

空间同位素热/电源安全性技术指标体系框架研究

胡文军¹, 刘继忠², 唐玉华², 陈军红¹, 张 玮², 张 哲², 李上明¹, 胡绍全¹

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621900; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100084)

摘要: 基于我国空间同位素热/电源使用环境特点, 借鉴国外空间同热/电源安全认证的研究成果, 通过对空间同位素热/电源应用环境剖面的分析, 开展了空间同位素热/电源安全技术指标体系框架研究, 建立了覆盖同位素热/电源产品研制、地面贮存/运输、发射准备、发射、在轨运行及废弃处置等全生命周期的正常和事故环境下的安全性技术指标体系, 提出四大类型29项可考核技术指标, 可作为空间同位素热/电源研制和安全性使用评价工作的主要依据, 为解决我国使用空间同位素热/电源缺乏安全认证体系和安全性验证技术指标问题提供参考。

关键词: 空间同位素热/电源; 深空探测; 安全性; 技术指标体系; 任务剖面

中图分类号: V41, T199

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)01-0073-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190911001

引用格式: 胡文军, 刘继忠, 唐玉华, 等. 空间同位素热/电源安全性技术指标体系框架研究[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 73-80.

Reference format: HU W J, LIU J Z, TANG Y H, et al. Study on technical index system and framework of safety standards for RHU and RTG[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 73-80.

引言

随着现代科技的发展, 人类探索的脚步逐渐迈向月球及更深远的太空, 但传统的化学电源和太阳电池无法满足航天器在月球及外层空间严峻环境条件下的温控和供电需求, 空间核能源成为深空探测的必备装置之一^[1]。由于核能源固有的放射性, 装载核能源的航天器一旦发生事故, 有可能对地球生物圈中的人与环境带来极大的危害。在过去几十年, 美国携带核能源装置SNAP-9A的导航卫星“探测器-5B”(Transit 5BN-3)发射失败; 装载核动力装置的“雨云-B号”(Nimbus-B)气象卫星在进入轨道时发生故障, 运载火箭在高空自毁, 装载的同位素热源坠入海洋; “阿波罗13号”(Apollo-13)太空船服务舱爆炸后, 载有同位素电源的登月舱再入大气, 坠入2 000 m的汤加海沟。苏联在发射携带核动力装置的雷达侦察卫星时, 因发动机失灵导致航天器没有进入预定轨道而坠入太平洋, 一颗携带核动力装置的苏联雷达侦察卫星“宇宙954号”(Space-954)坠落在加拿大的西北部冰源地区, 碎片落在地球表面, 放射性物质污染了地表; 1996年, 搭载同位素电源的“火星96”(Mars 96)飞船发生地球大气再入, 同位素电源沉入太平洋海底^[2-6], 虽未报道对人类和生物圈的影响, 但带核能源的航天任务日益成为世界各国关注的焦点。

与陆地上的核设施相比, 空间核系统具有高移动性特点, 为安全性带来了更大的风险^[7]。为此联合国大会于1992年通过了《关于在外层空间使用核动力源的原则》^[8], 使得在外层空间使用核动力源有了国际层面的法律制度。而《外层空间核动力源应用安全框架》则为各国提供了切实可行的安全标准和技术指南^[9-10]。美国和俄罗斯根据《外层空间核动力源应用安全框架》的要求, 制定了空间核能应用相关的安全性试验内容^[11]。

虽然我国在飞行安全评价^[12]、草原驾驶安全^[13]等安全体系构建方面进行了研究, 由于在外空环境中运用核能具有独特性, 以及空间核能源事故风险具有很高的不确定性和可变性, 可借鉴性有限。为了最大限度确保空间核能源使用的安全性, 须考虑空间使用核能全过程的安全性因素, 并对其进行审查和评估, 确认其安全性指标是否满足航天器空间使用要求。本文仅对空间同位素热/电源(Radioisotope Heat Unit, RHU/Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)安全技术指标体系进行研究。

1 应用环境剖面分析

空间同位素热/电源从产品交付到最终废弃处置包括地面运输、发射准备、发射及部署、运行和废弃处置等任务剖面, 见图1所示。

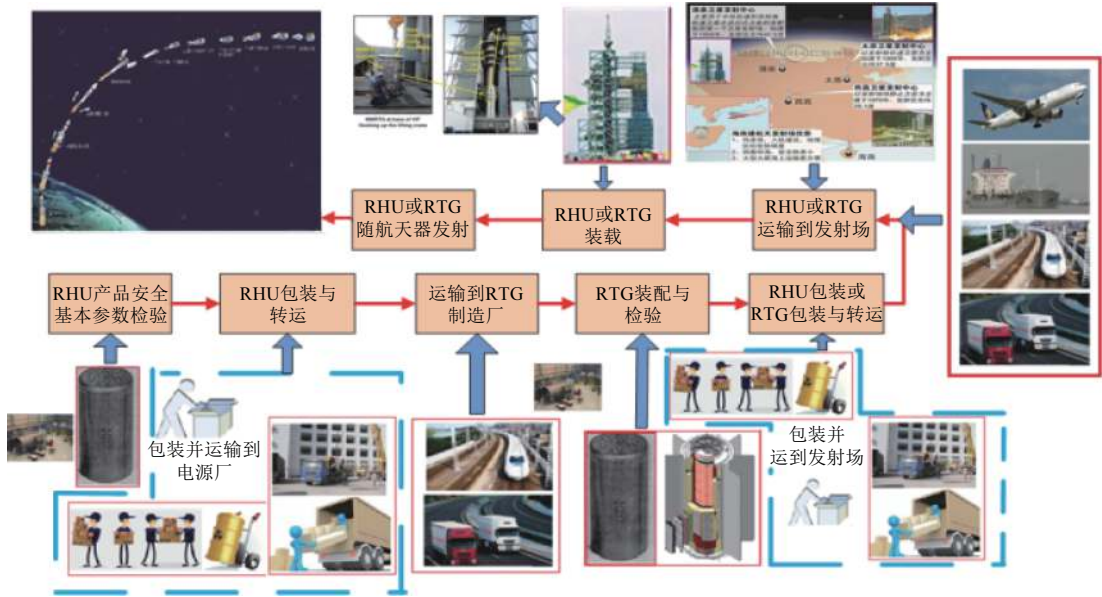


图1 空间同位素热/电源任务剖面
Fig. 1 Mission profile of space RHU/RTG

1.1 研制阶段

研制阶段是指从同位素热源设计、安全性初步论证、制造等一系列过程。其中影响RHU产品安全性的因素包括源芯设计、包壳设计、焊接质量。最终与空间同位素热/电源应用相关的安全性技术指标体系见图2所示。其他指标安全性问题可按相关标准执行。

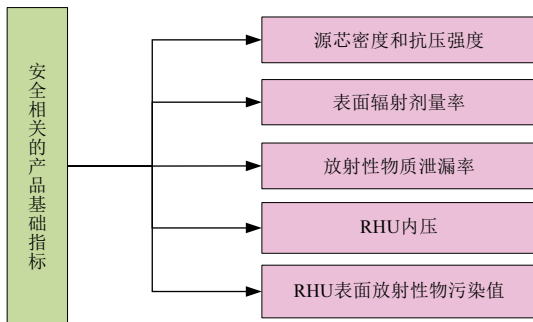


图2 同位素热源安全性相关的基础指标
Fig. 2 Basic technique index of RHU

1.2 运输阶段

正常的地面贮存/运输（含场内转运）环境下，影响RHU/RTG安全性的主要因素是运输振动、冲击、贮存环境条件等。要求RHU/RTG在经历正常的地面贮存/运输环境后，不发生放射性物质的泄漏。其中，RHU/RTG表面辐射率和漏率指标与产品基础要求一致，其他技术指标需要根据运输工具、运输路线及贮存环境条件，给出安全试验需要考核的振动谱、冲击谱、过载值，贮存/运输过程中温度、湿度的变化范围

以及大气压的变化范围，以便于地面试验，用于考核RHU/RTG安全性。因此，可建立正常环境下地面贮/运阶段的技术指标体系如图3所示。

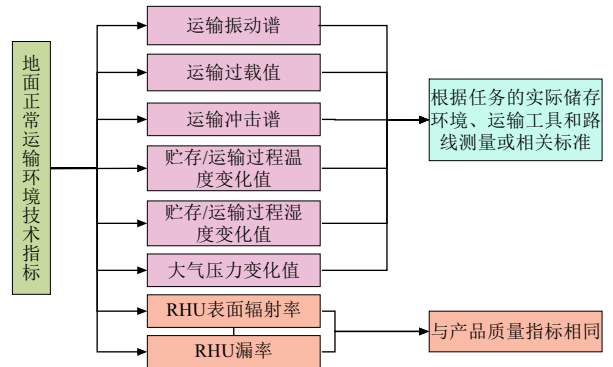


图3 RHU/RTG地面运输阶段正常环境下的安全指标体系
Fig. 3 Safety index system of RHU/RTG at normal transportation environment on the ground

地面运输阶段事故环境下，可能导致的同位素燃料扩散的事故包括：运输过程中的跌落、运输过程中的交通事故等。可能的事故场景见表1。对表1进行分析，可建立地面运输阶段事故环境的安全指标体系如图4所示。

其中，运输过程由于采用的运输工具不同，其安全指标也不同。目前，根据我国国情，只考虑公路运输和铁路运输。

安全技术指标体系的确定采用包容性原则，地面运输（含场内转运）阶段事故环境下的安全指标主要包括坠落高度、火烧温度和时间、贯穿、穿刺、水浸

表 1 地面运输阶段可能的事故场景

Table 1 The typical accident situation of ground transportation phase

阶段	事故场景描述	与安全有关的技术指标
场内转运阶段	RHU/RTG从起吊装置上坠落	坠落高度 落地角度 坠落到尖锐物体上
	转运时工位器具坠落到RHU/RTG表面	工位器具坠落高度 工位器具质量
运输阶段	公路运输发生交通事故时的碰撞、燃料燃烧、翻车掉入深谷或河流、湖泊及紧急刹车等。	燃油燃烧的温度及持续时间 加速度 撞击速度和角度 坠落高度 外压
	列车编组引起的碰撞、行驶过程两列车相撞，列车弯道翻车。	加速度 撞击速度 坠落高度

1.4 发射准备阶段

在正常的发射准备阶段，RHU/RTG已完成在火箭上装器，不需考虑安全性要求。

如在发射准备阶段，发生推进剂的燃烧和爆炸事故，需RHU/RTG能抵抗推进剂燃烧的温度、爆炸产生的冲击波以及火箭碎片的撞击。因此可建立发射准备阶段事故环境的安全指标体系如图5所示。

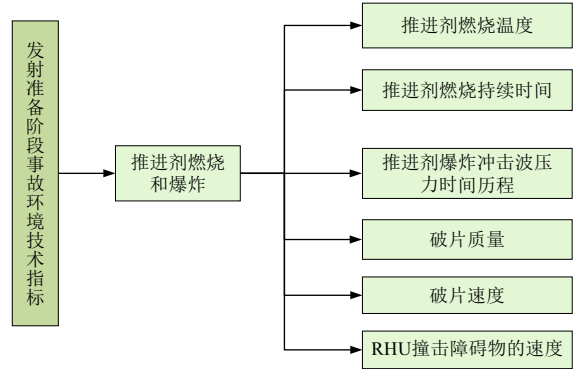


图 5 RHU/RTG发射准备阶段事故环境下的安全指标体系
Fig. 5 Safety index system of RHU/RTG at hypothesis accident in transportation phases in launch preparative phases

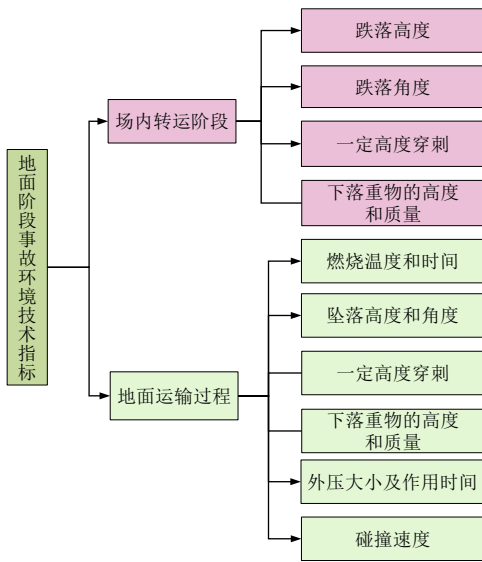


图 4 RHU/RTG地面运输阶段事故环境下的安全指标体系
Fig. 4 Safety index system of RHU/RTG at hypothesis accident in transportation phases on the ground

等，因此可以参照IAEA SSR-6（2012）《放射性物质安全运输条例》^[14]和GB11806（2004）《放射性物质安全运输规程》^[15]规定，确定RHU/RTG的安全技术指标体系。

1.3 装器阶段

正常条件下的装器，主要考虑RHU/RTG与操作人员的近距离接触，必须对RHU/RTG表面的放射性活度（或表面剂量率）和²³⁸PuO₂的泄漏率进行控制，其安全性指标就是产品的基础安全指标。

1.5 发射及部署阶段

空间同位素热/电源在发射及部署阶段的安全性技术指标体系与使用运载火箭的型号和任务有关。以我国“长征3号乙”运载火箭发射的飞行时序^[16]为例进行说明。将发射过程分为8个任务阶段，见表2。一是发射早期阶段，即1~2任务阶段；二是发射后期阶段，即3~8任务阶段。

根据表2可以知道，在发射及部署阶段，RHU/RTG在正常环境下，经历的主要力学环境是各阶段点火、分离引起的冲击过载（加速度）、振动以及飞行过程中的振动。因此可以构建发射及部署阶段的正常环境技术指标体系如图6所示。

如果在发射准备阶段和发射阶段任务失败，RHU/RTG需要经历热环境、力学环境和化学环境。其中热环境包括推进剂燃烧、推进剂爆炸火球烧蚀、再入环境的气动烧蚀等；力学环境包括爆炸超压、爆炸碎片撞击、低速坠地撞击、再入后的高温高速撞击地面或水面、再入过程的内压增长、落入深海的外压作用等；化学环境主要包括肼类推进剂对金属包壳的腐蚀、海水腐蚀等。

据此可以建立RHU/RTG在发射及部署阶段故障条件的安全性技术指标体系如图7所示。

1.6 运行及废弃阶段

在运行阶段可能的事故环境是RHU/RTG或航天器

表2 “长征3号乙”运载火箭典型的飞行时序

Table 2 The typical flight sequence of Long March 3B rocket

任务阶段	事件描述		任务运行时间/s	
	开始	结束	开始	结束
0	完成安装	火箭助推器点火	-172 800	-3
1	火箭助推器点火	火箭助推器分离	-3	127
2	火箭助推器分离	一级级/二级级分离	127	147
3	一级级/二级级分离	整流罩抛弃	147	232
4	整流罩抛弃	二级级/三级级分离和三级级发动机点火	232	332
5	二级级/三级级分离和三级级发动机点火	三级级发动机一次关机	332	631
6	三级级发动机一次关机	三级级发动机二次点火	631	1 281
7	三级级发动机二次点火	三级级发动机二次关机	1 281	1 460
8	三级级发动机二次关机	卫星/三级级分离	1 460	1 560

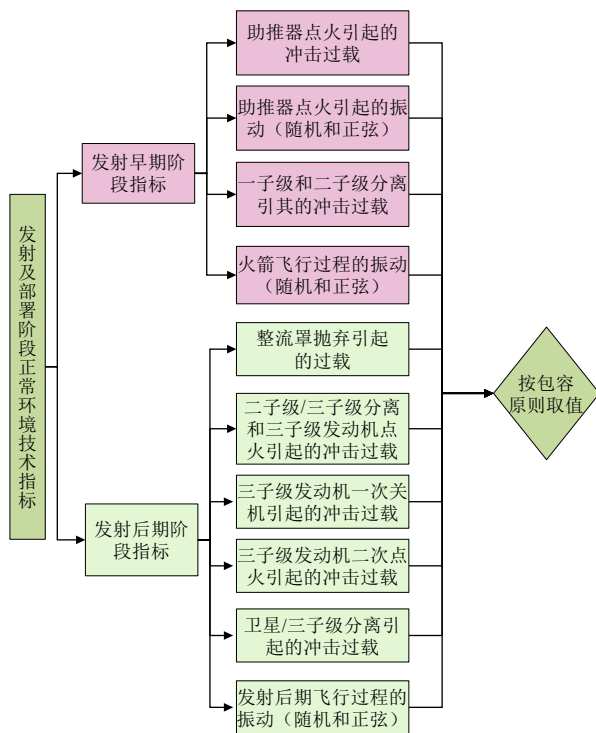


图6 RHU/RTG发射及部署阶段正常环境下的安全指标体系

Fig. 6 Safety index system of RHU/RTG at launch and enter orbit phases in normal environment

遭受空间碎片的撞击，导致RHU/RTG或航天器损坏。这种事故条件下，损坏的RHU/RTG或航天器仍然在轨道上运行，放射性物质不会造成对人类和生物圈的影响。

使用RTG/RHU的航天器在废弃后，RTG/RHU若保持完整结构，可将带有RTG/RHU的航天器放置在废弃轨道上或提升到高轨上，无需对事故条件下的安全性进行地面验证。

2 安全认证技术指标体系构建

根据对空间同位素热/电源任务剖面的分析，要求

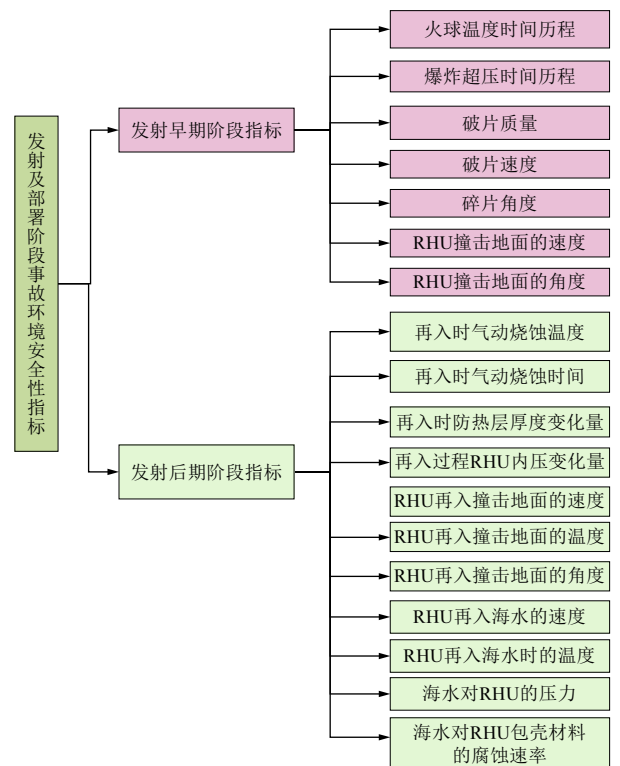


图7 RHU/RTG发射及部署阶段事故环境下的安全指标体系

Fig. 7 Safety index system of RHU/RTG during launch and entering orbit phases in accident environment

RHU/RTG在正常环境下，距离RHU/RTG表面一定范围内，辐射剂量在规定的范围内，表面污染满足相关规定要求；在事故工况下， $^{238}\text{PuO}_2$ 不能泄漏，据此可以建立如图8所示的正常环境条件下的安全指标体系和图9所示的事故工况下的安全技术指标体系。

分析图8和图9，发现不同任务剖面在正常和事故环境下有部分技术指标重复。根据技术指标包容的原则，对相同的指标采用最严酷的参数作为最终的考核指标，可以对技术指标进行合并，最终可建立如图10

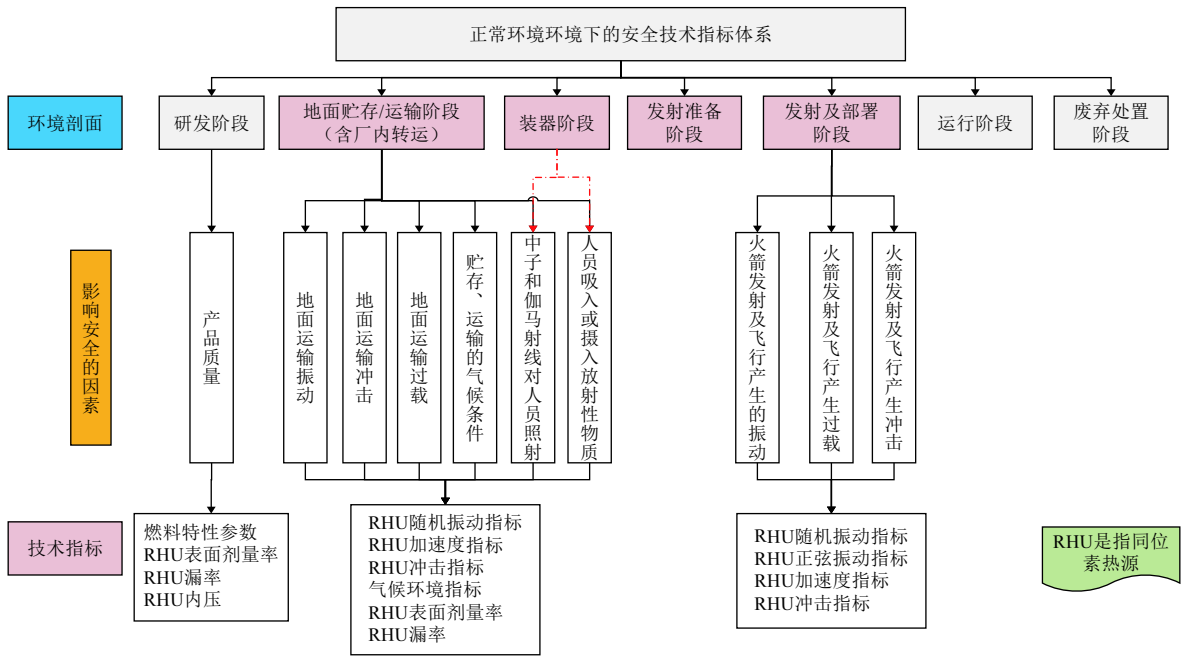


图 8 空间同位素热/电源正常环境下的安全指标体系

Fig. 8 Technology index system for RHU/RTG under normal environment conditions

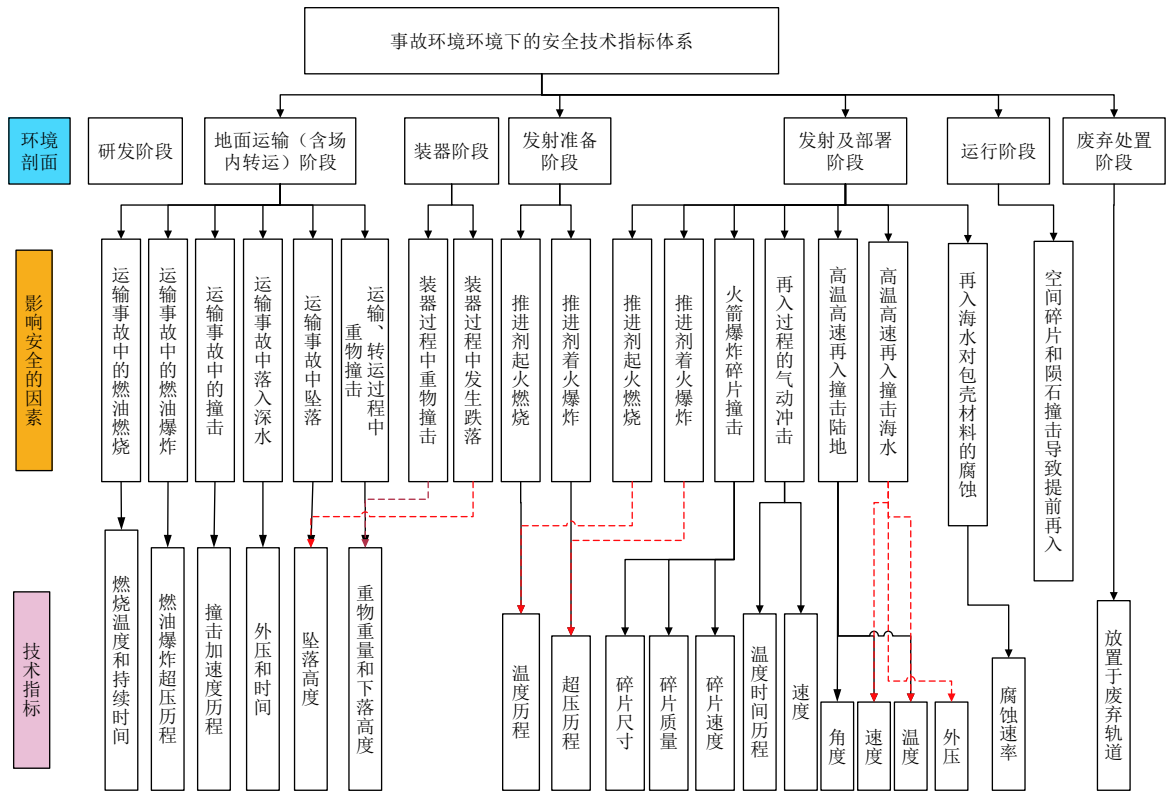


图 9 同位素热/电源假想事故条件下的安全指标体系

Fig. 9 Technology index system for RHU/RTG under accident environment conditions

所示的安全认证技术指标体系，其中RHU的基本安全技术指标、地面储运环境下的安全技术指标为通用安全技术指标，可以根据现有的法律法规和标准要求确

定具体的技术指标值；发射环境下的安全技术指标、再入环境的安全技术指标为特殊技术指标，需要根据航天任务和使用的运载火箭才能确定具体指标值。

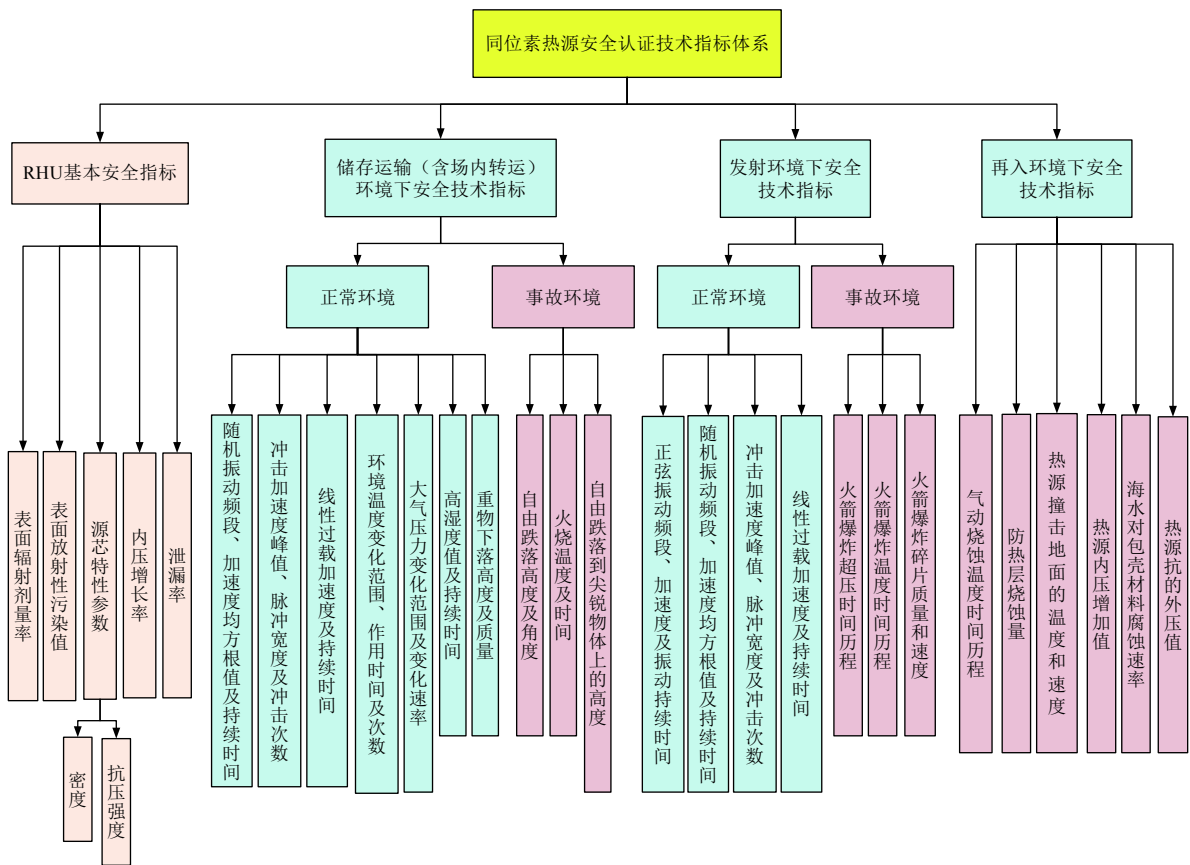


图 10 同位素热/电源安全认证技术指标体系

Fig. 10 Technology index system of safety verification for RHU/RTG

该技术指标体系共四大类型29项技术指标，涵盖空间同位素热/电源产品安全基本要求和各任务剖面的正常和事故环境要求。可满足我国空间同位素热/电源安全认证的技术要求，并在某型号航天任务中得到应用。

3 结论

人类从近地轨道探测迈向深空探测的过程中，为了弥补太阳能电源和化学能电源的不足，如月夜长时间低温、远离太阳系无光照等，通过引入核动力源来解决航天器能源问题。空间核动力源中存在着放射性材料或核燃料，一旦发生事故容易给人与环境带来危害。因此，对使用空间核动力源的航天发射任务，需要对空间核动力源进行安全认证，确保在正常使用环境和事故条件下不对人类和环境造成影响。我国在“嫦娥3号”任务中首次使用了放射性同位素热源作为空间核动力源，由于我国没有空间核动力源安全认证相关的技术标准^[17-18]，其安全性认证由俄罗斯完成。本文通过空间同位素热/电源应用环境剖面的分析，开展了空间同位素热/电源安全技术指标体系框架研究，确定了不同环境剖面下正常和假想事故条件的安全技术指标

体系，基本覆盖了同位素热/电源在全生命周期中的各种环境条件。通过正常和事故条件下的指标进行分析，对同类型指标进行合并，构建了我国空间同位素热/电源安全认证技术指标体系，为航天发射安全体系建设提供了辅助的决策手段，也为涉核航天发射安全分析与评估技术的研究提供了理论支撑。

致谢

特别感谢探月与航天工程中心、北京空间飞行器总体设计部和北京宇航系统工程研究所的支持。

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.
WU W R, WANG Q, REN B Q, et al. Application of RHU/RTG in space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(2): 1-6.
- [2] NIKOLAIN 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 deepspace [C]//Conference of IAC. [S. l.]: IAC, 2005.
- [3] YANG J C, HU J, NI M L. Adaptive guidance law design based on

- characteristic model for reentry vehicles[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, 51(12): 2005-2021.
- [4] SAKURAGIY, MEASON J L, KURODA P K. Uranium and plutonium isotopes in the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1983, 88(C6): 3718-3724.
- [5] KREYP W. Atmospheric burnup of the cosmos-954 reactor[J]. *Science*, 1979, 205(4406): 583-588.
- [6] ZAKIROV V, PAVSHOOK V. Russian nuclear rocketengine design for Mars exploration[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(3): 256-260.
- [7] DENISTON B. An inside look at Russia's nuclear power propulsion system (interview: academician Anatoly Koroteyev)[J]. *The 21st Century Science and Technology*, 2012: 57-59.
- [8] RIVERT A B. Applicability of trends in nuclear safety analysis to space nuclear power systems[J]. *Aip Conference*, 1993, 271(1): 435-437.
- [9] UN. Principles relevant to the use of nuclear sources in outer space, UN G. A. resolution A/res/47/68; GAOR, 47th session, supp. No. 20[Z]. USA: UN, 1992.
- [10] IAEA. Safety framework for nuclear power source applications in outer space[Z]. [S. l.]: IAEA, 2009.
- [11] SUMMERER L, WILCOX R E, BECHTEL R. The International safety framework for nuclear power source applications in outer space-useful and substantial guidance[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 111(1): 89-101.
- [12] 胡文军, 陈红永, 陈军红, 等. 空间核动力源的安全性研究进展[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(5): 453-464.
- HU W J, CHEN H Y, CHEN J H, et al. Advances of safety research on nuclear space power sources[J]. *Journal of Deep Exploration*, 2017, 4(5): 453-464.
- [13] 陈芳, 孙亚腾, 范丹红, 等. 飞行安全评价指标体系实证研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(9): 146-151.
- CHEN F, SUN Y T, FAN D H, et al. Empirical study on evaluation index system of flight safety skill. *China*[J]. *Safety Science Journal*, 2017, 27(9): 146-151.
- [14] 商艳, 朱守林, 戚春华, 等. 草原公路景观要素影响驾驶员眼动指标研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(5): 19-24.
- SHANG Y, ZHU S L, QI C H, et al. Impacts of grassland highway landscape elements on driver's eye movement indices[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(5): 19-24.
- [15] IAEA. 放射性物质安全运输条例: SSR-6[S]. [S. l.]: IAEA, 2012.
- [16] ICSCCS. 放射性物质安全运输规程: GB 11806[S]. Beijing: ICSCCS, 2004.
- [17] 李聃. 长征三号乙运载火箭[J]. *导弹与航天运载技*, 2005, 3(3): 3-7.
- LI D. Long March 3B launch vehicle[J]. *Mission and space Vehicles*, 2005, 3(3): 3-7.
- [18] 李琼, 刘海涛. 航天安全标准简介[J]. *航天标准化*, 2009(4): 17-20.
- LI Q, LIU H T. Brief introduction of aerospace safe standard[J]. *Aerospace Standardization*, 2009(4): 17-20.

作者简介:

胡文军(1966-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间核安全, 结构与材料冲击响应。

通讯地址: 四川省绵阳市919信箱401分箱(621900)

电话: (0816)2485413

E-mail: wjhu@vip.sina.com

Study on Technical Index System and Framework of Safety Standards for RHU and RTG

HU Wenjun¹, LIU Jizhong², TANG Yuhua², CHEN Junhong¹, ZHNAG Wei², ZHANG Zhe²,
LI Shangming¹, HU Shaoquan¹

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on the application environment for $^{238}\text{PuO}_2$ radioisotope heat unit (RHU) and radioisotope thermoelectric generator (RTG) in china, The technical index system of safety for evaluating the safety for RHU/RTG is studied drawing on the safety verification of RHU/RTG in foreign countries. The framework of technical index system for the safety standards are propounded that includes the normal and unexpected emergency conditions of full life circle for the RHU and RTG, such as design and manufacture, stockpile and transportation on the ground, preparing for launch, launch, in-orbit operation waste disposal and so on. The technical index system includes 29 items that can be used as the reference in developing and assessing of safety-in-use about the Pu-238 radioisotope heat unit or radioisotope thermoelectric generator, solving the problem of lacking the safety certification system and technical index of safety verification for the use of space RHU/RTG in China.

Keywords: Radioisotope Heat Unit (RHU) /Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG); deep space exploration; safety; technology index system; mission profile

Highlights:

- The Influence Factors are discussed for the safety of RHU/RTG for design and manufacture, stockpile and transportation on the ground, preparing of launch, launch, running in orbit, waste disposal.
- The framework of technical index system about the safety standards are propounded that includes the normal and unexpected emergency conditions of full life cycle for the RHU and RTG, such as design and manufacture, stockpile and transportation on the ground, preparing of launch, launch, running in orbit, waste disposal and so on.
- The system of technical index includes 29 items that can be used mainly in developing and assessing of application safety about the Pu-238 radioisotope heat unit or radioisotope thermoelectric generator.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]