

航天器环境试验标准体系研究

许冬彦¹ 沈自才²

(1. 中国航天标准化与产品保证研究院, 北京, 100071; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

摘要: 环境试验是航天器安全和可靠性的重要保障。本文在对航天器研制过程中所经历的环境及效应分析的基础上,从航天器的系统构成和航天器的研制流程角度,对航天器的环境试验进行了分类,进而构建了航天器系统级、分系统/组件级、材料/器件/电子元器件级的环境效应试验标准体系,这对航天器的研制及航天器的在轨安全和高可靠性具有重要意义。

关键词: 航天器; 环境试验; 标准体系

中图分类号: V4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0133-06

Research on Standard System of Spacecraft Environmental Test

XU Dongyan¹, SHEN Zicai²

(1. China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance, Beijing, 100071, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing, 100094, China)

Abstract: Environmental testing is important for security and reliability of spacecraft. Based on the analysis of the environment and effects experienced in the process of spacecraft development and mission, the environmental testing for spacecraft is classified from the perspective of spacecraft structure and development process, and then the standard systems for environmental tests of spacecraft, subsystems or units, and materials or device or components are constructed. All these are essential for the development, on-orbit safety and high reliability of spacecraft.

Key words: spacecraft; environment test method; standard system

在航天器研制和运行过程中,航天器将遭受一系列地面环境、发射环境、在轨环境及返回环境的考验。既有自然空间环境,也有设备自身的环境;既有天然环境,也有人工环境。尤其是新型探测器、新的探测任务、新的运载平台等的研制和开发,使得我国航天任务将面临着新的挑战。因此,在航天器研制过程中,开展相关环境试验,是提高航天器研制的可靠性,提高其在轨安全性和健壮性的重要依据。

目前,国内外均非常重视航天器相关的环境试验方法及体系建设。国际上,国际标准化组织(International organization for standardization, ISO)正

在持续加强航天器相关的环境试验标准体系建设^[1-4],美国也从美国国家航空航天局(National aeronautics and space administration, NASA)的相关规范^[5-6]、美国材料与试验协会(American society for testing materials, ASTM)系列标准^[7]以及美国军用规范(Military specification (USA), MIL)的军标^[8]建设来提升其航天器的研制能力,欧洲通过欧洲航空标准化协作组织(European cooperation for space standardization, ECSS)^[9]来系统完善航天器的环境试验标准体系,用于支持和支撑航天器的研制工作。我国经过多年的发展,建立了一系列企业级和航天行业级的标准体系^[10],极大支撑了我国航

收稿日期: 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

通信作者: 许冬彦,女,高级工程师, E-mail: xudy@vip.sina.com。

引用格式: 许冬彦, 沈自才. 航天器环境试验标准体系研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 133-138. XU Dongyan, SHEN Zicai. Research on Standard System of Spacecraft Environmental Test[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 133-138.

天器的研制任务。但随着军民融合的发展和民用航天企业的涌起,缺乏国家顶层层面的航天器环境试验标准体系。

本文在对航天器所面临的环境分析基础上,从航天器的试验类型分类入手,分别从系统级、分系统/组件级、材料/器件/元器件级 3 个层面,对航天器的环境试验体系进行研究,并提出了相应的标准体系,为我国的国家级航天器环境试验体系建设提供支持。

1 航天器环境

航天器环境是指航天器在制造、发射、在轨飞行以及返回再入过程中所遇到的环境,可以分别称为地面环境、发射环境、在轨环境以及返回再入环境^[11-13]。在本文中,暂不考虑有人参与的环境。

1.1 地面环境

主要包括制造、运输和储存过程中遇到的温度、湿度、大气、生物、运输、试验等环境;对火箭发动机来说,包括液体燃料腐蚀环境;对临近海边的航天器则还包括海风及盐雾环境,如未来海南航天发射场,需要考虑盐雾环境可能对航天器产生的影响。在本文中,暂不考虑盐雾及燃料腐蚀环境对航天器的影响。

1.2 发射环境

主要包括航天器发射、级间分离、抛去整流罩、变轨等过程中产生的振动、噪声、冲击、加速度等力

学环境以及随着航天器升空高度的增加而产生的低真空环境等。

1.3 在轨环境

主要是指航天器在轨运行过程中所遇到的自然环境和人工环境,包括高真空环境、冷黑环境、太阳电磁辐射、带电粒子辐射、中性大气、空间碎片与微流星体、等离子体、微振动、微重力、人工辐射(核爆炸辐射和激光辐射等)。

1.4 返回再入环境

主要是指航天器在返回再入过程中的调姿、制动、再入、着陆等遇到的气动力加热与力学环境,如高温冲击、剧烈振动与撞击等。

在轨环境是最复杂的环境,包括太阳电磁辐射、带电粒子辐射、原子氧、污染、轨道碎片(Orbital debris, OD)与微流星体(Micrometeoroid, MM)等。在深空轨道,则还存在一些特殊的环境与效应,如火星的尘与尘暴、月球的月尘、金星的极端高压等。低地(球)轨道/近地(球)轨道(Low earth orbit, LEO)、中地球轨道(Middle earth orbit, MEO)、地球同步轨道(或称对地静止轨道)(Geostationary Orbit, GEO)、月球、火星等典型轨道需要考虑的空间环境要素见表 1^[10]。

不同的环境可对航天器产生真空效应、温度效应、力学效应、磁效应、单粒子效应、电离损伤总剂量效应(简称总剂量效应)、位移损伤总剂量效应(简称位移损伤效应)、表面充放电效应、内带电效应、侵蚀效应、撞击效应等。

表 1 典型空间轨道环境要素一览表

Tab. 1 Space environment components for typical orbits and regions of space

环境	LEO/极轨道	MEO 轨道	GEO/ GSO 轨道	行星际 轨道	月球轨道	火星轨道	金星轨道	水星 轨道	木星 轨道
真空	✓	✓	✓	✓	✓				✓
紫外	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
中性大气	✓					火星大气	金星大气	水星 大气	
GCR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SCR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ERB	p	e+p	e						e+p
太阳风				✓	✓	✓			
MM/OD	✓	MM	MM	MM	MM	MM		MM	MM
热磁层等 离子体		✓	✓						✓
热/热循环	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
其他	极区辐射、电离层 等离子体			地磁层等离子体、中子、月 尘、月表二次粒子		火星表面 二次中子 火星尘暴	极端高压、极 端高温		木星 卫星

2 航天器及分类

目前,人类空间活动的范围主要在太阳系,按照轨道分类可以分为临近空间飞行器、LEO 航天器、MEO 航天器、GEO 航天器以及深空探测器(如月球探测器、火星探测器、土星探测器等)。

按是否有人参与,航天器分为无人航天器和载人航天器。无人航天器可以分为人造地球卫星、无人飞船和空间探测器,其中人造地球卫星又可以分为科学实验卫星、技术试验卫星、应用卫星;载人航天器则可以分为空间站、载人飞船和航天飞机。

航天器的功能和用途不同,其组成也不一样。一般来讲,航天器可由如下分系统组成:结构、机构、热控、能源、姿/轨控、有效载荷、天线、回收、其他(如星务等)。

3 航天器环境试验分类

航天器环境试验可以从航天器研制流程和航天器功能系统性等来进行分类。从航天器研制流程,可以分为研制试验、鉴定试验、验收试验;根据需要,还有原型飞行试验和/或发射前鉴定试验。从航天器的功能系统性可分为系统级试验、分系统/组件试验、材料/器件/元器件试验。不同的标准规范对试验的类别有不同的定义^[1,14]。本文只对试验所要做的工作和要注意的要求给予阐述。

3.1 研制试验

研制试验(Development test, DT)支持设计可行性并协助设计的开发。研制试验对于验证新设计概念以及将经过验证的概念和技术应用于新配置是必要的。研制试验用于确认结构和性能余量、可制造性、试验简化、可维护性、可靠性、寿命预测和与安全性的兼容性。因此,研制试验的要求取决于所用设计的成熟度和特定项目的操作要求。

3.2 鉴定试验

鉴定试验(Qualification test, QT)表明该项目符合设计要求并有合适的设计余量。鉴定试验水平应超过最大预测水平的安全系数或合格范围;除非另有规定,鉴定试验周期应长于最大环境周期,并具有适当的鉴定范围。此外,鉴定试验应确认可重新用于验收试验的方法、程序、设施条件和地面支持试验设备。

3.3 验收试验

验收试验(Acceptance test, AT)应证明该项目没有工艺缺陷和集成错误,并且其功能和性能在可行的范围内可以满足规定的任务要求。验收试验通过测试功能和性能参数来检测在制造和组装过程中引入的潜在材料或工艺缺陷。应通过顺序试

验来检测这些参数,以确定可能损害任务目标的功能和性能下降,并建立基线以确保数据历史中未发现降级。

3.4 原型飞行试验

原型飞行试验(Proto-flight test, PFT)方法比通过试验专用非飞行验证项目证明设计余量的方法具有更高的风险。此外,有限生产、紧凑时间表和预算的限制等有时候不允许使用专用的非飞行验证项目。原则上,原型飞行方法可以应用于空间系统的每个分解级别。

原型飞行试验应符合硬件的设计和制造方法,以便接受飞行操作。设计和制造方法的验证是通过施加比地面和轨道运行期间预期的环境更严重的环境水平来实现的。通过限制暴露时间来防止硬件疲劳,从而不会耗费硬件的大部分使用寿命。这些试验还可以检测潜在材料和制造缺陷,并在类似于任务环境的条件下提供每个试验项目的性能经验。

3.5 发射前鉴定试验

如果需要,航天器的发射前鉴定试验应在发射场进行。这些试验表明,在发射场运输和处理不会导致航天器参数变化,并验证航天器和运载火箭接口以及跟踪和控制系统的兼容性试验是否在发射现场作业的一部分内保持在规定的限度范围内。试验应在实际范围内运行航天器,以确保满足所有任务要求。

3.6 系统级环境试验

系统级试验通常是对整个航天器所开展的试验。以验证其真空、热、振动、磁等环境下的性能或自身功能。

3.7 分系统/组件环境试验

分系统/组件试验通常是针对某一个分系统如遥测分系统,或某一个组件如某种空间环境探测装置或设备所开展的环境试验。在某种程度上,分系统/组件试验的类型和系统级试验相似。

3.8 材料/器件/元器件环境试验

材料/器件/元器件环境试验是从航天器研制过程中,尤其是分系统或组件研制过程中,从材料、器件和元器件的选用角度所开展的环境试验。

4 航天器环境试验标准体系

从航天器研制全流程来分析,涉及到环境的试验包括电磁兼容性(Electromagnetic compatibility, EMC)试验、磁试验、静载试验、加速试验、正弦振动试验、随机振动试验、声试验、冲击试验、热平衡试验、热真空试验、热循环试验、压力试验、泄露试

验、老化试验以及材料/器件/元器件级对应的特殊环境试验。

本文从系统级、分系统/组件级和材料/器件/元器件级 3 个维度,并结合航天器研制流程,来开展航天器环境试验标准体系构建研究。

4.1 系统级环境试验标准体系

航天器系统级环境相关的试验主要是针对研制、发射、在轨及返回过程中相关的真空、热、力、磁相关的试验,压力试验和泄露试验也是由于内外环境差所引起,也归为环境试验体系中。见图 1。

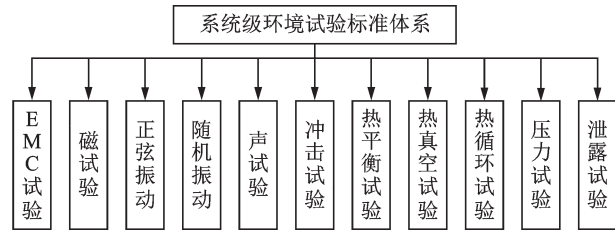


图 1 航天器系统级环境试验标准体系

Fig.1 Standards system for spacecraft system test items

在图 1 中,在鉴定试验(QT)、验收试验(AT)和原型飞行试验(PFT)3 类试验项目中,并不是所有的试验均需要开展,有些试验项目为选做项目。在 AT 中, EMC 试验、磁试验、冲击试验为选做项目,在 3 类试验项目中,磁试验、热循环试验均是根

据实际情况选做。

4.2 分系统/组件级试验标准体系

分系统/组件级试验主要是针对电子分系统、天线分系统、电源分系统(含太阳能电池阵和蓄电池)、推进分系统、光学分系统、结构分系统、压力容器、各类阀等。其需要开展的试验见图 2。

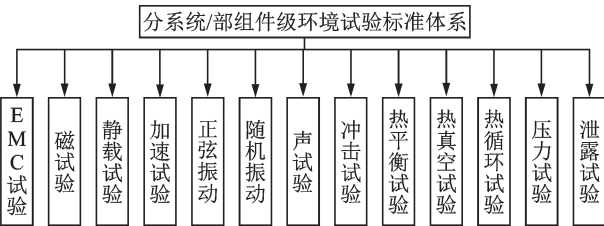


图 2 航天器分系统/组件级环境试验标准体系

Fig.2 Standards system for spacecraft subsystem/uit test items

在图 2 中,加速试验、热平衡试验、热循环试验是根据情况选做的试验项目。EMC 试验、磁试验、静载试验、声试验、冲击试验、压力试验和泄露试验是根据分系统/组件的具体种类来确定是必做还是选做。以 QT 为例:对电子分系统, EMC 试验是必做项目。随机振动试验、热真空试验、声试验(电子系统除外),对所有分系统来说均为必做试验项目。航天器需做的 QT 环境试验项目见表 2^[1]。

表 2 分系统/组件鉴定级环境试验项目

Tab.2 Subsystem/unit QT environmental test items

试验	电子	天线	机械	太阳能电池阵	电池	阀	动力	压力容器	推进器	热控	光学	结构
EMC	R	O	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—
磁场	O	—	O	—	O	R	O	O	O	—	O	—
静载	O	O	O	O	O	O	O	O	O	—	O	R
加速	O	O	O	O	O	—	—	O	—	—	O	—
正弦振动	O	O	R	O	R	O	O	R	R	O	O	R
随机振动	R	R ^a	R	R ^a	R	R	R	R	R	R	R ^a	R ^a
声	O	R ^a	—	R ^a	—	—	—	—	R	R	R ^a	R ^a
冲击	R	O	O	O	O	O	O	—	O	O	O	R
热平衡	O	O	O	O	O	—	O	—	—	O	O	—
热真空	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	—
热循环	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
压力	—	—	O	—	R	R	R	R	R	—	—	—
泄漏	O	—	O	—	R	R	R	R	O	R	—	—

注:R:必要; O:可选; — :不必需;a:建议使用随机振动或声试验,优选较合适的试验,另一试验可酌情而定。

4.3 材料/器件/元器件级试验标准体系

高性能航天材料和元器件是航天器在轨安全的重要保证,而航天材料和元器件的在轨性能是开展航天器设计的重要保证。因此,系统建立航天材料/器件/元器件级的环境效应地面模拟试验,开展航天材料/器件/元器件环境效应模拟试验评价,可为航天器研制与设计提供重要

支撑。

基于空间环境的复杂性,应该针对单一空间环境及多种因素环境系统建立相关标准体系^[10,15-17],如图 3 所示。

其中,单粒子效应比较复杂,从其对器件的破坏程度及是否可以恢复,可以分为破坏性效应和非破坏性效应。见图 4。

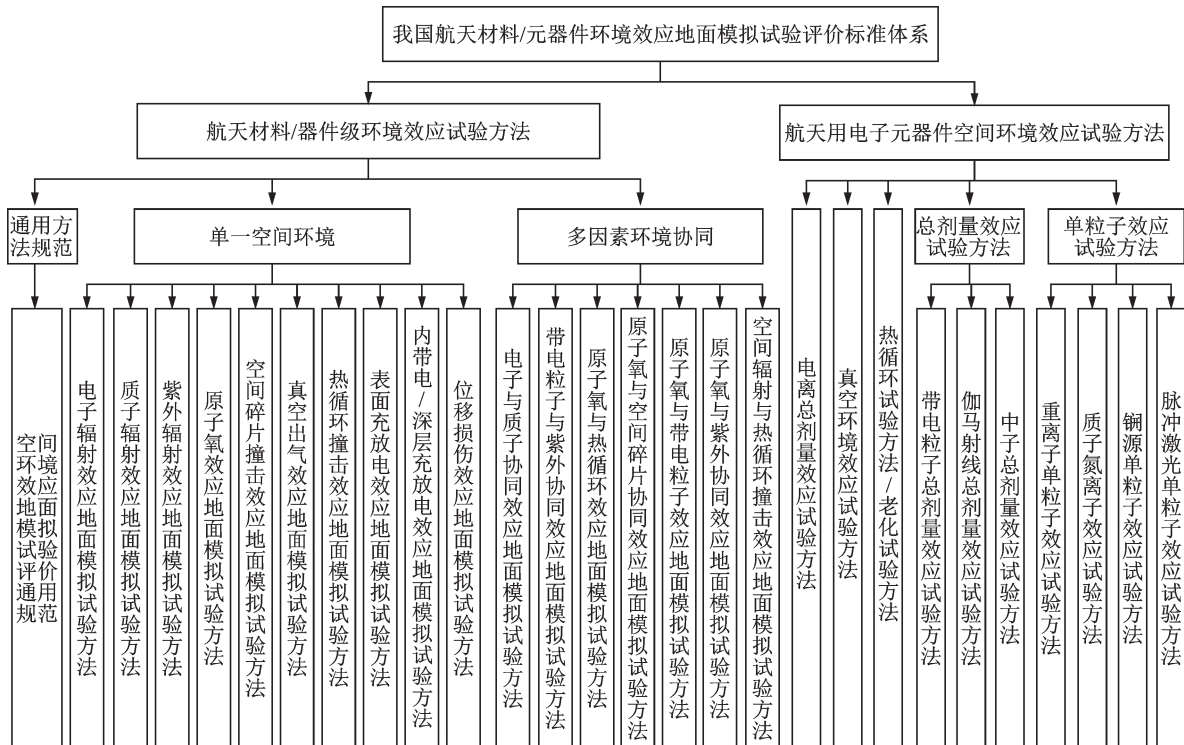


图3 我国航天材料/器件/元器件地面模拟试验评价标准体系构建

Fig.3 Standard system of ground simulation testing for spacecraft material/device/component

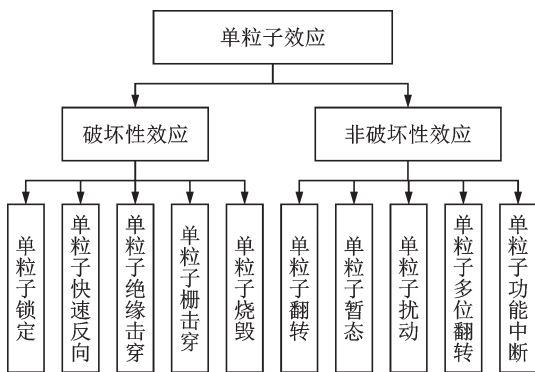


图4 单粒子效应分类

Fig.4 Catalogue of single event effects

5 结 论

环境试验是航天器在轨安全和可靠性的重要保障。尤其是随着航天科技的发展和空间基础设施建设的不断推进,新的型号、新的任务、新的环境、新的材料/器件/元器件等要求进一步加强航天器环境效应试验体系建设。由于航天器是由不同的复杂分系统组成,是多学科、多系统、多材料的系统工程。因此,需要从系统级、分系统/组件级、材料/器件/元器件级分别考虑,从研制试验、鉴定试验、验收试验、飞行试验等不同维度统筹兼顾,系统梳理和建立航天器环境试验标准体系,从而为航天器设计、寿命预示、在轨安全和可靠性提供技术支持。

参考文献:

[1] International Organization for Standardization. ISO 15864—2004, Space systems-general test methods for space craft, subsystems and units[S]. 2004.

[2] International Organization for Standardization. ISO/DIS 15856—2010, Space systems-space environment-simulation guidelines for radiation exposure of non-metallic materials[S]. 2010.

[3] International Organization for Standardization. ISO 17851—2016, Space systems-space environment simulation for material tests-general principles and criteria[S]. 2016.

[4] International Organization for Standardization. ISO 16378—2013, Space systems-measurements of thermo-optical properties of thermal control materials [S].2013.

[5] PURIVS C K, GARRETT H B, WHITTLESEY A C, et al. Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects[R]. NASA TP-2361,1984.

[6] National Aeronautics and Space Administration. Mitigating in-space charging effects—A guideline[R]. NASA-HDBK-4002A, 2011.

[7] ASTM International. Standard practice for combined, simulated space environ-ment testing of thermal control materials with electromagnetic and particulate radiation[R]. ASTM E512-94, 1994.

- [8] Department of Defense, United States of America. MIL-STD-883E, Test methods[S]. 1996.
- [9] European Cooperation for Space Standardization. ECSS-Q-ST-70-06C, Space product assurance-particle and UV radiation testing for space materials [S]. 2008.
- [10] 沈自才,刘宇明,田东波,等. 航天材料空间环境效应地面模拟试验标准体系[J]. 航空学报, 2018(增刊1): 722190-722205.
SHEN Zicai, LIU Yuming, TIAN Dongbo, et al. Standard system of ground simulation testing for space materials [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018(S1): 722190-722205.
- [11] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京:宇航出版社, 2013: 1-3.
- [12] 沈自才,欧阳晓平,高鸿,等. 航天材料工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2016: 119-122.
- [13] 吴永亮,张小达,朱凤梧,等. 航天器设计中的环境要素与效应研究[J]. 航天器工程, 2017,26(5): 82-89.
WU Yongliang, ZHANG Xiaoda, ZHU Fengwu, et al. Analysis of environmental factors and their effects in spacecraft design [J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(5): 82-89.
- [14] 国防科学技术工业委员会. GJB 1027A—2005,运载器、上面级和航天器试验要求[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,2005: 1-55.
- [15] 冯伟泉,丁义刚,闫德葵,等. 空间电子、质子和紫外综合辐照模拟试验研究[J]. 航天器环境工程,2005, 22(2): 69-72.
FENG Weiquan, DING Yigang, YAN Dekui, et al. Study on space electron, proton and ultraviolet combined irradiation simulation test [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(2): 69-72.
- [16] 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, 32(5): 54-60.
SHEN Zicai, QIU Jiawen, DING Yigang, et al. Space environment synergistic effect on spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012, 32(5): 54-60.
- [17] 邱家稳,沈自才,肖林. 航天器空间环境协和效应研究[J]. 航天器工程. 2013,22(1): 15-20.
QIU Jiawen, SHEN Zicai, XIAO Lin. Study on synergistic effect of space environments on spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(1): 15-20.

(编辑:夏道家)