

核动力航天器总体设计研究

周继时¹, 李莎¹, 刘磊², 解家春³, 耿言¹

(1. 探月与航天工程中心, 北京 100037; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 研制核动力航天器是最有希望实现更远深空探测的可靠技术途径。针对目前国内在核动力航天器总体设计方面存在研制规范欠缺、研制经验空白的形势, 借鉴国外研制核动力航天器的成功经验, 结合现有标准规范、一般航天器总体设计方法, 提出了研制核动力航天器时, 对工程总体、航天器总体进行设计的要点。特别是, 针对空间核动力源及其安全防护, 从核动力源设计、核安全设计两个方面, 提出了关注要点和解决措施。本文的研究工作可以用于指导空间核动力航天器的研发和应用。

关键词: 核动力航天器; 航天器设计; 核动力源设计; 空间核安全设计

中图分类号: V57; TL364

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)05-0444-09

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.05.005

引用格式: 周继时, 李莎, 刘磊, 等. 核动力航天器总体设计研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 444-452.

Reference format: Zhou J S, Li S, Liu L, et al. Study on overall design of nuclear powered spacecraft[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 444-452.

0 引言

空间核动力泛指在外层空间利用核能的装置, 该装置把核衰变能(例如放射性同位素)、核裂变能(例如核反应堆)或者核聚变能转化为热能、电能或者动能, 以满足航天器飞行任务的能源需求。截至目前, 人类共发射73颗核动力航天器, 美国32颗, 苏联/俄罗斯40颗, 中国1颗。美国主要发展和使用基于同位素核能源的航天器。苏联/俄罗斯发展的核动力航天器大部分都是基于核裂变能源^[1]。

随着深空探测任务越来越复杂, 航天器距离地球越来越远, 采用核动力成为航天器最有希望实现快速和更远深空探测的可靠技术途径。进入21世纪, 美国将空间核动力的发展瞄准兆瓦级及以上的空间核电源、大功率核推进系统。在同位素电源领域, 重点支持研究了包括布雷顿、斯特林、热电、热光电等在内的10项功率转换技术。在使用核裂变反应堆的大功率电推进系统研究领域, 也资助开展了多项研究(见表1), 其中研发的可变比冲磁流体火箭(Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)拟将在国际空间站上搭载进行飞行试验^[2-6]。同传统的化学火箭相比, 电推进虽然推力小, 但比冲大, 可以解决化学推进比冲较小的天然不足^[7]。

自20世纪70年代以来, 我国一直在开展空间核动

力源方面的技术研究, 目前同位素电池和热离子反应堆电源已经突破关键技术。但是, 从国内调研的情况来看, 包括工程总体、卫星/探测器总体以及与之存在核技术接口的其他系统总体、核动力源设计部门等各有关方面, 在核动力航天器的设计、建造、运行管理等各个层面, 均没有相关设计标准和研制规范可供参考使用。

本文在全面分析我国现有航天器研制标准体系内容的基础上, 提出了核动力航天器研制标准体系新增类别。重点是, 基于相关标准要求和研制经验, 在保证核安全的前提下, 从工程总体、航天器总体两个层面提出了开展核动力航天器设计的技术要点, 详细阐述了核动力源的设计要求。同时, 通过调研分析国外在核动力航天器使用方面的成功经验, 结合我国现有核安全法规、标准等, 提出了核动力航天器在研制过程中正常工况、事故工况下的设计要求。

1 核动力航天器研制标准体系研究

我国的航天器标准体系分成管理(M)、产品保证(Q)、工程(E)和产品(P)4个相互独立、又紧密联系的系列标准体系。M系列标准体系包括项目管理(M1)、产品管理(M2)、技术基础管理(M3)和职能管理(M4)4个子体系。Q系列标准体系包括产品保证基础(Q0), 产品保证管理(Q1), 质量保证

(Q2)，可靠性保证(Q3)，安全性保证(Q4)，维修性保证(Q5)，电子、电气和机电(EEE)元器件保证(Q6)，材料、零部件保证(Q7)，工艺保证(Q8)，软件产品保证(Q9)，地面设备保证(Qa)等11个子体系。E系列标准体系主要根据专业进行划

分，包括工程系统(E0)、结构与机构专业(E1)、控制专业(E2)、推进专业(E3)等15个子体系。P系列标准体系中子体系的划分，原则上与E系列标准体系子体系的划分一致，只是根据专业产品的情况进行了稍微调整。

表 1 美国研发的大功率电推进系统

Table 1 High-power electric propulsion system developed in America

项目	功率/kW	比冲/s	转换效率/(%)
木星冰月亮轨道器离子推力器 (Electric Ion Thruster of Jupiter Icy Moons Orbiter)	30	7 000	—
阳极层高比冲推力器 (Very High Isp Thruster with Anode Layer)	140	6 000~8 000	>70
核电脉冲诱导推力器 (Nuclear Electric Pulsed Inductive Thruster)	200	3 000~10 000	>70
可变比冲磁流体火箭 (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket)	200	3 000~30 000	>70

核动力航天器设计标准体系，需要结合核动力航天器研制特点，在现有航天器研制标准体系基础上进行修改和补充完善。本文所研究的核动力航天器设计标准体系仅考虑到分系统级，所以P(产品)系列标准暂不做研究。为保证整个航天器标准体系的连贯性和系统性，按照我国现有的航天器标准体系分类方法和体系框架，核动力航天器研制标准体系需要改进的内容包括：

在工程系列标准体系中，增加核系统专业标准(暂定序号为Ef)、核安全系统专业标准(暂定序号为Eg)；在工程系列环境工程标准中增加航天器核辐射环境标准(暂定序号为Ec-7)；在工程系列电源、总体电路专业标准中增加反应堆电源标准(暂定序号为E7-1-5)；在工程系列卫星地面接收站、监测站、CDAS站标准中增加核辐射监测站(暂定序号为Ee-5)如，表2所示。

表 2 核动力航天器研制标准体系新增类别

Table 2 New update category of nuclear powered spacecraft development standard system category by newly increased

序号	体系代号				标准名称
	一层	二层	三层	四层	
1					航天器用同位素一般要求
2					航天器用同位素地面处置要求
3			EF-1同位素系统标准	/	航天器用同位素在轨处置要求
4		Ef核系统标准			航天器用同位素辐射防护设计准则
5					航天器用核反应堆一般要求
6					航天器用核反应堆地面处置要求
7			EF-2裂变反应堆系统	/	航天器用核反应堆在轨处置要求
8					航天器用核反应堆辐射防护设计准则
9					宇航员可允许核辐射剂量要求
10			EF-1核安全系统基础标准	/	核动力航天器核辐射剂量要求
11	E工程系列				航天器核辐射剂量计算方法
12		Eg核安全系统标准			核动力航天器核辐射屏蔽设计准则
13			EF-2核辐射屏蔽标准	/	核辐射屏蔽用材料选用一般要求
14					核动力航天器核故障处置要求
15			EF-2安全处置标准	/	核动力航天器寿命末期处置要求
16					航天器核辐射环境设计准则
17		Ec环境工程标准			航天器核辐射环境试验方法
18			Ec-7核辐射环境标准	/	航天器核辐射环境试验安全要求
19		E7电源、总体电路专业标准			反应堆电源安全设计要求
20			E7-1电源标准	E7-1-5反应堆电源标准	反应堆电源使用要求
21		Ee卫星地面接收站、监测站、CDAS站标准			核辐射监测站一般要求
22			Ee-5核辐射监测站标准	/	核辐射监测站总体设计规范

2 核动力航天器设计

核动力航天器与一般航天器的最大区别是其在空间使用核能。无论是在地面还是在空间，核能均是一个十分敏感的话题，随之而来的最直接的考虑是核安全设计和防护。

核动力源和核安全系统是核动力航天器独有的系统，而由此又会引申出很多对其他系统的特殊要求。因为核能在空间的利用形式只有核电源、核推进和核热源三种形式，最直接的影响就是航天器的电源系统、推进系统、热控系统，这些影响也势必会引起整个航天器构形、空间环境、轨道、飞行控制、总装、测试、试验、运输等一系列的变化。

2.1 工程总体设计

航天工程一般包括航天器、运载火箭、发射场、测控、地面应用等系统。由于核安全非常敏感且影响极大，因此从工程总体层面就要统筹考虑各系统在设计上的影响。

对于运载火箭系统，从安全的角度考虑，其在进行弹道设计时就需要考虑到，一旦在发射段出现故障，火箭尽量不要落在陆地上。

对于发射场系统，在开展安全性设计时，必须首先保证一旦发生核泄漏事故后人员的安全性。此外，核动力源对航天器的总装环境也有特殊要求，导致发射场提供的总装环境等也应有所不同。

对于测控系统，需时刻监视核动力源的安全性，保证航天器出现问题时，能及时按照预案对航天器进行处置，确保其不会降落至地面。

对于地面应用系统，需要考虑航天器上的核动力源对科学探测载荷工作的影响。

对于卫星/航天器系统，是与核直接相关的系统，无论是总体设计还是分系统、单机设计，都要充分考虑涉核这个特点。详见后续内容。

2.2 航天器总体设计

核动力航天器总体设计的重要原则就是围绕核动力源及其安全防护设计来开展。由于大功率核动力航天器具有核辐射、大功率、高电压、大电流的特点，导致在核动力源、核安全系统、机械设计、热设计等多个方面，核动力航天器与常规航天器都存在差别。核动力源设计和核安全设计详见本文第3节和第4节内容。本文只介绍核动力航天器总体在相关设计上独有的要素。

2.2.1 一般性设计

核动力航天器在设计时，应当符合我国现有航天器设计准则和核动力装置的一般设计准则，同时重点

考虑涉核系统及其对航天器设计提出的特殊要求，主要体现在如下方面：

1) 轨道方面。核动力航天器需运行在足够高的安全轨道（国际上约定核动力航天器的启动轨道高度至少800 km）。在设计寿命到期或出现严重故障后，航天器应具备被推入安全轨道的能力。

2) 在进行核动力航天器总装以及涉核产品装配、调试时，需要用到一些特殊的工艺，以确保安全性和正确性。

3) 在地面测试和试验验证方面，需要制定核动力航天器专门的综合测试和试验环境条件、方法，特别是核动力源和核安全系统需开展有针对性的环境试验、专项试验。

4) 可靠性方面。为了保证达到航天器整体的可靠性要求，明确指出在航天器的整个寿命期间，核反应堆可靠性应达到0.999 9。

5) 安全性方面。在常规的航天器安全设计基础上特别强调了核安全。核安全需符合GB 15146-2008系列《反应堆外易裂变变材料的核临界安全》、GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》、GB 11806-2004《放射性物质安全运输规程》等标准和航天器自身所规定的相关要求。核动力航天器的核安全性设计的主要目标是，使航天员和航天器在所有运行工况下受到的电离辐射的照射保持在合理可行尽量低的水平。因此核动力装置的设计、建造和运行必须高质量，以尽量减少能导致放射性物质大量释放的故障发生。应确保在达到工作轨道前，发生一切可能事件时反应堆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等。详细设计见本文第4节内容。

2.2.2 机械设计

核动力航天器与常规航天器在机械设计部分的主要不同点体现在如下方面：

1) 核安全对构形布局的特殊要求。结构与机构材料选择，需考虑对核辐射有较好的屏蔽性。与核反应堆有直接关系的结构和机构，应考虑反应堆所产生高温、高压环境。应当考虑航天器载荷仓和辐射隔离所需要的安全距离，对于使用空间堆的航天器，建议采用大型支撑杆起辐射隔离作用（见图1）^[2]。

2) 设备的结构设计。轨道运行期间的辐射环境在卫星环境规范中规定。应根据辐射环境，考虑防辐射问题，使设备结构对产品起到保护作用。

3) 包装和运输设计。核反应堆或同位素等放射性

原料和部件的包装和运输设计,应符合国标GB 15146.3-2008《反应堆外易裂变材料的核临界安全第8部分:堆外操作、贮存、运输轻水堆燃料的核临界安全准则》、

GB 11806-2004《放射性物质安全运输规程》,同时严格遵守国家对放射性物品运输安全管理条例、放射性物品道路运输管理规定等相关行业规定。

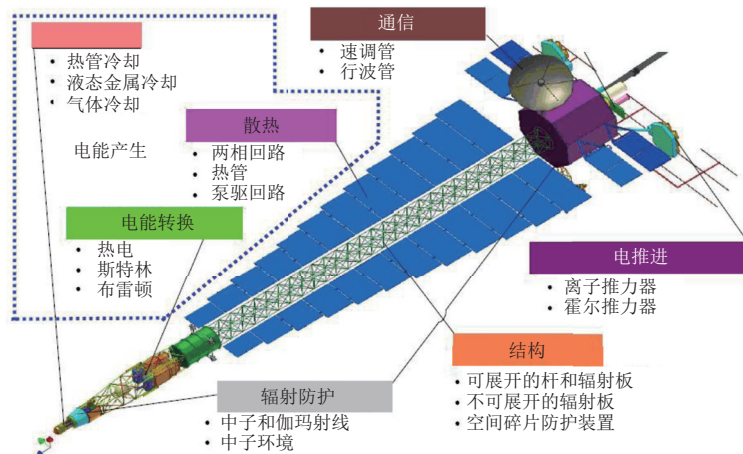


图1 “木星冰月亮探测器”结构示意图

Fig. 1 The structural configuration of the Jupiter ice Moon spacecraft

2.2.3 热设计

由于大功率核动力航天器需要排散大量的废热,对其散热装置的设计有着特殊的要求,需要采用新的、高效的技术来解决,必须在航天器总体层面上考虑热能的综合利用。比如采用核反应堆电源,应重点考虑采用高温散热等新技术,以降低散热板的面积。此外,在设计时,核动力源必须提供详细、精确的热设计模型给航天器总体。

2.2.4 电气设计

与常规航天器的主要不同点体现在如下方面:

1) 设计依据部分,由于目前国军标中没有关于空间核电源的设计标准,在设计时需要参考GJB2042-94《卫星电源系统通用规范》。

2) 空间核电源是核能在空间的主要应用形式之一。空间核电源与传统的电源在发电原理、能量来源等方面有着本质不同。对于核反应堆电源,其功率较高,电压和配电体制会发生根本性变化,电源控制、调节等环节的设计也会与现有的航天器设计有着本质区别。在供电接口部分,针对核动力航天器的不同等级功率需求,推荐使用以下一次母线电压参考值:输出功率小于4 kW时,母线电压为+28 V;输出功率在4~10 kW范围内,母线电压为+42 V;输出功率在10~20 kW范围内,母线电压为+100 V;输出功率大于50 kW时,采用高压配电体制。核动力航天器整星二次电源电压选择建议为+28 V和+42 V。

2.2.5 磁设计

核动力航天器磁设计主要是指磁矩估计和控制方

法,应符合Q/W 1072-2004《航天器磁矩估计和控制方法》和总体有关磁矩技术指标的要求。此外,需考虑因素有

1) 对剩磁有要求的卫星,其设计、生产、试验和测试过程应严格按剩磁矩控制流程进行;剩磁较大的设备应该布放在靠近航天器的中心;状态相同、设备数量为偶数,应尽量反向布置,考虑设备之间剩磁矩的相互抵消。

2) 卫星磁矩和周围环境磁场相互作用产生的磁力矩和所有其他干扰力矩共同作用时,不应使航天器姿轨控分系统的性能下降。

3) 在整个航天器设计过程中,要尽量避免使用高磁导率软磁材料。

4) 整星电缆网设计方面,走线应充分考虑到路径最短,供电线与回流线尽量放置于同一束电缆中,妥善处理接地问题。

同时,核动力航天器各设备和部件在开展磁设计时,应尽可能采取措施,使下述原因导致的磁场达最小化:

1) 由磁性铁磁材料所产生的磁场,如果核反应堆热电转换部门采用磁流体发电机制,应当使磁流体热电装置外磁场最小化。

2) 由电缆和设备所构成的供电往回路所产生的杂散磁场。

3) 由电磁激励装置如继电器、阀门、电动部件等所产生的感应磁场。

整星在正样阶段时,必须进行磁试验,对剩磁水平进行评估,内容包括退磁与磁补偿。

2.2.6 推进设计

核推进也是核能在空间的主要应用形式之一。核推进属于全新的推进方式，与现有推进系统有着本质区别。核热推进会造成较大的辐射危害，在近地轨道受到严格限制使用。大功率核电推进喷出的物质主要是离子化工质，也会对空间环境有一定影响。以上方面在进行设计时需要重点考虑。

2.2.7 控制设计

主要考虑航天器在寿命末期处置、故障处置时，必须具有将航天器推入处置轨道的能力。

3 核动力源设计

3.1 基本设计准则

应当根据航天器对核动力源的系统要求，包括发电功率、转换效率、辐射剂量、质量、体积、使用寿命等，首先确定选择核反应堆或同位素电源的方案，以保证航天器按要求完成任务和功能。对于选择核反应堆的方案，需要考虑的因素有：

1) 综合考虑熔点、结构强度、热导率等因素，选择合适的反应堆堆芯。超高温反应堆因功率较大（百千瓦级），建议采用快堆型，并结合堆芯设计和控制方式，确保核动力航天器发射时的临界安全。

2) 核反应堆需要解决系统部件材料之间，尤其是与冷却剂的兼容性问题。

3) 应当采取高效的热控措施，以解决核动力航天器大功率热排放问题。对于长期大功率工况，选择板式辐射器。对于短期大功率工况，选择相变换热器。

4) 在各种工况下，保证核动力航天器的安全性和可靠性，具体设计详见本文第4节内容。

5) 对于深空探测任务，要求核电源的寿命在10年以上。

3.2 反应堆热工水力设计

核动力航天器中，核反应堆的全部运行状态分为正常运行工况、一般事故工况、严重事故工况和极限事故工况。热工水力设计应在保证限制放射性产物释放的屏障满足各类工况的安全要求前提下，为反应堆提供与航天器各种工况相适应的、与堆芯产生热量相匹配的传热能力，并为二回路系统提供合适的冷却剂系统压力、温度等热工参数。

基于安全性角度出发，热工水力设计需要考虑的因素为：

1) 在正常运行工况和一般事故工况下，反应堆热工水力设计应保证燃料元件不产生传热破损。

2) 在严重事故工况下，堆芯可能发生少量燃料元

件传热破损的情况，反应堆热工水力设计仍应保证该工况下的堆芯热工水力参数满足事故分析准则规定的有关要求，并能保证反应堆安全停堆和顺利排出堆芯余热。

3) 在极限事故工况下，堆芯可能发生较多燃料元件传热破损的情况，反应堆热工水力设计仍应保证该工况下的堆芯热工水力参数满足事故分析准则规定的有关要求，并能保证反应堆安全停堆，维持次临界状态；确保堆芯有可冷却几何形状，并顺利排出堆芯余热。

3.3 控制系统设计

核反应堆控制系统包括工艺过程接合处起、直至直接控制核反应堆装置参数的器件为止所使用的所有设备和部件（硬件和软件）。控制系统应能跟踪和适应核反应堆在飞行中的各种负载变化，确保核动力航天器的姿态机动性，并将核反应堆的参数维持在运行工况规定的范围内。

3.4 辐射屏蔽设计^[1,8]

核动力航天器辐射屏蔽设计主要考虑的因素有：

1) 核反应堆辐射屏蔽结构应满足规定载荷条件下的强度和刚度要求。

2) 根据辐射源特点，结合结构和屏蔽计算选择屏蔽材料。

3) 屏蔽体中不同屏蔽材料层的布置、各层的最小厚度，应根据屏蔽设计计算和结构可实现性设计来确定。

4) 停堆后表面仍有较强放射性的设备及部位，应设置局部屏蔽体。

5) 在满足辐射安全要求的前提下，应综合考虑反应堆一次屏蔽和二次屏蔽，以达到尽量缩小屏蔽体体积，减轻屏蔽体重量目的。

6) 一次屏蔽应能屏蔽来自反应堆堆芯的 γ 和中子辐射；二次屏蔽应保证航天员所受的辐射剂量低于规定的限值。

7) 辐射屏蔽设计应与核动力装置系统，设备布置和结构设计协调进行，确保设计的屏蔽体合理、有效、可靠。

8) 核反应堆或同位素电源的辐射屏蔽设计应满足表3规定的辐射剂量场设计限值。

表3 辐射剂量场设计限值

Table 3 The design limit of radiation dosage field

部位	当量剂量率/ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
反应堆舱前、后舱壁外壁面	2.2×10^1
停堆30 h后，反应堆底部轻外壳外壁面	5×10^2
停堆30 min后，堆侧及堆顶屏蔽外表面	2×10^3

4 核安全设计^[1, 9-13]

4.1 设计目标

核安全设计的总目标是,建立并维持一套有效的防护措施,以保护地球生物圈内的人和环境,使其免受核动力航天器的开发和应用可能带来的放射性危害。

辐射防护目标是,确保空间核动力源内的或由有计划地从空间核动力源释放出的任何放射性物质引起的辐射,在一切运行状态下均低于规定限值,并要确保任何事故的放射性后果能得到缓解。

技术安全目标是,要采取一切合理可行的措施防止空间核动力源发生事故及一旦发生事故时缓解其后果;对于在设计空间核动力源时考虑过的一切可能事故,包括概率非常低的事故,要以高可信度确保任何放射性后果是低于规定限值的;要确保有严重放射学后果的事故的发生几率极低。

对于在核动力航天器上执行任务的航天员,任务期间接受来自空间核动力源的辐照剂量限值为50 mSv/y。对于地球上人员的辐射剂量规定限值参照GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》执行。此外,核动力航天器的应用应尽量避免对地球轨道空间环境、其他天体环境产生放射性污染。

4.2 设计总要求

核动力航天器的核安全设计应考虑任务全周期的所有阶段;必须贯彻纵深防御的概念,从而提供多层次的保护,防止放射性危害。

4.2.1 纵深防御

纵深防御是指,在设计中要求提供多层次的设备和规程,用以防止事故,或者一旦事故发生时保证适当的防护。

各类核动力航天器在设计时,应根据自身特点选择纵深防御级数,并论证所采用的防御级数是足够的和恰当的。第一级防御是防止偏离正常工况,这要求按照恰当的质量水平和工程实践,正确并保守地设计。第二级防御是对偏离正常工况的控制,以防止预计事件升级为事故工况。第三级防御是,设想上一级防御或许未能阻止某些预计事件或假想始发事件的升级,并由此可能酿成更严重的事件,尽管这是极少发生的;在设计中,应预先考虑这些不大可能的事件,并提供固有安全特性、故障时仍能安全运行的设计、附加设备和程序,以便控制事件的后果,并在此类事件之后达到稳定可接受的状态。第四级防御是处理可能超过设计基准的超设计基准事故,确保事故后果得到缓解。

4.2.2 设计的安全分析

核动力航天器的安全评价包括分析航天器对一系列可能导致预计事件或事故工况的假设始发事件的响应。按下列方式分析假设始发事件及其后果:①事件按类型分组,以便只对每组中的极限事件进行定量分析;②说明极限事件的进程及其后果;③论证与空间核动力源应用有关的风险及安全裕度是可接受的。

4.2.3 设计参数限值

对核动力航天器应用核动力源的每一种正常工况及事故工况,要规定有关参数的设计限值。这些限值必须能确保在正常工况及事故工况下,放射性物质的产生和释放所引起的后果在规定的辐射防护要求范围内。对事件序列要进行比较,以确定最关键的参数值,便于以合理裕度用于各个系统和部件的设计。

4.2.4 可靠性设计

为保证执行安全功能所需的可靠性,对某些安全系统或部件应确定其最大不可利用率限值,经国家安全部门认可后,作为基准或用作验收准则。

为达到和保持结构、部件和系统执行安全功能的重要性所要求的可靠性,一般应采用下列各项措施:①设计上保证单一故障不会使系统丧失其执行预定安全功能的能力;②减少共因故障的可能,从而可提高可靠性;③若条件许可,采用功能独立、实体隔离等方法,以提高系统可靠性;④在设计安全重要部件时,考虑系统或部件发生故障时,在不启动任何动作的情况下就可以进入一种安全状态。

4.2.5 需考虑的环境

地面阶段的环境主要指空间核动力源的设计、制造、组装、试验、测试、运输和储存等相关操作环境,与地面核动力装置类似。

发射阶段的环境主要与运载火箭飞行过程有关,包括振动、冲击、加速、噪声等,此外还包括入轨过程所经历的空间环境。

运行阶段和寿终处置阶段的环境主要包括,同位素或反应堆运行产生的辐射场和空间辐射场,低温、真空和微重力环境,以及微流星体、空间碎片和能够卡住活动结构的微小颗粒等固有空间环境。

4.2.6 寿终处置的设计要求

对于应用于短寿命轨道任务的核动力航天器,当任务完成或任务失败时,姿轨控系统必须有将空间核动力源推送至长寿命轨道。

4.3 应用放射性同位素源航天器的核安全设计

放射性同位素源航天器的安全设计的要求是,在正常工况及任何事故工况下,都应保持对放射性同位素

材料的包容, 确保没有放射性物质散入环境, 避免对人和环境造成危害。具体设计要求包括:

1) 放射性同位素宜选用以 α 衰变为主的核素, 伴生 γ 衰变和自发裂变应尽量少。

2) 放射性同位素材料应具有合适的化学形态和物理形态, 应不溶于水, 耐高温, 化学性质稳定, 不易蒸发和升华, 破碎时以生成大碎块为主, 不产生可吸入的颗粒和粉尘。

3) 为包容放射性同位素材料, 应在材料外设置多层包壳。包壳应具有熔点高、耐腐蚀、化学性质稳定等特点。包壳在阻止放射性同位素材料释放的同时, 应能够释放衰变过程中产生的气体, 以避免内部压力过高。

4) 在所需放射性同位素材料较多的情况下, 宜将其分成多个独立的模块化单元, 每个模块化单元都有独立的包壳, 以提高事故情况下的防护能力。

5) 当放射性同位素电池的热电转换系统或热排放系统失效时, 必须有可靠的途径将材料的衰变热导出, 从而使温度保持在设计限值以内。

6) 放射性同位素热源的包壳应能够避免放射性材料对航天器的设备和设施产生不利影响。除包壳外, 还可根据具体需要采取辐射防护措施。

7) 应根据运载火箭整流罩内的冷却条件限制放射性同位素材料的装量。

8) 发生意外再入大气层时, 应保证放射性同位素热源的完整, 杜绝放射性材料泄漏。

4.4 应用核反应堆航天器的核安全设计

应用核反应堆的航天器, 在地面设计、制造、组装、试验和测试阶段, 应满足核材料操作、研究堆、动力厂等方面的安全要求。在地面输运和储存阶段, 反应堆在可能的最佳慢化条件下, 其有效增殖因子应不大于0.98。除只会产生可忽略放射性的零功率地面试验, 核反应堆在到达工作轨道前, 发生一切可能事件时反应堆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等。发生具有潜在严重放射性后果的事故的应小于 10^{-5} 。在计划任务中不应有反应堆再入, 如发生意外再入并与地面撞击, 反应堆应始终保持在次临界状态。运行过的反应堆意外再入时, 应保持完整或完全烧毁。具体设计要求包括:

1) 空间核反应堆(尤其是应用于短寿命轨道的空间核反应堆)宜选用高富集度U-235作为燃料。

2) 在设计堆芯的燃料元件和组件、反射层和其他部件时, 必须考虑与反应堆整体有关的中子学、热工

水力学、机械、材料、化学和辐射相关事项。

3) 在设计堆芯时, 应针对各种运行计划, 考虑从寿期初到寿期末所有可预见堆芯状态; 不会超过所有运行状态下规定的最大允许设计限值。

4) 反应性控制系统必须能在反应堆所有运行状态下有效运作, 而且该系统将在所有设计基准事故(包括控制系统本身失效)情况下保持其停堆能力。

5) 反应性控制机构必须能够提供足够的负反应性, 以便在所有运行状态和设计基准事故工况下都能使反应堆处于次临界状态并保持这种状态。

6) 必须对反应性控制系统的正反应性最大增长率做出规定, 并将其限制在能够证明的合理数值。

7) 必须在设计中包括至少一个自动停堆系统。停堆系统有效性、动作速度和停堆裕度必须能够满足规定限值和条件。停堆系统任何单一故障不得妨碍该系统在需要时执行其安全功能。

8) 反应堆冷却系统必须提供从燃料到最终热阱的长期、可靠的热传输。反应堆冷却系统的设计必须能够为反应堆提供具有可接受和经证明之裕度的充分冷却。

9) 应有可靠的余热移出途径排出停堆后堆芯的剩余发热, 防止燃料温度超出限值。

10) 必须设计有足够的仪器仪表, 以监测反应堆的主要参数(如功率、冷却剂温度等)和与安全相关系统的状态。

11) 反应堆保护系统必须是自动化系统并独立于其他系统, 必须能够对各种假想始发事件自动启动所需的保护动作以中止事件, 使反应堆处于安全条件下。

12) 反应堆保护系统必要的自行动作一经启动就不能通过人为动作加以阻止或妨碍, 并且在事故后一定时间内不需要人为手动干预。

13) 在设计中必须采取可靠措施, 确保反应堆因各种事故意外再入时, 在各种情形下都能够保持次临界状态。掉落情形包括堆芯重构和密实、堆芯内部充水增强慢化、水淹没或湿沙子覆盖增强反射、中子吸收体可能移动等。

14) 对于空间核反应堆电源系统, 应有独立电源模块, 以使与反应堆安全相关系统具有独立于反应堆运行模式和热电转换系统而运行的能力。

5 结 论

由于不受太阳光照的影响, 且单位能量密度大, 在空间使用核能源, 已成为人类开展更远深空探测、更复杂航天活动的发展趋势:

1) 兆瓦级以上的大功率核动力航天器将成为研发

主要方向。随着大功率相控阵雷达、通信系统等的应用和发展,以及月球基地、更远和更大规模深空探测活动的开展,数百千瓦、兆瓦级的电力需求会日益迫切。大功率核动力航天器技术一经突破,将对空间技术发展带来革命性变化。

2) 同位素核动力航天器将进入可持续发展时期。经过多次成功的飞行验证和使用,证明同位素热源/电源系统具有技术成熟度高、安全性好的优点。在深空探测的一些小型任务中,需要百瓦量级、长寿命的小功率核动力航天器,同位素电源正好满足此需求。

由于核能来自放射性同位素衰变、重核裂变或轻核聚变,核动力航天器在设计、建造、试验、运行和废弃处置全过程,都必须首先聚焦做好核安全和辐射安全的防护。国外在成功应用空间核动力方面的经验表明,制定合适的安全原则和策略,开展有针对性的防护设计和充分地面验证,可以将核动力源安全可控地用在深空探测领域。

本文基于我国航天器现有标准体系,给出了开展核动力航天器研制需要进一步发展和完善的相关设计标准;系统总结了核动力航天在总体设计、核动力源设计、核安全设计方面的技术特点,可以为我国未来研制核动力航天器提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 周继时,朱安文,耿言. 空间核能源应用的安全性设计、分析和评价[J]. 深空探测学报, 2015, 2(4): 302-312.
Zhou J S, Zhu A W, Geng Y. Safety design, analysis and estimation for the use of nuclear power source in outer space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(4): 302-312.
- [2] 朱安文. 空间核电源国外调研分析报告[R]. 北京: 中国航天科技集团, 2013.
Zhu A W. Investigation analysis report on nuclear power of space from abroad[R]. Beijing: China Aerospace Science and Technology Corporation, 2013.
- [3] Bennett G L, Enterprises M, Johnson E W, et al. First flights: nuclear

power to advance space exploration[C]// Proceedings of International Air & Space Symposium and Exposition. [S.l.]: AIAA, 2003: 2-4.

- [4] Cataldo R L, Bennett G L. U. S. Space radioisotope power systems and applications: past, present and future[R]. USA: NASA Glenn Research Center, 2011.
- [5] Nikolai N P S, Vladimir A P, Veniamin A U. Russian experience in development of nuclear power system 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 [R]. [S.l.]: IAC, 2005
- [6] James R S, James S S. NASA's nuclear electric propulsion technology project [C]// The 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. [S.l.]: AIAA, 1992
- [7] 李俊峰, 宝音贺西. 深空探测中的动力学与控制[J]. 力学与实践, 2007, 2009(4): 1-8.
Li J F, Baoyin H X. Dynamics and control in deep space Exploration[J]. Mechanics in Engineering, 2007, 2009(4): 1-8.
- [8] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册: 辐射安全[M]. 北京: 原子能出版社.
- [9] Albert C M, Haskin F E, Veniamin A U. Space nuclear safety [M]. Malabar(USA): KRIEGER Publishing Company, 2008.
- [10] United Nations. Principles relevant to the use of nuclear power sources in outer space [C]// VIENNA: United Nations, 85th Plenary Meeting. [S.l.]: United Nations, 1992.
- [11] 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.
- [12] Bennett G L. Safety status of space radioisotope and reactor power sources [C]// Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1990.
- [13] Damon D, Temme M, Brown N. Space nuclear reactor safety [C]// Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1990.

作者简介:

周继时(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器总体设计。

通信地址: 北京市海淀区知春路63号中国卫通大厦B座10层

(100086)

电话: (010)88306190

E-mail: zhoujis@163.com

Study on Overall Design of Nuclear Powered Spacecraft

ZHOU Jishi¹, LI Sha¹, LIU Lei², XIE Jiachun³, GENG Yan¹

(1. Luna Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineer, Beijing 100094, China;

3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Developing nuclear powered spacecraft is the most prospect and reliable technological approach to realize further deep space exploration. However, related development standards for integrated design of nuclear powered spacecraft have not been studied in China. Drawing lessons from the foreign successful experience of the development of nuclear powered spacecraft, considering the existing standards and specifications as well as the general spacecraft design methods, the key design points were presented for developing nuclear powered spacecraft, including the Top-level Design group for engineering and Top-level Design group for spacecraft. Especially, for the utilization of space nuclear source and the safety protection, the key points and solutions for developing space nuclear source and nuclear safety design are proposed. All of these will be applied to the research and development of nuclear powered spacecraft.

Key words: nuclear powered spacecraft; spacecraft design; nuclear power source design; space nuclear safety design

High lights:

- In China, the standards and specifications for the development of nuclear powered spacecraft need to be further improved.
- The design of nuclear power source and its safety protection the core of the overall design of nuclear powered spacecraft.
- Take all reasonable and feasible measures to prevent accidents in space nuclear power sources.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]