

# 空间光学遥感器可靠性设计研究

史漫丽, 吴南, 董杰, 原娜

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 空间光学遥感器是一类特殊的遥感器, 其可靠性设计是研制工作的重要组成部分。本文从空间光学遥感器的特点分析入手, 介绍了光学遥感器可靠性模型的建立方法。针对空间光学遥感器的特点, 从光学遥感器的防污染设计、活动部件设计、单粒子效应防护设计及静电防护设计方面对其可靠性设计进行了有针对性的阐述。

**关键词:** 空间遥感; 光学遥感器; 可靠性设计

**中图分类号:** TP73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2018)08-0761-04

## Research on the Reliability Design of a Space Optical Remote Sensor

SHI Manli, WU Nan, DONG Jie, YUAN Na

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A space optical remote sensor is a kind of special remote sensor. The design for reliability of a space optical remote sensor is an important part of the development process. This paper introduces and establishes a method for an optical remote sensor reliability model based on the characteristics of the space optical remote sensor. The anti-pollution design, design of the moving parts, design of single-particle effect protection, and the design of electrostatic protection were analyzed.

**Key words:** space remote sense, optical remote sensor, reliability design

### 0 前言

空间光学遥感器的可靠性设计是贯穿整个遥感器设计过程的一项重要工作<sup>[1]</sup>。遥感器可靠性设计与分析的目的就是通过有效、及时的可靠性管理、设计与试验, 经济地实现光学遥感器任务所要求的可靠性, 最大限度地降低遥感器在轨运行中发生重大致命性故障的概率, 保证遥感器能在轨、顺利完成任务。空间光学遥感器可靠性设计贯穿整个遥感器的设计过程, 要以遥感器整体功能和整体优化为首要目标。

### 1 空间光学遥感器可靠性设计的特点

空间光学遥感器是一类特殊的遥感器, 除了具有遥感器的一次成功、在轨不可修复<sup>[2]</sup>、长寿命、在轨空间环境复杂的特点, 还具有一些不同于其他遥感器的特点:

1) 光学遥感器中的光学元件极易受到污染。一旦污染, 光学效率大大降低, 整个系统的性能就会降

低乃至失效。

2) 光学遥感器上大量使用活动部件。这些活动部件多数无备份, 一旦关键机构出现卡滞, 整个系统就可能失效。

3) 光学遥感器中 CMOS 器件比较敏感, 一旦出现单粒子锁定, 整个系统或者关键通道就可能失效。

4) 光学遥感器中大量使用了静电敏感器件, 如 CCD 芯片和 CMOS 器件, 需要严格执行防静电措施, 以防造成系统失效。

因此, 空间光学遥感器的可靠性设计要从整体功能出发, 从整体及其组成要素及其各组成要素之间的相互作用和相互联系中综合把握可靠性设计要素, 保证光学遥感器整体功能。

### 2 空间光学遥感器可靠性设计流程

空间光学遥感器可靠性设计对其固有可靠性有决定性的影响。空间光学遥感器可靠性引入的“高机会区”是总体方案设想中、后期至初样阶段前期(完

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-06-03.

作者简介: 史漫丽(1985-), 女, 工程师, 主要研究工作为空间光学遥感器电子学总体设计、图像处理。E-mail: smanly016544@163.com。

成硬件和软件的详细设计)。型号研制工作每深入一步,对系统或硬件的设计修改就增加一份困难,所付出的代价也随之增加。因此,应制定严格的可靠性设计流程,并按照流程严格执行。空间光学遥感器可靠性设计流程如图1所示。

3 空间光学遥感器可靠性建模

空间光学遥感器可靠性模型应按照设备/部组件、分系统、系统的顺序依次建立能反映其组成单元可靠性关系的可靠性模型,用于可靠性预计、分配和故障模式影响分析等设计分析工作。空间光学遥感器可靠性模型是可靠性分析的重要组成部分。可靠性建模应关注以下几个方面:

- 1) 关注各单机、组件之间的可靠性逻辑关系。如串联、并联、串并联、并串联系统、表决系统等。
- 2) 考虑系统内单元的热备份、冷备份的关系。
- 3) 内有表决器的,考虑表决器对系统的影响。

空间光学遥感器的可靠性模型用可靠性框图表示(如图2所示)。每一个方框代表一个单元或功能。在可靠性方框图中,所有方框对完成任务来讲都是相互独立的。

空间光学遥感器可靠性模型可以按照系统、分系统、部组件自上而下的方式依次建立。一个完整的遥感器系统包含光学分系统、机构及结构分系统、电子学分系统、热控分系统。可靠性模型的建立要考虑这些分系统之间的关系,建立系统的可靠性模型。然后依次建立每个分系统进一步分解到部组件级别的可靠性模型,形成分系统的可靠性模型。设备/部组件级别的可靠性模型建立需要从元器件等最小结构单元

4 遥感器可靠性预计及定量化分配

4.1 可靠性预计

遥感器可靠性预计是从概率统计的观点对系统各级的可靠性进行的定量预测。可靠性预计的方法有相似产品法、元器件计数法、应力分析预计法<sup>[3]</sup>。相似产品法是一种粗略计算方法,只能用于方案阶段单机及设备数据比较少的情况。元器件计数法是根据元器件的品种、数量、质量等级进行的可靠性预计。这种方法比较简单实用,可比较全面正确地反映系统各级的可靠性状态。此方法用于型号项目研制初期。应力分析预计法主要是在完成详细设计后,考虑元器件的实际应力(如环境温度和振动等)所进行的预计方法,在元器件失效率模型和数据比较完整的情况下可以采用此方法。

可靠性预计的主要目的是通过对比发现设计中的薄弱环节,例如单点故障、元器件的选用问题等。可靠性模型和元器件失效率是可靠性预计的两个条件。元器件的失效率主要是根据其等级和EEE规范来确定的。遥感器主体结构、热控涂层、机构等在国内还暂无相应数据,可参照国外相关数据。

4.2 可靠性定量化分配

可靠性定量化分配与设计必须是在确定了系统工作环境、工作寿命、成败判据后才有确定的含义。遥感器研制和在轨工作过程所经历的事件和环境被称为遥感器任务剖面。遥感器可靠性设计需要考虑遥感器所工作的环境、在轨的工作模式及工作时间。从地面装调、测试、环境试验、靶场试验到遥感器发射上天的在轨运行环境都要考虑。在轨工作时间直接决定了失效率因子。对于频繁开关机设备,在进行可靠性设计时,还要考虑开关因子的设计。

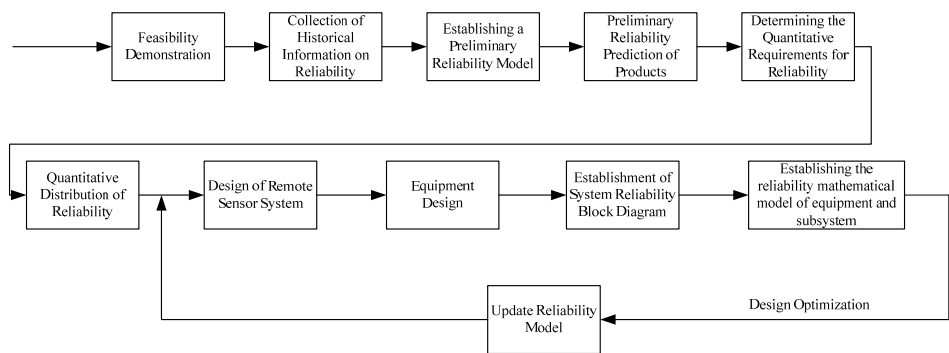


图1 空间光学遥感器可靠性设计流程 Fig.1 Reliability design process of spatial optical remote sensor



图2 遥感器可靠性模型示意 Fig.2 The schematic diagram of the reliability model of the remote sensor

可靠性预计与可靠性量化分配与设计是相辅相成的。可靠性量化分配设计与可靠性预计的结果应保持趋势上的一致。

## 5 空间光学传感器可靠性设计

### 5.1 空间光学传感器防污染设计

防污染设计是空间传感器设计的关键之一。国内外很多光学传感器都因为防污染设计不到位,付出了惨痛的代价。美国“阿波罗”7号飞船指挥舱的5个窗口都受到污染。美国陆地卫星3号上的多光谱扫描仪热红外通道(谱段 $10.4\sim 12.5\mu\text{m}$ )由于污染等原因发射后不到一年就停止了工作。我国早期发射的4颗极轨气象卫星,其主载荷扫描辐射计的红外探测通道信号,均存在不同程度的衰减。1988年发射的FY-1A卫星,红外通道开通就衰减了70%,15天后就失去使用价值,经过分析,主要原因是水汽凝结在低温下的红外探测器光学窗口表面所致。因此,要在光学传感器设计、生产、测试、试验、发射、在轨运行等各个环节采取防污染措施。

#### 5.1.1 污染的来源

污染物主要指在组件视线内或者残留在组件上的任何影响或者减弱传感器组件性能的外部分子或粒子。这些分子或粒子会引起光学器件表面状态改变,对传感器完成任务造成不利影响。

污染是环境因素综合作用的结果。由于光学传感器入瞳处裸露,卫星上的可凝挥发物及姿控发动机喷出的物质可能造成污染。光学传感器自身材料随环境发生的化学变化及自己的放气也会对自身造成污染。一些具有多孔结构的材料,如复合材料,在一定湿度条件下吸水,在空间高真空环境条件下就会形成水汽,进而对光学传感器的光学系统造成污染。另外,光学传感器上使用的粘合剂、结构件上的涂料、垫圈、密封圈、聚酰亚胺材料等,在低温真空环境下,受到辐照的影响会产生可凝挥发物。这些挥发物附着在光学元件表面,造成系统性能下降乃至失效。杜瓦材质产生的气体会使真空度不断下降,从而增大制冷机负载,造成系统性能下降。

#### 5.1.2 防污染措施

防污染工作的目的就是要将污染减小到可以接受的程度以确保光学传感器的性能。因此,一定要从设计到在轨运行全过程采取污染防护措施,制定污染控制技术和计划流程,严控污染源。确保每个潜在污染源全过程都有应对措施。主要措施归纳如下:

1) 正确选用相机结构材料,尤其是制作复合材料构件时选用低挥发性的树脂、胶垫和弹性固定胶。

2) 利用热控技术使光学元件的温度高于周围物体温度,避免冷凝现象发生。

3) 相机活动部件选用可起润滑作用而不挥发有机成分的材料,如固体润滑。

4) 在湿度、温度和洁净度满足要求的环境下进行装调、测试和试验,在受控条件下运输和存放。

5) 温控包扎层开放气孔。

6) 对有挥发成分的零部件进行真空放气处理。

7) 发射入轨后在相机建立工作状态阶段,进行相应的加热去污(放气)操作。

### 5.2 空间光学传感器活动部件设计

空间光学传感器上大量使用了活动部件,如调焦机构、光路切换机构、制冷机、滤光轮机构等。空间光学传感器要求的在轨寿命长达8年以上。长寿命的要求使得有些机构在轨工作次数达到上万乃至千万次以上。电机故障、齿轮磨损卡滞、轴承磨损卡滞都会使得整个系统失效。因此,活动部件的设计也是空间光学传感器设计中的关键部分。为防止活动部件出现在轨卡滞等现象,在设计时采取防冷焊等措施。具体如下:

#### 1) 齿轮啮合面防冷焊

齿轮啮合面是滑动摩擦,摩擦面相对较大,涂膜不是十分理想的办法。所以,在啮合齿轮副中小齿轮采用非金属材料聚酰亚胺,可彻底解决齿轮冷焊问题。

#### 2) 滚珠丝杠副防冷焊

滚珠丝杠副的活动面较大,螺母、丝杠和导珠管都与滚珠有活动面,对滚珠采取防冷焊措施,即在金属滚珠表面,用离子溅射防冷焊膜。

#### 3) 电机轴承及转动轴承防冷焊

电机轴承及旋转机构轴承的滚珠与轴承体接触面较多,且为承力件,需要进行放冷焊处理,即在金属滚珠的表面采用离子溅射防冷焊膜。

### 5.3 空间光学传感器单粒子效应防护设计

单粒子效应是单个高能质子或重离子入射到电子器件上所引发的辐射效应。包括单粒子锁定、单粒子翻转等。光学传感器中CMOS器件比较敏感,CMOS探测器一旦出现单粒子锁定,整个系统或者关键通道就可能失效。

#### 5.3.1 单粒子锁定防护设计

单粒子锁定,是单粒子效应的一种,单粒子入射产生的瞬态电流会导致设备功能性损坏。单粒子锁定主要发生于CMOS器件中。正常情况下,CMOS器件寄生的可控硅处于高阻关闭状态。当单个带电粒子入射时,产生的瞬态电流使其导通。当可控硅的正反馈特性使得流过器件的电流不断增大,进入大电流再

生状态,便发生单粒子锁定效应。对于一些航天级器件,锁定电流高达几安培,从而导致器件局部温度高于正常工作温度,导致器件永久性损坏。航天光学遥感器上的器件很多为CMOS器件,在整个成像链路中起着决定性的作用。若发生单粒子锁定,即导致整个光学遥感器的失效或关键通道失效。因此,光学遥感器可靠性设计中要十分重视CMOS器件的单粒子锁定防护设计。

单粒子锁定防护主要考虑以下措施:器件在选型时尽量选择器件本身具有抗单粒子效应的工艺。在电路设计过程中,为防止发生单粒子锁定,在印制板的电源线上串联限流电阻。另外,对于数据线、地址线要使用二极管进行旁路保护,有效防止电路因强电磁干扰锁而烧毁。

### 5.3.2 单粒子翻转防护设计

单粒子翻转是单个高能粒子作用于半导体器件,引发器件的逻辑状态发生异常变化。对单粒子翻转敏感的主要为存储器件和与控制有关的器件,包括CPU、控制器、逻辑电路和FPGA电路等。单粒子翻转多发生在存储器中,会造成bit位翻转,多为瞬时故障,通过程序的重加载可以自行修复。根据以往经验,软件的抗单粒子翻转设计也很重要。

对于容易受到单粒子翻转影响的逻辑器件或者大规模集成电路等应特别关注,尽量选择单粒子翻转率较低的器件。

为防止重要数据由于单粒子翻转造成错误,软件设计时应考虑将数据放在3个不同的物理地址,采用三选二表决,可以降低由于单个数据出错造成错误。对于程序中的计数值、定时值都采取屏蔽措施。

### 5.4 空间光学遥感器防静电设计

空间光学遥感器中大量使用了静电敏感器件,如CCD芯片和CMOS器件,需要严格执行防静电措施,以防造成系统失效。

静电敏感的元器件是任何要求用小能量来切换状态或在高阻抗线路中要求电压小变动的逻辑电路族。敏感的电路族有CMOS、PMOS、NMOS和低功耗TTL器件等等。

空间光学遥感器在设计上,应十分重视静电防护设计,严格执行关于CMOS器件防静电设计的要求。空间光学遥感器每台电子设备均进行相应的防静电设计。对重点器件应制定有针对性的防静电检查措施。同时,在元器件、电路板和设备的运输、储存、焊装、调试和试验过程中,单机研制单位应制定完善

严格的防静电规章制度,相关人员要经过培训,严格进行过程控制,严格执行防静电规定。做到在静电防护环节上,可靠性和安全性完全有保障。

## 6 FMEA 分析

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)即故障模式影响分析。故障影响即故障模式对使用、功能或者状态所导致的结果<sup>[4]</sup>。进行FMEA分析是为了系统地、全面地查明一切可能的故障模式及其影响,根据分析的不同时机提出对故障模式采取何种补救措施。通过FMEA分析找出遥感器的“单点故障”<sup>[5]</sup>。所谓的单点故障是指这种故障发生时,就会导致不可接受的或者严重的后果。遥感器应在设计、工艺、管理等方面采取切实有效的措施来避免单点故障,提高整个系统的可靠性。

## 7 总结

空间光学遥感器的可靠性设计,是贯穿于遥感器整个研制过程中的一项重要工作。掌握可靠性设计对于遥感器整体功能和整体优化的实现有重要帮助。

### 参考文献:

- [1] 浦轲. 卫星可靠性设计原理概述[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(4): 62-67.  
Puke. Overview of satellite reliability design principles[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(4): 62-67.
- [2] 王世清, 王靖, 俞伟学. 小卫星贮存可靠性研究[J]. 质量与可靠性, 2011(4): 8-11.  
WANG Shiqing, WANG Jing, YU Weixue. Study on storage reliability of small satellites[J]. *Quality and Reliability*, 2011 (4): 8-11.
- [3] 廖炯生. 长寿命卫星的可靠性问题[J]. 中国空间科学技术, 1983(3): 33-38.  
LIAO Jiongsheng. Reliability of long-lived satellite[J]. *China Space Science and technology*, 1983(3): 33-38.
- [4] 刘强. 基于失效物理的性能可靠性技术及应用研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2011.  
LIU Qiang. Research on performance reliability technology and application based on failure physics[D]. Hefei: National University of defense technology, 2011.
- [5] 马景. 航天火工装置可靠性设计、试验、评估实用方法与程序[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(2): 59-63.  
MA Jing. Applicable methods and program for reliability design, rest and evaluation of pyrotechnic devices[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(2): 59-63.