

可重复使用航天器空间辐射效应评价 关键问题及解决方法

韩金鹏, 高著秀

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 介绍了可重复使用航天器及其应用需求, 分析了其在太空遭遇的空间辐射环境及效应, 探讨了可重复使用航天器的空间辐射效应评价在元器件退火效应研究及工程化、地面模拟试验设施及评价技术、地面检测维护及评价、抗辐射设计规范等方面存在的问题, 提出了深入开展元器件空间环境效应及退火效应机理研究, 给出适合可重复使用航天器的指标和评价体系; 搭建多功能的综合环境效应地面模拟试验装置, 加强多因素环境协同效应机理研究, 建立空间多因素环境协同效应试验方法; 开展空间环境多因素协同效应仿真, 加强可重复使用航天器辐射效应预示方法的深入研究等解决途径。

关键词: 可重复使用; 空间辐射环境; 电离总剂量; 单粒子

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.004

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)03-0021-06

Key Problems and Solutions for Evaluation of Space Radiation Effects of Reusable Spacecraft

HAN Jin-peng, GAO Zhu-xiu

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Reusable spacecraft and its application requirements were introduced. The space radiation environment encountered by the reusable spacecraft and the effects were analyzed. The problems of space radiation effect evaluation of reusable spacecraft existing in the research and engineering of annealing effect of components, ground simulation test facilities and evaluation technology, ground inspection, maintenance and evaluation, radiation resistance design specifications were discussed and the solutions thereto were proposed, such as an in-depth research was carried out on the mechanism of space environmental effect and annealing effect of components and the index and evaluation system suitable for the reusable spacecraft was given; a multi-functional ground simulation test device for integrated environmental effects was built, the research on the mechanism of multi-factor environmental synergistic effect was strengthened, and a test method for spatial multi-factor environmental synergistic effect was established; the multi-factor synergistic effects of space environment were simulated and the in-depth research on radiation effect prediction methods of reusable spacecraft was conducted.

KEY WORDS: reusable; space radiation environment; total ionization dose; single particle

收稿日期: 2019-07-18; 修订日期: 2019-09-11

Received: 2019-07-18; Revised: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金 (41604142)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (41604142)

作者简介: 韩金鹏 (1986—), 男, 山东人, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天器空间环境及防护总体设计。

Biography: HAN Jin-peng (1986—), Male, from Shandong, Ph. D., Engineer, Research focus: overall design of spacecraft environment and protection.

随着航天技术的发展,一次性使用航天器技术日益成熟,世界航天大国都在积极开展重复使用航天器的可行性论证、方案探索及关键技术攻关和研究。可重复使用航天器必将成为未来航天技术发展的一个重要方向,具有重要的应用价值。

1 可重复使用航天器的发展历程

20 世纪中期,冯·布劳恩和钱学森提出了重复使用天地往返运输系统的概念。可重复使用航天器是指可以循环多次重复使用、反复穿过地球大气,并能依靠自身的动力系统自由地穿梭于地球表面与空间环境之间,运送各类有价值目标;或能够长时间在轨驻留和在轨机动,执行各类任务,具有军事和民用特点的多用途航天器^[1-2]。可重复使用航天器主要包括可重复使用的运载火箭、载人飞船、天地往返空天飞行器等。可重复使用航天器从设计之初就注重航天器自身的可重复使用性能,通过注重航天器自身可靠性的设计,提高航天器在轨运行和使用的可靠性,采用重复使用的方式,提高航天器使用次数,利用后期维护保养均摊航天器研制成本,从而可大大降低单次任务成本,提高效费比。通过采用新的设计理念和设计手段以及先进的进入太空的方式,能有效缩短发射周期,提高发射的机动灵活性,形成航班化的运营和维护。

1981 年,美国 NASA 哥伦比亚号航天飞机成功首飞,成为第一代可重复使用航天器^[3-5]。从此之后世界各航天大国相继开展了可重复使用航天器的方案研究和论证工作以及试验机验证计划,并在一些关键技术攻关方面也取得了令人瞩目的成果。目前各航天国家提出的可重复使用航天器有 Space X 的猎鹰 9 号重复使用运载火箭^[5-6]、“龙”飞船^[3-4]、NASA 的“猎户座”飞船^[3-4,7]、美国空军的 X-37B^[8]、美国内华达山脉公司的追梦者^[8]、欧空局的 IXV、俄罗斯的“新型载人航天运输系统”^[3-4]、印度的 RLV-TD 等,其他国家也正在开展相关概念研究和技术攻关,一时之间可重复使用航天器成为各国家航天领域的研究热点。

如今航天技术的日益普及、规模应用以及商业航天发射,对低成本自由进入空间的能力提出了巨大需求,航天器采用重复使用方式大幅度降低近地轨道发射成本,可为航天技术的快速发展提供基础性支撑。以载人飞船为例,参考国际空间站运营和补给任务规划,随着未来世界各国载人航天活动和在轨执行任务的增加,未来将人员和物资送往空间站的频率会越来越高。不可重复使用的载人飞船存在研制成本高、发射周期长等弊端,这将导致不可重复使用的载人飞船无法满足如此大规模的任务需求。如果载人飞船具备可重复使用性能,完成相关在轨任务后,载人飞船返

回地面维护保养中心或总装厂房,通过地面操作人员利用相关地面维护保养设备开展一系列对飞船冷热结构的检测、维护保养,利用地面设备的检测数据对飞船的健康状态和剩余寿命进行详细的评估,使其可以快速发射入轨,执行下一次在轨任务,这样一方面可以大大地缩短任务的发射准备周期,提高飞船发射频率,通过多次使用均摊成本,可降低单次任务的成本,提高任务效费比,从而满足近地轨道空间站大规模载人航天在轨任务的需求。通过计算分析(如图 1 所示)可知,当飞船可以重复使用后,将能够显著降低空间站任务周期内飞船研制的成本。从飞船重复使用次数与飞船成本的曲线图可以看出,飞船的成本随着重复使用次数的增多会越来越低,而随着飞船的重复使用次数达到 10 次以上时,飞船的成本趋近于最低^[3-4]。

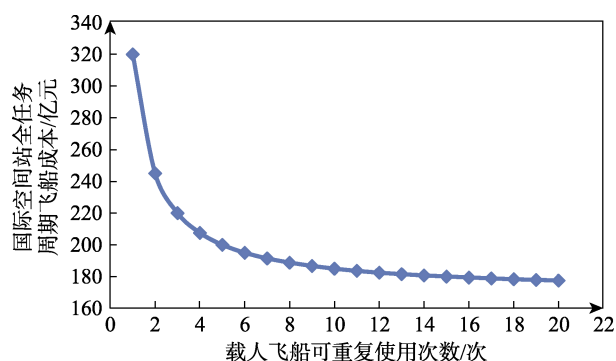


图 1 国际空间站任务飞船成本与可重复使用次数的关系
Fig.1 The relationship between international space station mission spacecraft costs and the number of reusable spacecrafts

随着各国航天技术的发展,各国的太空资产越来越多,而太空资产具有附加值高的特点,一旦出现故障,将造成巨大的经济损失,因此太空补给和维护变得越来越重要。利用可重复使用航天器的变轨机动、自主交汇对接和接近作业能力可以实施在轨卫星维护、模块更换、整星回收等空间服务,从而提高太空资源利用率,降低成本。此外空间科学试验相关载荷(如生命科学实验用品、物质与物理科学实验用品等)在轨完成试验后,其试验样品可通过可重复使用航天器携带返回地面再行开展相关研究。

综上所述,可重复使用航天器在经济性和在轨服务方面具有重大的应用价值,是未来航天技术发展的重要方向。与传统航天器一样,可重复使用航天器在太空中同样会受到空间环境,特别是空间辐射环境的影响。传统航天器是一次性使用,在进行辐射效应评价时,可针对一次任务周期开展。鉴于可重复使用航天器具有多次重复使用的特点,因此存在退火、协同效应方面的不同,不能像传统航天器那样针对一次任务开展评价,需要开展针对性地研究。

可重复使用航天器在轨期间,遭遇地球辐射带、

太阳宇宙射线和银河宇宙射线等粒子辐射环境,产生总剂量效应、单粒子效应、充放电效应等。这将会对航天器的电学、光学等性能产生影响,严重时可能造成单机设备故障,进而导致航天器在轨故障。因此在重复使用航天器的方案设计及研制阶段,需要开展针对性的辐射效应评估,进而采取有效的辐射防护措施,为飞行任务的成功提供保障的同时,尽可能降低质量代价和成本代价。

2 可重复使用航天器辐射效应

地球辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线是可重复使用航天器在轨遭遇的空间辐射环境带电粒子的主要来源,其主要成分是电子、质子及少量重离子等。辐射环境将对材料和器件带来严重的辐射损伤效应,辐射损伤效应根据其类型可以分为电离总剂量效应(TID)、单粒子效应(SEE)、位移损伤效应(DD,又称为非电离总剂量效应, TNID)、充放电效应等^[9-10]。

空间辐射环境中来自辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线的带电粒子轰击到航天器敏感单机中的电子元器件或材料后,带电粒子会将自身的能量传递给元器件或材料的原子,导致其产生电离作用,带电粒子自身的能量就会被吸收,从而对电子元器件或材料化学键造成损伤,造成元器件或材料产生缺陷或性能退化,称为总剂量损伤。随着时间的增加,元器件或材料的电离总剂量效应损伤会越来越严重。这种效应损伤与辐射的带电粒子的具体类别和能量大小无关,只与带电粒子在电子元器件或材料中运动过程中损失的总能量有关,属累积效应^[10-11]。总剂量效应会引起航天器各单机设备中的电子元器件或材料性能产生严重退化,甚至失效,主要表现为:航天器包覆的热控涂层变脆开裂、变色,太阳辐射吸收率增加,热控涂层的控温性能下降;各类非金属绝缘材料、橡胶密封圈等内部化学键断裂,性能下降,弹性降低,变脆开裂,无法继续维持原来的功能;太阳电池阵玻璃、摄像机镜头等材料透光率下降、变黑,导致太阳电池阵发电性能下降,摄像机拍摄的影响变暗;电子元器件性能下降,电流放大系数降低,漏电流、反向击穿电压、阈值电压漂移等出现异常^[10-14]。

电子元器件在带电粒子的电离作用下,灵敏区内产生大量电荷。当轰击集成电路的带电粒子能量足够大时,由于带电粒子的电离效应,电子元器件内部产生大量的电子-空穴对,从而引起元器件的逻辑软错误,包括单粒子翻转、单粒子闭锁,甚至出现元器件永久损伤的现象^[10-11,14-16]。

带电粒子进入航天器材料或电子元器件后,除通过电离作用产生电离总剂量效应外,还可能以动能碰撞的撞击方式将电子元器件原子撞离其原来位置,产

生内部结构缺陷,从而产生相应的内部损伤,称为位移损伤效应。对位移损伤比较敏感的一般是光学耦合器件,主要包括航天器太阳电池阵、光纤等。在位移损伤作用下,航天器太阳电池阵可出现短路电流 I_{SC} 和开路电压 V_{OC} 下降,从而其发电性能退化,输出功率下降^[14-18]。

复杂的空间环境将会对航天器在轨执行任务产生严重影响,这些不同的环境因素将不仅单独对航天器产生损伤作用,还可能诱发次生环境,对航天器造成次生损伤。有的环境几种效应有互相增强的效应,带电粒子辐射环境可与紫外、原子氧、等离子体等存在协同效应^[10,19]。同时空间辐射环境中的电子、质子与重离子间也可能存在协同效应,我们不仅要关注空间辐射环境本身对可重复使用航天器的影响,还要关注空间辐射环境与其他环境因素的协同效应和空间辐射环境本身不同效应之间的增强效应对可重复使用航天器的影响^[19]。

3 辐射效应评价面临的问题

传统一次性使用的航天器,例如卫星,在轨期间的寿命就是任务周期,轨道剖面和任务周期已经确定,在进行卫星研制过程中只需考虑固定的轨道剖面和任务周期内辐射效应对卫星各单机设备产生的影响。对于像总剂量效应这种具有长时间累积特点的辐射效应来说,在卫星研制过程中根据卫星轨道剖面和任务周期等要素,利用已有的空间辐射环境模型,计算分析出卫星在轨期间接受的总剂量值,根据带电粒子与物质相互作用的规律,给出剂量-深度曲线,依据剂量-深度曲线开展元器件筛选和地面模拟试验及评价,并确定防护措施,确保卫星在轨高可靠、长寿命。对于单粒子效应这种瞬间效应来说,根据卫星轨道剖面和任务周期可确定卫星在轨遭遇的带电粒子能谱,对元器件、电路等进行地面模拟试验,确定抗辐射加固措施^[20-21]。

可重复使用航天器辐射效应评价在某些方面的工作类似于卫星,但可重复使用航天器相比卫星具有多次重复使用的特点。每次任务返回地面后,经过相应的检测维护,随后开展下一次任务,因此不能完全按照卫星的模式来进行辐射效应评价和抗辐射加固设计。可重复使用航天器相比传统一次性使用航天器在辐射效应评价方面主要面临如下问题。

1) 可重复使用航天器元器件退火效应研究及工程化。传统一次性使用的航天器针对一次任务开展辐射效应防护,在辐射环境恶劣、任务周期长的飞行任务中,往往需要选择抗辐射等级较高的元器件。这些元器件的价格往往很昂贵,而且在对航天器开展大量的辐射效应防护工作时,由于采取屏蔽措施还会造成航天器质量的增加,挤占宝贵的发射载荷。可重复使

用航天器每次任务后都可以返回地面进行维护, 单机元器件在轨期间遭遇的辐射效应, 返回地面后会出现不同程度的退火效应^[22-23], 性能有一定的恢复。因此在元器件退火效应的前提下, 航天器多次重复使用的累计使用寿命应比单次持续使用情况下要长得多。考虑退火效应后, 在航天器研制过程中可以节约用于辐射效应屏蔽的额外的结构质量, 对航天器经济性有很大益处, 因此深入开展各类元器件性能退化规律和退火效应的研究对于可重复使用航天器具有重要的价值。然而, 近年来, 国内外针对元器件在不同辐射环境下的变化规律与损伤特性已进行了较多研究, 但很多工作仅局限于器件在某一偏置下对不同剂量率或不同辐照环境中辐照响应规律和退火特性的探讨, 元器件受辐照后的退火特性与器件类型、辐照剂量、偏置条件以及退火温度等都有一定关系^[11,22-23], 现阶段的研究与宇航需求尚有一定差距, 不能满足航天器工程化要求。

2) 地面模拟试验设施及评价技术。空间中不同的环境具有一定的协同效应, 不同空间环境及效应是相互作用的, 这些环境往往有相互增强的效应^[10,11-12]。例如航天器表面热控材料在太阳电磁辐射环境因素与带电粒子辐射环境因素的综合作用下, 其性能将发生较大幅度的退化, 甚至失效。不同的辐射环境效应也存在一定的协同效应, 例如当元器件在轨接受的总剂量达到一定程度时, 元器件将更容易产生单粒子效应。因此不能单独只研究某一种环境因素对航天器电子元器件的影响, 需要研究多环境因素共同作用下引起的协同效应对航天器的影响, 从根本上改进地面空间环境模拟的试验方法与试验技术, 从而提高航天器环境效应评价试验的有效性和准确性, 还要加强环境效应研究和环境预示工作, 制定更合理的试验条件。

3) 地面检测维护及评价。可重复使用航天器在轨完成任务后返回地面, 需要进行必要的检测和维护, 更换必要的设备和一次性组件, 并经过严格的评估, 具备再次执行在轨任务的能力。现在面临的问题是航天器返回后针对辐射损伤效应如何进行检测, 检测流程如何, 检测项目有哪些, 如何根据检测结果评估航天器再次执行航天任务的能力。

4) 可重复使用航天器抗辐射设计规范。航天器抗辐射加固设计规范是保障航天器顺利进行地面设计研制生产必不可少的重要举措。我国多年的航天器抗辐射加固设计及研究形成了很多相关的设计方法和设计经验, 这些方法和经验有的已经固化为文字规范, 有的仍然存在于设计人员的经验和零散设计文件中。这些基本都是围绕一次性使用的航天器形成的, 目前针对可重复使用航天器的相关抗辐射设计、地面模拟及评价规范等都很少, 而且有些针对一次性使用航天器抗辐射设计规范的有效性和可操作性也没有

得到真正解决^[24-25]。

4 解决途径

针对以上分析的可重复使用航天器辐射效应评价和抗辐射设计面临的问题, 笔者对相应的解决途径进行了探讨和思考, 具体如下:

1) 深入开展元器件空间环境效应及退火效应机理研究, 提出适合可重复使用航天器的指标和评价体系。空间辐射效应的机理是开展空间辐射效应地面模拟试验和在轨性能退化与故障分析的前提, 尤其是电子元器件和半导体器件的空间辐射损伤机理比较复杂, 而可重复使用航天器多次进出空间辐射环境, 重复遭遇空间辐射环境, 对于元器件的辐射效应损伤和退火效应要考虑的因素更多, 情况更复杂。虽然针对元器件空间辐射效应机理已经开展了大量的研究, 并且取得了大量显著的研究成果, 但是其中的很多损伤机理还没有研究清楚, 特别是元器件辐射损伤退火效应, 元器件退火特性与器件类型、辐照剂量、偏置条件以及退火温度等都有一定关系, 机理比较复杂, 深入开展各类元器件性能退化规律和退火效应的研究对于可重复使用航天器具有重要的价值。因此航天工业部门与微电子器件辐射效应研究机构紧密结合, 开展攻关研究, 提出适用于可重复使用航天器的辐射效应指标体系, 便于可重复使用航天器型号设计师开展航天器抗辐射设计^[25]。

2) 搭建多功能的综合环境效应地面模拟试验装置, 加强多因素环境协同效应机理研究, 建立空间多因素环境协同效应试验方法。首先针对可重复使用航天器多次重复使用的特点, 利用地面模拟设备研究电子元器件多次进出空间辐射环境后的恢复效应, 研究辐照剂量、辐照次数与性能恢复程度的关系, 建立元器件寿命预示模型, 指导可重复使用航天器抗辐射设计和可重复使用航天器返回地面后的地面检测维护和再次任务能力评估。开展空间多因素环境协同效应地面模拟试验首先需要能够同时实现多种空间环境因素及效应地面模拟的试验装置, 因此需要搭建可同时实现电子和质子、太阳紫外、空间碎片、原子氧、空间等离子体、真空等多种环境因素综合的地面模拟试验装置。针对不同的材料和器件, 空间环境对航天器的协同效应产生的损伤机理是不同的, 因此应该对不同效应机理进行充分和深入研究, 从而对实验结果能正确判读。为了提高空间环境多因素协同效应研究的有效性和准确性, 需要建立空间环境多因素环境协同效应试验方法^[19]。

3) 开展空间环境多因素协同效应仿真, 加强可重复使用航天器辐射效应预示方法的深入研究。一般情况下, 地面模拟试验都是加速试验, 很难实现航天器全寿命周期的模拟试验, 而且如果进行全寿命周期

模拟试验,试验成本也会非常高昂。因此基于航天器空间环境效应性能退化机理和相关模拟试验数据的分析,可建立可重复使用航天器敏感器件的多环境因素性能退化预示模型,以对其在轨性能和剩余性能进行仿真预示,对航天器返回地面后的损伤程度和再次执行在轨任务的性能进行评估,从而在一定程度上降低航天器地面维护和试验评价的费用,提高航天器经济性。

5 结语

可重复使用航天器必将成为未来航天技术发展的重要方向,相对于非重复使用的航天器,可重复使用航天器多次天地往返重复使用的特点给航天器的抗辐射加固设计和辐射效应评价带来了更多的新问题。文中分析了可重复使用航天器在轨遭遇的辐射环境及其效应,对其面临的辐射效应评价问题和解决途径进行了探讨和思考,并呼吁航天工业部门与微电子器件辐射效应研究机构紧密结合,开展可重复使用航天器辐射效应评价和抗辐射设计研究。

参考文献:

- [1] 杨勇. 我国重复使用运载器发展思路探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(2): 1-4.
YANG Yong. Roadmap of Chinese Reusable Launch Vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2006(2): 1-4.
- [2] 杨勇, 王小军, 唐一华. 重复使用运载器发展趋势及特点[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(5): 15-19.
YANG Yong, WANG Xiao-jun, TANG Yi-hua. Development Trends and Characteristics of Reusable Launch Vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2002(5): 15-19.
- [3] 李志杰, 果琳丽, 张柏楠, 等. 国外可重复使用载人飞船发展现状与关键技术研究[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 106-112.
LI Zhi-jie, GUO Lin-li, ZHANG Bai-nan, et al. Study on Development Status and Key Technologies of Reusable Manned Spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(2): 106-112.
- [4] 李志杰, 果琳丽, 张柏楠, 等. 可重复使用航天器任务应用与关键技术研究[J]. 载人航天, 2016, 22(5): 570-575.
LI Zhi-jie, GUO Lin-li, ZHANG Bai-nan, et al. Study on Mission Application and Key Technologies of Reusable Spacecraft[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(5): 570-575.
- [5] 龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发展与展望[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 84-92.
LONG Le-hao, CAI Qiao-yan, WANG Fei, et al. Development of Reusable Space Transportation Technologies[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(10): 84-92.
- [6] 吴晗玲, 宋保永, 苏晗, 等. 猎鹰 9 运载火箭结构分系统
- 设计特点分析与研究[J]. 飞航导弹, 2017(9): 1-4.
WU Han-ling, SONG Bao-yong, SU Han, et al. Analysis and Research on the Structural Subsystem Design of Falcon 9 Launch Vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(9): 1-4.
- [7] 周亚强, 娄路亮, 牟宇. 国内外典型火箭运载能力变化分析[J]. 载人航天, 2017, 23(6): 737-742.
ZHOU Ya-qiang, LOU Lu-liang, MOU Yu. Lift Capacity Evolution of Typical Launch Vehicles in China and Abroad[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(6): 737-742.
- [8] 张国成, 姚彦龙, 王慧. 美国两级入轨水平起降可重复使用空天运载器发展综述[J]. 飞机设计, 2018, 38(2): 1-6.
ZHANG Guo-cheng, YAO Yanlong, WANG Hui. A Survey on Development of Two-Stage-to-Orbit Horizontal-Takeoff-Horizontal-Landing Reusable Launch Vehicle in USA[J]. Aircraft Design, 2018, 38(2): 1-6.
- [9] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
HUANG Ben-cheng, TONG Jing-yu. Space Environmental Engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [10] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
SHEN Zi-cai. Space Radiation Environment Engineering[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013.
- [11] 沈自才, 丁义刚. 抗辐射设计与辐射效应[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015.
SHEN Zi-cai, DING Yi-gang. Anti Radiation Design and Radiation Effect[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015.
- [12] 杨晓宁, 杨勇. 航天器空间环境工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
YANG Xiao-ning, YANG Yong. Space Environment Engineering for Spacecraft[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [13] 张育林, 陈小前, 闫野. 空间环境及其对航天器的影响[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
ZHANG Yu-lin, CHEN Xiao-qian, YAN Ye. Space Environment and its Influence on Spacecraft[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011.
- [14] 宋秉华. 单元抗辐射性能建模方法研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
SONG Bing-hua. Research on Unit Anti-radiation Modeling Methods[D]. Hunan: Hunan University, 2017.
- [15] 朱立. 混合辐射场探测器研制与实验测试[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHU Li. Development and Experimental Test of Combined Detectors in Mixed Radiation Field[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [16] 李志彦. 高可靠 TagTree 编码 VLSI 研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
LI Zhi-yan. VLSI Research of Highly Reliable Tagtree

- Coding[D]. Xian: Xidian University, 2012.
- [17] 徐庆华. 金属皱褶芯材夹层板的热力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- XU Qing-hua. Research on Thermodynamic Characteristic for the Metallic Sandwich Plates with Folded Core[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [18] 张雷, 杨生胜, 高欣, 等. 空间太阳能电池辐射效应评价方法[J]. 真空与低温, 2013, 19(1): 24-29.
- ZHANG Lei, YANG Sheng-sheng, GAO Xin, et al. The Evaluation Methods for Radiation Effects of Space Solar Cell[J]. Vacuum and Cryogenics, 2013, 19(1): 24-29.
- [19] 沈自才, 邱家稳, 丁义刚, 等. 航天器空间多因素环境协同效应研究[J]. 中国空间科学技术, 2012(5): 54-59.
- SHEN Zi-cai, QIU Jia-wen, DING Yi-gang, et al. Space Environment Synergistic Effect on Spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012(5): 54-59.
- [20] 沈自才, 闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 229-240.
- SHEN Zi-cai, YAN De-kui. Present Status and Prospects of Space Radiation Environmental Engineering[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 229-240.
- [21] 李丹明, 陈学康. 空间环境效应评价与防护技术研究现状与发展设想[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(3): 224-228.
- LI Dan-ming, CHEN Xue-kang. Evaluation of Space Environment Effects and Related Protection Techniques[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(3): 224-228.
- [22] 李茂顺, 余学峰, 郭旗, 等. CMOS SRAM 总剂量辐射及退火效应研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(8): 1087-1091.
- LI Mao-shun, YU Xue-feng, GUO Qi, et al. Research on the Total Dose Irradiation and Annealing Effects of CMOS SRAM[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(8): 1087-1091.
- [23] 任迪远, 陆妩, 郭旗, 等. CMOS 运算放大器的辐照和退火行为[J]. 半导体学报, 2004, 25(6): 731-734.
- REN Di-yuan, LU Wu, GUO Qi, et al. Radiating and Annealing on CMOS Operation Amplifier[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(6): 731-734.
- [24] 蔡震波. 新型航天器抗辐射加固技术的研究重点[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 173-176.
- CAI Zhen-bo. The Radiation Hardening Techniques for New Generation Spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 173-176.
- [25] 贾向红, 邹鸿, 许峰, 等. 空间电子辐射风险及其防护策略研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(6): 453-457.
- JIA Xiang-hong, ZOU Hong, XU Feng, et al. Research Progress of Space Electrons Radiation Risk and Its Protection Strategy[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(6): 453-457.