

# 对卫星抗辐射加固保证大纲的探讨

范景德

(航天工业总公司第八研究院 509 所, 上海, 200240)

大纲提出我国卫星工程抗辐射加固设计技术要求及考核内容。对极轨卫星的空间辐射环境提出了极轨卫星抗辐射加固设计根据。对总体抗辐射加固设计、单机抗辐射加固要求及考核、线路抗辐射加固设计要求(包括软、硬件要求)、元器件选择和考核以及抗充放电设计要求和考核作了初步规定, 为卫星工程近期抗辐射加固提出具体的框架。

关键词 卫星 抗辐射加固 保证大纲

卫星抗辐射加固系统设计工程是应用卫星和卫星应用的关键技术之一, 卫星系统抗辐射加固水平体现在综合抗辐射能力上, 综合抗辐射加固是卫星生产计划中不可缺少的一部分, 具有普遍性、紧迫性和实用性。

卫星抗辐射加固设计是在积极吸收国外卫星抗辐射加固设计工作经验, 结合我国国情和过去在轨卫星的经验, 使我国卫星抗辐射加固设计工作逐步走向科学化、系统化, 从而达到卫星抗辐射加固优化设计, 降低因辐射环境而引起的风险性, 降低成本和提高相对效益。因此对辐射环境要有个共识, 辐射指标尽量适度, 抗辐射设计要求和验证尽可能做到合理和充分。

长寿命卫星设计要素之一是在充分了解特定任务所处的空间环境之后, 必须在电子元器件、电子线路、部件和整星各级分别进行抗辐射加固设计。设计的根据视辐射三大效应对卫星各系统产生的危害程度而定。

在目前国内抗辐射加固器件性能还不够高的情况下, 除进口必要抗辐射加固器件外, 重点应该在系统设计中找出路。

## 1 总体抗辐射加固设计

- (1) 计算卫星在轨寿命期内, 外部累积辐射剂量(如表1所示某卫星2年抗辐射要求)。
- (2) 预示卫星内部寿命期内辐射深度剂量表。
- (3) 提出整星、单机、器件辐射剂量要求。
- (4) 预示个别元器件在轨单粒子翻转。
- (5) 编写卫星抗辐射加固大纲。

- (6) 提出总体、重点分系统, 重点单机, 抗辐射设计要求。
- (7) 提出重点系统, 单机, 试验大纲。
- (8) 组织对有关系统和重点单机抗辐射设计评审和验证。
- (9) 指定认证单位, 协同试验方法。

表1 太阳同步卫星抗辐射指标及分配

Table 1 Anti-radiation specifications of solar synchronous satellite and their distribution

试验项目	总剂量/Gy	单粒子翻转率 <sup>1)</sup>	锁定	充/放电	电磁脉冲
星外	$5.7 \times 10^4$	可计算	无锁定或锁定 16 h 内本机无损伤	卫星外壳任何两点 阻抗(不包括绝缘 部分) < 10 mΩ	
单机		$10^{-5} \sim 10^{-7}$ 2)	并对卫星其它系 统功能无影响	外壳承受静电电压 ≥ 700 V	在距 0.3 m 能抗 10 kV 电磁脉冲
半导体器件和集成电路	$1 \times 10^2$ $\sim 5 \times 10^3$ 3)	$10^{-8} \sim 10^{-10}$			
太阳电池	$3 \times 10^{-14}$ 电子 数/cm <sup>2</sup> ·a 4)				

注: 1) 单粒子翻转率以每位每天翻转多少次计

2) 主要针对星载计算机及大规模集成电路

3) 若目前国内无抗辐射器材, 原则上单机加 3 mmAl 屏蔽, 但最低能承受  $6 \times 10^2$  Gy

4) 材料、导线、高分子化合物总剂量可参考太阳电池剂量

## 2 单机抗辐射设计要求及考核

总剂量效应和锁定现象可通过器件开发, 在技术方面采取措施使之得到解决, 而单粒子翻转 (SEU) 现象所引起的软错误则不仅仅是通过技术方面采取器件开发就能够完全解决的, 因此必须通过采取对策纠正软差错, 以确保单机连续稳定地工作。对抗 SEU 设计一般能自动恢复正常, 或只可瞬时或短时间失控而不造成卫星失效。

(1) 在我国电子器件目前抗辐射水平条件下, 各分系统和单机要解决寿命期内从总剂量到元器件承受水平的差值, 通过系统设计、单机结构设计、屏蔽、冗余或采用更佳抗辐射器件来达到抗总剂量目的。早期的单机异常就能检测出错误并自动排除异常。

(2) 冗余设计: 除冷热机备份举措外, 元器件有永久性故障时可采用机内预设置, 立即切换到备份单元或由地面指令控制切换到需要的模式上。

(3) 具备自动排除软错误功能: 采用硬件和程序双重并行工作的比较方法, 并采用单机要求具有时间差多次采样比较输出的方法。

(4) 单机考核要求(以星载计算机为例)

1) 用硬件连接的中断, 启动每 1 个控制周期; 在每个控制周期的开始, 该处理器重置初始值, 不使用从前 1 周期(或前几个周期)转入的任何 1 个寄存器的值。

2) 合理设定单机锁定电流范围: 若出现锁定, 能在 16 h 内不会出现大电流。如工作电压  $\pm 10$  V 时, CMOS 电路限电阻约 40- 90 Ω 值, 设定临界电流 < 30 mA, 超过 30 mA 会自动切断。

3) 半年中不出现因辐射而使姿控控制模式变化, 不造成姿态失败或造成不能出图。2 周

中允许有一次瞬时扰动,须在 2 s 内恢复,不造成大的姿态干扰。

### 3 线路抗辐射设计要求

线路抗辐射加固设计目的,即使因辐射导致出现错误情况下也能够继续执行处理任务。硬件上要有自诊断功能、非法地址检验功能和非法指令检验功能。从软件上要有双重或三重冗余系统对运算结果进行极限校验功能,对程序执行顺序有鉴别功能。

#### 3.1 硬件抗辐射加固设计

(1) 元器件参数的降额使用指标应基于高质量数据。降额使用指标:分析每个电路在最坏情况下性能,并证明在允许误差、辐射温度和老化等综合效应的情况下电路性能不超过合格范围。IC 电路在条件许可下优先考虑使用中小规模集成电路。

(2) 选择合适的屏蔽及屏蔽材料,除铝外,钽材料也可。

(3) 设置检错纠错功能块:对关键部位要有修正电路,修正 RAM 的 1 位翻转,检出 RAM 的 2 位翻转。修正电路内部不允许有存贮元件,防止发生软错误。

(4) 冗余设计,增加系统安全系数,对运算电路、控制电路和中断电路内部存贮器拟采用三冗余系统防止发生软错误。

(5) 设置硬件计数器。在软件进入死循环、时间计数器不起作用时由硬件计数器复位,即计数器在规定时间内不被清除,则发出复位信号,重新启动机器,从死循环中解脱。

(6) 正确设置 WDT (看门狗),对本系统正常/故障起动提供识别标志,再由软件按不同标志进行不同初始化处理。设置合适的 IC 保护电路,对读取时间、传递时延、电流门限等应留有足够的余地。

(7) 硬件重构:对不能用三取二输出数据,当系统判别确定为硬件故障时,要有硬件重构的功能。

(8) 抗锁定电阻选取应折衷考虑,即尽量使电阻大些,让锁定的可能性最小,且干扰正常工作。星上 CD4000 系列其锁定维持电流 60 mA,则电路设计把电流限制在 50 mA 以下。限流技术对大系数 CMOS 器件型号有明显效果但不是对所有的都有效。

#### 3.2 软件抗辐射加固设计

风云一号气象卫星在轨情况和几次地面单粒子效应试验中 CPU 等所观测到的量,均有过翻转,几率最大、危害最大的是 80C86 段地址寄存器,往往跳入错误的模块或数据区,甚至是空闲区内,造成死循环、大范围冲毁重要数据,使系统陷于瘫痪。

软件抗 SEU 设计有如下要求。

(1) 容错:实时操作系统既对辐射环境作出响应,又可避免程序设计错误导致故障和过程事故,具备自检能力,保护程序正常执行。

(2) 程序模块化:把程序固化在 PROM 中使信息不受 SEU 影响。

(3) 对模块输入、输出标签值进行预置、检查和复位。每一个块入口的标签值有初始化,出口有约定标志;对只执行一次指令码,仅在退出该块之前检查一次标签值;对循环指令码,标签值在每次循环迭代时都检查一次;程序退出该块,标签值复零;使所有输入/输出指令至少执行两次后生效;两次指令放在不同块的边界处。

(4) 把由地面随机参数的确定减少到最低限度。将尽量多的注数和修正数固化在 PROM,减少 RAM 因 SEU 使数据变化的可能性。

(5) 三取二表决法指对关键数、需修改数和中间数,同时将其存入在分割开的3个不同的RAM中,实行周期性最优刷新法。

(6) 输出数据实行双机或单机时间差比对,对输出数据通过比对发出问题再三取二。若仍然不能解决问题,交系统管理软件分析,确定硬件故障还是软件错误。属前者则通过硬件重构,然后返回应用软件继续进行。

(7) 标志值用1个字节或字作标志,不许用一位或一位两种状态之一来决定状态。

(8) 模式间转换采用直跳式而不用存储器跳转方式。

(9) 数据区与程序区须隔离,避免程序进入RAM面积冲毁RAM中数据。

(10) 段存贮器置初值:由中断服务程序执行给段寄存器置初值,若段存贮器出现SEU使程序出错,可恢复段存贮器的值。

(11) 对80C86和80C31CPU、PROM、RAM全部实行填充。若程序一旦跳入空休区就进入处理程序中乱飞程序处理。

## 4 元器件选择及考核

长寿命高可靠已成为各种应用卫星的重要标志之一,高可靠性内涵之一是提高抗辐射效应,空间辐射中不同能量和类型的带电粒子对材料、热控涂层、电子元器件、硅太阳能电池产生电离效应和位移效应。电子元器件表现为反向电阻降低、漏电阻增加,电子元器件加固出路从设计、工艺和工程应用上进行辐射加固。

### 4.1 元件选择

选择满足总剂量、抗SEU/SEL(单粒子锁定)、抗充/放电指标的元器件。

### 4.2 抗辐射器材选用原则

(1) 满足指标,以可靠性为第一、结合重要性和经济性而定。核心器件用HCS器件,接口级、切换级和电源等可用满足MIL883C或38510筛选的产品;

(2) 对电阻、电容、三极管、二极管和继电器等采用国产七专产品;

(3) 微处理器及其外围设备宜采用国际上HARRIS、NTEI公司抗辐射加固产品;

(4) 对模拟控制器、喷气控制电路等备份系统(或工作时间不长者),采用普通抗辐射器件;

(5) 对遥控遥测等单机,若外面有足够的屏蔽可采用一般抗辐射器件;

(6) 对暴露在星外的有机材料,宜采用高抗辐射塑料和涂料。

### 4.3 器材抗辐射考核规定

(1) 粒子辐照须由研制单位进行总剂量、SEU和SEL验证试验,报总体后确认。

(2) 在以往卫星上考核成功,技术状态、材料、元器件、工艺不变情况下可免做抗辐射试验。

(3) 中小规模集成电路外面屏蔽厚度 $\geq 3\text{mm}$ (Al),则免做试验。

(4) 大规模集成电路有厂方抗辐射质保书,则认证单位在厂方生产批量中随机抽1—2只作抽样抗辐射验证试验。若无厂方抗辐射质保书,则每种元器件随机抽2—3只作功能正常、功能偏差、功能失效的辐射验收试验。

(5) 若选用3种工艺(SOS、SOI和CMOS外延结)之一的电子元器件能达到抗 $D = 1 \times 10^3\text{Gy(Si)}$ 、SEU能达到 $10^{-8}$ (以每天每位多少次计)、SEL无锁定或锁定很低的可免做抗

## 辐射验收试验

(6) 试验样品须在无屏蔽下辐照, 只进行功能测试, 试验方法按美国军标 M L-883C 执行。

(7) 电子元器件重离子、SEU 和 SEL 试验须将器件开盖试验。高能质子视其能量决定器件是否开。

(8) 线性器件、ECL 器件、大规模集成电路等先在室温条件进行锁定筛选再在系统最高温度下重新筛选。在剂量 3- 7 Gy (Si) 闪烁 X 射线环境要对每个器件进行筛选。

## 5 抗充/放电设计要求

### 5.1 接地

1) 卫星主要结构部件的导体部份, 每个接点间的直流电阻小于  $10\text{ m}\Omega$ ; 2) 星上所有导电部份和金属表面, 凡不作为电流载体部件通过接地网或经配电盘最终接到卫星公用地(结构地); 3) 星上热控包敷材料要等地位接结构地, 减少电容性结构形成的电荷积累及击穿放电; 4) 中低频单机外壳专设信号地回路; 5) 电源线、信号线各自分别捆扎或电缆束, 分开布线, 合理接地。

### 5.2 屏蔽

星上数字逻辑电子线路盒屏蔽厚度不小于  $2\text{ mm}$  (A1); 电缆和接插件在连接处充分屏蔽

### 5.3 布线

电子线路盒内、外走线避免形成电流环; 整星采用胶合布线法。

### 5.4 滤波和脉冲选通

对易受触发和干扰电路采用滤波和脉冲选通方法; 与遥测接口专门设计射随保护电路; 对星上部分仪器的供电系统采用短路保护措施。

### 5.5 响应、敏感和障碍

1) 对耦合型的单机进行电磁干扰仿真, 距离仿真源  $30\text{ cm}$  处在  $10\text{ kV}$  电压放电的条件, 应无错误响应。

2) 当干扰频率为  $14\text{ kHz}$  到  $10\text{ GHz}$ , 电场强度为  $2\text{ V/m}$  条件下电子设备应无障。

3) 当  $400\text{ MHz}$  出现在一次电源上的噪声电压小于  $1\text{ V}$  (峰-峰值) 或者出现在二次电源线的噪声电压小于  $50\text{ mV}$  (均方根值), 电子设备不敏感。

4) 对脉冲小于  $1\text{ V}$  上升时间小于  $10\text{ ms}$  的干扰, 数字电路不应该响应。

5) 接收机应能抑制频带外电压信号, 比带内电压信号低  $60\text{ dB}$ 。

6) 对整星结构条件下测量表面阻抗, 任何两点阻抗不大于  $10\text{ m}\Omega$ 。

## GUARANTEE OUTLINE OF RADIATION HARDENING FOR SATELLITE

Fan Jingde

(Institute No. 509 of the 8th Research Academy of Space Industry General Corporation, Shanghai, 200240)

### ABSTRACT

The guarantee outline presents the technical demands of design and contents of assessment for radiation hardening in satellite engineering in our country. It includes the basis of design in space environment of polar orbit, the contents of design for general radiation hardening, the requirements and assessments of the single-board computer, the requirements of design for circuits (including hardware and software), the choices and assessments for devices, and the primary stipulations for the requirements of design and assessments against the phenomenon of charge and discharge.

**Key words** Satellite Radiation hardening Guarantee outline

### 高性能、高吞吐率微机多道分析器系列通过部级鉴定

中国原子能科学研究院核技术应用所研制的高性能、高吞吐率微机多道分析器系列近日通过部级鉴定。该产品主要性能指标已达到国际同类产品和技术的先进水平,其软件功能齐全,操作使用方便。首先提出并使用了“双向滑尺均道”技术改善了逐次逼近法ADC的微分非线性;“尾数均道法”技术改善了线性放电法ADC的微分非线性;“伪随机地址DMA单字传送”方法解决了获取数据的实时显示问题;在多道缓冲存储器中采用“DMA+N”数据存取方式解决死时间技术损失实时修正和提高谱仪数据吞吐率。

摘自中国原子能科学研究院《原子能院报》