

# 航天发射故障机理与故障规律分析

徐克俊<sup>1</sup> 郑永煌<sup>1,2</sup>

(1 中国酒泉卫星发射中心 2 西安交通大学系统工程研究所)

**摘 要** 分析、总结航天发射故障机理与故障规律,并提出具体的预防措施。

**关键词** 航天发射 故障机理 故障规律

## 1 前言

广义地讲,故障是指系统(或称设备,或称产品)在规定的条件下不能执行规定功能的状态。在航天发射活动中,故障是指在规定的条件下,系统在检查测试中性能参数超出了合格范围或功能失常,或者接口不匹配。对于不可修复的产品如电子元器件、火工品等则称其为失效。对故障以及故障特性的科学认识,是进行故障诊断的重要基础。可以从多种角度、多个层次来认识故障,如故障分类、故障性质、故障模式、故障影响、故障后果、故障机理、故障规律等。本文主要围绕航天发射活动的特点,分析其故障机理和故障规律,并总结故障产生的主要原因和预防对策。

## 2 航天发射故障机理分析

一般而言,设备发生故障都有其内部原因和外部影响因素,观察到的现象是其外部表现形式。因此故障诊断需要研究故障的微观规律和宏观规律。其中故障发生的微观规律,就是故障发生的机理,包括外部环境影响因素和内部固有缺陷的原因。

### 2.1 外部环境影响因素

外部环境对设备状态的影响,主要表现在自然环境的影响,人和啮齿动物的影响,以及交付、使用和维修活动的影响等 3 个方面。

(1)自然环境对设备的影响因素。主要包括气象条件(如风、雨、雷、电、高温、低温)、地域条件(如潮湿、干燥、盐雾、风沙、低气压)和电磁环境(如电磁暴、电磁干扰)等的影响。设备在受到过高的自然环

境应力作用下,往往会影响其功能和性能。

(2)人和啮齿动物对设备的影响因素。人是设备的使用者和维修者。人在使用、维修过程中,如果发生人为差错,出现“错、忘、漏、损、丢”和使用、维修不当将引起故障,影响设备的性能。在航天发射活动中,人为差错主要包括指挥错误、技术状态设置错误、操作动作错误、装配错误、检验错误、维修错误等。其中对产品危害最大的是技术状态设置错误。一个插头的连接错误或舵片装反的错误,可以造成整个航天发射活动的失败或计划严重推迟。造成人为差错的主观原因有三个类型:即操作作风型——责任心不强,不遵守操作规程,疏忽大意,盲目蛮干等;技术技能型——缺乏专业知识或操作技能,不懂或不熟悉设备性能和操作规程等;组织管理型——对使用或维修作业组织不严密、管理混乱等。其中不遵守操作规程和管理混乱,常常会带来严重后果,是必须要给予重点关注和防止的类型。

啮齿动物(如老鼠等动物)可能咬坏电缆或钻入电气、机械设备内部,对设备功能造成损害。

(3)交付、使用和维修活动对设备的影响因素。设备研制出来后,一般要经历包装、贮存、装卸、运输的过程,才能由生产厂转移到用户手中。在这个过程中,如果发生异常或过度移动,设备受到了超出设计允许范围的冲击、振动或静电积累,造成机械损伤或螺栓松动、零部件移位、电路板脱落、导线断开、焊点开裂或静电放电等损害,会严重影响设备功能;其次,设备在使用过程中经常进行功能检查和维修,如果次数过多,检查、维修不当,也会影响设备性能。典型的外部环境因素对设备的影响见表 1。

表 1 外部环境因素对设备的影响

序号	影响因素	对设备的影响
1	高温	对温度敏感的材料,电气材料绝缘性能、润滑油的粘性和润滑性、塑料橡胶件的尺寸、机械性能等均明显下降;电子元器件的参数发生漂移;弹性元件的弹性和金属材料的机械强度降低;设备外表涂、镀层起泡、剥落;配合件的间隙发生变化;炸药的安定性、火药的易燃性显著下降等。
2	低温	液压件和轴承的工质油、润滑油粘度增大;部件间摩擦力增加;塑料橡胶、金属件尺寸变化,发硬、变脆、易折、易断,密封性能降低、漏油、漏气;电子元器件参数发生漂移;有损伤的管脚开路;不同材料制成的配合件因收缩率不同间隙发生变化,严重时发生机械卡死;火药和固体燃料燃速下降等。
3	低气压	密封件漏气、漏液和变形;电气接点易烧蚀;抗电强度下降;产品易击穿等。
4	沙尘	转动件、滑动件摩擦增加,易卡滞,油路、气路易堵塞;继电器、开关易接触不良、拉弧;精加工面易擦伤;密封件易漏气、漏油等。
5	潮湿	绝缘电阻下降、易漏电;零件电阻降低,易使介质损耗、介电常数增加;降低零件耐腐蚀性、加快表面锈蚀;非金属材料易受潮膨胀;导线受潮耐压性下降,易击穿等。
6	盐雾	表面光洁度易损,影响相互配合;零部件机械强度降低;金属件易锈蚀;绝缘性能下降等。
7	霉菌	光学镜片模糊、损坏;金属零件腐蚀加快;材料绝缘性能下降;产品表面质量破坏等。
8	冲击振动静电	机械外伤疲劳损伤;结合部松动、脱落,甚至破坏;接触不良、开路;导线焊点、插头脱落、松动;电子元器件管脚和电极、熔断丝振断;仪表指针脱落或摆偏;磨破或扯断导线,两种材料脱粘;静电放电击穿 CMOS 电路或点燃火工品等。
9	人为差错	轻则损害设备功能,重则造成系统破坏、任务失败,甚至箭毁人亡等。
10	啮齿动物	咬坏电缆;破坏密封;钻入电机、设备内部,损害设备功能等。
11	电压波动	过高或过低电压将影响设备性能等。
12	电磁辐射	电子、电气设备受干扰,不能正常工作;电子、电气设备、仪表产生错误动作等。
13	功能检查与维修	次数过多或不当会损害设备功能等。

2.2 设备故障机理分析

故障机理是指引起产品故障的内部结构、内在工作方式、动作原理以及物理、化学特性等变化的内在原因。航天产品和发射设施的故障机理主要有以下几种:设计、制造、工艺、元器件(原材料)、性能老化、软件等。

(1)设计缺陷。是导致设备故障的重要原因。设备的可靠性是设计赋予的固有特性,即使承制方制造水平再高、工艺再完善、元器件质量再好,如果存在设计缺陷,设备也会出故障。常见的设计缺陷有:结构、电路设计不合理;抗干扰设计不到位;没有注意降额设计;电感线圈没有削尖峰设计;通风散热设计差;密封设计差;耐环境设计差;无防差错设计;匹配设计不良;精度、容量、量程设计考虑不周等。

(2)制造缺陷。是指设备在生产过程中装配、操作、元器件(原材料)选用、参数调整或校正不当等形成的固有缺陷。这是设备发生故障的重要原因之一。

(3)工艺缺陷。是指设备在生产中制定的工艺规程、工艺设计、工艺流程、工艺技术 etc 不合理给设备带来的缺陷。如焊接工艺、切削工艺、组装工艺不完

善经常会产生虚焊、公差配合过大或过小、遗留多余物等。这也是设备发生故障的重要原因之一。

(4)元器件(原材料)失效。是影响设备发挥正常功能的重要原因之一。根据统计,通常元器件失效约占电子设备整机故障的 40%左右。同样,原材料失效引起设备整机故障在电气设备、电子设备和机械设备中也屡见不鲜。

(5)性能老化。在有耗损规律的设备中,性能老化是引起设备故障的重要原因,如橡胶密封圈、高效过滤器、空气开关、电解电容等,使用时间接近其有效寿命期时,常因性能老化发生故障。

(6)软件缺陷。一般属于设计缺陷。航天产品和发射设施因为计算机技术的普遍应用,经常会因为软件设计缺陷引起设备故障。这不仅表现在以计算机为核心的信息化设备上,也表现在大量使用的可编程的电子元器件、集成电路和智能仪表上,目前软件故障呈上升趋势。

2.3 元器件故障机理分析

元器件故障,习惯上又称为失效。熟悉、了解元器件的失效模式和失效机理,对于设备故障诊断是

非常重要的。

航天发射产品及发射设施系统复杂, 元器件种类繁多, 常见的有电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、集成块、电源模块、继电器、光电池、微电机、电连

接器、导线、焊片、传感器等, 其失效模式和失效机理也多种多样, 现列出主要品种的失效模式和机理如表 2 所示。

元器件失效一般是由设计缺陷、制造与工艺缺

表 2 常见的元器件失效模式与失效机理

序号	名称	失效模式	失效机理
1	电 阻	开路	线径不匀; 电腐蚀; 污染; 热老化; 电压电流过载; 引线疲劳断裂等。
		短路	电应力或热应力过大等。
		机械损伤	冲击、振动等机械应力过大, 导致基体开裂、膜体破裂、损伤等。
		接触不良	加工工艺缺陷、引线疲劳、电腐蚀导致帽盖与金属膜、碳膜接触不良等。
		阻值变化	原材料成分缺陷、工艺缺陷等。
		烧糊	设计时, 选用功率不够, 导致使用失效等。
2	电 容	开路	引线与电极接触点氧化、接触不良; 电解电容器的电解质干枯、阳极引出金属片腐蚀; 引线疲劳断裂; 浪涌电流过大等。
		短路	电扩散; 介质击穿; 污染和浸渍分解; 潮湿环境; 浪涌电流过大等。
		击穿	介质老化; 介质存在斑点、杂质; 金属离子迁移; 介质分子结构改变; 内部气隙等。
		电解液泄漏	密封损伤; 电腐蚀; 低气压; 高温; 老化等。
		容量变化	表面污染; 介质老化; 潮湿环境; 材料、工艺缺陷; 电极腐蚀等。
3	集 成 块	电极间开路或时通时断	电极间金属电迁移; 电腐蚀; 工艺缺陷; 多余物腐蚀等。
		电极短路	电极间金属电子扩散; 金属化工艺缺陷; 多余物等。
		引线折断	线径不匀; 引线强度不够; 热应力和机械应力过大; 焊料疲劳和电腐蚀等。
		电参数漂移	原材料缺陷; 可移动电离子引起的反应等。
		封装裂缝	封装工艺缺陷; 环境应力过大等。
4	继 电 器	接触不良	接触面污染、氧化; 弹簧片应力不足; 内部多余物造成机械卡滞等。
		误动作	结构件在应力下出现谐振等。
		触点粘结	设计容量过低, 造成过电流烧蚀等。
		弹簧断裂	材料疲劳、裂纹损伤、脆裂; 有害气体腐蚀等。
		漏电	封装环境潮湿, 封装后潮气进入; 引线绝缘子破损等。
		线圈断线	电腐蚀; 有害气体腐蚀等。
		动作延迟	内部机构工艺缺陷; 多余物造成机械卡滞等。
5	电 连 接 器	接触不良	接触面污染; 插件装配不到位; 弹簧片应力不足; 焊剂污染等。
		短路	多余物; 焊接工艺缺陷等。
		绝缘不良	多余物; 焊剂污染; 绝缘材料老化、破损; 焊接工艺缺陷等。
		机械失效	弹簧失效; 零件变形; 推杆疲劳断裂; 底座材料裂缝等。
		弹簧断裂	材料疲劳、损坏或脆裂等。
6	微电机	积炭多	炭刷材料、工艺缺陷造成磨损, 炭粉堆积等。
		卡死	炭刷、整流子与转子间隙小; 移相电容变化; 多余物等。
7	仪 表 指 示 器	指示迟滞	灰尘等多余物使动作摩擦力加大等。
		指针卡死	轴尖或指针机械变形等。
8	光 电 器 件	镜面发霉	霉菌的菌丝与光学镜面的油污、汗渍结合, 繁殖出新孢子; 潮湿环境等。
		镜面发雾	在高低温突变环境, 水气在镜面凝结; 表面粗糙等。
		脱胶	胶与玻璃膨胀系数不同, 温度骤变环境使胶层破裂、脱落等。
		输出不正常	设计、生产工艺缺陷等。

陷、原材料缺陷、使用不当和环境影响造成的。大多数情况下,通过失效分析、试验可以从以上方面找到具体原因,从而有效地采取针对性的措施加以纠正。

### 3 航天发射故障规律分析

航天发射活动在发射以前进行得最多的工作就是发射的技术准备和发射直接准备。其中,对航天发射产品和发射设施进行检查测试,发现故障、分离故障、排除故障,是消除隐患、保证发射成功的关键工作。航天发射故障的发生有其一定规律性。

#### 3.1 不同性质的发射试验故障规律

航天发射试验按发射试验性质可分为研制性试验、定型性试验、抽检性试验和训练性试验。发射试验性质的不同,故障出现的规律也不相同。

研制性试验是在产品研制阶段,用来考核、验证产品设计方案和各分系统设计方案是否正确,产品对实际飞行环境是否适应,系统间是否协调,为修改设计提供依据的发射试验。其特点是产品刚设计、生产出来,虽然经过了出厂测试的检验,但设计、生产、工艺、元器件、软件、使用操作、管理等方面的固有缺陷未得到充分暴露,所以,其故障原因是全方位的,但往往设计缺陷引起的故障占主导。

定型性试验是在产品定型阶段为取得发射和飞行数据,考核、检验产品性能是否符合指标要求而进行的试验。其特点是产品方案已获通过,已经历了研制性试验考核,即将由研制投入批生产。这类试验故障的规律是:设计缺陷相对减少了,制造和工艺缺陷相对较多,其它原因导致的故障仍然存在。

抽检性试验是指在产品已定型,成批投产后、交付使用前,按使用方要求,根据随机抽样的方法,对产品进行抽样检查的飞行试验。其特点是产品已完成设计、制造定型,生产、工艺过程已趋稳定。此类试验的故障规律,发生故障的原因往往是管理和使用操作不当,如技术状态出现不应有的变动,操作失误等。设计、制造、工艺、元器件、软件等缺陷也会偶然出现。

训练性试验是指为训练使用单位的发射指挥、操作人员而进行的试验。其特点是产品已交付使用单位,一般属合格产品,有的经过长期贮存。此类试验的故障规律,虽然发生故障的原因各类都有,但更多表现出来的是使用操作上的问题和设备、元器件

的老化问题。当然,如试验增加了其它应用性科研内容,对产品的技术状态作了局部变动,因这些变动考虑不周导致故障的情况也屡有发生。

#### 3.2 不同发射试验阶段的故障规律

产品设计、制造出来后,一般要经历出厂测试,发射场技术准备区的测试和发射区的测试,性能指标合格后才能实施发射。这被称为发射试验的出厂、技术准备、发射和飞行 4 个阶段。因为航天发射产品属于复杂设备,往往没有明显的耗损故障期,设计、制造已经定型的产品出现故障一般是偶然发生,其故障率近似为常数。所以,在发射试验的上述 4 个阶段,根据不完全的故障统计,存在着以下宏观规律:出厂测试发现的故障多,到发射场故障就少,出厂测试发现的故障少,到发射场故障就多;在技术准备区故障多,到发射区故障少,在技术准备区故障少,到发射区故障就多;在发射前出现故障,彻底排除后,产品上天飞行往往成功,在发射前未发现故障,产品上天飞行常常不顺利。因此,进行航天发射试验,应特别重视发射前的地面检查测试,要求“千方百计地暴露问题,千方百计地发现问题,千方百计地解决问题”,以彻底消除隐患,保证发射取得成功。

#### 3.3 不同发射试验环境的故障规律

产品在不同的发射场进行发射,因其所处气候环境、地理环境不同,故障发生有不同规律。例如在地处西北戈壁滩的酒泉卫星发射中心,属大陆性气候,昼夜温差大,空气干燥,沙尘大,冬季持续低温时间长。产品易发生静电引起的故障,沙尘破坏密封件的故障,以及夏季高温和冬季低温环境引起的故障;而地处西南的西昌卫星发射中心,潮湿多雨、雷电多,易引发漏电、电子设备遭雷击导致的故障。在航天发射试验中要因时因地制宜,有针对性地加以防范。

### 4 航天发射故障预防措施

通过对近 10 年我国航天发射故障的统计分析表明,航天发射故障主要由电子元器件问题、技术状态变化、生产管理和操作问题、技术文件错误、软件问题等引起的,为了减少故障,提高发射成功率,应分别采取有针对性的预防措施。

(1) 电子元器件问题。由电子元器件问题引发的

(下转第 63 页)

地位,发布新的《国家航天政策》,稳步推进其“重返月球”计划。俄罗斯为保持其在载人航天技术领域的竞争力,制定了载人探月与火星的长远发展规划。欧盟、印度、日本等航天国家,不仅积极谋求独立开展近地轨道载人航天活动,而且加快深空探测计划的进程,为独立开展载人航天活动奠定技术基础。航天大国加速推进载人航天技术发展动向表明,载人航天在航天技术领域的战略地位更加突显,对拓展国家政治、经济、军事与技术发展的战略空间有着重要作用。因此,载人航天发展规划作为国家整体发展战略的重要组成部分,其决策始终受到政府最高决策

层的高度关注,并在国家政策与预算等方面给予重点保障。目前,国际空间站建设仍是主要航天国家开展载人航天活动的重点内容。俄罗斯还提出在 2025 年前建造独立的空间站,为载人航天持续发展奠定基础。可见,空间站建设不仅可拥有巨大的空间资源开发与利用平台,而且能够突破在近地轨道组装大型航天器的技术。另外,开展载人航天活动,需要具有强大的经济实力和科学技术水平作支撑。2007 年,载人航天领域的国际合作形式出现多样化趋势,应引起我们的广泛关注和深入思考。◇

(上接第 49 页)

航天发射故障十分突出,特别是电连接器、继电器等元器件出现问题最多,须引起高度重视。在设计和生产过程中,应对元器件分门别类采取措施提高质量,同时摸清故障规律,制定定期维修检查、更换的制度和标准,降低元器件故障率或避免元器件问题。

(2)不受控的技术状态变化。每次发射,航天器、运载火箭以至发射设施的技术状态都会有所变动。这些变动相当于修改设计,如果考虑不周,容易带来故障。即使是一种成熟的航天器和运载火箭,其持续发射的周期可能有十几年,在这样长的时间内,要发生很多人事、管理和随之而来的设计、生产工艺改变,会使产品的技术状态存在偏离原设计的危险。实践证明,不受控的技术状态变化经常会引起严重故障,这是一条重要规律。在航天发射活动中要严格控制技术状态变动,遵守“充分论证、各方认可、试验验证、审批完备和落实到位”的五条原则要求。

(3)生产、管理和操作等问题。从元器件到整机生产过程中,由生产、管理和操作引起的产品质量缺陷已占质量问题总数 50%。因此,必须加大生产管理力度,制定切实可行的操作规范,强化培训上岗,加强检验复查,杜绝此类问题的发生。

(4)方案、图纸、技术说明书、细则等技术文件错

误。技术文件是产品研制生产和使用操作的依据,如果技术文件出现问题,必然会引发产品故障。因此,必须严格执行校对、审核、会签和批准制度,特别是涉及产品技术状态变化和系统间接口的技术文件,要重点组织进行复查复核。

(5)软件问题。随着计算机技术在航天发射领域的广泛应用,软件问题也日益显得突出。由于软件的复杂性和特殊性,软件故障具有很强的隐蔽性和突发性。因此,必须严格按软件工程化要求实施软件的开发,对关键软件要进行语句和分支 100% 覆盖性测试。

## 5 结束语

航天发射是一项高风险的工程,任何微小的失误都有可能引发严重的后果,甚至导致箭(船)毁人亡的重大事故。因此,必须深入研究航天发射故障机理与故障规律,采取切实有效的预防措施,把危险和风险控制到最低限度。◇

## 参 考 文 献

- [1] 虞和济.设备故障诊断工程.北京:冶金工业出版社,2001
- [2] 徐克俊.发射工程学概论.北京:国防工业出版社,2003