

空间核反应堆电源技术概览

胡古, 赵守智

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 空间核反应堆电源具有环境适应性好、功率覆盖范围广、结构紧凑以及大功率条件下质量功率比小等突出优点, 在军民航天任务中具有广阔的应用前景, 是改变未来航天动力格局的颠覆性技术之一。对空间核反应堆电源的原理、特点、适用范围、应用前景、历史发展情况及现状、典型方案、应用安全等进行了系统介绍, 对技术发展趋势进行了分析总结, 并就我国该技术发展给出一些见解。

关键词: 空间核反应堆电源; 航天任务; 颠覆性技术

中图分类号: TL99

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)05-0430-14

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.05.004

引用格式: 胡古, 赵守智. 空间核反应堆电源技术概览[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 430-443.

Reference format: Hu G, Zhao S Z. Overview of space nuclear reactor power technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 430-443.

0 引言

核能的发现和利用是20世纪最伟大的科技成就之一。核能具有远高于常规化学能源的功率密度, 其卓越的性能优势促使科学家们积极探索和研究将其应用于包括地面发电、水下及水面舰艇推进、航天器供电等在内的各种领域活动, 早在20世纪60年代美国和前苏联两个超级大国就已将核能成功应用于太空^[1]。1965年4月, 美国成功发射了世界上第一个空间核反应堆电源SNAP-10A, 从此拉开了人类将核反应堆电源用于太空的序幕, 据公开资料报道, 迄今为止美国和前苏联累计成功发射了35个装备有空间核反应堆电源的航天器^[2,3], 见表1。

美国和俄罗斯/前苏联历来视空间核反应堆电源为国家战略核心技术, 在长达数十年的时间里, 投入了巨量的资金和人力进行持续研发, 支持和开展了一系列研发计划^[4-15], 取得了举世瞩目的成就。作为核动力技术的一个分支, 始于冷战时期的空间核反应堆电源技术从一开始就是为军事任务服务, 美国和前苏联发射的数十颗装备空间核反应堆电源的航天器, 除了个别为试验验证性质外, 均具有明确的军事背景(如前苏联装备BUK型空间堆的“宇宙”系列海洋雷达侦查卫星RORSAT, 其用途为监视美国的核潜艇在各大洋上的行踪)^[5,16-17]。在相关军事用途的强力驱动下, 空间核反应堆电源技术获得迅速发展, 其展现出来的优异

性能也促使科学家们在各种民用航天任务中考虑进行应用, 包括多种类型的深空探测、星表基地、地球轨道应用等任务均有采用核反应堆电源供电的方案。伴随人类足迹的不断拓展, 在越来越多的空间任务中, 常规能源(化学能、太阳能)已不能满足需求, 先进的空间核反应堆电源成为必然甚至是唯一的选择。

作为典型的军民两用技术, 空间核反应堆电源技术的研发与应用将对国防军事、科学探索和拓展人类生存空间、开发宇宙资源、推动社会进步等产生重大影响^[1]。进入21世纪后, 美俄的相关空间核反应堆电源研发计划稳步推进, 各种新方案、新思潮层出不穷。作为迅速崛起中的大国, 我国也明确表示在未来的深空探测任务中将应用空间核动力^[18], 以空间核反应堆电源为代表的空间核动力技术进入了黄金发展时期。

本文将系统介绍空间核反应堆电源的原理、特点、适用范围和应用前景, 分析总结国际空间核反应堆电源技术的发展历史现状和发展趋势, 列举典型的国际空间核反应堆电源方案, 概述空间核反应堆电源的应用安全, 并就我国该技术的发展给出一些建议。

1 空间核反应堆电源简介

1.1 空间核反应堆电源基本概念及原理

空间核反应堆电源是在空间任务中将核反应堆产生的热能转换成电能为航天器供电的装置。空间核反应堆电源主要由反应堆本体、影子辐射屏蔽、热电转

表1 空间核反应堆电源应用情况

Table 1 Summary of space nuclear reactor power applications

序号	国别	发射日期	航天器	电源型号	寿命
1.	美国	1965-4-3	Snapshot	SNAP-10A	43 d
2.	前苏联	1970-10-3	“宇宙”367	BUK	110 min
3.	前苏联	1971-4-1	“宇宙”402	BUK	<3 h
4.	前苏联	1971-12-25	“宇宙”469	BUK	9 d
5.	前苏联	1972-8-21	“宇宙”516	BUK	32 d
6.	前苏联	1973-12-27	“宇宙”626	BUK	45 d
7.	前苏联	1974-5-15	“宇宙”651	BUK	71 d
8.	前苏联	1974-5-17	“宇宙”654	BUK	74 d
9.	前苏联	1975-4-2	“宇宙”723	BUK	43 d
10.	前苏联	1975-4-7	“宇宙”724	BUK	65 d
11.	前苏联	1975-12-12	“宇宙”785	BUK	<3 h
12.	前苏联	1976-10-17	“宇宙”860	BUK	24 d
13.	前苏联	1976-10-21	“宇宙”861	BUK	60 d
14.	前苏联	1977-9-16	“宇宙”952	BUK	21 d
15.	前苏联	1977-9-18	“宇宙”954	BUK	43 d
16.	前苏联	1980-4-29	“宇宙”1176	BUK	134 d
17.	前苏联	1981-3-5	“宇宙”1249	BUK	105 d
18.	前苏联	1981-4-21	“宇宙”1266	BUK	8 d
19.	前苏联	1981-8-24	“宇宙”1299	BUK	12 d
20.	前苏联	1982-5-14	“宇宙”1365	BUK	135 d
21.	前苏联	1982-6-1	“宇宙”1372	BUK	70 d
22.	前苏联	1982-8-30	“宇宙”1402	BUK	120 d
23.	前苏联	1982-10-2	“宇宙”1412	BUK	39 d
24.	前苏联	1984-6-29	“宇宙”1579	BUK	90 d
25.	前苏联	1984-10-31	“宇宙”1607	BUK	93 d
26.	前苏联	1985-8-1	“宇宙”1670	BUK	83 d
27.	前苏联	1985-8-23	“宇宙”1677	BUK	60 d
28.	前苏联	1986-3-21	“宇宙”1736	BUK	92 d
29.	前苏联	1986-8-20	“宇宙”1771	BUK	56 d
30.	前苏联	1987-2-1	“宇宙”1818	TOPAZ-I	142 d
31.	前苏联	1987-6-18	“宇宙”1860	BUK	40 d
32.	前苏联	1987-7-10	“宇宙”1867	TOPAZ-I	342 d
33.	前苏联	1987-12-12	“宇宙”1900	BUK	124 d
34.	前苏联	1988-3-14	“宇宙”1932	BUK	66 d
35.	前苏联	1988-3-15	“宇宙”1933	BUK	60 d

换系统、废热排放系统和自动控制系统5部分组成, 系统原理如图1所示。

在反应堆本体内发生核裂变反应产生的热能被传输至热电转换系统, 一部分热能在热电转换系统中转换为电能, 剩余没有转换为电能的废热则由废热排放系统通过辐射散热形式排散到宇宙空间。影子辐射屏蔽位于反应堆本体和电源其它系统以及航天器有效载

荷之间, 可以将核反应堆产生的辐射剂量减弱至有效载荷或宇航员可接受的水平。自动控制系统负责电源系统的监测和运行控制。

1.2 空间核反应堆电源的特点

目前, 太阳能电池是应用最广泛的航天供能形式, 其技术成熟、安全可靠、工作寿命较长, 电功率可高达数十至百千瓦。不过, 太阳能电池为非自主能源, 依赖太阳光照条件, 其使用受到诸多限制: 受限于太阳光能量密度, 大功率下电池阵展开面积巨大, 过大的电池阵对航天器的构型、轨道保持和姿态控制设计等产生巨大挑战; 对于深远空间或太阳阴影区, 由于太阳常数较小(如木星太阳常数仅约为地球轨道的3.7%)或阴影时间过长(如长达14个地球日的月夜), 太阳能电池将不适用。

与太阳能电池相比较, 空间核反应堆电源的根本优点在于其为自主电源, 不依赖于阳光, 且储能极高, 从而在以下方面独具优势:

1) 它是自主电源, 不依赖于阳光, 可全天候全天候连续工作, 能够在深远空间、日照阴影区工作。

2) 环境适应性好, 生存能力强, 可在尘暴、高温、辐射等恶劣条件下工作。

3) 适用功率范围广, 可以覆盖千瓦至兆瓦及以上功率输出, 可以有效满足航天任务日益增长的能源需求。

4) 质量功率比随功率增长而降低, 在大功率条件下质量功率比优于太阳能电池, 且功率越大, 质量优势越明显, 非常适合于大功率航天任务。

5) 无对日定向要求, 可设计成紧凑结构, 隐身特性及机动特性好, 大功率条件下系统体积及结构展开尺寸远小于太阳能电池, 受打击面积小, 非常适用于为军事任务服务。

总的来说, 相较于太阳能电池, 空间核反应堆电源具有环境适应性好、功率覆盖范围广、结构紧凑以及大功率条件下质量更小的突出优点。不过, 空间核反应堆电源也具有技术复杂、研发周期长、投资高的特点, 存在并需要解决辐射防护和核安全等特殊问题。

1.3 空间核反应堆电源的适用范围

国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)在2005年出版的《核电源及核推进在和平探索太空中的作用》一书中给出了不同空间电源的适用功率范围及适用任务周期, 参见图2^[4]。

对于小时量级的短期任务, 化学电池可提供高达6万kWe的电功率, 但当任务周期延长至1个月时, 其只能为航天器提供千瓦级及千瓦以下电功率, 因此化学电池通常服务于短期任务, 如执行短期任务的返回

式卫星。太阳能电池本身不适于提供瞬间大功率输出,其在10~50 kWe功率量级最为高效,同时具有较长的使用寿命,因此太阳能电池通常服务于光照条件良好、中等功率水平的长期任务,例如目前绝大多数长期任务的地球轨道航天器采用太阳能电池提供电力。空间核反应堆电源几乎可以为任何寿命周期的任

务提供无限制的电力供给,然而考虑到其综合效费比,通常将其应用中高功率(大于10 kWe)需求的航天任务。放射性同位素电池输出电功率较小(千瓦及以下),可长周期连续提供电力,因此特别适合于光照条件不太好、功率需求不太高的长周期无人深空探测任务以及星表探测任务。

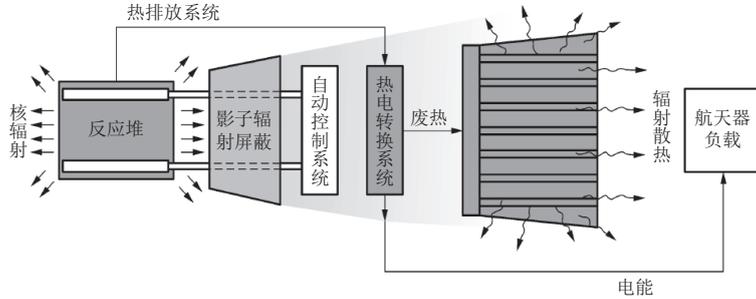


图1 空间核反应堆电源系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of space nuclear reactor power

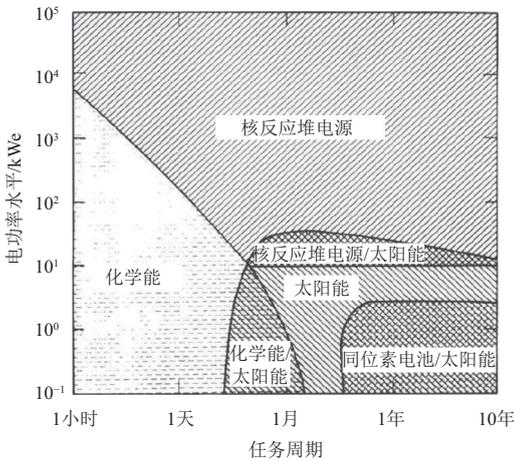


图2 不同空间电源的适用范围

Fig. 2 Regimes of possible space power applicability

需要注意的是,上述不同空间电源的适用范围主要从功率水平和使用寿命两个方面考虑,为一般性原则,并非一成不变。不同空间任务在选择某一种或某几种电源作为其供电方式时,会对电源提出总体性技术要求,包括但不限于功率、寿命、质量、体积等,另外,任务本身的特性、运行环境以及技术路线的效费比、技术成熟度、安全可靠等方面的因素也会对电源形式的选择产生或多或少的影响。比如,对于深空探测任务,太阳能由于受限于太阳常数小而不适用;某些军事任务,虽然太阳能电池能够满足功率和寿命上的要求,在质量功率比及经济性上也优于空间核反应堆电源,但是太阳能电池帆板过大且需对日定向,严重影响航天器隐身及机动性能,甚至因此影响军事目的的实现,因此实际上空间核反应堆电源更优;千瓦级及以下功率深空探测任务一般采用放射性

同位素电池,在这个功率量级放射性同位素电池综合性能最优,不过考虑到同位素电池原料Pu(钚)-238获取困难、存量有限,也可以采用空间核反应堆电源方案作为备用方案,例如美国目前正在积极执行“Kilopower”千瓦级空间核反应堆电源研发计划,其目的之一就是作为同位素电池的有益补充。

综合考虑各方面因素,可以给出空间核反应堆电源的普适性适用范围:

- 1) 大功率(百千瓦级及以上)、长寿命任务。此时,空间核反应堆电源是最优甚至是唯一选择。
- 2) 中等功率(十千瓦级)、长寿命、太阳常数小/日照阴影时间长/无日照任务。此时,空间核反应堆电源是最优甚至是唯一选择。
- 3) 中等功率、长寿命、日照条件良好,但对隐身、机动性要求高的军事任务。此时,空间核反应堆电源是最优选择。
- 4) 小功率(千瓦级及以下)、长寿命、太阳常数小/日照阴影时间长/无日照任务。此时,放射性同位素电池最优,空间核反应堆电源可以作为备选方案。

1.4 空间核反应堆电源的应用前景

空间核反应堆电源适用功率范围广、环境适应能力强、结构紧凑、寿命长的优点,使其在空间任务中有广泛的应用前景。以下分别从民用、军用两个方面进行阐述。

1.4.1 民用航天任务

自空间核反应堆电源诞生起,人们就开始设想将空间核反应堆电源应用于包括深空探测^[19-24]、月球和火星探测^[25-29]、地球轨道应用^[30-31]等在内的各种民用航天任务。为了更好地评估空间核反应堆电源对民用航天

任务的支撑作用，有关航天大国及国际机构也针对空间核反应堆电源的和平利用展开了系统的研究与论证。

20世纪80年代，为了支撑美国未来太空政策，美国国家航空航天局（NASA）牵头对未来60年（1995—2055年）的民用航天任务及其能源需求进行了展望、分析和论证，并就在这些任务中使用空间核反应堆电源的可行性进行了评估^[32-33]。评估结果表明：50 kWe及以上功率量级的空间核反应堆电源可以广泛、明显地增强1995—2055年间的民用航天任务能力，并使一系列雄心勃勃的计划得以实现。

图 3^[1, 32-33]给出了NASA评估的未来可以采用空间核反应堆电源进行能源供给的有关民用航天任务，包括外太阳系、内太阳系、地月空间以及地球轨道4个维

度，基本上覆盖了21世纪中叶以前人类可能感兴趣的足够电功率量级才能支持的科学、商业航天任务。外太阳系应用包括火星以远行星（土星、天王星、海王星、冥王星）以及小行星、彗星无人探测任务；内太阳系应用主要为无人和有人的火星及其卫星探测，具体应用对象包括样品返回、有人科考、有人前哨站和基地，也包括电推进载人/货运飞船等；地月空间应用包括永久有人月球前哨站、有人月球基地、无人月球观察站阵列、电推进飞船、地月L1拉格朗日点基地等；地球轨道应用包括GEO通讯平台、GEO驻留站/基地、航空/海洋交通控制雷达卫星、微重力材料加工厂、新型空间站等。上述应用对电功率的需求低至15 kWe，高至7 MWe，均可以或必须使用空间核反应堆电源。

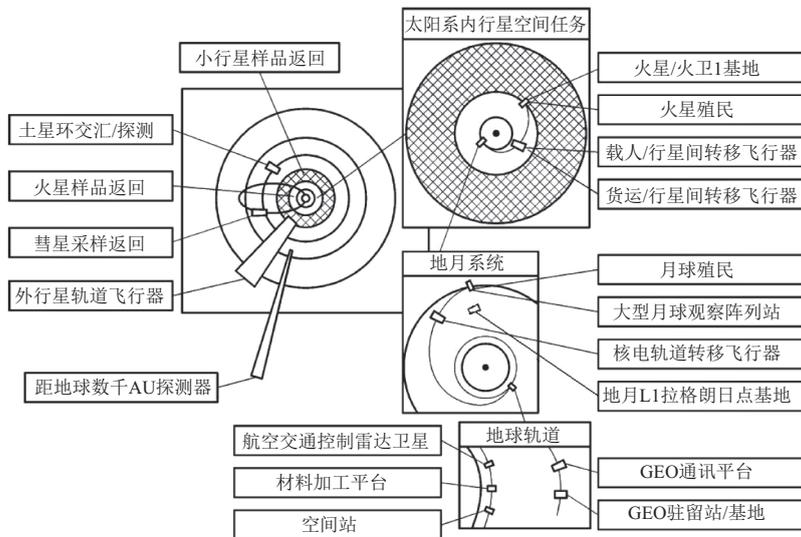


图 3 空间核反应堆电源在民用航天任务中的应用
Fig. 3 Civil mission applications of space nuclear reactor power

2005年，IAEA对未来高功率民用航天任务能源需求进行了综述（图 4）^[4]。这些任务包括通讯及电视转播、环境保护、太空发电及生产加工、科学任务、全球空间任务5个大类，功率需求从10 kWe直至100 MWe量级，这些任务中除了中等功率（百千瓦级以下）地球轨道任务外，其它任务均需使用空间核反应堆电源。

2012年2月，NASA发布《空间技术路线图与优先任务》^[34]，将空间核反应堆电源放在未来5年最高优先级的16个技术领域之列。其中，将空间核反应堆电源分为100 kWe以下和100 kWe以上两个功率台阶，计划在2030年前执行4次核动力航天器发射任务。2015年7月，NASA对上述路线图进行了扩展和更新，发布新版《NASA技术路线图》^[35]，基于满足相关任务架构的要求，将空间核反应堆电源分为3个功率水平：1~10 kWe，10~100 kWe，1~5 MWe，分别用于科学探索、载人星体/载人小行星探索、载人火星探索任务。

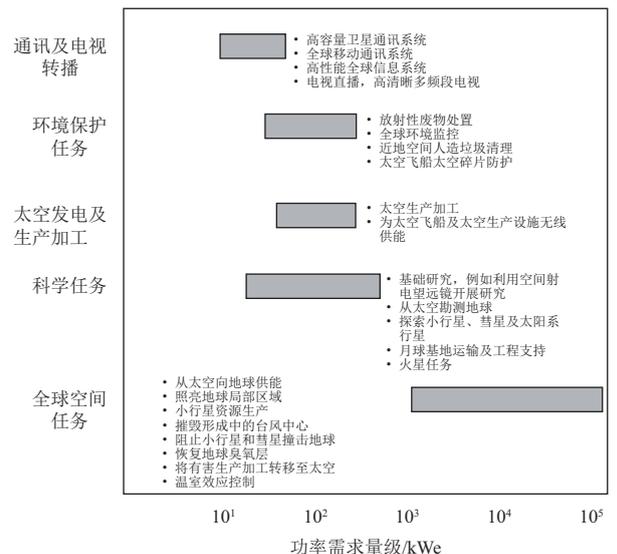


图 4 未来高功率民用航天任务
Fig. 4 Future high power civil space missions

1.4.2 军用航天任务

空间核反应堆电源技术的研发始于军事目的,美国和俄罗斯/前苏联的空间核电源(包括空间核反应堆电源和放射性同位素电池)研发计划一开始就是为军事任务服务的,尤其是地球轨道上的有关应用^[36-37]。

20世纪80年代中叶,美国发布了战略防御倡议(SDI,也称“星球大战计划”)^[36-38],核心目的是利用美国的高技术优势,建立空间武器系统,提供对付战略核武器攻击的空间防御手段,以消除前苏联日益增长的核威胁。SDI是一个以空间为主要基地,由全球监视、预警与识别系统、拦截系统以及指挥、控制和通讯系统组成的多层次太空防御计划。SDI将各新式空间武器系统对能源的需求分成了3个等级:

1) 基态。基态指整个寿命周期的正常运行模式,该等级对能源的需求为数千瓦至百千瓦量级的全寿期连续功率供给,用于满足各种日常维护、控制功能,包括监视、通讯、数据处理、轨道控制以及制冷等。

2) 警戒态。警戒态指可能导致战争的响应模式,该等级对能源的需求可高达十兆瓦量级,用于满足定向、跟踪以及类似任务需求,整个任务寿期该模式的累积运行时间约一年。

3) 爆发态。爆发态指战争时的运行模式,该等级对能源的需求可高达百兆瓦量级甚至更多,用于驱动高能武器等,持续时间数十至数百秒。

对于特定的SDI武器系统的能源需求,参见表2。为满足各任务能源需求,SDI对核能以及常规能源进行了评估,认为空间核反应堆电源的突出优势体现在寿命长、生存能力强以及结构紧凑,因此对于大多数SDI武器系统(尤其是长周期大功率任务,比如监视系统、能量武器系统等),空间核反应堆电源都是必然选择^[37]。而负责SDI计划能量武器系统的美国物理协会(American Physical Society, APS)研究小组认为,基于战略防御计划的迫切需求,对于基态和警戒态都需要核反应堆,而对于爆发态,核反应堆和基于火箭引擎技术的化学燃烧能源都可以满足非常高的短时能量需求^[37,39]。APS委员会的成员认为,基于生存能力以及可靠性方面的考虑,甚至对于数十千瓦电功率需求,也必须采用核反应堆电源^[37,40]。

苏著亭等编著的《空间核动力》^[1]中,介绍了天基雷达系统和天基武器系统对空间核反应堆电源的功率需求(参见表3)。书中明确指出,作为空间武器装备用电源首先要满足功率要求,此外还必须充分考虑所选电源的独立性、机动性、环境适应性、生存能力、抗打击能力等诸多因素,综合分析来看,空间核

反应堆电源必然是空间军事装备的不可替代的选择。

表2 SDI能源需求预估
Table 2 Estimated SDI power requirements

武器系统	基态	警戒态	爆发态
助推段监视/跟踪	4~10	4~10	4~10
空间监视/跟踪			
红外	5~15	5~15	15~50
雷达	15~20	15~20	50~100
雷达成像	15~20	15~20	100~500
激光照射	5~10	5~10	50~100
多普勒雷达	15~20	15~20	300~600
天基拦截器	2~30	4~50	10~100
化学激光	50~100	100~150	100~200
激光反射镜	10~50	10~50	20~100
中性粒子束	20~120	1 000~10 000	100 000~500 000
自由电子激光	20~120	1 000~10 000	100 000~500 000
电磁轨道炮	20~120	1 000~10 000	200 000~5 000 000

表3 空间武器系统的功率需求
Table 3 Power requirements of space weapon systems

名称	电功率
天基雷达系统	数十千瓦至上兆瓦
天基预警雷达卫星	
雷达成像侦察卫星	
天基武器系统	数百千瓦
高功率微波武器	
高能激光武器	数十兆瓦
粒子束武器	数十千瓦到百兆瓦
天基电子干扰卫星	数十千瓦到一兆瓦

2 空间核反应堆电源技术发展情况

冷战期间,美国和前苏联等开始系统研究将核反应堆技术应用于太空,为空间军事任务提供电力,在不同任务背景驱动下,持续投入大量人力、物力进行研究,攻克了大量关键技术,建成了一系列空间核反应堆电源地面试验装置,形成了成体系的空间核反应堆电源研发能力,并实现了数型空间核反应堆电源的空间应用,取得了令人瞩目的成就。进入21世纪后,随着新的深空探测、载人登陆火星等任务的提出,美俄欧均提出了新的空间核反应堆电源研发计划,相关工作扎实推进、成果斐然,各种新概念、新技术也层出不穷,空间核反应堆电源研究迈入了新的研究阶段。

2.1 美国发展情况

美国空间核反应堆电源的发展历程可分为4个阶段。第1阶段是20世纪50—70年代。这一时期美国针对

潜在的国防和太空探索任务需求以核辅助电源系统计划(SNAP)^[6]为中心开展了大量的概念设计和技术研发活动,发展了SNAP-2、SNAP-8、SNAP-10A、SNAP-50等多种反应堆系统,建造了6个原型反应堆并进行了试验。1965年4月,美国将采用温差热电偶转换、输出电功率为500 We的SNAP-10A成功送入了太空,SNAP-10A运行了43天后被永久关闭,是世界上第一个发射至空间的核反应堆电源,也是目前为止美国唯一发射至空间的核反应堆电源系统。由于国防需求不明确以及太空任务优先顺序的调整,美国政府于1973年终止了空间核反应堆电源的大规模开发投入。

第2阶段是20世纪80年代初至90年代初。在“星球大战”计划(SDI)及太空探索倡议计划(SEI)^[41]的支持下,美国空间核反应堆电源研究开发得以复苏,开展了以SP-100计划^[7-8]为主的研究开发工作。到1994年SP-100计划结束时,电源研究已达到详细设计和部件验证阶段。由于政府优先任务再次调整和投资削减,空间核反应堆电源发展在90年代中期再次陷入低潮。

第3阶段是21世纪初到2006年。2002年2月,NASA开始实施太空核能倡议计划(NSI)(后更名为“普罗米修斯”计划^[9-10]),计划至2012年投资90亿美元,研究核心是大功率空间核反应堆电源及核电推进技术。计划中确定了输出电功率为200 kWe的气冷快堆加布雷顿循环的核反应堆电源系统方案,建造了布雷顿发电机样机并开展了相关试验,该电源计划用于为“冰覆木卫轨道飞行器”(JIMO)提供电力。由于技术复杂、经费投入巨大以及NASA空间任务发展优先级变化的原因,该计划仅持续数年时间,于2006年终止。

第4阶段是2006年开始至今。2006年后,美国吸取以往经验,调整了研发策略,注重于充分利用已有成熟技术来降低研发成本和风险,缩短研发周期。研发的重点计划包括为未来星球基地供电的经济可承受星表裂变电源计划(AFSPS)^[11]以及千瓦级电源计划(Kilopower)^[12-13]。2013年,美国完成了AFSPS的部件和子系统的研制与测试,2015年完成了非核集成演示工作。Kilopower研发目的是作为同位素电池的备用以及填补同位素电池(千瓦以下)和AFSPS(数十千瓦级)之间的功率空当。Kilopower采用了模块化的设计理念,根据任务需求适当改变系统结构至可以输出0.5~10 kWe的电功率。美国于2015年启动了“采用斯特林技术的千瓦级反应堆演示验证”项目(KRUSTY)^[42],已分阶段完成了实验装置系统设计和非核材料测试、堆芯电加热模拟装置设计制造、高温热管及自由活塞式斯特林发电机研究制造、电加热不锈钢模拟堆芯非

核系统测试、电加热贫铀模拟堆芯系统测试,目前已建成地面原型堆,计划于2017年11月开始实验测试工作,全面验证该型电源的可行性。预计美国将于2020年具备千瓦级核反应堆电源的飞行应用条件。

2.2 俄罗斯/前苏联发展情况

俄罗斯/前苏联空间核反应堆电源的发展历程可分为3个阶段。

第1阶段是20世纪50—80年代。前苏联从1956年开始研究空间反应堆电源技术,至前苏联解体前,共开发了4个主要型号(Romashka、BUK、TOPAZ-I和TOPAZ-II)^[2-3,14],一共向太空成功发射了34颗(32颗采用BUK型电源,2颗采用TOPAZ-I型电源)使用空间核反应堆电源的“宇宙”系列军事侦察卫星,取得了引人瞩目的成就。Romashka是石墨直接导热、温差热电偶转换的核反应堆电源,电功率460~475 We。BUK型空间核反应堆电源采用温差热电偶转换,液态钠钾合金回路冷却,电功率3 kWe。TOPAZ-I型空间核反应堆电源采用液态钠钾合金回路冷却,多节热离子热电转换,电功率5 kWe。TOPAZ-II型空间核反应堆电源与TOPAZ-I型相似,所不同的是,采用了单节热离子热电转换,电功率5 kWe。

第2阶段是20世纪90年代至21世纪初。前苏联解体后,由于经费投入大幅缩减,空间核反应堆电源的研究开发只能在小规模下发展。相关研究机构陆续研究了功率和寿期大幅提高的第二代热离子电源系统(输出电功率40~150 kWe),同时也开展了动态能量转换的更大功率的空间反应堆电源系统研究。

第3阶段是2009年开始至今。2009年,时任俄罗斯总统批准实施兆瓦级空间核动力飞船研发计划^[15],开启了俄罗斯空间核动力发展的新阶段。该兆瓦级空间核动力飞船为核电推进,核反应堆电源采用超高温气冷快堆设计,气体布雷顿循环发电。目前已完成兆瓦级空间核反应堆电源初步设计、反应堆燃料元件入堆考验以及反应堆本体技术试验工作,飞船原计划2018年首飞,后推迟至2025年之前完成飞船制造和飞行试验准备工作。除兆瓦级核动力飞船外,俄罗斯仍在持续进行热离子技术研究。2012年3月,俄红星公司和物理动力工程研究院公布了创新型热离子转换器设计,在降低运行温度同时还能获得超过10%以上的转换效率,从而使热离子核反应堆实现亚兆瓦级的功率输出^[31]。

2.3 欧洲发展情况

历史上,欧洲有关国家也开展过空间核反应堆技术研发,但在研发规模、研发深度、持续时间上与美国和俄罗斯/前苏联相差较远,也没有真正实现应用。

为支持新时期欧盟 (European Union) “地平线2020” 战略 (Horizon 2020) [43], 近年来欧盟开始重新审视空间核反应堆电源在航天任务中发挥的重要作用, 从2011年起连续推进了数个与空间核反应堆电源研发有关的计划。

2011—2013年期间, 欧盟执行了“空间电源和推进颠覆性技术” 计划 (DiPoP) [44-45], 对未来空间电源和推进有关的颠覆性技术及其应用进行了评估。DiPoP项目对非核空间电源和推进技术、核电推进技术、核热推进技术、空间核反应堆电源技术、空间核安全和可持续性发展、空间核技术公众接受度及公众信息公开、空间电源及推进应用进行了详细论证、评估。在发布的电推进路线图中, 通过15年周期的研究, 在2030年前后, DiPoP计划的研究成果结合先进电推进技术和核反应堆电源供电的核电推进技术将可以服务于包括内太阳系无人科学探测/行星间科学先导、有人行星开发先导货运 (建设小型基础设施)、重型货运/大型无人外太阳系探测等任务; 在发布的核反应堆电源路线图中, 给出了30 kWe、200 kWe空间核反应堆电源研发路径, 计划在2025年前针对首选任务建设反应堆原型, 2030年执行首飞验证。

在DiPoP计划研究成果的基础上, 2013—2014年间, 欧盟委员会 (European Commission) 资助执行了“用于长周期探索计划的空间电源和推进系统用兆瓦级高效能技术” 计划 (MEGAHIT) [46], 该计划研究目标包括: 在“地平线2020” 框架内构建空间核电推进路线图、建立包含俄罗斯在内的欧洲空间核电源研发团队、研究国际范围内潜在的合作机会。在核电推进路线图构建过程中, 功率量级最终确定为兆瓦级, 并对各分系统技术选项进行了筛选。该功率量级的核电推进具有广泛的应用前景, 潜在应用包括地球轨道目标偏移 (比如消除小行星撞击地球威胁)、大功率无人深空探测 (比如木卫样品返回)、空间拖船、载人火星任务。MEGAHIT计划对设想建造的国际核电推进飞船 (INPPS Flagship) 进行了概念研究, 给出了总体构架和各分系统技术选项, 该飞船计划在2030年后发射升空。欧盟宣称MEGAHIT计划将成为更大范围国际合作研发的典范, INPPS飞船计划将为人类文明在太空的国际和平合作创建新的愿景, 对欧洲大陆的经济增长贡献可以与“阿波罗” 计划和国际空间站计划相媲美。

DiPoP计划和MEGAHIT计划提出的空间核反应堆电源覆盖了整个功率范围 (30 kWe、200 kWe、兆瓦级), 作为上述计划的延续, 在“地平线2020” 战略支助下, 欧盟在2015—2017年期间开始执行“电推进

系统转换器、反应堆、辐射器、推进器演示验证” 计划 (DEMOCRITOS) [47], 准备对空间核电推进分项技术进行演示验证, 标志着DiPoP和MEGAHIT计划发布的路线图开始进入正式实施阶段。该计划为欧洲和俄罗斯联合计划, 研究团队包含来自英国、德国、俄罗斯、意大利、法国的核领域和航天领域的专家, 巴西以观察员身份也参与了该项目。目前DEMOCRITOS已完成1兆瓦量级核电推进太空飞船 (木卫二及火星任务) 初步设计以及兆瓦级核电推进系统地面演示验证装置基准测试初步设计[48]。

2.4 发展趋势分析

纵观空间核反应堆电源发展历程及近期发展情况, 可以总结出以下几点空间核反应堆电源技术研发趋势:

1) 系列化功率全覆盖

美俄已成功将0.5~5 kWe的核反应堆电源送入了太空, 目前正在研发千瓦至兆瓦、寿命超过10年的新型空间核反应堆电源。美国在太空技术路线图中提出的空间核反应堆电源的功率水平从千瓦级覆盖至兆瓦级。俄罗斯热离子型核反应堆电源的功率范围从5 kWe到亚兆瓦级, 兆瓦级空间核动力飞船计划中的核反应堆电源功率为兆瓦级。欧盟执行的DiPoP和MEGAHIT计划覆盖功率范围为30 kWe至兆瓦级。由此可见, 美俄欧正逐步通过空间核反应堆电源的系列化研发, 实现功率水平的全覆盖。

2) 综合考量选择技术路线

在对某一功率范围的空间核反应堆电源进行研发时, 美俄欧都首先进行各种技术方案的分析, 根据功率适用范围、性能参数、可行性、技术基础、开发费用等进行比较论证。在选择技术路线时, 并不单纯追求高技术指标, 而是综合考虑技术的先进性、成熟度和经济性, 尽量做到技术继承与发展的有机统一, 先进性与现实性的有机统一。

在SNAP计划期间, 美国曾同时对温差热电偶转换、热离子转换、汞朗肯循环、钾朗肯循环、布雷顿循环等多种热电转换方式进行研究。后来, 针对空军的500 We功率需求, 为尽快实现空间核反应堆电源的应用, 美国重点对温差热电偶转换的SNAP-10A开展了深入研究, 并进行了飞行测试。在后来的SP-100、普罗米修斯计划和AFSPS的研究中, 美国都首先进行了技术路线论证, 以明确研究方向。综合来看, 目前美国在斯特林发电技术方面取得了突破: 考虑到热管冷却堆芯技术的简单、安全、可靠的特性, 以及液态金属回路冷却堆芯技术的更优质量特性和更高的技术成熟度, 针对不同的需求, 美国在千瓦级功率范围选择了热管冷却快堆结合斯特林循环发电的技术路线, 在

几十千瓦至百千瓦的功率范围选择了液态金属回路冷却堆芯结合斯特林循环发电的技术路线。

在空间核反应堆电源研究初期，俄罗斯/前苏联也同时对朗肯循环、布雷顿循环、温差热电偶转换和热离子转换等多种热电转换方式进行了研究，后来根据侦查卫星对导航和目标定位的要求，否定了动态转换方式，选择静态转换的温差热电偶和热离子电源作为发展方向。目前，基于热离子空间核反应堆电源的技术基础、性能参数和功率适用范围，俄罗斯仍选择其作为千瓦至百千瓦的主要技术路线。而在兆瓦级，基于20世纪90年代的布雷顿发电技术研究基础，俄罗斯选择了超高温气冷快堆和布雷顿循环发电技术的技术路线。

欧盟在执行DiPoP和MEGAHIT计划时，在确定不同功率量级初步技术方案时，针对分项的堆芯、辐射屏蔽、热电转换、辐射器、电功率分配及管理技术可能采用的技术路线进行了详细论证，最终确定的液态金属/气体冷却快堆结合布雷顿循环发电的技术路线，在系统性能、技术继承性、技术可扩展性等方面具有综合优势。

3) 新时期研发更加实效、经济

新时期的技术研发，美俄欧都更加注重实效，采用了包括充分利用以往研究成果或陆地反应堆成熟技术、积极吸收国际技术和资金合作在内的多种手段，以期降低开发成本，加快研发进程。美国的AFSPS计划明确提出了“经济可承受”的要求，并强调利用陆地反应堆的技术、高效率能量转换技术以及常规材料，以降低开发风险和开发成本。美国的Kilopower计划，功率定为千瓦级，这个功率量级的研发费用本身就比大功率电源更少，经济可承受性更好，而在计划执行过程中，一方面充分利用现有设施开展相关实验研究工作，另一方面通过分阶段逐级模拟验证关键技术，有效控制了研发费用和研发风险，在缩减任务成本、加速研发进度方面取得了显著成效。与美国类似，俄罗斯正在执行的兆瓦级核动力飞船计划也是一个大量利用现有技术实现空间核动力应用的范例，俄专家指出“该技术方案是俄过去已开展工作的延续，不需要实现技术上的突破，只需要将现有技术进行修改达到兆瓦级，是一项技术可行、低风险的计划”^[49]。同时，俄罗斯和欧盟在各自近期的研发计划中，都在积极寻求技术上和资金上的国际合作，期望以一种更为“经济”的模式实现共赢。

4) 持续探索、开发新技术

研发过程中，美俄等在大力提升已有技术性能和

可靠性的同时，一直持续开发耐高温燃料与材料，不断提高热电转换系统效率，积极研发包括液滴型辐射器、碳纤维翅片辐射器、高效热电偶转换、碱金属转换、磁流体转换、热光电转换等在内的新技术，同时探索开发包括裂变碎片电源、聚变反应堆电源在内的新概念，寻求空间任务架构革命性突破。

3 代表性空间核反应堆电源举要

在空间核反应堆技术研发历程上，有多型反应堆实现了实际应用，还有一些反应堆已研究到了很深的程度，以下对其中的典型代表进行简介。

3.1 SNAP-10A^[1,4,6]

SNAP-10A是世界上第一个发射升空的空间核反应堆电源。搭载SNAP-10A的飞船“Snapshot”于1965年4月3日升空，4月4日反应堆达到满功率，5月16日，由于飞船电气故障，导致SNAP-10A在连续运行43天后被永久关闭。

SNAP-10A设计寿命1年，电功率500 We，最大直径1.5 m，高3.4 m，系统总质量435 kg。系统主要构成包括铀氢锆燃料反应堆、钠钾液态金属冷却回路、一体化硅锆温差热电偶转换/辐射散热器，如图5所示。

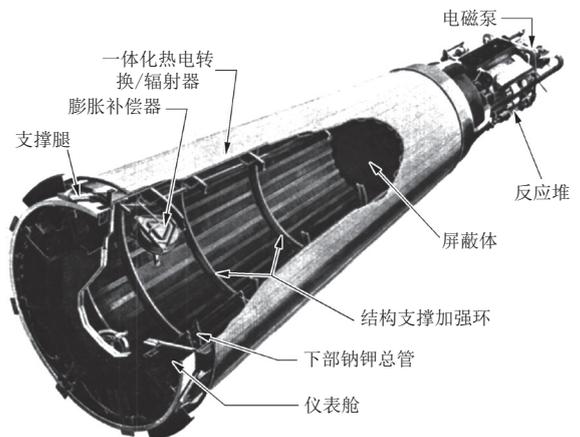


图5 SNAP-10A核电源系统总图
Fig. 5 SNAP-10A NPS layout

3.2 BUK^[1,4]

前苏联在20世纪60年代研发的BUK电源是世界上第一型实用的空间核反应堆电源。从1970—1988年，前苏联共有32个BUK型电源用于RORSAT卫星，最长任务持续时间135天。

BUK设计输出电功率3 kWe，系统总质量930 kg，早期寿命较短，后期寿命延长至半年。系统采用铀-钼合金燃料、钠钾液态金属回路冷却快堆、温差热电偶转换，如图6所示。

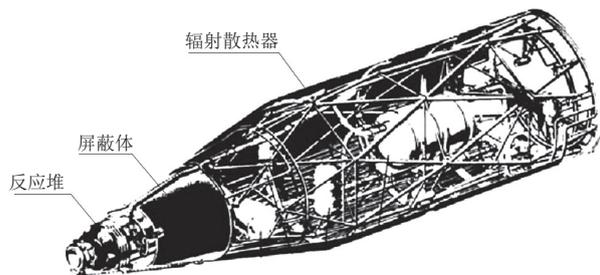


图6 BUK核电源系统总图

Fig. 6 BUK NPS layout

3.3 TOPAZ-I^[1,4]

前苏联在20世纪60—80年代还研发了TOPAZ-I型空间核反应堆电源。在1987年2月，前苏联发射了首个TOPAZ-I电源，运行了143天。1987年7月，前苏联发射了第二个TOPAZ-I电源，运行了近1年。

TOPAZ-I设计寿命1年，输出电功率7 kWe（含2 kWe自用电），系统总质量约1 t。系统采用二氧化铀燃料、氯化锆慢化超热堆、钠钾液态金属回路冷却、堆内多节热离子热电转换、回路式辐射散热器，如图7所示。

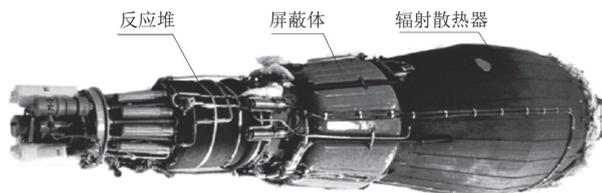


图7 TOPAZ-I核电源系统总图

Fig. 7 TOPAZ-I NPS layout

3.4 SP-100^[7,50]

1983年，在SDI计划支持下，NASA、美国能源部（United States Department of Energy，DOE）、美国国防部（United States Department of Defense，DOD）联合资助开展SP-100研发计划，目标是开发电功率输出范围覆盖十至百千瓦量级的空间核反应堆电源技术。一开始的研发聚焦在输出电功率100 kWe、寿命10年（满功率运行时间7年）的基准电源方案。进入20世纪90年代后，研发重点转向为服务SEI计划、输出电功率20~40 kWe的电源系统，期望通过降低技术指标要求，加速研发进度，实现尽早部署。至1994年计划终止时，SP-100研发约投资10亿美元，所有与反应堆有关的可行性问题都成功得到解决，除电磁泵和热电转换装置仍需在液态锂回路中进行部件试验外，已完成20~40 kWe电源系统的详细设计以及制造、资格认证工作。

SP-100基准设计方案采用氮化铀燃料、高温锂回路冷却快堆、掺杂镓磷的硅锗温差热电偶转换、热管

式辐射散热器，系统总质量4.6 t，发射状态时的尺寸为直径4 m、长6 m，如图8所示。

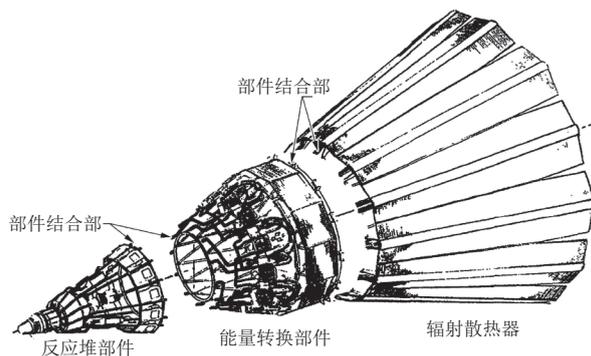


图8 SP-100核电源系统总图

Fig. 8 SP-100 NPS layout

3.5 AFSPS^[11,51-52]

2006年美国正式启动“星球表面裂变电源”计划（FSP），用以支持NASA未来的月球和火星任务。2007年，NASA、DOE共同资助开展了AFSPS电源研究，截止2015年，完成了所有非核部件和子系统的研制与测试，以及非核集成演示验证工作。由于AFSPS设计中采用了二氧化铀燃料、不锈钢结构材料等大量成熟技术，根据美国专家的说法“所有与核相关的技术均为成熟技术”，实际上AFSPS已经完成了所有技术开发工作，具备了上天实用的技术条件。预计装置开发和第一个飞行装置建造总计需耗资14亿美元。

AFSPS设计电功率40 kWe，寿命5~8年，月壤屏蔽模式AFSPS系统总质量约4.9 t，全集成屏蔽模式AFSPS系统总质量约为8.8 t。系统采用二氧化铀燃料、钠钾液态金属冷却反应堆、自由活塞式斯特林发电机、钛水热管式辐射器，如图9所示。

3.6 俄罗斯兆瓦级空间核反应堆电源^[15]

俄罗斯政府2009年公布了用于行星之间的载人或无人任务的兆瓦级空间核动力飞行器研发计划，计划投资170亿卢布（约6亿美元）。

该飞行器（参见图10）采用核电推进模式，核反应堆电源（参见图11）采用氦气气体冷却快堆以及闭式布雷顿循环热电转换系统，废热排放采用传统的热管式辐射器或全新的液滴式辐射器，输出电功率0.8~1.0 MWe，累计运行时间大于5万 h，单次连续运行持续时间大于1万 h。电推进器比冲约7 000 s。核动力航天器的质量约为20 t，核反应堆电源系统质量约6.8 t，设计寿命大于12年。

3.7 Kilopower^[12-13,42,53]

NASA和DOE联合研究团队于2010年开始执行Kilopower研发计划。按照计划，将于2017年夏季建

成地面原型堆KRUSTY并开展相关演示验证试验。这将是美国继SNAP计划后，近50年以来建设的第一个空

间核反应堆电源地面原型堆，也是世界上建成的第一个真正意义上的采用热管冷却堆芯的反应堆系统。

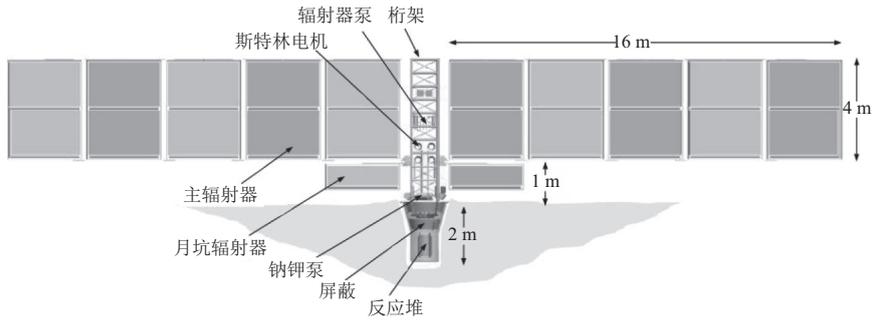


图 9 AFSPS参考概念图（月壤屏蔽模式）
Fig. 9 AFSPS concept (lunar regolith shield)

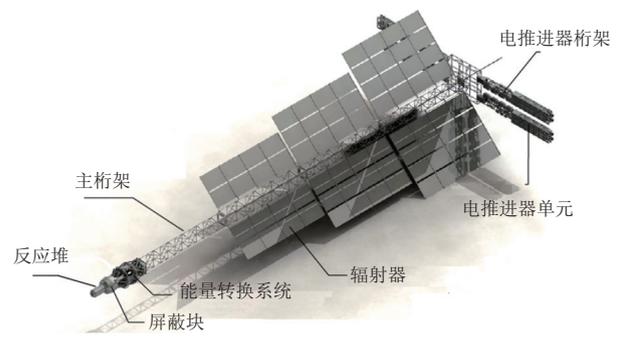


图 10 俄兆瓦级核动力飞船概念图
Fig. 10 Russian MWe nuclear electric spacecraft concept

中，曾经发生过数次事故，伴随事故经验的总结，其安全措施也得以不断完善。联合国也在不断寻求通过国际公约的形式从法律法规层面保证空间核反应堆电源的应用安全。

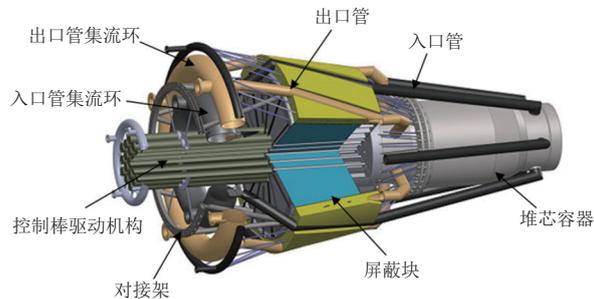


图 11 俄兆瓦级核动力飞船装备的核反应堆电源概念图
Fig. 11 Nuclear reactor concept for Russian MWe nuclear spacecraft

Kilopower电源系统采用铀钚合金燃料、钠热管冷却快堆、自由活塞式斯特林发电机、钛水热管式辐射器。通过局部的设计变更，基于该技术的不同电源系统可覆盖0.5~10 kWe电功率范围，1 kWe方案系统（参见图12 (a)）质量约400 kg，10 kWe方案系统（参见图12 (b)）质量约1.5t，设计寿命可达10年以上。

4 空间核反应堆电源的应用安全

核技术应用的安全性一直是公众关注的焦点，空间核反应堆电源作为核技术应用的一种形式，其安全性同样备受关注。在空间核反应堆电源的发展历程

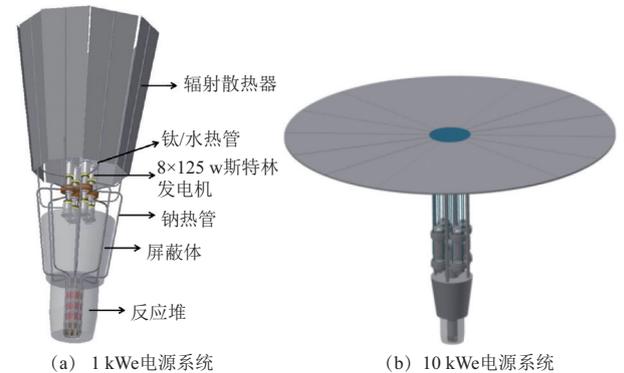


图 12 1 kWe和10 kWe Kilopower电源系统
Fig. 12 1 kWe and 10 kWe Kilopower System

4.1 事故及安全措施改进

相关文献表明，历史上，前苏联一共发生过5次空间核反应堆电源应用事故^[3, 36, 54-55]：

- 1) 1969年1月25日，前苏联发生了一起运载火箭发射事故，在这次事故中，火箭可能携带有一颗装备空间核反应堆电源的RORSAT卫星。
- 2) 1973年4月25日，前苏联一颗装备空间核反应堆电源的RORSAT卫星发射失败，坠入太平洋，核反应堆的安全设计确保了其保持在次临界状态。
- 3) 1978年1月24日，一颗在低地球轨道运行的前苏联RORSAT卫星“宇宙954号”携带BUK型空间核反应堆电源意外再入大气层并解体，在大气层中没有燃烧完全的带有放射性的残留物质散落在加拿大北部冰原约124 000 km²的无人区。经过事故后清理行动，未造成明显的环境影响；

4) 1983年2月7日, 前苏联RORSAT卫星“宇宙1402号”再入坠毁。事故中, 反应堆堆芯被成功弹出, 报告显示它在再入时已按设计完全烧毁并坠入南大西洋。

5) 1988年5月, 前苏联通报了RORSAT卫星“宇宙1900号”在轨道转移系统自动触发后, 因卫星与反应堆分离时姿态不正确, 未能将反应堆推至预定废弃处置轨道, 反应堆最终停留轨道高度约700 km, 比预定处置轨道稍低。这次事故没有对地球环境造成危害。

上述事故均为前苏联发生的事故, 前苏联也在核反应堆电源开发应用过程中不断吸取经验教训, 通过一系列技术措施改进、完善其安全特性。

搭载BUK反应堆的宇宙系列卫星的典型运行轨道高度约为250 km, 在任务结束后, 为保证不对地球环境造成危害, BUK反应堆将与卫星分离, 并被助推至约950 km的轨道以保证足够的反射性衰减周期。“宇宙954号”事件后, 前苏联重新设计了BUK反应堆的安全系统。后续卫星增加了一套堆芯再入弹出系统, 一旦反应堆发生意外再入, 堆芯在再入时将被弹出以保证其被气动加热完全烧毁至足够小的颗粒, 使放射性危害限制在可以接受的水平。该套系统在1983年发生的“宇宙1402号”事故中成功发挥作用, 事故中反应堆发生失控再入, 堆芯再入弹出机制成功动作, 堆芯再入时按设计完全烧毁并坠入南大西洋。

BUK反应堆采用的铀钼合金燃料熔点较低(1 126 °C), 将燃料弹出并在再入大气层的过程中烧尽是一种较好的解决方法。而对于TOPAZ系列反应堆, 由于其采用了熔点更高(2 800 °C)的二氧化铀燃料, 耐热的二氧化铀燃料有可能在再入大气层的过程中不会耗尽, 因此再入燃烧扩散的方法不再适用。为了保证TOPAZ系列反应堆的应用安全, 前苏联最后确定的解决方案就是要求TOPAZ系列反应堆运行在800 km以上的地球轨道, 这样运行后积累了放射性的反应堆在这个高度的轨道上具有足够长的轨道寿命(数百年以上), 再入前放射性产物具有足够长的衰变时间, 使其放射性活度衰减至足够低的可以接受的水平。

可以看到, 虽然空间核反应堆电源曾经发生过数次事故, 但是设计人员及时对事故经验进行了总结分析, 并采取有针对性的措施不断改进安全性, 同一类型事故并未重复发生。

4.2 联合国的有关原则和要求

自1978年发生前苏联“宇宙954号”事件后, 联合国开始在各种论坛场合探讨外层空间安全利用核能的议题。1992年, 联合国和平利用外层空间委员会(COPUOS)形成并通过了“关于在外层空间使用核动力源的原则”^[50]。

该原则对有关国际权利、空间核能源安全的技术见解、利用空间核能源的责任和损失补偿等问题作出规定。但是由于包括美国在内的部分代表对上述原则持保留意见, 目前该原则不具有国际法的法律约束力。

在上述原则中, 明确规定了空间核反应堆的安全使用要求:

1) 核反应堆可用于行星际航天任务, 足够高的轨道和低地球轨道(条件是任务执行完毕后核反应堆须存放在足够高的轨道上)。

2) 足够高的轨道是指轨道寿命足够长, 足以使裂变产物衰变到大约为铜系元素活性水平的轨道。足够高轨道必须能够使对现有和未来外太空任务构成的危险和与其他空间物体相撞的危险降至最低限度。在确定足够高的轨道的高度时, 还应考虑到毁损的反应堆的部件在再入地球大气层之前也须经过规定的衰变时间。

3) 核反应堆只能用高浓缩铀(U)-235燃料。核反应堆的设计应考虑到裂变和活化产物的放射性衰变。

4) 核反应堆在达到工作轨道或行星际飞行轨道前不得使其进入临界状态。

5) 核反应堆的设计和建造应确保在达到工作轨道前发生一切可能事件时均不能进入临界状态, 此种事件包括火箭爆炸、再入、撞击地面或水面、沉入水下或水进入堆芯。

6) 为显著减少载有核反应堆的卫星在其寿命低于足够高轨道的轨道上操作期间(包括在转入足够高轨道的操作期间)发生故障的可能性, 应有一个极可靠的操作系统, 以确保有效地和有控制地处置反应堆。

2009年, COPUOS和IAEA联合发布了“外层空间核动力源应用安全框架”^[57]。该框架提供了关于空间核动力源应用的高级指导, 涵盖了发射、运行和寿终飞行各阶段在核安全方面的指导意见。同时对于空间核动力源设计、制造、测试和运输各地面活动阶段, 对现有的国家或国际的安全指南和标准提供了补充指导意见。该安全框架的执行遵循自愿原则, 不具有国际法的法律约束力。

4.3 安全应用启示

空间核反应堆电源的研发应用超过了半个世纪, 其应用安全有教训也有经验。总的来看, 为了确保空间核反应堆电源的应用安全, 可以采取以下技术措施: 需确保反应堆在未进入工作轨道之前的任何情况下均处于次临界状态, 对于低轨道应用任务需有可靠措施保证任务完成后反应堆被推至足够高轨道进行处置, 一旦运行后的反应堆发生意外再入大气层事故, 可以考虑将其在大气层完全烧毁并完全扩散, 或者使

其完整再入以限制其影响范围。

通过上述合理的措施,同时在设计中严格遵守“关于在外层空间使用核动力源的原则”、“外层空间核动力源应用安全框架”,可以有效保证空间核反应堆电源的安全应用,即便发生事故,也可以将事故后果控制在公众可以接受的水平。

5 关于我国空间核反应堆电源技术发展的一些认识和思考

空间核反应堆电源技术是颠覆性国家战略技术,我国应进行积极研发。现就笔者多年以来在该领域的研究工作体会,给出几点个人的认识和思考:

1) 空间核反应堆电源技术研发为大国战略

空间核反应堆电源技术为跨领域高精尖技术,相较于传统技术具有巨大性能优势,可颠覆传统模式,具有明确而广泛的军民应用前景,其研发可产生巨大的科学、经济和社会效益。同时,该技术难度高、研发周期长、研发成本高昂,需要国家层面的大力推动和雄厚的技术、经济实力作为支持,唯大国可以支持,其研发必然是大国战略行为。

2) 空间核反应堆电源技术研发应别具一格

空间核反应堆电源与地面核反应堆有相同之处,最根本的就是它们都是核反应堆,都是对核能的利用,因此基本原理相同,部分技术相通。但是由于任务背景、运行环境、寿命阶段划分上明显不同,空间核反应堆电源在顶层设计原则、具体设计要求、设计理念、设计方法、技术路线上与地面核反应堆有云泥之别。应该说,空间核反应堆电源与地面反应堆技术异大于同。因此,研发过程中,在借鉴地面核反应堆研发经验成果的基础上,更应该大胆创新、转变思路,积极探索、采纳和应用新的技术和设计理念、设计方法,突破传统研发观念的束缚;另一方面,政府对空间核反应堆电源的监管也应该充分考虑该技术的特殊性,不能拘泥于针对地面核设施的已有法律法规、条条框框,在满足其安全应用的大原则前提下应给予更多的自主空间,创造宽松的研发环境。只有这样,我国空间核反应堆电源技术研发才有可能打破传统、后来居上,为我军民事业发展贡献更大力量。

3) 空间核反应堆电源技术研发应通力协作

空间核反应堆电源技术融核能、航天、材料、信息、控制、环境等科学为一体,是一门综合性的前沿科学技术,技术跨度广、难度大。作为核动力技术,其安全性牵动公众敏感神经。广泛的军民应用背景,关乎国家、社会发展。因此,空间核反应堆电源

的研发需要科学界、工业界、社会、政府通力协作。另外,科学无国界,空间核反应堆电源技术将来必然在拓展人类生存空间、推动人类社会进步上发挥巨大作用,这些都是人类共同的事业。在空间核反应堆电源研发历史上也有国际成功合作的典范(如TOPAZ核反应堆电源国际合作计划^[58]、欧盟-俄罗斯-巴西MEAGHIT计划、欧盟-俄罗斯-巴西DEMOCRITOS计划等),因此,我们在立足自主研发同时,也应积极寻求国际合作,取长补短,促进我国空间核反应堆电源技术健康、快速发展。

6 结束语

空间核反应堆电源性能优越、功能强大,可极大提升军民航天任务能力,其研发和应用必将对科学探索、国防军事、社会发展、人类进步产生重大影响。

进入21世纪后,在不同应用背景牵引下,空间核反应堆电源技术发展迎来新的契机,美俄欧提出的一系列计划稳步推进,相关研究百花齐放,成井喷状态。相信,在我国空间核动力人的努力下,不远的将来,空间核反应堆电源这颗“科学上的明珠”必将从神舟大地上升起并“龙翔九天”。

参 考 文 献

- [1] 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,2015.
- [2] 解家春,赵守智.空间核反应堆的过去、现在和未来(内部报告)[R].北京:中国原子能科学研究院,2014.
- [3] 许春阳,王颖,王春芬,等.国际空间核反应堆电源发展历程(内部报告)[R].北京:中国核科技信息与经济研究院,2012.
- [4] IAEA. The role of nuclear power and nuclear propulsion in the peaceful exploration of space [R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [5] 杨启法,卢浩琳.空间核反应堆电源研究和应用[J].航天器工程,1995,4(4):11-20.
- [6] Voss S S. SNAP reactor overview [R]. USA: Air Force Weapons Laboratory, 1984.
- [7] Pluta P R, Smith A M, Matteo N D. SP-100, a Flexible technology for space power from 10s to 100s of kWe [R]. USA: IEEE, 1989.
- [8] Buden D. Summary of space nuclear reactor systems(1983-1992)[R]. USA: AIP, 1993.
- [9] 朱毅麟.美国太空核动力计划重开张——“普罗米修斯”计划一瞥[J].国际太空,2004,9:26-30.
- [10] Ashcroft J, Eshelman C. Summary of NR program prometheus efforts(C)//USA: Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum. USA: STAIF, 2007.
- [11] Mason L, Poston D, Qualls L. System concepts for affordable fission surface power, NASA-TM-2008-215166[R]. USA: NASA, 2008.
- [12] Mason L, Gibson M, Poston D. Kilowatt-class fission power systems for science and human precursor missions [C]//USA: NETS-2013-6814. 2013.

- [13] Gibson A M, Mason L. Development of NASA's small fission power system for science and human exploration [R]. USA: AIAA, 2014.
- [14] 波诺马廖夫-斯捷普诺依 N M. 空间核动力(热电转换和热离子转换的空间核反应堆电源“ROMASHKA”和“ENISEY”)[M]. 刘舒, 译. 北京: 原子能出版社, 2015.
- [15] 许春阳. 俄罗斯兆瓦级空间核动力装置研发进展(内部报告)[R]. 北京: 中国核科技信息与经济研究院, 2012.
- [16] 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.
- [17] 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, (5): 32-35.
- [18] 网易新闻. 中国深空探测将应用空间核动力 [OL]. <http://news.163.com/17/0310/06/CF58R21D000187VI.html>.
- [19] Moeckel E W. Propulsion systems for manned exploration of the solar system, NASA-TM-X-1864 [R]. USA: NASA, 1969.
- [20] Bloomfield S H. Small space reactor power systems for unmanned solar system exploration missions, NASA-TM-100228 [R]. USA: , NASA , 1987.
- [21] Noca M, Polk E J, Lenard R. Nuclear electric propulsion for the exploration of the outer planets [C]// Proceedings of Forum on Innovative Approaches to Outer Planetary Exploration. USA: [s.n.], 2001.
- [22] Oleson R S. Electric propulsion technology development for the jupiter icy Moons orbiter project [C]// Space 2004 Conference and Exhibit. USA: [s.n.], 2004.
- [23] Cassady R J, Frisbee H R, Gilland H J, et al. Recent advances in nuclear powered electric propulsion for space exploration [J]. Energy Conversion Management, 2008, 49: 412-435.
- [24] Chiravalle P V. Nuclear electric ion propulsion for three deep space missions [J]. Acta Astronautica, 2008, 62: 374-390.
- [25] NASA. Report of the 90-day study on human exploration of the Moon and Mars, NASA-TM-102999 [R]. USA, NASA, 1989.
- [26] Henry W. Brandhorst, Ronald J. Sovie. Nuclear Technology and the Space Exploration Missions [C]// Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-90). USA: [s.n.], 1990.
- [27] Sovie R J, Bozek J M. Nuclear power systems for lunar and mars exploration [C]// 41st International Astronautical Conference. Germany: [s.n.], 1990.
- [28] Coomes E P, Dagle J E. The PEGASUS: a nuclear electric propulsion system for the space exploration initiative [C]// Eighth Symposium on Space Nuclear Power Systems. USA: [s.n.], 1991.
- [29] McGinnis J. Nuclear power systems for manned mission to Mars [R]. USA: Naval Postgraduate School, 2004.
- [30] Guven U, Velidi G. Usage of nuclear power as a powerful saudi arabia: source for space stations and for space development mission [C]// 62nd International Astronautical Congress. South Africa: IACC, 2011.
- [31] Andreev P V, Gulevich A V, et al. Physical and engineering potential of thermionics for advanced projects of sub-megawatt SNPS [C]// Nuclear and Emerging Technologies for space (NETS-2012). USA: ANS, 2012.
- [32] Mankins J, Olivieri J, Hepenstal A. Preliminary survey of 21st century civil mission applications of space nuclear power, JPL Report JPL-D-3547, [R]. USA: Jet Propulsion Laboratory, 1987.
- [33] Rosen R, Schnyer A D. Civilian uses of nuclear reactors in space [J]. Science & Global Security, 1989(1): 147-164.
- [34] NASA. NASA space technology roadmaps and priorities [R]. USA: the National Academies Press, 2012
- [35] NASA. NASA Technology roadmaps [R]. USA: NASA, 2015.
- [36] Steven aftergood. background on space nuclear power [J]. Science & Global Security, 1989(1): 93-107.
- [37] Aftergood S. Towards a ban on nuclear power in Earth orbit [J]. Space Policy, 1989: 25-40.
- [38] (U.S.) Office of technology assessment. sdi (strategic defense initiative) technology, survivability and software [R]. USA: Reprinted by U.S. Department of Commerce National Technical Information Service, 1988.
- [39] American Physics Society Study Group. Report to the American physical society of the study group on science and technology of directed energy weapons [J]. Reviews of Modern Physics, 1987, 59(3), Part II: S169.
- [40] Canavan G H, Bloembergen N, Patel C K N. Debate on APS directed-energy weapons study [J]. Physics Today, 1987(11): 48-53.
- [41] Coomes E P, Bamberger J A, Dagle J E, et al. An integrated mission planning approach for the Space Exploration Initiative, PHL-SA-20524 [R]. USA: Pacific Northwest Laboratory, 1992.
- [42] Sanchez R G, Hutchinson J D, Patrick ray mcclure, et al. Kilowatt Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) demonstration: CEDT phase 1 preliminary design documentation, LA-UR-15-26603 [R]. USA: [s.n.], 2015
- [43] European commission. HORIZON 2020 [OL] (2015-04-17). <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>.
- [44] DiPoP – Disruptive technologies for space power and propulsion [OL] (2017-09-20). <http://dipop.eu/>.
- [45] Koppel C R., Valentian D, Blott R, et al. Disruptive propulsive technologies for Ueropean space missions [C]// 5TH European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Muenchen Germany: [s.n.], 2013.
- [46] Ruault J M, Masson F, Worms J C, et al. MEGA HIT: update on the advanced propulsion roadmap for HORIZON2020 [C]// International Space Propulsion Conference. Cologne, Germany: Association Aeronautique et Astronautique de France, 2014.
- [47] Jansen F, Bauer W, Masson F, et al. DEMOCRITOS demonstrators for realization of nuclear electric propulsion of the european roadmaps MEGA HIT & DiPoP [C]// Oint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium. Kobe-Hyogo, Japan: [s.n.], 2015.
- [48] Koroteev A S, Andrianov D I, Karevskiy A V, et al. Test bench for key components of megawatt class international power and propulsion system ground demonstration [C]// 7TH European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Milan, Italy: [s.n.], 2017.
- [49] Zakirov V, Pavshool V. Feasibility of the recent Russian nuclear electric propulsion concept: 2010 [J]. USA: Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5): 1529-1537.
- [50] Marriott A T, Fujita T. Evolution of SP-100 system designs [C]// 11th Symp. Space Nuclear Power and Propulsion. USA: [s.n.], 1994.
- [51] Mason L S, Poston D I. A summary of NASA architecture studies utilizing fission surface power technology [C]// 8th Annual International

- Energy Conversion Engineering Conference. USA: NASA, 2010.
- [52] Briggs M H, Gibson M A, Geng S. Fission surface power technology demonstration unit test results [C]// 14th International Energy Conversion Engineering Conference. USA: [s.n.], 2016.
- [53] Gibson M A, Oleson S R, Poston D I, et al. NASA's kilopower reactor development and the path to higher power missions [C]//IEEE Aerospace Conference. USA: IEEE, 2017.
- [54] Albert C M, Haskin F E, Veniamin A U. Space Nuclear Safety [M]. Malabar(USA): KRIEGER Publishing Company, 2008.
- [55] Aftergood S, Hafemeister D W, Prilutsky F O, et al. Nuclear power in space [J]. USA: Scientific American, 1991, 42-47
- [56] United Nations. Principles relevant to the use of nuclear power sources in outer space [C]//United Nations 85th Plenary Meeting. Vienna, Austria: [s.n.], 1992.
- [57] United Nations committee on the peaceful use of space scientific and technical subcommittee and international Atomic Energy Agency. Safety framework for nuclear power sources applications in outer space [R]. Vienna: United Nations, 2009.
- [58] Thome F V, Wyant F J, Mulder D, et al. A TOPAZ international program overview [C]//AIP Conference Proceedings. USA: [s.n.], 1995.

作者简介:

胡古(1978-),男,研究员,主要研究方向:空间核动力,特种核动力。

通信地址:北京275信箱33分箱(102413)

电话:(010)693587485

E-mail: 13681144067@139.com

Overview of Space Nuclear Reactor Power Technology

HU Gu, ZHAO Shouzhi

(Department of Reactor Engineering Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Space nuclear reactor power (SNRP) has many advantages, such as good environmental adaptability, wide power coverage, compact and small specific mass under high power conditions. SNRP has broad application prospects in military and civilian space missions, and is one of the disruptive technologies which will change the future pattern of aerospace power. In this paper, the principle, characteristics, application scopes, application prospects, development history and current situation, typical projects, application safety of SNRP are introduced. The development trends of SNRP technology are analyzed. Some insights are also given to the SNRP development in China.

Key words: space nuclear reactor power; space missions; disruptive technologies

High lights:

- Space nuclear reactor power has clear and extensive military and civilian purposes.
- Space nuclear reactor power technology is one of the disruptive technologies.
- In recent years, space nuclear reactor power development is booming.
- Application safety of space nuclear reactor power can be guaranteed effectively.
- China's development of space nuclear reactor power should be in a unique style.

[责任编辑:高莎,英文审校:朱恬]