

太阳电池阵深空探测适应性设计概论

王文强, 杨洪东, 杨广, 王佳禹, 吴庆, 顾春杰

(上海空间电源研究所 物理电源事业部, 上海 200245)

摘要: 随着近年来月球探测的推进, 深空探测的论证, 针对深空探测对太阳电池阵低温、低光强、强辐射等环境的技术需求, 以火星探测和木星探测太阳电池阵设计分析为例, 通过任务环境特点分析, 给出了特殊服役环境下太阳电池选型方法, 方阵设计与验证建议, 对国内深空探测太阳电池阵设计具有一定参考意义。

关键词: 太阳电池阵; 深空探测; 低温低光强

中图分类号: V423.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)01-0041-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191101003

引用格式: 王文强, 杨洪东, 杨广, 等. 太阳电池阵深空探测适应性设计概论[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 41-46.

Reference format: WANG W Q, YANG H D, YANG G, et al. Solar cell array design for deep space exploration missions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 41-46.

引言

目前国内外深空探测器的电源方案多种多样, 供电装置主要有太阳电池阵和同位素电源两种类型。美国“凤凰号”(Phoenix)与“洞察号”(Insight)火星探测器、“朱诺号”(Juno)木星探测器、“黎明号”(Dawn)、“源光谱释义资源安全风化层辨认探测器”(Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer, OSIRIS-REx), 欧洲火星大气与挥发演化(MAVEN)火星探测器, 日本“隼鸟号”(Hayabusa)小行星探测器, 选用了太阳电池阵供电; 美国“伽利略号”(Galileo)木星探测器、“旅行者号”(Voyager)探测器, 选用了同位素核电源供电。

一方面, 空间用太阳电池阵是卫星或探测器供电分系统的重要组成部分, 通过光伏特效应在光照期为航天器负载供电或为蓄电池充电, 为空间飞行器供电提供了稳定的能源, 我国高效多结GaAs太阳电池及太阳翼机械结构广泛应用, 可以根据任务特点进行适应性改进, 有着长期在轨服役经验, 但是太阳电池阵包含电路部分、机械部分, 总质量较大。

另一方面, 同位素电源质量较小, 发电功率随轨道变化较小, 国际上应用较为成熟, 美国、俄罗斯均有相应的系列化产品, 但由于Pu238等原料严重受限, 国内温差发电器件成熟度较低, 成本远高于太阳电池

阵, 产品在轨应用较少。

综上所述, 选择太阳电池阵作为供电装置的优选方案显得更为合理^[1]。

经过多年发展, 空间用太阳电池阵随着空间高分专项工程、北斗导航工程等计划稳步的推进, 逐渐成为型谱化产品, 在近地轨道(Low Earth Orbit, LEO)、中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)等多种轨道广泛应用; 通过地面技术研究与在轨型号应用, 现阶段形成了以GJB2602《空间太阳电池阵通用规范》、QJ1731《太阳电池板通用规范》、GJB7392《空间用三结砷化镓太阳电池通用规范》等为代表的设计标准, 用以指导空间太阳电池阵产品的设计。

近年来, 我国月球探测工程成功实施, 多项深空探测项目正在深化论证。通过对比深空探测用太阳电池阵与一般地球卫星太阳电池阵任务剖面可知, 深空探测用太阳电池阵与常规LEO、MEO等轨道环境差异较大, 需要面临特殊的在轨服役环境。

以月面工作用太阳电池阵为例, 在轨工作温度范围极大, 高温可高达约+120℃, 不工作时进入月夜存储, 低温可低至-190℃。

以火星探测用太阳电池阵为例, 探测奔火、环火阶段, 低温可达约-190℃, 高温仅约+30℃。

以上深空探测用太阳电池阵低温较低, 远超出了常规LEO轨道(-90~+90)℃, MEO轨道(-160~

+70) °C 的温度范围。

本文通过梳理近年来深空探测用太阳电池阵产品状态, 结合下一步深空探测需求, 对深空探测用太阳电池阵设计进行了分析, 为相关产品研制队伍提供参考。

1 深空探测需求

现阶段空间用太阳电池设计以GJB7392《空间用三结砷化镓太阳电池通用规范》为基础, 国内相关研制单位均以近地空间需求为基础, 开发AM0光谱太阳电池。

目前广泛应用的三结GaAs太阳电池为GaInP₂/InGaAs/Ge结构, 光电转换效率可达30% (AM0 (Air Mass 0), 25 °C)。近地空间探测器要求太阳电池在AM0光谱, 在90 °C 以内的温度下工作, 典型的三结GaAs太阳电池电压、电流温度特性均已有了较为充分的工程研究, 有效地支撑了型号产品应用。

但是目前深空探测用太阳电池阵具有较多特殊性, 太阳距离、辐照强度、工作温度等服役环境均差异较大。

以工作温度为例, 火星探测中太阳电池工作温度约为-9.5 °C, 此温度与典型三结GaAs设计状态、测试条件 (AM0, 25 °C) 相对较为接近; 随着太阳距离的增加在木星探测任务中, 太阳电池工作温度已经低至-130 °C, 远远偏离了目前典型三结GaAs设计状态、测试条件 (AM0, 25 °C) 或者典型近地空间、月球探测使用条件; 天王星探测任务中, 太阳电池工作温度甚至低至-199 °C^[2], 低于液氮 (-196 °C) 温度 (辐照强度与太阳距离关系图参见图1)。

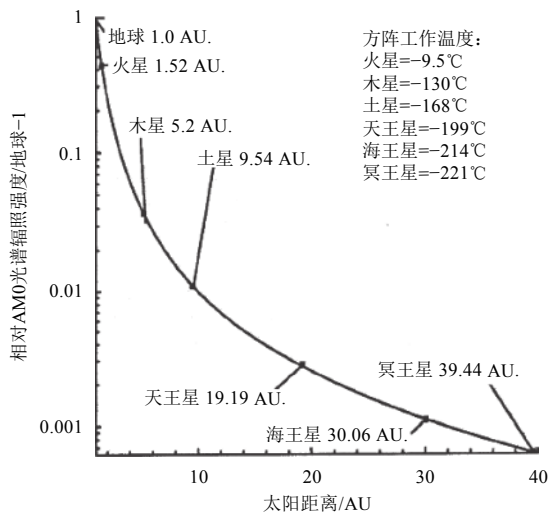


图1 辐照强度与太阳距离关系图^[2]

Fig. 1 Solar intensity vs. distance from the Sun

以辐照强度为例, 火星探测中太阳辐照强度约为0.43 Suns (以AM0辐照强度类比), 辐照强度视火日距离在493~717 W/m²范围内变化; 木星探测中辐照强度约为0.02~0.03 Suns (以AM0辐照强度类比), 辐照强度视木日距离在27~41 W/m²范围内变化; 即随着太阳距离的增加, 辐照强度急剧下降, 远低于AM0辐照强度。

以光谱环境为例, 火星表面光谱与AM0光谱差异较大, 会造成太阳电池转换效率下降。

以辐射环境为例, 木星辐射带质子通量是地球10倍, 高能电子通量比地球高2~3个数量级, 且最高能量高达1 GeV, 辐射环境比地球静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO) 轨道更加恶劣^[3]。

由以上深空探测太阳电池阵服役环境可知, 深空探测环境涉及超低工作温度、超低辐照强度、特殊光谱环境、超高辐射环境, 太阳电池或方阵均需进行分析与论证。

深空探测任务具体细分涉及火星探测、木星探测等, 任务类型多, 应用环境差异大。此处以任务需求为例, 分别对太阳电池阵设计进行论述。

2 火星探测太阳电池阵设计

结合国外各项火星探测任务经验, 火星探测可以分为3部分: 地火转移与火星环绕、火星表面分离着陆、火星表面巡视, 其中涉及太阳电池阵应用的主要有火星环绕和火星表面巡视两部分。

2.1 火星环绕探测太阳电池阵设计分析

火星环绕探测需要经历短期近地段、长期地火转移段及火星轨道环绕段3部分, 需经历近地高温 (-90~+90) °C、地火转移及火星环绕低温 (-190 °C~+30) °C。

火星环绕探测太阳电池阵正常工作时太阳翼受照, 正常工作温度约 (-30~+30) °C, 光强约500 W/m², ISRO^[4]等机构采用AM0光谱空间用多结GaAs太阳电池在此条件下进行了测试工作, 未发现太阳电池效率异常变化情况。

这说明典型的空间用三结GaAs太阳电池可以应用于火星环绕探测, 针对任务环境的光强变化、温度变化等因素进行测试分析即可, 无需针对火星环绕任务环境重新设计太阳电池结构或在现有的太阳电池结构基础上进行适应性改进。

环火阶段太阳翼受到遮挡情况下, 太阳翼温度迅

速降低，低温低至 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，已远超过了一般地球轨道卫星太阳电池阵 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度。考虑到超低温下典型Sn63Pb37锡铅焊料相对室温条件，断裂方式由韧性断裂转变为脆性断裂，容易在IMC/钎料界面、IMC层发生低温断裂^[5]，故建议选用太阳电池的引出焊点、太阳翼与SADA连接用接插件选用Sn10Pb90等高铅焊料进行钎焊，或选择其他连接形式（如压接）来进行处理。

太阳电池铺设在太阳翼上，太阳翼的基板、铰链等作为太阳翼机械支撑，太阳翼机械部分可靠性对太阳翼发电或整星姿态调整等过程有着关键作用。

现阶段太阳翼聚酰亚胺薄膜与面板粘贴用胶、蜂窝芯拼接用胶、面板与铝蜂窝芯粘贴用胶等多为环氧类结构胶，一般为 $(-100\sim+100)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境设计。在超低温 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 使用时，可能出现胶水从高温进入低温迅速收缩，聚酰亚胺薄膜、面板、胶水热膨胀系数差异下造成面板等分离凹陷或凸起情况，或者面板粘贴用胶出现龟裂等现象，影响太阳电池粘贴或太阳翼结构强度。故建议相关研制单位进行环境验证或环境适应性设计。

2.2 火星表面太阳电池阵设计分析

火星表面探测中，太阳翼需在火星表面工作。火星表面大气中存在大量尘埃，太阳光透过大气后出现短波衰减，使得火面光谱出现明显变化^[6]（AM0光谱与火星 30° 、 60° 光谱对比图参见图2），进而造成现广泛应用的典型三结GaAs太阳电池顶电池、中电池电流失配增加；针对此情况美国喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）、Spectrolab公司等机构研究了火星表面光谱，对小太阳光谱模拟器进行了改进，根据火星光谱对GaAs太阳电池进行了改进，开发了火星光谱匹配太阳电池^[7-8]。

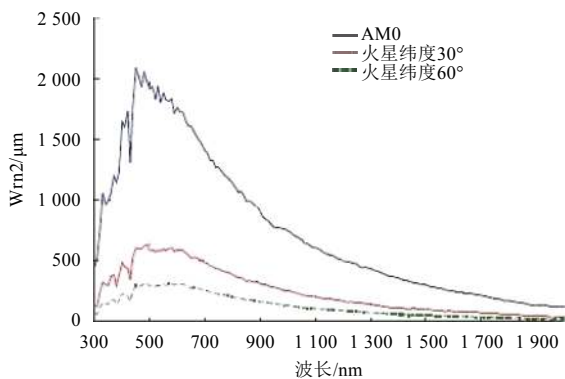


图2 AM0光谱与火星 30° 、 60° 光谱对比图^[6]

Fig. 2 Spectral intensity of AM0, Mars 30° latitude and Mars 60° latitude solar spectra

火星光谱相对AM0光谱出现短波减少的情况，现阶段火星光谱并未开源，故我国火星表面用太阳电池阵应以蒙特卡洛或大气辐射传输技术为工具，以美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的Mars-GRAM或欧洲航天局（European Space Agency, ESA）的MCD数据库为基础，仿真计算得到火星表面光谱数据；在此基础上提高多结GaAs各子电池能量转换比例，通过半导体带隙调节，使得三结子电池匹配；为进一步优化器件结构，可能还需要适应性调整电池电压，以达到保障电流优化前提下得到较为优化的电压，提高火星光谱下太阳电池的光电转换效率。

火星表面探测器在火星表面工作时，可能存在不同帆板控制方式不一致的情况。由于不同帆板受照情况不同，不同帆板输出曲线可能差异较大，为避免不同帆板间的相互影响，避免I-V曲线形成多个峰值，对电源控制器功率使用方式造成干扰，甚至造成误判，建议不同帆板设计采用不同的电路设置或相同控制方式的帆板设计采用相同的电路设置。

由于火星表面光强较弱，大气中漂浮大量尘埃^[9]，因此太阳阵输出功率受限较大，建议太阳翼采用二次展开等方式，增大太阳电池面积，为整器提供更多能源。

3 木星探测太阳电池阵设计分析

3.1 太阳电池抗辐射设计分析

木星探测涉及的超强辐射远超出一般地球轨道或月球轨道卫星。现阶段典型太阳电池在 $1\times 10^{15}\text{ e/cm}^2$ 辐照总剂量下电流衰减超过10%，故木星探测用太阳电池需综合考虑进行辐射设计。

在轨使用的叠层太阳电池由玻璃盖片和太阳电池组成，玻璃盖片面密度越高，到达太阳电池的辐射剂量越低，故可以考虑根据辐射剂量适当提高KFB玻璃盖片厚度，减少太阳电池辐射剂量。

在太阳电池结构方面，虽然Si和GaAs太阳电池抗辐射能力较弱，但是由于InP太阳电池存在效率较低、衬底昂贵、机械强度低、质量密度大的缺点^[10]，InP太阳电池应用尚有距离；由于木星探测太阳辐照强度极低，对整星功率要求较高，考虑到可能现阶段在轨使用的晶格匹配效率29.8%GaAs太阳电池、在研的晶格失配GaAs太阳电池抗辐射性能差异并不显著^[11]，故可考虑以晶格失配GaAs太阳电池结构为基础进行方案设计。

考虑到木星恶劣的辐射环境,可以在满足科学探测需求的前提下,优化木星探测轨道,舱外降低辐射总剂量,提高末期功率;如“朱诺号”木星探测器辐射总剂量为 $1.32 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ ^[12],总剂量相对较小,可以通过地面环境试验摸底寿命末期高辐射剂量下的GaAs太阳能电池性能,为方阵设计提供依据。

木星探测太阳能电池阵需在舱外辐射环境下服役,辐射剂量较高,需要结合木星科学探测轨道分析辐射总剂量等数据,为舱外电缆、聚酰亚胺薄膜、环氧胶及硅橡胶环境适应性分析提供依据。

3.2 LILT条件太阳能电池设计分析

JPL采用三结GaAs太阳能电池进行了低温低光强(Low Intensity-Low Temperature, LILT)条件测试,发现三结GaAs太阳能电池在LILT条件下展现了较为优异的性能^[13],故现阶段以GaAs太阳能电池为基础进行木星探测设计较为可行。

木星探测过程中太阳能电池需要同时在低温和带电粒子辐照条件下长期工作,这些服役环境与在轨高温工作的状态差异较大。为分析低温下辐射环境作用,JPL分析了^[14]总剂量 $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ 的1 MeV电子辐射下的太阳能电池测试数据,得到了 $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温下未发现明显退火效应的结论,但是在 $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温下尚待进一步研究。

NASA研究了^[15]三结GaAs太阳能电池效率与温度、太阳距离关系,在5.6 AU下太阳能电池效率从室温到 $-160 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现逐渐增高的现象,并提供了不同光照强度下短路电流 J_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最佳工作点功率 P_{max} 随温度变化曲线,为木星探测太阳能电池阵设计提供了数据参考;NASA研究^[15]同时认为三结GaAs太阳能电池在LILT条件下的异常现象可能与太阳辐照强度关系更大,而不是测试温度影响更大;这种现象可能与子电池或隧穿结有关,具体原因还有待进一步研究。

综上所述,木星探测中以高效多结GaAs太阳能电池为基础,提高KFB玻璃盖片厚度,增强GaAs太阳能电池抗辐射性能,加强LILT下太阳能电池性能分析测试,具有较好的方案可行性。

4 现阶段研究情况与下一步重点工作

通过以上论证可以发现,现阶段深空探测研究资料主要还是以NASA、ESA等欧美研究机构文献为主,国内深空探测领域在空间用太阳能电池LILT条件下输出特性测试、超低温太阳翼设计及强辐射环境方阵可靠

性研究等方面尚较为薄弱。

LILT环境涉及低温深冷设备、超低辐照强度稳态太阳光谱模拟器、真空环境设备等综合技术集成,目前国内高校或科研院所相关LILT测试设备方面尚有欠缺;国内高校或院所亟需开展元器件LILT下性能变化,太阳翼聚酰亚胺薄膜、面板、埋件及胶水低温性能匹配,长期低温环境下方阵连接可靠性等多方面的基础研究工作。

5 结论

本文通过深空探测用太阳能电池阵技术需求为牵引,以火星探测、木星探测为例,对相应深空探测任务环境特点、太阳能电池选型及方阵重点设计注意事项进行了分析工作,建议后续深空探测用太阳能电池阵方案设计时根据使用环境光谱条件,以空间用高效GaAs太阳能电池为基础,进行适应性分析或设计改进,通过任务剖面识别,进行充分分析或测试验证,获得太阳能电池器件的服役基础数据,进行功率分析为探测器供电;同时建议加强空间用太阳翼机械部分的力学、热学适应性分析,验证特殊应用环境下的可靠性。

目前国内部分研究基础尚显薄弱,下一步仍需以物理、化学、材料等基础科学研究为基础,以真空、低温等工程技术为支撑,开展太阳能电池、方阵及太阳翼机械部分等多方面的研究分析工作。

参 考 文 献

- [1] 张文佳,刘治钢,张晓峰,等.木星环绕探测器电源系统设计研究[J].*航天器工程*,2019,28(2):97-103.
ZHANG W J, LIU Z G, ZHANG X F, et al. Research of power system design of Jupiter orbiting probe[J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(2):97-103.
- [2] PHILIP P J, DAVID A S. Low intensity low temperature(LILT) measurements and coefficients on new photovoltaic structures, Photovoltaic Specialists Conference[C]//Conference Record of the Twenty Fifth IEEE. [S.l.]: IEEE, 1996.
- [3] 王建昭,田岱,张庆祥,等.木星环绕探测任务的内带电风险评估[J].*深空探测学报*,2017,4(6):564-570.
WANG J Z, TIAN D, ZHANG Q X, et al. Internal charging evaluation in Jupiter exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6):564-570.
- [4] USHA G, VASUDEVAN R, KRISHNAPRIYA G, et al. Establishing suitability of standard multijunction solar cells for Mars Orbiter Mission[C]//Photovoltaic Specialist Conference(PVSC). [S.l.]: IEEE, 2014.
- [5] 都雪.极低温Sn基焊点性能及寿命预测[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

- DU X. Sn-based solder joints property and life prediction in extremely low temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [6] STELLA P M, MARDESICH N, EDMONDSON K. Mars optimized solar cell technology[C]//Photovoltaic Specialists Conference(PVSC). [S.l.]: IEEE, 2008.
- [7] STELLA P M, MARDESICH N, EDMONDSON K. Mars optimized solar cell technology[C]//Photovoltaic Specialists Conference(PVSC). [S.l.]: IEEE, 2008.
- [8] STELLA P M, MARDESICH N, EDMONDSON K. Multijunction solar cell technology for Mars surface applications[C]//Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. [S.l.]: IEEE, 2006.
- [9] ZUREK RW, HABERLE R M. Dust in the Mars atmosphere[R]. USA: Ames Research Center, Jet Propulsion Laboratory, 1991.
- [10] 李果华, 强抗辐射漂移机制InP太阳电池的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- LI G H, investigation of extreme radiation hardness and drift-dominated INP solar cells[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [11] 李占行, 艾尔肯·阿不都瓦衣提, 玛丽娅·黑尼, 等. 1 MeV 电子辐照下晶格匹配与晶格失配GaInP /GaInAs /Ge 三结太阳电池辐射效应研究[J]. *发光学报*, 2017, 38(4): 463-469.
- LI Z H, ABUDUWAYITI A, HEINI M, et al. Radiation effects of lattice matched and upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge Triple-junction solar cells by 1MeV Electrons[J]. *Chinese Journal of luminescence*, 2017, 38(4): 463-469.
- [12] MCNATT J. Extreme environments solar power project enabling solar array power to the outer planets[C]//Space Photovoltaic Research and Technology(SPRAT)conference. Cleveland, OH, USA: SPRAT, 2019.
- [13] STELLA P, MUELLER R, DAVIS G, et al. The environmental performance at Low Intensity, Low Temperature(LILT) of high efficiency triple junction solar cells[C]//Proceedings of the 2nd IECEC. USA: IECEC, 2004.
- [14] STELLA P M, MUELLER R L, SCRIVNER R L, et al. Preliminary low temperature electron irradiation of triple junction solar cells[C]//Proceedings of the 19th Space Photovoltaic Research and Technology Conference. China: [s.n.], 2007.
- [15] SCHEIMAN D A, SNYDER D B. Low intensity low temperature(LILT) measurements of state of the art triple junction solar cells for space missions[C]//Photo-voltaic Specialists Conference (PVSC). USA: IEEE, 2008.

作者简介:

王文强(1988-), 男, 工程师, 主要研究方向: 空间太阳能电池阵设计。

通讯地址: 上海空间电源研究所(200245)

电话: (021)24187662

E-mail: vincentwong0912@foxmail.com

杨洪东(1975-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间太阳能电池研究与应用。**本文通讯作者。**

通讯地址: 上海空间电源研究所(200245)

电话: (021)24178751

E-mail: hongdong_yang@163.com

Solar Cell Array Design for Deep Space Exploration Missions

WANG Wenqiang, YANG Hongdong, YANG Guang, WANG Jiayu, WU Qing, GU Chunjie

(Department of Physical Power, Shanghai Institute of Space Power, Shanghai 200245, China)

Abstract: With the advancement of the Moon exploration and deep space exploration missions, aiming at the solar cell array adopting low temperature, low light intensity and severe radiation for deep space detection, and based on the analysis of solar cell arrays of Mars and Jupiter exploration missions, the solar cell array selection methods, array design and advices on verification tests are presented according to the analysis of mission environment, providing reference for solar cell array design of deep space exploration missions in China.

Keywords: solar cell array; deep space exploration design; low temperature low intensity

Highlights:

- The technical requirements of solar cell array for deep space missions are analyzed.
- The solar cell array design is analyzed for Mars orbiting mission.
- The solar cell array design is analyzed for Mars surface patrol mission.
- The solar cell array design is analyzed for Jupiter orbiting mission.
- The difficulties of solar cell array design for deep space missions are presented and the future key projects are proposed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]

(上接第40页)

Research on Power System Development of Chinese Deep Space Exploration

LEI Yingjun, ZHU Liyin, ZHANG Wenjia

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

Abstract: Aiming at the key tasks of deep space exploration such as lunar exploration, small celestial exploration, Mars exploration, Jupiter and interplanetary exploration in China, the specific requirements of the power system are proposed based on the analysis of the characteristics of individual detection missions. Finally, the power system requirements of all deep space exploration missions are summarized. The main development requirements of power system for deep space exploration missions in China are proposed, including wide temperature anti-irradiation solar array, light and small intelligent power control device, high power density power system topology, high efficiency and high reliability thermoelectric conversion technology, providing reference for the research and design of deep space exploration power system.

Keywords: deep space exploration; space power system; lunar exploration; Mars exploration

Highlights:

- The power system requirements of China's follow-up key deep space exploration missions are analyzed and summarized.
- Wide-temperature and anti-irradiation solar arrays development requirement adapted to deep space mission is proposed.
- Light and small intelligent power control device development requirement adapted to deep space mission is proposed.
- High power density MPPT power system topology development requirement adapted to deep space mission is proposed.
- High efficiency and high reliability thermoelectric conversion technology development requirement adapted to deep space mission is proposed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]