

基于微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架设想

夏彦^{1,2}, 黄文², 冯宇², 靳张涛², 欧学东¹, 徐靖皓^{1,2}, 帅智康²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 月表配电网架是月球科研站长久稳定供电的动力来源和骨架支撑。微型核反应堆重量轻、结构紧凑、拓展性好, 能够为月球科研站发电装置提供持久的能量来源。为了满足月球科研任务和未来建设大型月球基地的需要, 月表配电网架必须具备高可靠性和可扩展性。提出了一种融合微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架, 同时提出了可保证月表供电系统大功率高可靠运行的配套供电保障技术, 从月表配电网的拓扑结构、分区互联和运行控制方法三个方面论述了所提配电网架的可行性及应用优势。本设想期望能够为载人登月、地外星体基地建设计划提供有益思考和启发。

关键词: 微型核反应堆; 斯特林发动机; 月表配电网架; 供电保障技术

中图分类号: V476.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)01-0003-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210138

引用格式: 夏彦, 黄文, 冯宇, 等. 基于微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架设想[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9 (1): 3-13.

Reference format: XIA Y, HUANG W, FENG Y, et al. A high-reliability and scalable lunar surface power distribution network frame vision based on micro-nuclear reactor[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9 (1): 3-13.

引言

月球蕴藏着可供人类开发使用的稀土、钛等丰富矿产资源^[1], 在月球上建立科研站, 不仅能对月球进行有效探测和合理开发, 也可为未来火星探索打下坚实基础。月表配电网架是科研站长久稳定供电的动力来源和骨架支撑, 是保证科研任务顺利完成、满足研究人员日常生活的核心保障。从现有世界各国的航天任务来看, 目前仍未有关于月表配电网架相关工作的详细披露。

现有地外探测系统的供能来源主要依靠光伏发电和储能相配合^[2]。由于月球的自转周期特性, 月球科研站将有较长时间处于黑暗中, 储能电池无法完全满足供电需求。同时, 光伏电池板存在寿命衰减问题, 发电效率逐年递减^[3], 深空条件下定期维护和更换同样具有较大难度。因此, 不受环境影响、寿命长、功率大、维护简单的核反应堆在深空发电中的优势凸显^[4], 配置热电转换装备可作为月球科研站理想的能量来源。但传统核反应堆体积过大, 结构复杂, 安全系数较低^[5], 无法直接应用于月表配电网架。现有载人航天器、卫星和深空探测器等航天器的供电架构功率传输能力通常不足10 kW, 电压等级一般在100 V以下^[6],

而月球科研站的负荷类型多, 功率通常能够达到几千瓦至几十kW, 需要设计具备更强功率传输能力的分布式配电网架结构。地面大电力系统规模庞大, 设计和应用复杂, 而微电网结构容易发生故障, 且存在稳定性问题^[7], 两者都难以应用于月球空间。同时, 月球配电网架的电缆线路存在于恶劣的月球环境中^[8], 极易造成线路故障或设备损坏, 随着电压等级和容量的升高, 将会带来网络停电甚至瘫痪等更加严重的后果。

为了满足初期月球小规模科研任务和未来建设大型月球基地的需要, 月表配电网架必须具备高可靠性和可扩展性, 设计通用型模块化接口, 同时具有双向潮流控制功能, 其系统拓扑如图1所示。微型核反应堆具备结构简单、运行安全、功率密度大等突出优势, 能够为月球空间科研站发电装置提供持久的能量来源。本文提出了一种融合微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架设想, 期望能够为载人登月、月球基地建设计划提供有益思考和启发。

本文第1节介绍了基于微型核反应堆的发电系统设计, 第2节介绍了基于微型核反应堆的配电网架设想, 第3节介绍了高可靠供电保障技术, 第4节为设计实例与功能验证, 第5节为本文结论。

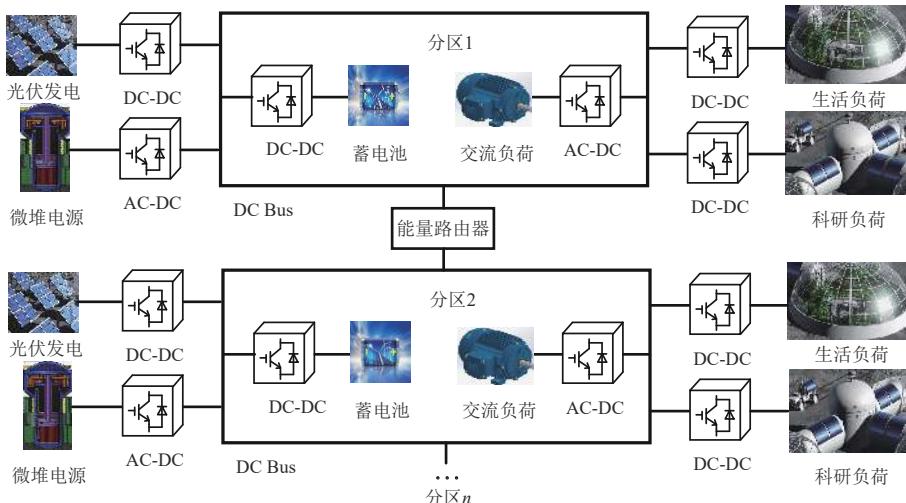


图1 月表配电网架系统拓扑图
Fig. 1 Topology diagram of monthly distribution grid system

1 基于微堆的发电系统设计

传统光伏储能供能系统具有寿命短且易受光照条件影响的缺陷^[9-12]，因此，月表配电网架的主电源单元，采用中国自主研发的斯特林一体化微型反应堆电源，选取该电源的主要原因为：

1) 直接输出电能，拓展性好。5 kW既匹配首期演示需求，又能适应逐级拓展功率步长。

2) 模块化设计。模块化有利于更快速生产、测试与更便利的运输、管理。

3) 紧凑、轻量、自然循环。对中国的运载能力更友好，对月表重力环境更友好。

1.1 电源设计与参数

电源由反应堆压力容器、堆内构件、堆芯、动力活塞、配气活塞、直线电机、转鼓控制棒、反射层、热管、内外屏蔽结构等部分组成，各部分结构如图2所

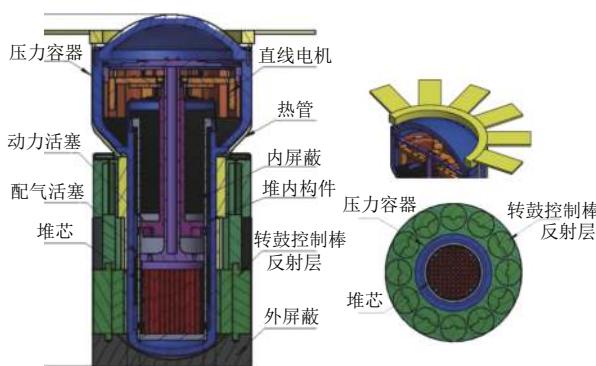


图2 斯特林一体化微型反应堆电源结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the power supply structure of the Stirling integrated micro-reactor

示（散热器部分显示）。该电源的原动机部分选用斯特林发动机，不受气压影响，无需与外界交换工质，并且对于热源的包容性强，相比于其它热机而言，在空间应用中具有优势^[13-15]；机电转换部分选用直线电机，具有响应快、可控性强和结构紧凑等特点，更有利热电一体化设计^[16]。该微型反应堆将传统的堆芯系统（一回路）与能量转换系统（二回路）集成在反应堆压力容器内部，直接输出电能，小型化突出。电源参数见表1。

表1 斯特林一体化微型反应堆电源主要参数

Table 1 Main parameters of Stirling integrated micro-reactor power supply

参数	数值
电源电功率/kW	5
电源总重量/kg	650
电源主体尺寸/m	$\Phi 0.5 \times 0.7$
电源散热板尺寸/m ²	24
电源寿期/a	2

1.2 月表布置方式

电源优选采用月球已有的1 m以上深度的小型撞击坑布置，以电缆引出到20 m以外的星表站供电。采用该布置对着陆器的降落精度或移动性能要求较高，但主要优势在于：

- 1) 采用撞击结构，无需发射挖掘设备；
- 2) 坑壁形成天然的辐射屏蔽，无需发射电源外屏蔽结构；
- 3) 减少太阳照射，有利于形成相对低温的电源运

行环境。

仿真计算表明, 假设撞击坑具有0.1 m高, 0.1 m厚环形边缘隆起, 导致坑边缘辐射散射, 使得阴影区有剂量增强, 经计算, 以距坑中心20 m处2 m高的圆柱体为剂量面, 中子和伽马辐射剂量率分别为200 mSv/h和10 mSv/h。电源月表布置方式示意图见图3。

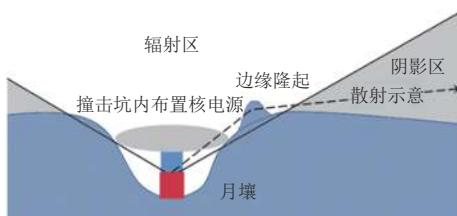


图3 电源月表布置方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layout of the power supply month table

1.3 电源输出特性

试验测试表明, 在充气压力为5.0 MPa时, 电源样机最大输出功率约为5.3 kW, 效率为27.0%。图4给出了测试的发电机输出随热功率变化的特性图, 表2给出了发电机各测试点数据, 当热功率上升时, 斯特林电机的输出功率、电压和电流都会随之上升。

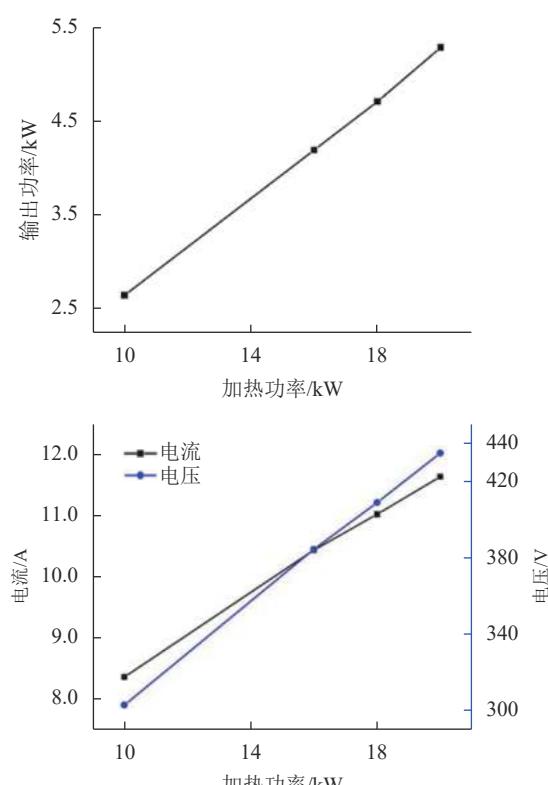


图4 不同加热功率条件下发电机输出电功率/电流/电压波形
Fig. 4 Generator output power/current/voltage under different heating power conditions

表2 5 kW自由活塞斯特林发电机的输出特性

Table 2 Output characteristics of 5 kW free piston Stirling generator

加热功/kW	输出功/W	电压/V	电流/A
10	2657	303	8.3
16	4195	384	10.4
18	4707	408	11.0
20	5278	434	11.6

2 基于微型核反应堆的配电网架设想

2.1 现有供电网络参考

月表供电系统配电网可选用交流供电、直流供电, 或交直流混合供电方式。相比于交流配电网, 直流配电网的优点主要有^[17-20]:

- 1) 系统内有功功率平衡仅取决于直流母线电压, 不存在类似交流系统里的频率稳定、无功功率等问题, 可靠性较高;
- 2) 直流线路中无集肤效应和无功电压压降特征, 同等条件下直流导线具有更高的电能传输能力, 有助减小线路导体尺寸及重量;
- 3) 空间大部分负荷, 依赖直流电源运行, 直接接入直流供电系统可减少交直流变换引起的损耗; 储能电池可直接或经DC-DC单级转换后接入直流母线, 降低系统能耗。

地面成熟的交流电网采用的变压器技术虽成熟、简单可靠, 但就体积及重量而言其航天运输成本过高。因而综合考虑可靠性、电能利用率及成本, 月表供电系统主干网架选用直流供电方式, 局部交流子系统与直流系统之间采用DC-AC连接, 以最大限度提升供电系统的灵活性。

直流配电网拓扑结构主要包括放射状、两端供电以及环状等^[21-22], 如图5所示。放射状拓扑结构简单, 便于运行操作, 控制保护相对容易, 但若系统上游出现故障, 易导致大面积停电, 供电可靠性相对低。两端供电拓扑结构相对复杂, 需考虑电能双向流动等特点, 故障识别和保护也相对困难。当一侧电源发生故障, 另一侧的电源能继续给系统提供电力支撑, 不会导致大面积停电事故, 供电可靠性相对高。环状直流配电网中任意一点出现故障, 保护装置隔离故障后系统非故障部分仍可正常运行, 环状配单网供电结构具备更高的供电可靠性, 但系统控制也更复杂^[23]。从供电可靠性角度而言, 月表供电系统配电网建议采用两端供电或环状拓扑。

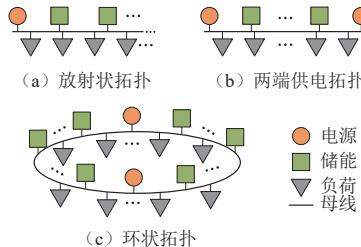


图 5 不同拓扑供电网络

Fig. 5 Power supply network with different topologies

依据现有的航天运输技术条件，如在月球表面分批次建设科研基地，每次运输支持建设的子系统应该为一个完整的供电系统，同时具备可扩展性，以保证子系统能互联成为整体系统。如图6所示，图中每个分区均为完整供电系统，分区之间通过电力联络线进行互联，互联的分区之间经控制单元实现潮流交换，图中的控制单元可能是独立装备，也可能集成到分区系统中（图中控制单元仅为功能性示意图）。同时互联的分区之间通过通信线路（有线或无线）进行信息交换，为系统整体能量优化调度提供信息支撑。采用这种分区互联模式的配电网络既符合地外星体基地建设规律，又能在系统部分分区出现功率不足时，通过灵活调用互联分区富裕能量，保证重要负荷的电力支撑，极大提升供电系统可靠性和运行效率。

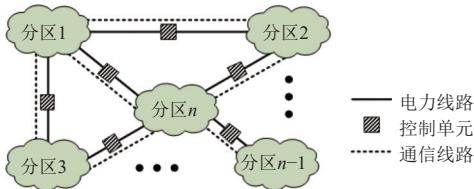


图 6 配电网分区互联结构

Fig. 6 Distribution network partition interconnection structure

2.2 高可靠、可扩展的分区互联配网架构设想

2.2.1 辅助发电系统及其设计

月表基地含有大量的科研设备，其中冲击负荷及其它特种用电装备在短时间内需较大功率支撑，微堆功率输出较为恒定，需要配备一定容量的储能装置平抑能量波动。

1) 辅助发电子系统

光伏发电已经广泛应用于飞行器的电能供给，已被证明是有效成熟的供电技术^[24]。对于月表基地，光伏发电系统可以布置于基地外空旷区域并通过电缆与基地相连接。光伏发电电子系统在月昼时持续向系统输送功率，在满足当前能量需求后，由储能系统负责存储多余能量以备后续使用。光伏发电系统作为微堆的可选补充，承担由长时间尺度上实现月表基地用电功

率平衡的作用。月表昼夜温差达 300°C ，需要考虑光伏发电系统自身的保温，避免变换器及其功率器件过早失效。月表基地辅助发电子系统示意图见图7。

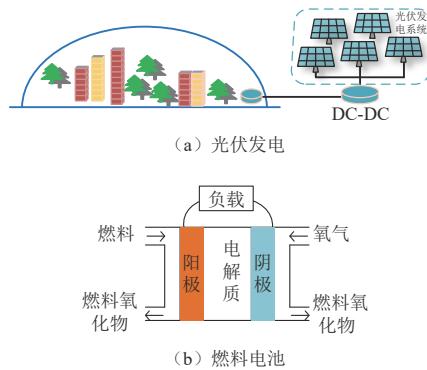


图 7 月表基地辅助发电子系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of photovoltaic power generation subsystem of Moon table base

燃料电池已运用在美国“双子座”载人飞船、航天飞机等，可作为月表配电网架的可选辅助电源。燃料电池是一种将燃料与氧化剂存储的化学能通过电化学反应转换为电能的发电装置。燃料电池不像热机受到卡诺循环的限制，因而具备更高的转换效率，可达35%~60%，可满足空间负荷中长时间尺度下的供电需求。月表基地储能装备示意图见图8。

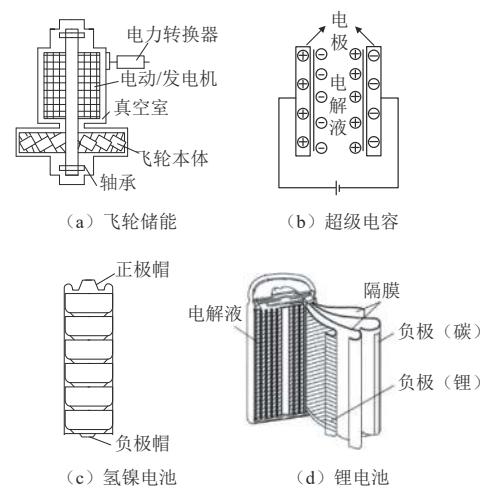


图 8 月表基地储能装备示意图

2) 储能子系统

由于电能生产和消耗具备同时性，因此为了短时间尺度下如满足冲击负荷的功率需求和中长期时间尺度下能量的平稳供应，储能系统不可或缺。现有储能方式通常分为：电能存储为机械能的飞轮储能；电能存储为场能的超级电容；电能存储为化学能的空间蓄

电池, 如镉镍电池、氢镍电池、锂电池等。飞轮储能和超级电容储能具有优良的瞬时功率提供能力, 能满足冲击负荷的供能需求, 但其存储能量有限, 无法在月夜期间长时间、大容量供能。氢镍电池相比于传统空间用镉镍电池, 具有较高的容量和放电倍率以及较长的使用寿命; 而相比于锂电池, 具有较高的循环次数、较宽的工作温度范围, 且技术更加成熟, 空间蓄电池可满足中长时间尺度下的供电需求, 但其无法瞬时提供大量能量^[25-27]。

综合考虑, 分区互联供配电系统的储能子系统以氢镍电池为主, 辅以较小比例的超级电容或飞轮储能。

氢镍电池的二阶RC等效电路模型^[28-29]如图9所示。并联的 R_1 、 C_1 表示电池的电化学极化特性; 并联的 R_2 、 C_2 表示电池的浓差极化特性; R_0 表示电池内阻; V_{ocv} 表示电池开路电压; V_o 表示负载电压。

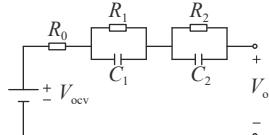


图9 氢镍电池二阶RC等效电路模型

Fig. 9 Second order RC equivalent circuit model of Ni-MH battery

从等效模型可看出, 氢镍电池存在电池极化现象, 会导致充放电过程中发生电极电位偏移, 使得负载电压 V_o 与电池开路电压 V_{ocv} 存在较大偏差。电池极化现象在传统的空间用镉镍电池和氢镍电池中都存在, 但由于氢镍电池电化学极化反应时间和浓差极化反应时间相对短, 相比于镉镍电池具有更高的放电倍率。通常氢镍电池的放电倍率能达20 C, 而镉镍电池放电倍率仅约5 C。高放电倍率电池可输出更大电流和功率, 相同的电池容量和系统电压等级下, 镉镍电池储能系统的电压暂降是氢镍电池储能系统的4倍, 镉镍电池出力消除电压暂降的时间比氢镍电池慢4.03倍。同时, 氢镍电池比功率可达1 000 W/kg, 约为镉镍电池的5倍, 寿命可达8~15年^[25], 还有较好的低温特性(工作温度范围: -20℃~+70℃)^[26], 更满足空间长时间尺度下的供电需求。

3) 极端情况供电备份

系统设备在月表极端环境中运行将产生极高故障率。此外, 太阳电池阵的输出在昼夜间波动导致母线电压异常, 威胁供电系统的安全稳定运行。因此, 有必要针对极端情况设计系统功能与行为。

极端情况系统备份供电启动流程如图10所示。不同分区的电源相互作为备份, 当某分区的微型核反应堆电源故障时, 其它分区可通过能量路由器等装置向

该分区传输功率, 实现能量互济。而在实际运行中, 所有微型核反应堆电源同时发生故障的概率极低。在所有微型核反应堆电源均故障且太阳电池阵列没有输出的极端情况下, 月表配电网架中拥有的储能系统依然能够为负荷提供基本电能保障, 必要时可切除非关键负荷进行减载处理, 保证关键负荷一段时间的正常运行。

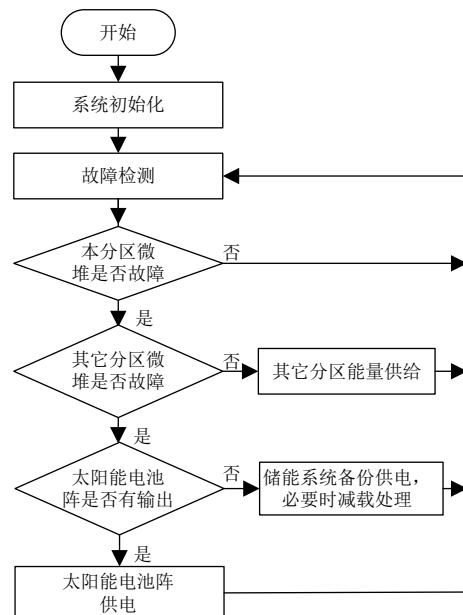


图10 极端情况系统备份供电启动流程图

Fig. 10 System power supply backup flow chart

2.2.2 分区互联供配电系统核心变换器

航天器电源中的用电负载多数为CPU、FPGA等电子负载, 其电压多为±12、±5、3.3 V等, 用电功率较小。月表基地分区互联供配电系统电功率等级大约在20~50 kW, 需100 V高压甚至300 V等特高压等级进行供电^[30]。同时, 因为大功率负荷的存在, 难以通过常规的调理和变换等手段^[31]给不同负载供电。考虑到供电可靠性、供配电系统设计的易扩展性以及分区互联的实际需求^[32-33], 具备模块化通用接口的能量路由器将承担核心的能量互联与分发角色。设想的能量路由器结构示意图如图11所示。

高压直流母线通过电缆与能量路由器连接, 经过能量路由器内部的多级变换产生不同电压等级的标准输出端口, 实现用电负荷的即插即用。设想在互联供配电系统的某一高功率非重要负荷区域, 如含有大量电机负荷的工作区域, 其供电将由冗余设计的能量路由器供应。此时, 能量路由器通过DC/DC变换产生常用的48 V电机工作电压、照明电压和通信电压。在多个分区间, 能量路由器同样承担能量的分发和功率流向控制任务。此时, 能量路由器将不再提供各级模

块化接口，而是根据实际情况决定能量分发的方式。如在某一时刻，基地A有3 kW功率裕量，基地B和基地C分别各存在2 kW的功率缺额，此时将根据功率缺额的性质和负载的重要性，由能量路由器确定向各个基地分发的具体数值。

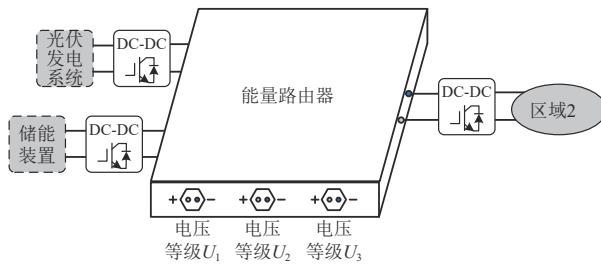


图 11 月表基地能量路由器设想结构

Fig. 11 Envisioned structure of energy router for Moon base

2.2.3 分区互联供配电系统的继电保护子系统

由于直流系统固有的故障电流上升速度极快，且不存在过零点难以开断，导致直流供配电系统一旦故障，将快速威胁区域内负载安全。冗余设计只是提高了供电可靠性，还需从本质上提高健壮性。考虑以超快速直流固态断路器为核心建立分区互联供配电系统继电保护子系统^[34]。超快速直流固态断路器通过常通型功率半导体器件SiC JFET作为断路器动作开关，能够在十数μs内实现电流的无弧开断，最大限度确保负载的安全，并及时切换到冗余备用线路，实现不间断供电。

2.3 可扩展分布式架构配电网运行控制方法

由于单个电源与储能设备的供电能力有限，设计多类型电源、储能与负荷的协同运行控制方法，维持直流母线电压稳定，优化分配各类型电源所承担的电能负荷。配电网的运行控制可采用如图12所示的多时间尺度控制架构。

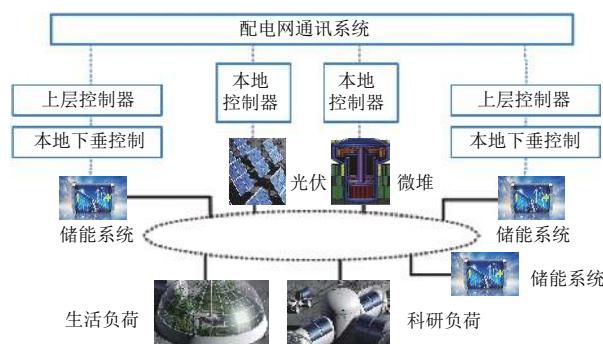


图 12 配电网的整体控制架构

Fig. 12 Overall control architecture of the distribution network

为保证反应堆工作安全，微堆基本不调整输出功率，蓄电池是月表配电网的主要调节装备。在直流系

统中，蓄电池作为根据输出功率调整工作电压，利用下垂控制原理实现多储能设备的协同控制。配电网内蓄电池采用分层控制进行整体的协调控制。其中本地下垂控制器可以不依赖于宽频带通讯，仅需测量本地输出功率即实现多设备间协同工作。随着配网规模扩大，可直接将新设备接入系统，实现并网。储能的下垂控制方程可简化表示为

$$U = U_0 - k_p P \quad (1)$$

其中： U_0 是设置的空载电压； P 为测量到的输出功率； k_p 是设定的下垂系数。图13是下垂控制的原理图，当各储能逆变器的输出电压接近时，输出功率按下垂系数进行比例分配，具备基本的电压控制和功率分配功能，可靠性较高，但控制准确性较差。因此，需利用配电网通讯系统，基于上层控制器调整下垂系数、空载电压等参数，实现直流电压无静差控制，输出功率精确分配与储能单元储存能量的均衡，兼顾配电网控制的可靠性和精确性。光伏作为配电网中的备用电源，可以根据配电网的工作状态调整工作模式。当微堆发电难以满足负荷需求时，光伏通过输出功率避免蓄电池的过度放电。光伏作为输出功率不完全受控的电流源，不参与系统的协调控制。

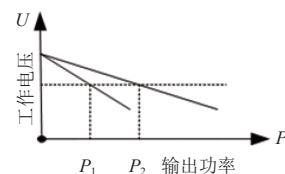


图 13 直流下垂控制原理

Fig. 13 Principle of DC droop control

3 高可靠供电保障技术

3.1 冗余设计技术

对于月表供电系统而言，系统设备发生故障的显著特征为：

1) 危害性大。月表供电系统结构和功能单一，设备故障或可能导致基地无法正常运转。

2) 人工干预能力有限。远离地球的月表基地故障发生后很难通过人员进行维修。

3) 设备资源有限。受航天运输成本及运输效率限制，设备故障难以通过更换得到恢复。

冗余是提高系统可靠性的重要途径^[35]，冗余设计主要包括结构冗余（硬件冗余和软件冗余）、信息冗余、时间冗余和冗余附加^[36]。对月表供电系统进行冗余设计可从三个方面来考虑：

1) 对供电系统关键设备进行硬件冗余设计。综合考虑重量和空间约束条件下达到系统可靠性最高目标, 例如供电系统可采用双母线配置方案、对电能变换装备进行拓扑冗余优化设计等。

2) 对供电系统进行软件冗余设计。运用集中式管理理念开展月表供电系统的设备层级和系统层级的冗余控制系统主要功能设计, 基于并联式冗余实现手段从软件层面主备状态和实时数据备份来实现热备冗余功能。

3) 核心部件通用模块化冗余设计。对功能相同或类似设备的核心部件进行模块化设计, 设计标准统一接口, 实现设备核心部件的即插即用。

冗余设计技术在月表高可靠可扩展网架的规划建设中具备可行性, 体现在以下两个方面:

1) 冗余设计技术条件成熟, 实现过程简单。月表配电网分区间相似性适合通过母线冗余、电能变换装备冗余、储能冗余提高供配电系统的可靠性, 同时冗余设计还考虑软件冗余和设备模块化冗余, 多层级配合, 实现过程无需人工干预, 在月表具有较强的可行性。

2) 现有的条件和平台已经具备了冗余设计技术的使用基础, 冗余设计技术在航天任务中已成功应用。例如“嫦娥五号”月球探测器^[37]、皮卫星^[38]等已经使用了相关硬件冗余技术, 保证航天器在紧急情况下自动处理和硬件切换, 提升系统的可靠性。

3.2 数字孪生监测与预警技术

数字孪生以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型, 并借助实时数据再现物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等, 为物理实体增加或扩展新的能力, 是一种实现物理世界与信息世界交互与共融的有效方法^[39-41]。将数字孪生技术应用于月表供电系统, 能够提高可靠性:

1) 模拟月表供电系统运行状态。供电系统数字孪生体能在数字空间实时反映其行为和状态, 并以可视化

化的方式呈现。

2) 在线诊断系统健康状态。通过相关传感器获取结构状态与载荷变化、环境等信息, 结合数据预处理、信号特征分析、模式识别等技术, 识别系统当前损伤状态。

3) 在线预测系统未来状态。通过数据链、数据接口等技术连接监测数据和数字模型, 结合机器智能等方法驱动模型的动态更新, 对系统未来状态进行异常预警, 便于及时检修与维护系统。

数字孪生技术应用于月表供配电系统及关键设备具有可行性, 主要体现在以下两个方面:

1) 数字孪生技术在解决复杂系统的监测、维护、动态重构方面具有并逐渐展示了先进性^[38]。目前数字孪生技术成果应用于航空器健康维护和剩余寿命预测、船舶全生命周期管控、电能智能管控、风力发电机齿轮故障预测等领域, 带来明显的经济效益^[42]。

2) 数字伴飞技术已经成功应用于“嫦娥五号”, 实现了对太阳能电池阵输出功率、蓄电池组电压电流的实时监控、状态展示和预警。月表供配电系统建设在月球表面, 相比航天器而言, 运行环境更加稳定, 不需要运行姿态等运动数据, 所需数据量更小, 可行性更强。

4 设计实例与功能验证

为了验证所提高可靠、可扩展的分区互联配网构架设想, 本文按照图14所示的拓扑结构设计了100 kW月表直流分区互联供配电系统, 并在PSCAD/EMTDC电磁暂态专业仿真软件中搭建了仿真模型, 对系统分区能量互济和系统故障情况下高可靠运行两部分功能进行了验证。如图14所示, 设计的供配电系统包含3个分区: 分区1为400 V直流系统, 分区2为750 V直流系统, 分区3为400 V直流系统。分区1与分区2之间、分区2和分区3之间通过能量路由器连接, 能量路由器承担双向潮流和电压变换的功能。各分区内部各个电源的参数如表3所示。

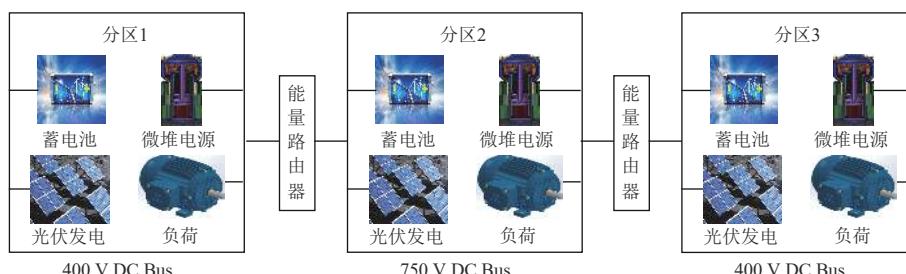


图14 100 kW月表直流分区互联供配电系统拓扑图

Fig. 14 Topology diagram of 100 kW DC partition interconnected power supply and distribution system

表3 各分区内部电源参数

Table 3 Power parameters of each partition

分区	电源类型	容量/kW
分区1	斯特林发电机	12
	储能电池	7
	光伏电池	6
分区2	斯特林发电机	19
	储能电池	15
	光伏电池	14
分区3	斯特林发电机	12
	储能电池	7
	光伏电池	8

4.1 系统分区能量互济功能

首先验证所设计网架的系统分区能量互济功能，仿真结果如图15所示，从上到下依次是分区1、分区2、分区3中各电源的输出功率。

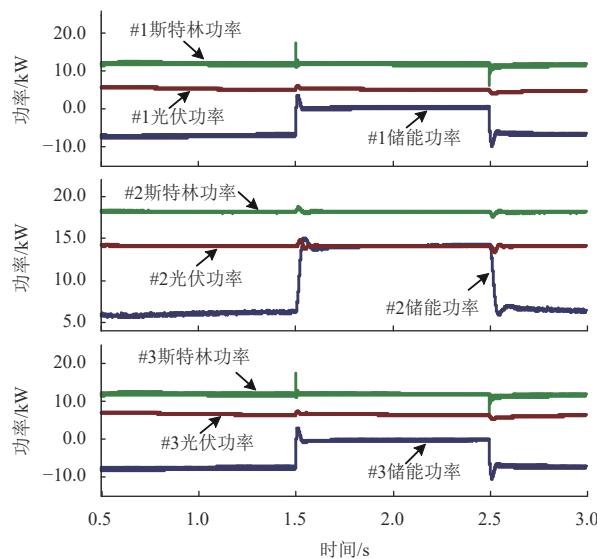


图15 系统分区能量互济功能仿真验证

Fig. 15 Simulation verification of system partition energy mutual aid

0.5~1.5 s范围，系统的3个分区都处于平稳运行。其中，分区1的斯特林发电机保持12 kW的恒定功率输出，由于光照条件和温度变化缓慢，光伏电池保持大约6 kW的功率输出，网络中由于负荷数量不多，储能电池处于充电状态，充电功率为7 kW；分区2的斯特林发电机保持19 kW的恒定功率输出，光伏电池保持约14 kW的功率输出，储能电池处于放电状态，放电功率为6 kW；分区3的斯特林发电机保持12 kW的恒定功率输出，光伏电池保持约8 kW的功率输出，储能电池处于充电状态，充电功率为7 kW。

1.5~2.5 s范围，分区2突然投入一个22 kW的负荷，3个分区迅速响应，进行能量互济，通过能量路由器进行功率调度。分区1和分区3的储能电池将充电能量迅速转移给新增负荷使用，且分区2的储能电池增加输出，输出功率达到了14 kW。同时，3个分区中的斯特林发电机和光伏电池输出功率都保持不变。

2.5 s之后，系统切除新增负荷，通过能量路由器的能量调度功能可以迅速回到原来的状态。

4.2 系统故障情况下高可靠运行功能

验证所设计网架在故障情况下高可靠运行的功能，仿真结果如图16所示，从上到下依次是分区1、分区2、分区3中各电源的输出功率情况。

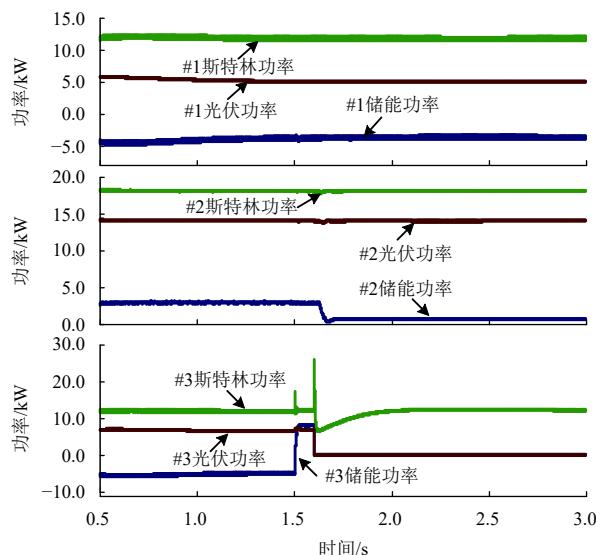


图16 系统继电保护功能仿真验证

Fig. 16 Simulation verification of system relay protection function

0.5~1.5 s范围，系统的3个分区都处于平稳运行的工作状态。其中，分区1的斯特林发电机保持12 kW的恒定功率输出，光伏电池保持大约6 kW的功率输出，网络中由于负荷数量不多，故储能电池处于充电状态，充电功率为4 kW；分区2的斯特林发电机保持18 kW的恒定功率输出，光伏电池保持约14 kW的功率输出，储能电池处于放电状态，放电功率为3 kW；分区3的斯特林发电机保持12 kW的恒定功率输出，光伏电池保持约8 kW的功率输出，储能电池处于充电状态，充电功率为5 kW。

1.5 s时，分区3突然发生接地故障。由于能量路由器具有故障保护功能，因此故障发生时，分区1和2内各电源的输出特性未受较大影响，分区3中由于存在故障，导致储能电池输出功率迅速增加，储能装置的限流功能使输出功率最大为7 kW额定容量。与此同时，

系统的继电保护装置迅速动作，在0.1 s内将分区3整个断开，避免接地故障的影响传播至其他分区。分区3内部光伏电池闭锁，储能电池停止充放电功能，输出功率下降至0，分区3的斯特林发电机由于功率无法改变，因此采用内部热耗散装置将多余能量进行消纳。

1.6 s时，分区3被成功断开后，由于整个系统负荷减少，因此分区2中的储能电池出力下降，保证分区互联系统的能量平衡。

5 结 论

本文从基于微堆的发电系统设计、月表配电网架、高可靠供电保障技术等方面阐述了一种基于微型核反应堆的月表高可靠可扩展配电网架设想，并且深入探讨了月表配电网的拓扑结构、分区互联和运行控制方法，有助于月球科研任务的开展，推动对月球进行有效探测和合理开发，为中国航天事业的可持续发展贡献力量。

参 考 文 献

- [1] 马继楠,裴照宇,刘继忠,等.月球探测进展与国际月球科研站[J].科学通报,2020,65(24):49-58.
MA J N, PEI Z Y, LIU J Z, et al. Progress in lunar exploration and international lunar research station[J]. Scientific Bulletin, 2020, 65(24):49-58.
- [2] 刘志强.适用于载人航天器的低压大功率电源系统的设计[D].上海:上海交通大学,2013.
LIU Z Q. Design of low-voltage high-power power supply system suitable for manned spacecraft [D]. Shanghai : Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [3] 杨明卿.光伏发电系统综合能效提升的研究与实现[D].青岛:青岛科技大学,2017.
YANG M Q. Research and realization of comprehensive energy efficiency improvement of photovoltaic power generation system [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017.
- [4] 胡古,赵守智.空间核反应堆电源技术概览[J].深空探测学报(中英文),2017,5(4):38-51.
HU G, ZHAO S Z. Overview of space nuclear reactor power technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 5(4):38-51.
- [5] 余美芳.核反应堆压力容器用钢及其结构的断裂韧性研究[D].天津:天津大学,2016.
YU M F. Research on Fracture Toughness of Steel and Its Structure for Nuclear Reactor Pressure Vessel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [6] 陈琦,刘治钢,张晓峰,等.航天器电源技术[M].北京:北京理工大学出版社,2018.
[7] 李霞林.交直流混合微电网稳定运行控制[D].天津:天津大学,2014.
LI X L. Stable operation control of AC/DC hybrid microgrid [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [8] 叶培建,肖福根.月球探测工程中的月球环境问题[J].航天器环境工程,2006,23(1):1-11.
YE P J, XIAO F G. Lunar environmental issues in lunar exploration projects[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2006, 23(1):1-11.
- [9] SPENCE B R, WHITE S F, WILDER N, et al. UltraFlex-175solar array technology maturation a chievements for NASA's New Millennium Program (NMP) Space Technology 8 (ST8) [C]//Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference.[S.I.]: IEEE, 2006.
- [10] FATEMI N, LYONS J, ESKENAZI M. Qualification and production of Emcore ZTJ solar panels for space missions[C]// 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). [S.I.]: IEEE, 2013.
- [11] KAWASAKI O, YAMAMOTO Y, MATSUDA S. NASA's space solar cell -- ground test data and flight data[C]//A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC. USA: IEEE, 1994.
- [12] LANDIS G, JENKINS P, SEXTON J A, et al. A facility for space calibration and measurement of solar cells on the International Space Station[C]//Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. USA: IEEE, 2000.
- [13] ROSS B. Status of the emerging technology of stirling machines[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995, 10(6): 34-39.
- [14] THIEME L G, SCHREIBER J G. NASA GRC technology development project for a Stirling radioisotope power system[C]// Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. [S.I.]: IECEC, 2000.
- [15] AIAA. Assessment of the free-piston Stirling convertor as a long life power convertor for space[C]//35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (AIAA). [S.I.]: AIAA, 2000.
- [16] PING Z, YU B, ZHU S, et al. Research on control strategy of free-piston stirling-engine linear-generator system[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). [S.I.]: IEEE, 2015.
- [17] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-16.
LI X L, GUO L, WANG C S, et al. Summary of research on key technologies of DC microgrid[J]. Summary of Research on Key Technologies of DC Microgrid, 2016, 36(1):2-16.
- [18] 徐政,屠卿瑞,裘鹏.从2010国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J].高电压技术,2010,36(12):3070-3077.
XU Z, TU Q R, QIU P. Looking at the development direction of DC transmission technology from the 2010 International Large Power Grid Conference[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(12):3070-3077.
- [19] SALOMONSSON D , SANNINO A. Low-Voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [20] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [21] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等.直流配电网研究现状与发展[J].电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN P F, HE C G, SHAO H, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):64-73.
- [22] 马钊,焦在滨,李蕊.直流配电网络架构与关键技术[J].电网技术,2017,41(10):3348-3357.
MA Z, JIAO Z B, LI R. DC distribution network architecture and key

- technologies[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(10):3348-3357.
- [23] 熊志杰. 含光伏的直流配电网短路特性及固态断路器研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- XIONG Z J. Research on short circuit characteristics of DC distribution network containing photovoltaics and solid state circuit breakers [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [24] PATEL M. Spacecraft power systems[M]. USA: CRC Press, 2004..
- [25] 余成洲, 赖为华. 氢镍电池的现状与发展方向[J]. 新材料产业, 2001(6):26-29.
- YU C Z, LAI W H. Current situation and development direction of MH/Ni battery[J]. Battery Bimonthly, 2001(6):26-29.
- [26] MAY G J, DAVIDSON A, MONAHOV B. Lead batteries for utility energy storage: a review[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 15: 145-157.
- [27] 马季军, 何小斌, 涂淳. 我国载人航天电源系统的技术发展成就及趋势[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 207-218.
- MA J J, HE X B, TU B. Technical development achievements and trends of manned spaceflight power system in China[J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(3): 207-218.
- [28] 徐钦赐, 负海涛, 杨腾盛, 等. 混合动力汽车氢镍电池建模研究[J]. 电源技术, 2021, 45(2):222-224+262.
- XU Q C, YUN H T, YANG T S, et al. Research on modeling of NI/MH battery hybrid electric vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(2):222-224+262.
- [29] 胡京. 含氢镍电池的储能系统仿真建模及其应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
- [30] 于磊, 王宏佳, 王林涛, 等. 航天器高压直接配电设计研究[J]. 载人航天, 2017, 23(6): 770-775.
- YU L, WANG H J, WANG L T, et al. Research on high voltage direct power distribution design of spacecraft[J]. Manned Space Flight, 2017, 23(6): 770-775.
- [31] 王娜, 黄峰, 马季军, 等. 我国交会对接任务中航天器电源设计与应用[J]. 载人航天, 2013, 19(3): 52-59.
- WANG N, HUANG Z, MA J J, et al. Design and application of spacecraft power supply in my country's rendezvous and docking missions[J]. Manned Space Flight, 2013, 19(3): 52-59.
- [32] 钟丹华, 唐筱, 舒斌, 等. 载人飞船电源系统并网供电特性研究[J]. 航天器工程, 2020, 140(1): 33-37.
- ZHONG D H, TANG X, SHU B, et al. Research on grid-connected power supply characteristics of manned spacecraft power system[J]. Spacecraft Engineering, 2020, 140(1):33-37.
- [33] 于磊. 空间电源系统并网供电技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- YU L. Research on grid-connected power supply technology of space power system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [34] HE D , SHUAI Z, LEI Z, et al. A SiC JFET-based solid state circuit breaker with digitally controlled current-time profiles[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2019: 7(3):1556 -1565.
- [35] 孙怀义. 冗余设计技术与可靠性关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(11): 2089-2092.
- SUN H Y. Research on the Relationship between redundancy design technology and reliability[J]. Journal of Instrumentation, 2007, 28(11): 2089-2092.
- [36] 齐爽. 控制器双冗余设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- QI S. Design and realization of dual redundancy controller [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [37] 于萍, 张洪华, 李骥, 等. 嫦娥五号着陆上升组合体GNC系统设计与实现[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(7): 763-777.
- YU P, ZHANG H H, LI J, et al. Design and implementation of GNC system of lander and ascender module of Chang'e-5 spacecraft[J]. Sci SinTech, 2021, 51: 763-777.
- [38] 童杰文. 高可靠卫星综合电子系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- TONG J W. Research of high reliable composite electronic systems for pico-satellite [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [39] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, ZHANG Y, et al. Digital twin five-dimensional model and ten major applications[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(1): 1-18.
- [40] 孙惠斌, 颜建兴, 魏小红, 等. 数字孪生驱动的航空发动机装配技术[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 833-841.
- SUN H B, YAN J X, WEI X H, et al. Aeroengine assembly technology driven by digital twin [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 833-841.
- [41] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星:概念, 关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
- LIU W R, TAO F, CHENG J F, et al. Digital twin satellite: concept, key technology and application[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(3): 565-588.
- [42] 孟松鹤, 叶雨政, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9):1-12.
- MENG S H, YE Y M, YANG Q, et al. Digital twin and its application in aerospace [J]. Journal of Aeronautics, 2020, 41(9):1-12.

作者简介:

夏彦(1984-),女,研究员,北京空间飞行器总体设计部研发副总师,主要研究方向:空间核动力和空间核辐射探测。

通讯地址:北京海淀友谊路104号(100094)

电话:(010)68111994

E-mail: xiayan_cast@163.com

A High-reliability and Scalable Lunar Surface Power Distribution Network Frame Vision Based on Micro-nuclear Reactor

XIA Yan^{1,2}, HUANG Wen², FENG Yu², JIN Zhangtao², OU Xuedong¹, XU Jinghao^{1,2}, SHUAI Zhikang²

(1. Beijing Institute of Spacecwt Systems Engineering, Beijing 100094, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The lunar surface distribution grid is the long-term stable power source and skeleton support for the lunar scientific research station. The miniature nuclear reactor is light in weight, compact in structure, and extensible in scale. It can provide a long-lasting energy source for the power generation devices of the lunar scientific research station. To meet the needs of lunar scientific research tasks and the construction of large-scale lunar bases in the future, the lunar power distribution grid must have high reliability and scalability. Therefore, a high-reliability and scalable power distribution grid, integrated with micro nuclear reactors, for the lunar surface, as well as its relevant reliability guarantee technologies was proposed in this paper. The feasibility and advantages of the power distribution grid frame proposed were discussed from the perspectives of the topology, partition interconnection and operation control methods of the distribution grid. This vision is aimed to provide inspiration for manned moon landing and extraterrestrial base construction plans.

Keywords: miniature nuclear reactor; stirling engine; lunar surface power distribution grid; power supply guarantee technology

Highlights:

- Micro-reactor-based power generation system was designed.
- A high-reliability and scalable power distribution grid design for the lunar surface integrated with micro nuclear reactors was proposed.
- High-reliability power supply guarantee technologies were proposed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]