



月球科研站分布式能源系统方案设计

刘奕宏, 张明, 杨, 刘枝

Scheme Design and Key Technology Research of Distributed Energy System for Lunar Scientific Research Station

LIU Yihong, ZHANG Ming, YANG Yi, and LIU Zhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220073>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

月球基地能源系统初步研究

Preliminary Research on the Lunar Base Energy System

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(6): 561-568

分布式天线组阵优选设计

Optimal Design for Distributed Antenna Arraying System

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(2): 168-174

“长征五号”火箭助推器关键技术及方案设计

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle Booster

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(4): 362-371

无人月球科考站构建与运行关键技术初探

Preliminary Study on Key Technologies for Construction and Operation of Robotics Lunar Scientific Base

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 111-117

“嫦娥五号”任务总体方案权衡设计

Overall Scheme Trade-off Design of Chang'e-5 Mission

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 215-226

“长征五号”系列运载火箭总体方案与关键技术

General Scheme and Key Technology of Long March 5 Launch Vehicle

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(4): 335-343



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

月球科研站分布式能源系统方案设计

刘奕宏, 张明, 杨祎, 刘枝

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 针对月球极区低温、低光照的恶劣环境及月球科研站长期观测任务需求, 提出一套多类型分布式能源系统架构, 采用标准化、模块化、可扩展的设计思想, 构建了基于核反应堆和光伏发电的大型能源系统、基于同位素和光伏发电的中型能源系统和基于智能电池包的小型能源系统技术, 实现了长寿命、大功率、高可靠的持续稳定供电, 解决了功率等级跨度大、电源种类多的难题, 以满足月球科研站能源长期稳定供给需求; 采用有线并网供电和无线能量传输技术, 实现各类能源系统间的能源共享和功率扩展; 基于分层管理的多通道能源管理方法, 解决了能源自主健康管理所涉及顶层、中层、底层3个层次间的能量平衡问题, 增强了对月球科研站任务的支持能力。

关键词: 月球科研站; 分布式能源系统; 方案设计; 关键技术研究

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)06-0579-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220073

引用格式: 刘奕宏, 张明, 杨祎, 等. 月球科研站分布式能源系统方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 579-588.

Reference format: LIU Y H, ZHANG M, YANG Y, et al. Scheme design and key technology research of distributed energy system for lunar scientific research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 579-588.

引言

随着对空间探索的深入, 未来将从深化月球科学、提升月球探测能力和开展月球资源应用等方面实施全面的系统探测^[1]。中国拟在2030年前后建成月球科研站基本型, 形成人类长期开展科学探测和资源利用的月面设施^[1-2]。将采用3次工程任务+关键技术先期攻关的方式, 建成月球科研站的基本型^[2-6], 并对未来月球科研站扩展与应用展开相关的关键技术研究。

本文针对月球极区特征及月球科研站任务需求, 结合月球科研站的组成与建设目标, 提出一套多类型分布式能源系统构架技术, 实现能源系统的设计。

1 月球科研站任务

1.1 总体任务

月球科研站是一个系统性的工程任务, 需具备可维护、可扩展, 长期自主运行、短期有人参与的能力, 可持续开展月球科学研究、技术验证和资源开发利用。月球科研站分为地月运输、月面长期支持、月面运输与操作、月面科学、地面支持及应用等5大设施, 功能模块如图1所示。任务的主要目标: ①开展月球科学研究, 推动空间科学发展; ②开展月球资源的原位利用, 为太空资源利用奠定基础; ③为载人探月提供短期驻留环境和技术验证; ④构建国际合作、军

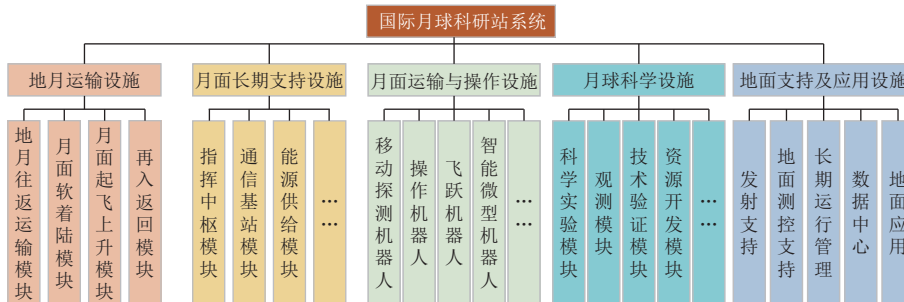


图1 月球科研站基本组成

Fig. 1 Basic composition of lunar scientific research station

民融合的基础平台; ⑤开展新技术验证, 支持更远的深空探测活动。建成后的科研站如图2所示。

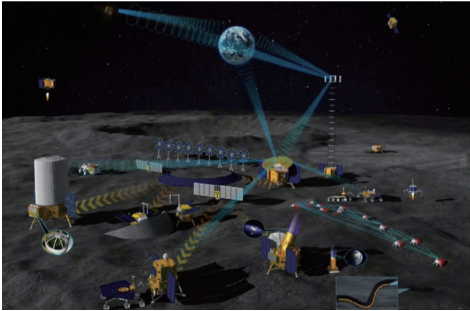


图2 建成后的国际月球科研站

Fig. 2 International lunar scientific research station completed

经过对月球不同区域的研究与分析, 建议月球科研站在月球南极选址^[5, 7], 其对能源系统约束条件主要有温度、光照、月尘3个方面。

1) 温度约束

月球南极地区月昼期间表面温度范围 $-170 \sim -110 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 月夜期间达到 $-230 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 极区环境温度较低, 月面生存条件差, 能源系统需具备低温适应和生存能力^[7]。

2) 光照约束

极区的复杂地形对太阳光照产生了十分显著的影响, 部分撞击坑底部存在永久阴影区, 而在海拔比较高的区域, 如撞击坑的坑缘、山顶、山脊等, 可获得长时间的连续光照, 南极特定区域光照时间年占比最大可达80%, 利于长期开展科学探测, 着陆区应选择连续光照时间长的位置。南极地区的光照具有太阳高度角低、受地形地貌影响大等特点, 月球赤道面与黄道面成 1.54° 的夹角, 在不考虑地形高程的前提下, 以1个恒星月为周期, 标准月球模型的南极点的太阳高度角在 $\pm 1.54^{\circ}$ 之间变化, 方位角在 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 变化, 受物理天平动对纬度所产生的影响(0.04°), 南纬 $88.4^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的区域内会出现周期约为半年的极昼极夜^[7]。上述约束条件都是能源系统设计需充分考虑的因素。

3) 月尘影响

因在月面长期工作, 月球科研站月尘的累积影响不可忽略, 能源系统需重点考虑月尘覆盖太阳能电池阵, 对太阳能电池发电效率造成的影响。

1.2 能源系统任务

月球南极地区的光照具有太阳高度角低、受地形和地貌影响大等特点。对于月球极区的永久阴影区(如撞击坑底部), 阳光永远无法照射, 其内温度极低, 表层和次表层温度常年维持在 40 K 左右; 而在海拔较高的区域, 如撞击坑坑缘、山顶、山脊等, 往往

能得到长时间的连续光照, 温度也相对较高。经过对2007年在月球两极获取的极区太阳辐照度强度计算分析, 南北极地区地表太阳辐照度在 $0 \sim 38 \text{ W/m}^2$, 月表温度约为 $100 \sim 160 \text{ K}$ 。另外, 月球南极还存在为期半年的极昼和极夜现象, 探测器需要度过极夜^[8-9]。

结合月球科研站的建设目标, 能源系统较为复杂, 既包括大功率或超大功率等级的主站能源系统, 中功率的月面巡视/飞跃/采样等多任务航天器电源系统, 又可能包括小功率的小型航天器电源系统, 存在功率等级跨度大, 电源类型众多的特点。

1) 功率等级

(1) 主站能源系统: 输出功率 $\geq 100 \text{ kW}$, 可由多个通用化能源模块组成;

(2) 多任务中型航天器电源系统: 输出功率 1 kW , 可支持多类型月面探测任务, 如巡视/飞跃/采样等;

(3) 小型航天器电源系统: 输出功率不超过 100 W , 可支持紧急通信、地形预先探测等短期任务, 如短期巡游/紧急通信等。

2) 能源系统特点

(1) 复杂的工作模式

主站、中型月面航天器、小型航天器任务差异较大, 其能源系统组成各不相同, 不同任务阶段能源系统处于不同的工作状态, 各阶段供电需求不同。

(2) 高标准要求的能源系统架构

月球科研站能源系统多种多样, 能源系统的管理架构需具备较强的可扩展性和通用性, 这对系统拓扑和控制策略提出了极高要求, 尤其是能源系统供电接口应具有较高的通用化和标准化。

(3) 严格约束的重量

受运载发射能力约束的限制, 能源系统重量要求极其严格。需开展高可靠、大功率质量比电源系统的研究, 考虑探测器能源系统之间的功能复用, 可通过器间系统优化实现减重目标。

(4) 迫切的能源自主管理需求

与常规探测器相比, 月球科研站能源系统功率规模、控制系统复杂度、能源类型等发生了较大的变化, 系统的鲁棒性要求极高, 各类型能源系统需要具备智能融合管理能力, 并为科研站的自主任务规划提供决策支持。

2 月球能源系统关键技术

2.1 核反应堆发电与防护技术

核反应堆发电不受外界环境变化的影响, 具有在月昼和月夜连续供电的能力, 尤其在大功率供电方面

具有突出的重量优势^[10-14]。对月球科研站核反应堆需求分析,完成月面核反应堆发电系统设计,主要包括反应堆设计、燃料元件设计与样件研制、高温热管组件设计与样件研制、热电转换器件设计与样件研制和关键部组件环境试验考核,对关键物理过程和性能参数的试验考核验证非常重要。在安全分析的基础上,开展月面核反应堆电源系统的集成与防护设计。

温差发电具有高可靠性、斯特林发电具有热电转换效率高的优势,是10 kWe核反应堆电源最具应用前景的两种热电转换技术路线^[12, 15]。温差发电拟采用的方钴矿(CoSb₃)热电器件,面临方钴矿温差发电机设计功率较低的问题,需开展方钴矿热电器件大批量生产性能优化和工艺稳定性研究。空间斯特林发电机在比功率及发电效率与应用等方面,中国还存在较大差距,需通过完善斯特林发电机多场系统仿真分析及优化设计模型,完成紧凑、高效的高性能斯特林电机设计。

2.2 高效轻质同位素发电技术

面对月球严酷的自然环境,同位素发电展示出很高的适应和生存能力,而且还具备重量轻、体积小、能经受强烈振动、寿命长等空间应用潜力。当前同位素存在电源效率低和寿命不满足使用要求的问题,需突破空间同位素发电系统设计、高效低衰减温差发电、长寿命高可靠斯特林发电和空间同位素电源安全技术,形成温差发电系统样机、斯特林发电系统样机和涉核安全标准规范,支持同位素电源在月球长期探测任务的应用^[16-17]。

2.3 远场无线能量传输技术

面向月球科研站月面能源供给重大需求,通过激光或微波传输,开展月面远距离无线能量传输技术研究,采用大功率微波能量高效产生与发射、收发天线一体化设计、高精度波束指向控制、微波能量高效接收整流;空间高光束质量大功率激光器、高精度捕获、瞄准和跟踪(Acquisition, Pointing Tracking, APT)控制、高效光电转换及散热等技术,确定远场无线能量传输实施方案,实现5 km距离下,400 W无线能量传输样机研制,满足极区坑底探测器、月面用电终端等要求。

2.4 近场无线能量传输技术

利用无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术代替有线连接,实现能量发射部分与负载设备之间的能量传输功能。构建一种可实现高可靠、高效率和高功率密度要求的WPT系统,提升月面任务的多样性和灵活性。

2.5 多通道高效电力变换和功率调节技术

面向月球科研站等超大功率复杂能源系统应用需求而提出多通道电力变换和功率调节技术,在满足基地主站中不同种类能源的超大功率调节及能量平衡时,还应兼顾主站之间的功率变换,完成能量的调配控制;完成主站对多任务探测器、多功能维护机器人等中型探测器,对有线或无线等多种形式完成能源的双向补给;多任务探测器等中功率子站的功率调节及能量平衡及子站之间的能量补给、以有线或无线等多种形式完成对紧急通讯、地形勘探、巡视器及其它用电设备的能源管理补给^[18]。

多通道电力变换和功率调节技术包括光伏发电、大功率核反应堆发电、储能双向、高效多模式温差发电变换和功率调节等相关电源管理控制等的研究,以解决极端环境下复杂能源生态系统用电要求。

2.6 高效低阻大功率传输与分配技术

开展大功率配电体制的设计、分析与验证,在传统低压固态功率控制器(Solid-State Power Controller, SSPC)基础上,研究基于新型高压功率器件的大功率配电架构、高压功率器件驱动、超导功率传输通路、高升压比DC/DC辅助电源等,制定高效低阻大功率传输及分配实施方案,设计新型配电平台,实现800 V高压,2 km配电传输,最终实现多路5 A配电控制,配电功率达到20 kW,提升月面任务的适配能力。

2.7 多通道能源管理技术

多源多通道能源综合管理与调度控制架构,对核反应堆电源、光伏电源、储能电源、同位素电源、并网供电模块、无线能量传输模块、功率调节与变换模块等多源多通道综合调度与统一管理控制。采用分布式多通道电源统一融合管理及调配策略,涉及能源系统体系架构、能量平衡计算方法、功耗传输效率、自主运行、故障识别与处理等关键问题。结合各阶段能源系统任务优先级,综合考虑系统规模、具体配置、系统可靠性与鲁棒性、能源系统物理约束等因素,分阶段分类研究确定能源管理策略。

2.8 分布式并网供电技术

月球科研站能源系统通过并网供电模块,大型与大型能源系统之间、大型与中型能源系统之间、中型与小型能源系统之间的功率并网与能源互通,实现多个系统之间的能量调度。两母线之间的能量传递通过具有大功率隔离功能的双向电源并网控制设备实现,研制并网控制器原理样机。

3 能源系统设计

3.1 能源系统

3.1.1 能源系统分类

月球科研站任务复杂、类型多样、特点各异,月球科研站能源系统设置为大型、中型和小型3类能源系统^[8, 10]。大型能源系统作为月球科研站能源供给的大后方,一般由多个基地主站能源系统并联组成,负责科研站在轨运行期间长期不间断的主体能源供给,输出功率一般在20 kW以上;中型能源系统用于执行科研站的常规任务,如巡视、飞跃、采样、行走等中型任务的能源供给,输出功率在百瓦到千瓦级;小型能源系统则用来完成各种衍生任务,如救援、信标、紧急通信、前期勘识等,输出功率一般在几瓦到几十瓦不等。大、中、小型的能源系统配置可以灵活支撑月球科研站各种类型任务的实施执行,适配度高。

1) 大型能源系统

大型能源系统负责月球科研站主能源供给,在轨运行期间提供不间断长期供电,由若干个基地主站能源系统并联组成^[6, 8, 10],系统组成如图3所示。主站能源系统由核反应堆发电模块、光伏发电模块、储能模块、多通道并网供电模块、配电管理模块和远场无线能量发射模块组成,单个基地主站输出功率 ≥ 20 kW,受限于反应堆本身及相关发电储能配电模块,大型能源系统寿命一般在15~20 a。

(2) 光伏发电模块,采用大型太阳电池阵为电力源,在月昼期间长期供电,为科研站建设初期提供长期供电,待核反应堆发电模块组装完毕正常工作后,为月昼期间附加供电^[11]。

(3) 储能模块,采用大容量智能电池包为电力源,为月夜期间供电和作为紧急能源,为月球科研站提供短期供电,以应对短期大负载工作需求,并作为紧急能源,以应对故障模式下的能源需求。一般采用加热带、导热硅脂、热控多层的方式实现电池包的控温。

(4) 多通道并网供电模块,提供多个主站能源系统之间的功率并网功能,主站与中型能源系统之间的功率并网功能,实现科研站能源扩展。

(5) 配电管理模块,向主站内用电负载提供功率变换与分配。

(6) 远场无线能量发射模块,完成由主站能源系统向中型能源系统的远场(1 km级)无线能量传输功能,向中型航天器提供远距离无线能源支持。

2) 中型能源系统

针对巡视/飞跃/采样等多任务航天器,设计采用中型能源系统,主要分为2种类型。

(1) 中型-A能源系统

适用于在光照区长期工作的月面探测器,以光伏发电为主,配置储能蓄电池作为辅助能源。同时配置无线传能模块,用于与大型能源系统实现远距离无线能量传输,与小型能源系统实现近距离无线能量传输,组成框图如图4所示。中型-A能源系统输出功率按照1 kW设计^[12-14],参照目前常规的中等航天器,在轨寿命一般配置为8 a。

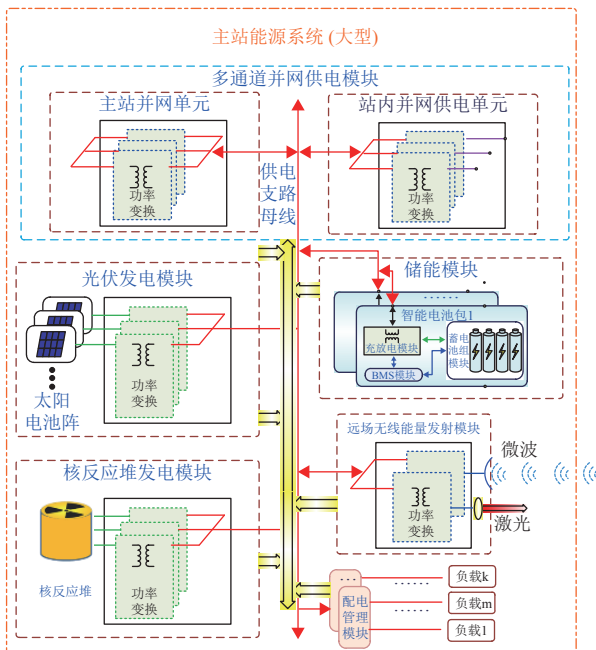


Fig. 3 Composition block diagram of Large energy system

(1) 核反应堆发电模块,采用核反应堆作为电力源,为长期供电主能源,并不间断供电。

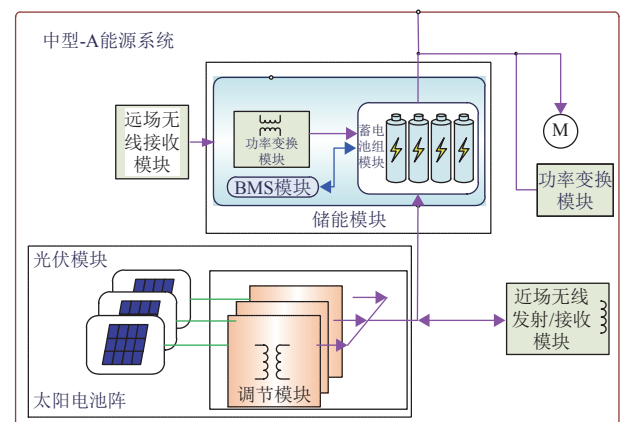


Fig. 4 Composition block diagram of Middle-A energy system

采用太阳电池阵为电力源,对功率进行调节,作为月昼期间长期供电能源;太阳电池阵配置功率需要

确保中型系统整个任务在光照区的供电功率, 以及蓄电池在阴影区放电后充电所需的功率, 即太阳电池负载端输出能量需要在一定裕度的前提下大于负载需求能量, 即

$$Q_{\text{太阳电池}} \geq Q_{\text{负载需求}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{太阳电池}} = P_{\text{太阳电池}} \times \cos\theta \times t_{\text{光照}} \times \zeta_{\text{SR}} \quad (2)$$

其中: $P_{\text{太阳电池}}$ 为太阳电池的输出功率; θ 为太阳入射角; $t_{\text{光照}}$ 为光照时间; ζ_{SR} 为太阳电池功率控制效率。

智能电池包为电力源, 作为阴影期供电能源和紧急能源, 负责短期供电, 以应对短期大负载工作需求; 远场无线能量接收模块, 负责接收主站能源系统发射至中型能源系统的远场 (1 km 级) 无线能量传输。当中型航天器在永久阴影区开展工作时, 用于提供能源支持; 近场无线能量发射/接收主要负责接收其他中型能源系统无线能量传输, 向小型能源系统提供无线能量传输, 为小型能源系统提供支持; 功率变换向小型能源系统提供有线能量传输 (蓄电池充电等), 为小型能源系统提供支持。

(2) 中型-B能源系统

适用于全地形月面探测器, 以同位素发电为主能源, 其不受光照区限制, 配置储能蓄电池作为辅助能源; 无线传能模块, 用于与大型能源系统实现远距离无线能量传输, 与小型能源系统实现近距离无线能量传输, 组成框图如图5所示。中型-B能源系统输出功率按照400 W设计, 在轨寿命通常设计为8 a。

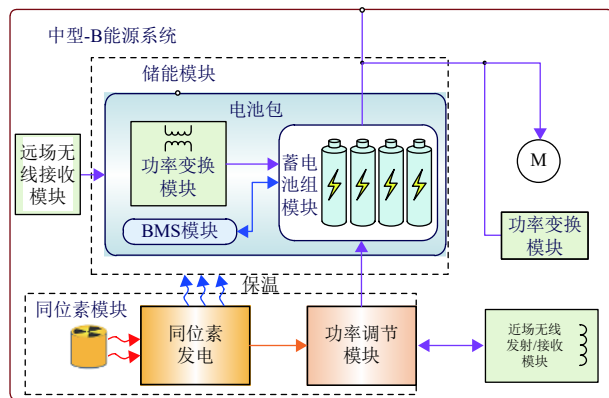


图 5 中型-B能源系统组成框图

Fig. 5 Composition block diagram of Middle-B energy system

采用同位素核源作为热源, 进行热电转换, 并调节功率, 提供长期供电; 采用智能电池包电力源, 作为短期能源负责短期供电, 提高动态特性, 以应对短期大负载工作需求; 远场无线能量接收模块, 负责接收主站能源系统发射至中型能源系统的远场 (1 km 级) 无线能量传输。当中型航天器在永久阴影区开展

工作时, 提供能源支持; 近场无线能量发射/接收模块, 负责接收其它中型能源系统无线能量传输, 向小型能源系统提供无线能量传输, 为小型能源系统提供支持; 功率调节与变换模块, 负责向小型能源系统提供有线能量传输 (蓄电池充电等), 为小型能源系统提供支持^[7]。

3) 小型能源系统

地形感知、紧急通信等小型多任务航天器, 作为中型航天器 (巡视/飞跃/采样等多任务) 的子系统, 搭载在中型航天器上, 小型航天器随身携带特定载荷, 执行地形预先感知、紧急通信等短期特定任务。针对该类任务, 采用小型电源系统, 与中型航天器 (巡视/飞跃/采样等多任务) 搭配的设计, 配置储能蓄电池作为主能源, 配置无线传能模块, 用于与中型能源系统实现近距离无线能量传输, 组成框图如图6所示。小型能源系统输出功率按照10~100 W设计, 受限于储能系统的使用周期, 设计寿命一般 < 1 a。

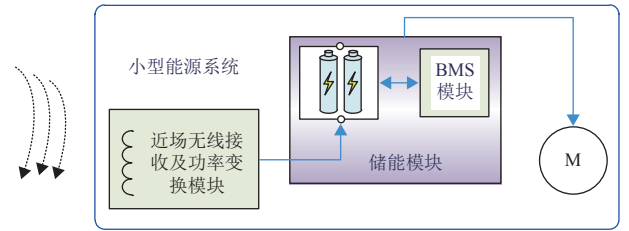


图 6 小型能源系统组成框图

Fig. 6 Composition block diagram of Small energy system

采用智能电池包作为电力源, 作为工作期间供电能源, 智能电池包能量配置为

$$Q_{\text{蓄电池}} = P_{\text{地影}} \times \xi_{\text{Wh}} \times t_{\text{阴影}} \quad (3)$$

其中: $P_{\text{地影}}$ 为长时功率; ξ_{Wh} 为蓄电池的放电效率。

近场无线能量负责接收中型能源系统无线能量传输, 为小型能源系统提供支持; 功率调节与变换模块, 负责接收中型能源系统有线能量传输 (蓄电池充电等), 为小型能源系统提供支持。

4) 能源系统间功率互联

(1) 大型能源系统与大型能源系统间

多个大型能源系统之间采用高压大功率超导传输系统实现功率与信息的传输; 通过多通道并网供电模块实现多个大型能源系统的功率变换与并网; 利用多通道能源调度管理系统实现多个大型能源系统的统一调度与管理。

(2) 大型能源系统与中型能源系统间

大型与中型能源系统之间通过多通道并网供电模块实现有线方式的能量共享与功率并网, 作为主份控制方式; 通过远场无线 (1 km 级) 能量传发射与接收

模块, 实现无线能量共享与功率并网, 为中型航天器处于阴影期工作时提供能源支持, 以提升中型航天器阴影期生存与工作能力。

(3) 中型能源系统与小型能源系统间

中型能源系统与小型能源系统之间通过功率变换

模块实现有线方式的蓄电池充电功能, 作为主份控制方式; 利用近场无线能量发射与接收模块, 实现无线蓄电池充电功能, 为小型航天器完成一个工作周期后进行能量续航, 以提升小型航天器生存与工作能力。月球科研站能源系统组成如图7所示。

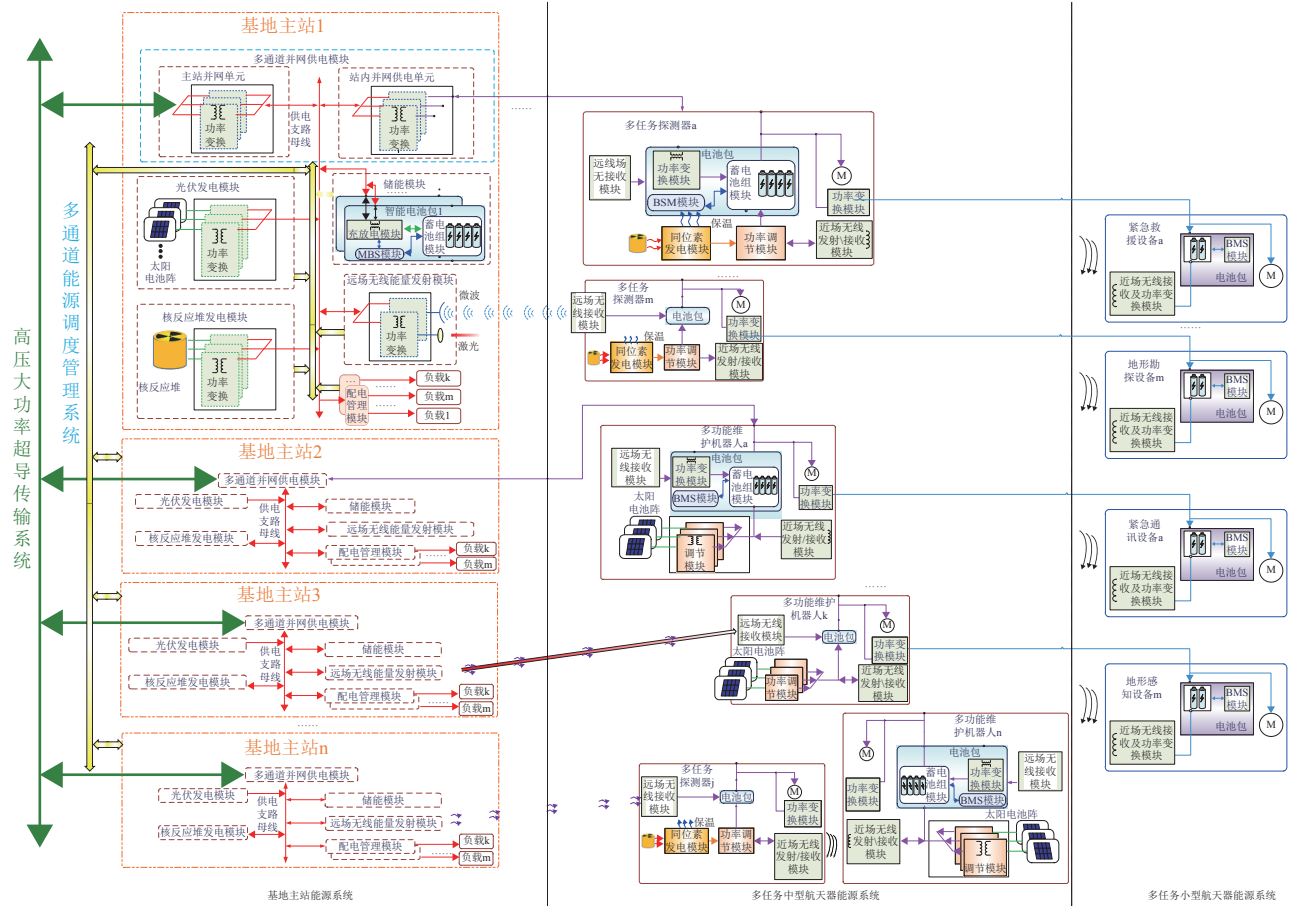


图 7 月球科研站能源系统组成
Fig. 7 Assumption of energy system composition for lunar scientific research station

3.1.2 能源系统模块

月球科研站能源系统分别由核反应堆发电、光伏发电、储能、多通道并网供电、配电管理、远场无线能量传输、近场无线能量传输、功率调节与变换、同位素发电、高压大功率超导传输和多通道能源调度管理系统组成, 各组成模块如表1所示。

月球科研站能源系统需要采用全新的系统拓扑架构与功率控制技术来实现, 结合任务需求, 拟采用分布式电源系统架构, 按照模块化、可重构、可扩展的思路, 根据需要进行多种组合排列。月球科研站能源系统拓扑架构具有如下特点。

(1) 月球科研站能源系统可满足长期不间断工作、长短期交替工作及短期工作等多种应用场景能源

需求, 系统组成规模大、控制复杂、难度大。

(2) 结合任务特点, 能源系统采取“分类分级、互联互通”的设计原则, 分类设计大型、中型和小型共3类4型能源系统, 采用远场/近场无线传能、大功率超导传输、并网供电等技术, 实现不同能源系统之间的能源互联与功率互通。

(3) 同类基础功能模块, 如光伏、储能、配电、并网模块、无线传能、功率调节与变换等, 可根据应用场景分级设计, 同一模块应具有一定的通用性和可替换性, 当出现在轨故障时, 可将故障模块从系统中切除和更换, 避免因故障蔓延。

(4) 能源系统功率扩展性好, 可通过增加基础模块(储能、光伏、并网供电、配电等)的数量, 实现

表 1 月球科研站能源系统各组成模块

Table 1 Energy system composition module of lunar scientific research station

序号	模块名称	组成	技术指标	说明	配置	
大型能源系统 (20 kW)						
1)	光伏发电模块	太阳能电池阵	输出电压	≥100 V	基础配置 1个	选配
2)			输出功率	≥10 kW		
3)		功率调节器	输入电压	≥100 V		
4)			输出电压	≥400 V		
5)			输出功率	≥10 kW		
6)	核反应堆发电模块	核反应堆	输出电压	40 ~ 70 V	基础配置 1个	必配
7)			输出功率	≥10 kW		
8)		热电转换效率	≥6%			
9)		功率调节器	输出电压	≥400 V		
10)			输出功率	≥10 kW		
11)	储能模块	蓄电池组	输出电压	≥70 V	默认1个模块, 可并联扩容,	必配
12)			额定容量	≥300 Ah		
13)		充放电调节器	功能	蓄电池组充电、蓄电池组放电		
14)		蓄电池管理系统	功能	温控管理、均衡管理、健康管理等		
15)		多通道并网供电模块	主站间并网单元	输入电压		
16)	输出电压			≥400 V		
17)	并网功率			≥5 kW		
18)	站内并网单元		输入电压	≥400 V		
19)			输出电压	≥28 V		
20)	并网功率	≥2 kW				
21)	配电管理模块	高压配电模块	配电路数	多路	默认1个模块, 可并联扩容	必配
22)			配电电压	高电压		
23)		常压配电模块	配电路数	多路		
24)			配电电压	常用电压		
25)	远场无线能量传输模块	发射模块	功率	≥400 W	默认1个模块, 可并联扩容	选配
26)			效率	≥30%		
中型能源系统 (1 000 W/400 W)						
27)	光伏发电模块	太阳能电池阵	输出电压	≥28 V	基础配置 1个	A型 必配
28)			输出功率	≥1 kW		
29)		功率调节器	输入电压	≥28 V		
30)			输出电压	≥28 V		
31)			输出功率	≥1 kW		
32)	同位素发电模块	同位素电源	输出电压	≥15 V	基础配置 1个	B型 必配
33)			输出功率	≥400 W		
34)		热电转换效率	≥8%			
35)		功率调节器	输出电压	≥28 V		
36)	输出功率		≥400 W			

续表 1

序号	模块名称	组成	技术指标	说明	配置	
37)	38)	蓄电池组	输出电压	≥23 V		
			额定容量	≥50 Ah		
39)	储能模块	充放电调节器	功能	蓄电池组充电、蓄电池组放电	基础配置 1个	必配
40)			蓄电池管理系统	功能		
41)	远场无线能量传输模块	接收模块		功率	≥400 W	基础配置 1个
42)			效率	≥30%		
43)	近场无线能量传输模块	发射模块	功率	≥30 W	基础配置 1个	选配
44)			效率	≥90%		
45)	接收模块	接收模块	功率	≥100 W		
46)			效率	≥90%		
47)	功率调节与变换模块	功率调节器	功能	蓄电池组充放电	基础配置 1个	必配
48)			功率变换与分配	配电路数		
49)				配电电压	常用电压	
小型能源系统 (10 W~100 W)						
50)	51)	蓄电池组	功能	主能源	基础配置 1个	必配
			放电调节器	功能		
52)	储能模块	蓄电池管理系统	功能	温控管理、均衡管理、健康管理等	基础配置 1个	必配
53)			近场无线能量传输模块	接收模块		
54)	效率	≥99%				
55)	功率调节与变换模块	功率调节器	功能	接收有线蓄电池组充电	基础配置 1个	必配
56)			功率变换与分配	配电路数		
57)				配电电压	常用电压	

系统规模扩容, 大幅度提升系统输出功率, 极大缓解了母线电压持续提升的迫切程度。

(5) 能源系统采用的多种新型空间能源技术, 包括核反应堆发电、同位素发电、无线能量传输、超导大功率传输等, 将显著带动与牵引与之相关的技术及基础产业的发展。

(6) 多通道能源调度管理系统负责能源系统的整体调度与日常管理, 要求具有长期无人运行自主管理、故障识别与处理等功能, 智能化程度比较高。

(7) 月面活动过程中, 由于羽流、冲击、漂浮等各种因素会导致太阳能电池片表面月尘堆积, 对覆盖不同重量不同物质月尘的叠层太阳能电池模拟测试, 电性能衰减率一般在1% ~ 30%不等, 在光伏板设计过程中需充分考虑衰减效率, 通过系统冗余与备份等方式

增强能源的安全与可靠性。

3.2 能源系统总体设计方案

通过对月球科研站能源分析,根据标准化、模块化、可扩展化要求,确定月球科研站能源系统总体方案和拓扑架构;研究母线电压等级,对电能的生产、传输、调节控制、功率分配与智能管理的全环节评估、分析与优化。

1) 分类分级能源系统架构

月球科研站能源系统采用分布式系统架构,组成如图8所示。能源系统控制策略直接影响到系统的供电质量及可靠性,拟采用对等控制(设备级控制)+集中控制(系统级分层控制)的控制策略。

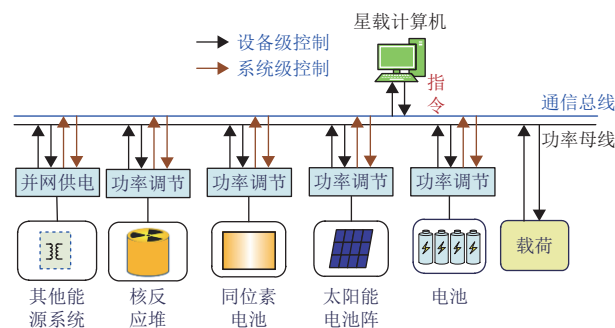


图8 系统控制架构

Fig. 8 System control architecture

2) 分布式能源系统多级控制

对等控制由各分控制器对各自出口端采样控制,实现物理设备级控制,主要是对电源系统物理层的功率设备调节,如双向DC-DC变换器、分布式的太阳功率调节器、蓄电池功率调节器、负载分配器等,基于本地信息完成自身的一些基本控制目标,如维持母线电压稳定、实现系统功率平衡、系统稳定运行等。控制内容包括母线电压、互联功率、负载电压、最大功率跟踪以及蓄电池组充放电控制等。

集中控制由系统管理计算机对运行参数采样、分析和计算,在对等控制的基础上二次精细调节。集中控制主要指对系统集中管理和能量优化,提升整体运行的效率和可靠性,实现最优。能量管理、各单元输出功率合理分配等最优运行目标是集中控制的基本功能,而功率/能量分配、直流母线电压二次调节及多运行模式切换等功能模块是实现系统级控制功能的重要组成部分。集中控制策略分别为上层、中层和底层,系统中各个分布式能源单元之间的协调以信息交互。

3) 分布式能源系统仿真分析与评估

月球科研站能源系统拟采用分布式多通道架构,系统组成和工作模式都较为复杂,系统运行的稳定性

要求极高,需要开展能源系统软件仿真建模,在此基础上开展仿真分析研究,对月球科研站能源系统稳定性进行理论研究与分析,提出分布式能源系统的稳定性评价体系,提升能源系统的长期稳定运行能力。

4) 分布式能源系统试验验证

搭建科研站能源系统控制、管理与配电地面演示验证系统,组织开展相关测试与试验,验证提出的400 V/100 kW级电源系统拓扑结构和总体方案的有效性;开展高压母线主动功率调节器、高压电源变换器等样机研制,掌握空间高压母线真空放电地面试验数据,继续完善并增强空间高压供配电系统设计手段,突破高压母线设计瓶颈,形成高压大功率电源系统设计、制造、试验、验证能力。

4 结论

本文结合月球科研站总体任务,对能源系统进行任务分析,提出了月球科研站能源系统组成,并对能源系统分类、组成、初步配置与系统特点进行了分析,提出互相支撑灵活配置的“基于核反应堆发电和光伏发电的20 kW级大型能源系统+基于同位素发电和光伏发电的百千瓦级中型能源系统+基于智能电池包的10 W级小型能源系统”的系统总体方案,以满足月球科研站能源长期稳定供给任务需求,为后续月球科研站能源系统设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 国际月球科研站合作伙伴指南. 国际太空[J]. 2021(8): 17-20.
- [2] 谢和平,李存宝,孙立成,等. 月球原位能源支撑技术探索构想[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 1-9.
XIE H P, LI C B, SUN L C, et al. Conceptualization of in-situ energy support technology on the Moon[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 1-9.
- [3] 于登云,吴学英,吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 307-314.
YU D Y, WU X Y, WU W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307-314.
- [4] 张焯,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.
- [5] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等. 嫦娥4号月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2017, 4(2): 111-117.
WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'E-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.
- [6] NASA. 2015 NASA 技术路线图-技术领域三: 空间电源与能源储存[M]. 中国国防科技信息中心,译. 北京: 国防工业出版社, 2015.

- [7] 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(中英文),2018,5(6):561-567.
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): 561-567.
- [8] 马季军,何小斌,乔卫新,等. 载人月球任务能源系统初探[J]. 载人航天,2019,25(2):143-150.
MA J J, HE X B, QIAO W X, et al. Research on energy system in manned lunar mission[J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(2): 143-150.
- [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 Astronautic, 2007, 28(6): 1553-1537.
- [10] 曹哲,张雪怡. 载人月面巡视器混合电源系统设计[J]. 载人航天,2019,25(1):42-49.
CAO Z, ZHANG X Y. Design of hybrid power system for manned lunar rover[J]. Manned Spaceflight, 2019, 25(1): 42-49.
- [11] 曲婧,宋清源. 太阳能电池驱动的月球车设计[J]. 产业与科技论坛,2017(4):93-95.
- [12] 任德鹏,李青,任保国. 月球基地温差电源的应用研究[J]. 电源技术,2019(5):845-848.
REN D P, LI Q, REN B G. Application research on thermoelectric generator for lunar bases[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019(5): 845-848.
- [13] 王颖,朱安文,刘飞标,等. 远深空探测任务的能源动力方案[J]. 深空探测学报(中英文),2020,7(2):213-220.
WANG Y, ZHU A W, LIU F B, et al. Ultra deep space exploration mission and power project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 213-220.
- [14] 朱安文,刘飞标,杜辉,等. 核动力深空探测器现状及发展研究[J]. 深空探测学报(中英文),2017,4(5):405-416.
ZHU A W, LIU F B, DU H, et al. Current status and development for deep space nuclear power explorer[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 405-416.
- [15] 王廷兰. 深空探测用同位素电源的研究进展[J]. 电源技术,2015,39(7):1576-1579.
WANG T L. Progress of radioisotope thermoelectric generator for deep space exploration[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1576-1579.
- [16] 康海波. 同位素电源系统研究进展[J]. 电源技术,2011,35(8):1031-1033.
KANG H B. Progress of radioisotope thermoelectric generator system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(8): 1031-1033.
- [17] 冶文莲,孙述泽,陈鹏帆,等. 空间自由活塞斯特林发动机研究进展[J]. 真空与低温,2021,27(5):457-466.
YAN W L, SUN S Z, CHEN P F, et al. Research progress of free piston stirling engine for space application[J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(5): 457-466.
- [18] 薛蕾,赵建辉,李帆,等. 基于多峰峰值功率跟踪的月球车一次电源[J]. 电源技术,2015,39(301):2184-2188.
XUE L, ZHAO J H, LI F, et al. Design of primary electrical power subsystem of lunar rover based on global MPPT[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(301): 2184-2188.

作者简介:

刘奕宏(1986-),女,高级工程师,主要研究方向:航天器能源控制与管理。

通讯地址:北京空间飞行器总体设计部(100094)

电话:(010)68112741

E-mail:7975941@qq.com

Scheme Design and Key Technology Research of Distributed Energy System for Lunar Scientific Research Station

LIU Yihong, ZHANG Ming, YANG Yi, LIU Zhi

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

Abstract: In view of the harsh environment of low temperature and low light in the lunar polar region, as well as the long-term observation mission requirements of the lunar scientific research station, combined with the composition and construction objectives of the lunar scientific research station, a set of multi-type distributed energy system architecture was proposed. By adopting standardized, modular and scalable design concepts a solar energy system based on nuclear reactor power generation and photovoltaic power generation, and a medium-sized energy system based on isotope power generation and photovoltaic power generation, and a small energy system based on intelligent battery packs were built to achieve long-life, high-power, highly reliable, stable and continuous power supply, solve the problems of large power level span and numerous power types were solved, and the long-term stable supply demand of energy for lunar scientific research station was met. At the same time, the wired grid connected power supply technology and wireless energy transmission technology were adopted to realize energy sharing and power expansion among various energy systems. The multi-channel energy management method based on hierarchical management was adopted to solve the energy balance problem between the top, middle and bottom levels involved in independent health management of energy, and the mission support ability of the lunar scientific research station was enhanced.

Keywords: lunar scientific research station; distributed energy system; scheme design; key technology research

Highlights:

- According to the harsh environment of low temperature and low light in the polar region of the moon, and the long-term observation task requirements of the lunar scientific research station, carry out the demand analysis of the lunar scientific research station distributed energy system.
- The solution of large, medium and small energy systems based on distributed architecture was proposed, which realizes stable and continuous power supply with long life, high power and reliability, and solves the problems of large power grade span and numerous power supply types.
- The key technologies of energy system represented by nuclear reactor power generation and protection, high-efficiency light isotope power generation technology, near-field and far-field wireless energy transmission technology were presented.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]