烷、甲醛等物质；可探测高度 60km 的温度廓线；可绘制整体的矿物分布图；

8 次级离子质谱仪：对表面进行地质勘探。

9 长波雷达：探测深层结构，估算岩层厚度。

10 导航及引导系统：用于在靠近时进行导航，着陆地点选择，着陆时进行辅助控制、表面成像。

11 全景立体相机：获得着陆地点的全景图像，以及着陆时的实时 3D 成像。

12 红外显微镜：安装于机械臂 2，帮助选择返回地球的采样土壤。

结论：主要需要其中的导航系统、多种相机系统（普通高分辨率相机，全景立体相机，多光谱相机）、表面成分分析系统（土壤及气质普分析器）、气象测量仪、雷达系统、红外显微镜。

载人火星车的更多需求：我们选用有可增压装置的载人车辆，可以作为移动居住舱，长时间进行生活或移动工作。由于并没有载人火星车的应用历史，所以选择已有的载人月球车作为参考模板。

探测器	活动范围/km	车轮数量	能源系统	承载人数	其它
(a) Grumman LSS Project 344 Rover ^[23]	300	两套双轮	-	1	-
(b) Rover First 先行月球车	-	-	燃料电池	2	为宇航员提供必要的防辐保护；可遥控 ^[24] 。
(c) Pressurized Lunar Rover 可增压 月球车	-	每个容器 上配 4 个 车轮，直径 2 米	同位素电源 8.5kW	4 ~ 6	最初由弗吉尼亚东理工学院的学生提出，重量 7.0 吨；它由两个 5 米长，直径 4 米的圆柱形增压舱，通过通道相连接 ^[25] ；驱动系统采用无刷直流电机，减速比 50:1；常速 14.7 千米/小时，最大速度 29.4 千米/小时。可工作 14 天。
(d) MOSAP	3000	-	燃料电池	-	由 NASA 在 1989 年“90-Day-Study”月球基地概念中提出 ^[26] ；常速 10 千米/小时。
(e) Daylight Rover 日光探测器	1000	4 套双轮	可再生燃料 电池 10kW	2 ~ 4	由波音公司在 1990 年提出 ^[27] ；可工作 80 天；由两个单独的增加舱组成，前部作为驱动，后部用于存储。探测器最前部有两个可控机械臂，可完成常规的采样及收集工作；质量 25 吨；常速 2 ~ 4 千米/小时。
(f) The Small Pressurized Rover 小型 增压月球车	240	6 (双轮) 全轮独立转向	锂亚电池 (300VDC)	2 ~ 4	由 NASA 提出，宇航员将于 2020 年重返月球时使用这种月球车 ^[28] ；Chariot 风格的底盘及驱动系统；有一个增压舱，可为宇航员提供 72 小时有效保护。
(g) LPMR 极地月球车	最大范围 100	4 直径 1.5 米， 宽 0.5 米	燃料电池， 常规 2.5kW， 峰值达 6kW	3	可搬运 500 千克的挖掘钻取设备；同时设计了一个机械臂，可提起 50 千克的有效载荷；质量 23 ~ 25 吨；可工作 6 天 ^[29] 。

图 7.6: 有可增压装置的载人月球车

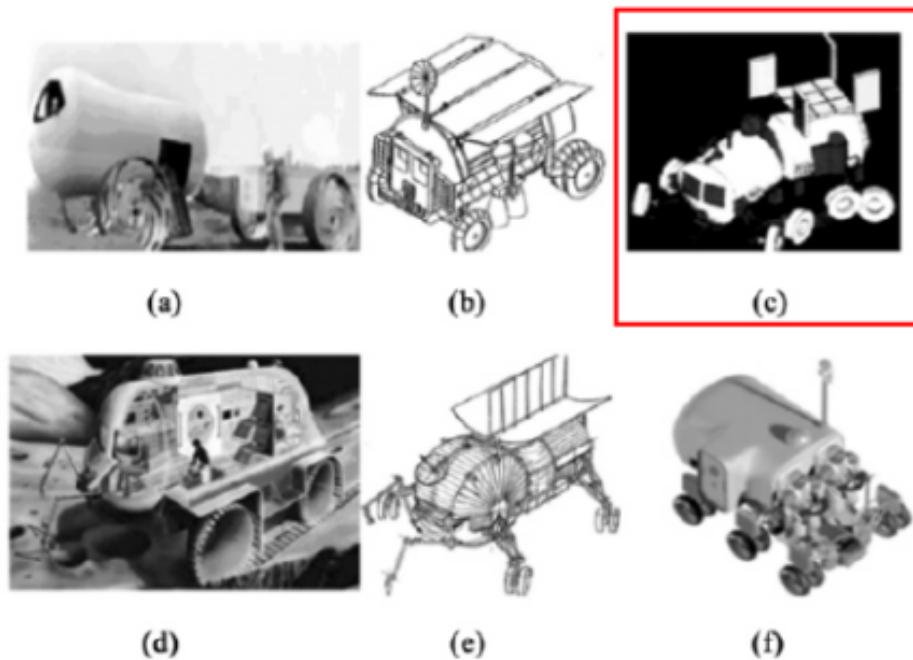


图 7.7: 火星车的选择

结论：选择（c）型的月球车作为我们所需的载人火星车的参考模型。

并且得到了大致的火星车参数：

能源需求：8.5kW 300VDC 同位素电源。

续航情况：速度 14.7–29.4km/h，正常使用情况下可续航 14 天左右。

第八章 环境控制系统

8.1 环境控制分析

环境条件：大气成分 95% 二氧化碳; 标准大气压 $P = 700\text{Pa}$, 平均风速 5m/s , 最高风速 $60\text{--}80\text{m/s}$; 温度, 正常温度 $T = 215\text{K}$, 变化范围为 $130\text{--}300\text{K}$; 电磁辐射平均值 615W/m^2 , 变化范围 $493\text{--}718\text{W/m}^2$; 重力加速度 $g = 3.72\text{m/s}$ 。

舱室条件：以直径 32m , 高 9m 的圆柱体进行估算, 舱体材料初步以常用航天器材料钛合金的物性参数为基准, 舱内温度 300K , 舱内压力为一个标准大气压。

主要热交换方式：舱室底部与土壤热传导; 舱室四周和顶部与大气对流传热和辐射传热。

采用公式: $Q = 2A\sqrt{\frac{1}{\pi\tau}}\sqrt{\rho c\lambda}\Delta t$ 。

参数 $\lambda = 0.04\text{W/mk}$, $A = 804.25\text{m}^2$, $\Delta t = 300 - 255 = 45\text{K}$, $\rho = 3933\text{kg/m}^3$, $c = 800\text{J/kgK}$, $\tau = 10^5\text{s}$ 。

结果 $Q = 45.834\text{kW}$ 。

侧面热对流:

采用公式:

$$Gr = \frac{ga_V\Delta tl^3}{v^2}$$

$$Nu = C(GrPr)^n$$

$$h = \frac{\lambda}{l}Nu$$

$$Q = Ah\Delta t$$

参数: $g = 3.72\text{m/s}$, $a_V = 1/T = 0.0047$, $\Delta t = 85\text{K}$, $l = 9\text{m}$, $v = 8.586 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$, $Pr = 0.71$, $C = 0.59$, $n = 0.25$, $\lambda = 0.01\text{W/mK}$, $A = 904.78\text{m}^2$ 。

结果: $Gr = 1.47 \times 10^9$, $Nu = 106.05$, $Q = 9062.13\text{W}$ 。

顶部热对流: 与侧面热对流类似, 参数有一点变化。参数: $C = 0.15$, $A = 804.25\text{m}^2$, $l = 8$ 。得 $Q = 2108.77\text{W}$ 。

辐射传热:

公式: $h = \epsilon_1 \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$, $Q = Ah\Delta t$ 。

参数: $\epsilon_1 = 0.25$, $\sigma = 5.67 \times 10\text{W/m}^2\text{K}^4$, $T_1 = 300\text{K}$, $T_2 = 215\text{K}$ 。

结果: $Q = 144.463\text{kW}$ 。

8.2 控制系统设计

舱体正常状态总散热量约为 200kW。其中辐射传热为最主要散热方式占 70%, 其次是与土壤的热传导 25%, 对流传热几乎可以忽略。因此可以采用辐射式主动热控来进行温度控制。设想在产热设备较为集中的区域的舱体壁面上安装百叶窗系统, 用热管连接仪器散热面和百叶窗控制面, 通过控制百叶窗的开闭调整散热量。为了获得更好的散热效果, 将它以斜面方式安装在外壁上。

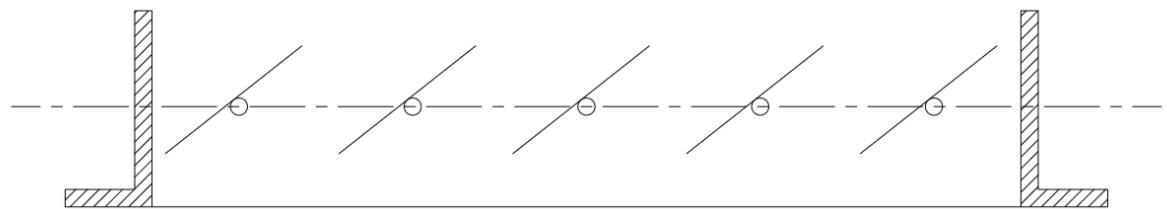


图 8.1: 散热系统平面图

附录 A 营养分析

计算方法：计算的对象是全员总任务时间对物质和能量的总消耗量的估计值。其中物质和能量包括氧气、水、能量和营养物质（维生素和矿物质等）。

假设：所有具有一定范围的值都做保守估计，取其最大值；作为消耗量的计算，可再生物质的循环利用将不予考虑。下面对计算涉及的参数和变量进行说明和确定。

计算公式和参数：设男乘员有 M 人，女乘员有 W 人，则总人数为 $K = M + W$ 人。任务持续天数为 T ，某物质或能量 x 的日均消耗男乘员和女乘员分别为 $C_{male}(x)$, $C_{female}(x)$ ，单位由 x 确定，则 x 的总消耗量的估计值 $C_{total}(x)$ 为：

$$C_{total}(x) = (M \times C_{male}(x) + W \times C_{female}(x)) \times T \quad (\text{A.1})$$

参数的确定：

任务时长 T 的确定：参考“月宫一号”于 2014 年 5 月成功完成的，我国首次长期高闭合度集成实验的持续时间为 105 天^[1]，拟将 T 设置为 100 天。

乘员人数 K, M, W 的确定： K 的确定：设计书中提及火星宫”分 2 期建设，整体建成后可容纳 100 人，“火星宫”一期可容纳 10 人，主要开展火星生命科学的研究^[2]。因为本说明书是一期的设计说明书，所以 K 确定为 10 人。根据“月宫一号”的男女比例 7/3，将 M 和 W 分别设置为 7 和 3。

男女乘员物质和能量的每日需求量 $C_{male}(x), C_{female}(x)$ 确定：可以根据人类对 x 的平均需求量 $C_{average}$ 再乘以表示男女差异的系数 $\alpha = C_{male}(x)/C_{female}(x)$ ，得出：

$$C_{male}(x) = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \times C_{average} \quad (\text{A.2})$$

$$C_{female}(x) = \frac{1}{1 + \alpha} \times C_{average} \quad (\text{A.3})$$

不同的物质和能量的数据以表格列出。

耗氧量 $C_{total}(\text{O}_2)$ 的计算： 根据设计原则^[3]，氧气的供给量要足够支持一个乘员参与中等到高等强度的活动，根据保守估计原则，选取表 A.1 的高等活动强度的数据，得出 $C_{average} = 0.96 \text{ kg}/(\text{person}\cdot\text{day})$ 。男女比例的数据从表格的 *95th Percentile Nominal Male* 和 *5th Percentile Nominal Female* 中得出为 $\alpha = 1.11/0.52 \approx 2.134$ 。根据以上数据，可以得出：

$$\begin{aligned} C_{male}(\text{O}_2) &= \frac{\alpha}{1 + \alpha} \times C_{average} \\ &= \frac{2.134}{1 + 2.134} \times 0.78 \approx 0.654 \text{ kg}/(\text{person}\cdot\text{day}) \\ C_{female}(\text{O}_2) &= \frac{1}{1 + \alpha} \times C_{average} \\ &= \frac{1}{1 + 2.134} \approx 0.306 \text{ kg}/(\text{person}\cdot\text{day}) \\ C_{total}(\text{O}_2) &= (M \times C_{male}(\text{O}_2) + W \times C_{female}(\text{O}_2)) \times T \\ &= (7 \times 0.654 + 3 \times 0.306) \times 100 \approx 54.960 \text{ kg} \end{aligned}$$

表 A.1: Table of Oxygen Requirements

Category	Metabolic Load [kJ/(person•day)]	Oxygen Requirements [kg/(person•day)]
Low Activity Metabolic Load *	10,965	0.78
Nominal Activity Metabolic Load **	11,82	0.84
High Activity Metabolic Load *	13,498	0.96
5 th Percentile Nominal Female	7,590	0.52
95 th Percentile Nominal Male	15,570	1.11

Note

* From Space Station Freedom Program via C. H. Lin (NASA/JSC), personal communication.

** From the Baseline Values and Assumptions Document, JSC-47804.

The assumed conversion factor from liters of O₂ to calories is 4.8 cal/L here. February 2003 3–9 A pressure of 101.325 kPa and a temperature of 0 °C are the standard conditions.

水消耗量 $C_{total}(\text{H}_2\text{O})$ 的计算：乘员用水主要分为两个方面：饮用水和清洁用水。饮用水的供给至少要达到 2.0 L/person•day。清洁用水则根据当前条件尽可能的供给，如表 A.2。基于保守估计，清洁用水取值为 *Operational* 的最大值 5.16 kg/person•day，饮用水取值为 2.0 L/person•day，即¹1994.0 kg/person•day。男女差异系数取自人体含水量的男女

¹水的密度为 997 kg/m³

比例², $\alpha \approx 1.091$ 。水消耗量的计算过程如下:

$$\begin{aligned}
 C_{average} &= C_{drink} + C_{hygiene} \\
 &= 5.16 + 1994.0 = 1999.160 \text{ kg/person}\cdot\text{day} \\
 C_{male}(\text{H}_2\text{O}) &= \frac{\alpha}{1+\alpha} \times C_{average} \\
 &= \frac{1.091}{1+1.091} \times 1999.160 \approx 1043.082 \text{ kg/person}\cdot\text{day} \\
 C_{female}(\text{H}_2\text{O}) &= \frac{1}{1+\alpha} \times C_{average} \\
 &= \frac{1}{1+1.091} \times 1999.160 \approx 956,078 \text{ kg/person}\cdot\text{day} \\
 C_{total}(\text{H}_2\text{O}) &= (M \times C_{male}(\text{H}_2\text{O}) + W \times C_{female}(\text{H}_2\text{O})) \times T \\
 &= (7 \times 1043.082 + 3 \times 956,078) \times 100 \\
 &\approx 1016980.800 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

表 A.2: Hygiene water requirements

Mode	Hygiene Water [kg/person·day]
Operational	2.84 – 5.16
90-day Degraded	2.84
Emergency	2.84

能量需求 $C_{total}(E)$ 的计算: 人体能量消耗主要包括基础代谢(设基础代谢率为 BMR kcal/day), 食物的代谢反应 MRF , 体力活动(设每日体力活动能量消耗率为 PA kcal/day), 和生长发育³组成:

$$C_{total}(E) = (BMR_{total} + PA_{total}) \times T + MRF_{total} \quad (\text{A.4})$$

计算基础代谢率所用的公式由^[4]给出, 单位是 kcal/day:

$$BMR_{male} = 66 + 13.7 \times weight + 5.0 \times height - 6.8 \times age \quad (\text{A.5})$$

$$BMR_{female} = 65.5 + 9.5 \times weight + 1.8 \times height - 4.7 \times age \quad (\text{A.6})$$

²成年男子总体水约为体重的 60%, 女子为 50%–55%

³宇航员的生长发育忽略不计

假设男乘员的平均年龄为 25，平均体重和身高分别为 66 kg 和 175 m；女乘员的平均年龄为 23，平均身高体重分别为 49 kg 和 163 m，则计算可得：

$$BMR_{male} = 66 + 13.7 \times 66 + 5.0 \times 175 - 6.8 \times 25$$

$$= 1675.2 \text{ kcal/day}$$

$$BMR_{female} = 65.5 + 9.5 \times 49 + 1.8 \times 163 - 4.7 \times 23$$

$$= 716.3 \text{ kcal/day}$$

体力活动的计算通过 BMR 乘以体力活动水平 PAL 来计算， PAL 参考 chinese-activity 水平分级表 A.3，基于保守估计的原则，取重活动强度的 PAL ：

$$PA_{male} = 2.10 \times BMR_{male} = 3517.920 \text{ kcal/day}$$

$$PA_{female} = 1.82 \times BMR_{female} = 1303.666 \text{ kcal/day}$$

所以得出基础代谢率和体力活动能量消耗率的总和为：

$$\begin{aligned} BMR_{total} + PA_{total} &= W \times (BMR_{female} + PA_{female}) + M \times (BMR_{male} + PA_{male}) \\ &= 3 \times (716.3 + 1303.666) + 7 \times (1675.2 + 3517.920) \\ &= 42411.738 \text{ kcal/day} \end{aligned}$$

表 A.4: 不同能量物质的食物热效应

食物成分	食物热效应(占成分能值)
脂肪	4%—5%
碳水化合物	5%—6%
蛋白质	30%
混合性食物	10%

表 A.3: chinese-activity 水平分级

活动强度	职业工作时间分配	工作内容举例	PAL_{male}	PAL_{female}
轻	75% 时间坐或站立, 25% 时间特殊职业活动	办公室工作, 修理电器钟表售货员, 酒店服务员, 化学实验操作, 讲课等	1.55	1.56
中	25% 时间坐或站立, 75% 时间特殊职业活动	学生日常活动, 机动车电工安装, 车工, 金工等	1.78	1.64
重	40% 时间坐或站立, 60% 时间特殊职业活动	非机械化农业劳动, 炼钢, 舞蹈, 体育运动, 装卸, 采矿等	2.10	1.82

食物热效应的计算涉及到不同营养成分在宇航员的食谱中所占的比例以及它们的食物热效应占成分的能值, 不妨将其记为食谱设计 η 和食物能值比例 ω 的函数, 单位是 kcal/day。

$$MRF_{total} = \sigma(\eta, \omega) \times T \quad (\text{A.7})$$

综上所述, 目前能够计算出的能量消耗估计值为:

$$\begin{aligned}
 C_{total}(E) &= (BMR_{total} + PA_{total}) \times T + MRF_{total} \\
 &= 42411.738 \times 100 + MRF_{total} \\
 &= 4241173.800 + MRF_{total} \text{ kcal}
 \end{aligned}$$

营养物质需求的计算： 人体对营养物质的需求包括这几大类：糖类 (Carbohydrate)、蛋白质 (Protein)、脂质 (Fat)、维生素 (Vitamin) 和微量元素 (Minal)。其中，糖类、蛋白质和脂质计量的方式是各类上述物质占人体能量消耗量的百分比乘以人体总能量消耗。参考表 A.5，根据保守估计原则, Energy 取 $2900 \text{ kcal} \cdot d^{-1}$ ，各项比例均取最大值，得出：

$$\begin{aligned}
 C_{carbohydrate} &= 2900 \times 60\% \times T = 174000.0 \text{ kcal} \\
 C_{protein} &= 2900 \times 15\% \times T = 435000.0 \text{ kcal} \\
 C_{fat} &= 2900 \times 30\% \times T = 87000.0 \text{ kcal}
 \end{aligned}$$

表 A.5: Set values of Nutritional requirements of one crew-member

Nutrients	Unit	target values
Energy	$\text{kcal} \cdot d^{-1}$	2800–2900
Protein	%Total energy consumed	11–15
Carbohydrate	%Total energy consumed	55–60
Fat	%Total energy consumed	25–30

维生素和微量元素则用质量单位如毫克、微克等计量。参考表 A.6，给出几种常见维生素的总消耗量^[5]：

$$\begin{aligned}
 C_{VitaminA} &= 900 \times T = 90000 \mu\text{g} \\
 C_{VitaminD} &= 25 \times T = 2500 \mu\text{g} \\
 C_{VitaminK}^{male} &= 90 \times T = 9000 \mu\text{g} \\
 C_{VitaminK}^{female} &= 120 \times T = 12000 \mu\text{g} \\
 C_{VitaminE} &= 15 \times T = 1500 \mu\text{g}
 \end{aligned}$$

以及常见微量元素的总消耗量：

$$C_{\text{Fe}} = 10 \times T = 1000 \text{ mg}$$

$$C_{\text{Cu}} = 9 \times T = 900 \text{ mg}$$

$$C_{\text{Zn}} = 11 \times T = 11 \text{ mg}$$

表 A.6: Nutrition requirements for long-duration missions

Nutrients	Daily dietary intake
Nutrients	Daily dietary intake • 0.8 g/kg and
Protein	• $\leq 35\%$ of the total daily energy intake and • 2 of 3 of the amount in the form of animal protein and 1 of 3 in the form of vegetable protein
Carbohydrate	50% to 55% of the total daily energy intake
Fat	25% to 35% of the total daily energy intake
Ω -6 fatty acids	14 g
Ω -3 fatty acids	1.1 to 1.6 g
Saturated fat	<7% of total calories
Trans fatty acids	<1% of total calories
Cholesterol	<300 mg/d
Fiber	10 to 14 g/4187 kJ • 1 to 1.5 mL/4187 kJ and
Fluid	• ≥ 2000 mL
Vitamin A	700 to 900 μ g
Vitamin D	25 μ g
Vitamin K	Women: 90 μ g Men: 120 μ g
Vitamin E	15 mg
Vitamin C	90 mg
Vitamin B12	2.4 μ g
Vitamin B6	1.7 mg
Thiamin	Women: 1.1 mg Men: 1.2 mg

表 A.6: 续表

Nutrients	Daily dietary intake
Riboflavin	1.3 mg
Folate	400 μ g
Niacin	16 mg niacin equivalent
Biotin	30 μ g
Pantothenic acid	30 mg
Calcium	1200 to 2000 mg
Phosphorus	• 700 mg and • $\leq 1.5 \times$ calcium intake
Magnesium	• Women: 320 mg Men: 420 mg and • ≤ 350 mg from supplements only
Sodium	1500 to 2300 mg
Potassium	4.7 g
Iron	8 to 10 mg
Copper	0.5 to 9 mg
Manganese	Women: 1.8 mg Men: 2.3 mg
Fluoride	Women: 3 mg Men: 4 mg
Zinc	11 mg
Selenium	55 to 400 μ g
Iodine	150 μ g
Chromium	35 μ g

总结 本文结合了营养学，食品学和航空学等领域的文献，对宇航员的各种营养需求做了粗略的估计。本文对数值采取保守估计的原则，得出了一定数量的乘员在一定时长内消耗的氧气，水，能量和营养物质的总量。

附录 B 设计图纸

B.1 舱体三视图

冯聪

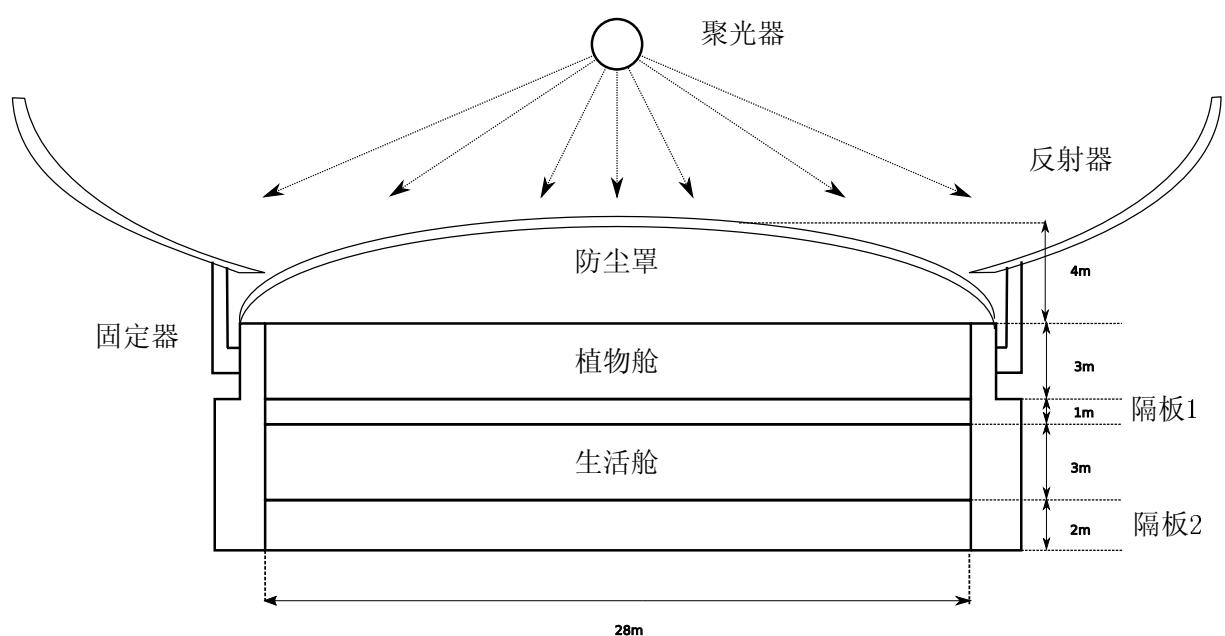


图 B.1: 基地侧面剖视图

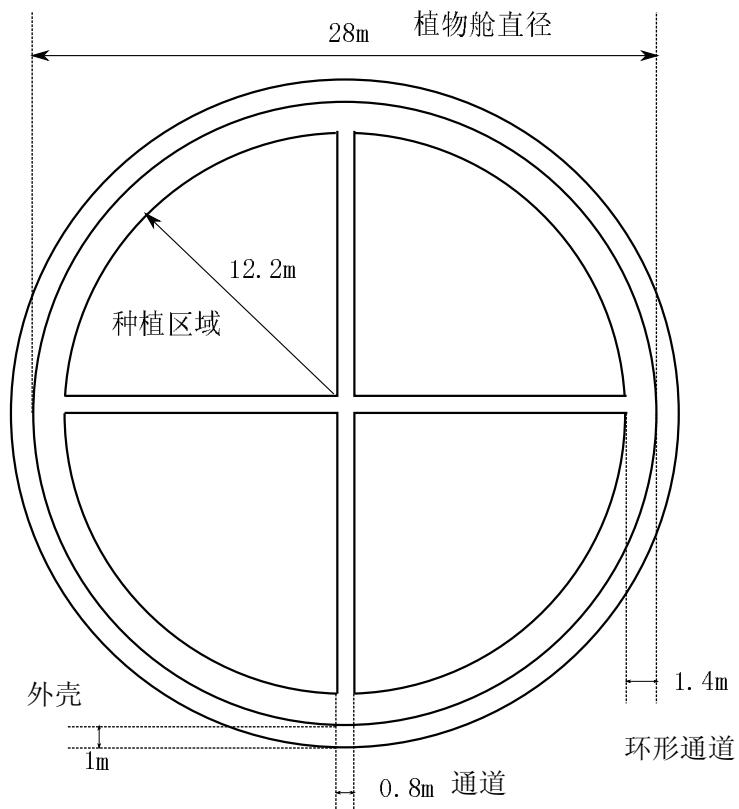


图 B.2: 基地上层俯视图

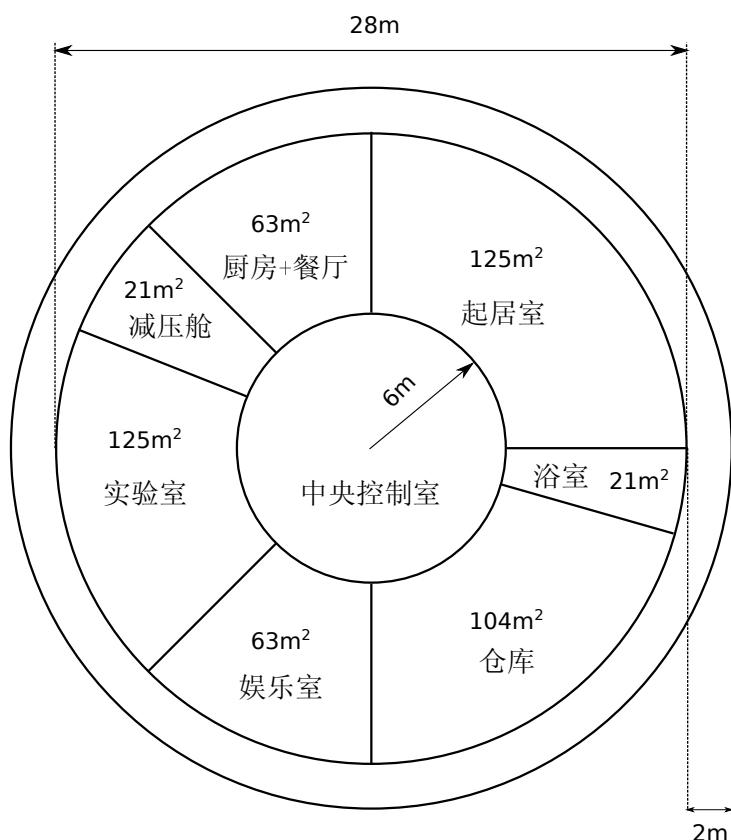


图 B.3: 基地下层俯视图

B.2 舱体立体图

杨祖仪

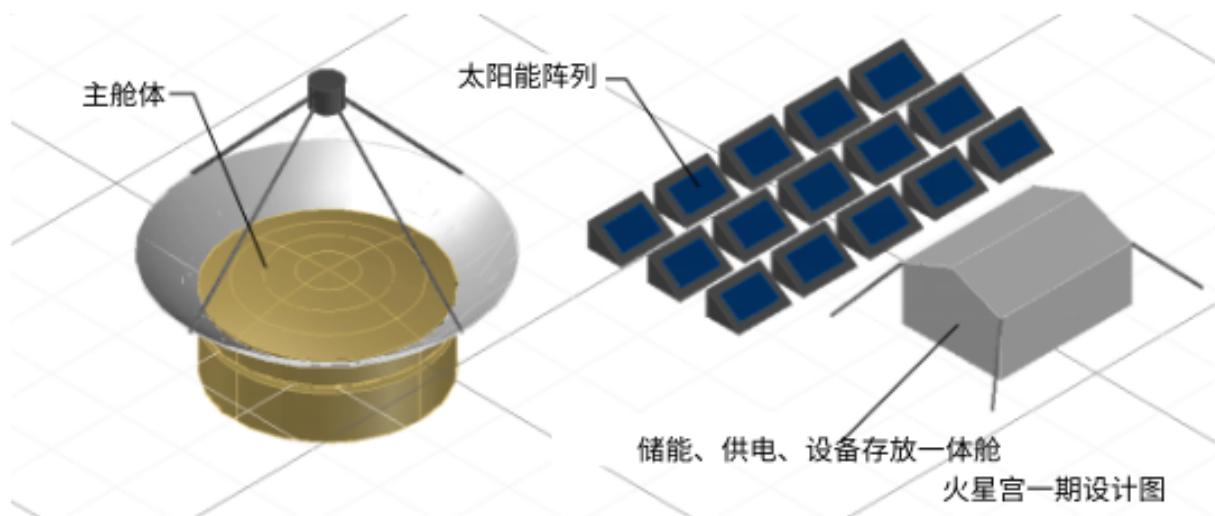


图 B.4: 火星宫一期设计图

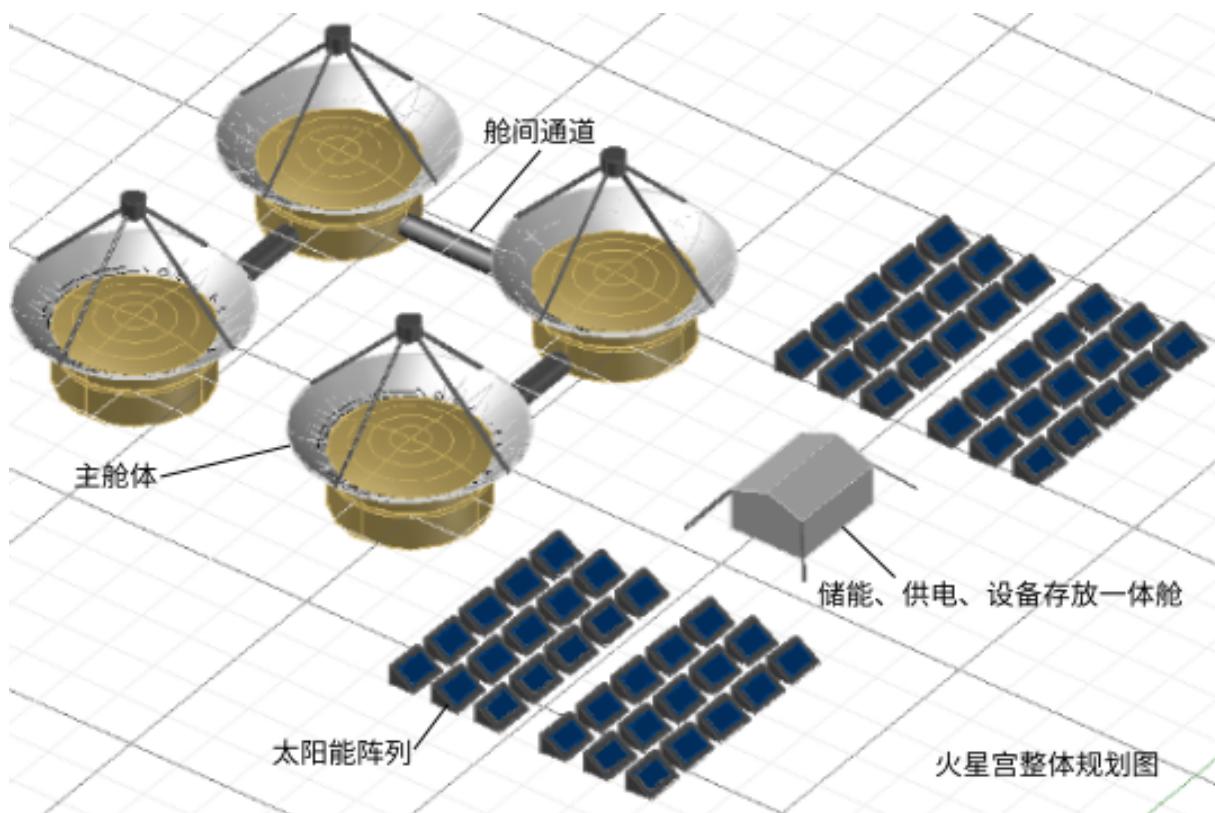


图 B.5: 火星宫整体规划图

附录 C 工程预算

表 C.1: 废物处理和物质循环利用

项目	主材料	必需/非必需	成本/10 人/月/元
阳极	石墨、碳纸、碳布	必需	2000
阳极室	玻璃、有机玻璃	必需	1000
阴极	石墨、碳纸、碳布	必需	2000
阴极室	玻璃、有机玻璃	必需	1000
质子交换膜	质子交换膜、盐桥	必需	15000
阳极室微生物菌群	希瓦菌、假单胞菌、泥 细菌等	必需	5000
阴极催化剂	生物阴极	非必需	5000
外电路	导线、电极等	必需	3000
固体废物处理液	调节废液的 pH 值等 参数，使之方便反应	必需	10000

总成本：44000 元/10 人/月。

备注：占地面积几平方米左右，承载能力约在几千克固体废物左右，具体数值视环
境而定。

表 C.2: 舱体预算

材料	所用部位	比重	所需体积	单位价格	总价/元
钛合金	舱体外壳和内部主要支架、隔离门、隔离带、地基	4.51g/cm ³	3718.612m ³	188 元/kg	31.53 亿
金涂层	舱体外壳涂层	19.32g/cm ³	1.75229m ³	344 元/g	116.46 亿
纯银	采集板	10.5g/cm ³	2.88m ³	3.85 元/g	1.16 亿
合计					149.15 亿

备注：仅列举可查的材料价格；计价单位为人民币。

表 C.3: 工程和活动规划预算

名称	数量	价格 (百万元)
GAMMA 分析仪	1	0.15
气质联用仪	1	1.75
高分辨率相机	1	0.6
气象测量系统	1	1.5
综合雷达系统	5 (不同类型)	10
红外显微镜	1	0.66
火星车整体 (以好奇号为参考)	1	95000
总计		95014.66

表 C.4: 环境控制系统预算

材料名称及说明	数量	单价	总价/元
一、 制冷循环系统	2 套		
全封闭涡旋式压缩机	2	2000	4000
壳管式换热器	4	3000	12000
膨胀阀	2	400	800
智能控制系统	2	1000	2000
温度压力传感器	10	200	2000
管线耗材 10m	2	500	1000
制冷工质	2	500	1000
热控涂层 10 平米	1	5000	5000
二、 空气调节系统	4 套		
轴流式风机	4	1500	6000
喷水室	4	600	2400
电加热器	4	500	2000
智能控制系统	2	1000	2000
风管 10m	1	1000	1000
三、 压力控制系统	1 套		
智能控制系统	1	1000	1000
高压气源	2	5000	10000
减压阀	2	1200	2400
总计			54600

参考文献

- [1] 月宫一号微信公众号. 带您了解北航月宫一号. 3月 2015 年.
- [2] 本课课程组. 任务设计书. 4月 2018 年.
- [3] LYNDON B JOHNSON SPACE CENTER. Advanced life support requirements document. 2002.
- [4] Mifflin MD, St Jeor ST, Hill LA, Scott BJ, Daugherty SA, and Koh YO. A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1990.
- [5] Maya Cooper, Grace Douglas, and Michele Perchonok. Developing the nasa food system for long-duration missions. *Journal of food science*, 76(2), 2011.