

# 空间环境监测与试验体系初步设想

于登云<sup>1</sup>, 向树红<sup>2</sup>, 于丹<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着我国空间技术的快速发展, 空间环境与效应问题已经受到越来越多的关注。文章在国内外空间环境监测与试验研究发展现状的基础上, 指出我国在该领域存在的问题。对于我国空间环境监测与试验体系的发展, 提出了制定并完善相应规划、建设空间环境观测体系以及加强相关技术的研究等有益的建议。

**关键词:** 空间环境; 环境观测; 环境试验

中国分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2008)03-0205-04

## 1 引言

我国空间技术已进入快速发展时期, 航天器已由实验型逐步转变为业务服务型, 国民经济和国防建设对空间技术的依赖程度日益提高, 用户对航天器在轨可靠性及工作寿命的期望值也在提高。然而随着我国新一代航天器技术的不断发展, 卫星功能日益增强, 表面敏感部件和活动部件增多, 涉及的空间环境更加严酷复杂, 空间环境及效应对卫星造成的损害已日渐突出<sup>[1]</sup>。据美国统计, 卫星在轨异常事件 70%与空间环境影响有关<sup>[2]</sup>, 其中直接由空间环境诱发的故障占 40%左右。因此空间环境及其效应研究已成为影响航天器长寿命、高可靠的重要因素。

## 2 空间环境对航天器的影响

### 2.1 空间环境的分类

总体来说, 空间环境归纳起来分为 10 类。

(1) 热真空环境: 真空, 冷黑, 太阳辐射, 地球反射, 地气辐射;

(2) 力学环境: 振动, 噪声, 冲击, 加速度;

(3) 等离子体层: 电离层等离子体, 极光等离子体, 磁层等离子体;

(4) 微流星/空间碎片: M/OD 通量密度、尺寸、

质量、速度、方向;

(5) 太阳环境: 太阳物理, 磁暴, 太阳/地磁指数, 太阳常数, 太阳光谱;

(6) 电离辐射: 地球辐射带, 银河宇宙射线, 太阳宇宙射线;

(7) 地磁场: 自然磁场;

(8) 引力场: 自然重力场;

(9) 中高度大气层: 大气密度, 气流;

(10) 中性热层: 密度、温度、成分(原子氧)。

空间环境对航天器的影响主要有 8 个方面。

(1) 动力学环境: 航天器材料、元器件、部组件、系统结构的变形、断裂、损坏;

(2) 热环境: 热设计失常, 材料、元器件、部组件、系统结构的热疲劳变形、断裂、损坏, 性能退化, 寿命缩短;

(3) 辐射环境: 材料、元器件、敏感表面总剂量效应, 微电子器件单粒子效应;

(4) 等离子体环境: 表面带电效应, 内带电效应, 高压太阳阵电离层带电及电流泄漏效应;

(5) 原子氧环境: 敏感表面的剥蚀、污染、辉光效应;

(6) 微流星体/空间碎片: 撞击损伤效应;

(7) 空间磁环境: 影响姿态控制;

收稿日期: 2008-02-26; 修回日期: 2008-04-29

**作者简介:** 于登云(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国空间技术研究院副院长, 主要从事航天器总体和动力学应用理论研究、分析软件开发和工程分析设计以及相关组织管理等工作。曾获国防科技进步二等奖3项; 第七届“中国青年科技奖”; 2008年被国家探月工程领导小组授予“嫦娥一号有功人员”证书。联系电话: (010) 68747367。向树红(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 国防科工委环境与观测专家组成员, 中国航天科技集团公司跨世纪学术技术带头人。长期从事航天器环境工程与可靠性技术及航天器动力学环境工程的研究工作。曾获国防科工委科技进步二等奖等多项奖励。联系电话: (010) 68746353。

(8) 微重力环境：影响姿态控制。

## 2.2 空间环境对航天器的影响程度

综上所述，空间环境对卫星有着极其重要的影响。其中重力场、高层大气、太阳辐射影响卫星的轨道与寿命；地球磁场、高层大气、太阳辐射、重力梯度影响卫星的姿态；地球辐射带、太阳宇宙线、银河宇宙线、太阳辐射对卫星材料、微电子元件与敏感部件等造成辐射损伤；空间碎片、微流星体对卫星的光学镜头、机械结构造成损伤；原子氧等使卫星的材料与涂层形成化学损伤；磁层等离子体、太阳电磁辐射影响卫星表面电位，产生充放电损伤；地球电离层影响卫星的通信和测控；太阳电磁辐射、冷黑环境、高层大气的真空环境影响卫星的热控状态。各种空间环境对航天器在轨寿命与可靠性有不同程度的影响，按严重程度（以影响因子表示）分别将其列于表1中。表2列出不同的轨道环境因素对卫星性能的影响，表中的数值是影响因子。

表1 不同级别影响因子的意义

Table 1 Meanings of different levels of influencing factor

| 影响因子 | 含义、内容               |
|------|---------------------|
| 10   | 导致飞行任务失效            |
| 9    | 可能会导致飞行任务失效         |
| 8    | 缩短飞行任务的有效时间         |
| 7    | 可能会缩短飞行任务的有效时间      |
| 6    | 降低飞行任务的有效性          |
| 5    | 可能会降低飞行任务的有效性       |
| 4    | 需改变设计               |
| 3    | 可能需要改变设计            |
| 2    | 给航天器的正常运行带来一定的影响    |
| 1    | 可能会给航天器的正常运行带来一定的影响 |
| 0    | 可忽略                 |

表2 不同轨道高度上空间环境的影响程度

Table 2 Level of space environment effects in different orbits

| 环境 \ 轨道      | LEO | MEO | GEO | 国际空间站 (500 km) |
|--------------|-----|-----|-----|----------------|
| 日照           | 4   | 4   | 4   | 4              |
| 重力场          | 3   | 3   | 0   | 3              |
| 磁场           | 3   | 3   | 0   | 3              |
| Van allen 辐射 | 0~5 | 5~8 | 1   | 2~5            |
| 太阳耀斑质子       | 0~4 | 3   | 5   | 4              |
| 银河系宇宙射线      | 0~4 | 3   | 5   | 4              |
| 空间碎片         | 7   | 0~3 | 3   | 7              |
| 微陨石          | 3   | 3   | 3   | 3              |
| 电离层          | 3   | 1   | 0   | 3              |
| 热等离子体        | 0~3 | 0   | 5   | 0              |
| 中性气体         | 7~9 | 0~3 | 0   | 7~9            |

## 3 国外空间环境监测与试验研究现状

### 3.1 国外空间环境监测与试验研究的进展

20世纪60年代，空间活动刚刚起步，人类对空间环境的严酷性认识不足，对空间特殊环境及其效应不了解，航天器在轨故障率很高。随着空间活动的不断深入，人们逐步认识到空间环境是导致航天器在轨故障、早期失效的重要原因，并斥巨资建立了许多大型空间模拟器和动力学环境设备，同时对电子、质子、原子氧、紫外、电离层等离子体、微流星和空间碎片、污染等特殊环境及其效应开展了广泛的研究，以满足不同轨道航天器长寿命、高可靠的需求。随着空间环境及其效应研究日益受到重视，航天器在轨故障显著减少。

美国NASA设有12个专门的实验室和研究中心，承担空间环境效应、空间环境试验技术与空间环境防护技术的研究。在洛克希德·马丁公司、通用电器公司（GE）、波音公司、麦克唐纳-道格拉斯公司（MDC）等工业部门及科研院所也建立了大批规模不同的空间环境试验设备。欧空局建立了ESTEC、INTERSPACE、IABG等大型空间环境试验中心，加拿大、英国等也建立了自己的环境试验研究机构。前苏联为满足其航天大国空间活动的需要，在莫斯科、萨玛拉、新西伯利亚及乌克兰的哈尔科夫建立了4个研究基地，从事空间环境效应、试验技术、加速试验理论、寿命预示技术、防护技术研究。日本在筑波宇宙中心建立了空间环境效应模拟与试验研究基地。印度也建立了自己的空间环境试验中心。到目前为止，世界各航天国家已在空间环境模拟技术、地面试验评价方法、飞行实验技术、环境效应机理、寿命预示与可靠性分析、空间环境效应防护技术等方面投入巨大的财力、人力，开展了广泛深入的实验研究工作，取得了大量研究成果，在促进航天器长寿命、高可靠技术发展方面发挥了非常重要的作用。NASA的“长期暴露装置”回收后，进一步加深了对严酷的空间环境及其效应的认识。

### 3.2 NASA的空间环境及其效应（SEE）计划

1994年，NASA建立了空间环境及其效应（SEE）计划，研究减缓空间环境效应对航天器有

害影响的工程技术<sup>[3,4]</sup>。该计划代表了国际空间环境效应及试验研究的最高水平和发展趋势,引领着世界空间环境效应及试验研究的方向。SEE 计划分近期(1994-2002年)、中期(2003-2009年)及远期(2010-2020年)三个阶段进行。计划提供了一个非常综合的、集中的研究目标:理解轨道环境;研究最好的飞行实验和地面试验技术;不断完善预示轨道环境及其效应的模型;最终确保这些研究成果应用于航天器设计中。SEE 划分了7个技术工作组:电离辐射、等离子体及场、微流星及轨道碎片、电磁效应、中性外部污染、材料及工艺和热层、热环境及太阳活动。技术工作组提供了空间环境不同学科的专业技术和资源。

最初 SEE 计划仅局限于地球轨道的应用。2004年1月,美国总统布什为 NASA 提出了一个新的目标,其中包括重返月球和进军火星的计划。为了响应这个倡议,SEE 计划进行了修改和重新定位,从原来的宇航技术产业扩展到介入 NASA 深空探测系统的人和机器人技术部分。SEE 计划为航天器设计人员提供了消除或减轻空间环境对航天器有害影响的工程设计产品以及所需的包括低地球轨道、地球同步轨道和星际探测的环境信息和工程设计工具。

2004年得到经费支持的6个研究领域是:

- (1) Apollo 年代材料数据的挖掘;
- (2) 月球尘埃污染问题;
- (3) 等离子体问题;
- (4) 月球/火星电离辐射问题;
- (5) 火星表面辐射问题;
- (6) 高压电源系统表面带电。

从美国 SEE 计划看出,美国将空间环境效应及试验技术发展作为其空间技术发展的核心竞争力,将空间环境效应及试验研究看作保证航天器可靠性的关键技术。SEE 计划的特点是系统集成和工程化应用,它提供的工程设计产品包括模型、数据库、设计指南和工程标准。

#### 4 我国空间环境监测与试验研究现状

我国空间环境监测与试验技术研究历经30多年,按照型号牵引、专业推动的原则,已取得了一

系列研究成果,并完成研究成果向工程应用的转化。目前,基本具备了满足我国航天器环境试验需要的真空热试验和动力学试验设备,包括代表我国在航天器环境试验技术研究领域最新水平的 KM6 空间模拟器、400 kN 双振台、15 m 磁试验设备、2163 m<sup>3</sup> 高声强混响室等,并开展了多方面的试验研究工作。这些工作对保证我国航天器的成功发射和在轨正常运行起到了非常重要的作用。同时在表面带电,空间磁环境,电子、质子、紫外综合环境,原子氧环境,等离子体,污染检测及控制,寿命摩擦与微焊接等微弱环境效应及试验技术研究方面也做了大量工作,并获得一定研究成果,部分成果已应用于型号工程。

我国利用“实践”系列科学卫星、“神舟”飞船和应用卫星搭载进行空间环境的探测活动,内容包括太阳活动、地球静止轨道带电粒子、太阳同步轨道带电粒子、高层大气、低地球轨道的表面电位、辐射剂量、单粒子效应等,对空间环境有了初步的了解,一些探测结果对航天器的故障分析等工作起到了较好作用。

但是,与国外相比,我国的航天器环境试验与效应研究工作还有一定差距<sup>[5]</sup>。

(1) 航天器环境试验与观测技术研究主要靠型号牵引的发展模式,专业推动发展重视不够,缺乏系统全面的规划。

(2) 空间环境效应在轨飞行实验监测技术比较落后,特别是用于在轨运行的空间环境及其效应监测的专用卫星研制工作几乎为空白。

(3) 空间环境试验新技术、新方法研究不够,基础储备少。主要体现在:

- a. 对试验技术、测试分析技术的研究不够重视;
- b. 对特殊环境及其效应研究的投入少,研究工作不充分,迟迟不能形成工程化试验能力;
- c. 对材料、元器件、部组件试验重视不够,试验技术储备不足。

(4) 对试验规范、标准体系建设的研究不够,数据资源共享程度低。

## 5 发展我国空间环境试验与观测体系的初步设想

### 5.1 技术体系框架

与国外类似,我国空间环境试验技术体系及管理體系也是按照环境专业开展工作,可以得出如图1所示的试验体系。

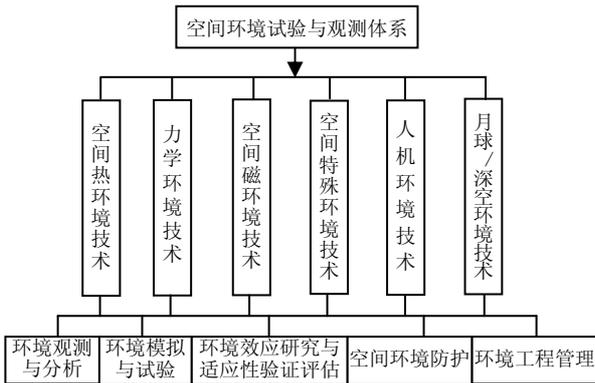


图1 空间环境试验与观测体系框图

Fig.1 Block diagram of space environment monitoring and test system

### 5.2 几点设想

(1) 制定我国空间环境工程中长期发展规划,完善我国空间环境与观测总体规划;加强重大项目的协调,提高科技资源及国家经费的利用效率。

(2) 建设由天基探测器、地面数据接收系统、数据处理中心和各用户终端组成空间环境观测体系。发展空间环境及其效应监测专用卫星,涉及的轨道包括卫星常用的 GEO 轨道、SSO 轨道。提高搭载试验研究力度,对应用卫星设计搭载试验任务,有目的地开展空间环境的飞行实验验证研究,实现空间环境及其效应监测载荷系列化、标准化、集成化。

(3) 建立国家空间环境及效应地面试验评估、验证与保障研究中心,开展空间环境地面模拟试验、地面模拟试验规范、空间环境仿真软件、空间环境保护技术等方面的研究。

(4) 加强材料特性的专项实验研究,建立工程材料数据应用指南。

(5) 建立空间环境试验与观测的标准体系。

## 6 结束语

目前,我国空间技术进入了快速发展的时期,航天器型号已初步形成系列化、型谱化、批量化,新一代航天器工作寿命剖面已涉及到日地空间大部分主要环境因素。空间环境试验单项技术研究已不能满足我国航天器新技术发展及长寿命、高可靠技术发展的需求。全面规划我国空间环境发展战略,建设并完善我国空间环境监测与试验体系,这对满足我国“十一五”及2020年前空间技术的发展需求具有十分重要的意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 金恂叔. 航天器在轨故障与空间环境的关系[J]. 航天器环境工程, 2004, 21(3): 1-6
- [2] 黄本诚, 等. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 11-13
- [3] 闫德葵. NASA空间环境及效应SEE计划进展[J]. 航天器环境工程, 2002, 19(4): 57-61
- [4] Pearson S, et al. NASA's space environments & effects(SEE) program: technology for the new millennium, AIAA 2000-0240[R]
- [5] 向树红, 于丹, 孙国江, 等. 环境工程在卫星研制生产中的应用[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(6): 311-314