

空间环境对电子系统的影响

GJB451A《可靠性维修性保障性术语》中对可靠性定义如下:产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。GJB 450A((装备可靠性工作通用要求》作为对装备寿命期内开展可靠性工作进行指导的顶层标准,规定了开展装备可靠性工作的通用要求和工作项目,适用于装备寿命期各个阶段。装备可靠性工作包括可靠性管理、可靠性设计与分析、可靠性试验与评价和使用可靠性评估与改进等。装备可靠性工作的主要任务之一,就是可靠性设计。

空间电子设备工作于空间环境中,必须适应真空、高能粒子、冷黑等恶劣空间环境。GJB4293《装备环境工程通用要求》将环境适应性定义为:装备在其寿命期预计可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有功能、性能和(或)不被破坏的能力,是装备的重要质量特性之一,空间电子设备的环境适应性是可靠性设计的一个重要组成部分。

空间环境是除陆地、海洋和大气以外人类生存的第四个环境。空间环境中所说的空间通常指地面上几十公里高度以上的广大宇宙区域。主要的空间环境要素有:中性大气、电离层等离子体、地球基本磁场、高能带电粒子(太阳宇宙线、地球辐射带、银河宇宙线)和空间碎片、流星体等。

空间电子设备经历的环境非常复杂,包括气动力、振动、噪声、加速度、冲击、微流星、真空、冷黑、太阳辐射、磁场、原子氧、等离子体、质子、电子等。在设备研制过程中,对这些因素完全考虑是不可能的也是没有必要的,但空间电子设备作为飞行器的有效载荷,上述环境因素对其高可靠的完成工作任务产生巨大影响。

1.1 振动冲击

为了适应航天火箭发射(变轨、火工品爆炸冲击等)飞行中的气动力激励、发动机的振动激励等随机振动激励的影响,而提出对空间电子设备的振动、冲击等环境适应性要求。电子设备在振动和冲击环境下,由于振动的疲劳效应及共振现象,可能出现电性能下降、零部件失效、疲劳损伤甚至损坏的现象,提高装备的抗振动冲击能力,是保证产品性能和可靠性的重要手段。据统计,在电子设备失效的环境因素中,振动因素约占 27% 。

对策:对空间电子设备的结构进行固定、减震等优化设计,用胶固封印制电路板组件、固定电连接器、导线线缆等,以提高设备抗振动和冲击的能力。

按建造规范和 GJB4293 要求,结合具体产品,辨识引起设备振动的振源,详细分析振源的特性,预估振动环境数据,分析设备固有的动态特性、设备的关键部位和薄弱部位、故障失效模式与机理,建立模型,确立试验的基本准则;编制加速度、正弦、随机、冲击等环境试验大纲,大纲评审后进行试验,认真记录试验过程,试验结束后,对相关数据进行采集分析计算,编写试验报告进行工作总结,将试验结果通报设计部门,对抗振动冲击设计效果进行验证,以判断设备的环境适应性和可靠性。

1.2 噪声

噪声的产生是由于火箭发动机排出的高速气流与周围的空气混合时形成紊流,引起压力脉动,并以声速向四周辐射,以行波形式扫过卫星整流罩的表面所致。有两条途径传到整流罩内部的卫星结构上,一是机械传递,通过连接件传至卫星底部,二是声,外蒙皮的振动辐射到罩内空间,一般噪声的有效频域为 50Hz~10kHz,可引起卫星结构的强烈振动。巨大的噪声可对电子管、波导管、速调管、磁控管、继电器、导线和印制板组件等构成损伤或损坏。

对策:由于声学本身和航天器特性存在许多未知因素,采用分析方法来确定声试验环境量值和频谱特性还是很困难的,因此目前依靠经验预示方法来确定试验条件,在声学混响室进行试验。

声试验的目的就是考核空间电子设备经受声学环境的能力,从而暴露设计及工艺装配中存在的问题,验证空间电子设备结构动力学特性和电性能是否符合设计要求。

2.辐射环境

银河宇宙线是来自太阳系外宇宙空间的各种高能带电粒子,能量极高,穿透力极强,是造成单粒子事件的主要因素之一;太阳宇宙线是太阳发生耀斑等活动时从太阳发射出来的高能粒子流;地磁捕获辐射带(包括内辐射带和外辐射带)带电高能粒子等,对空间电子设备的影响主要表现在:

(1) 单粒子翻转(SEU)带电粒子轰击微电子器件,在其内部极短路径上产生大量电子-空穴对,在器件电场作用下迅速集结,使存储器件中的电路状态发生

改变，而造成单粒子翻转事件。即存储器中某一个比特的数据从‘0’变成‘1’，或从‘1’变成‘0’，导致程序错误运行或错误动作；

(2) 单粒子锁定(SEL)在 CMOS 电路中，高能粒子特别是重离子穿越芯片时，会沉积大量电荷，形成电流和压降，使晶体管的基射极正偏，使局部电路锁定在导通状态。单粒子锁定发生后，器件不再受其输入信号的控制，不能正常工作。

(3) 单粒子烧毁(SEB)倘若锁定电流过大，器件将被烧毁，形成单粒子烧毁事件，造成永久性故障。

(4) 辐照损伤通过对构成物质的电离作用和原子位移作用，造成晶格缺陷和损伤。

对策：选用抗辐射能力强的电子元器件，利用屏蔽材料进行防护；针对单粒子事件，要选用翻转敏感度低的器件，采取冗余容错技术、检错纠错技术，有断电和再次重新启动的功能，以便在发生锁定后进行解锁；采用放射性同位素为辐照源，进行空间粒子辐照环境试验，以验证防护效果。不同的空间电子设备在不同的轨道上，面临不同的辐射环境，应针对具体环境特点分别采取相应措施。

3. 真空环境

空间飞行器运行轨道高度不同，真空度也不同，轨道越高，真空度越高。海平面大气压力的标准值是 101325Pa；100km 为 3×10^{-2} Pa；200km 为 15×10^{-4} Pa；350km 为 6×10^{-6} Pa；600km 为 5×10^{-7} Pa；1000km 为 8×10^{-9} Pa，已接近极高真空环境。

空间真空环境对电子设备主要产生如下影响。

3.1 散热

真空使系统与外部环境的热交换仅以辐射和金属接触传导方式进行，没有空气，所以气体对流和传导传热可忽略不计。若没有充分的散热能力，电子器件将工作于高温状态，影响其寿命和可靠性，甚至是器件损坏。

对策：采用导热管、辐冷板等，与热控设计人员一起分析、确认和实施，并试验验证散热措施的有效性。

3.2 真空放电

空间电子设备的一些高压器件和电路在真空环境下可能发生气体放电或击穿,以致造成器件或电路功能减退或永久损伤。电击穿是电极之间发生的自激放电,一般发生在 $1 \times 10^3 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 的低真空范围。当真空度达到 $1 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 或更高时,在真空中分开一定距离的两个金属表面,受到一定能量的电子碰撞,激发次级电子产生微放电,甚至电晕放电。

对策:加大电极间距离和填充介质有助于提高电极间的耐压。高压导线采用屏蔽线,其屏蔽皮接地,接插件使用带有 O 形环的高压接插件等。

3.3 黏着和冷焊

固体表面原有吸附的气体膜、污染膜、氧化膜等在真空条件下部分或全部消失,固体表面相互接触时便发生不同程度的黏合现象,称为黏着;如果除去氧化膜,使表面达到原子清洁程度,在一定压力负荷下接触表面可进一步整体黏着,即产生冷焊。空间电子设备的执行部件如步进电机等活动部件在此情况下就会出现故障,因此,必须采取防冷焊措施。

对策:选择不易发生冷焊的配偶材料,避免同种金属材料配偶使用;使用自润滑材料,或在接触面上涂敷固体润滑剂等。

4 热环境

热环境包括太阳辐照环境、地球反照与红外辐射环境、冷黑环境等,将形成约 $-100^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$,或更大范围的冷热交变温度环境。其中,对空间电子设备影响较大的主要是低温环境和冷热交变。低温和冷热交变环境可以使伸缩机构卡死,某些有机材料产生老化和脆化,电子元器件工作不正常或失效,降低设备寿命等。

对策:采取主动和被动热控措施,在空间电子设备的外壳上粘贴加热片和温度传感器,并采用隔热材料进行包覆。温度低于设定值时,可开启加热片加热;温度高时可开启辐冷板等吸热和导热措施,以保证电子设备在一定温度范围内正常工作。通过真空热平衡和真空热试验来验证电子设备的热设计。

4.1 温度与失效率的关系

影响元器件失效率最重要的参数是其工作温度。对于不同的元器件,工作温度的定义不同。例如,对于半导体分立器件和集成电路,工作温度是其有源区的温度(俗称‘结温’);对于电阻器,工作温度是其电阻体中点的温度。

对于大部分元器件而言,失效率随工作温度上升而呈指数规律上升,且可表

示为

$$\lambda = K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

式中： λ 表示失效率， K 是与元器件类型相关的常数； E_a 称为激活能； $k=1.38\times10^{-23}\text{J/K}$ 是玻尔兹曼常数； T 是元器件的工作温度。

激活能的大小反映了失效率随温度变化的快慢。不同类型的元器件或者不同的失效模式具有不同的激活能。如果 $E_a \approx 0.5\text{eV}$ ，则工作温度每上升 10°C ，元器件的失效率将增加 1 倍，这称为 10°C 规则。

元器件的最高允许温度主要受其可靠性要求的约束，与元器件采用的材料以及封装形式有关。常用元器件的最高允许温度如表 1 所列。例如，对于采用塑料封装的硅集成电路芯片，可安全工作在 150°C 以下的结温，如温度瞬时超过 150°C ，会产生隐形损伤，超过 175°C 就会即时失效。

表 1 常用元器件的最高允许温度

元器件名称	最高允许温度 / $^\circ\text{C}$	元器件名称	最高允许温度 / $^\circ\text{C}$
变压器	95	陶瓷电容	80~85
继电器	95	锗晶体管	70~100
碳膜电阻	120	硅晶体管	150~200
金属膜电阻	100	塑料封装集成电路	125~150
铝电解电容	85	金属封装集成电路	150~200
云母电容	70~120	化合物半导体器件	150~175
薄膜电容	60~130	电子管	150~200

元器件的工作温度 T 可表示为

$$T=P_D \cdot P_\theta + T_A$$

式中， P_D 是元器件的最大耗散功率， P_θ 是元器件的热阻， T_A 是环境温度，例如，当 $P_\theta = 100^\circ\text{C/W}$ ， $P_D = 1\text{W}$ ，环境温度 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 时，计算得到 $T = 125^\circ\text{C}$ 。

由式可知，降低元器件工作温度的途径是降低耗散功率，减少热阻，降低环

境温度。对于一定类型的元器件而言，在最高允许结温一定的条件下，最大耗散功率与环境温度成反比；在环境温度一定的条件下，最高允许结温越高，可以承受的最大耗散功率越大。

4.2 散热的途径

热对元器件的影响主要体现在两个方面，一方面，半导体器件的失效率随温度的增加而指数上升，多数元器件服从 10°C 规则，即温度上升 10°C ，失效率增加一倍，因此温度越高，失效率越大，寿命越短。另一方面，元器件的多数电性能参数（漏电流，增益，耐压，允许功率等）是温度的函数，因此温度的变化会引起元器件参数的变化，从而导致电路性能的变化。

防过热设计简称热设计，其目标是将设备、电路和元器件的温升控制在允许范围之内，同时要使内部各点间的温差尽量小。热设计重点考虑的要素是元器件自身的发热，元器件耐热或者对热的敏感程度、元器件与周围环境的换热能力。

电子设备或者元器件的散热可通过热传导、热对流和热辐射三种途径来完成。在实际情况下，这三种情况往往同时存在，但只有一种或者两种是主要的。例如，室温下，功率小于 $1/2\text{W}$ 的碳膜电阻，通过传导散去的热量占50%，对流散热占40%，辐射散热占10%。

了解空间环境，掌握空间环境对空间电子设备的影响，加强航天器电子设备的可靠性设计，首先就要明确产品使用的自然环境条件，也就是要求学生们积极的了解掌握、研究和适应空间环境。空间电子设备要想达到设计指标要求，必须加强其环境适应性设计，通过理论分析将环境适应性要求设计到产品中去，再通过严格的试验，验证设计的正确性并不断改进设计，使之达到性能指标，满足空间电子设备对高质量高可靠性的需求。