美俄空间核动力研发机构和组织管理体系研究

龚 游,王新燕,邹益晟,夏梦蝶,夏 芸 (中国原子能科学研究院,北京 102413)

摘 要: 美国、俄罗斯作为空间核动力领域实力最强的国家,一直将空间核动力视为国家战略核心技术。 在重大战略需求的推动下,美俄持续开展研发工作,形成了雄厚的技术基础,实现了空间核动力规模 化工程应用和不断快速发展。与之相适应的是美俄高效协同的组织管理体系和实力强大的研发机构, 两国凭借各具特色的组织管理体制机制,全面统筹国内优势科研力量协同攻关。基于美俄空间核动力研 发机构和组织管理体系的现状,简要分析了两国在该领域研发的组织管理特点和相关成功经验,为中国 空间核动力技术发展提供相关启示与建议。

关键词:美国;俄罗斯;空间核动力;研发机构;组织管理

中图分类号: C931 文献标识码: A DOI: 10.3772/j.issn.1009-8623.2024.03.008

空间核动力主要包括空间核反应堆电源(以下简称空间堆电源)、放射性同位素电源/热源(RTG/RHU)以及空间核推进(核电推进和核热推进),具有无限航时、超长寿命和多环境应用等突出优势,是各国抢占空天领域战略优势的核心关键之一。当前,美国、俄罗斯空间核动力正呈现不断快速发展的势头,而与之相适应的是两国已形成了各具特色的组织管理体制机制,能够集中统一国内优势科研力量协同攻关,为美俄在新时期进一步推进太空能力发展奠定了坚实基础。

1 美俄空间核动力发展现状

美俄作为最早认识到空间核动力领域重要性和该技术实力最强的国家,始终将其视为国家战略核心之一,从20世纪50年代起持续开展了一系列研发工作,先后实施了多个空间核动力重点专项计划,取得了诸多重大成果,积累了雄厚的技术基础和应用经验。截至2023年9月,美俄共成功发射且在轨应用了61个带有核动力装置的航天器,分别是34个带有空间堆电源的航天器和27个带有RTG/RHU的航天器^[1-4]。

1.1 美国空间核动力发展现状

美国早期以RTG/RHU为主,进入新世纪后开始加快推进空间堆电源和空间核热推进技术的应用和发展。

截至 2023 年 9 月,美国已成功发射了 25 个带有 RTG/RHU 和 1 个带有空间堆电源的航天器,先后实施了"核辅助电源"计划(SNAP)、"核火箭发动机"计划(ROVER)、"火箭飞行器核发动机"计划(NERVA)、SP-100 计划、SPACE-R计划、"普罗米修斯"计划(PROMTHEVS)、"经济可承受星表裂变电源"计划(AFSPS)、核热火箭计划(NTP)以及"千瓦级核反应堆电源"计划(Kilopower)等,成功在"子午仪号""阿波罗号""旅行者号""伽利略号""毅力号"等航天器上实现多型 RTG/RHU 应用 [3-4]。

2017年以来,美国连续发布了一系列行政令和政策,加快推进太空力量的建设。空间堆电源作为天基强大动力能源的重要选项,再次成为大国博弈的焦点。美国于2017年再次成立太空委员会,并于2019年成立太空军,于2020年发布太空6号令提出四大里程碑目标和路线图^[5],进一步强化空间核动

力国家战略。此外,美国国防部下属的研发部门——国防高级研究计划局(DARPA)于 2021 年发起"地月间敏捷火箭行动演示"计划(Draco),力争在2025 年前完成核动力推进系统的建造和演示^[6]。

1.2 俄罗斯空间核动力发展现状

俄罗斯始终以空间堆电源为主,成功发射了33个带有空间堆电源的航天器、2个带有RTG/RHU的航天器,相继实施了罗马什卡(Romashka)温差空间堆电源计划、布克(BUK)温差空间堆电源计划、托帕兹(TOPAZ)热离子空间堆电源系列计划、兆瓦级空间核动力飞船计划、创新型热离子堆计划等,实现了31个BUK型和2个TOPAZ-1型空间堆电源的在轨应用[2-3]。

近年来,俄罗斯成功试射了"海燕"核动力巡航导弹,于 2019年公开展示了首个全尺寸核动力飞船概念原型,并在 2020年展示了核动力飞船在轨道上部署的三维仿真动画,计划于 2030年进

行首飞测试^[7]。同时,俄罗斯作为目前唯一具有 钚 -238 生产能力的国家,在钚 -238 放射性同位 素电源研制方面具有强大的技术优势,并于 2023 年 8 月 10 日向月球南极成功发射搭载钚 -238 放射性 同位素电源的"月球 25 号"机器人航天器,最终 由于偏离预定轨道与月球表明相撞后失联。

此外,据相关消息报道,俄罗斯正在研制一种 名为埃基帕兹(Ekipazh)的新型配备核动力电源 军事卫星,旨在太空中进行电子战行动^[8]。

2 美国空间核动力研发组织管理体系

根据广泛的调研分析,美国空间核动力研发的组织管理体系可以凝练概括为:总统领导国家太空委员会的决策领导机构,美国能源部(DOE)和美国航空航天局(NASA)两大政府部门各司其职的组织管理机构,DOE和NASA下辖研究机构协同推进的研发执行机构,如图1所示。

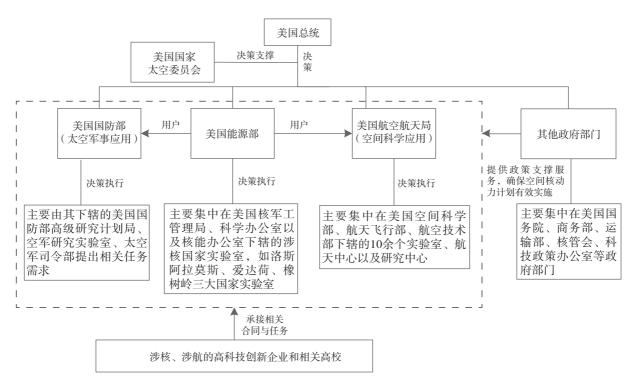


图 1 美国空间核动力研发的组织管理体系

2.1 美国总统领导国家太空委员会负责决策

2017年6月30日,为重振太空领导力,美国第三次正式重建国家太空委员会^[9],由副总统任委员会主席,国务卿、国防部长、商务部长、运输部

长、能源部长、航空航天局长、核管理委员会和科 技政策办公室主任担任委员会成员。副总统代表总 统并通过国家太空委员会履职,统筹协调国家太空 委员会各成员的相关工作,在开发和使用空间核动 力的国家战略下各负其责。

2.2 美国能源部和美国航空航天局两大政府部门 各司其职

美国能源部作为美国集中管理空间核动力研发的联邦政府机构,主要负责牵头制订与实施美国的空间核动力计划,通过统筹协调其下辖世界领先的国家实验室优势科研力量,大力开展空间核动力的开发和使用,以实现美国太空国家安全和深空探测目标。相关研究单位主要集中在国家核安全局、科学办公室以及核能(助理)部下辖的14个国家实验室[10]。2021年1月6日,美国能源部(DOE)发布《太空能源战略》[11],提出将其下辖涉核国家实验室的能力同航天界的需求相结合,加强先进放射性同位素电源、经济可承受星表裂变电源以及核热推进技术等研发,以满足美国国防部和NASA今后的任务需求。

美国国家航空航天局作为美国负责太空计划制订与实施的联邦政府机构,主要开展航空科学和太空科学的研究,是世界著名的航空航天科研机构。美国国家航空航天局下设6个战略事务部(共分管10余个研究中心、实验室以及飞行中心),其中涉及空间核动力开发和使用的部门主要集中在空间科学部、航天飞行部以及航空航天技术部。美国国家航空航天局在军用、民用航空航天方面担负了多种类型的任务,与美国国防部的国防高级研究计划局联系紧密,与陆海空军保持密切合作,与美国能源部等其他政府部门也保持合作。美国国家航空航天局的研究成果可以直接转让给美国国防部、能源部及其他有关合作机构。

2.3 美国能源部和美国国家航空航天局下辖主要研究机构协同推进

2.3.1 美国能源部下辖的主要研究机构

洛斯阿拉莫斯国家实验室(LNAL)。LNAL成立于1943年,位于新墨西哥州,其将国家安全作为最高使命,所承担的任务涉及核武器、核事故应急响应、军事控制、核不扩散和空间核动力等领域。从早期的热离子堆到后续持续以热管堆研发为主,LNAL几乎参与了美国各个时期主要的空间核动力计划,如ROVER/NERVA计划、SP-100计划、普罗米修斯计划、AFSPS计划、NTP计划和Kilopower计划等,主要负责反应堆设计和建造工

作,其中主要代表有:

一是 ROVER 计划 (1955—1973 年) [12],以研制大型洲际弹道核导弹主推进为研制目标,由美国空军和美国原子能委员会 (AEC,后拆分并入美国能源部)支持、LNAL主导。研制期间,共进行了15次核热推进反应堆和发动机部件级热试验,并取得了大量试验数据。

二是 SP-100 计划 (1983—1993 年) $^{[13]}$, 旨在 开发 $10 \sim 100$ kW 电功率的空间堆电源,得到美国 国家航空航天局和美国战略防御倡议组织(SDIO)的 联合支持,由 LNAL 承担。在计划终止前,SP-100 已完成关键技术攻关。

三是 AFSPS 计划(2006 年至今)[14], 由美国国家航空航天局和美国能源部共同启动,旨在开发一种可用于月球或火星表面、提供能量和支持人类居住且经费可负担的核反应堆电源, LNAL 主要负责反应堆系统的设计和建造,目前已完成非核集成试验。在此基础上,二者将 40 kW 电源作为重点开发型号,为后续开展 Kilopower 计划奠定了坚实基础。

橡树岭国家实验室(ORNL)。ORNL成立于 1943年,位于田纳西州,最初作为"曼哈顿"计划 的一部分, 主要开展铀钚分离研究, 目前作为美国 能源部最大的科学和能源实验室, 主要开展核裂变 与聚变相关的基础和应用科学、材料科学等研究以 及提供同位素生产等服务,并建造了高通量同位素 研究堆(HFIR)等科研设施。橡树岭国家实验室 成立至今,一方面根据需求提出开展核动力飞机计 划、中等功率反应堆试验(MPRE)计划,并成功 建造了核动力飞机的熔盐堆实验装置(ARE),并 在 2.5 MW 的功率下成功运行了 100 h[15]。另一方面, 先后参与了普罗米修斯计划、NTP 计划等,主要负 责空间核动力所需燃料技术的开发与测试。此外, 为支撑 NASA 的火星和深空探测用放射性同位素电 源的需求,由橡树岭国家实验室牵头,联合爱达荷 国家实验室(INL)和洛斯阿拉莫斯国家实验室正 在提升钚-238产能,预计2026年达1500 g/年[11]。

爱达荷国家实验室(INL)。INL始建于1949年, 由爱达荷国家工程实验室(前身为核反应堆测试中心)与环境实验室合并而成,位于爱达荷州,属于 综合性多学科实验室,主要从事核能、国家安全以 及环境科学等领域的研究。在空间核动力领域,爱达荷国家实验室利用其先进试验堆(ATR)、瞬态脉冲研究堆(TREAT)、核燃料监测设施、空间与安全动力系统设施、材料燃料中心等独一无二的重大科研设施,先后承担了美国空间核动力的燃料开发与测试、电磁泵等关键部件的设计与制造、钚-238 材料的生产以及放射性同位素电源的组装、测试和其安全分析等任务。目前,爱达荷国家实验室和美国国家航空航天局合作开发用于 NTP 计划的新型燃料,并利用 TREAT 堆的独特性能确定候选燃料 [16]。此外,预计到 2026 年,爱达荷国家实验室将在 DOE 核能办公室的领导下,联合其他国家实验室为 NASA "蜻蜓计划"设计、开发和部署一架 RTG 驱动旋翼机 [11]。

2.3.2 美国国家航空航天局下辖的主要研究机构

喷气推进实验室(JPL)。成立于 1936 年,位于加利福尼亚州帕萨迪纳,主要负责为美国国家航空航天局开发和管理无人太空探测任务开发与管理工作,同时也负责管理美国国家航空航天局的深空网络,主要功能是建造和操作行星航天器。截至 2022 年,喷气推进实验室开展了基于 SP-100 的深空探测概念研究,提出了土星环形会合任务 [17];牵头负责普罗米修斯计划中"木星覆冰卫星轨道器"(JIMO)的设计制造,承担了非核部分的设计研发工作 [18];负责管理 NASA 的火星探测计划 [19],成功完成了"好奇号"和"毅力号"新一代核动力火星探测车任务的开发和管理,其搭载的多任务放射性同位素电源(MM-RTG)由美国能源部下辖国家实验室研制提供。

格伦研究中心(GRC)。成立于 1942 年,位于俄亥俄州克利夫兰,主要专门从事航空航天发动机的试验研究。从成立之初,格伦研究中心就开始核热火箭研究 [20],先后管理和参与了 NERVA 计划、普罗米修斯计划、AFSPS 计划、NTP 计划及 Kilopower 计划,主要负责能量转换系统、传热系统等非核系统的设计和动力系统的非核测试。其中,NERVA 计划于 20 世纪 60 年代初提出,旨在ROVER 研究成果的基础上进一步研制用于空间推进目的的核火箭发动机,得到了 AEC 和 NASA (替代了空军)联合支持,格伦研究中心主要负责该计划的管理工作。

马歇尔太空飞行中心(MSFC)。成立于1960年,位于亚拉巴马州亨茨维尔,主要致力于航天飞机和太空飞行器的推进技术研究以及国家太空站的设计和建造等。成立至今,MSFC同美国能源部多次开展合作,先后参与了普罗米修斯计划、NTP计划、AFSPS计划以及Kilopower计划等。其中,NTP计划作为ROVER/NERVA计划的延续,旨在促进和实现小行星和火星载人探索任务,于2011年重启,由马歇尔太空飞行中心负责组织相关技术开发与论证,会同美国能源部共同开展^[21]。近年来,马歇尔太空飞行中心联合爱达荷国家实验室(INL)、BWX技术公司共同开展了NTP的W/U02燃料制造工艺的开发与测试^[16],预计将在2026年完成核热火箭25千磅级发动机的设计、制造、地面及飞行测试^[22]。

3 俄罗斯空间核动力研发组织管理体系

根据广泛的调研分析,俄罗斯空间核动力研发的组织管理体系可以凝练概括为:总统太空委员会全面统筹谋划的决策领导机构,俄罗斯国家原子能集团公司(Rosatom,以下简称俄原公司)和国家航天集团公司(Roscosmos,以下简称俄航公司)两大国有公司集中管理的组织管理机构,两大国有公司下辖研究机构及库尔恰托夫研究院分工明确的研发执行机构,如图 2 所示。

3.1 总统太空委员会全面统筹谋划

继美国成立国家太空委员会之后,2018年 11月,俄罗斯科学院与俄航公司举行联合会议, 会后起草报告提出为确保完成国家探月计划,提议 成立俄罗斯总统太空委员会。该委员会的主要职责 是确定俄罗斯太空领域的发展战略^[23]。目前尚无 公开消息表明俄罗斯总统太空委员会是否已成立, 可能还在推进中。当前,俄罗斯已设有科学院太 空委员会,由科学院院长担任委员会的主席,直 接对总统负责,主要负责制订和协调俄罗斯的太 空计划。

3.2 俄原和俄航两大国有公司集中管理

俄原公司。作为俄罗斯核工业的执行主体, 俄原公司的前身为苏联中型机械制造部,是苏联 时期最大的政府部门。2007年,俄原公司通过立 法的形式由包括俄联邦原子能机构在内的整个军

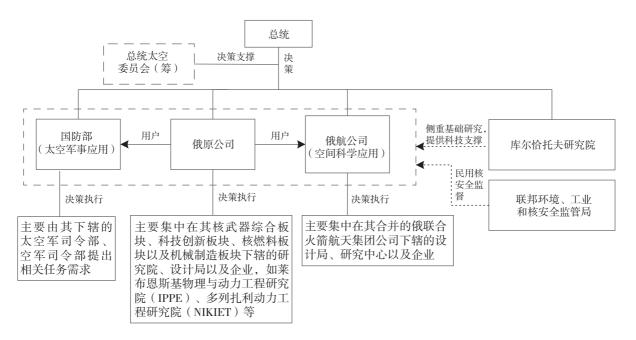


图 2 俄罗斯空间核动力研发的组织管理体系

民核工业整合成,直接向俄罗斯总统负责,囊括了俄罗斯核工业上中下游的 335 家研究机构和公司企业,负责统筹开展军民核工业领域的科研生产活动,主要涉及核军工、核动力、核电、核技术与基础科研等领域。从职能上看,俄原公司身兼双重角色,既是企业主体,参与并协调下属企业的市场经营活动,同时又行使核行业政府主管的职能,对内负责管理俄罗斯联邦所有的核资产,对外代表国家履行俄罗斯联邦在和平利用核能与核不扩散方面的国际义务,属于"政企合一"性质的特殊单位。

俄航公司。与俄原公司一样,俄航公司是俄航天工业"政企合一"的执行主体,于2015年7月由俄罗斯总统普京签署总统令确定由俄罗斯联邦航天局与联合火箭航天集团公司合并组建^[24]。俄航天公司既拥有原俄罗斯联邦航天局的职权,同时也拥有原联合火箭集团公司及其下属企业。其中,俄罗斯联邦航天局原有职责是负责执行国家政策与法律规范,管理国家太空资产和国家合作项目,以及航天工业部门开展军用太空技术等;联合火箭航天集团公司几乎囊括了俄罗斯航天领域内的所有企业、设计局与科研单位,负责集中优势力量建立具有全球竞争力的航天能力和产品生产研制体系。

3.3 两大国有公司下辖研究机构及库尔恰托夫研 究院分工明确

3.3.1 俄原公司下辖的主要研究机构

莱布恩斯基物理与动力工程研究院(IPPE)。 IPPE 成立于 1946 年,位于奥布宁斯克,主要从事 钠冷快堆、铅铋快堆和空间核动力等领域研发。截 至 2022 年, 莱布恩斯基物理与动力工程研究院先 后承担和参与了 BUK 型和 TOPAZ-I 型空间堆电源 以及 RD-0410 核火箭发动机实验样机的研制,为 Leda 月球着陆器、火星 -96 探测器和月球 -25 号机 器人航天器提供钚-238RTG。其中, 1970—1988年, 共有 31 个 BUK 型和 2 个 TOPAZ-1 型空间堆电源 成功用于宇宙号侦察卫星,最长任务持续时间1年。 在此基础上, IPPE 联合科技与生产联合体红星 (SPA 红星)于 2012年公布了创新型热离子转换 器的设计,转换效率可达到10%,可以输出约1兆 瓦范围内的电能 [25]。此外,为满足俄近年来积极 研制火星等外层行星使用 RTG 对钚 -238 的需求, IPPE 正评估使用别洛雅尔斯克 3 号(BN-600)和 4号(BN-800)快堆机组大规模生产钚-238的技 术可行性,预计将以有经济竞争力的方式每年生产 多达 100 千克钚 -238[26]。

多列扎利动力工程研究院(NIKIET)。NIKIET 成立于 1952 年,位于莫斯科,主要从事反应堆设

计及相关设备研发制造等工作, 涉及领域包括空间 核动力、潜艇核动力、核电、研究堆以及微堆等, 是俄罗斯核动力领域反应堆设计研发的重要研究 机构之一。在核热推进研究方面, NIKIET 参与了 RD-0410 核火箭发动机实验样机的研制和 IGR 高 通量石墨 - 脉冲堆、IVG-1 反应堆等核热推进研 究专用设施的建造和升级[27]。在 RD-0410 核火箭 发动机的研究基础上, NIKIET、库尔恰托夫研究院 (RRCKI)以及卢奇科学研究院(Luch)于20世纪 90年代后开发了多种核动力双模式系统,但受苏联 解体影响这些设计工作仅停留在科研阶段。2007年 4月, NIKIET 宣布将重点开发一种核动力双模式系 统地面原型装置,其电功率为 $100 \sim 500 \text{ kW}^{[28]}$ 。 2010年6月,克尔德什(Keldysh)研究中心牵头 启动了使用核电源推进系统的兆瓦级空间核动力 飞船计划, NIKIET 负责该计划核动力装置的反应 堆设计与制造[29]。

3.3.2 俄航公司下辖的主要研究机构

克尔德什研究中心(Keldysh Research Center,KeRC)。KeRC 前身为 1 号研究所(NII-1),成立于 1933 年,位于莫斯科,主要从事火箭推进和空间能源领域的研发工作。从 1953 年开始,作为苏联核热推进研制项目最初的 3 家管理单位之一,克尔德什研究中心参与了 RD-0410 核火箭发动机实验样机的研制和 RD-0411 核火箭的设计 [30]。进入 21 世纪以来,克尔德什研究中心开始从事核电推进用离子发动机的开发,并于 2010 年 6 月牵头启动了兆瓦级空间核动力飞船计划的研究,作为总承包商负责飞船发动机装置非核部分的能量转换系统和离子发动机的研制,目前已成功开发并制造了ID-500 大功率离子发动机原型样机,并对散热系统的样机进行了地面试验 [7]。

化学自动化设计局(CADB)。CADB成立于1941年,位于沃罗涅日,主要开展火箭推进、激光器等领域的研究。该设计局设计了一系列高科技产品,包括60余种液体推进火箭发动机、苏联唯一的可运行RD-0410核火箭发动机和第一台输出功率为1MW的苏联激光器。其中,RD-0410核火箭发动机实验样机作为苏联时期开发程度最高的核火箭发动机设计,其性能略高于美国的NERVA核火箭发动机,被指定用于航天器的加速和减速以

及深空探测的轨道校正。CADB作为RD-0410核火箭发动机实验样机研制的牵头负责单位,联合KeRC、NIKIET、库尔恰托夫研究院(RRCKI)等单位建造了全尺寸的RD-0410核火箭发动机原型装置,并组织完成了250次模拟试验^[30]。

3.3.3 库尔恰托夫研究院

RRCKI 成立于 1943 年,前身为俄罗斯原子能 院(IAE),位于莫斯科,是俄罗斯成立最早、覆 盖研究领域最全面的核领域科研机构之一。作为俄 罗斯第一个国立国家科学中心, RRCKI 隶属于俄 罗斯政府,直接对俄罗斯总统负责。作为俄罗斯空 间核动力技术发展的先驱, RRCKI 提出了众多思 想和概念设计, 先后承担和参与了 Romashka 型空 间堆电源、Topaz-II型空间堆电源和RD-0410核 火箭发动机实验样机的研制以及 IGR 高通量石墨 -脉冲堆、IVG-1 反应堆等核热推进研究专用设施的 建造,并围绕布雷顿循环空间堆电源和 NPPS 研究 提出多种概念设计。其中, Romashka 型空间堆电 源作为俄该领域研发的第一个型号,由 RRCKI 提 议发起, 并联合多家单位共同设计、制造, 在其专 用设施上完成了大约 15 000 h 的连续试验[31],为 推动俄罗斯空间核动力发展奠定了基础。

4 美俄在研空间核动力重点型号计划的组织 管理

4.1 美国 Kilopower 空间堆电源计划

4.1.1 计划简介

2015年,美国国家航空航天局太空技术任务部(STMD)正式启动 Kilopower 空间堆电源计划,总投资 1500万美元,旨在填补放射性同位素电源和星体表面核反应堆电源之间的功率空档 [32]。该空间堆电源采用钠热管冷却,斯特林热电转换,燃料为高富集度铀钼合金,其参考设计指标为电功率 1~10 kW、热功率 3.5~40 kW、系统质量 390~1800 kg,旨在适当的温度下产生适当的功率水平,同时保持核反应堆堆芯体积小、质量轻,满足未来运载火箭承重限制的要求。

该空间堆电源计划分3个阶段实施:第一阶段,完成基于800 W 电源需求的空间堆地面原型样机试验验证;第二阶段,在800 W 空间堆电源的基础上进行功率扩展,设计并验证满足火星星表

任务需求的 3 ~ 10 kW 级空间堆电源;第三阶段,设计开发空间堆电源高温热管辐射器实验原型装置,以备后续年份进一步开展飞行试验技术研发,并在国际空间站开展相关技术飞行试验。

自计划启动以来,Kilopower 先后启动了多项测试工作,包括材料和部件测试、非核系统测试、贫铀测试、地面堆测试等,取得了诸多研究成果和重要进展,为进入飞行开发阶段奠定了坚实基础^[33]。在此研究基础上,NASA 正在制定一项新的飞行任务,计划在 2027 年设计、测试和演示一套电功率为 10 kW 的 Kilopower 空间堆电源,以用于月球表面的探测任务,未来可能扩展到火星探测任务。目前,美国能源部和 DOE 正在全面开展 10 kW 空间堆电源的详细设计。

4.1.2 参研单位及分工

Kilopower 的研制任务主要由美国国家航空航 天局和美国能源部下辖的研究中心和实验室以及部 分相关公司承担[34]。美国国家航空航天局下辖的 格伦研究中心(GRC)是该计划的牵头研发机构, 并具体负责领导斯特林发电机和热管技术的研发 以及非核集成试验。其中, 斯特林发电机由太阳 电力公司(Sunpower)研制提供,热管由先进冷却 技术(ACT)公司研制提供;马歇尔太空飞行中心 (MSFC)为GRC的非核测试开发反应堆电系统模 拟热源和核试验的屏蔽;约翰逊航天中心(JSC)负 责空间堆电源的最终组装及发射。美国能源部下辖 的 LANL 主要牵头负责反应堆设计、反射层制造以 及带核集成试验; Y-12 国家核保障综合体主要负 责燃料和屏蔽以及高浓缩铀堆芯的制造; 内华达国 家核保障试验场主要负责为带核集成试验测试提供 支持。

4.2 俄罗斯兆瓦级空间核动力飞船计划

4.2.1 计划简介

2009年,时任俄罗斯总统梅德韦杰夫正式批准实施兆瓦级空间核动力飞船(也称为兆瓦级太空核动力拖船或运输和能源模块,TEM)计划,总投资170亿卢布,旨在确保俄罗斯在太空应用高效能源系统方面处于领先地位,以满足行星载人或无人任务等各类能源需求,可用于国防军用与商业民用活动。该兆瓦级空间核动力飞船采用核电推进、超高温气冷快堆设计和气体布雷顿循环发电等关键技

术,设计寿命大于 12 年,原计划 2018 年完成飞行 试验 [35]。

兆瓦级空间核动力飞船包括 5 个主要模块,分别是:作业模块、桁架结构、应急系统、自动功率管理系统和核电推进系统。其中,核电推进系统作为核心模块,负责为核动力飞船供应能源动力,由能源组件和电推进组件两大部分构成。能源组件利用核反应堆产生电能,主要包括 3 个部分:用于加热工质的核反应堆装置、用于将热能转换为电能的涡轮发电机 – 压缩机装置,以及用于向空间散热降温的制冷辐射器装置。电推进组件利用电能产生推力,由 12 个霍尔稳态等离子电推进器组成。

从 2009 年批复以来, 兆瓦级空间核动力飞船取得了一系列重要进展和成果, 包括核燃料元件研制、反应堆样机的设计制造与测试、涡轮增压器开发制造与测试、ID-500 大功率离子发动机原型样机研制以及核动力装置散热系统地面模拟试验等。根据俄罗斯联邦航天局公开信息报道, 兆瓦级空间核动力飞船的研制工作正按计划向前推进, 兵工厂设计局(KB Arenal)正在进行核动力飞船的组装, 计划于2030年完成木星首飞,其后便开始批量化生产。

4.2.2 参研单位及分工

兆瓦级空间核动力飞船的研制任务主要由俄 航公司和俄原公司众多下属分支企业联合承担[36]。 俄航公司下辖的 KeRC 作为核动力发动机装置的 总承包商,负责能量转换系统(布雷顿循环)和 离子发动机的研制;科罗廖夫能源火箭航天(RSC Energia)集团负责核动力飞船航天器的设计与制 造,并完成航天器上的反应堆安装。近年来,由于 KeRC 未能按期完成离子发动机的研制, 俄航下辖 的兵工厂设计局(KB Arenal)于2020年6月被任 命作为核动力飞船新的总承办商, 承担其职责继续 推进计划工作。俄原公司下辖的 NIKIET 作为核动 力飞船反应堆装置的主要承包商,负责反应堆设计 与制造,将建造一台用于地面测试的RUOO 反应 堆和一台用于飞行测试的 RHUC 反应堆。该快中 子增殖反应堆采用氦氙冷却剂, 铀合金燃料, 堆芯 温度高达 1500 K, 使用循环闭合回路, 以确保核 反应物质不会溢出。反应堆的相关设备和保护系统 采用钼合金 TSM-7 材料制成,确保堆容器能支撑 反应堆运行超过10万小时。

5 美俄空间核动力组织管理的主要特点

5.1 高层决策领导

对美国而言,从最初的空间核动力计划 (1950年的 SNAP 计划)由 AEC、DOD、NASA 联 合开展实施,到现在由国家太空委员会引领各政府 部门共同制定、实施,由副总统代表总统统筹协调 国务卿、国防部长、商务部长、运输部长、能源部 长、航空航天局长、核管理委员会和科技政策办公 室主任的相关工作,在开发和使用空间核动力的国 家战略下各负其责。

对俄罗斯而言,从最初的空间核动力计划 (1964年的 Romashka 计划)由 RRCKI 发起实施, 到现在由俄原公司、俄航公司以及俄科学院太空委 员会共同制订和实施,相关参与单位均直接对总统 负责,确保了相关政策和计划能高效落地。同时, 为进一步统一俄罗斯太空发展战略思路,紧跟美国 步伐积极推进成立总统太空委员会,以更好地制定 和实施俄太空领域发展的战略,使俄罗斯在当下激 烈的太空博弈中抢占优势,具备竞争力。

5.2 集中统一管理

美俄将空间核动力领域视为重要战略领域,均通过其核工业和航天工业两大领域的执行主体集中统一管理,同相关部门通力协作,统筹优势科研力量集中攻关,取得了众多重要的成果。

在美国方面,美国能源部和美国国家航空航天 局作为美国两大领域的政府管理机构,下辖的国家 实验室、研究中心等科研机构是美国核工业和航天 工业的重要科研力量。美国空间核动力计划通常由 美国能源部和美国国家航空航天局组织发起,其他 政府部门参与并提供政策支撑,二者下辖的科研单 位作为主体积极承担研发,凸显了其多部门协作的 特点。

在俄罗斯方面,俄罗斯主要依托其核工业和航天工业的两大国有企业:俄原公司与俄航公司,它们是"政企合一"的特殊企业,直接对俄罗斯总统负责,是俄罗斯实施空间核动力计划的执行主体。它们几乎分别囊括了核工业和航天工业两大领域内所有企业、设计局与科研单位。同时,RRCKI和科学院作为俄罗斯综合性科研机构,主要从事基础和交叉学科领域的研究,在俄罗斯空间核动力发展中同俄原公司和俄航公司密切配合,提供了重要的

战略指引和创新支撑,体现了俄罗斯在空间核动力领域实施国家支持、高度集中、一体化管理和合理分工的体制机制,凸显了其在重大工程实施中全局谋划的系统思维。

5.3 专项计划推进

为抢占太空先发优势,谋求太空主导权和霸主 地位,美俄从 20 世纪 50 年代起就高度重视空间核 动力技术的应用和发展,施以国家级重大专项计划 加快推进。围绕国防军事应用和空间科学探测,美 俄先后成功实施了 SNAP、BUK、TOPAZ 和火星探 测等多项空间核动力重大专项计划,取得了大量成 功应用经验,建立了雄厚的技术基础。其间,虽受 国际政治形势变化、发展战略政策调整、技术需求 目标不确定、技术复杂度过高以及经费投入巨大等 方面的影响,美俄空间核动力的发展技术路线有所 调整,但对空间核动力的整体重视程度从未减少, 并始终支持其相关技术持续保持研发。

特别是进入 21 世纪以来,美俄在太空领域开始进入全新时期。一方面纷纷提出国家探月计划,另一方面将太空域视为独立作战域,纷纷加快推进太空力量的布局和建设。空间核动力技术再次成为大国博弈的焦点。当前,美俄正在此前积累的技术能力和应用经验的基础上,抓紧实施新一代空间核动力专项计划,预计美国的千瓦级核反应堆电源Kilopower 计划、核热火箭 NTP 计划以及俄罗斯的兆瓦级空间核动力飞船计划将在 2027 年前后陆续实现工程应用,届时美俄将在太空博弈中抢得先机。

5.4 坚持技术路线持续开展研发

美国以发展应用放射性同位素电源/热源为主要方向,先后成功发射"子午仪号""阿波罗号""旅行者号""伽利略号""毅力号"等航天器,并积累了丰富的技术经验。与此相比,美国在空间堆电源方面应用经验较少,仅成功发射1个带有SNAP-10A空间堆电源的航天器,但始终坚持多条技术路线持续开展研发,包括液态金属冷却堆、热管堆、热离子堆和超高温气冷堆等。当前,美国更加重视技术成熟度和经济可承受性,重点发展千瓦级热管堆电源技术。

俄罗斯以发展应用空间堆电源为主要方向,并 坚持热离子堆技术路线,成功实施了BUK计划、 TOPAZ系列计划和创新型热离子堆计划等专项计 划,持续开展研发与能力提升,实现了33个热离子堆电源在轨应用。与此相比,俄罗斯在RTG/RHV方面相关应用经验较少,仅成功发射了2个带有RTG/RHV的航天器。当前,新一轮的"探月竞赛"开启,俄罗斯正在积极开展RTG技术研发,为下一步探月飞行任务做好技术准备。

6 结论与启示

为抢占太空先发优势、谋求太空主导权和霸主地位,美俄从 20 世纪 50 年代起就对空间核动力技术开展了系统研究,并依靠其强大的研发机构和高效协同的组织管理体系,统筹国内优势科研力量先后实施了一系列重大专项计划,取得了一系列重大成果,并保持不断快速发展的强劲势头。本文在对美俄空间核动力研发机构和组织管理体系现状梳理的基础上,简要分析了两国该领域研发的组织管理特点和相关成功经验,并结合中国空间核动力发展的情况,得到以下启示建议供决策参考:

一是坚持集中统一,高层决策推动,建成以重点核研究院为主体、与航天领域深化合作的协同研发体系。当前,中国空间核动力处于起步阶段。为尽快缩短同美俄两国之间的差距,中国应借鉴美俄成功经验,对空间核动力发展坚持集中统一,建成以重点核研究院为主体、与航天领域深化合作的协同研发体系,建立有效的组织协调机制,实现核工业和航天工业的协调融合,合理优化行政审批流程,充分调动和发挥各类资源,统筹部署太空发展与空间核动力技术研发和工程建设,为中国提升空间核动力能力提供坚强保障。

二是尽快设立国家空间核动力重点专项计划,加快推进,实现中国空间核动力型谱化、系列化发展。近年来,美俄正在加紧实施星表核反应堆电源、兆瓦级空间核动力飞船等新一代国家级空间核动力计划。中国空间核动力面临差距进一步扩大的困境,在太空领域将陷入被动的局面。为此,应充分发挥新型举国研发的制度优势,尽快在国家层面设立实施空间核动力重点专项计划,以加快空间核动力发展,同步高效跟进。同时,应抓住国际上目前尚未形成限制空间核动力发展条约的宝贵窗口期,及早发射中国首个空间堆电源,打通技术发展链路,实

现空间核动力的型谱化、系列化发展,尽早跨入太 空核大国行列。■

参考文献:

- [1] 吴伟仁,王倩,任保国,等.放射性同位素热源/电源 在航天任务中的应用[J]. 航天工程,2013:22(2):1-6.
- [2] WHITMAN N H, POSTON D I, MCCLURE P R. Modeling and Analysis of the BUK/BES-5 Fast Reactor Using MCNP[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.osti. gov/biblio/1207760.
- [3] 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,2016:81-84.
- [4] Jet Propulsion Laboratory. NASA's Perseverance Rover begins its first science campaign on Mars[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-perseverancerover-begins-its-first-science-campaign-on-mars.
- [5] WhiteHouse. Memorandum on the National Strategy for Space Nuclear Power and Propulsion (Space Policy Directive-6)[EB/OL]. [2023-11-26]. https:// trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/ memorandum-national-strategy-space-nuclear-powerpropulsion-space-policy-directive-6/.
- [6] DARPA. DARPA Selects Performers for Phase 1 of Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO) Program[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www. darpa. mil/news-events/2021-04-12.
- [7] Beyond NERVA. Transport and energy module: Russia's new NEP Tug[EB/OL]. [2023-11-26]. https://beyondnerva.com/2020/01/29/transport-and-energy-module/.
- [8] The Space Review. Ekipazh: Russia's top-secret nuclear-powered satellite[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.thespace.review.com/article/3809/1.
- [9] Executive Office of the President. Reviving the National Space Council [EB/OL]. [2023-11-26]. https://www. federal register.gov/documents/2017/07/07/2017-14378/ reviving-the-national-space-council.
- [10] 王鹏. 美国能源部国家实验室研究定位及协同创新研究 [J]. 全球科技经济瞭望, 2020, 35(5): 35-42
- [11] Department of Energy. Energy for space[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/Energy for Space-DOE Space Strategy Paper 01-06-

- 2021.pdf.
- [12] FINSETH J L. Rover nuclear rocket engine program: overview of rover engine tests[R/OL]. [2023-11-26]. https://ntrs.nasa.gov/citations/19920005899.
- [13] TRUSCELLO V C. SP-100, the US Space Nuclear Reactor Power Program[R]. California: Jet Propulsion Lab, 1983.
- [14] POSTON D I, KAPERNICK R J, DIXON D D, et al. Reference reactor module for the affordable fission surface power system[EB/OL]. [2023-11-26]. https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/969/1/277/607762/Reference-Reactor-Module-for-the-Affordable?redirectedFrom=fulltext.
- [15] GEHIN J C. History of the ORNL Molten Salt Program[R]. Tennessee Oak Ridge National Laboratories, 2015.
- [16] The National Aeronautics and Space Administration. Space Technology Mission Directorate: Nuclear Thermal Propulsion Update[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/rballard_ntp_update oct 2019 508. pdf.
- [17] MONDT J F, TRUSCELLO V C, MARRIOTT A T. SP-100 Power Program[C]//AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 1994: 143-155.
- [18] TAYLOR R. Prometheus project final report[R]. California: Jet Propulsion Laboratory, 2005.
- [19] Jet Propulsion Laboratory. JPL and NASA's Mars Exploration Program[EB/OL]. [2023-11-26]. https://trs.jpl. nasa.gov/bitstream/handle/2014 /48413/CL%2317-4062. pdf?sequence=1.
- [20] Glenn Research Center. Nuclear rockets[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www1.grc.nasa.gov/historic-facilities/rockets-systems-area/7911-2/.
- [21] HASLETT R A. Space Nuclear Thermal Propulsion Program[R]. United States: Grumman Aerospace Corp, 1995.
- [22] ERIC P. Lecture series on nuclear space power & propulsion syste MS-2- Nuclear thermal propulsion systems[R]. France: CEA, 2021.
- [23] Sputnik News. 俄航天集团与科学院提议设立总统太空 委 员 会 [EB/OL]. [2023-11-26]. https://sputniknews.cn/russia/2019021010 27623587/.
- [24] 张京男. 俄罗斯航天国家集团公司成立的影响与分析 [J]. 国际太空, 2015(9): 11-16.
- [25] ANDREEV P V, GULEVICH A V. Physical and

- engineering potential of thermionics for advanced projects of sub-megawatt SNPS[C]//Nuclear and Emerging Technologies for space CNETS-2012. USA: ANS, 2012.
- [26] Nuclear Engineering International. Russia seeks to use Pu-238 as spacecraft energy source[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.neimagazine.com/news/ newsrussia-seeks-touse-pu-238-as-spacecraft-energy-source-7938667.
- [27] ISAKOV A D, PROZOROV A A, SHUTOVA E P. Nuclear rocket engine[J]. Методология проектирования молодежного научно-инновационного пространства как основа подготовки, 2014(7): 143-148.
- [28] GABARAEV B A, LOPATKIN A V, TRET'YAKOV I T, et al. Research reactors: a look into the future[J]. Atomic Energy, 2007, 103(1): 566-572.
- [29] GlobalSecurity.org. NIKIET Dollezhal-Space Reactors[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.globalsecurity.org/space/world/russia/nikiet. htm.
- [30] PEMPIE P, DE L'ESPACE R P. History of the nuclear thermal rocket propulsion[C]//AAAF 6th International Symposium Propulsion for Space Transportation of the XXIst Century. Versailles: AAAF: 2002: 9.
- [31] PONOMAREV-STEPNOI N N, USOV N E K A. "Romashka" reactor-converter[J]. Atomic Energy, 2000(33): 178-183.
- [32] MCCLURE P R, POSTON D I, GIBSON M A, et al. Kilopower project: the KRUSTY fission power experiment and potential missions[J]. Nuclear Technology, 2020, 206(suppl 1): S1-S12.
- [33] GIBSON M A, OLESON S R, POSTON D I, et al. NASA's Kilopower reactor development and the path to higher power missions[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Los Angeles: IEEE, 2017: 1-14.
- [34] LEE M. Kilopower overview and mission applications[EB/OL]. [2023-11-26]. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/kilopower-media-event-charts-final-011618.pdf.
- [35] 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.
- [36] 高端装备产业研究中心. 俄罗斯星际飞行计划之《核动力太空拖船》[EB/OL]. [2023-11-26]. https://mp.weixin.qq.com/s/H0mKPSBBncsg-fOJPElHWg.

U.S. and Russia Research Institutions in Space Nuclear Power and Their Organizing Structures

GONG You, WANG Xinyan, ZOU Yisheng, Xia Mengdie, XIA Yun (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract: As the countries with strongest capability in space nuclear power, the United States (U.S.) and Russia have long been developing space nuclear power as a national strategic and core technology. Driven by key strategic needs, the two countries consistently promote R&D in space nuclear power and have established strong technology basis. Space nuclear power has been applied in engineering in scale and is maintaining a momentum of rapid development in the two countries. The U.S. and Russia have established effective organizing/management systems of space nuclear power and research institutions with advanced capabilities. The characterized organizing/management systems unite outstanding domestic research forces to conduct synergized research. This paper investigates the status of the U.S. and Russia research institutions in space nuclear power and their organizing structures and then analyzes characteristics of and experiences in the organizing structures to provide corresponding suggestions and proposals for developing space nuclear power in China.

Keywords: the United States; Russia; space nuclear power; research institution; organizing structure

(上接第25页)

accelerate use of quantum in government[EB/OL]. [2023-11-23]. https://www.gov.uk/government/news/15-million-competition-to-accelerate-use-of-quantum-in-government.

[10] 光子盒. 英国开展产学研合作的量子计算项目 [EB/OL]. [2023-11-23]. https://quantumchina.com/newsinfo/4895459. html.

Research of Development Strategy and Trends of Quantum Technology in U.K.

FANG Wei, FENG Gaoyang

High Technology Development Center of Anhui (Basic Research Management Center of Anhui), Hefei 230088

Abstract: This paper conducts research and analysis on the strategy and trends of quantum technology development in the UK, and finds that the U.K. government is committed to building a global leading quantum economy through long-term national strategic planning, sustained and stable investment, and multi departmental collaboration, effectively promoting the development of the national quantum industry. Thus, suggestions are proposed for the development of quantum technology in China, such as establishing a new national system, seizing the high ground in the field of quantum technology, accelerating the industrial application of quantum technology, and building an open ecosystem, to further consolidate China's absolute advantage in the quantum field.

Keywords: the U.K.; quantum science and technology; quantum computing; technology strategy