

# 影响 GEO 卫星长寿命高可靠的空间环境因素 及其评估、验证和保障技术研究

庞贺伟<sup>1</sup>, 冯伟泉<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:** 文章叙述了空间环境与卫星长寿命高可靠的关系, 着重分析了影响 GEO 卫星长寿命高可靠的各种空间环境效应, 如: 地磁亚暴电子造成的卫星表面带电及诱导的二次放电、辐射带高能电子引起卫星内带电、太阳耀斑质子和银河宇宙射线造成的单粒子效应、空间带电粒子和太阳电磁辐照造成的辐照总剂量效应以及空间环境下敏感表面的污染效应等。文章最后给出 GEO 卫星空间环境效应的评估、验证和保障技术研究的必要性及其主要研究方向。

**关键词:** 空间特殊环境; GEO 卫星; 长寿命; 带电; 总剂量; 单粒子效应; 污染

**中图分类号:** V524.3; V520.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2006)02-0063-04

## 1 引言

地球同步轨道(以下简称 GEO)是长寿命卫星主要运行轨道。GEO 卫星主要有通信卫星、导航卫星、遥感卫星等, 它们在国民经济建设中有广泛应用, 卫星的寿命越长其经济价值和政治意义就越大。目前国外航天先进国家的 GEO 卫星平台一般达到在轨可靠工作 15 年以上。

所谓卫星可靠性是指卫星在工作环境条件下在规定时间内完成规定功能的概率。卫星长寿命高可靠是一项艰巨的系统工程, 它与空间环境, 如: 辐射带、太阳耀斑质子、银河宇宙射线、地磁亚暴、真空和低温等, 密切相关, 产生的空间环境效应主要有:

- (1) 地磁亚暴电子造成的卫星表面带电以及诱导的二次放电;
- (2) 辐射带电子引起的卫星内带电;
- (3) 太阳耀斑质子、银河宇宙射线重离子造成的单粒子效应;
- (4) 空间带电粒子和太阳电磁辐射造成的总剂量效应;
- (5) 空间环境下敏感表面的污染效应, 等等。

国内外经验证明: 卫星寿命越长, 其环境故障的几率越高。环境对卫星的损伤分为累积损伤和瞬时损伤。环境损伤会使卫星寿命后期的故障不断升高。美国 1971~1986 年发射的地球同步轨道卫星产生 1 589 次异常事件中, 有 70% 与空间环境有关。长寿命高可靠卫星的设计必须以寿命末期环境退化数据为依据, 没有这些数据或者这些数据不准确, 卫星的长寿命高可靠将无法得到保证。因此准确掌握空间环境对卫星的长期退化影响是卫星长寿命高可靠系统工程的重要技术基础之一, 长寿命卫星的空间环境评估、验证和保障技术研究是非常必要和迫切的。

## 2 影响 GEO 卫星长寿命高可靠的空间环境因素分析

### 2.1 引起卫星表面带电的等离子体环境<sup>[1]</sup>

GEO 卫星表面带电环境问题被认为是 GEO 卫星最严重的环境威胁之一。有了表面导电处理技术后, 该问题虽有所缓解, 但仍没有完全解决, 因为不可能做到卫星所有表面都进行导电处理, 另外空间环境长期作用下原有导电性能会发生退

收稿日期: 2006-03-01; 修回日期: 2006-03-17

作者简介: 庞贺伟(1961-), 男, 硕士学位, 研究员, 中国空间技术研究院院长助理。联系电话: (010) 68746052。  
冯伟泉(1956-), 男, 研究员, 主要从事空间特殊环境模拟试验技术研究。联系电话: (010) 68746635。

化。表面充电现象发生于地磁暴期间,在地方时子夜到黎明段尤为严重,但其他时段也有发生。卫星不同电位区域之间的不等量带引起的放电则可能损坏表面材料,并形成电磁干扰损坏星上的电子设备。为此,应尽量采用卫星表面导电处理,如:多层隔热材料、二次表面镜上加透明导电层。但是太阳帆板的电池表面涂透明导电层和接地技术没有解决,而且太阳帆板占据卫星面积的很大比例,因此 GEO 卫星表面带电问题目前仍然存在。随着卫星功率的进一步加大,要求帆板母线电压大于 100 V,随之产生新的表面充放电问题,表面充放电(一次放电)引发电池片二次放电。二次放电是以帆板太阳电池能量为放电能源,能量大、持续时间长,严重时导致部分太阳电池短路烧毁,类似故障国外已经出现多次。GEO 卫星表面充电效应是导致卫星异常和故障的重要原因,在空间环境引起的异常和故障中约占 1/3,因此在 GEO 卫星设计时应应对表面带电问题进行充分考虑,并进行试验验证。

## 2.2 引起卫星内带电的辐射带高能电子环境

卫星内带电是指空间高能电子沉积在卫星内部介质上引起的放电,主要是由能量大于 500 keV 的高能电子引起的。GEO 卫星处于地球外辐射带,外辐射带主要是电子,因此 GEO 卫星的内带电环境是比较严酷的。内带电的主要危险是带电区域有可能在敏感器件附近。当入射电荷积累率高于电荷泄漏率时,电荷将在介质内积累,这些电荷产生的电场不断增加,当电场强度超过介质的击穿阈值时,将造成介质体内放电。这种放电直接或间接地耦合到航天器微电子线路中,引起不同程度的软故障或硬故障,严重时甚至会导致航天器完全失败。

## 2.3 引起卫星单粒子效应的太阳耀斑、银河宇宙射线环境<sup>[2]</sup>

单粒子事件是指当高能质子或重离子穿过卫星的防护层,在芯片、存储器中沉积电荷造成的。单粒子事件又分为单粒子翻转、单粒子锁定和单粒子烧毁等。单粒子翻转是一种软错误,会引起中断和伪指令事件发生,而单粒子锁定和单粒子烧毁事件会造成器件烧毁甚至卫星的报废等永久

性损伤。太阳耀斑质子、银河宇宙射线带电粒子是单粒子效应的主要环境因素。太阳耀斑是太阳上一种强烈的能量释放过程,它喷射出大量的高能质子, GEO 卫星属于高轨道卫星,遭遇太阳耀斑高能质子的可能性和强度较大。这些高能粒子事件每次会持续几天,并且以不同的方式影响着 GEO 卫星。太阳高能粒子任何时候都可能出现,但大多数都发生在太阳活动峰年左右。太阳粒子事件期间,卫星遭受到的高能粒子的轰击明显增加,大于 10 MeV 的高能粒子通量可以达到 70 000 质子/(cm<sup>2</sup>·s·ster)。由于击中灵敏区域的粒子增多,单粒子翻转的概率明显增加。银河宇宙线实际上就是从银河发出高能带电粒子,具有较高的电荷数(原子量),并且能量超过 GeV 水平。但是银河宇宙线通量相对很低,因而引起的单粒子翻转率并不高,但对于长寿命卫星,其累积效应不可忽视。单粒子事件是随着现代卫星采用大量高集成度的器件而出现的,因此在卫星设计中必须充分考虑防护措施并得到有效验证。

## 2.4 引起卫星总剂量和位移损伤的空间带电粒子环境和太阳电磁辐射环境<sup>[3]</sup>

地球辐射带、太阳耀斑、银河宇宙射线的带电粒子和太阳电磁辐射穿越或沉积在卫星材料、器件和部组件中会产生电离效应和位移效应,这种损伤表现为材料性能和器件功能随辐照累积而慢慢退化,直至最后完全失效。卫星表面功能材料和太阳电池是直接暴露在空间环境中,由于卫星外露环境最恶劣,而且是综合作用,因此地面模拟难度大。GEO 卫星的粒子辐照环境中低能带电粒子较多,低能带电粒子主要沉积在卫星表面,造成卫星表面功能材料的总剂量损伤和位移损伤十分严重。太阳电磁辐射环境主要指太阳远紫外和近紫外辐射和 X 射线,它们对卫星材料的损伤作用不可忽视。

## 2.5 卫星污染环境<sup>[4]</sup>

卫星入轨后处于高真空环境中,本身会产生大量的挥发物、分子和颗粒,这些物质反过来在卫星上沉积形成污染,另外羽流也会产生污染。由于沉积量随时间加大,对长寿命 GEO 卫星,其敏感表面在寿命后期的污染沉积量

是非常严重的。国外经验证明, 太阳能电池阵输出功率衰减仅考虑空间粒子辐射损伤是不够的, 有污染和没污染作用相差很大。同样的辐照, 不同污染水平其退化完全不同, 光聚合反应下形成分子污染膜会造成了太阳能电池阵输出功率的衰减。GEO 卫星上大量使用的二次表面镜特别易受卫星分子污染, 其太阳吸收率和热反射率因此发生改变。

### 3 空间环境效应的评估、验证和保障技术研究<sup>[5]</sup>

#### 3.1 开展空间环境效应评估的研究

长寿命高可靠卫星的空间环境效应地面模拟试验技术有较大的难度。第一是模拟设备的技术难度特别大, 如: 表面充放电、内部充放电、表面分子污染、总剂量、位移损伤、单粒子等环境及效应, 对模拟试验设备有新的更高的要求。第二是模拟试验方法有较大的难度, 若按过去的模拟试验方法来进行长寿命试验耗时太长, 15 年太阳紫外辐照按照目前紫外加速倍率标准需要连续辐照 3 年之久。为了解决这些问题, 国外各种长寿命评估技术研究应运而生, 如退化机理研究、退化规律研究、退化模型研究、飞行试验研究、环境效应专家系统研究等, 最终目的是用较短时间较准确地模拟评价长期环境效应, 这些评估技术大大丰富了人类对空间环境效应的认识能力, 为卫星长寿命高可靠发挥重要作用。

#### 3.2 建立相应的地面验证试验方法

飞行试验是环境效应最准确的验证手段, 但它并不是最经济、最方便的方法。对长寿命高可靠卫星, 地面模拟试验才是最可行、最实用的验证试验方法。卫星长寿命高可靠性必须要建立相应的地面验证试验方法。航天产品环境试验一般分为 3 类: 研制试验、鉴定试验和验收试验。为了确定某新产品环境效应能否满足型号要求, 需要进行模拟环境的鉴定试验。鉴定试验通过后, 表明该技术能够符合卫星相关技术要求。但在型号生产过程中, 还需要通过验收试验解决质量一致性问题, 确保产品质量与鉴定时一致。长寿命高可靠性是卫星最重要的质量指标, 我们需要研究建立一系列有关材料、器件、部组件等在空间

环境长期作用下退化特性的鉴定试验和验收试验规范, 从而保障型号的长寿命高可靠质量。

#### 3.3 开展相关的保障技术的研究

根据影响 GEO 卫星长寿命高可靠的空间环境效应分析, 需要开展相关的保障技术研究。在数据库方面, 需要研究建立 GEO 卫星元器件空间环境损伤性能退化数据库和卫星空间环境效应与寿命试验数据库软件平台。在预示软件方面, 需要研究建立 GEO 卫星高压太阳能电池阵带电模型及预示软件, 污染导致 GEO 卫星热控表面、太阳能电池阵性能衰减的预示软件和卫星典型集成电路板内带电风险评估软件。在加速试验规范方面, 需要研究建立 GEO 卫星高压太阳能电池阵带电模拟试验规范、空间太阳近紫外加速试验规范、空间太阳远紫外加速试验规范、空间中低能量电子加速试验规范、空间中低能量质子加速试验规范等。在防护设计指南方面, 需要研究建立 GEO 长寿命卫星电路板内带电防护设计指南等。通过这些研究, 使相关保障技术上一新的台阶, 为 GEO 卫星长寿命高可靠打下坚实的基础。

### 4 结束语

地球同步轨道 (GEO) 是长寿命卫星主要运行轨道, 空间环境对卫星长寿命高可靠有重要影响。长寿命卫星设计所需材料、器件、部组件在寿命末期环境退化数据是卫星长寿命高可靠系统工程的重要技术基础, 因此相关的空间环境评估、验证和保障技术必须予以突破。

#### 参考文献 (References)

- [1] Bogorad A, Bowman C, Herschitz R, *et al.* Differential charging control on solar array for geosynchronous spacecraft[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40
- [2] Goka T, *et al.* The on-orbit measurements of single event phenomena by ETS-V spacecraft[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1991-12, 38(6):1693~1699
- [3] Brown R R, Fogdall L B, Cannagay S S. Electron-ultraviolet radiation effects on thermal control coatings[R]. AIAA-68779
- [4] Reinisch R F, Gloria H R, Wilson D E. A kinetic study of the photodegradation of poly film in vacuum[J]. American Chemical Society, Division of Polymer Chemistry Meeting, Phoenix, Arizona, 1966-1-16~21
- [5] Daly E J. The evaluation of space radiation environments for ESA projects[J]. ESA Journal, 1988, 12

## Space Environmental Factors Influencing on GEO Satellite's Life and Reliability and Their Evaluation, Verification and Guarantee Technologies

PANG Hewei<sup>1</sup>, FENG Weiquan<sup>2</sup>

(1. *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;*

2. *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China*)

**Abstract:** The relation between the space environment and the life and reliability of satellites is discussed by analyzing various influencing factors. Space substorm environment is related to satellite surface charging and discharging; high energy electrons in belt cause satellite internal charging; solar and particle event and galactic cosmic ray induce single event effects; space charged particles and solar electromagnetic radiation produce a total dose effect; and space vacuum environment influences the satellite self-contamination. The evaluation, verification and guarantee technologies of these space environmental effects are also discussed.

**Key words:** space special environment; geosynchronous satellite; long life; charging; total dose effect; single event effect; contamination