

# 月球基地能源系统初步研究

任德鹏, 李青, 许映乔

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 建设月球基地、深入开展月球探测是后续深空探测发展的必然趋势, 能源系统是维持月球基地正常工作的基本条件。结合月球基地能源需求和月面环境特点, 确定了能源系统的基本要求; 对比分析了各种能源类型的特点及应用前景, 明确了初级阶段月球基地能源系统应以太阳能的利用为主要方式, 核心技术是解决太阳能的高效存储问题; 通过储能技术的分析, 提出了热化学制氢结合氢氧燃料电池及光伏发电装置的能源系统方案, 并对系统设计的关键技术进行了分析, 相关内容可为月球基地的深入论证及其能源系统的具体设计提供借鉴。

**关键词:** 月球基地; 能源系统; 方案概述

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2018)06-0561-08

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2018.06.009

**引用格式:** 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(6): 561-568.

**Reference format:** REN D P, LI Q, XU Y Q. Preliminary research on the lunar base energy system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 561-568.

## 引言

随着人类科技文明的发展, 未来必然会将生存和发展的空间拓展至地外天体或宇宙空间, 当前开展的深空探测是人类文明迈入太空时代的第一步。月球是距地球最近的天体, 自然成为首选的探测目标。过去几十年的月球探测取得了一定的科学成果, 我们了解到月球上蕴藏着丰富的矿产资源和能源<sup>[1]</sup>。对于解决人类社会面临的发展危机具有重要意义、月球具备天然的环境和地理优势, 是开展科学观测和研究生产的理想场所。对月球认识的提高, 丰富了月球探测的意义。联合国早在1984年就通过了《指导各国在月球和其他天体上活动的协定》, 确立了开发和利用月球资源的合法性。在这种背景下, 深入开展月球探测成为各航天大国的一项使命。当前人类对月球的探测尚处于初级阶段, 对月球的了解仍非常有限<sup>[2]</sup>, 现有的探测途径已不能满足后续发展的需求, 建设月球基地深入开展科学探测、逐步开发和利用月球资源是月球探测的发展趋势<sup>[3-4]</sup>。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)早在2005年就公布了月球基地的建设方案, 其他国家也先后制定了各自月球基地的发展计划, 并开展了先期技术研究<sup>[4]</sup>。月球基地被赋予了很多功能, 归纳起来主要

包括: ①月球科学探测平台; ②月基空间观测站; ③科学实验平台; ④军事战略基地; ⑤月球资源开发站; ⑥深空探测中转站; ⑦人类生存拓展殖民地。其中任何一项功能的实现都会对当今人类的政治、经济、科技、军事产生重要影响。

能源是维持月球基地正常工作的前提, 是各阶段月球基地共同的需求, 在各种规划论证中也都将能源系统列为月球基地的重要组成部分, 并作为基地设计的一项核心关键技术<sup>[3-5]</sup>。本文从月球基地的任务入手, 结合月面环境特点分析了基地能源系统的基本要求, 通过能源类型的具体分析提出了一种解决初期阶段月球基地能源供应的方案, 旨在为我国月球基地的深入论证提供参考。

## 1 月球基地发展及能源系统要求分析

按当前人类科技水平的发展可以预测, 月球基地的研发和应用可分为4大阶段: ①初级阶段为无人基地, 主要由智能机器人执行基地的运行管理, 该阶段的主要任务是深入开展月球科学探测及系列实验, 对月球矿石的开采加工、建筑材料制备、氧气制造、能源利用等关键技术进行验证, 为后续有人基地的应用奠定基础, 基地的月面工作周期不少于1年; ②中期阶段为短期有人基地, 该阶段月球基地可提供5~10名航天

员半年左右的生存条件,其主要任务为搭建循环生态系统对生存系统进行验证、安装并测试基地拓展的功能模块、开采矿石和月壤并制备基地维护所需的材料;③高级阶段,通过中期阶段的发展,基地的各组成模块已经齐全并能够正常发挥其功能,月球基地的发展进入了高级阶段,已经能够满足100名航天员长期驻守,此时月球基地的主要工作转为对月球资源的开发应用,利用月球的原位资源拓展基地的规模和保障条件是该阶段的主要任务;④应用阶段,此时的月球基地已经发展为功能齐全、自给自足的月球生态城镇,能够生产和储备必要的资源和能源反供地球,全面实现月球基地功能,充分发挥人类进入太空时代的中继站作用。

作为功能相对齐全、任务周期较长的月球基地,科学任务多且能够连续工作是其基本特征,与常规月面探测器相比,月球基地的能源需求更大且要求输出持续稳定。作为月球基地的能源供应站,能源系统必须满足以下基本要求。

#### 1) 适应月面环境

月球表面地形崎岖复杂,表面没有大气,重力加速度仅为地球的1/6。月昼期间月表温度高达120℃、而月夜期间降至-180℃<sup>[6]</sup>。月面还存在复杂的空间辐射环境<sup>[7]</sup>。能源系统的设计中必须采取必要措施或开展验证试验,确保在月面特殊工作环境中能够正常工作。

#### 2) 能够长期稳定运行

为提高月球基地的工作效率,能源系统需在月昼和月夜期间都能连续提供能源保障;受发射准备周期的影响,初级和中期阶段的月球基地不可能随时有航天员进行故障处理和设备检修,因此能源系统需具备智能化运行和可靠性高的特点。该系统不宜使用一次性能源,应确保在长期不补充原料的条件下仍能够稳定运行。

#### 3) 输出功率大且能够热电联合输出

不同阶段的月球基地对能源的需求量虽不相同,但即便是初级的无人基地也需要几十至上百千瓦的能量输入保证其完成既定的任务<sup>[3]</sup>。月夜期间,为保证在低温环境中设备和人员的安全,需要能源系统能够持续提供必要的热量。因此,月球基地能源系统需具备输出功率大、热电联产的特点。

#### 4) 环保洁净

月球是人类共有的资源,人类的探测和开发也要保持可持续发展,不能对月球环境产生不可恢复的破坏。能源系统应为一个封闭的系统,只与外界发生能量的交换,其工作过程不能对外排放不可分解的废液、废气,也不能导致失控的放射性污染。

#### 5) 轻小型一体化

在未实现利用月球原位资源满足自给自足的阶段,能源系统需要随月球基地一起由运载火箭发射至月面,重量轻、效率高的系统才能满足设计要求。为保证能源供应的连续性并降低操作难度,能源系统要求一体化设计,能够实现月面着陆后即可就位工作,不能有复杂的组装、调试和准备过程。

## 2 能源利用类型分析

月球没有大气和海洋,尚未发现存在生命的迹象,人类已成熟掌握的风能、潮汐能、化石能等能源利用技术在月球上都无法应用,月球基地只能采用其他的能源类型。以下结合月球的资源、环境特点及系统的要求,对月球基地能源利用类型进行分析。

#### 1) 光伏发电系统

光伏发电系统是利用材料的光电效应直接将太阳能转化成电能的能源类型,该系统在人类社会的各领域均有广泛应用,大部分航天器设计中也都将之作为主能源使用<sup>[8]</sup>。光伏发电系统通常的组成形式包括太阳能电池阵、蓄电池和电源管理器,相关的设计、制造和应用技术已趋于成熟。月球表面有着丰富的太阳能,月球距太阳的距离约为1 AU且没有大气造成的衰减,月面上单位垂直面积接收的太阳能高于地面的任何地区;月球赤道面与黄道面的夹角小于2°<sup>[9]</sup>,其任意位置太阳高度角的变化规律基本不变,利于对太阳的定向跟踪;月面白昼持续时间约为14个地球日,可以提供持续的光照。这些都是月球基地采用光伏发电系统作为主能源的有利因素,该系统能够解决月昼期间基地的能源需求。但在日食及月夜期间光伏发电系统无法工作,此时能源的供应只能依靠蓄电池。蓄电池存在功率密度小、充放电效率低、循环寿命短的缺点<sup>[10]</sup>,在低温环境中其放电效率会明显下降。即便是最新型的锂离子蓄电池,短期内其比能量也难以提高至300 Wh/kg<sup>[11]</sup>,月夜期间若要实现长时间的能量输出,能源系统需要较大的重量资源。正因为光伏发电系统不满足连续工作和热电联产的要求,导致“嫦娥3号”探测器在月夜期间只能处于休眠状态,且需要放射性同位素热源为其加热<sup>[12]</sup>,显然该系统不适合作为月球基地的主能源。

#### 2) 光热发电系统

光热发电系统是利用太阳能将工质加热膨胀,以高压气体的形式驱动透平进行发电的装置。在能量利用途径上该系统先将太阳能转换成机械能,再实现机械能到电能的转换。光热发电系统一般由集热器、热

机和发电机组,近年来在民用领域取得了广泛的应用,但在空间应用方面的进展相对缓慢。与光伏发电相比,光热发电系统具有效率高、寿命长的优点<sup>[13]</sup>,其直接利用了太阳辐射的热能,因此容易实现热电联产;月球表面没有大气,其光照区和阴影区有较大的温差,能够简化工质散热装置的设计,这些是光热发电系统应用于月球基地的有利因素。但该系统同样无法解决月夜期间的能量输出问题,由于存在运转组件,其系统可靠性相对低且工作准备时间长,这些缺点也决定了光热发电不能满足月球基地能源系统的要求。

### 3) 放射性同位素温差电源系统

温差电源是利用热电材料的塞贝克效应直接将热能转化为电能的能源类型,由于其工作原理简单、内部没有运动部件,因此具有可靠性高、无污染的优点<sup>[14]</sup>。在民用领域主要应用于工业节能和废热利用等方面<sup>[15]</sup>,在空间领域主要应用于光伏系统无法工作的深空探测方面<sup>[16-17]</sup>。温差电源正常工作需要与热源配合使用,采用放射性同位素作为热源,利用元素衰变过程产生的热量能够使温差发电系统稳定运行,其寿命仅取决于元素的半衰期。温差发电系统具有较强的环境适应性,月夜期间仍能正常工作,且能够实现热电联产。但该系统存在2个主要的缺点:①综合效率低,温差发电的转换效率普遍不超过10%,其最高质量比功率只有6 W/kg左右,输出电功率一般不超过1 kW;②综合成本高,无论是温差材料的研制还是同位素热源的制备都需要特殊的工艺和保障条件,导致温差发电系统价格高昂、无法批量生产也不适合大规模装备。可见,温差发电系统不适用于月球基地。

### 4) 空间核反应堆电源系统

由于受控核聚变技术目前尚未完全掌握,这里的核反应堆电源特指空间裂变核反应堆电源,是将核裂变反应过程产生的热能进行综合利用的装置,主要由反应堆、热电转换系统、放射屏蔽系统和废热排放系统组成。与其他类型的能源系统相比,空间核反应堆电源具有功率大、寿命长、生存能力强、可全天候工作的特点<sup>[18]</sup>,在空间领域方面也有广泛的应用背景,被认为是月球基地及其他深空探测任务中最理想的能源类型<sup>[19]</sup>。20世纪60年代以来,美国对月球及火星基地用空间核反应堆电源进行了大量研究,提出了多种代表性设计方案<sup>[20-23]</sup>,近年来俄罗斯、中国<sup>[19,24]</sup>、日本等国也开展了相应的研究工作。为避免对环境的污染和对人员的辐射伤害,反应堆必须考虑对中子的屏蔽防护;为确保堆体的安全、提高能源的转换效率,冷却工质多采用导热性能好、热容大的液态金属,甚至

需要进行多级冷却。这些必要的设计导致电源系统有较大的重量,如美国为火星基地研制的“HOMER”(Heatpipe-Operated Mars Explortion Reactor)系统,其输出电功率为3 kW、总质量达2.13 t<sup>[23]</sup>;而“AFSPS”(Aflordable Fission Surface Power System)系统,输出电功率40 kW、全集成方案的总质量为8.8 t<sup>[21]</sup>。降低系统重量、提高质量比功率仍是后续研制的重点,此外提高系统自主运行管理能力、降低事故发生后的影响程度都是促进核能系统应用于月球基地的研究内容。

### 5) 燃料电池系统

燃料电池是一种能直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能转化为电能的发电装置,具有能量转换效率高、无污染、比功率高的特点<sup>[25]</sup>。随着人类面临越来越严重的能源短缺和环境污染问题,燃料电池的优点越发突显,在世界范围内引发了广泛的研究热潮并取得了实际应用。特别在空间应用领域,近年来各类新型航天器的研制为燃料电池提供了广泛的应用背景<sup>[26]</sup>。目前空间领域的应用以氢氧燃料电池为主,其中质子交换膜燃料电池是后续发展和应用的主流<sup>[27]</sup>。为解决燃料电池工作时间受限于携带燃料的缺点,近年来人们又以氢氧燃料电池为基础、结合水电解技术和光伏发电技术开发出一种可再生的燃料电池系统,其比能量高达400~1 000 Wh/kg,较传统的蓄电池有明显优势<sup>[28]</sup>。再生燃料电池能够实现物质和能量的循环利用、可同时输出电能和热能、多余的水可提供航天员饮用,尤其适用于月球基地<sup>[29]</sup>。但该系统采用电解水的方式实现燃料气体的再生,过程中需要消耗大量的电能,导致系统的电效率(电-气体-电)较低,研究高效的电解催化技术或寻找更经济的水解方法是促进其具体应用的一项重要工作。

### 6) 其他能源系统

月球特殊的运转特征使其表面的太阳辐射热流有相对固定的变化规律,月面任意位置在每个昼夜交替期间的温度变化几乎相同<sup>[6]</sup>。由于月壤的导热系数很小,一定深度处月壤的温度已近似不变<sup>[30]</sup>,无论是月昼还是月夜,月壤中都存在最大可达100℃的温差。围绕利用月面自然温度环境,人们提出了多种能源利用的方案,如采用温差发电器利用月壤内部的温差实现发电、采用低温工质热机利用月壤储能进行能量转换等。这些能源系统的具体设计尚不完善,且需要对月壤进行人工改造,工程实施有很大的难度,不适合应用于初级阶段的月球基地。

通过上述分析,可以得到以下认识:①月球基地能源系统有多方面的要求,单一类型的能源系统同时



具有明显的优缺点,月球基地需要考虑多种能源类型的结合,集成各系统的优点、弥补各自的缺陷;②月球基地能源系统将沿着太阳能-核裂变能源-核聚变能源的技术路线发展。月面拥有丰富的太阳能,实现太阳能的综合利用是各阶段月球基地共同的目标;月壤中含有丰富的氦-3资源,是核聚变反应清洁、高效、安全的原料,随着月球基地规模的不断扩大和核能技术的不断完善,其能源系统最终将发展至核聚变阶段,而核裂变系统为中间过渡类型;③初级阶段月球基地将以太阳能为主要能源,其能源系统应优选太阳能利用效率高的设计方案,光伏、光热及燃料电池发电系统面临的共性问题为解决太阳能的高效存储,这也是初级阶段月球基地能源系统设计的关键技术。

### 3 太阳能存储技术分析

太阳能的存储类型没有严格的定义,本文根据储能材料工作原理将月球基地太阳能的存储分为电存储、热存储和化学存储3类。

电存储采用储能装置将太阳能转换为电能进行存储,空间领域主要采用的储能设备为蓄电池。初级阶段的月球基地在月夜期间尚不具备满负荷工作的能力,但仍需保持基本的状态监测、数据管理和通信等功能,电功率至少为1.5 kW,即月夜期间月球基地的电量需求至少为500 kWh。当前空间应用的锂离子蓄电池比能量在150 Wh/kg左右,即使不考虑各种效率损失,存储500 kWh的电能需要蓄电池的重量接近3.4 t,对于初级阶段的月球基地而言,这是难以接受的重量资源。考虑当前电池技术的发展,短期内难以有快速的提升,因此电存储不是月球基地太阳能存储的经济方案。

热存储采用储热材料将太阳辐射以热能的形式进行存储,高热容、性能稳定的储热材料是其应用的关键。目前,热存储技术在地面已经获得了广泛的应用<sup>[31]</sup>,新型的储热材料也不断得以开发和应用<sup>[32-33]</sup>,但仍无法广泛应用于空间领域,最主要的原因是重量问题。最新研制的铝硅合金其储热密度可达500 kJ/kg<sup>[34]</sup>,不考虑热电转换效率,仅存储月球基地月夜期间电量需求相当的热量,至少需要3.6 t储热材料。尽管不少学者也提出利用月壤储热的设想,但需要对月壤进行改造,通过添加材料增加其导热系数或增大其热容,以当前的科技水平不可能在月面开展。可见,热存储方式也无法解决月球基地的太阳能高效存储问题。

化学存储可以将太阳能直接转化为储能物质的分子化学能,通过化学键的断裂与重组实现能量的存储和释放。化学存储因具有储能密度高、能量损失小、

应用灵活的特点,被视为最具有发展前景的太阳能存储方式<sup>[35]</sup>。能够实现化学存储的反应式有多种<sup>[36-39]</sup>,其中氢的氧化还原反应具备较多优点:①氢气与氧气可以通过燃料电池直接将化学能转化为电能;②氢的能量密度高达143.3 MJ/kg,理论上共需要113 kg的氢气和氧气完全反应就能够提供500 kWh的能量;③氧气及反应过程生成的水可作为航天员的应急生存保障。

氢氧循环反应的关键在于高效的水解技术,使用水作为唯一的原料能够同时生产氢气和氧气,保证物质的循环利用。从原理及实现途径上分析,有望被月球基地采用的是电解法和热化学法。1 mol水分解为氢气和氧气需要消耗237 kJ的能量,采用电解水的方式会大幅增加月球基地的电能需求;相比而言,热化学法仅依靠热能即可实现水的分解,采用该技术可提高月球基地的能源利用率、使不同类型的能源分配更优化。热化学水解法由美国学者Funk等<sup>[40]</sup>于1960年首次提出,其原理是将水解分成一个或几个单独吸热和放热的热化学反应,分步骤分别制造氢气和氧气。过去几十年间,研究学者已经提出了300多个循环反应式<sup>[41]</sup>,美国能源部曾对多种反应式进行过综合评测,筛选出9个反应体系进行推荐<sup>[41]</sup>,其中氧化锌循环的制氢效率可达45%,是当前的研究热点<sup>[42-43]</sup>。该循环中金属锌在250℃左右环境中与水反应,生成氧化锌并产生氢气,过程中释放热量;第二步是个吸热反应,需要1 500℃以上的高温环境,氧化锌分解生成金属锌和氧气。由于两步反应的温度环境不同,使用同一个反应器可以避免反应物的转移、降低系统质量,但要求反应器具备不同温度的调控能力;为提高水解效率,反应物需保持粉末状态,精准控制温度和反应时间才能防止其出现熔融;此外,为避免逆反应的发生,反应器需填充惰性气体保护。这些都是氧化锌水解循环反应需要解决的问题,除理论研究外,国内外学者在2000年前后开始了相应的实验研究<sup>[44]</sup>,已经在实验室实现了水解循环,为后续实际应用奠定了技术基础。

可见采用热化学法实现水的分解、利用氢氧化学反应解决太阳能的存储和利用是初级阶段月球基地能源系统最佳技术选择。

## 4 能源系统初步方案

### 4.1 方案概述

针对初级阶段月球基地提出了一种以太阳能为主能源的能源系统方案,该系统由光伏发电设备、燃料电池设备、水解制氢设备及能源综合管理设备等4大部分组成,其系统运行原理如图1所示。

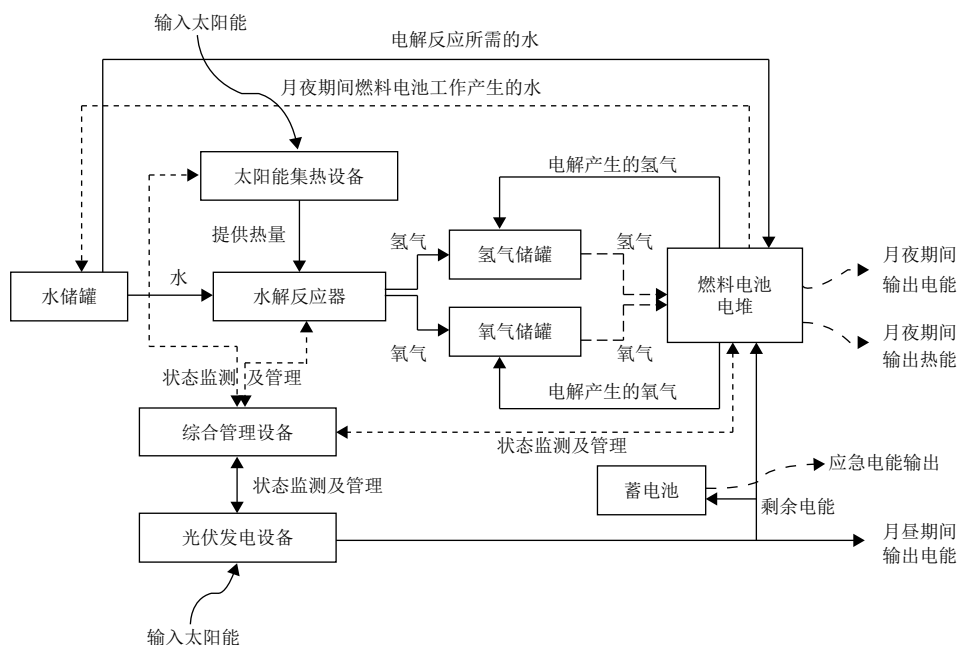


图1 能源系统工作原理示意图

Fig. 1 Illustration for operating principle of the energy system

光伏发电设备在月昼期间工作，直接为月球基地提供电能，剩余的电能可存储在蓄电池中或用于水的电解；燃料电池设备由电池堆芯、氢氧储罐、水储罐及管路组成，该设备在月夜期间工作，为基地提供电能和热能，其中燃料电池选用质子交换膜电池，堆芯具备逆反应电解水的能力；水解制氢设备由太阳能集热设备和水解反应器组成，集热设备月昼期间收集太阳能并制造水解反应所需的高温环境，水解反应器将水分解为氢气和氧气；能源综合管理设备对月球基地能源系统的工作状态进行监测、管理和调度。

光伏发电设备和燃料电池存在备份接口，月昼期间光伏设备剩余的电能提供给燃料电池堆芯，通过逆反应可电解部分水，辅助制造氢气和氧气；水解制氢设备与燃料电池存在循环接口，燃料电池将氢氧反应生成的水提供给水解设备，后者再将水解产生的氢气和氧气反供前者。

## 4.2 关键技术分析

月球基地能源系统是多专业、多学科的集成，其中制氢和燃料电池工作过程是实现水的循环利用及能源连续输出的关键，能源系统涉及的主要关键技术包括以下几个方面。

### 1) 热化学制氢设计

虽然热化学制氢的原理简单，但满足高效、稳定、安全的水解化学反应式数量不多，确定相对成熟可靠的反应式是制氢设计的首要工作；热化学反应包含吸热和放热两个步骤，为控制反应的方向、提高制

氢效率，精确的温度控制是必要的保障条件，这需要完善的热设计技术；为提高化学反应的充分性，保证工作的连续性，需解决循环试剂的烧结问题，制氢设备需保证试剂的循环反应能力，设备的研制和优化也是项重要的研制工作。

### 2) 燃料电池设计

当前燃料电池在我国空间领域尚没有应用先例，月球基地燃料电池的设计需解决多项技术瓶颈，提高系统的可靠性、完善系统冗余设计并开展地面可靠性验证试验是后续实际应用过程中的首要工作；燃料电池的电堆正向运行能够将氢氧反应的化学能转换为电能，逆向运行能够电解水生产氢气和氧气，多功能、轻小型电堆的研制是燃料电池的设计核心；开展高效的储气技术研究，降低氢氧存储设备的重量是燃料电池应用研究的重要内容。

### 3) 系统总体设计

根据月球基地任务分析，确定能源系统中不同类型能量的分配、实现内部指标和资源的合理匹配是能源系统总体设计的主要内容；开展系统优化设计，降低能源系统重量、实现功能备份、提高系统可靠性是总体设计的另一项重要内容。

### 4) 系统接口设计

能源系统输出的电能直接满足月球基地设备工作的需求，其输出的热能主要提供人员和设备的温度保障，能源系统与热控系统存在能量接口必须进行一体化论证和设计，完善系统接口设计、实现能源系统与

热控系统间能量的合理利用;此外,应急模式下能源系统可提供航天员生存所需的水和氧气,能源系统需设计与之相关的接口、并满足该模式下的任务需求。

## 5 结束语

建设月球基地是人类探索太空、拓展生存空间的必要环节,对整个人类社会有深远的意义。能源系统是月球基地功能实现的基础,在初级阶段月球基地以太阳能作为主能源是较优的技术选项,而其中的关键是解决太阳能的高效存储问题。

本文提出了一种可实现太阳能综合利用的能源系统设计思路,适用于初级及中级阶段月球基地。通过对关键技术分析及研究,旨在完善我国月球基地能源系统的设计,逐步扩宽研究内容及深度,最终全面掌握核心设计技术,可为未来月球基地的设计和建设奠定技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等.月球某些资源的开发利用前景[J].地球科学-中国地质大学学报,2002,27(5):498-503.  
OUYANG Z Y, ZOU Y L, LI C L, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 498-503.
- [2] 果琳丽,李志杰,齐盼,等.一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J].航天返回与遥感,2014,35(6):1-10.  
GUO L L, LI Z J, QI B, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(6): 1-10.
- [3] 张熹,胡智新.无人月球基地总体初步设想[J].航天器工程,2010,19(5):95-98.  
ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 95-98.
- [4] 果琳丽,王平,朱恩涌,等.载人月球基地工程[M].北京:中国宇航出版社,2013.  
GUO L L, WANG P, ZHU E Y, et al. Manned lunar base engineering[M]. Beijing: China Astronautics Press, 2013.
- [5] 侯建文,赵晨,常立平,等.未来月球探测总体构想[J].载人航天,2015,21(5):425-434.  
HOU J W, ZHAO C, CHANG L P, et al. General conception of future lunar exploration[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 425-434.
- [6] 徐向华,梁新刚,任建勋.月球表面热环境数值分析[J].宇航学报,2006,27(2):153-156.  
XU X H, LIANG X G, REN J X. Numerical analysis of thermal environment of lunar surface[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(2): 153-156.
- [7] 陈磊,李飞,任德鹏,等.月面和近月空间环境及其影响[J].航天器工程,2010,19(5):76-81.  
CHEN L, LI F, REN D P, et al. Lunar surface and near lunar space environments and their effects[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 76-81.
- [8] 张忠卫,陆剑峰,池卫英,等.砷化镓太阳能电池技术的进展与前景[J].上海航天,2003,20(3):33-38.  
ZHANG Z W, LU J F, CHI W Y, et al. Technique development and prospects analysis of GaAs solar cell[J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(3): 33-38.
- [9] 任德鹏,夏新林,贾阳.月球坑的温度分布与瞬态热响应特性研究[J].宇航学报,2007,28(6):1553-1537.  
REN D P, XIA X L, JIA Y. Analysis on temperature distribution and transient thermal response of lunar concavity[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1553-1537.
- [10] 李成,杨秀,张美霞,等.基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J].电力系统自动化,2013,37(18):20-24.  
LI C, YANG X, ZHANG M X, et al. Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 20-24.
- [11] 安晓雨,谭玲生.空间飞行器用锂离子蓄电池储能电源的研究进展[J].电源技术,2006,30(1):70-73.  
AN X Y, TAN L S. Development of lithium-ion batteries as new power sources for space application[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(1): 70-73.
- [12] 刘自军,向艳超,斯东波,等.嫦娥三号探测器热控系统设计与验证[J].中国科学(技术科学),2014(44):353-360.  
LIU Z J, XIANG Y C, SI D B, et al. Design and verification of thermal control system for Chang'E-3 probe[J]. Sci. Sin. Tech., 2014(44): 353-360.
- [13] 姚睿,吴克启.斯特林发动机在空间太阳能发电中的应用[J].太阳能学报,2001,22(1):111-114.  
YAO R, WU K Q. Application of free piston stirling engine in space solar power system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2001, 22(1): 111-114.
- [14] 赵建云,朱冬升,周泽广,等.温差发电技术的研究进展及现状[J].电源技术,2010,34(3):310-313.  
ZHAO J Y, ZHU D S, ZHOU Z G, et al. Research progress of thermoelectric power generation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(3): 310-313.
- [15] 晏维,邱国跃,袁旭峰.半导体温差发电技术应用及研究综述[J].电源技术,2016,40(8):1737-1740.  
YAN W, QIU G Y, YUAN X F. Application and research of semiconductor thermoelectric power generation technology[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(8): 1737-1740.
- [16] GEORGE R. Enabling exploration with small radioisotope power systems[R]. USA: NASA Office of Space Science, 2004.
- [17] 崔萍,李歆,张楠,等.前苏联和俄罗斯同位素温差发电器发展状况[J].电源技术,2004,28(12):803-806.  
CUI P, LI X, ZHANG N, et al. The development of radioisotope thermoelectric generator in USSR & Russia[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28(12): 803-806.
- [18] 冉旭,单建强,朱继洲.空间核反应堆概述[J].国外核动力,2004,25(5):1-5.  
RAN X, SHAN J Q, ZHU J Z. Summary of space nuclear reactor power[J]. Foreign Nuclear Power, 2004, 25(5): 1-5.
- [19] 姚成志,胡古,解家春,等.月球基地核电源系统方案研究[J].原子能科学技术,2016,50(3):464-470.  
YAO C Z, HU G, XIE J C, et al. Scheme research of nuclear reactor power system for lunar base[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(3): 464-470.
- [20] UPTON H, PROTSIK A, GAMBLE R, et al. The application of SP-100

- technology in a lunar surface power system[C]//Proceedings of the Conference on Advanced SEI Technologies. Washington D.C.: AIAA, 1991.
- [21] LEE M, DAVID P, LOUIS Q. System concepts for affordable fission surface power[R]. USA: NASA, 2008.
- [22] KING J C, EL-GENK M S. Submersion-subcritical safe space(S4) reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(17): 1759-1777.
- [23] POSTON D I. The heatpipe-operated Mars exploration reactor(HOMER)[C]//Space Technology and Applications International Forum-2001. [S.l.]: AIP Publishing, 2001, 552(1): 797-804.
- [24] 张明, 蔡晓东, 杜青, 等. 核反应堆空间应用研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 119-126.  
ZHANG M, CAI X D, DU Q, et al. Research on nuclear reactor in space application[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(6): 119-126.
- [25] 张亚媛, 张沛龙, 葛静, 等. 燃料电池应用现状及发展前景[J]. 新材料产业, 2014(6): 65-68.  
ZHANG Y Y, ZHANG P L, GE J, et al. Current situation and prospect of fuel cell application[J]. Advanced Materials Industry, 2014(6): 65-68.
- [26] 杨紫光, 叶芳, 郭航, 等. 航天电源技术研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(6): 1231-1237.  
YANG Z G, YE F, GUO H, et al. Progress of space power technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(6): 1231-1237.
- [27] 吴峰, 叶芳, 郭航, 等. 燃料电池在航天中的应用[J]. 电池, 2007, 37(3): 237-240.  
WU F, YE F, GUO H, et al. The application of fuel cells in aerospace[J]. Battery Bimonthly, 2007, 37(3): 237-240.
- [28] 宋世栋, 张华民, 马霄平, 等. 可再生燃料电池的研究进展[J]. 电源技术, 2006, 30(3): 175-178.  
SONG S D, ZHANG H M, MA X P, et al. Progress in research on renewable fuel cells[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(3): 175-178.
- [29] JAN D L, ROHATGI N, VOECKS G, et al. Thermal, mass and dower interactions for lunar base life support and power systems[C]//International Conference on Environmental Systems. Colorado: Jet Propulsion Laboratory of the California Institute of Technology, 1993.
- [30] 罗祖分, 宋保银, 曹西. 考虑热物性变化的月壤温度数值模拟[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(3): 70-76.  
LUO Z F, SONG B Y, CAO X. Numerical simulation of lunar soil temperature considering its variable thermal properties[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(3): 70-76.
- [31] BELEN Z, JOSE M M, LUISA F C, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23): 251-283.
- [32] 赵建国, 郭全贵, 高晓晴, 等. 石蜡/膨胀石墨相变储能复合材料的研制[J]. 新型炭材料, 2009, 24(2): 114-118.  
ZHAO J G, GUO Q G, GAO X Q, et al. Preparation of paraffin/expanded graphite phase change composites for thermal storage[J]. New Carbon Materials, 2009, 24(2): 114-118.
- [33] 顾晓滨, 秦善, 牛菁菁. 相变储能矿物材料研究现状及展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 932-940.
- GU X B, QIN S, NIU J J. Research status and prospect on phase change mineral materials[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(6): 932-940.
- [34] 许骏, 于思荣. 铝合金相变储热材料的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2013, 27(10): 93-97.  
XU J, YU S R. Research and application progress of Al-based alloy phase change materials using for thermal storage[J]. Materials Review, 2013, 27(10): 93-97.
- [35] 孙峰, 彭浩, 凌祥. 中高温热化学反应储能研究进展[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(6): 577-584.  
SUN F, PENG H, LING X. Progress in medium to high temperature thermochemical energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(6): 577-584.
- [36] SCHMIDT M, SZCZUKOWSKI C, ROBKOPF C, et al. Experimental results of a 10 kW high temperature thermochemical storage reactor based on calcium hydroxide[J]. Appl. Therm. Eng., 2014, 62(2): 553-559.
- [37] KATO Y, YAMADA M, KANIE T, et al. Calcium oxide/carbon dioxide reactivity in a packed bed reactor of a chemical heat pump for high-temperature gas reactors[J]. Nucl. Eng. Des., 2001, 210(1-3): 1-8.
- [38] KODAMA T, OHTAKE H, MATSUMOTO S, et al. Thermochemical methane reforming using a reactive WO<sub>3</sub>/W redox system[J]. Energy, 2000(25): 411-425.
- [39] BLOCK T, KNOBLAUCH N, SCHMÜCKER M. The cobalt-oxide/iron-oxide binary system for use as high temperature thermochemical energy storage material[J]. Thermochim. Acta, 2014(577): 25-32.
- [40] FUNK J E, REINSTROM R M. Final report energy depot electrolysis systems study, TID-20441[R]. USA: [s.n.], 1964.
- [41] 陈宏善, 魏花花. 利用太阳能制氢的方法及发展现状[J]. 材料导报, 2015, 29(6): 36-40.  
CHEN H S, WEI H H. The methods and development status for hydrogen production from water-splitting using solar energy[J]. Materials Review, 2015, 29(6): 36-40.
- [42] 王宝辉, 吴红军, 刘淑芝, 等. 太阳能分解水制氢技术研究进展[J]. 化工进展, 2006, 25(7): 733-738.  
WANG B H, WU H J, LIU S Z, et al. Advance on research of hydrogen production by solar water splitting[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(7): 733-738.
- [43] STEINFELD A. Solar hydrogen production via a two-step-water splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27(6): 611-619.
- [44] 徐波, 王树林, 李生娟, 等. 纳米锌水解制氢实验[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1275-1280.  
XU B, WANG S L, LI S J, et al. Experiment for hydrogen making by hydrolyzing Zn nanoparticles[J]. CIESC Journal, 2009, 60(5): 1275-1280.

作者简介:

**任德鹏**(1976—), 男, 博士后, 主要研究方向: 月球探测器的总体设计与试验技术。

通信地址: 北京5142信箱373分箱(100094)

电话: (010)68117764

E-mail: rdpsd@163.com

## Preliminary Research on the Lunar Base Energy System

REN Depeng, LI Qing, XU Yingqiao

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The establishment of lunar bases is an inevitable trend in the following deep space exploration. Meanwhile, the energy system is a basic condition for keeping a lunar base working well. In this paper, basic requirements of the energy system are determined by combining lunar base energy requirements and lunar environment features. A variety of energy resources are analyzed comparatively, indicating that utilizing solar energy is the main method in the primary stage of the lunar base energy system. The core technology of utilizing solar energy is to store it with high efficiency. Based on the analysis of energy storage technologies, an energy system scheme using thermochemical hydrogen production combining hydrogen and oxygen fuel cells and photovoltaic power generation devices is proposed. The key technologies for the system design are analyzed, which can be referred in the detailed design of the lunar base energy system.

**Key words:** lunar base; energy system; scheme overview

### High lights:

- Basic requirements of the energy system are determined by combining lunar base energy requirements and lunar environment features.
- The utilization of Solar energy is the main method in the primary stage of the lunar base energy system, and the core technology is to store the energy with high efficiency.
- An energy system scheme using thermochemical hydrogen production combining hydrogen and oxygen fuel cells and photovoltaic power generation devices is proposed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]

(上接第505页)

## The Development Overview and Prospect of Lunar Relay Communication Satellite System

ZHANG Lihua<sup>1</sup>, WU Weiren<sup>2</sup>

(1. DFH Satellite Co., LTD., Beijing 100094, China; 2. Lunar Exploration and Space Program Center, Beijing 100086, China)

**Abstract:** The relay communication is a key problem for lunar exploration missions, especially the landing and cruising on the lunar farside and polar areas, as well as the manned lunar exploration missions. The research and development status are analyzed about lunar relay communication satellite system throughout the world. Based on the analysis on the requirements for lunar relay communication missions, the implementation approach are analyzed for relay communication system scheme, orbit selections, etc. The technical development trends for future lunar relay communication satellite system are also given in this paper.

**Key words:** lunar exploration mission; relay communication satellite; development overview; development prospect

### High lights:

- The research and development status of lunar relay communication satellite system are summarized and analyzed.
- Implementation approaches for the critical issue of lunar relay communication missions are analyzed.
- The technical development trends for future lunar relay communication satellite system are given.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]