

美国积极发展太空核电源系统

摘要：核电源是开展长期深空探测任务的必然选择，NASA 已在行星际探测任务中广泛应用多种放射性同位素电源，并在不断改进其性能。同时，NASA 积极研制能满足更高动力需求的小型核裂变反应堆电源，“千瓦级动力”（Kilopower）计划已进入系统级测试阶段。Kilopower 太空裂变电源系统具有简化紧凑、安全性好、开发成本低等特点，适合用作航天器电源或星球表面哨基地电源；可以模块化使用，利用多个系统组合可满足火星表面载人探索任务需要。

美国国家航空航天局（NASA）一直将核电源技术视为提升美国太空探索能力的重要技术，在不断改进放射性同位素电源性能的同时，积极研制能满足更高动力需求的核裂变反应堆电源。近期，NASA 完成了“小型核裂变电源系统”（FPS）可行性研究，并于 2017 年 11 月开始在内华达试验场对“千瓦级动力”（Kilopower）计划研制的小型核裂变反应堆系统进行多项测试，计划 2018 年初进行 Kilopower 反应堆样机真空测试。这标志着 NASA 在研的太空核裂变电源系统即将进入分系统测试阶段，为后续研制千瓦级核电源奠定关键技术基础。

一、核电源是开展长期深空探测任务的必然选择

美国总统特朗普称，太空将是美国下一个伟大疆域，强调 NASA 应将重点转向载人航天探索与科学发现任务，包括载人登

月和火星任务以及更远的深空任务。美国国家航天委员会主席、副总统彭斯也表示，将制定政策以实现整个太阳系的载人航天探索。2017年12月11日，特朗普签署“重振美国载人航天探索计划”总统备忘录，对2010年版《国家航天政策》进行修订，正式提出：“在美国的领导下，实现载人重返月球并进行长期探索和开发利用，为未来的火星和其他目的地探索提供支持”。

无论在科学探索还是载人航天任务中，电源系统都至关重要。目前，航天器上大多采用太阳能电池和化学电池提供能源。但对于长期深空探测任务而言，不受环境影响、寿命长、安全可靠的核电源将成为必然选择。太空核电源是将核反应堆或者放射性同位素产生的热转化为电能，向航天器提供所需电力。太空核电源分为放射性同位素电源和反应堆电源两类。目前，放射性同位素电源已经在行星际探索中得到广泛应用，但其输出电功率最大也仅能达到百瓦级，无法胜任未来深空探索任务(如，NASA估计支持火星表面任务需要电源系统达到40千瓦级)。因此，美国积极研制能满足更高动力需求的核裂变反应堆电源。图1为各种空间电源应用范围的对比。

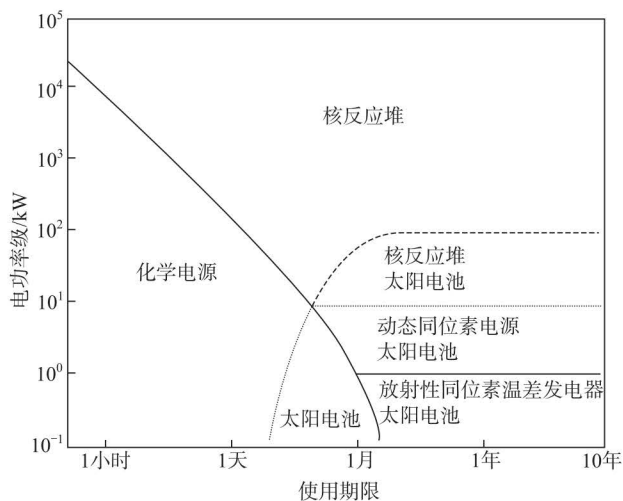


图1 各种空间电源应用范围的对比

二、放射性同位素电源应用现状

放射性同位素电源寿命长、工作可靠，已广泛应用于功率需求不大的各种太空任务。当前，美国在放射性同位素电源的设计与制造方面已日臻完善，但尚有较大提升空间。

1. 放射性同位素电源已在行星际探测任务中广泛应用

自 1961 年以来，美国已在 27 次航天任务中使用了 46 个放射性同位素电源，用于导航、气象、探月、深空探索等任务。放射性同位素钷-238(半衰期 87 年)具有优良的功率密度和使用寿命，辐射水平低。美国用于太空任务的放射性同位素电源全部采用钷-238，输出电功率 2.7~300 瓦，功率密度 3~5 瓦/千克，质量 2~56 千克，最高效率达 6.7%，寿命 30 年。以“好奇”号火星车所用的多任务放射性同位素电源(MMRTG)为例，这是美国研制的新一代放射性同位素电源系统，采用 8 个装填二氧化钷(约 3.5 千克的钷-238)的通用热源模块，采用静态热电转换装置，输出电功率 110 瓦，剩余热量通过外部辐射片释放到太空环境中。另外，“火星 2020”任务也计划采用多任务放射性同位素电源。

2. 放射性同位素电源面临的限制性因素

放射性同位素电源存在明显局限性：(1)输出电功率较小。由于放射性同位素的发热量低，且热电转换效率不高(小于 8%)，输出电功率最大也仅能达到百瓦级。目前美国单个放射性同位素电源的功率水平达到 300 瓦左右。然而，随着深空探索任务的不断拓展，对空间电源的功率需求也不断增长，达到千瓦级甚至更高，放射性同位素电源系统已不能满足任务要求，存在较大能力缺口。(2)钷-238 供应面临挑战。钷-238 燃料价格昂贵，且美国的库存量(约 35 千克)有限，仅能支持已规划的 2030 年前太空探索任务需求，而不能满足 NASA 长期太空探索任务的需要。为此，美国能源部再次恢复钷-238 燃料生产。2015 年 12 月，橡树岭国

家实验室宣布，研究人员已经生产了 100 克钷-238 样品，但技术尚处于重启的概念验证阶段；预计 2019 年将达到中期生产水平，每年生产 400~500 克钷-238；计划 2025 年实现全面量产，每年生产约 1.5 千克钷-238。美国能源部计划 2019 年生产新的以钷-238 为燃料的核电池，供 NASA 深空探测任务使用。但是，随着重返月球被重新确定为美国国家航天目标，NASA 对钷-238 的年需求量将增加，因为当前的需求量(1.5 千克钷-238/年)估算中没有考虑载人航天任务的需要。因此，为支持 NASA 载人月球探索任务，必须提高钷-238 的生产量，可能每年需要生产约 5 千克钷-238。根据 2017 年 10 月 4 日美国政府问责局(GAO)发布的报告，钷-238 燃料规模化生产面临一些技术问题以及劳动力短缺。显然，进一步提高生产量将使能源部面临新的挑战。

3. 放射性同位素电源未来仍将在 NASA 前沿科学任务中发挥作用

当前，美国仍在不断改进放射性同位素电源系统性能，通过更有效的热机转换或热电转换，提高放射性同位素电源的总功率、功率密度和效率，NASA 计划发展的放射性同位素电源系统详见表 1。有潜力的电源转换技术包括：先进“斯特林”发动机和先进热电转换系统，重点是提高转换效率(目标 12%)和功率密度(8 瓦/千克以上)，同时确保长寿命(14 年以上)。随着重返月球被重新确定为美国国家航天目标，NASA 对放射性同位素电源的需求将增加。据称，“星座”计划取消后，NASA 对钷-238 的年需求量从 5 千克下降到 1.5 千克，主要原因就是不再考虑载人月球探索任务的需求。

NASA 的深空科学任务是继续研发放射性同位素电源的主要推动力。未来，0.1~1000 瓦功率范围的放射性同位素电源仍将在 NASA 的前沿科学任务中发挥作用。另外，放射性同位素能量通过阿尔法光伏直接转换，可极大地提高效率和功率密度(达到 200

瓦/千克)，但研制风险高。

表 1 NASA 计划发展的放射性同位素电源系统

序号	技术名称	描述
1	增强多任务放射性同位素热电发生器 (eMMRTG - 100)	带通用热源 (GPHS) 的放射性同位素热电发生器 (100 瓦) 和高效率热电转换器 (约 10%)
2	先进“斯特林”同位素热电发生器 (ASRG - 100)	带通用热源的放射性同位素热电发生器 (100 瓦) 和高效率“斯特林”发动机转换器 (约 30%)
3	高功率放射性同位素热电发生器 (ARTG - 500)	带通用热源的放射性同位素热电发生器 (500 瓦) 和高效率、高功率热电转换器 (约 15%)
4	高功率“斯特林”同位素热电发生器 (ASRG - 500)	带通用热源的放射性同位素电源系统 (500 瓦) 和高效率、高功率“斯特林”发动机转换器 (约 30%)
5	毫瓦级放射性同位素热电发生器 (mWRTG)	采用放射性同位素加热单元 (RHU) 和高效率热电转换器 目标: 功率 60~150 毫瓦, 效率 >8%
6	阿尔法光伏电池	放射性同位素电源系统, 包含放射性同位素 (如钷-238 或其他 α 发射极) 和将 α 辐射直接转换为电能的半导体材料 目标: 功率 100~1000 瓦, 效率 >50%, 功率密度 >12 瓦/千克

三、加紧研制小型太空核裂变电源

太空核裂变电源具有明显的优势：一是核裂变电源释放的能量较大，其电功率可达到兆瓦级，能量供给充足；二是核裂变电源采用的燃料为铀，储备较丰富，能大量供给。NASA 研究认为，太空核裂变电源是可持续的载人火星探索所必需的。

20 世纪 60 年代，美国研制放射性同位素电源时，也积极研制能满足更高动力要求的核裂变反应堆电源。1965 年，美国的 SNAP-10A 核裂变电源系统(功率 0.5 千瓦)曾被送入轨道，但在轨工作仅 43 天便因故障而停止运行。SNAP-10A 系统采用热电偶实现能量转换，热-电转换效率仅为 3%。21 世纪初，NASA 制定了“太空核创新计划”，旨在利用核动力推进航天器探索火星，包括开发先进的太空核反应堆电源，但并未开展系统级试验验证。

1. 相关技术能力评估

2012 年 11 月，美国科研人员测试了一种核动力引擎原型。该引擎利用核裂变反应堆带动 8 个“斯特林”引擎，可提供约 500 瓦的电能。NASA 格伦研究中心和洛斯·阿拉莫斯国家实验室也对一个简化模型进行了测试，该原型包括一个小型核反应堆和一个“斯特林”引擎，能提供约 24 瓦的电能。

《2015 年 NASA 技术路线图》指出，美国的太空核反应堆计划已成功开发出高性能的燃料、材料和热传递系统，但这些硬件并未在太空飞行验证。研制 1~10 千瓦核裂变电源系统的关键技术包括：铀钼燃料，简单轻便的“核堆芯到电源”热传递技术，低功率电源转换技术，安全性、可靠性设计等。总之，采用当前的材料、燃料、热电转化和废热散热技术，近期开发出太空核裂变电源系统是可行的，主要挑战是把技术整合到一个安全、可靠、经济可承受的系统。

2. “千瓦级动力”计划——测试小型太空裂变反应堆系统

近年来，NASA 一直在资助一个名为“千瓦级动力”(Kilopower)的小型核裂变电源项目，其目标是将应用于太空的 1~10 千瓦小型核裂变电源的技术成熟度从二、三级提高到五级。该计划主要面向两种任务需求演示验证核裂变电源技术：(1) 1~10 千瓦电源，用于机器人科学任务平台电源和小型勘探系统；(2) 10~100 千瓦电源，为开展行星表面勘探的前哨基地供电或用

于向核电推进系统提供动力。Kilopower 计划是 NASA 计划发展的核裂变电源系统(见表 2)的重要组成部分,也是当前研发的重点。

表 2 NASA 计划发展的核裂变电源系统

序号	技术名称	描述
1	1~4 千瓦裂变电源系统	采用可扩展用于外行星和电推进任务的通用裂变反应堆,采用热电转换方式
2	1~10 千瓦裂变电源系统	采用可扩展用于外行星和电推进任务的通用裂变反应堆,电源转换方式包括“斯特林”和“布雷顿”发动机
3	10~100 千瓦裂变电源系统	电源转换方式采用“斯特林”发动机; 可独立提供完整的电力
4	1~10 兆瓦裂变电源系统	可在太阳系的任何地方提供充足的能量; 主要用途是核电推进
5	大于 10 兆瓦裂变电源系统	为核电推进系统提供电源

该小型核裂变电源将铀钚合金燃料、非能动钠热管、斯特林发动机集成起来,利用裂变反应堆产生的热能,带动“斯特林”发动机产生电能。裂变反应堆相当于热源,利用热管代替传统冷却回路将反应堆产生的热能传输给小型斯特林发动机,并将其转换为电能输出,其热电转换效率可达 20%。整个项目分为 3 个阶段:第一阶段,设计并在地面验证千瓦级电功率的核电源原型;第二阶段,设计并验证满足火星表面任务需求的 3~10 千瓦级核电源;第三阶段,于 2019 财年或晚些时候在国际空间站对相关技术开展飞行试验。

NASA 正在进行的小型太空核裂变反应堆系统(电功率约 1 千瓦)测试,是自 1965 年以来美国首次尝试利用裂变反应堆为航天器提供动力。Kilopower 太空裂变电源系统具有简化紧凑、安全性好、开发成本低等特点,设计寿命 10 年以上,适合用作航天器电

源或星球表面前哨基地电源；可以模块化方式使用，利用多个系统组合可满足火星表面载人探索任务需要。

四、核电源技术突破将使新的航天任务成为可能

当太空电源技术取得突破时，往往能使新的航天任务成为可能。NASA 一直力求开发质量轻、体积小、效率高、能在较宽温度范围和强辐射环境中运行的电源系统。2014 年发布的《通往探索之路：美国载人太空探索计划的理由和途径》报告指出，行星表面核电源是实现载人火星任务的 11 个主要任务要素之一。

未来几十年，逐步改进的电源系统将使得在月面和行星表面工作的原位资源利用系统成为可能。随着放射性同位素电源和核裂变电源能源利用效率的提高，将能装备数量更多、能力更强的科学仪器并延长任务周期，可以开展更多的深空科学探索项目，给任务带来更多灵活性。未来如果开发出高性价比、轻量化的核电源系统(如兆瓦级核裂变电源)，再结合高功率的电推进器，即可实现核电推进航天器，这样载人航天探索就不必再依赖太阳能，而目标为火星或更远目的地的探索任务也成为可能。这将显著扩展太空探测的范围(可推动探测器深入到太阳系的各个角落甚至太阳系边界)，提高探测效率，进一步推动快捷、长期、灵活和全面的科学探测活动。