

太阳系边际探测能源需求及技术途径分析

韩承志¹, 张焯¹, 李飞¹, 赵泽龙², 张海旭², 王三丙³, 汪群博⁴, 唐玉华^{4,5}

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 3. 中国工程物理研究院, 绵阳 621900;
4. 深空探测实验室, 合肥 230093; 5. 探月与航天工程中心, 北京 100190)

摘要: 受飞行距离远、任务时间长的限制, 太阳系边际探测器须解决长寿命、大功率、高可靠的能源技术问题, 这是实施太阳系边际就位探测的基本条件及系统级关键技术之一。通过对国内外超远距离地外科学探测情况的研究, 依据中国太阳系边际探测任务实施论证方案, 梳理了太阳系边际探测器能源系统需求, 并分析核能源系统技术途径和技术难点, 可为探测任务的深入论证提供参考。

关键词: 太阳系边际探测; 能源系统; 技术难点

中图分类号: V44

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0476-13

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250030

引用格式: 韩承志, 张焯, 李飞, 等. 太阳系边际探测能源需求及技术途径分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 476-488.

Reference format: HAN C Z, ZHANG H, LI F, et al. Analysis of energy demand and technical approach in solar system boundary exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 476-488.

引言

迄今为止人类空间探测活动主要集中在距离太阳数个日地距离(AU)范围内, 仅有5颗探测器飞行距离超过70 AU并飞向太阳系边际, 特别是“旅行者1/2号”(Voyager 1/2)探测器相继进入行星际空间并传回了重要的信息, 进一步延伸人类的探索范围, 突破太阳风层顶, 针对性开展星际空间探测, 备受国际广泛关注。在此背景下, 世界主要航天大国均提出了针对太阳系边际的就位探测方案。

深空探测是中国航天领域重要发展方向, 探月工程和火星探测任务的顺利实施, 标志着中国在深空探测领域已经打下坚实的基础。迈向更深远的太空、具备太阳系全域到达能力是中国综合发展深空探测能力的必然目标。

太阳系边际探测任务的论证和实施, 在工程上将突破行星际轨道设计、新型体制先进高效能源系统、超远距离深空测控通信、智能化自主导航等多项关键技术体系, 可全方位提升航天工程技术水平。在科学上将揭开太阳风日球层特性及其与星际介质相互作用机制、行星空间天气环境、行星系统特性等神秘面纱, 有望成为太阳系研究的新起点, 为人类深入了解太阳系起源和演化提供重要的科学支撑。因此开展

太阳系边际探测任务具有极高的工程意义和科学探测价值。

根据中国太阳系边际探测的任务设想, 探测器将抵达距离太阳100 AU处, 对太阳风与星际风交会的区域开展科学探测, 任务飞行距离远(大于100亿km)、执行时间长(长达30年), 探测过程环境恶劣复杂(强辐射、温度低), 光照条件差(太阳光照随距离呈现指数下降^[1])。中国传统深空探测任务能源采用以太阳能为主, 化学电池为辅的能源体系, 这种体系难以适应太阳系边际探测任务。开发新的能源体系、突破原有能源技术是国际上相关研究共同面临的难题, 而能源方案的选择不仅决定任务的可行性, 同时对科学设备搭载能力, 成果丰富程度也影响深远。

1 太阳系边际探测发展历程

人类历史上共有5个探测器达到太阳系逃逸速度(图1), 包括“先驱者10/11号”(Pioneer 10/11), “旅行者1/2号”以及“新视野号”(New Horizon)探测器^[1-3]。这些任务最初目标是飞越探测外行星或矮行星, 在完成既定任务后继续向太阳系边际飞行, 截止目前还没有专门针对太阳系边际开展就位探测的有关任务。

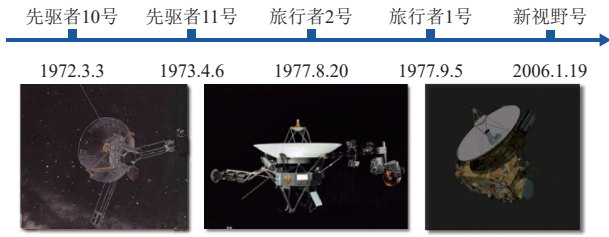


图 1 5 颗进入太阳系逃逸轨道的探测器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of five detectors entering the escape orbit of the solar system

“先驱者 10 号”于 1972 年 3 月 3 日从佛罗里达州的 36A 航天发射中心搭乘阿特拉斯-半人马运载火箭 (Atlas SLV 3C) 发射, 达到 14.3 km/s 的分离速度, 2003 年 1 月在距离地球 122.3 亿 km 处失联。“先驱者 11 号”在 1973 年 4 月 6 日在佛罗里达州的卡纳维拉尔角发射, 飞行 67.5 亿 km 于 1995 年 9 月底失联。“旅行者 1 号”于 1977 年 9 月 5 日发射, 发射 $C3 = 105.5 \text{ km}^2/\text{s}^2$; “旅行者 2 号”于 1977 年 8 月 20 日发射, 发射 $C3 = 102.4 \text{ km}^2/\text{s}^2$ 。2017 年 9 月, “旅行者 2 号”距离太阳 115.32 AU, 而“旅行者 1 号”距离太阳 139.64 AU^[2-3]。“新视野号”于 2006 年 1 月 19 日搭乘“宇宙神 5 号” (Atlas V) 运载火箭发射, 发射 $C3 = 166 \text{ km}^2/\text{s}^2$, 探测器分离速度达到 16.26 km/s, 是目前人类发射速度最大的探测器, 于 2019 年 1 月到达柯伊伯带目标天体 2014 MU69 附近, 其能源将在 2025 年无法满足通信需求^[4-8]。

目前“旅行者 1 号”已经通过太阳风层顶, 并正在持续刷新人类探测的最远距离记录, 其它 4 个探测器则位于太阳系逃逸轨道上, 正前往星际空间。这 5 颗探测器能源方案汇总见表 1, 从表中可见这些任务均采用同位素温差电源 (Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG) 以解决深远空长期电能源需求, 并配备多颗同位素热源 (Radioisotope Heating Unit, RHU) 实现深冷空间条件下的设备保温。

表 1 5 颗太阳逃逸探测器方案特点汇总表^[9-16]

Table 1 Summary of characteristics of five detectors^[9-16]

任务名称	先驱者 10/11 号	旅行者 1/2 号	新视野号
发射质量/kg	258	773	478
能源方案	4 个 SNAP-19 RTG	3 个百瓦级 RTG	1 个百瓦级 RTG
	电源: 155 W	电源: 470 W	电源: 238 W
	12 颗 1 W RHU 同位素热源	9 颗 1 W RHU 同位素热源	

“先驱者 10/11 号”探测器总功耗 100 We, 配置 4 个 SNAP-19 同位素温差电源, 每个重量约 15 kg, 分别装在夹角 120° 的两个展开桁架上, 距离探测器中心约 2.75 m。电源系统寿命初期总输出功率约 155 W, 年衰减率为 9~10 We/Y, 到达土星时为输出电功率为 100 We。“旅行

者 1/2 号”配置 3 个百瓦级 RTG, 每个 RTG 直径 40.6 cm, 长 50.8 cm, 质量为 39 kg, 发射时可提供 30 V、470 We 的直流电能, 2019 年后系统输出功率下降为 335 We, 预估 2032 年能源难以支持探测器与地面基本通信。“新视野号”探测器功率需求为 200 We, 配置 1 个百瓦级 GPHS-RTG, 其重量约 57 kg, 发射时可提供 30 V、238 We 的电能, “新视野号”在科学探测模式下耗电 176 We, 整器最小功耗为 160 We, 仅用于操作系统和发射接收器, 因此至柯伊伯带天体仍有足够电能开展工作^[4]。综上, 上述 5 颗探测器均是采用百瓦级同位素温差电源的小型探测器。

作为深空科学探测的前沿, 太阳系边际探测概念集中了对人类十分重要的众多科学问题。美国《2014—2033 年日球物理路线图》将太阳系边际作为最高优先级的任务之一^[17]。从 20 世纪 80 年代起, 美国欧洲等多个国家、机构协同合作, 持续不断地提出并开展了多种针对太阳系边际或行星际穿越探测概念方案研究: “星际先驱计划” (Interstellar Precursor Mission)、 “千天文单位计划” (Thousand Astronomical Units, TAU)、 “星际探针” (Interstellar Probe)、 “创新星际探索探测器” (Innovative Interstellar Explorer, IIE)、 “星际日球层顶探针/日球层边界探索计划” (Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Boundary Explorer, IHP/HEX)、 “KISS 星际介质探测器” (KISS-ISM)、 “太阳风层顶静电快速传输系统” (Heliopause Electrostatic Rapid Transit System, HERTS) 等 (见图 2)。

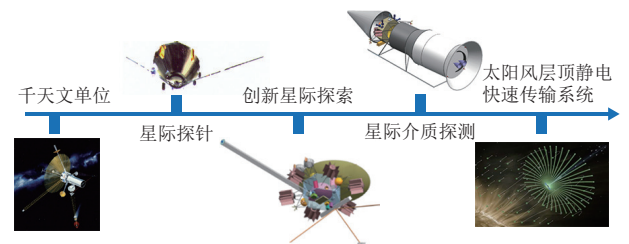


图 2 多种太阳系边际探测概念示意图

Fig. 2 Schematic diagram of various boundary detection concepts in the solar system

太阳系边际探测概念任务设计均飞向 100 AU 以远, 任务周期长达数 10 年 (见表 2)。由于常规太阳能和化学电池无法满足任务用电需求, 这些方案研究了多种能源方案以应对面临的困难, 包括先进的 RTG 方案、核裂变反应堆电源方案、激光无线传输方案等, 霍金还提出了通过数米级光帆传送纳米级航天器的设想。不难看出国际上普遍认为太阳系边际探测需要突破常规航天器能源技术体系才能实现。

表2 太阳系边际探测概念方案汇总表^[17-29]Table 2 Summary of conceptual plans for solar system marginal exploration^[17-29]

任务名称	质量/ kg	目标/ AU	周期/ 年	能源方案
千天文单位计划	25 000	1 000	50	兆瓦级核反应堆系统
星际探针探测器	250	400	30	先进RTG、百米级太阳帆
创新星际探索探测器	1 200	200	30	先进RTG
星际日球层顶探针	624	200	25	先进RTG、百米级太阳帆
KISS星际介质探测器	16 800	200	30	先进RTG
太阳风层顶静电快速传输系统	—	100	10	先进RTG
星际先驱任务的突破性推进体系	数百	500	12	地面兆瓦级激光器阵列对准航天器轻质光伏阵列

综合表1已经实施的探测器方案和表2多种太阳系边际探测概念方案,国际上对于太阳系边际探测的能源方案主要集中在同位素核能源、核反应堆能源、超大型太阳帆、激光阵列等技术途径中。其中采用同位素核电源体系的航天器规模相对较小,约为百千克级别,这类方案常结合化学推进,并利用行星引力弹弓效应实现太阳系逃逸。采用核反应堆的航天器则为大型航天器,质量达到数吨至数十吨,常与先进电推进技术组合设计。利用激光光束发散角小,能量损失相对小的特点,在地面建立超大型激光阵列,采用激光传输也是解决边际探测能源问题的途径之一。因此设计先进的能源方案是太阳系边际探测任务实施的关键点。

2 太阳系边际探测能源需求分析

中国深空探测发展的目标是由近及远、科学驱动、有的放矢^[5]。为探索太阳系演化和起源、构建太阳系全域到达能力,中国规划开展针对太阳系边际鼻尖方向和尾部方向探测任务^[6],由于任务要求极高的逃逸速度增量,仅靠运载火箭难以实现,考虑近年天体相位和工程实施能力,鼻尖任务可以借力木星,尾部任务可以借力木星和海王星,如图3所示。

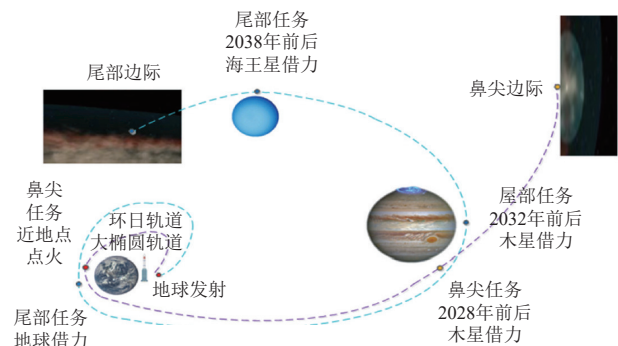


图3 太阳系边际探测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of marginal detection in solar system

根据太阳系边际探测方案设想,任务具有飞行距离远(>100 亿km)、任务执行周期长(超过25年)、就位探测太阳光线弱($\leq 10^{-4}$ W/m²)、温度十分寒冷(接近背景温度4 K)(即“极远、极暗、极寒和超长期”)的特点。

1) 随距离增加光照不断减弱,需独立自主供电。因太阳辐射能量密度与距离平方成反比,在近地轨道距太阳约1 AU处太阳常数平均约为1 367 W/m²,木星与太阳平均距离约为5 AU,光通量已经降低到不足50 W/m²^[7],是地球轨道太阳常数的3.4%。依据美国2011年发射的“朱诺号”(Juno)木星探测器数据,其太阳能电池板总面积约60 m²,电功率输出420 W(任务末期),总重达到340 kg,约占探测器重量的21%。而对于更远的土星,平均光照强度将会减少到15 W/m²,到100 AU处的太阳光通量仅为 10^{-4} W/m²,若采用太阳能作为整器能源,太阳帆板的面积需等比例扩大,将达上千甚至上万平方米规模,若进一步考虑光伏电池低温低光强效应(Low Intensity Low temperature, LILT)^[8-9]、长任务周期带来光伏器件的性能衰减等因素,所需的太阳电池阵面积将会更大,其体积、质量资源消耗巨大,因此常规太阳能发电不能满足太阳系边际任务能源需求。而化学电池由于自身不产生能源,其存储的能量十分有限,更难以满足太阳系边际任务。综上,太阳系边际探测任务需要不依赖外界环境的独立自主能源,为任务提供必要的电能。

2) 大功率用电要求高

太阳系边际探测任务需要通过天体借力以实现较小资源代价下达到较高逃逸速度,木星借力时地面与星上通讯延时超过1 h,探测器需要具备一定的自主导航能力,以确保借力过程任务安全。而对于尾部任务,海王星借力段通信距离约30 AU,不仅通信延时极大,且目前地面定轨精度无法支持探测器实施海王星借力过程中轨道机动需求,也需要探测器具备自主导航能力借力飞行。自主导航涉及多台太阳敏感器、星敏等多种导航敏感器和动量轮、控制单元等设备,工作期间功率需求达到百瓦级,电能需求显著。

太阳系边际探测科学数据在任务中后期有较大传输需求,包括多种光谱图像数据、中性和带电粒子探测数据、波和射电探测数据等。因此探测任务需配置X、Ka频段高增益天线,以满足超远距离远下数据传输需求。两种频段通信行波管放大器均有超过百瓦的用电需求。

在任务实施过程中,随着探测器与太阳距离越来

越远, 其外热流呈指数下降, 周围环境温度极低, 导致探测器大量设备均处于极低温环境中, 需要采取一定的热控措施, 以满足设备工作或者存储环境温度。

为了丰富科学产出, 采用电推进方式可以极大提高推进剂利用效率, 显著提高探测器载荷搭载能力。但不论是离子推力器^[10]或者霍尔推力器^[11], 两者利用电场或者磁场将工质电离后加速喷出产生推力, 电推进系统工作时耗电量十分巨大, 达到数千瓦以上的用电需求。

综上所述, 太阳系边际探测任务能源不仅有不依赖外部环境需独立自主供电的要求, 且在包括通信、控制、热控等诸多方面均有超过数百瓦级用电需求。在巡航低功耗模式下, 探测器仅进行姿态控制和对地通信和基本星务管理时, 功耗在200 W内; 当探测器同时进行姿态控制、科学探测、星务管理、数据下传时, 星上功耗在300~500 W; 而当探测器采用电推进系统加速飞行时, 其用电量可达10千瓦级, 因此在能源技术途径选择时还要充分考虑不同阶段大功率用电需求。

3 能源技术途径分析

如前文所述, 国际上对这类极长周期、极远飞行距离的任务提出了多种能源方案, 以成功应用的RTG为主, 还包括激光阵列传输能源、巨型太阳帆等技术途径。激光传输能源需要地面建立超大型激光阵列, 任务过程中其指向精度与距离呈现平方反比关系, 这种技术途径要求传输系统有极高的指向精度和稳定性, 同时容易受到气候影响而中断与探测器的联系, 任务实施难度和风险较大。巨型太阳帆不仅消耗探测器的质量资源, 制约科学探测数据获取的能力, 同时探测器整体结构挠性显著增加, 显著增加了探测器姿轨控难度和任务风险。上述设想均难以满足太阳系边际任务长期、连续、自主、可控及较大功率能源需求的特点。综合考虑中国深空技术发展趋势及所选能源技术在未来的可持续扩展应用范围, 空间核电源是太阳系边际探测任务的首选能源解决方案。

空间核电源, 包括同位素核电源及核反应堆核电源(鉴于核聚变技术尚处于理论研究阶段, 本文反应堆电源指核裂变反应堆电源), 通过核衰变能或者核裂变能产生热, 进一步通过热电转换单元实现电能输出。核电源热电转换方式包括静态转换发电和动态转换发电两种。典型的静态转换有温差电转换、热离子转换、碱金属转换、磁流体发电以及热光伏技术; 典型的动态转换有朗肯循环、布雷顿循环和斯特林循

环。动态转换和静态转换中的热光伏技术均可以达到20%以上热电转换效率, 而温差、热离子转换效率相对较低, 难以超过15%^[15-17]。

20世纪50—60年代, 空间核电源特别是空间堆电源取得快速发展, 但后期很快被日趋成熟的太阳能发电技术替代而几乎停滞。同位素核电源功率密度小, 早期发展缓慢, 但是其结构简单、安全性高, 为后来火星、木星探测以及太阳系穿越探测等任务提供了重要的能源支撑。国际上普遍认为同位素核电源多适用于百瓦级探测任务的需求, 而对于用电需求达到数千瓦及以上的任务, 裂变反应堆电源则更具优势, 如图4所示^[12]。目前在轨获得实际应用的核电源主要包括同位素温差核电源、热离子核反应堆电源以及热管温差核反应堆电源。美俄空间核能发展基础扎实, 已实现在轨应用。其中苏联(俄罗斯)发射的38颗空间核电源卫星中, 2颗采用热离子核反应堆(TOPOAZ)电源, 34颗采用温差核反应堆(BUK)电源, 形成了ROMASHKA、BUK、TOPOAZ-1/2等两代多个系列的空间核反应堆电源产品, 还有2颗采用同位素温差电源。美国发射了1颗温差核反应堆电源系统进行技术验证, 其它任务如“旅行者”“先驱者”“好奇号”(Curiosity)、“毅力号”(Perseverance)等均采用RTG^[13-17]。

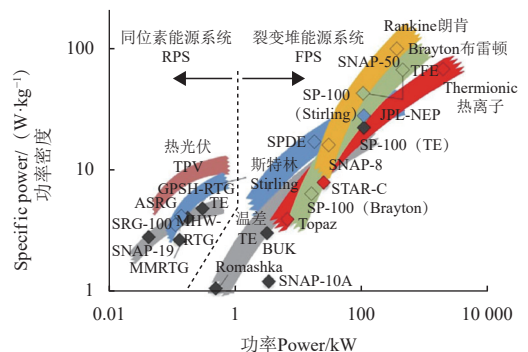


图4 不同类型核电源功率密度

Fig. 4 Power density of different types of nuclear power sources

因此, 针对太阳系边际任务时间、空间跨度大的特点, 整个任务过程中需独立自主供电、不能受外部环境因素影响, 同时用电需求在数百瓦到十千瓦水平, 可以联合探测器最大功耗设备电源需求, 选择同位素核电源或者空间核反应堆电源。

3.1 同位素核电源

同位素核电源(Nuclear battery或Radioisotope power source)是利用放射性同位素衰变放出的载能粒子(如阿尔法、贝塔粒子和伽玛射线), 并将其能量转换为电能的装置, 能够提供百瓦级电能源供应, 可

支持基于化学推进方案的太阳系边际探测任务。同位素核源和换能装置是同位素核电源的两大核心部分。

1) 同位素核源

同位素核源的选择要综合高的比功率、长寿命以及高的安全性、可靠性和稳定性。常见的放射性同位素约2 000多种,其中有1 900余种由于半衰周期过短,不适用于同位素核电源的核源材料,还有70~80种同位素具有穿透力很强的放射性且难以屏蔽,不仅对设备有不利影响同时研制测试过程中对人员及周围环境也有污染,也不适于作同位素核电源的核源材料。进一步排除物理化学性质不稳定的20多种同位素,可用作同位素核电源的核源主要有钴-60 (^{60}Co)、锶-90 (^{90}Sr)、钌-106 (^{106}Ru)、铯-137 (^{137}Cs)、铈-144 (^{144}Ce)、钷-147 (^{147}Pm)、铥-170 (^{170}Tm)、钋-210 (^{210}Po)、钷-238 (^{238}Pu)、镅-241 (^{241}Am)、镅-242 (^{242}Cm)、镅-244 (^{244}Cm)等10多种。这些核素的半衰期和特性见表3。

表3 常见核电源同位素汇总表^[18-21]

Table 3 Common isotopes used in nuclear power sources

同位素	半衰期	活度 ($\text{Ci}\cdot\text{g}^{-1}$)	比释热 ($\text{W}\cdot\text{g}^{-1}$)	原料 状态	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
^{60}Co	5.272 a	1 130	17.4	金属	1 480
^{90}Sr	28.79 a	142	0.96	SrTiO_3	1 910
^{106}Ru	373.59 d	3 394	33.1	金属	2 310
^{137}Cs	30.167 a	87	0.42	CsCl	646
^{144}Ce	284.91 d	3 180	25.6	Ce_2O_3	2 190
^{147}Pm	2.6234 a	928	0.33	Pm_2O_3	2 130
^{170}Tm	129 d	6 048	13.6	Tm_2O_3	2 375
^{210}Po	138.37 d	4 500	141	金属	255
^{238}Pu	87.4 a	17	0.56	PuO_2	2 250
^{241}Am	432.2 a	3.46	0.114	AmO_2	—
^{242}Cm	162.8 d	3 320	120	Cm_2O_3	1 950
^{244}Cm	17.6 a	81	2.8	Cm_2O_3	1 950

注: 二氧化镅达到1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 将缓慢分解并放出氧气。

其中 ^{210}Po 、 ^{238}Pu 、 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm 主要为 α 衰变, ^{90}Sr 、 ^{106}Ru 、 ^{147}Pm 、 ^{170}Tm 主要为 β 衰变, ^{60}Co 主要为 γ 衰变, ^{137}Cs 、 ^{147}Pm 、 ^{144}Ce 同时存在 β 和 γ 衰变,考虑太阳系边际任务长达30年的任务执行周期, ^{106}Ru 、 ^{144}Ce 、 ^{170}Tm 、 ^{210}Po 、 ^{60}Co 、 ^{242}Cm 等几种同位素不宜作为较优选项。进一步考虑同位素放射源需有稳定的单质或氧化物,因此同位素核源主要在 ^{90}Sr 、 ^{238}Pu 、 ^{244}Cm 等几种元素里进行选择,国际上使用最多的是 ^{238}Pu 和 ^{90}Sr 两种。 ^{90}Sr 的半衰期28年,衰变过程发射的 β 粒子在辐射伏特效应能量转换电池和电磁辐射能量转换核电池中有较优的发电效果。 ^{90}Sr 是裂变堆的主要放射性废料之

一,有较为广泛的获取途径。而对于空间用同位素核电源系统,一次性长期稳定输出是最重要的应用需求,因此核源半衰期越长越好。 ^{90}Sr 的半衰期较 ^{238}Pu 短很多,20年的时间后其输出功率将下降为原有的60%,相对而言更适于地面或海洋等区域核电源的应用。 ^{241}Am 具有长达432年的半衰期,但其比释热较低,初期释放同样能量的镅,其用量超过钷的5倍,对于周期30年左右的探测任务,其优势尚不足以体现,但如果任务时间达到50乃至100年以上,其优势逐渐凸显。

综合太阳系边际任务需求,考虑到使用寿命、功率密度、和防护措施以及物理化学性质, ^{238}Pu 是制造核热源体的首选同位素,具有较长的使用寿命(半衰期87.4年),即便20年后依然能够产生初始状态下约80%的能量。 ^{238}Pu 主要为 α 衰变, α 射线穿透能力极弱几乎可以被一张纸阻挡,且能量沉积率高,次级产物 γ 射线少,因此外照射剂量低,所需要的屏蔽材料少,减少了发射载荷的压力。同时二氧化铈陶瓷体降低了 ^{238}Pu 金属毒性大、粉末易扩散的危害。除此之外, ^{241}Am 可以作为同位素核源的备选方案。

2) 热电转换器件

将放射性同位素的衰变能转换为电能的机制有十几种,如“放射性同位素温差电源^[22]”“同位素热光伏电源”(Radioisotope ThermoPhoto Voltaic,简称RTPV)^[23]、“同位素斯特林电源(Advanced Space Radioisotope Generator, ASRG)^[24]”“辐射伏特效应^[25]”“衰变耦合磁共振”“往复式震荡悬臂梁^[26]”“静态热离子换能器^[27]”“碱金属热电转换器”(AMTEC)^[28]”“同位素热声能源系统^[29]”等,这些转换机制是将衰变能转换为热能、化学能或者机械能,再将其转换为电能。

其中最成熟应用最广泛的是RTG,并且已经有超过45年在轨工作验证。此外从表4可以看出,斯特林和热光伏发电技术因其具有高(可达20%以上)的转换效率成为近年国际上空间核电源研究的热点,相比同位素温差发电比功率约2.8~4.3 W/kg,同位素热光伏和同位素斯特林发电均可以达到5 W/kg以上,较高质量比功率加大了各国对该技术路径的研发投入^[30]。碱金属发电技术虽然也就有高转换效率,但是其电解液密封、腐蚀、电极寿命以及规模等问题制约了其从原理验证向工程样机转化的发展。同位素热光伏电源和同位素斯特林电源均已经进入工程化验证阶段,部分关键技术已经突破,具有较高的应用前景^[31-32]。但是进一步考虑斯特林等动态发电技术存在活动部件卡滞导致能源新系统完全失效的风险,对于太阳系边际任务

这类能源系统单一并且要求长期高可靠高稳定性的特点, 完全失效的风险相对较难以承受。因此同位素热光伏发电技术作为静态发电技术, 兼具高的转换效率和高可靠性, 在大幅减缓对稀缺资源²³⁸Pu的用量基础上, 能够适应长达25~30年的寿命需求, 极具潜力成为未来空间同位素核电源的新星^[33-36], 鉴于当前处于工程化验证阶段, 其寿命和衰减特性进一步确认验证后, 可以作为备选方案, 但短期内鉴于温差发电技术极高的成熟度和广泛应用应作为较优方案, 不同发电技术路线比较见表4。

表 4 不同发电技术路线比较^[37-40]

Table 4 Comparison of different thermoelectric conversion technology paths^[37-40]

类型	同位素温差发电 RTG	同位素热光伏发电 RTPV	同位素斯特林发电 RSRG	同位素碱金属电源 AMTEC	同位素热离子电源 RTIGs
转换效率/%	5~7	>20	>20	15~20	8~10
质量比功率/(We·kg ⁻¹)	2.8~4.3	5~7	6~8	4~5	3~4
成熟度	9	5~7	5~7	3~4	6

在同位素温差电源中, 热电材料作为换能元件, 其选型决定了电源系统转换效率、核源用量、长期工作稳定性等关键特性。常用的热电材料主要有碲化铋、碲化铅、方钴矿、半哈斯勒、锗硅等, 早期热电材料选用碲化铋、碲化铅等, 转换效率较低不高于6%, 近年主要选用锗硅合金, 效率在6%~7%。鉴于同位素核源²³⁸Pu获取难度大、存量少, 宜发展转换效率高的热电材料作为温差发电器件, 以节约同位素核源的用量, 如表5中方钴矿⁻(SKD)和SKD/Bi₂Te₃等。

表 5 热电材料性能比较表^[41-46]

Table 5 Comparison of properties of thermoelectric conversion materials^[41-46]

热电材料	Bi ₂ Te ₃	PbTe	方钴矿 ⁻ (SKD)
工作温度/°C	<300	<500	<550
转换效率/%	4~8	4~815	8~10.4
热电材料	半哈斯勒(HH)	SiGe	SKD/Bi ₂ Te ₃
工作温度/°C	<700	<1000	<550
转换效率/%	6~9.6	6~7	6~12

综上所述, 用于太阳系边际探测任务的同位素核电源, 首选温差发电体系, 在兼顾寿命可靠性要求的同时, 温差热电材料应当以方钴矿⁻(SKD)、SKD/Bi₂Te₃等高转换效率器件材料为优选。其次可以发展具有高转换效率的热光伏发电技术作为备选方案。

3.2 核反应堆电源

不同于同位素核电源利用同位素自发衰变能产生

电能的方式, 核裂变反应堆则是将可控链式裂变反应释放的能量转换为电能的装置, 可提供十千瓦级以上的电能源供应, 支持基于电推进方案的太阳系边际探测任务。空间核反应堆选型的关键因素包括燃料类型、反应堆中子能谱、热电转换方式、热传输及排散方式4个方面。

1) 反应堆核燃料

核裂变反应堆燃料主要包含: 铀-235、钚-239、铀-233, 其中以²³⁵铀应用最为广泛, 也是早期美俄发展空间核裂变堆的主要原料。

燃料形式主要包括以氧化铀、碳化铀、氮化铀为代表的陶瓷型, 和以铀钼合金、铀-氢化锆为代表的金属型等^[51-53], 从表5中可以看到, 不同的技术路线有不同的优缺点。综合分析, 金属型燃料铀密度高, 导热性能好, 易于加工可实现小型化紧凑型设计, 但其抗辐照性能差, 高温条件下容易发生相变, 易发生肿胀, 稳定性较差。陶瓷型燃料稳定性好, 抗辐照能力强, 高温下稳定性比金属型好, 其中氧化铀是目前应用最广泛的陶瓷型燃料, 但是导热性能差、燃料密度低限制了反应堆参数的提升, 有潜力成为第四代核反应堆燃料的碳化铀和氮化铀^[51-52], 虽然比氧化铀导热率显著提高, 但是其工艺尚未成熟、存在与包壳反应等问题, 也还没有获得实际应用, 相关数据积累少, 当前阶段还不具备应用在太阳系边际任务中的条件。综合考虑, 对于低能耗、低温十千瓦以内的小功率反应堆可以发展U-Mo合金型为代表的金属类燃料反应堆, 相反十千瓦以上大功率空间反应堆仍优选氧化铀作为堆芯燃料。考虑到太阳系边际任务长达数十年的使用寿命, 即便是最成熟、应用最广泛的氧化铀燃料, 还需要在成分、工艺、相容性等方面展开深入研究和验证^[53]。

2) 反应堆能谱类型

反应堆按照中子能谱可以分为快中子堆和热中子堆, 二者主要区别在于是否将裂变中子慢化后持续进行链式裂变反应。根据表6, 热中子堆虽然技术成熟度高, 地面应用较广泛, 使用经验丰富, 但由于需要慢化剂降低中子能量, 因此结构设计复杂, 堆芯较为庞大, 考虑空间用质量资源受限显著, 且太阳系边际任务执行周期长, 因此宜选用快堆作为空间任务堆型, 同时这种选择也是国际设计主流。而快中子堆设计时, 由于中子通量高、结构紧凑, 堆内器件受到的中子辐射较强, 因此对材料性能和屏蔽提出了更高的要求。反应堆能谱类型比较见表7。

表6 常见核燃料特点汇总表

Table 6 Comparison of common nuclear fuel characteristics

燃料	优点	缺点	应用情况
UO ₂ 陶瓷	1.工艺成熟, 生产体系完备, 物理化学数据全面 2.熔点温度高, 稳定性好; 3.燃料肿胀小	1.轴密度低, 增加了堆芯体积与质量 2.热学性能参数相对较差	前苏联TOPAZ空间堆方案, 在轨应用; 美国SPACE-R空间堆方案, 未应用 ^[47-48]
UC陶瓷	铀密度相对高, 热学性能参数相对较好, 堆芯可小型化、紧凑化	1.材料相容性差, 肿胀较大 2.加工技术不成熟, 性能参数缺乏	前苏联ROMASHKA空间堆方案, 未应用 ^[47]
UN陶瓷	1.轴密度高, 热学性能好, 堆芯可小型化、紧凑化; 2.同等温度/燃耗深度下, 燃料肿胀幅值小、裂变气体释放率相对小	1.材料相容性差, 与包壳发生反应; 有安全隐患 2.加工技术不成熟, 性能参数缺乏	美国SP-100空间堆方案, 未应用 ^[49]
U-Mo合金	铀密度高, 装药质量小, 堆芯可小型化、紧凑化	1.体积膨胀、相组成变化、析氢等 2.加工技术不成熟, 性能参数缺乏	前苏联BUK空间堆方案, 并在轨应用; 美国Kilopower空间堆方案, 研发中 ^[47,50]
U-ZrHx合金	导热率高, 堆芯可小型化、紧凑化	应用环境受限, 加工技术不成熟, 性能参数缺乏	美国SNAP-10A空间堆方案, 在轨应用

表7 反应堆能谱类型比较

Table 7 Comparison of energy spectrum types for nuclear reactors

类型	优点	缺点
热中子谱	1.核燃料使用量少 2.技术相对成熟	1.堆芯体积大 (需要大量慢化剂材料) 2.结构设计复杂 (慢化剂选择与结构设计要求高) 3.同等体积下运行周期短
快中子谱	1.堆芯体积小 2.结构设计简单、紧凑, 无中子慢化单元 3.同体积下运行周期长	1.核燃料使用量大 2.技术成熟度低, 部分设计技术与材料考核需要额外的验证

3) 反应堆热电转换

核反应堆热电转换与同位素热电转换技术途径一致, 包括温差发电、热离子发电等的静态发电方式, 及斯特林、布雷顿等动态发电方式, 如图4。在发电转换方式方面, 近年俄罗斯重点发展兆瓦级空间堆电源, 采用布雷顿发电系统, 主要适用于载人火星及太空运输。美国则广泛涉足布雷顿 (“普罗米修斯计划”中采用的反应堆发电方式)、斯特林 (星表千瓦级反应堆发电方式) 等动态发电技术体系, 并已经建成斯特林地面原型堆^[54-55]。不难看出基于动态发电技术发展大功率空间堆电源是未来重要趋势之一, 但上述任务设计中寿命均在10年或者以下, 动态发电技术由于其复杂结构和运动部件, 使其长期工作下可靠性受到极大挑战, 考虑太阳系边际任务数10年的任务周期和10千瓦级能源需求, 对电能源系统有高安全性和可靠性的要求, 且在远距离下核反应堆是探测器唯一能量来源, 动态发电装置寿命和可靠性面临挑战。静态发电方式中热离子发电受到阴极管寿命影响, 通常认为寿命不超过5年, 其它技术路线在反应堆发电中的应用还处于早期研究阶段。综合考虑寿命需求以及技术和工艺成熟度, 温差发电是当前本任务中核堆电源的优

选发电技术路线。

4) 反应堆传热及排散方式

与同位素电源不同, 核裂变反应堆功率很大, 因此热排散问题是反应堆电源设计时须重点考虑的因素之一。10千瓦级发电反应堆, 其热功率可达200 kW以上, 需要进行大功率辐射散热系统设计, 将核堆内部的剩余热量安全导出, 并通过散热装置向外空间辐射散热实现热排散。因此反应堆热设计需要考虑核堆电源高温端热传导出设计, 和对外空间辐射散热设计两大部分。

常用的核反应堆电源向外传热技术途径包括流体回路、热管两种。流体回路传热由泵驱动, 实现去离子水在环路中的流通, 从而将热量导出, 这种方式受到驱动泵可靠性约束, 同时氢与中子有较高反应截面, 也降低了系统的可靠性。每一根高温热管均为单独的传热路径, 单根热管失效对整个系统影响有限。高温热管采用碱金属为传热工质, 包括锂、钠、钾等, 这类热管结构简单、无需泵驱动, 可靠性较高。

在外太空真空环境中, 散热只能通过热辐射的形式实现。散热器设计需综合考虑整器布局、质量约束和运载火箭内空间包络尺寸的约束。散热方式包括预埋热管的辐射散热器、含泵循环的辐射散热器、液滴式辐射散热器^[2]。其中前两种散热器翅片的设计可以根据需要采用固定式散热翅片和可展开散热翅片。折展式散热翅片的设计重点是要提高展开接触位置的良好导热能力。液滴式辐射散热器利用液滴发生器产生百微米级液滴团并喷出向收集器漂移, 在向液滴收集器输运过程中液滴团向空间辐射放出大量热量, 这种散热方式利用液滴团极大表面积, 实现高效率散热, 但这种创新概念的散热器加工精度要求极高, 长期空间中液滴损失情况有待分析, 寿命和可靠性尚需验证。

5) 反应堆体制选择

综上所述, 太阳系边际任务面临30年长寿命高可靠的要求, 同时任务对堆质量和体积约束明显。小功率发电 (<10 kWe) 可以采用基于U-Mo合金的快中子反应堆, 较大功率发电 (≥10 kWe) 建议采用基于氧化铀陶瓷的快中子反应堆。反应堆热电转换首选采用温差发电方式, 为了提升发电系统可靠性, 通过高温热管将热量从反应堆中导出后再与温差器件连接作为高温端, 温差器件另一端与散热板连接作为低温端, 即从发电体制讲, 太阳系边际任务首选热管温差堆。

4 核能源系统组成

前期中国积极进行包括同位素核电源和空间核反应堆电源的技术开发, “嫦娥四号”在同位素热源及电源方面积累了技术基础和工程经验, 相对较成熟。虽然空间堆方面技术薄弱, 但20世纪90年代中国便开始系统研究空间堆电源技术, 针对不同技术路线、不同功率量级技术开展了持续研究, 在反应堆设计、辐射防护、热电转换、热排放、综合试验技术等方面取得进展, 为小型空间核堆电源的研发奠定了基础, 仍需进一步完成地面带核工程样机测试。

综合考虑未来深空探测能源需求和当前技术发展, 太阳系边际任务电能源设计可以同时考虑空间堆电源技术途径和同位素核电源技术途径。太阳系边际任务中电能源系统主要功能包括: ①为探测器设备提供平稳的电能源输出, 在探测器的各种工作模式下, 为探测器提供稳定的母线电压; ②为探测器上的电设备提供电气连接, 为火工品提供起爆电流; ③特别的, 在采用核堆电源技术路线中, 能源系统需要能够在发射后至核堆启动前为探测器以及核堆在轨启动提供必要能源支持。

4.1 同位素核电源

根据任务能源需求和电能源系统主要功能, 同位素核电源可以提供全程供电, 同时利用部分废热为探测器设备保温, 以降低热控加热电功耗, 是太阳系边际任务能源问题的重要解决途径之一, 同位素核电源系统配置电源控制器、配电管理器、低频电缆网等设备, 如图5所示。

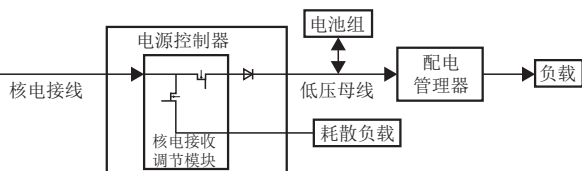


图 5 同位素核电源供电系统
Fig. 5 Radioisotope nuclear power system

采用放射性同位素温差电源具有以下优点: ①系统相对成熟, 探月二期任务中国已经初步掌握了RTG的设计及验证技术; ②辐射作用对探测器的影响相对较小, 辐射防护容易实现, RTG与探测器接口设计相对简单、容易操作; ③保障条件相对齐全, 地面针对RTG核源的管理程序相对完备, 各项保障条件较齐全。但若作为太阳系边际探测器的主能源, RTG必须解决大量核源材料的获取及制备问题, 并实现较大功率、长寿命、低衰减、持续的电能输出。此外由于同位素核电源适用于功率需求百瓦级任务, 因此该技术途径下探测器推进系统宜采用化学推进, 此时载荷搭载能力受到限制。

4.2 反应堆电源

由于空间堆运行时具有较大辐射, 太阳系边际采用核堆的供电方式时, 需要考虑将核堆与探测器保持一定的距离, 通过距离防护降低探测器辐照剂量。因此反应堆供电的电能源系统除了考虑核堆为整器提供必要的能源支持外, 还需要考虑发射阶段至核堆启动阶段之间整器的能源需求。为提高能源系统可靠性, 能源系统配置体装轻柔太阳能电池阵、电源控制器、蓄电池组、配电管理器、低频电缆网等设备, 如图6所示, 其中蓄电池可以提供核堆完全启动前探测器的能源需求, 配备体装柔性太阳翼可以在消耗较小的资源条件下, 为核堆多次启动提供支持, 增加探测器能源系统冗余, 降低任务实施风险。

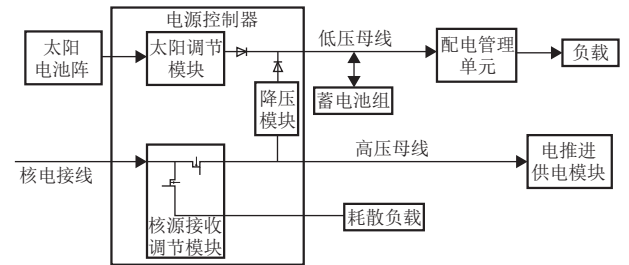


图 6 核堆电源供电系统
Fig. 6 Nuclear reactor power system

空间核堆电源具有功率大、生存能力强等优点是太阳系边际探测器较合理的技术途径, 它能够提供充足的电能, 使探测能力和对地通信能力有较大的提升, 并能够支持电推进技术的采用, 有效降低探测器的发射质量, 并提高载荷搭载能力, 为获得更多科学探测手段和数据大有帮助。但目前中国尚缺乏空间核堆的应用经验, 探测器设计研制过程中需全面考虑核堆电源的影响, 并开展充分验证工作。

5 核能源系统技术难点分析

核能源作为太阳系边际任务主要能源供应方案,

能源系统技术难点主要包含核电源自身技术难点和核能源综合利用技术难点。

5.1 核电源技术难点

太阳系边际任务中,核电源的应用需要考虑核安全、辐射防护、超长寿命、可实现性等诸多问题。针对我国空间同位素核电源技术及空间核反应堆技术发展现状,分别针对同位素核电源和反应堆电源的特点开展技术难点分析。

1) 高效率、低衰减同位素核电源技术

采用 ^{238}Pu 的同位素温差电源是深空任务百瓦级能源需求的最优技术路线,“旅行者号”探测器携带的RTG电源充分证明了该技术路线长寿命和高可靠的特点。中国在该技术路线方面开展了大量研究工作,在“嫦娥四号”任务中,中国首次成功利用 ^{238}Pu 的同位素热源提供电能和热能^[56]。在研制应用过程中,形成了同位素核电源系统设计能力,构建了全周期同位素安全管理和保障体系,为后续空间同位素核电源奠定了良好的基础。考虑 ^{238}Pu 产量存量双不足成为制约太阳系边际任务全面应用同位素核电源的主要困难,因此高效率利用同位素核原料成为亟待解决的难点问题。

另一方面,同位素核电源随着任务时间输出功率呈现指数下降的特点,其衰减主要来自两个方面:其中一种是同位素核源自然衰减导致输出下降,一块标准热源经过20年功率衰减为初始值的85%,年平均衰减率为0.75%,这是同位素核源固有属性;另一方面是热电转换器件在高温及辐射环境下性能不断下降导致输出能力不断下降,这类衰减随时间积累导致电源系统对外输出呈现十分显著的指数下降趋势,对于太阳系边际任务长达30年执行周期,以同位素温差电源RTG转换率8%为例,假定末期电功率为300 W条件下,同位素电源发电器件年衰减率每减小1%,对同位素核源用量则减少约20%以上,因此除了提高发电转换效率,降低系统年衰减率也十分重要。

综上,在稀缺同位素核源背景下,提高同位素核电源发电转换效率、降低器件性能衰退率,显著减少核源料用量是太阳系边际任务能源解决方案的重要技术途径。

2) 轻小型、高可靠、长寿命反应堆电源技术

空间核反应堆不仅可以解决太阳系边际探测任务面临的基本能源需求的问题,并且可以支持电推进系统这类大功率设备的使用,可以显著减小发射质量,提高任务搭载载荷能力。中国在空间堆应用方面尚属空白,因此面临多项技术难点的攻关。

轻小型集成设计:太阳系边际任务逃逸能量需求

极高,运载发射能力和空间有限,对空间堆电源在体积和重量方面均有较高的约束。采用静态发电方式的热管反应堆,是目前国际上普遍认为较适用于空间核反应堆的技术路线,同时具有较优的热瞬态反馈能力^[57-58]。因此需要针对边际探测任务对小体积、紧凑型堆的需求,开展燃料棒、控制鼓、反射层、高温热管、屏蔽体、热电转换器件及散热板高度集成的一体化设计技术。

高可靠和高安全性:反应堆电源可靠性安全性设计不仅关乎任务的成败,更重要的是通过设计使反应堆提高固有安全性,如根据紧凑的设计要求,燃料元件通常具有较高的铀浓缩度,因此反应堆应当设计运行在次临界状态以满足应用过程中的固有安全性。在满足联合国《外层空间核动力源应用安全框架》要求的同时,需避免研制及应用过程中对环境的污染和危害。空间堆高可靠、高安全性设计重点围绕反应堆启动可靠性安全性、稳定运行可靠性安全性、放射性辐射安全性、极端恶劣环境下冲击及烧蚀等安全性、紧急停堆可靠性安全性等多个方面。可靠性安全性设计不仅考虑长期高温下的材料的兼容特性,也要考虑长期工作环境中为材料肿胀等问题保留适度设计余量。

长寿命设计及验证:太阳系边际任务是中国首次使用核能源作为主要能源的深空探测任务,虽然应用经验十分薄弱,但却对核能源系统使用寿命提出了极高的要求。针对核电源系统构成、材料及工作机理,开展影响核电源系统的寿命敏感因素分析,从系统、单机、组件、元器件和原材料等多个级次开展长寿命设计及分析工作。同时开展寿命加速等效试验方法的研究,通过对试验对象施加更恶劣的综合模拟环境,缩短试验持续时间,充分分析加速试验数据,梳理系统或单机面临的共性问题及薄弱环节,通过器件加固、系统冗余设计提高核电源系统可靠性,实现对寿命指标的验证和分析。

基于地面试验堆的综合性能测试验证:不同于同位素核电源,空间核反应堆电源需要入轨后通过拔出安全棒进行反应堆的启动和运行,且链式裂变反应一经开始,反应堆就产生较强的辐射,其中高能射线部分极难屏蔽。因此反应堆正式产品在地面试验阶段不宜进行起堆运行测试,否则会后续总装和发射带来极大困难。加之地面试验堆环评及安全性要求,其地面试验堆建造设计必然与空间堆显著不同。因此,地面试验堆验证的有效性和全面性是空间堆成功应用的前提条件。

基于此,空间热管堆设计需与探测器设计方案和

研制流程联合开展,反应堆启动、运行参数测试、功能性能测试也需要针对性设计以解耦在轨工况测试条件。

3) 环境适应性设计

太阳系边际任务是国内首次采用核电源作为探测器主能源的深空探测任务,中国在此方面仍缺乏使用经验。核电源特别是核反应堆电源,结构复杂,入轨后还需要进行反应堆启动工作,并在此后长达数十年稳定运行,因此核电源在整个任务周期中的力学、真空、微重力、外热流变化等环境适应性是核电源系统在空间中应用的关键。

(1) 力学环境

核反应堆电源在收拢压紧状态随探测器由运载火箭发射深空,因此核堆电源需要满足发射段力学载荷环境,包括瞬态冲击载荷、发动机喷流噪声、结构振动等力学条件。此外在轨核反应堆启动前,需要解锁伸展机构,将核反应堆与探测器间的连接机构展开,使两者保持一定距离以减少核堆对整器辐射水平,核堆电源也需要适应类似解锁展开、火工品起爆产生的力学振动环境。反应堆堆芯燃料棒、高温热管、起堆控制棒在上述力学环境中不发生位移、形变或者破损,并且不产生共振。此外在上述力学环境中,反应堆启动的控制棒不意外启动,从而导致反应堆提前运行,在经历发射段恶劣力学环境后控制棒亦能够正常启动。

进入空间环境后,核电源需适应零重力或微重力环境,特别是高温热管传热性能能够适应微重力环境以及行星借力过程中重力环境瞬变的影响。

(2) 热学环境

太阳系边际探测任务全周期外热流变化差异巨大,在任务初期太阳光外热流超过 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,随着探测器与太阳距离不断增加,外热流呈现距离平方反比下降,到海王星外热流已经下降至不足 $5\ \text{W}/\text{m}^2$,此后更是不断下降几乎接近零。核电源设计需针对性开展外热流适应分析,确保在深冷空间中的性能稳定,特别是高温热管设计时需注意防止后期热管内部工质冷凝冻结。同时也要考虑电源系统电子学器件等(远离核源端)的保温设计,通过包覆隔热多层以及主动热控措施实施满足系统温度环境需求。

(3) 空间辐照和真空环境

太阳系边际任务中,核电源除了自身辐射外,同时也面临空间环境中紫外辐照、电磁辐射以及带电粒子辐射等,且系统长期处于真空环境中。考虑核电源系统中影响性能的关键部分如散热板表面材料、电子元件等,需要针对有关材料器件对紫外辐射损伤、热

环境效应、电离总剂量效应、单粒子效应、辐射损伤效应、低气压放电、真空出气等开展适应性分析和设计,以满足全任务周期的性能功能稳定。

5.2 能源综合利用技术难点

采用核能源,特别是核反应堆能源作为任务主能源在中国空间领域尚没有应用先例,匹配整星任务不同阶段功耗需求的电能源综合管理和利用缺乏技术积累和使用经验,新的能源体制需要兼顾核电源与探测器系统开展联合设计验证,主要存在两个方面的技术难点攻关。

1) 核电源综合管理技术

太阳系边际探测任务早期在太阳附近面临较大外热流散热要求高,中后期远离太阳又面临深冷空间保温要求高,采用 $10\ \text{kWe} +$ 电推进配置方案在完成行星借力前电功耗需求大,完成借力后电推进系统停止使用,大量多余电能需要安全耗散,此外核电源随时间输出不断下降,上述多种因素相互耦合和叠加,不同阶段和不同任务方案对能源需求差异较大,给整个任务期间核能源综合利用带来极大挑战。此外核堆电源既非恒压源也非恒流源,且输出功率存在波动,难以适应探测器不同工作模式的负载曲线,这对探测器母线电压稳定带来挑战。

针对上述问题,以核动力深空探测器任务与核堆电源为研究对象,设计核堆电源综合管理系统架构。梳理不同阶段任务剖面核电源控制管理需求,设计多形式分时能源管理策略,通过对二次储能电池蓄能、平衡负载耗散等多种功率补偿方法开展运行机制分析,从补偿功率大小、响应时间、对深空探测器影响、自身系统配置规模等多方面,深化明确混合式分时能源综合管理策略,以保证核堆电源输出阻抗保持不变。同时通过对核能源综合管理系统的运行机制分析,在实现综合管理系统对核堆电源输出特性的适应性,以及其与核动力深空探测器不同负载功率需求之间的匹配性基础上,完善负载耗散与热控的一体化设计,实现能源综合利用。

2) 基于平衡负载的功率匹配技术

核反应堆最大输出功率在长期时间尺度上存在衰减,但在短期时间尺度中保持恒定,在电推进非工作时段,耗散负载是探测器实现核能源输出功率与平台用电功耗之间平衡的关键部分,是核能源系统长时间稳定运行的关键。

考虑空间反应堆大功率的耗散需求和其特殊复杂的辐照环境,平衡负载材料选型需要攻克耐高温、良导热性以及抗辐照等的难题。同时负载的构型设计也

需要综合考虑铺设面积、安装固定方法、重量轻等多种因素。

在负载材料及构型定型基础上,基于反应堆运行特点及平台母线控制要求,综合考虑系统功率整体耗散要求、对热管堆电源输出的冲击,进一步针对耗散平衡方式进行仿真设计,结合缩比实物试验验证方法,搭建核堆电源输出随动控制验证电路平台,以验证顺序分流平衡、集中分流平衡和充电分流平衡等多种方式中,实现参数适应范围、响应性、实现灵活性等多方面的最优设计,以满足核堆电源不同输出曲线及平台低功耗条件下的功率平衡需求。

6 结束语

抵达太阳系边际开展探测,并向太阳系外进行拓展探测是人类深空探索必然的发展方向 and 阶段,对人类认识宇宙,了解太阳系演化以及星际空间环境具有十分重要的意义。面临太阳系边际探测极暗极远极寒的任务特点,深空探测新的能源体系是实现太阳系全域到达能力建设的关键环节。

本文简要梳理国际太阳系边际探测发展情况,借鉴已经进入太阳逃逸轨道的5颗探测器设计方案和国际上的概念设计,综合中国核能源技术发展情况,及所提太阳系边际探测方案设想,分析了太阳系边际探测任务对能源系统的供电需求,并以此建议百瓦级同位素核电源优选温差发电,积极发展热光伏发电,同位素核源首选 ^{238}Pu ,同时以 ^{241}Am 为备选。千瓦至10千瓦级空间堆电源优选热管温差堆电源,对于超过10千瓦的用电需求,核燃料宜优选基于氧化铀陶瓷的快堆,若用电需求1 kW级可以采用基于铀钚合金的快堆,以节约质量资源。在核电源选型需求分析基础上开展了同位素电能源系统和空间堆电能源系统技术途径,并对技术难点进行分析,为太阳系边际任务的发展和实施提供参考。

参考文献

- LANDIS G A, FINCANNON J. Study of power options for Jupiter and outer planet missions[C]//Proceedings of 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2015.
- 李恒,和鹏飞,徐明,等. 太阳系边际探测任务轨道优化设计[D]. 北京:北京理工大学,2023-11-15.
- 田百义,张磊,周文艳,等. 木星系及行星际飞越探测的多次借力飞行轨道设计研究[J]. *航天器工程*, 2018, 27(1): 6-10.
TIAN B Y, ZHANG L, ZHOU W Y, et al. Research on multiple gravity assist trajectories for a jovian system exploration and planet flyby mission[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(1): 6-10.
- 王颖,朱安文,刘飞标,等. 超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): 123-133.
- 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.
- 吴伟仁,于登云,黄江川,等. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.
WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. *SCIENTIASINICA Informationis*, 2019, 49(1): 1-16.
- 王赤,李晖,郭孝城,等. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 517-524, 535.
WANG C, LI H, GUO X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 517-524, 537.
- NASA. Jupiter overview[EB/OL]. (2016-04-20)[2025-05-25]. https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/juno/jupiter/.
- 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 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Providence, RI: [s.n.], 2004.
- HARRIS R D. In Situ irradiation and measurement of triple junction solar cells at Low Intensity, Low Temperature (LILT) conditions[J]. *IEEE Transactions Nuclear Science*, 2008, 55(6): 3502-3507.
- 毛根旺,韩先伟,杨涓,等. 电推进研究的技术状态和发展前景[J]. *推进技术*, 2000(5): 1-5.
MAO G W, HAN X W, YANG J, et al. Research state of electric propulsion and its development prospect[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000(5): 1-5.
- 康小录,杭观荣,朱智春. 霍尔电推进技术的发展与应用[J]. *火箭推进*, 2017, 43(1): 8-17.
KANG X L, HANG G R, ZHU Z C. Development and application of Hall electric propulsion technology[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(1): 8-17.
- DATAS A, MARTI A. Thermophotovoltaic energy in space applications: review and future potential [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 161: 285-296.
- 吴伟仁,刘继忠,赵小津,等. 空间核反应堆电源研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(1): 1-12.
WU W R, LIU J Z, ZHAO X J, et al. System engineering research and application foreground of space nuclear reactor power generators[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2019, 49(1): 1-12.
- 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, 4(5): 430-443.
HU G, ZHAO S Z. Overview of space nuclear reactor power technology[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(5): 430-443.
- 马世俊,杜辉,周继时,等. 核动力航天器发展历程(上)[J]. *中国航天*, 2014(4): 31-35.
MA S J, DU H, ZHOU J S, et al. Development history of nuclear-powered spacecraft (Part 1)[J]. *Pace System and Technology*, 2014(4): 31-35.
- 马世俊,杜辉,周继时,等. 核动力航天器发展历程(下)[J]. *中国航天*, 2014(4): 32-35.
MA S J, DU H, ZHOU J S, et al. Development history of nuclear-powered spacecraft (Part 2)[J]. *Pace System and Technology*, 2014(4): 32-35.

- [17] 朱安文, 刘磊, 马世俊, 等. 空间核动力在深空探测中的应用及发展综述[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(5): 397-404.
ZHU A W, LIU L, MA S J, et al. An overview of the use and development of nuclear power system in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(5): 397-404.
- [18] PANEK K. Radioisotopes production: N. p., 1970 [R]. [S. l.]: NASA, 1970.
- [19] FRIEDLANDER G, JOSEPH W. Nuclear and radiochemistry[M]. John Wiley and Sons, Inc.: New York, 1966.
- [20] PRELAS M, BORAAS M, AGUILAR F D L T, et al. Nuclear batteries and radioisotopes[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [21] 马崇智. 放射性同位素手册[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [22] ANONYMOUS. Chassis short mitigation and characterization technique for the multi-mission radioisotope thermoelectric generator[J]. *Nasa Tech Briefs*, 2016, 40(7): 1-10.
- [23] WANG H, TANG X, LIU Y, et al. Thermalmission enhanced and optically modulated radioisotope thermophotovoltaic generators[J]. *Energy Technology*, 2019, 8(3): 22-27.
- [24] 霍英杰, 董亮, 王丽红, 等. 空间斯特林发电技术的发展[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会. 浙江: 杭州, 2012.
- [25] 刘本建, 张森, 郝晓斌, 等. 金刚石辐射伏特效应同位素电池器件研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(5): 801-813.
LIU B J, ZHANG S, HAO XI B, et al. Research progress on diamond radio-voltaic effect isotope batteries devices[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, 51(5): 801-813.
- [26] LI H, LAL A, BLANCHARD J, et al. Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(2): 1122-1129.
- [27] 张振寰, 张昊春, 张冬, 等. 兆瓦级探月火箭空间核电源系统设计与性能研究[J]. *宇航学报*, 2022, 43(5): 696-704.
ZHANG Z H, ZHANG H C, ZHANG D, et al. Design and performance research of megawatt-class space nuclearpower system for lunar rockets[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(5): 696-704.
- [28] 郑人洲, 陆景彬, 王宇, 等. β 辐射伏特效应同位素电池的优化设计研究进展[J]. *原子核物理理论*, 2023, 40(3): 385-400.
ZHENG R Z, LU J B, WANG Y, et al. Research progress on optimization design of betavoltaic batteries[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(3): 385-400.
- [29] BREKIS A, ALEMANY A, ALEMANY O, et al. Space thermoacoustic radioisotopic power system, spaceTRIPS: the magnetohydrodynamic generator[J]. *Sustainability*, 2021, 13(23): 13498-13504.
- [30] MASON S L. Realistic specific power expectations for advanced radioisotope power system[J]. *Journal of propulsion and power*, 2007, 23(5): 1075-1079.
- [31] 苏生, 邵剑雄, 邱家稳, 等. 同位素热光伏电源真空热性能试验研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, 57(9): 1841-18.
SU S, SHAO J X, QIU J W, et al. Experimental study on vacuum thermal performance of RTPV[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, 57(9): 1841-1849.
- [32] WANG Z Y, SHAO J, HAN C, et al. Design and performance of the equivalent general purpose heat source in radioisotope thermophotovoltaic system[J/OL]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 268: 125941. <https://www.keyanzhidian.com/doc/detail?id=1010115716172>.
- [33] BAUER T. Thermophotovoltaics: basic principles and critical aspects of system design[M]. Heidelberg: Springer, 2011.
- [34] DATAS A. Optimum semiconductor bandgaps in single junction and multijunctionthermophotovoltaic converters[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 134: 275-290.
- [35] CHUBB D L. Fundamentals of thermophotovoltaic energy conversion[M]. The Netherlands: Elsevier, 2007.
- [36] COUTTS T J. A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1999, 3(3): 77-184.
- [37] National Aeronautics and Space Administration. Enhanced Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (eMMRTG) project summary[C]//Proceedings of eMMRTG conference. USA: NASA office of Chief Technologist, 2021.
- [38] National Aeronautics and Space Administration. Stirling Radioisotope Generator (SRG) technology maturation review: NASA-GRC[R]. USA: NASA, 2022.
- [39] National Aeronautics and Space Administration. Radioisotope Thermophotovoltaic (RTPV) power system development: NASA-RTPV[R]. USA: NASA Glenn Research Center, 2021.
- [40] EL-GENK M S, TOURNIER J M. AMTEC/TE Static conversion systems for space reactor power[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(20): 3099-3118.
- [41] NOZARIASBMARZ A, POUDEL B, LI W J, et al. Bismuth telluride thermoelectrics with 8% module efficiency for waste heat recovery application[J]. *iScience*, 2020, 23(7): 1340-1347.
- [42] WAN S, SONG Q F, CHEN H Y, et al. High-efficiency segmented thermoelectric power generation modules constructed from all skutterudites[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(11): 1651-1661.
- [43] LI X F, YANG P B, WANG Y M, et al. Phase boundary mapping in ZrNiSn half-heusler for enhanced thermoelectric performance[J]. *Research*, 2020(4): 9-17.
- [44] SAMARELLI A, FERRELLIN L, CECCHI S, et al. The thermoelectric properties of Ge/SiGe based superlattices: from materials to energy harvesting modules[J]. *ECS Transactions*, 2014, 64(6): 929-937.
- [45] ZHANG Q, LIAO J, TANG Y, et al. Realizing a thermoelectric conversion efficiency of 12% in bismuth telluride/skutterudite segmented modules through full-parameter optimization and energy-loss minimized integration[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(4): 956-963.
- [46] 姜洪义, 王华文, 任卫. SiGe热电材料的发展与展望[J]. *材料导报*, 2007(7): 119-129.
JIANG H Y, WANG H W, REN W, et al. The Development and prospects of si ge thermoelectric materials[J]. *Materials Reports*, 2007(7): 119-129.
- [47] 古哈尔金H E, 波诺马廖夫一斯捷普诺伊H H, 乌索夫B A. 热电转换和热离子转换式空间核反应堆电源“ROMASHKA”和“ENISEY”[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- [48] RHEE H S, WETCH J R, GUNTHER N, et al. SPACE— R thermionic space nuclear power system with single cell in-core thermionic fuel elements[C]//Proceedings of Symposium on Space Nuclear Power Systems. USA: American Institute of Physics, 1992.
- [49] DEMUTH S F. SP-100 space reactor design[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2003, 42(3): 323-359.
- [50] BUDEN D. Summary of space nuclear reactorpower systems: 1983—1992[R]. USA: Idaho National Engineering Lab, 1993.
- [51] ZHAO H, ZHU D, CHAUDRI K S, et al. Preliminary transientthermal-hydraulic analysis for new coated UN and UCfuel options in SCWR[J].

- Progress in Nuclear Energy, 2014, 71(1): 152-159.
- [52] 王德君, 何淼, 秦芝, 等. 碳化铀核燃料缺陷结构的研究现状[J]. 核技术, 2017, 40(7): 83-94.
WANG D J, HE M, QIN Z, et al. Current status of studies on point defect structures of uranium carbide nuclear fuels[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(7): 83-94.
- [53] 钱跃庆, 孙晓博, 刘文涛, 等. 空间核反应堆电源用核燃料研制进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 45-49.
QIAN Y Q, SUN X B, LIU W T, et al. Development of nuclear fuel for space power reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(1): 45-49.
- [54] MASON L, POSTON D, QUALLS L. System concepts for affordable fission surface power: NASA-TM-2008-215166[R]. USA: NASA, 2008.
- [55] SANCHEZ R G, HUTCHINSON J D, PATRICK R M, et al. Kilowatt Reactor Using Stirling Technology(KRUSTY) demonstration: CEDT phase 1 preliminary design documentation: LA-UR-15-26603[R]. USA: [s. n.], 2015.
- [56] 张焯, 吴学英, 李飞. “嫦娥”四号探测器任务概貌[J]. 中国航天, 2019(4): 16-23.
ZHANG H, WU X Y, LI F, et al. Overview of the “Chang’e-4” probe mission[J]. Aerospace China, 2019(4): 16-23.
- [57] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [58] BUDEN D. Summary of space nuclear reactor power systems: 1983-1992[R]. USA: Idaho National Engineering Laboratory, 1993.
- 作者简介:
韩承志(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 深空探测, 探测器总体设计。
通信地址: 北京市海淀区友谊路104号(102413)
E-mail: hanchzh16@qq.com
张焯(1970-), 女, 博士(研究员), 主要研究方向: 月球及深空探测, 探测器总体设计。
通信地址: 北京市海淀区友谊路104号(102413)
联系电话: (010)68114994

Analysis of Energy Demand and Technical Approach in Solar System Boundary Exploration

HAN Chengzhi¹, ZHANG He¹, LI fei¹, ZHAO Zelong², ZHANG Haixu²,
WANG Sanbing³, WANG Qunbo⁴, TANG Yuhua^{4,5}

(1. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

4. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230093, China;

5. Lunar Exploration and Space Engineer Center, Beijing 100190, China)

Abstract: The exploration of the solar system boundary is of great scientific value and social significance to the heliospheric physics, interstellar space physics and the origin and evolution of the solar system, and has been highly concerned by various space research institutions in the world. Limited by long flight distance and long mission time, the solar system boundary probe needs to solve the energy technology problems of long life, high power and high reliability, which is one of the basic conditions and key technologies of the implementation of the solar system boundary emplacement exploration. On the basis of the study of ultra-remote earth surgery explorations at home and abroad and the demonstration of the marginal exploration mission in our solar system, the demands of the probe energy system were summarized, and the preliminary scheme of the energy system and the key technologies and technological difficulties were analyzed, which can provide reference for further demonstration of exploration missions.

Keywords: solar system boundary exploration; energy system; key technology

Highlights:

- Based on the unique characteristics of “extremely far, extremely dark, extremely cold, and ultra long term” missions in the marginal exploration of the solar system, a systematic analysis was conducted on the demand for nuclear energy.
- Combining multiple constraints of detection tasks, a design concept for energy matching of isotope power supply + chemical propulsion, nuclear reactor + electric propulsion is proposed to meet the requirements of multi scenario applicability in nose tip and tail direction, and the selection of isotope power supply and nuclear reactor power supply is analyzed in detail.
- Based on the differences between isotope power supply and nuclear reactor power supply and platform supply and demand systems, power system designs under different technological routes are proposed.
- Based on different nuclear power technology routes, combined with task characteristics, analyze the technical application difficulties and provide development ideas.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]