

4、航天器的太阳风暴防护

电离总剂量效应的防护设计

电离总剂量效应防护设计：目标是确保航天器在轨期间不因电离总剂量效应而造成在轨故障或失效，提高航天器对轨道空间环境的适应能力和生存能力。

- ★ **元器件及材料的选取**

- ★ **质量屏蔽**

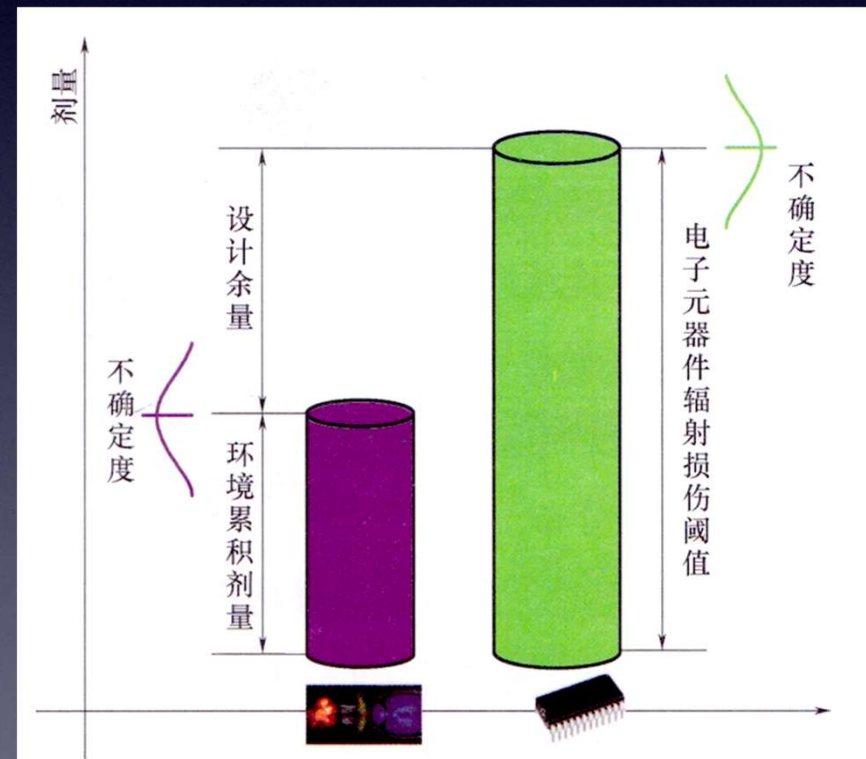
- ★ **辐射设计余量**

- ★ **总体优化布局 and 热冷备份等防护设计**

辐射设计余量设置

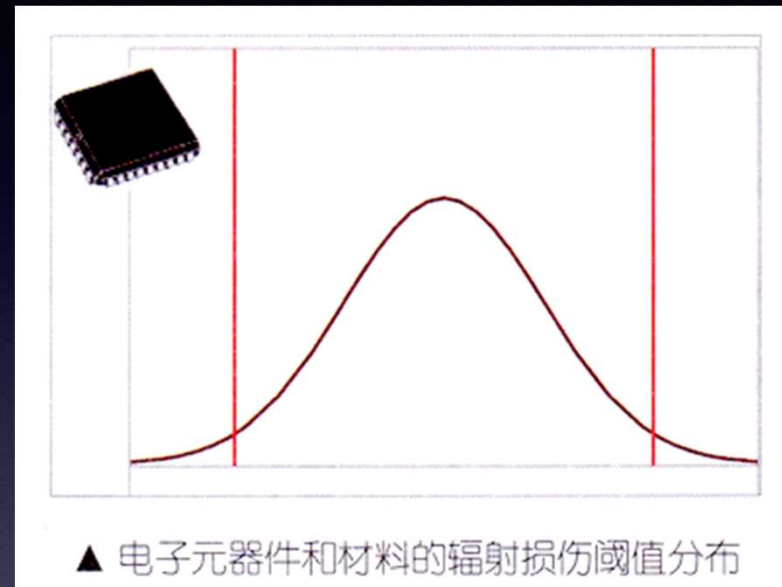
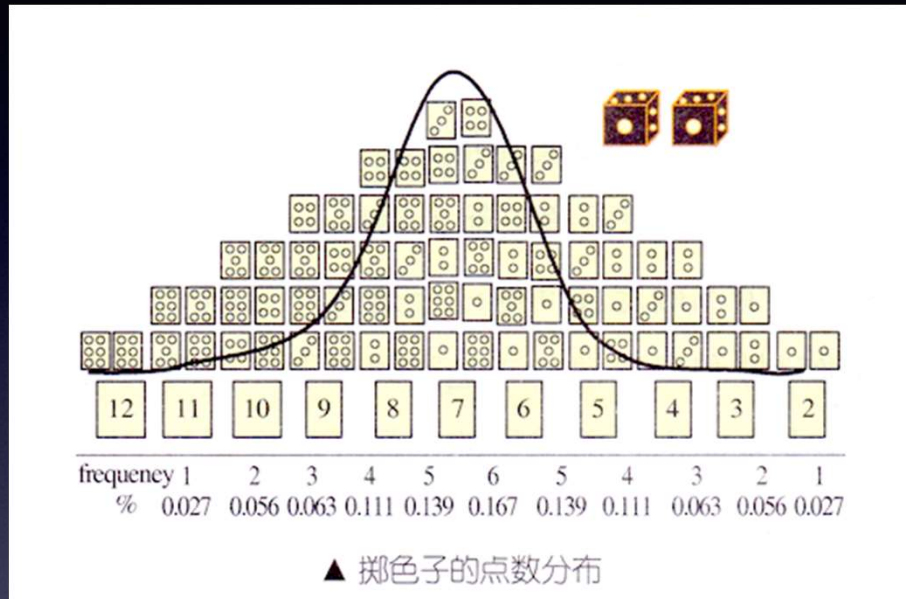
辐射设计余量：电子元器件和材料的辐射损伤阈值与元器件和材料空间位置处累积计量的比值，是判断能否承受在轨辐射剂量的重要参数

- ★ 生产过程中引入的元器件或材料辐射敏感度的不确定性和离散性
- ★ 空间辐射环境的不确定性，主要来源于空间环境模型与实际空间辐射环境之间的差异



电子元器件和材料辐射设计余量

元器件和材料选取



- ▶ 尽可能选取电离辐射能力较强的器件和材料
- ▶ 考虑生产工艺过程质量控制、工艺稳定性和一致性等

元器件和材料选取

工艺	10 ³ rad(Si)	10 ⁴ rad(Si)	10 ⁵ rad(Si)	10 ⁶ rad(Si)
CMOS体硅				
辐射加固CMOS				
高速CMOS				
CMOS/SOS/SOI				
加固CMOS/SOS/SOI				
NMOS				
NMOSI				
NMOSII				
NMOSIII				
DMOS				
VMOS				
PMOS				
加固的MNOS				
加固的MNOS/SOS				
加固的SONS				
商业级SNOS				

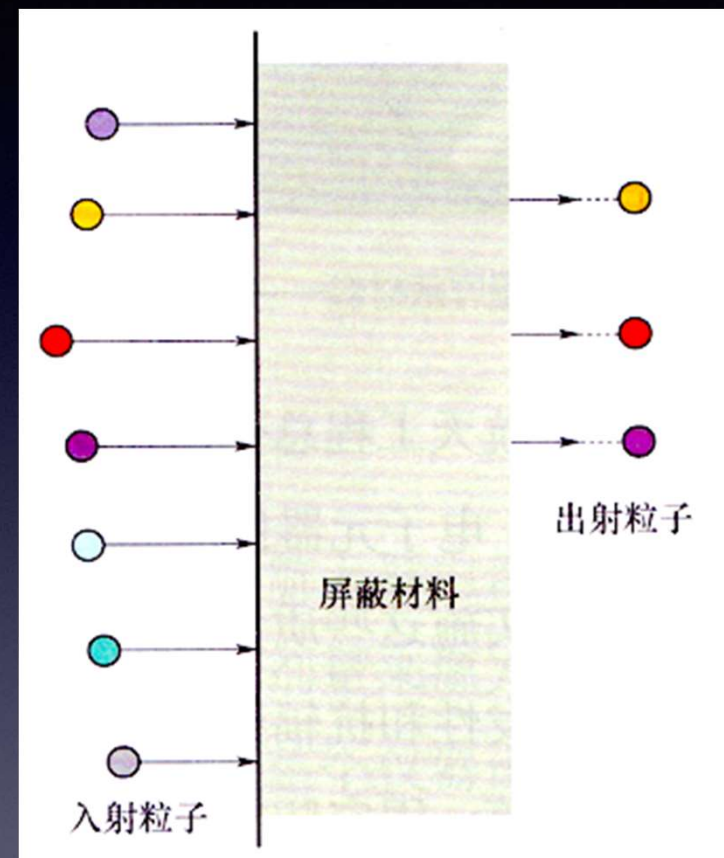
开始出现性能下降，在特定应用情况下可能出现失效
 严重性能下降，出现失效的几率高

MOS集成电路抗总剂量辐射能力

质量屏蔽

带电粒子能量损失原理：

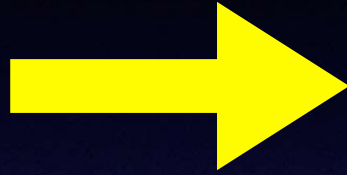
- ★ 粒子进入材料后，沿其路径与材料中的原子不断发生碰撞，逐渐损失能量
- ★ 如果材料厚度小于粒子在该材料中的射程，则粒子在材料中损失一定能量后将穿出材料
- ★ 如果材料相对粒子射程来说很厚，则粒子将损失掉全部能量而被材料所吸收，即粒子能量完全衰减在材料内部



质量屏蔽设计的依据：根据轨道空间环境分析得到的剂量深度曲线和电子元器件、材料的电离辐射损伤阈值，最终应保证辐射设计余量RDM的要求

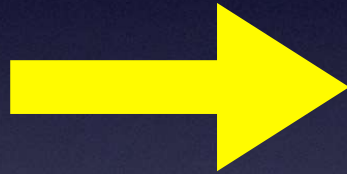
空间带电粒子与物质的相互作用

原子序数越大



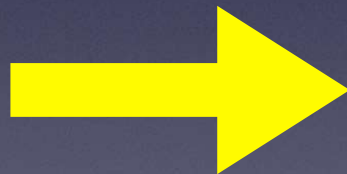
能量损失率越大

能量越低



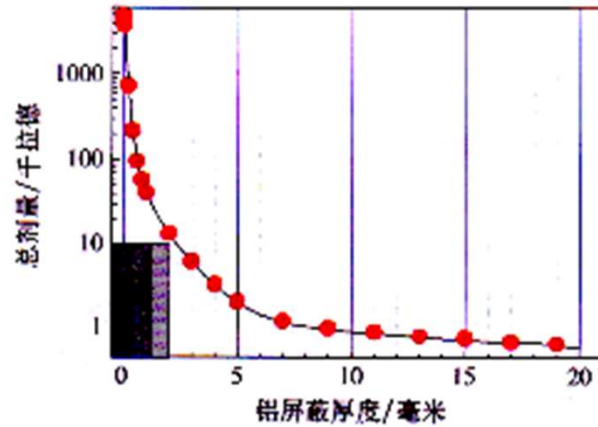
能量损失越快

电子入射在物质
上产生其他效应

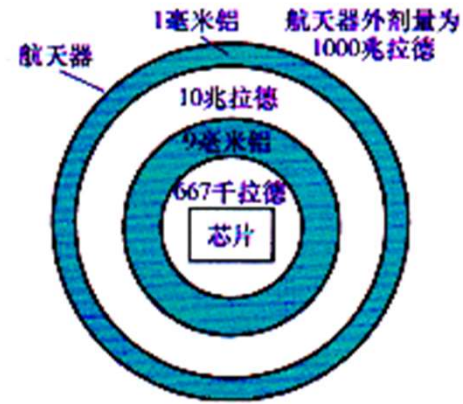


能量损失率并不是随
原子序数单调下降

航天器屏蔽示意图

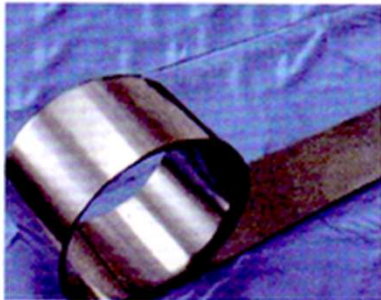


▲ 屏蔽材料为铝时的剂量—深度曲线



▲ 航天器屏蔽示意图

(图片来自<http://radhome.gsfc.nasa.gov/top.htm>)



▲ 常用质量屏蔽材料——铝片



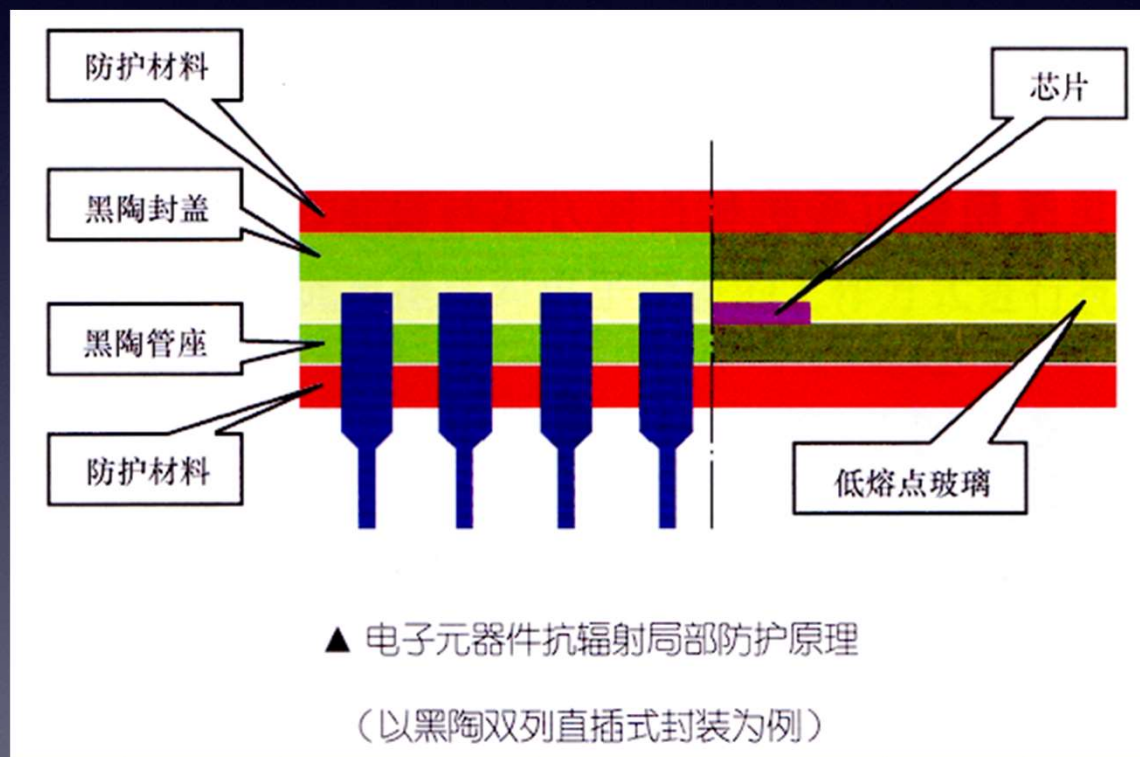
▲ 常用质量屏蔽材料——铜片



▲ 常用质量屏蔽材料——铅块

局部防护方式

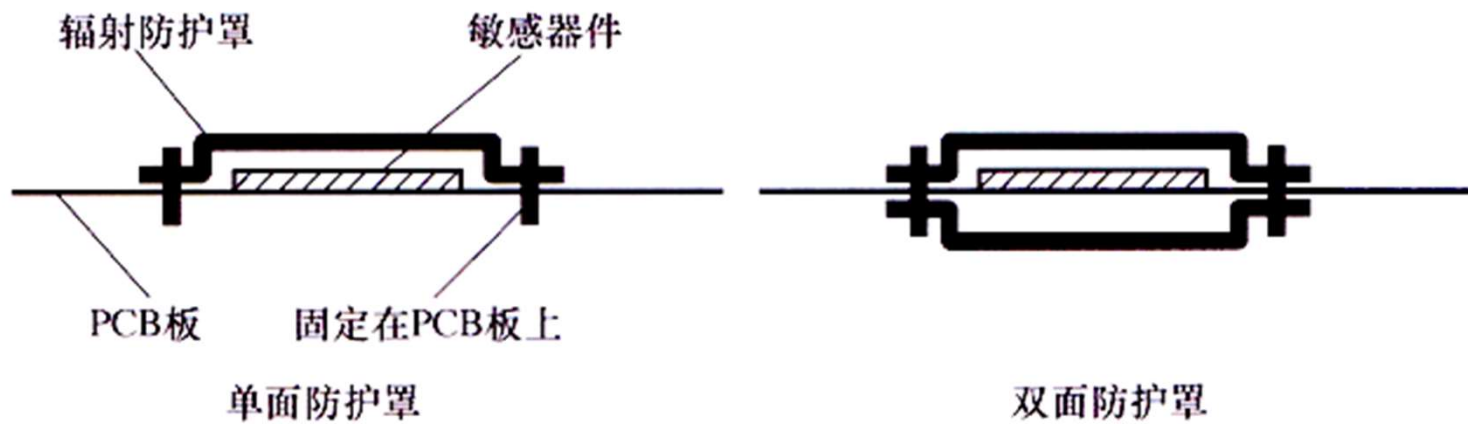
电子原器件局部防护



- ▶ 使用的胶粘剂、涂料、固定材料的挥发性和抗辐射性能应符合航天工程的要求
- ▶ 被固定的材料不应该松动和脱落
- ▶ 固定防护材料后，必须保证良好的绝缘性能

局部防护方式

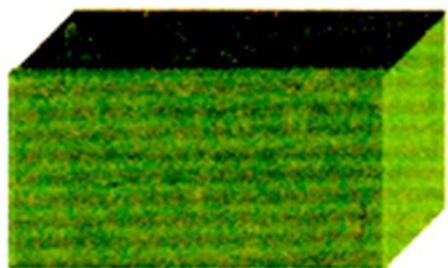
敏感元器件防护罩



▲ 敏感元器件辐射防护罩

局部防护方式

仪器局部防护屏蔽



辐射敏感设备

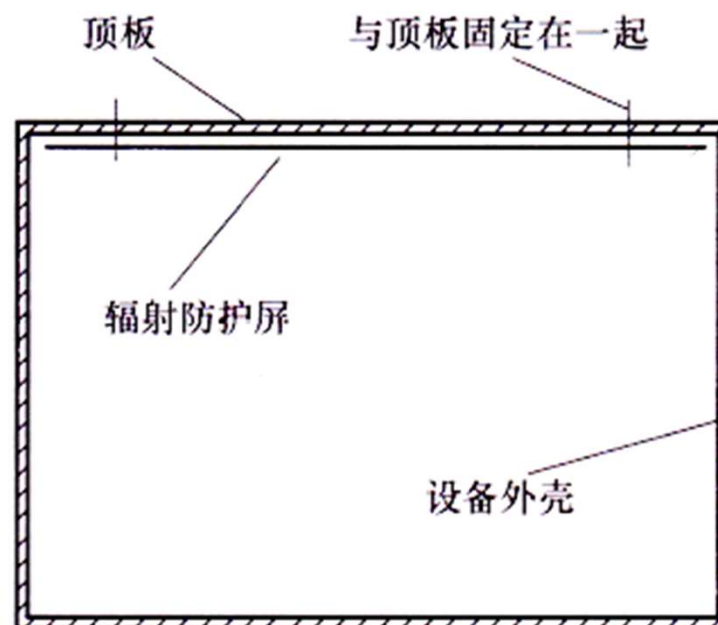


辐射防护屏



辐射剂量
主要来源方

▲ 敏感设备局部防护屏



▲ 敏感设备局部防护屏

总剂量防护的其他措施

- ★ 整星布局优化
- ★ 冷热备份交替工作

国内航天器常用防护设计措施

- ★ 优先考虑电离总剂量强的器件和材料
- ★ 根据航天器电子元器件电离总剂量辐射损伤阈值与在轨期间空间剂量分析结果确定辐射设计余量
- ★ 对于不满足辐射设计余量设计要求的，需要进行局部质量屏蔽

位移效应的防护设计

位移效应



太阳能电池性能退化
CCD成像质量退化

太阳能电池的防护措施

- ▶ 选择抗位移损伤强的太阳能电池片
- ▶ 减薄单体太阳能电池的厚度，也可提高电池本身的抗辐射能力
- ▶ 太阳能电池功率余量设计

位移效应的防护设计

电荷耦合器件CCD的防护措施

- ▶ 选用抗辐射能力强的CCD器件
 - ▶ 增加质量屏蔽，如铝屏蔽
 - ▶ 器件工作条件控制，如采用CCD降温方法
-

光电耦合器件的防护措施

- ▶ 选用抗辐射能力强的器件
- ▶ 选用初始电荷传输效率更大的器件
- ▶ 器件工作条件控制，如提高驱动电流

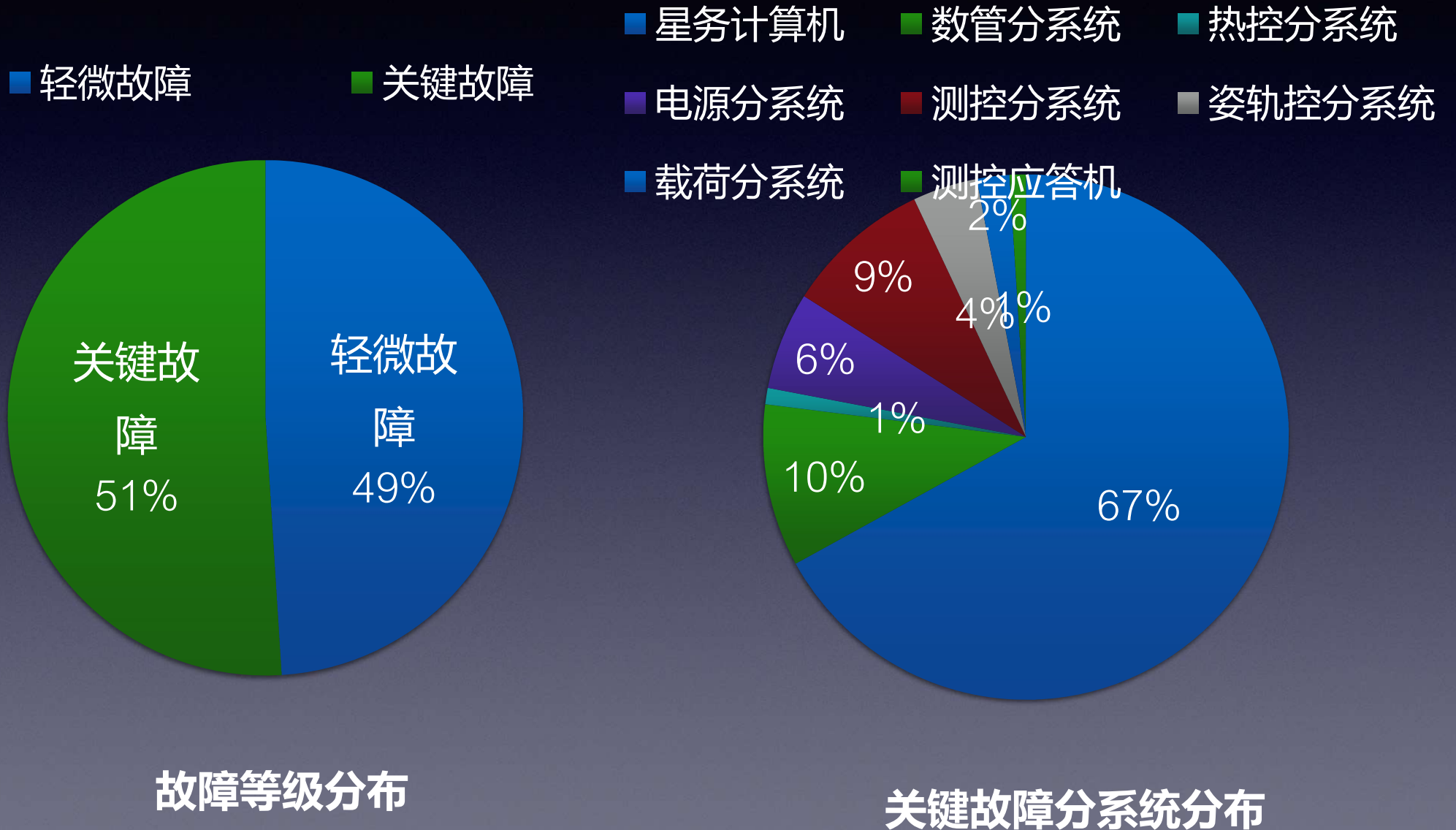
单粒子效应的防护设计

单粒子效应会造成航天器逻辑紊乱、指令错误、功能中断、逻辑异常等

单粒子效应防护基本原则

- ▶ 确保单粒子效应不能造成航天器系统的损伤，不能破坏其功能
- ▶ 在单粒子效应影响下人仍能满足航天器或者有效载荷数据完整性的要求

单粒子效应的防护设计



单粒子效应的防护设计

器件级防护设计：选取抵抗力强的器件

单粒子翻转：可能的条件下选用不发生单粒子翻转的器件；如果必须选用，则尽量选用具有较高抗单粒子翻转LET和较低饱和翻转截面的器件

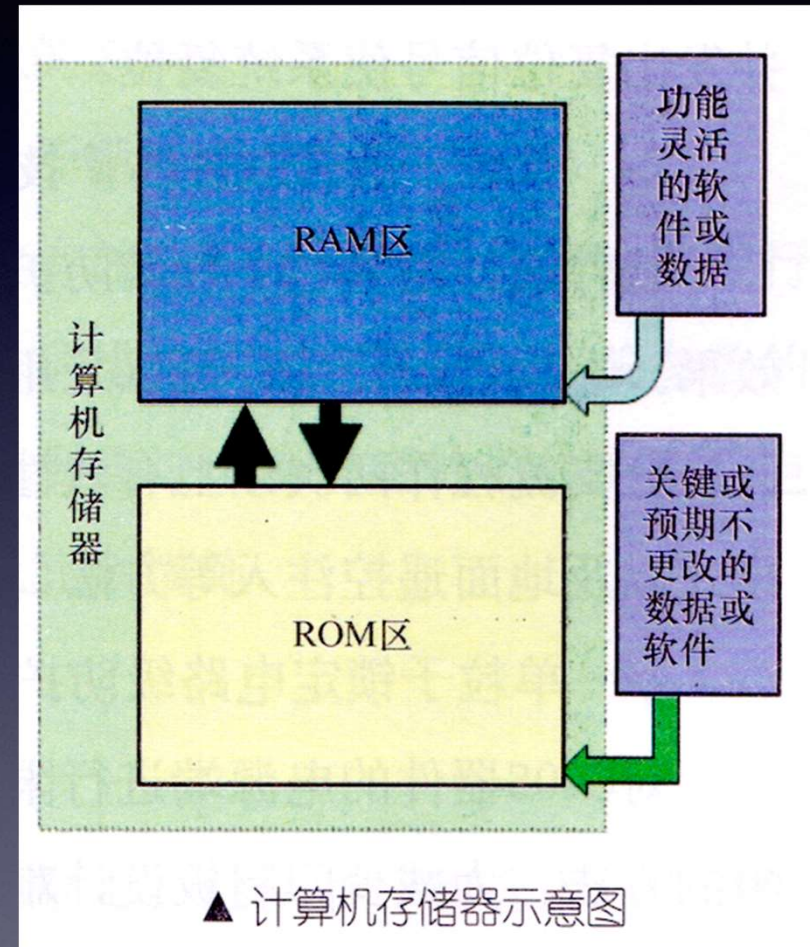
单粒子锁定器件：选择锁定阈值较高的器件

单粒子烧毁和单粒子栅击穿：选用单粒子烧毁和单粒子栅击穿的存活电压阈值大于其工作电压，并满足一定余量的功率MOSFET器件

单粒子效应的防护设计

★ 单粒子翻转硬件防护技术

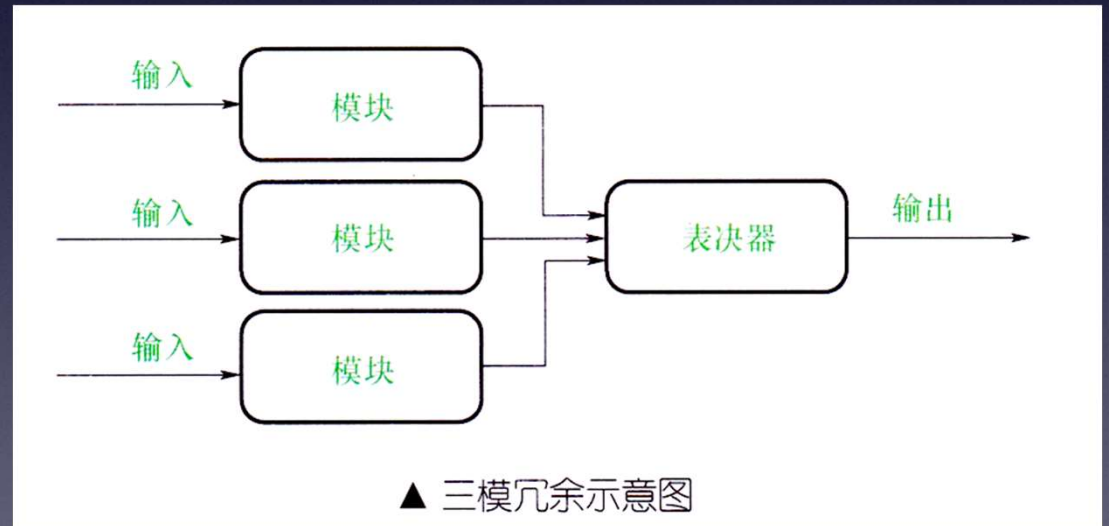
在应用数据中给予检查纠错，即在中央处理器同存储器进行数据交换的通道中加以解决

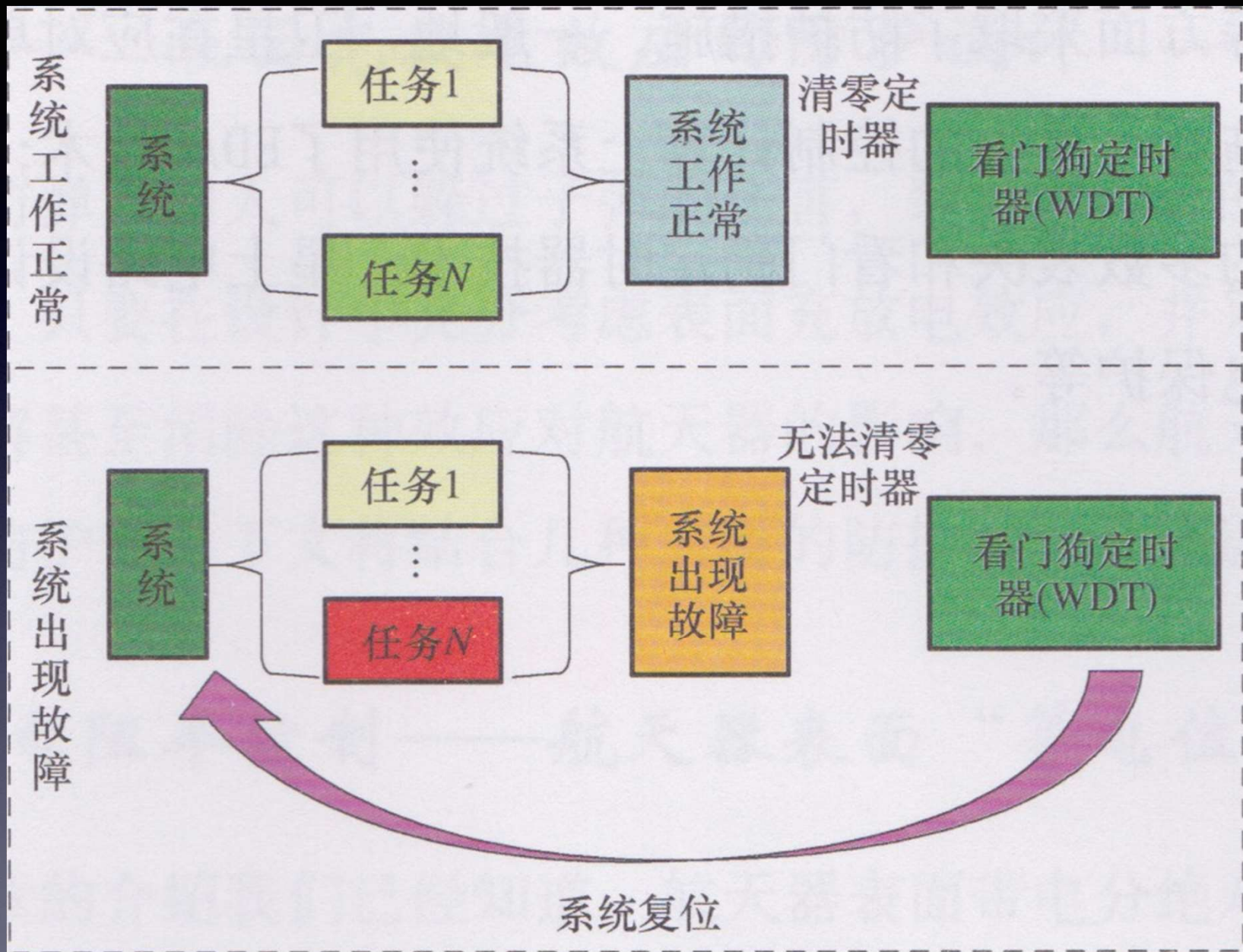


单粒子效应的防护设计

★ 单粒子翻转硬件防护技术

- ▶ 对存储数据按重要程度进行分类存储
- ▶ 对中央处理器的单粒子翻转可以用三模冗余技术
- ▶ 使用看门狗电路





看门狗电路示意图

单粒子效应的防护设计

★ 单粒子翻转软件防护技术

- ▶ 自诊断程序
- ▶ 多重编码
- ▶ 指令复执
- ▶ 程序卷回
- ▶ 分支流程做两次以上有效性判断
- ▶ 程序模块间的间隔
- ▶ 建立健康和安模式以及地面遥控注入等方法

单粒子效应的防护设计

★ 单粒子锁定电路级防护技术

- ▶ 对CMOS器件的电源端进行限流控制
- ▶ 设置过流断电保护功能
- ▶ 进行可控断电解锁设计
- ▶ 多机系统单机单独供电

★ 单粒子瞬态、单粒子烧毁以及单粒子栅击穿电路防护技术

- ▶ 单粒子瞬态：对器件的输出进行滤波处
- ▶ 单粒子烧毁以及单粒子栅击穿：严格遵循相关参数的降额设计准则

单粒子效应的防护设计

★ 国内航天器常用保护措施

器件的选用、电路设计、软件使用等方面

- ★ 星上的控制计算机系统采用的EDAC技术
- ★ 星载软件设计中采用了多数表决和看门狗定时器技术
- ★ 星上电路设计采取了电源端限流，过流断电保护等

表面充放电效应的防护设计

表面材料电阻率控制-航天器表面“等电位”秘籍

控制航天器的相对带电：选择静电导体做表面材料

静电导体：

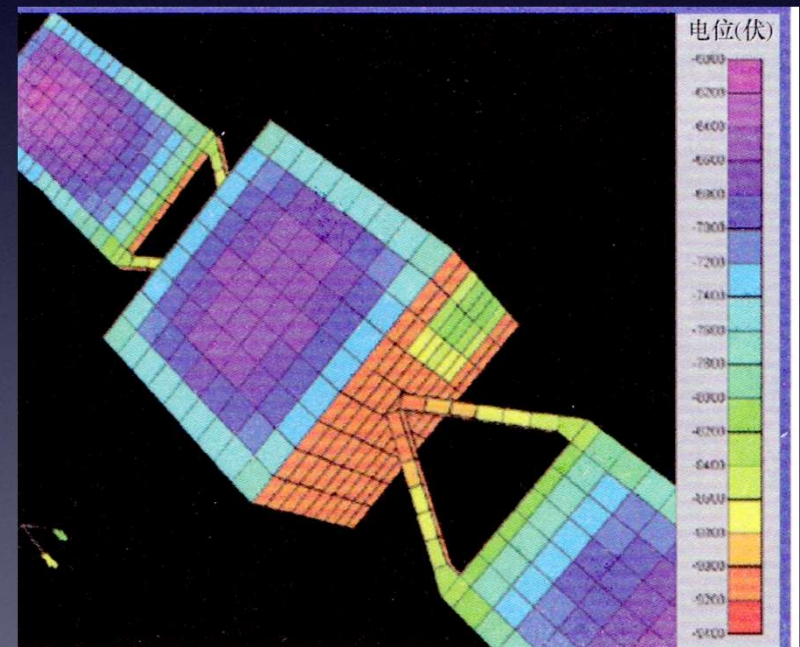
表面电阻率： $<10^5$ 欧/方块
或体电阻率： $<10^4$ 欧/厘米

静电耗散材料：

表面电阻率： $>10^5$ 欧/方块； $<10^{12}$ 欧/方块
或体电阻率： $>10^4$ 欧/厘米； $<10^{11}$ 欧/方块

国内航天表面材料

表面电阻率： $<10^9$ 欧/方块 且体电阻率： $<10^{11}$ 欧/方块



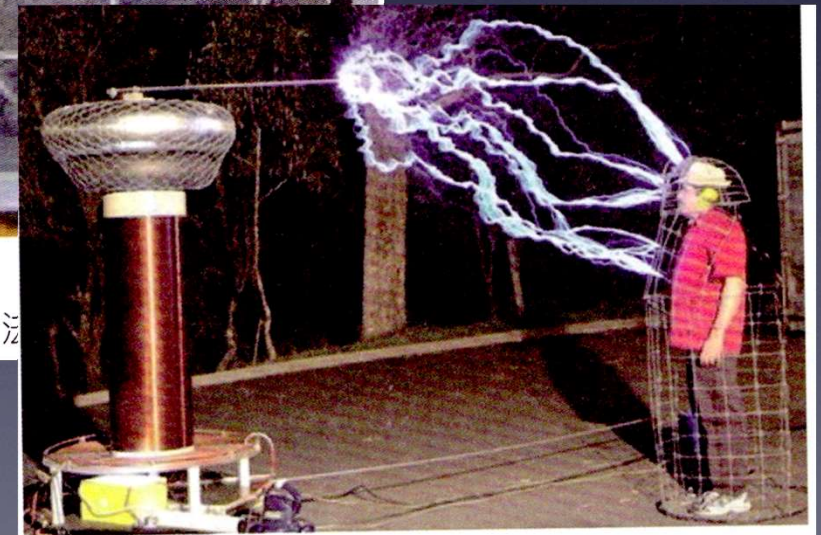
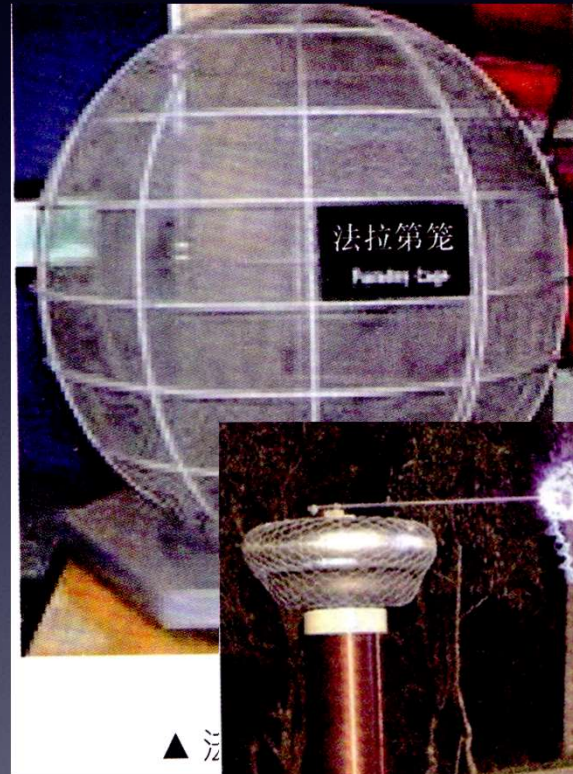
▲ 航天器表面相对带电示意图

表面充放电效应的防护设计

电磁屏蔽设计—航天器的防静电“盔甲”

★ 航天器外形接近法拉第笼

- ▶ 尽量减少开口
- ▶ 保证主结构之间有良好的连接
- ▶ 所有引出到航天器外部的电缆均采用金属屏蔽材料进行屏蔽



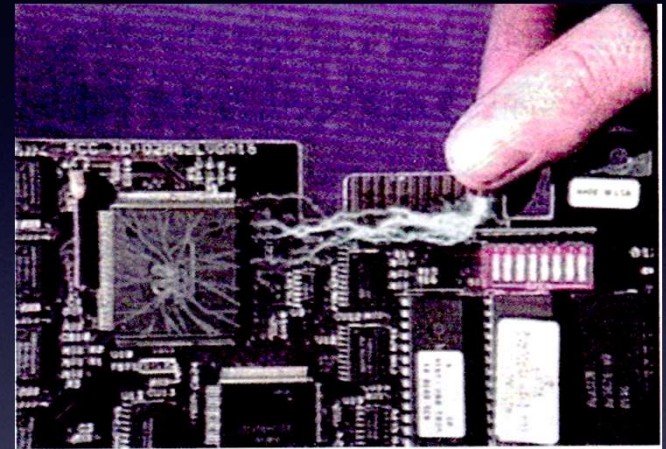
▲ 法拉第笼屏蔽试验

(图片来自<http://www.go-gddq.com>)

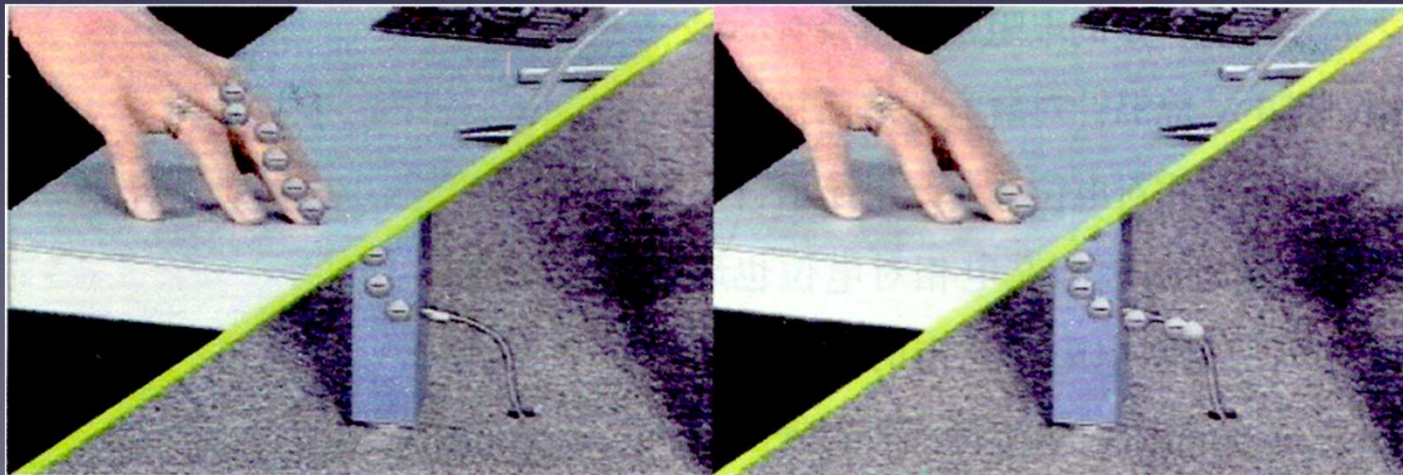
表面充放电效应的防护设计

接地设计—航天器上的“静电棒”

- ▶ 航天器的所有表面都应该直接或者通过泄放电阻接到结构地上
- ▶ 结构地：航天器结构本体



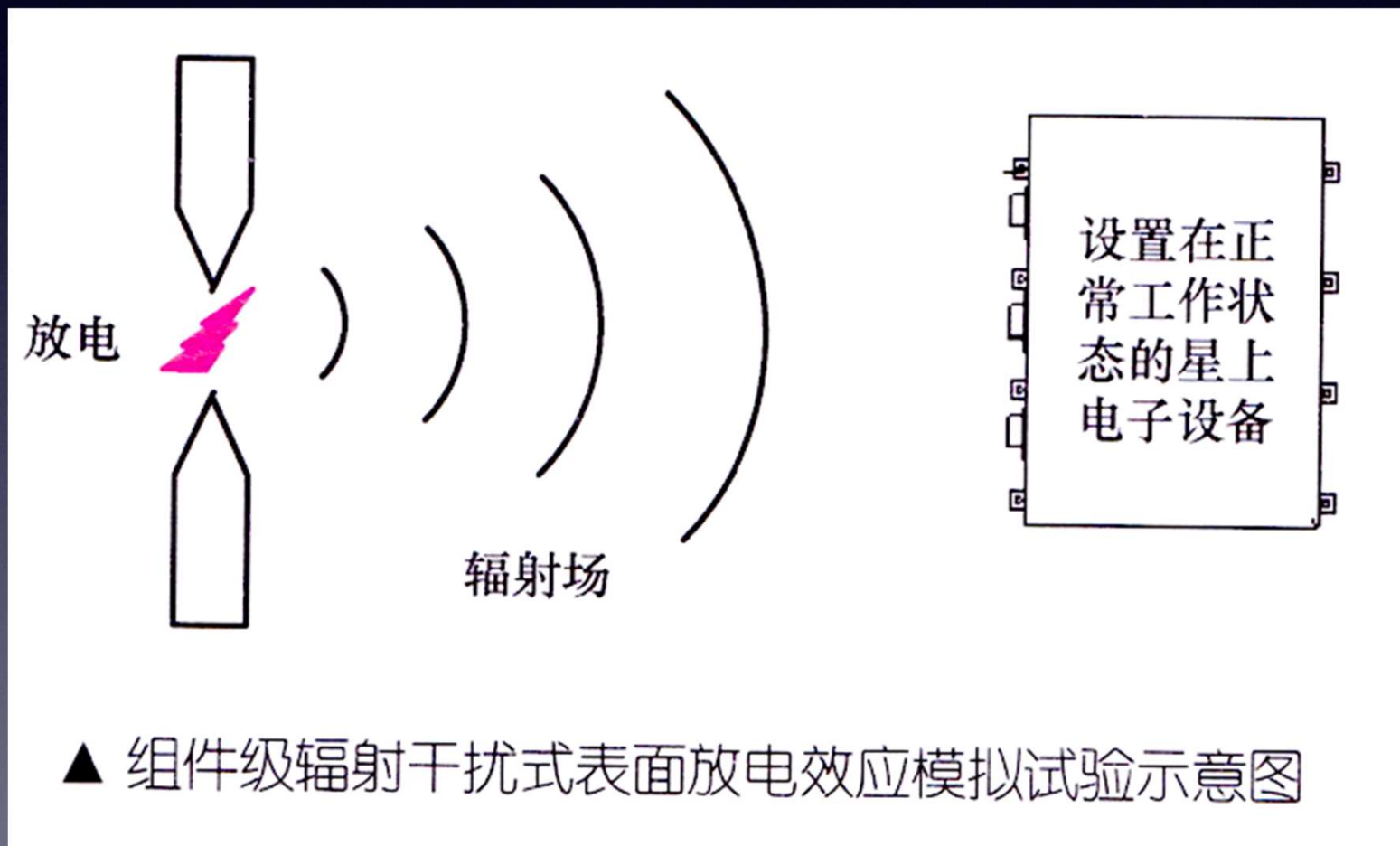
▲ 手触摸元器件时发生静电放电



▲ 人体所带的静电通过接触体的接地线泄放掉

表面充放电效应的防护设计

地面考核——航天器表面充放电免疫能力“健康检查”



表面充放电效应的防护设计

电位主动控制技术——航天器表面电荷“清除”装置

电子发射法：利用场致发射原理，采用一定装置将电子从航天器发射至空间，原理类似避雷针

粒子回收法：主要用于带浮点的航天器电位控制，较高的负电位可以是发射的粒子通过库伦作用返回航天器表面，中和表面负电位

等离子体发射法：通过向外发射等离子体来控制电位，等离子体中既有负电荷也有正电荷，因此此方法可以看成是综合利用电子发射法和粒子回收法两种原理

表面充放电效应的防护设计

国内航天器保护措施

- ▶ 限制表面材料电阻率
- ▶ 接地
- ▶ 电磁屏蔽
- ▶ 利用辐射干扰式表面放电效应模拟试验考核航天器及组件承受表面充放电效应影响的能力

内带电效应的防护设计

电阻率控制—保证电子“疏散”能力

注入电子数 > 泄露电子数

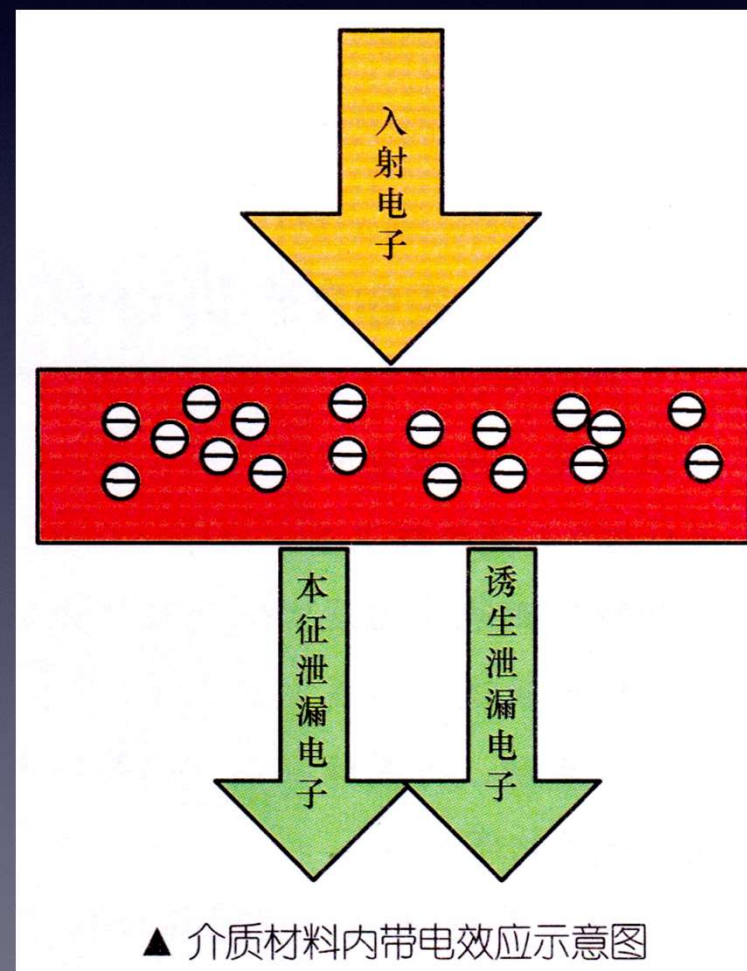


内带电效应

加大泄露电子数：

控制材料的电阻率： $<10^{12}$ 欧/

厘米或者 $<10^{12}$ 欧/方块



内带电效应的防护设计

辐射屏蔽—设计高能电子“盾牌”

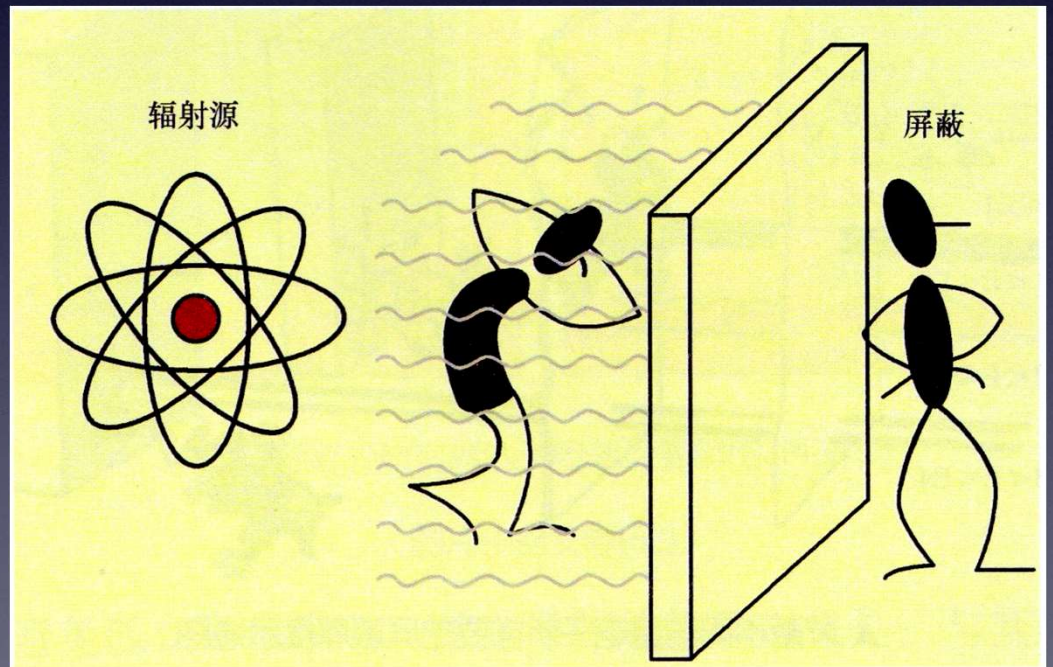
注入电子数 > 泄露电子数



内带电效应

减小注入电子数:

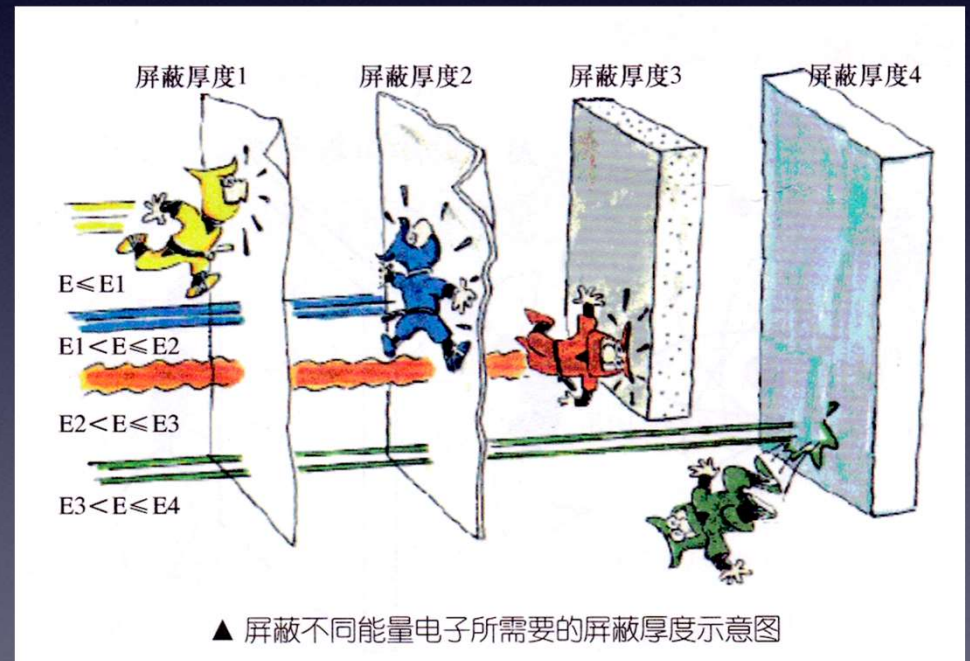
使用屏蔽材料



内带电效应的防护设计

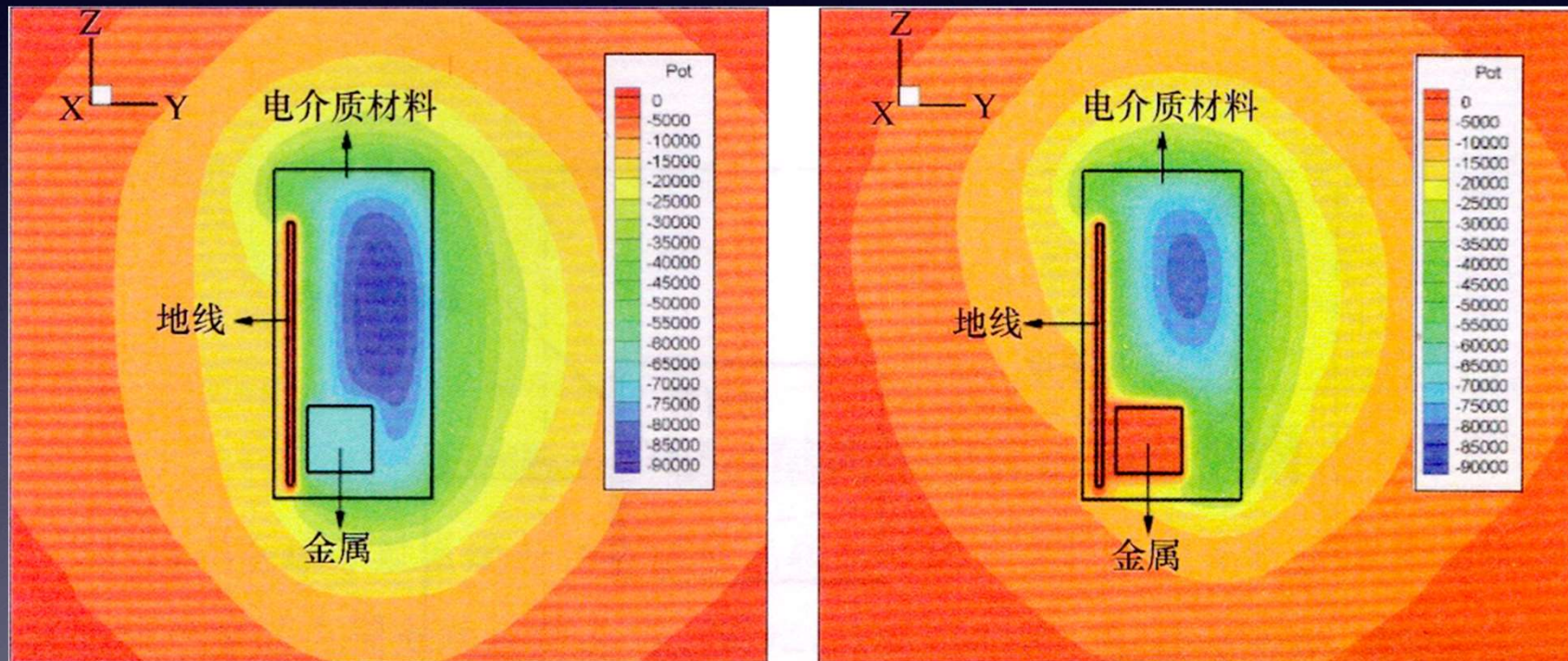
辐射屏蔽—设计高能电子“盾牌”

- ★ 足够厚的屏蔽可将注入电流密度降至0
- ★ 电流密度降至0.1皮安/厘米²
- ★ GEO轨道：2.8mm的铝箔



内带电效应的防护设计

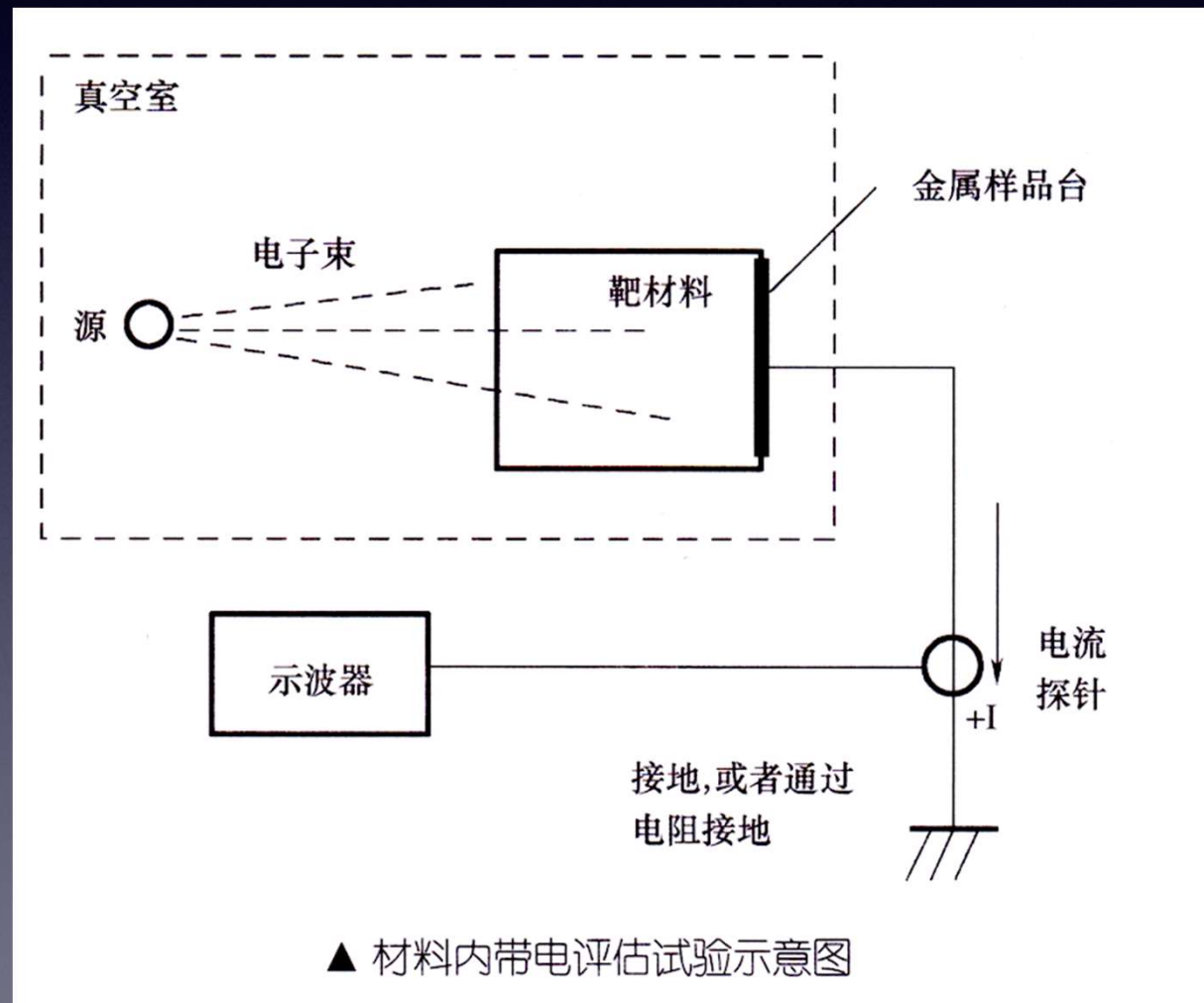
良好接地—提供电子“疏散”通路



▲ 接地对介质材料内带电效应影响的JPL算例

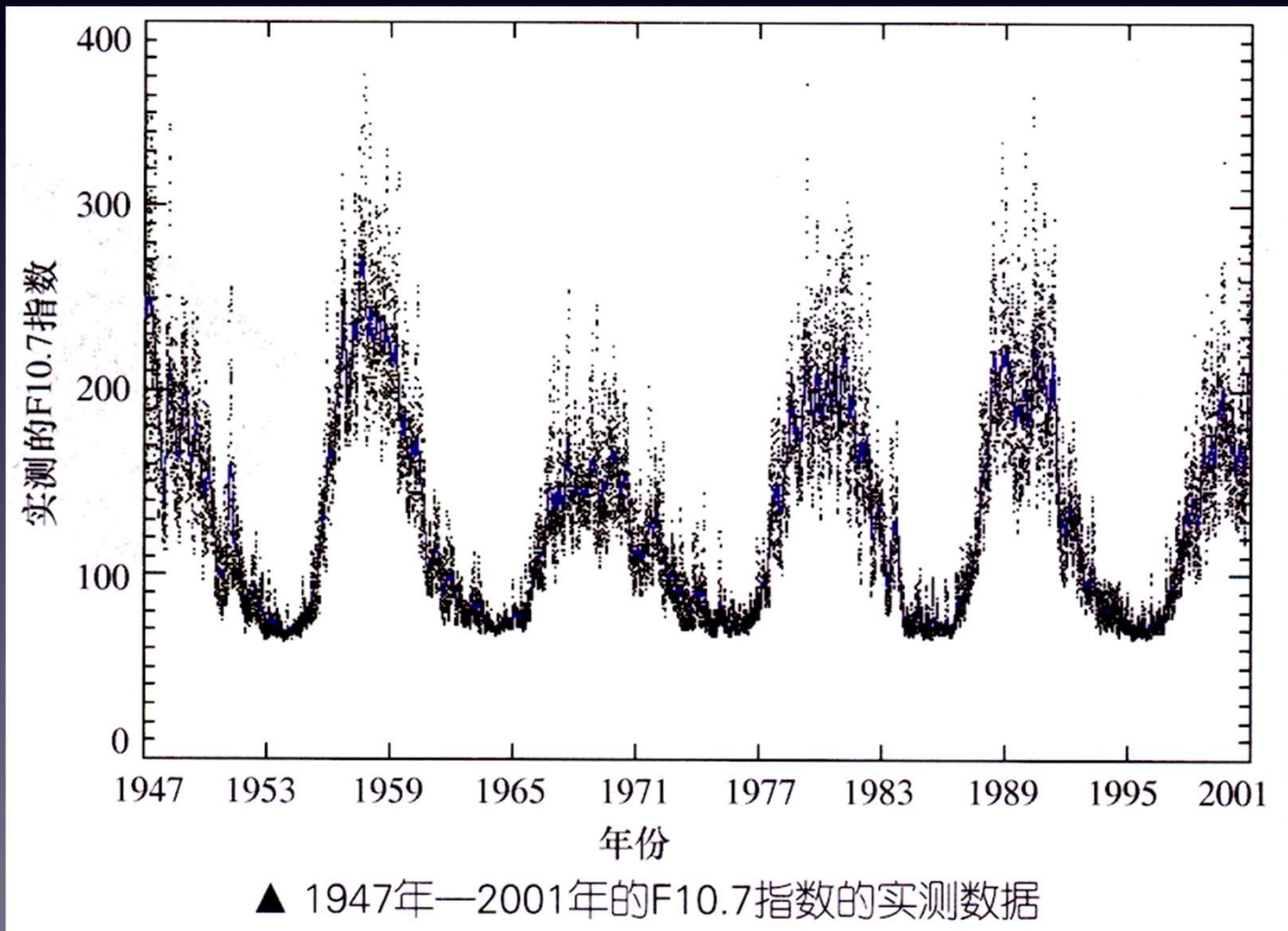
内带电效应的防护设计

地面试验—航天器内带电免疫能力“健康检查”



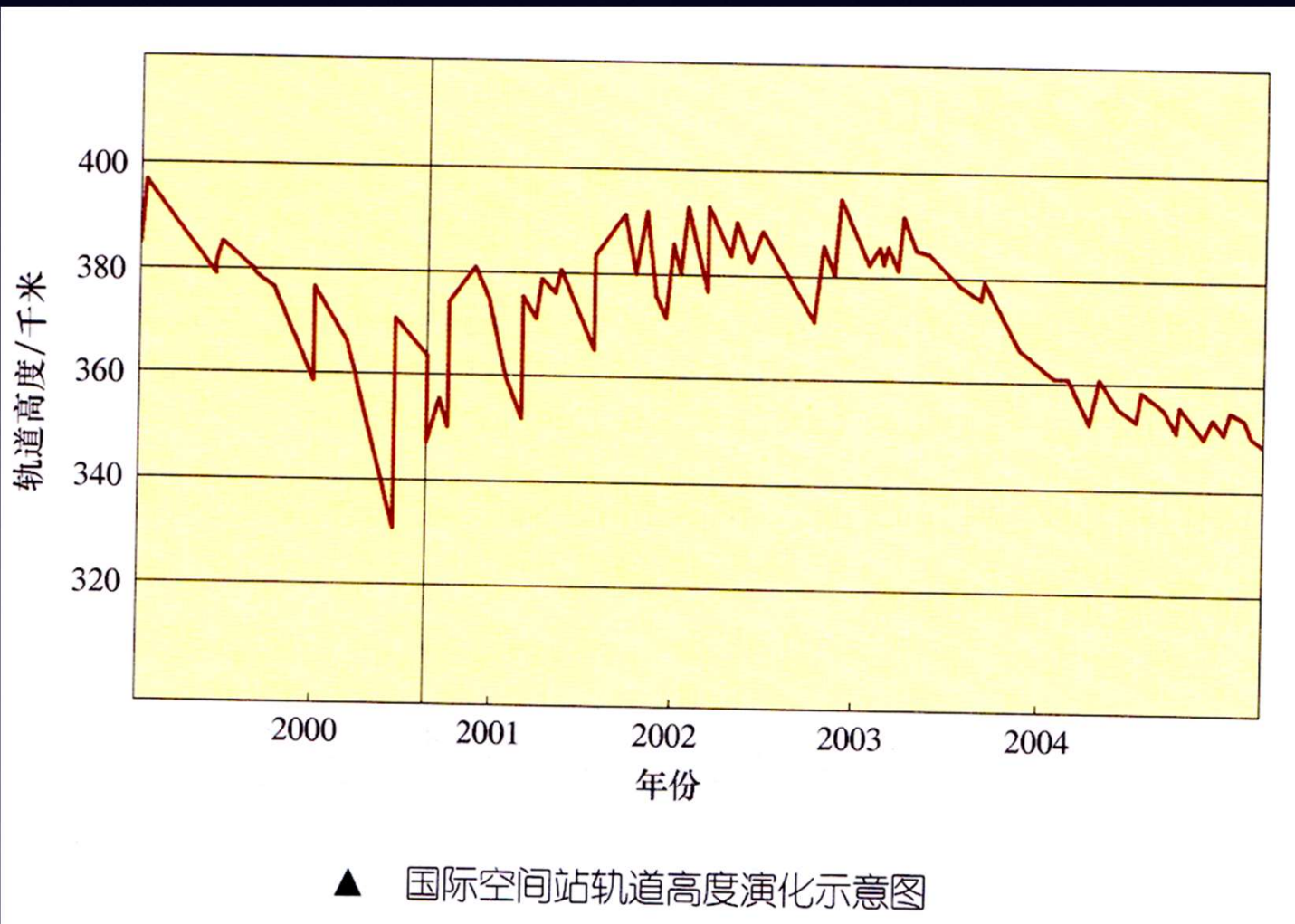
大气阻力效应的防护设计

推进剂预算



大气阻力效应的防护设计

轨道维持





5 微流星体与空间碎片对航天器的影响

微流星体

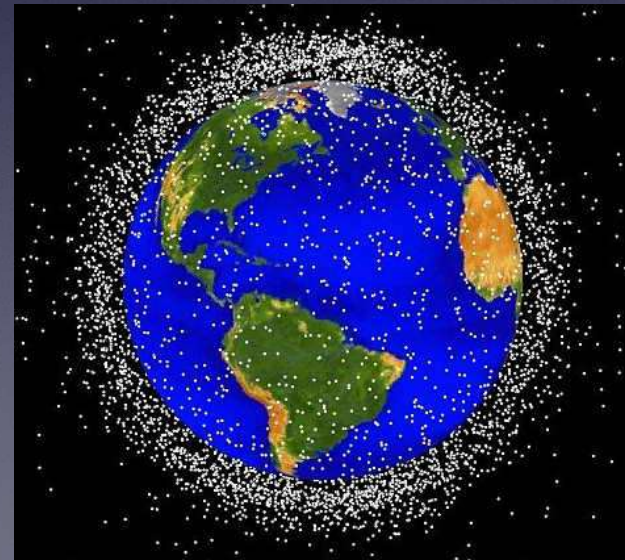
空间碎片

- 都是快速运动的物体，很容易穿透各种材料
- 具有很高的能量
- 在与航天器碰撞时本身可蒸发，可产生碎片

微流星体：来自太阳轨道的彗星及小行星的分裂和破碎

空间碎片：太空垃圾

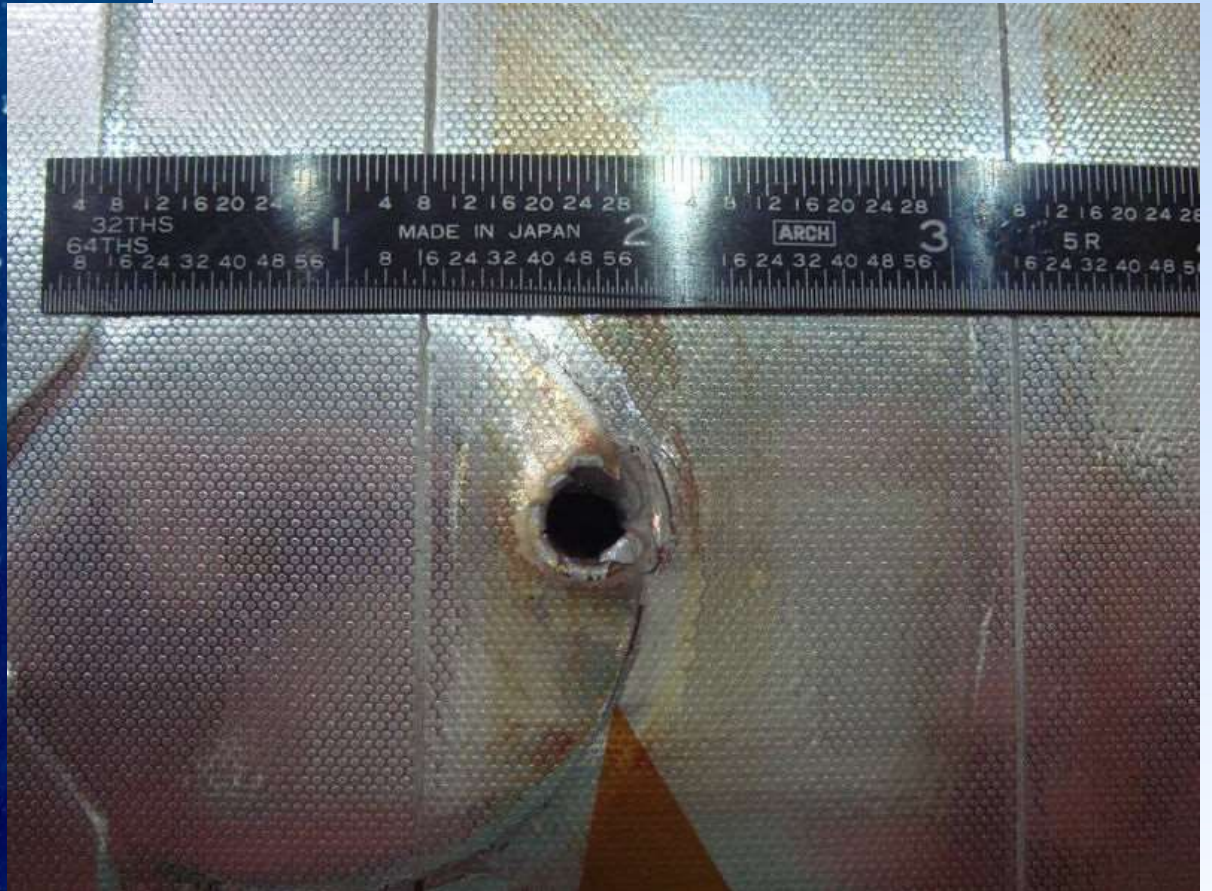
主要危害：撞击



STS-7 Window Pit



1mm



空间碎片的影响

粒子直径与坑直径的关系：

$$\frac{D_c}{D_p} = K \left(\frac{d_p}{d_i} \right)^{0.33} V^{0.333}$$

其中 D_c 是坑直径， D_p 为粒子直径， d_p 和 d_i 是粒子和靶的密度， K 是通过实验室确定的常数。

飞船撞击概率(PC)：

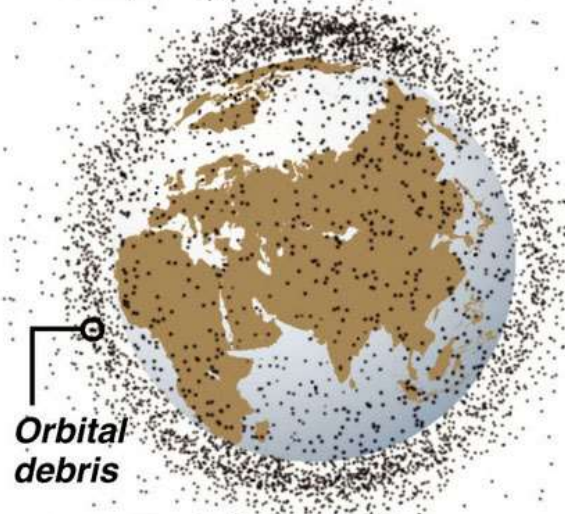
$$PC = 1 - \exp(-SPD) \times AX \times T \times VREL$$

其中SPD是空间密度（每 km^3 的物体数），AC是系统的截面积；T是发射间隔；VREL是物体与系统间的相对速度

空间碎片图

Space debris

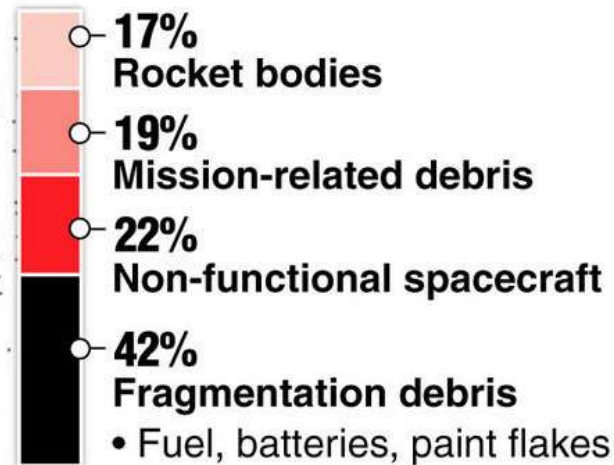
Orbital debris, any man-made, nonfunctional object orbiting Earth, is cluttering space and can sometimes cause trouble.



- Low Earth orbit region of space, within 1,240 mi. (2,000 km) of Earth's surface, is most concentrated area for orbital debris

Source: NASA

Breakdown of debris

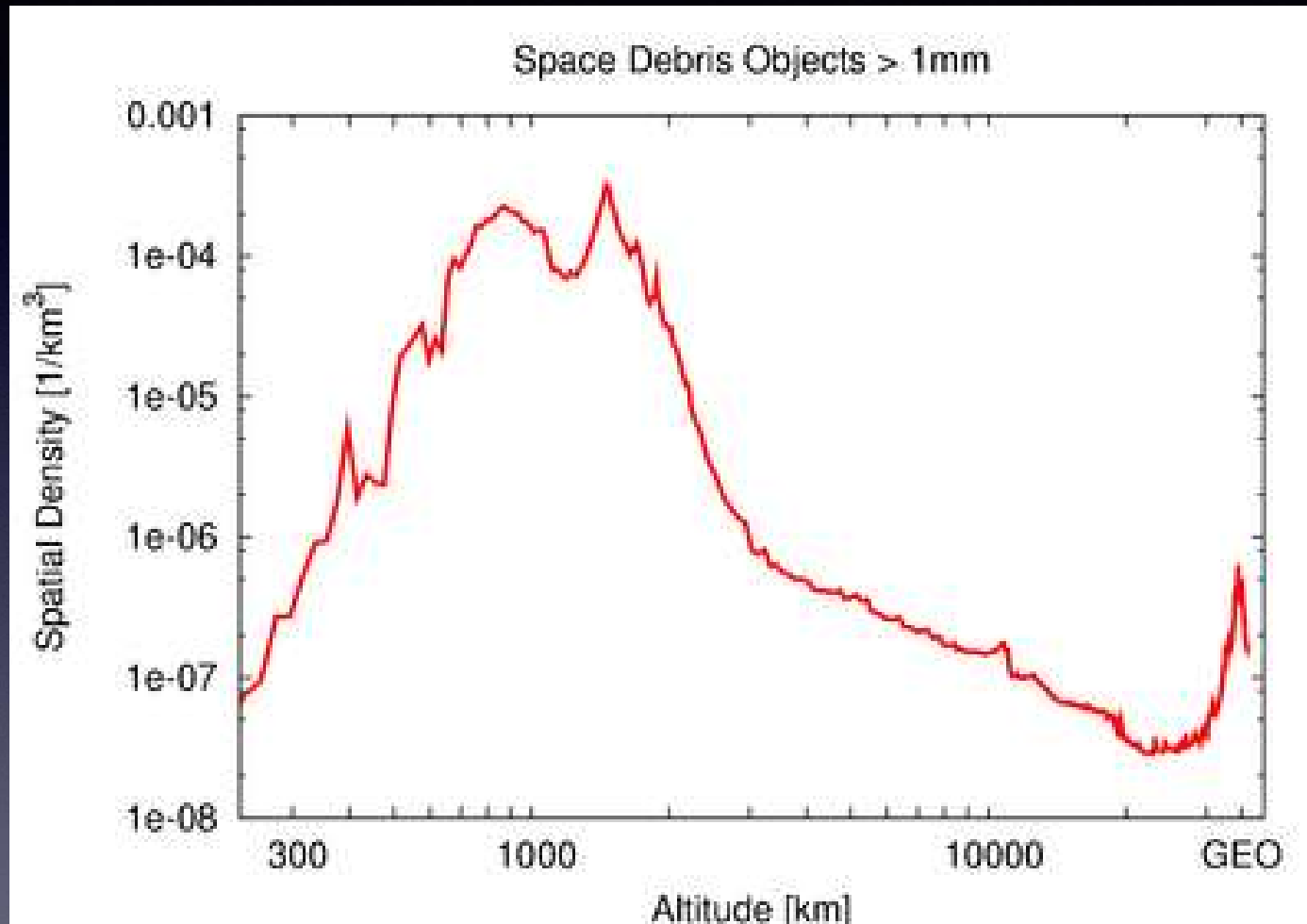


- **11,000 objects** greater than 4 in. (10 cm)
- **100,000 objects** between 0.4-4 in. (1-10 cm)

空间碎片数据表

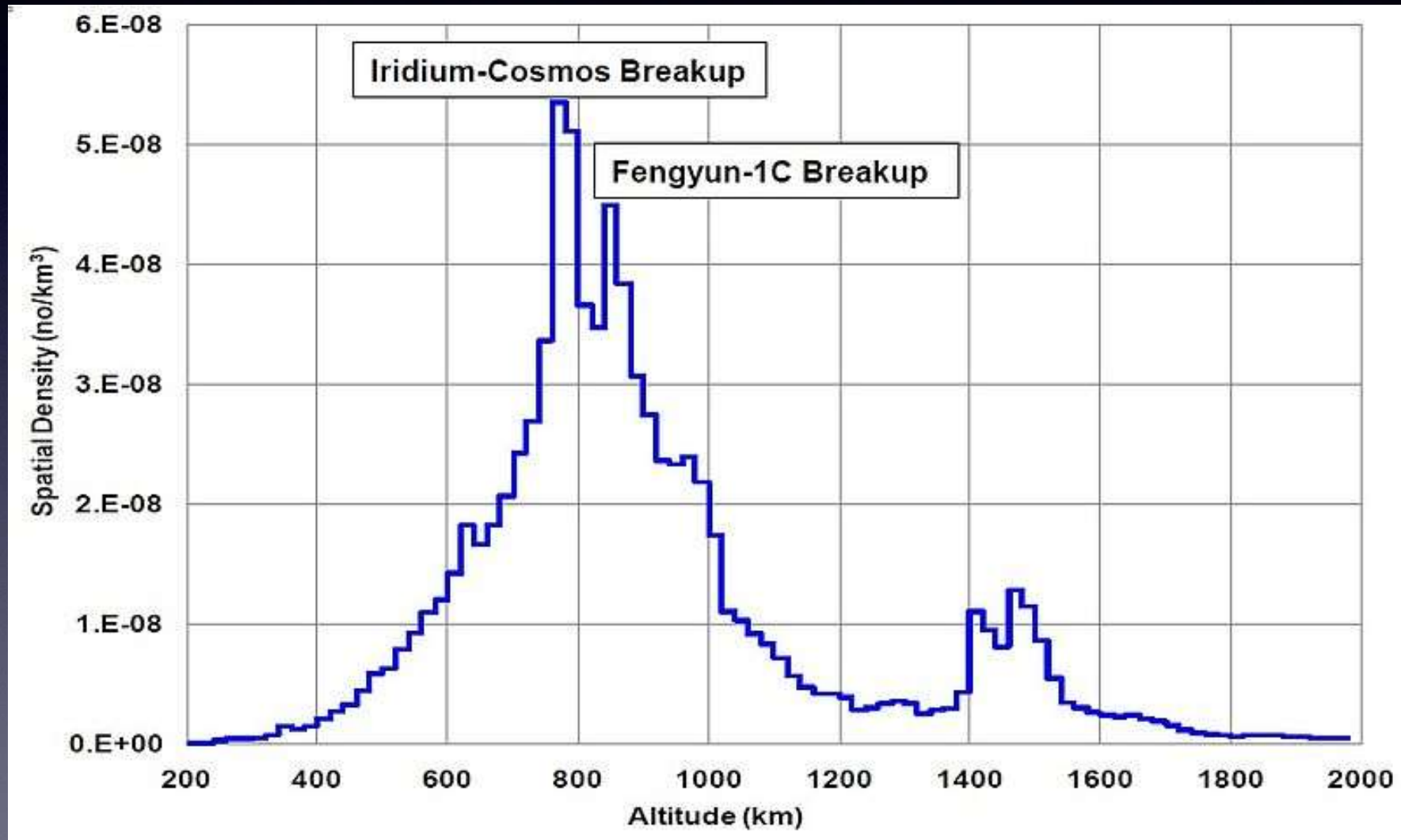
Categories of LEO (Low Earth Orbit) Debris			
Physical Size	Potential Risk to Satellites	Comments	Estimated Pieces of Debris in LEO
Larger than 10 centimeters (about four inches)	Complete Destruction	<ul style="list-style-type: none">• Can be tracked• No effective shielding	16,000
1-10 centimeters	Severe Damage or Complete Destruction	<ul style="list-style-type: none">• Smaller objects in this range cannot yet be tracked• No effective shielding	400,000
Smaller than 1 centimeter	Damage	<ul style="list-style-type: none">• Cannot be tracked• Effective shielding exists	Unknown

空间碎片不同高度的密度分布[ESA MASTER-2001]

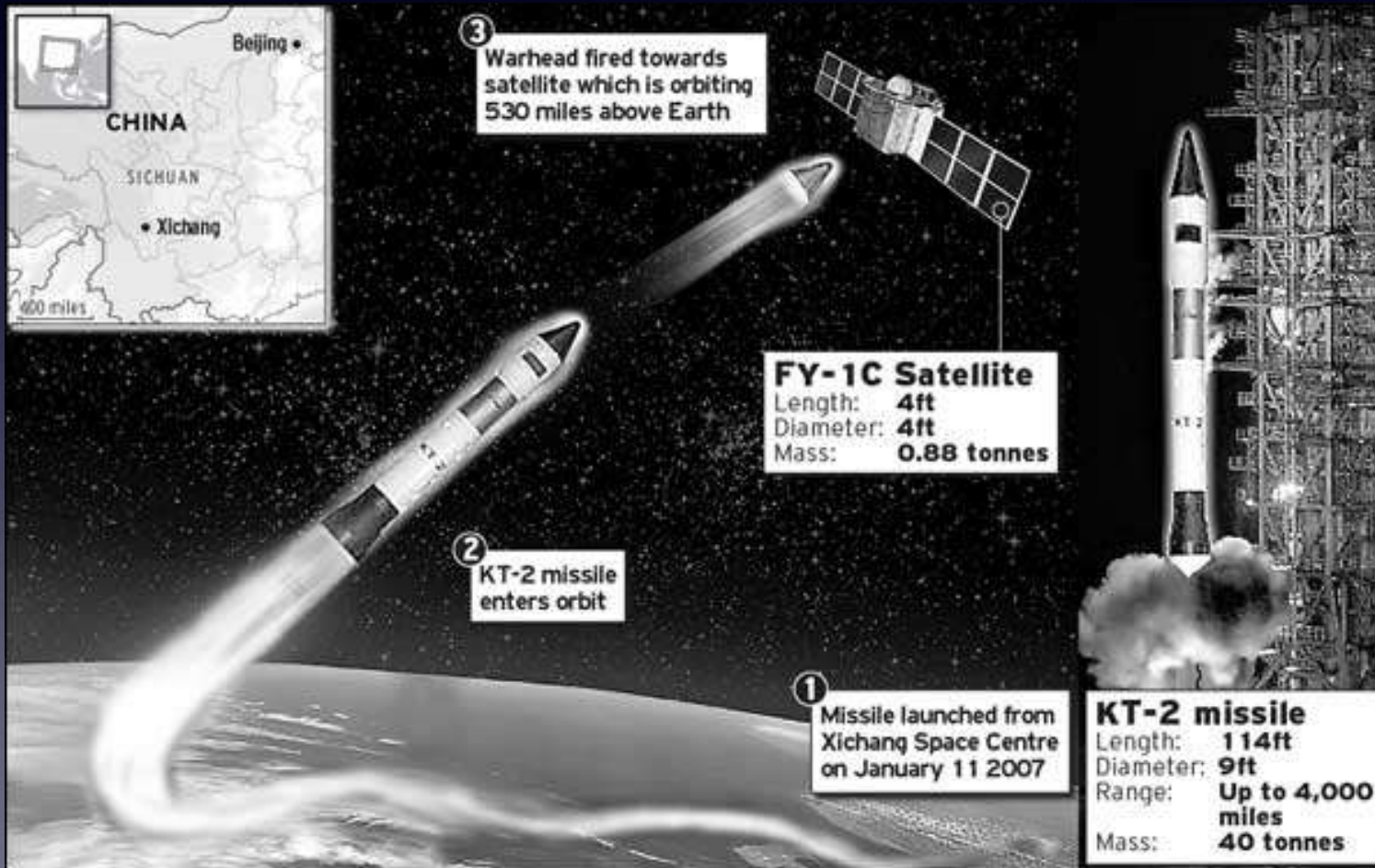


This graphic does not include the large amounts of debris from the Chinese ASAT (anti-satellite) program and 2009 collision events.

空间碎片不同高度的密度分布[NASA report to UNOOSA of 2011]



风云1-C实验

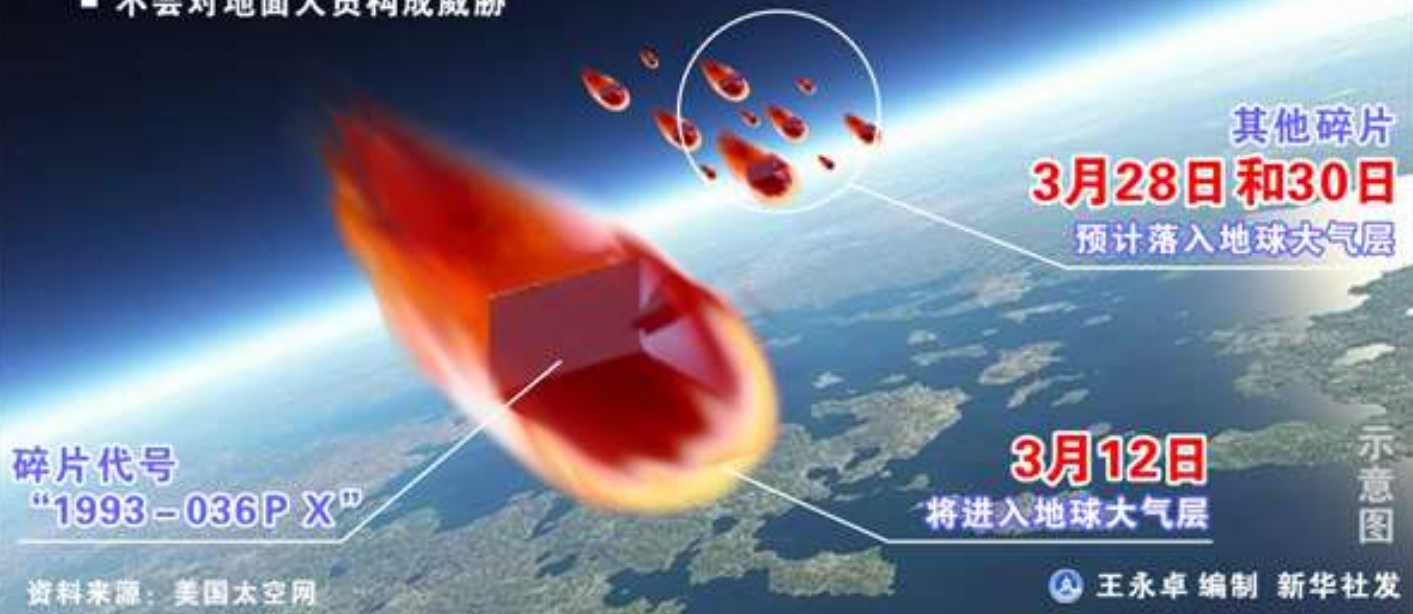


美俄卫星碰撞事件

美俄卫星相撞部分碎片本周坠落地球

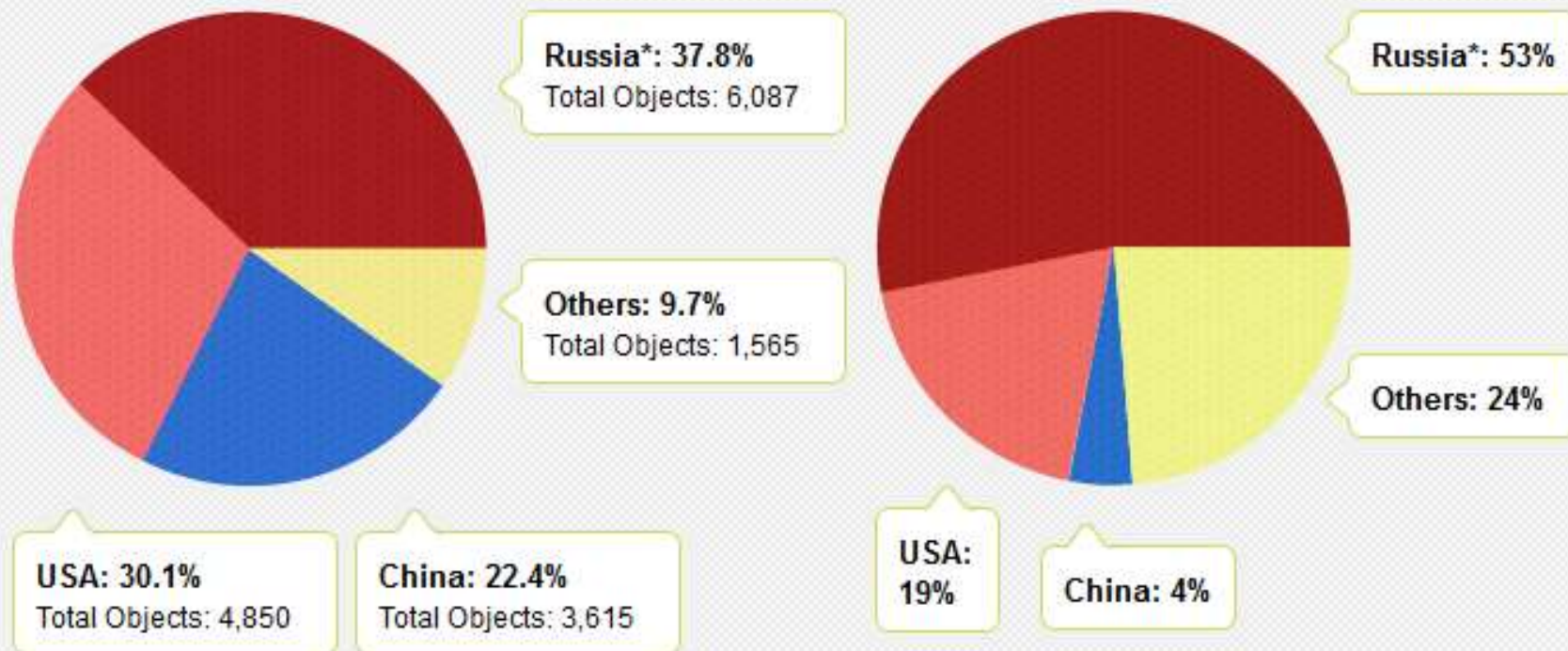
2月10日，美国“铱33”卫星与俄罗斯已报废的“宇宙2251”卫星相撞产生的太空碎片

- 大小：一厘米左右
- 可能在地球大气层化为灰烬
- 不会对地面人员构成威胁



空间碎片所有国分布图

An interesting way of looking at who owns objects in space is to consider the percentage of ownership by number of objects (left) and by mass of objects (right).

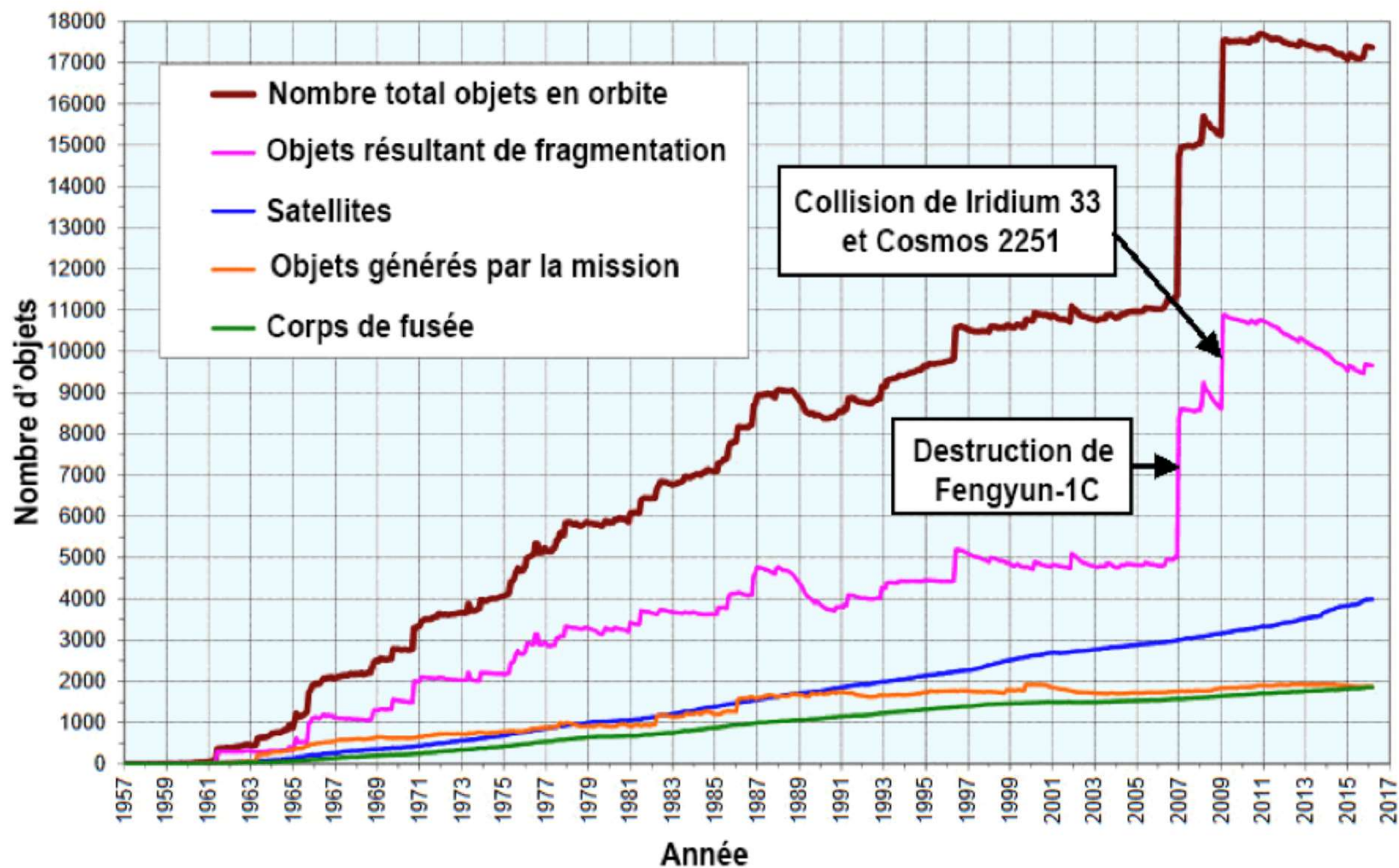


*(Includes former Soviet Union)

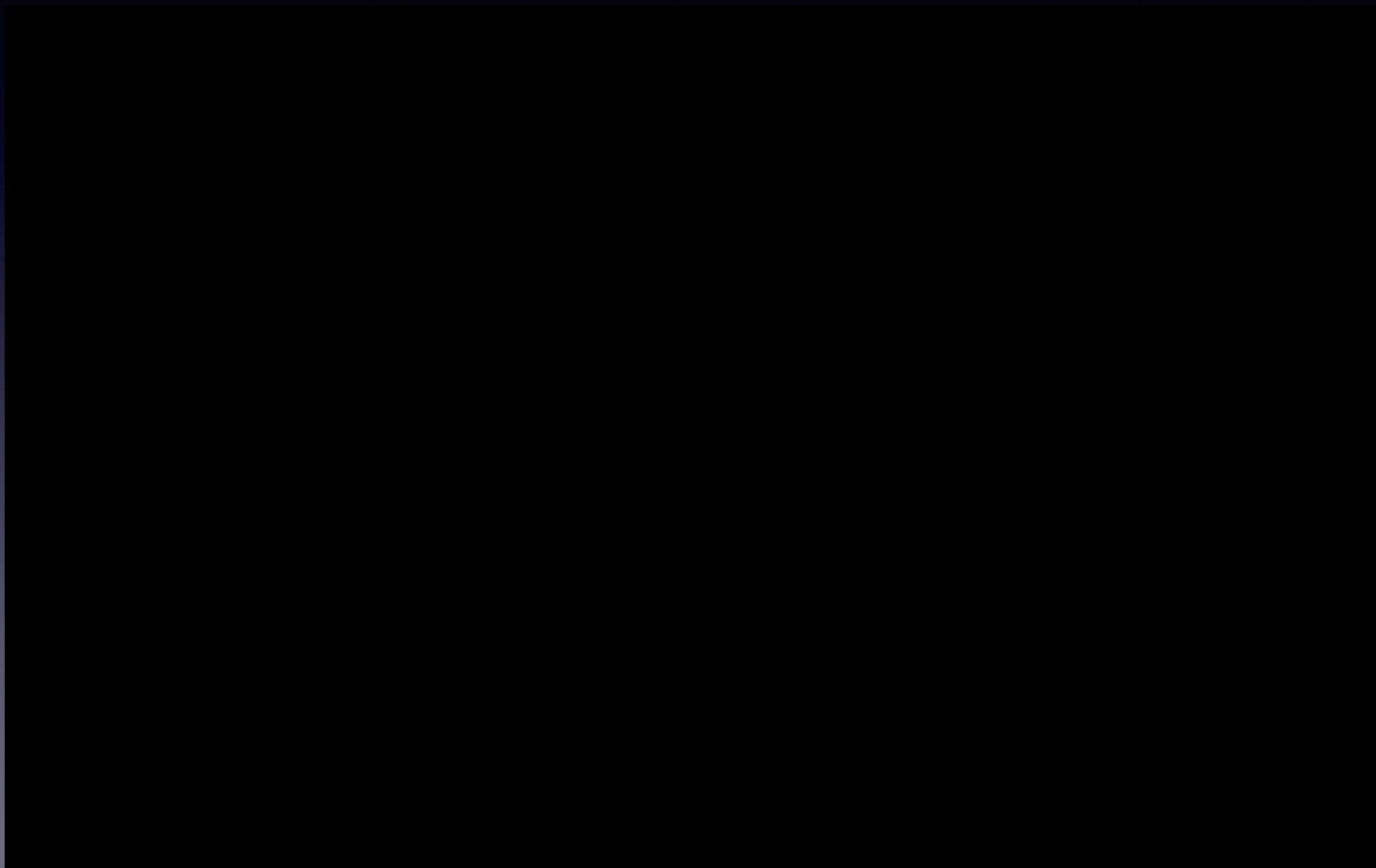
Left: (As of 1/4/12, cataloged by the US Space Surveillance Network; Data from Orbital Debris Quarterly News, 1/12 issue)

Right: (As of 1/12, cataloged by the US Space Surveillance Network)

空间碎片数目年变化图



空间碎片数目变化



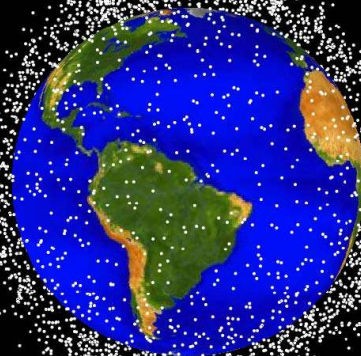
卫星数目变化图



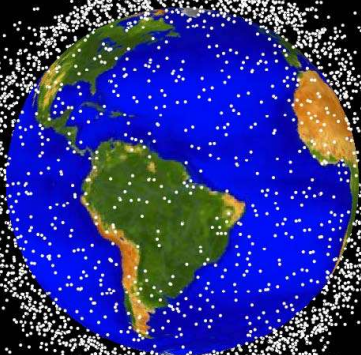
1960



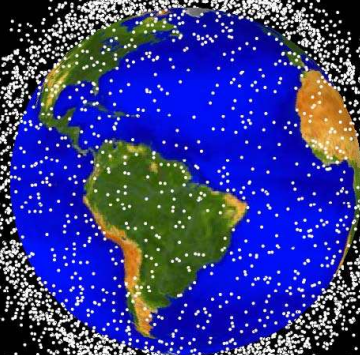
1970



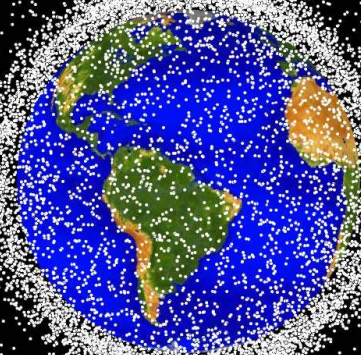
1980



1990

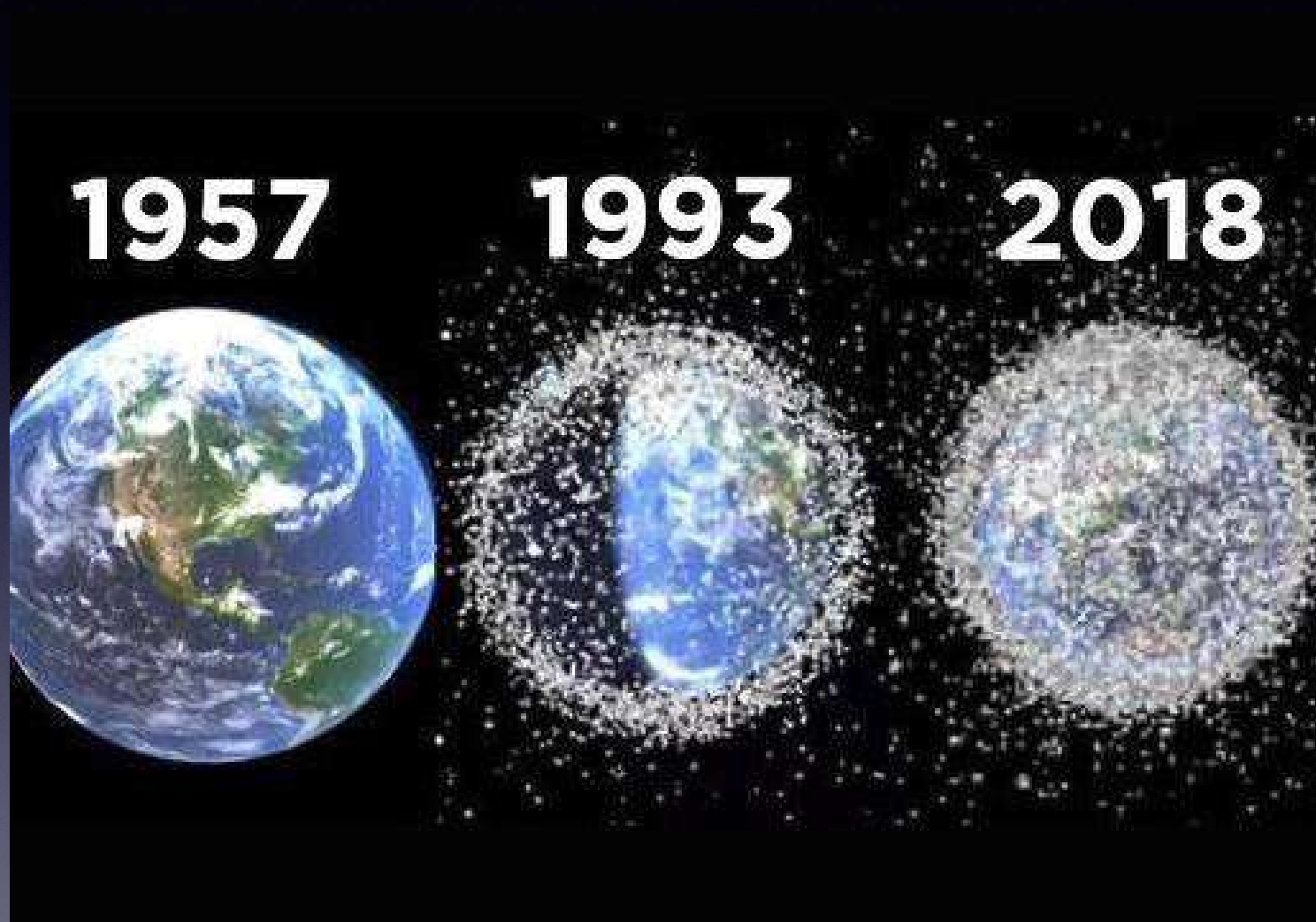


2000



2009

卫星数目变化图



截止2018年8月: 4857 satellites

作业

寻找一次空间天气事件，根据卫星数据分析其太阳和行星际源，认知其带来的影响，完成小论文一篇。