

模块化核动力航天器设计及其关键技术

王 钊^{1,2}, 夏陈超^{1,2}, 康志宇^{1,2}, 唐生勇^{1,2}, 于 宏³

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 上海航天科技集团公司 第八研究院空间科学总体部, 上海 201109;
3. 中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘 要: 为提高核动力航天器关键技术可继承性与可扩展性, 缩短核动力航天器研发周期, 降低研发成本, 本文通过总结国外核动力航天器发展现状, 梳理核动力航天器研制特点, 结合模块化航天器概念及设计原则, 首次提出模块化核动力航天器概念。将核动力航天器分为核电源模块、平台中心模块、载荷模块3大独立模块, 并针对体系架构设计提出3层建设方案, 针对模块化核动力航天器梳理关键技术难点, 为后续项目研究提供应用参考。

关键词: 空间核动力; 模块化核动力航天器; 体系架构; 展开机构; 电源管理

中图分类号: V 423.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.06.020

Design and Key Technologies of Modular Nuclear Powered Spacecrafts

WANG Zhao^{1,2}, XIA Chenchao^{1,2}, KANG Zhiyu^{1,2}, TANG Shengyong^{1,2}, YU Hong³

(1. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China;
2. Research Center of Space Science, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai Aerospace Science and Technology Corp., Shanghai 201109, China; 3. Department of Reactor Engineering Technology and Research, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to improve the inheritance and extendibility of the key technologies of nuclear powered spacecrafts and reduce the cycle and cost for the research and development, combined with the concept and design principle of modular spacecrafts, the concept of modular nuclear powered spacecrafts is proposed for the first time based on the summarized development status and characteristics of nuclear powered spacecrafts abroad. In the concept, a nuclear powered spacecraft is divided into three independent modules, i.e., nuclear power module, platform module, and load module, and a three-level development scheme is proposed for the architecture design. Finally, the key technical difficulties of modular nuclear powered spacecrafts are analyzed and concluded, which could provide reference for the further research.

Key words: space nuclear power; modular spacecraft with nuclear power; architecture design; deployable mechanism; power management

0 引言

空间核动力目前在国外已经开展空间应用,而在国内则处于方案探索及关键技术攻关阶段。已有文献主要针对以下方面开展研究:文献[1]在梳理空间核动力技术方案的基础上,初步探讨空间核动力技术发展脉络,分析未来发展方向;文献[2]针对

同位素电源、反应堆电源及核推进在深空探测领域的应用情况和发展情况开展研究,并针对深空应用的技术问题进行展望。本文在总结国外发展历程趋势的基础上,梳理空间核动力航天器的研制特点,结合模块化航天器内涵,提出模块化核动力航天器的设计方案,并针对模块划分模式、体系构建模式进行

收稿日期:2019-10-09; 修回日期:2019-10-22

作者简介:王 钊(1983—),女,硕士,主要研究方向为航天器总体技术。

通信作者:康志宇(1976—),男,博士,研究员,主要研究方向为航天器总体技术、颠覆性技术。

探讨,梳理模块化核动力航天器技术难点,为未来不同功率量级核电源空间应用提供参考。

1 核动力航天器概述

空间核动力系统是由电源系统和推进系统构成的组合系统,利用核能转化为热能,热能转化为电能,电能转化为动能,从而为航天器提供电源与推进动力。

核能一般直接转化成热能,热能转化为电能的方式包括半导体温差、热离子等静态转化发电,以

及基于工质做功的布雷顿、斯特林等动态循环发电方式。核能转化为推进动能的方式,一种是直接利用热能加热工质(例如氢)实现“核热推进”,另一种是利用核能转换成的电能供给电推进系统实现“核电推进”,如图 1 所示。本文主要针对空间核反应堆电源及核电推进开展研究,研究对象为以核反应堆电源为航天器平台与载荷提供电能,同时支持电推进进行轨道机动的一类核动力航天器(以下简称空间核动力航天器),暂不针对同位素电源和核热推进开展研究。

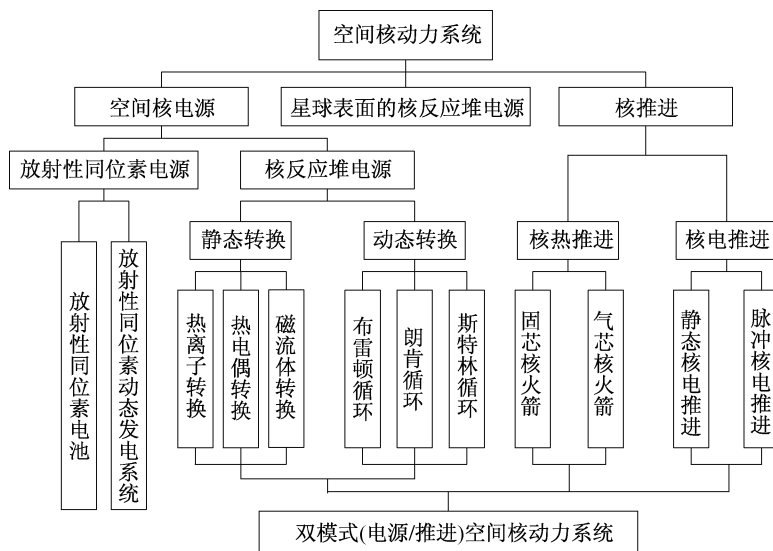


图 1 空间核动力系统^[3]

Fig.1 System of nuclear power^[3]

空间核动力航天器具有不依赖太阳光照、能量自主产生、功率范围大、能量密度高、环境适应性强等优势,可大幅提高空间可用电功率水平和使用时间,适用于难以获取太阳能或对动力需求较高的空间任务。因此,核动力技术与大范围轨道转移、大功率遥感探测、深空探测任务、星表基地建设等空间任务相结合,将极大提升当前任务能力水平,形成突破。

自 20 世纪 50 年代起,各国便开始开展空间核动力发展计划^[4]。截至 2004 年,美国共发射了 47 个带有空间核电源的航天器,其中包括 46 个放射性同位素电源(RTG)航天器和 1 个核反应堆航天器;苏联/俄罗斯共发射了 43 个带有空间核电源的航天器,其中包括 6 个放射性同位素电源航天器和 37 个核反应堆航天器如图 2 所示。目前还没有发射带有核热推进装置的航天器^[5]。

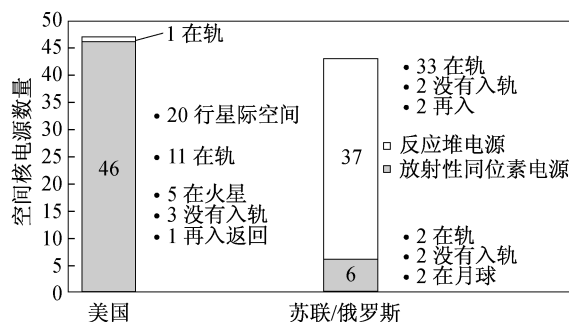


图 2 已发射的空间核反应堆航天器统计图

Fig.2 Statistical chart of launched nuclear power spacecraft

研究美、俄已发射及在研核动力航天器项目的发展趋势,可以得到以下两点启示:

1) 不同功率量级存在最优技术方案。发展空间核动力系统,首先需要根据未来需求,合理确定技术发展路线和重点发展途径,不同功率的电源需

求,采用不同技术方案,实现系统性能最优。对于几十瓦到数百瓦功率范围,美、俄均采用放射性同位素电源。对于几千瓦到百千瓦的功率范围,美、俄早期均采用液态金属冷却反应堆和温差发电的技术方案,后期美国因斯特林发电技术获得重大突破,开始重点研发液态金属冷却反应堆配斯特林循环发电的方案;而凭借在热离子发电方面的技术进步,俄罗斯开展了采用液态金属冷却反应堆配热离子发电的方案研究。对于几百千瓦到兆瓦级功率范围,美、俄均认为气冷快堆配布雷顿循环发电的技术方案最优。美、俄在选择具体技术方案时,并不单纯追求高技术指标,而是综合考虑了技术先进性、系统可靠性、运行经济性和使用方便性,尽量做到继承与发展、先进与现实的有机统一。

2) 核动力航天器总体设计采用相似功能划分模式。俄、美计划开展空间核动力飞行在轨演示验证,而俄罗斯针对地球轨道经济型货运任务^[6],美国更侧重深空探测领域,应用方向及任务流程不尽相同,因此,总体方案略有不同,但是在功能划分方面采取同类模式,航天器总体构型方面都采用在轨可伸展式桁架机构;反应堆电源方面都选择高效率长寿命的空间核电源技术,如气冷快堆结合布雷顿热电转换方式;在推进系统方面目前都以电推进为主推进形式开展项目研究。

2 模块化核动力航天器设计

2.1 模块化的概念

模块化设计方法起源于20世纪初,最初应用于建筑行业,后被应用于机械制造、汽车产品制造、航空产品制造及软件产品制造等行业。美国国家航空航天管理局(NASA)于1962年最早提出多任务模块化航天器(MMS)概念^[7],采用模块化设计将飞行器分系统进行模块化划分,设置标准组件。航天器模块化设计的内涵就是要求将整个航天器依据功能合理划分为多个不同的模块,这些模块物理独立、功能独立,通过特定的规则组合在一起,共同实现航天器的整体功能。同时,各个模块要求进行标准化设计,即针对同一功能,形成系列,满足不同需求指标的模块,且系列模块具有统一的标准化机械、电源、信号、热控和流体管路接口,保证同系列模块之间的可替换性。模块的组合规则来源于特

定航天器的功能及指标要求,通过对组合规则的控制及对功能模块的优化与配置,可以形成满足多种飞行任务的航天器。

模块化航天器具备以下优点:

1) 成本最优。利用模块化设计理念,将航天器典型分系统进行模块划分,并设置标准接口,因此,易于组装,易于测试,大大缩短航天器组装和测试的时间。

2) 易于维护修理。当航天器某一模块发生故障,可以通过修理或模块更换、模块替代的方案,使航天器恢复性能。因此,模块化分系统的可更换性,以及不同飞行计划分系统模块的互换性,保证了MMS的在轨维护。

3) 快速可靠性设计。对于常规分系统,如姿态控制分系统,可进行标准化设计,针对不同任务要求,适当修改软件,即可应用于不同卫星。

4) 功能可扩展。设计通用化平台,针对性改造部分分系统,即可完成不同应用需求。如NASA利用具有成功飞行经验的MMS平台研制探险者号平台,两平台结构相似,针对天线指向系统和通信数据系统功能稍加改进,即可实现科学探测功能。同时探险者号是世界上第一个可重复使用的空间平台,也是第一个可在轨更换科学仪器的平台。

2.2 空间核动力航天器研制特点分析

空间核动力航天器在设计建造、运行试验、实际应用及废弃处理过程具有以下特点:

1) 航天器系统规模庞大。空间核反应堆电源虽较地面堆质量及体积更小,但是相较于常规航天器分系统仍很庞大。俄罗斯兆瓦级核动力飞船总质量约20 t,在轨展开长度约50 m,其中,反应堆电源质量约2 500 kg,辐射散热系统质量约6 500 kg^[3]。因此,质量、长度都与常规航天器明显不同,在构型设计及建造方面有明显特殊性。

2) 功能分区清晰。核动力航天器按照功能分为4部分,即为航天器提供高功率持久电能的反应堆电源、用于隔开安全距离的展开机构、航天器常规分系统所在的平台部分,以及执行任务的载荷系统。各部分功能分区清晰,彼此间强耦合较少,界限明确。

3) 扩展需求强烈。空间核动力分为多种功率量级及多种技术类型堆型,同时在轨时间长,任务

功能要求具备军民融合、平战结合的特点。因此,不论从供电功能角度来看,或是任务需求角度来看,能力扩展需求均较为强烈。

4) 经费投入多。纵观美、俄空间核动力历年地面研究及空间应用的项目,经费投入巨大。ROVER/NERVA 计划投入 14 亿美元(1972 年);美国在 SNAP 计划上投入约 8.5 亿美元(1973 年);在 SP-100 计划上,投入约 12 亿美元(1997 年);普罗米修斯计划曾预计 10 a 投资 30 亿美元。俄罗斯研制兆瓦级核动力飞船总投资约 6 亿美元(2012 年)。此类都是资料可见的独立项目,粗略估计,美国和俄罗斯在整个空间核动力航天器的研发投入均在百亿美元量级^[8]。

5) 研制周期长。核动力航天器需要核领域与航天领域完全融合,因此,研制周期由核领域和航天领域研制进度共同决定。对于核领域而言,空间堆作为一项全新的研究领域,需要较长研制周期。① 在设计方面,不同于常规地面反应堆,需要针对空间应用开展空间堆方案研究,以及可靠性、安全性、适应性研究;② 需要按照国家核安全法律法规的要求进行试验,受核安全管理部门的监督,采用的管理体系与地面反应堆相似;③ 高温核燃料元件研发需要进行入堆考验,耗时较长,至少为 3~5 a,在此之后反应堆电源才可以进行总装集成,作为核电源分系统进行非核及带核地面试验,为后续整星试验做准备工作。对于航天器而言,核动力航天器不同于常规航天器,在构型设计、关键分系统方案、整星地面测试系统、标准化等方面都是全新领域,因此,需要较长时间开展方案研究及能力建设。

2.3 模块化核动力航天器设计概念分析

现有航天器设计采取的是定制化设计,一旦入轨之后,功能类型、性能指标即确定无法更改或微小改动。核反应堆电源针对不同功率量级采用不同技术方案,同时其研制周期长、经费投入大、在轨工作寿命长(10~30 a)。因此,同一功率量级的核动力航天器研制完成后,应用载荷需要根据任务需求的不同进行更换,实现核能利用最大化,提高经济性。将功能相对固定的平台部分进行统型设计,与不同功率量级核电源模块进行标准化对接,快速适应不同类型反应堆电源,完成型谱化发展及功能升级换代。因此,按照任务需求不同和功能换代升

级两大要求,模块化核动力航天器设计方案如图 3 所示。

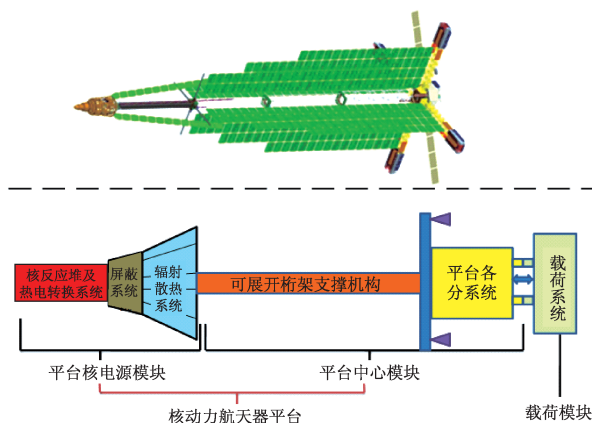


图 3 模块化核动力航天器

Fig.3 Modular spacecraft with nuclear power

模块化核动力航天器主要分为 3 部分独立模块:平台核电源模块、平台中心模块及载荷模块。以热离子核动力航天器为例,进行系统划分,如图 4 所示。

在模块化核动力航天器设计过程中,主要包括两方面内容:① 将整个核动力航天器根据功能分析和设计要求,通过功能抽象合理创建出平台核电源模块、平台中心模块和载荷模块 3 大独立模块,即“化整为零”设计;② 在每个独立模块内部,进行“凑零为整”设计,独立模块中的分系统采用模块化产品,实现快速设计快速研制。本文研究内容主要针对平台核电源模块、平台中心模块和载荷模块的“化整为零”设计开展研究。3 大独立模块划分及功能重组示意如图 5 所示。

平台核电源模块可以选择不同功率量级反应堆电源系统,与平台中心模块对接,即可实现功能换代升级,首型核动力航天器(如 10 kW 热离子核动力航天器)研发过程即明确标准化接口形式,后续型号(如 100 kW 级核动力航天器或 MW 级核动力航天器)即可实现快速研发设计,实现通用化平台。

载荷模块可以选择遥感天线实现对地长时探测、对接货仓实现深空探测、高轨综合服务站建设等目标,以及其他高功率电能需求的任务载荷。载荷对接既可在地面完成,与平台中心模块一体化设计,也可与核动力平台分别发射,在轨对接分离,根据任务需求灵活机动,达到军民融合平战结合,将

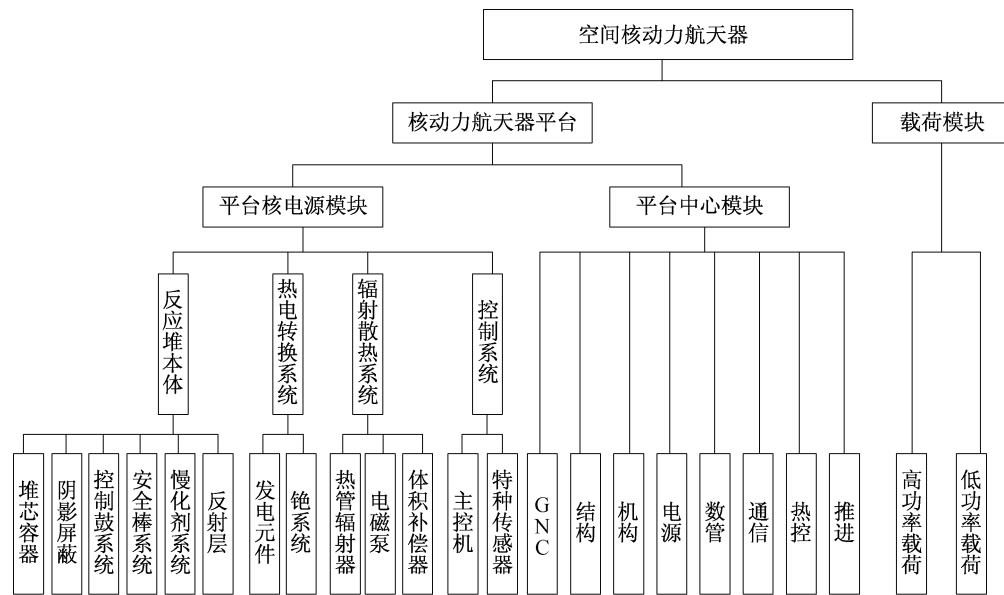


图 4 核动力航天器系统模块划分

Fig.4 Modular partition of nuclear power spacecraft system

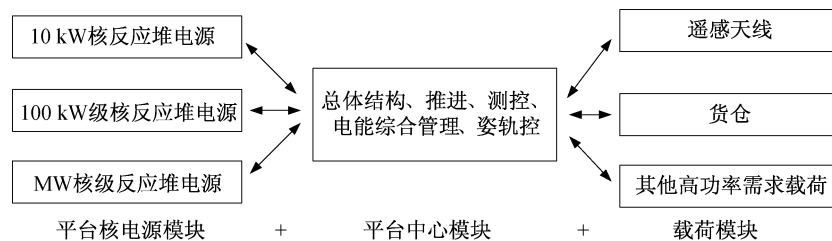


图 5 核动力航天器系统模块组合模式

Fig.5 Modular combination model of nuclear power spacecraft system

核能充分利用,实现最高经济性。

平台中心模块连接核电源模块与载荷模块,是维持整个航天器基本运营的部分,这一部分包括整器结构部分、推进系统、热控系统、维持整器基本运行的电能管理系统、测控系统核姿轨控系统。针对核电源模块和载荷模块设置标准接口,在轨可具备软件升级维护的能力。

各模块之间体系架构设计可采用3层模型,如图6所示,由下到上分别是结构层、协议层和应用层。

结构层主要是指模块化核动力航天器的结构布局,结构层由传统航天器的定制化、一体化设计变为半开放式结构,双向预留结构总线接口。整器基础系统(如推进、测控、电能管理、姿轨控等)布局在基础结构中,此部分仍采用封闭式设计,不可拆装。反应堆电源模块或载荷模块按照总体需求,通过标准化接口安装在结构总线上成为某型核动力

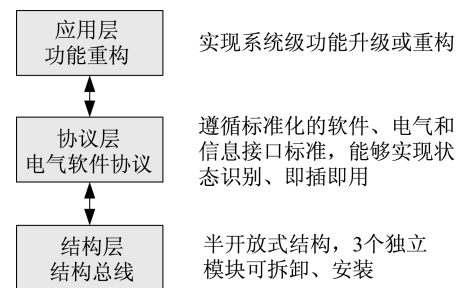


图 6 模块化核动力航天器体系架构示意图

Fig.6 Schematic sketch of nuclear power spacecraft architecture

航天器的一部分,可在地面或在轨通过分离对接操作实现模块的更换。

协议层主要是指核电源模块及载荷模块与平台中心模块的电气、信息、软件等接口方面标准化协议,通过开放式的软件架构实现可更换模块的功能连接,对于载荷模块实现自主识别对接的载荷模块状态参数,接入系统并启用,实现功能模块可

更换。

应用层主要是指通过整器的系统功能重构,实现航天器功率量级等关键性能提升、整器功能重构等应用能力。

3 模块化核动力航天器技术难点分析

模块化核动力航天器充分考虑可继承性与可扩展性,因此,针对以平台核电源模块与平台中心模块组成的核动力航天器平台梳理技术难点,以下技术难点通用于各种功率量级及应用需求的核动力航天器。

3.1 空间核反应堆电源系统设计技术

空间核反应堆区别于地面堆,需要考虑空间应用的特点,辐射安全性、轻质、高可靠性及不可维修性等对反应堆电源提出更高设计要求,其中主要包括以下三方面技术难点:

1) 无中子源启动技术。在地面反应堆启堆过程,通过中子源轰击进行反应堆启堆,而空间堆在发射入轨前由于辐射安全要求,因此,需要在轨采用无源中子启动技术进行启堆。利用宇宙射线与反射层、结构材料、燃料等材料发生反应,进而产生中子,以引发反应堆可靠启堆,由此带来一系列基础物理问题及材料问题。

2) 核安全技术。空间堆电源的安全备受关注,在地面测试段、运输段、发射场以及入轨前,均需重点考虑核反应堆的安全性,需要从方案设计、基础保障、管理体系等多方面开展核安全技术研究。

3) 数字化仿真技术。由于空间无人、不可维修、运行时间长等特点,为保障核反应堆电源安全可靠工作,需在地面同步运行同设计的数字反应堆,为在轨数据提供支撑。

3.2 关键部件小型化及性能稳定技术

空间核反应堆电源对于单机设备具有较高的体积和质量约束。为满足飞行样机的体积、质量、效率和可靠性指标要求,需要开展关键部件电、磁、流体力学、热控等小型化设计技术研究,形成综合性的设计方法和手段,研发耐高温、耐振动、高性能的关键材料,构建耐冲击振动结构,集成工艺,适时

开展相关试验验证,确保小型关键部件整体性能满足飞行试验要求。

3.3 长距离大承载的高刚度高强度展开机构技术

核动力航天器在轨展开后呈哑铃构型,可展开式支撑机构既要保证足够展开长度,又要保证可靠的刚性连接及承载性能。主要有以下两方面技术难点:

1) 长距离大承载展开机构总体设计技术。受反应堆 γ 及中子射线剂量约束,核动力航天器需要在发射阶段收拢,在轨展开。根据研究美、俄核动力航天器,在轨的展开机构展开长度达10 m以上,同时弯曲载荷大,结构组成复杂,功能要求多,其结构尺寸、承载能力及复杂性远大于我国现有空间展开机构。对展开机构开展总体设计,机构需要保证自身展开功能、锁定功能及承载功能,同时满足总体的电、热传输需求。

2) 高刚度高强度锁定保持技术。为满足核动力航天器姿轨控的稳定性要求及应用载荷指向精度的要求,展开机构的在轨基频需要同时满足飞行器在轨对接、变轨时传递给展开机构的载荷要求。因此,桁架结构间的锁定性能需满足高刚度、高强度的要求。

3.4 高效传输与能源管理技术

在空间核动力航天器中,核反应堆电源的工作特性对能源传输与管理提出了更高的要求:一方面,核反应堆电源输出高压直流电或高频交流电,考虑到防辐射需求,平台装置与核反应堆电源之间保持较远距离,高电流长距离传输增加了电缆损耗与设计难度;另一方面,由于核反应堆电源工作机理复杂,工作过程中其系统状态改变相对较慢,需几分钟甚至更长时间,当任务功能发生变化、平台电功率发生瞬态变化时,核反应堆电源无法作出及时响应,造成能量供需不平衡的问题。

3.5 大挠性航天器姿态稳定控制技术

核动力航天器主要由核电源模块、平台中心模块及载荷模块构成“哑铃”构型,核电源模块与平台中心模块间的连接桁架采用轻质化设计,从而导致系统的振动频率低且密集。核动力航天器进行在轨机动或者姿态变化时,推力器、反作用飞轮、有效

载荷和温度变化等激励大尺度轻质挠性桁架及附件振动,振动形成耦合干扰力矩长时间反作用在平台中心模块上,结构振动与控制交互作用影响平台中心模块的姿态控制精度、稳定度,严重时甚至将导致姿态失稳。

3.6 辐射防护综合设计技术

核动力航天器在运行过程中会产生较高剂量的中子和 γ 射线,为了防止结构材料和航天器平台仪器设备受照射后发热、活化及性能劣化,需要对核动力航天器采用特殊的辐射防护措施。主要从以下3方面综合考虑:核电源的阴影屏蔽设计、展开机构长度设计以及平台仪器舱抗辅加固设计。

核电源的阴影屏蔽设计是在核反应堆电源的后方,选择合适的屏蔽材料,以及轻屏蔽与重屏蔽组合模型开展研究,保证在满足辐射剂量要求的前提下,屏蔽体的质量最小。

展开机构设计的输入条件,即在保证核电源模块与平台中心模块有效的安全距离,距离越长,辐射剂量越小,同时展开机构设计难度越大,质量越大。

在平台仪器抗辅加固方面,是针对敏感仪器开展局部抗辅加固设计,减小辐射剂量的影响。

在核动力航天器设计过程中,应考虑以上3方面因素,综合设计,提出最优解决方案。

4 结束语

本文系统梳理美、俄空间核动力航天器的发展历程,总结发展趋势及技术路线,提出核动力航天器研发特点,结合模块化航天器内涵,提出模块化核动力航天器概念;进一步探索模块化核动力航天器模块划分模式,以及模块间体系架构模式;最后基于可继承性及拓展性,梳理模块化核动力航天器技术难点,为各类功率量级核动力航天器研发提供

参考。

参考文献

- [1] 廖宏图.空间核动力技术概览与发展脉络初探[J].火箭推进,2016,42(5):58-81.
- [2] 朱安文,刘磊,马世俊.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,2017,4(5):397-403.
- [3] 苏著亭,杨继才,柯国土.空间核动力[M].上海:上海交通大学出版社,2016:122-123.
- [4] 吴伟仁,赵小津,代守仑.空间核反应堆电源研究[J].中国科学:技术科学,2018,46(1):79-89.
- [5] PONOMAREV-STEPNOI N N, KUKHARKIN N E, USOV V A. Russian space nuclear power and nuclear thermal propulsion system [J]. Nuclear News, 2000, 76(13):37-46.
- [6] KOROTEEV A S. New stage in the use of atomic energy in space [J]. Atomic Energy, 2010, 108(3):170-173.
- [7] 任云丽.美国多任务模块化航天器(MMS)简介[J].航天标准化,1995(5):44-47.
- [8] 罗科捷耶夫 A S. 原子能空间应用新阶段[J].研究堆与核动力,2010,36(4):3-6.
- [9] PONOMAREV-STEPNOI N N, PAVSHUK V A, USOV V A. Russian experience in development of nuclear power systems and nuclear thermal propulsion systems of the first generation as the basis for development of advanced power and propulsion complexes for peaceful exploration of near and deep space [C]// International Astronautical Federation. 56th International Astronautical Congress 2005.2005:4-7.
- [10] 卢浩琳.空间核电源[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [11] 胡文军,陈红永,陈军红.空间核动力源的安全性研究进展[J].深空探测学报,2017,4(5):453-463.

2020年全国微波毫米波会议

上海,2020年5月17日—20日

<http://www.em-conf.com/ncmmw2020>

由中国电子学会主办,中国电子学会微波分会、上海航天电子技术研究所、上海交通大学、复旦大学、上海大学、华东师范大学、中国电子科技集团公司第五十研究所、微波毫米波单片集成和模块电路实验室、深圳市金瑞特科技有限公司等单位联合承办,西安恒达微波技术开发有限公司、林为干教育发展基金、《微波学报》等单位协办的“2020年全国微波毫米波会议”将于2020年5月17日—20日在上海召开。会议目的是为全国微波毫米波技术领域的科学家、工程技术与管理人员提供一个广泛交流科研成果和最新进展的平台,会议论文集将收录到中国知网(www.cnki.net)《中国重要会议论文全文数据库(CPCD)》。欢迎国内从事微波、毫米波、亚毫米波技术研究、开发、生产与应用的专家及工程技术人员踊跃投稿并参加会议,与同行进行广泛的交流与探讨,促进相互合作。

征文要求

论文应有所创新,重点突出,论述严谨,文字流畅,采用国际标准计量单位,尚未在其他专业会议和刊物上发表过。论文需包含英文题名和摘要,采用A4格式,全文包括图表、参考文献在内限3页篇幅。论文语言以中文为主,港、澳、台地区的作者可以投寄英文论文。论文模板和排版要求见会议网站有关信息。会议只接受Word格式的投稿文件,投稿时请注明选题号。

更多信息,请关注大会网址:<http://www.em-conf.com/ncmmw2020>

征文内容

1. 电磁场理论与数值方法
2. 微波毫米波天线
3. 微波毫米波系统及应用
4. 微波毫米波无源器件及电路
5. 微波毫米波有源器件及电路
6. 微波毫米波元器件建模表征
7. 微波毫米波测量技术
8. 微波毫米波电磁兼容
9. 微波毫米波新材料/结构/工艺
10. 无线能量收集与传输
11. 生物电磁学
12. 超导微波毫米波器件及应用
13. 高速电路与电子系统
14. 微波遥感
15. 微波毫米波和5G通信
16. 微波毫米波集成电路

17. 高功率微波
18. 短距无线通信与无线传感
19. 微波毫米波雷达及应用
20. 太赫兹技术
21. 射频EDA方法、工具与应用
22. 微波毫米波卫星移动通信
23. 异质/异构集成电路与系统
24. 其他

学生优秀论文

会议将评选6篇学生优秀论文,并将颁发“2020年全国微波毫米波会议优秀论文奖”获奖证书和奖金。会议还将从6篇获奖论文中评选出一篇论文,颁发“林为干教育发展基金优秀论文奖”获奖证书和奖金。

主办单位

中国电子学会

承办单位

中国电子学会微波分会
上海航天电子技术研究所
上海交通大学
复旦大学
上海大学
华东师范大学
中国电子科技集团公司第五十研究所
微波毫米波单片集成和模块电路实验室
深圳市金瑞特科技有限公司

协办单位

西安恒达微波技术开发有限公司
林为干教育发展基金
《微波学报》
特种光纤与光接入网省部共建国家重点实验室培育基地

投稿截止日期:2019年12月20日

录用通知日期:2020年1月25日

预注册截止日期:2020年3月5日

会议采用网上投稿、网上审稿和网上注册方式。

会议联系方式

联系人:陆 遥 郭 超
联系电话:025-51199611
E-mail:yaolu@em-conf.com
chaoguo@em-conf.com



中国科技核心期刊

(中国科技论文统计源期刊)

收录证书

CERTIFICATE OF SOURCE JOURNAL
FOR CHINESE SCIENTIFIC AND TECHNICAL PAPERS AND CITATIONS

上海航天

经过多项学术指标综合评定及同行专家
评议推荐,贵刊被收录为“中国科技核心期
刊”(中国科技论文统计源期刊)。

特颁发此证书。

中国科学技术信息研究所

Institute of Scientific and Technical Information of China

北京复兴路 15 号 100038

www.istic.ac.cn

2019年11月



中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊

收录证书

上海航天

依据文献计量学的理论和方法，通过定量与定性相结合的综合评审，
贵刊被收录为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊，特颁发此证书。

证书编号：CSCD2019-0690

有效期：2019年-2020年

发证日期：2019年5月

查询网址：www.sciencechina.cn



中国科学院文献情报中心

中国科学引文数据库

引文数据库