

## 可靠性基础知识讲座

### 第四讲 可靠性试验

廖 炯 生

可靠性试验是可靠性工程的重要组成部分。

狭义地说,可靠性试验是为了评价产品可靠性而进行的试验。其中,可靠性测定试验是在事先没有规定产品可靠性指标的条件下,用来测定产品可靠性特征量;可靠性验证试验的目的则是要确定产品的可靠性指标是否达到了规定的要求。而寿命试验或加速寿命试验则作为可靠性验证或测定的基本方法。

广义地说,为了评价或提高产品可靠性而进行的试验都叫可靠性试验。例如元器件老炼和筛选、整机老炼和环境适应性试验等通常都包括在内。可靠性增长试验的概念、方法和模型近年也有很大发展。

只要进行可靠性试验,就应当考虑这些试验能否充分保证产品可靠性或有助于提高产品可靠性。因此,必须讲究试验方法。所谓方法正确,是指可靠性试验应力的选择和

应力水平的确定都应当仔细考虑产品的失效机理,并且很好地模拟实际使用条件;在进行抽样试验时,抽样方法要符合统计学要求。

产品可靠性要求越高,需要试验的时间就越长,费用也越大。因此,通过测定或验证试验的方法来保证产品可靠性并不是在任何情况下都现实可行的,特别像卫星、导弹这样复杂、昂贵的大设备不可能做多少试验。但对元器件严格老炼筛选,整机进行老炼和环境适应性试验,分系统进行联试合练,以及对关键部件进行寿命考核试验等,都是必要的。是为了保障和提高整星、全弹可靠性的重要手段。

#### 筛选和老炼

筛选是通过一定的方法,将不符合要求的产品剔除,而将符合要求的产品保留下来的试验程序。广义地说,产品制造过程中各

16日这天,体力节律值是—98,低潮期。情绪节律值是62,高潮上升期。智力节律值是19,高潮上升期。具有比平时高的能力。出人为差错的概率较小。

#### 四、防止人为差错的方法

1.减轻操作人员的视觉负担,合理分配各感官的信息。

2.重要操作岗位,采用双岗制,加强对

操作者的监督。

3.重要的操作开关,如火箭点火开关,采用多个开关同时接通方可有效的形式。

4.机器上的仪表板,指示灯和座椅高度等设计必须有利于操作人员观察或动作。

5.重要操作要避开操作人员的生物节律“危险日”,即三个生物节律都处在临界期。

种工序质量检验,成品、半成品性能参数测试都有一个筛选过程。而可靠性筛选的目的是剔除早期失效产品,它的依据是许多产品失效规律呈“浴盆曲线”形状的这一事实。根据“浴盆曲线”理论,对产品(特别是元器件)进行筛选,包括适当提高应力使有缺陷的产品及早暴露出来,予以剔除,从而提高使用可靠性,是合理的。当然,对于不存在早期失效的产品,不宜采用筛选办法。例如卫星用蓄电池单体,是NBU(新的比用过的好)元件,就不筛选,而在卫星发射前全部换用新的。

虽然可靠性筛选要付出相当代价(费用和时间),但符合“预防失效”的原则,其经济效益仍是好的。

我国试验通信卫星所用电子元器件坚持“七专”,加强元器件制造过程质量控制,以提高固有可靠性,对于验收回来的“七专”元件,坚持检查性、补充性、针对性筛选, (“二次”筛选)以提高批使用可靠性;对于筛选和考核中,特别是装机调试中出现的失效元器件,坚持失效分析和质量反馈,配合承制厂采取纠正措施,争取逐步提高元器件固有可靠性水平。由于这样做的结果,取得了显著的成效。如1984年4月8日发射的卫星已在同步轨道正常运行了四年。其中控制系统,至今主份和备份线路工作完全正常,未发现电子元器件失效。

在筛选中,对于筛选剔除率(PDA)的控制很重要。PDA太高,有可能是产品存在严重缺陷,也可能是筛选条件太严,从而引入新的失效机理;PDA太低,有可能是产品缺陷少,也可能是筛选应力不足,不能有效地剔除早期失效。所以,过与不及都不好。一般说来,如果PDA过大,就没有理由认为剩下的产品是很可靠的,应当判该批产品不能用于系统。

常用的可靠性筛选方法有:

参数筛选:通过测试剔除参数超限产

品,获得与设计范围相应的参数均匀的产品;

检查筛选:用肉眼、放大镜、显微镜检查,可发现工艺或封装缺陷;用红外线检查可发现产品热设计上的问题;用X射线检查可发现产品内部缺陷;而微粒撞击噪声筛选(PIND)则可以用来发现产品内部的多余物,其灵敏度可达0.1微克。

密封性筛选:包括粗检漏和细检漏方法结合使用可检出大于 $10^{-5}$ 立方厘米/秒以至小到 $10^{-8}$ 立方厘米/秒漏率的元器件。

环境应力筛选:主要通过振动、冲击、离心和温度循环试验来剔除焊接不牢、键合不良、内引线配置不当、管芯引线和封装材料冷热性能匹配不当等元器件缺陷。值得一提的是高效应力筛选,它把筛选有效性最高的温度循环和随机振动结合。从机理上看,正弦扫描振动在规定试验时间内分摊到每一振点上的激振时间短,不足以暴露缺陷;而随机振动则是在整个试验时间内对所有频率同时激励,从而更有效地暴露缺陷,而且更符合导弹或卫星发射时存在着宽频谱振动的实际情况。温度循环之所以筛选效率高,是由于采用了高的变温率( $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )。

寿命筛选:高温贮存是一种热应力加速性寿命筛选,促使有缺陷产品提前失效,而对好产品起老炼稳定作用;功率老化则施加电、热应力使有缺陷产品加速暴露;高温及偏则在较高温度下对器件施加反向偏压,使硅片表面污染离子迁移和集中,产生表面沟道,予以剔除,效果较好。

老炼与筛选目的不尽相同,但有密切联系,正确的老炼筛选都能提高使用可靠性和稳定性。寿命筛选能对好产品兼起老炼作用,而老炼过程也对早期失效产品起筛选作用。

### 环境适应性试验

使用环境对产品可靠性影响很大,所以需要进行环境适应性试验。环境适应性试验

的着眼点和环境应力筛选有所不同,后者是通过施加一定的环境应力来剔除早期失效产品,一般用于元器件筛选;前者是要检验产品(整机)是否能在实际使用环境下可靠地工作,所以试验方法有以下三种:

现场使用试验:可真实反映产品在实际使用环境条件下的可靠性,同时也是检验人工模拟试验准确性的依据。在可靠性工作中,现场使用数据是很重要的。但这种试验取得数据的周期长、花费大,有一定局限性。

天然暴露试验:这是把样品暴露于天然气候环境(如热带、亚热带、寒带、高原地带等),通过定期观测,可以了解产品电参数、机械性能及外观的变化。

人工模拟试验:目的是在短时间内观察产品所能承受的环境应力大小。常用的环境模拟试验项目有低温、高温、温度循环、热冲击、低气压、潮热、盐雾、霉菌、沙尘、振动、冲击、碰撞、离心、运输、声振、爆炸、真空冷热浸、真空冷焊试验、高能电子和质子、中子辐照、 $\gamma$ 线辐照、紫外线辐照等。各种试验方法参照有关标准的规定。

在实用中,各种环境应力是组合地作用于产品的,因此有必要选择几种有代表性的环境应力进行组合试验,使其与实际使用环境接近。但综合环境条件的模拟是不容易的。重要的是正确规定环境试验条件和合理安排试验次序,试验设备要合格,要定期标定。

环境试验对航天产品质量和可靠性起着重要的保障作用。例如1987年9月发射并回收成功的科学试验卫星,其姿态控制部件在总装前的环境试验中,两次发现CMOS集成电路内部有多余物和内引线过长造成短路,从而及时更换处理。如果不经环境试验把关,其后果是不堪设想的。

### 寿命试验和加速寿命试验

狭义的可靠性试验主要就是寿命试验和

加速寿命试验。通过试验可以获得诸如失效率、平均寿命等可靠性特征量,以此作为可靠性预计、验证、鉴定和改进产品质量的依据。

寿命试验分为贮存试验和工作寿命试验。贮存试验要施加一定的环境应力,工作寿命试验要施加一定的环境应力和电应力。对于长寿命电子元器件来说,进行长期寿命试验是不现实的。因此广泛采用了加速寿命试验的方法,就是在不改变产品失效机理、不引入新的失效因子的前提下,提高试验应力,加速产品失效进程,然后根据加速寿命试验的结果,来预计正常应力下的产品寿命。根据应力施加方式,加速寿命试验分类为:

恒定应力加速寿命试验:将一定数量的试样分几组,每组固定一个应力水平进行试验。它的试验因素单一,数据易处理,外推精度较高,故最常用。

步进应力加速寿命试验:以积累损伤失效护理模型为依据。试验时,每组样品固定一个逐级升高应力的时间,直到足够数量的样品失效为止。这种试验周期较短,但精度较低。

序进应力加速寿命试验:可近似看作步进应力的每级应力差很小的极限情况。进行这种试验需专门程序控制,故很少采用。

进行一次寿命试验或加速寿命试验,要花费大量人力物力和时间。如果事前考虑不周,还很容易失败。因此必须进行周密的试验设计。一般来说,必须考虑以下问题:

1. 明确试验目的。可靠性测定试验是为了确定产品寿命分布和失效率、平均寿命等参数;可靠性验证试验是为了判断某批产品是否符合规定的可靠性指标要求;可靠性鉴定则为了鉴定产品的设计和生产工艺能否生产出符合可靠性要求的产品。应根据试验目的和寿命分布类型选择试验的标准和方法。在指数分布下,元器件按国标 GB1772-79《电子元器件失效率试验方法》进行,设

备按GB5080.7-86《电子设备可靠性验证试验》进行。对于威布尔分布的产品，可按GB2689.1~GB2689.4《恒定应力寿命试验和加速寿命试验数据处理方法》。

2. 寿试样品要在通过例行试验筛选的合格批中随机抽取，数量既能保证统计分析的正确性，又尽可能节省。

3. 试验条件要正确规定和严格控制其误差，这对保证试验的一致性、正确分析试验结果很重要。

4. 试验截止时间。做到全数试样失效是不现实的，从统计分析角度来看，也是不必要的。通常进行定数或定时截尾试验，又各分为有替换和无替换二种。

5. 测试周期的选定原则是使每周期内测得的失效数大致相同，测试工作量不致太大，但又要尽可能详细了解发生失效的时间。

6. 失效判据，通常的产品技术指标(参数)是否超出容许范围作为失效判据，也有用是否出现致命失效作为判据，应根据使用要求在试验前作出明确规定。

7. 数据记录和处理，应按产品失效数量和时间列出累积失效比率表，以便对失效分布类型及可靠性指标作出估计。还应对失效模式分别统计作出主次图，找出影响可靠性的主要因素。有条件时还应对失效样品进行失效护理分析，找出材料、工艺、设计方面的原因，采取针对性纠正措施来提高可靠性。

关于可靠性试验的抽样方法，本刊1986年第1~4期基础知识讲座栏已有介绍。

对于指数分布条件下寿命试验数据的统计分析方法，可列表概述如下。

表1 截尾寿命试验点估计公式指数分布

试验方式	总试验时间	点估计
定数，无替换	$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r$	平均寿命
有替换	$T = nt_r$	$\hat{\theta} = T/r$
定时，无替换	$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)\tau$	失效率
有替换	$T = n\tau$	$\hat{\lambda} = r/T$
定数逐步截尾，		对于定数截尾的
无替换	$T = \sum_{i=1}^r (b_i + 1)t_i$	无偏估计为
有替换	$T = \sum_{i=1}^r b_i t_i$	$\hat{\lambda} = (r-1)/T$
定时逐步截尾，		
无替换	$T = \sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^k b_j \tau_j$	
有替换	$T = \sum_{j=1}^k b_j \tau_j$	

## 可靠性增长试验

在设备研制阶段,在正式投产之前,用经过环境试验的样机进行以提高可靠性为目的的试验(这些试验不能代替合同或设备规范规定的其它试验),叫做可靠性增长试验。

所以,可靠性增长试验既可以是专门安排的,也可以包括老炼、筛选、环境试验等在内。总而言之,应充分利用一切试验中所获得的有关失效模式和失效机理的工程信息,通过适当的纠正措施,来实现产品可靠性增长。可靠性增长试验方法就是反复进行“试验—失效分析—纠正—再试验”这样一

个不断改进的循环过程。

在产品研制和生产的初期阶段,主要是由于设计、制造工艺的不成熟性和某些疏忽所致,系统可靠性不高。通过可靠性增长试验对产品作出成功的改进,将可能达到预期的增长。

从可靠性增长的观点看来,一切试验都是为了激发产品中潜在的薄弱环节使之表面化。系统性薄弱环节可引起系统性失效,经修理或更换并不能保证此类失效的重现,必须通过改进措施排除薄弱环节,以获得可靠性的普遍增长。此外,残余性薄弱环节可引起残余性失效,经维修或更换即可防止此类失效重现,从而获得可靠性的个别增长。(待续)

表2 截尾寿试区间估计公式(指数分布)

试验方式	平均寿命的区间估计
定数截尾	$\frac{2T}{x_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)} \leq \theta \leq \frac{2T}{x_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$
定时截尾	$\frac{2T}{x_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r+2)} \leq \theta \leq \frac{2T}{x_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$
仅知失效数的定时截尾	$\frac{\tau}{\ln\left[1 + \frac{r+1}{n-r} F_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2, 2n-2r)\right]} \leq \theta \leq \frac{\tau}{\ln\left[1 + \frac{r}{n-r+1} F_{\frac{\alpha}{2}}(2r, 2n-2r+2)\right]}$
定数截尾	$\frac{2T}{x_{1-\alpha}^2(2r)} \leq \theta$
定时截尾	$\frac{2T}{x_{1-\alpha}^2(2r+2)} \leq \theta$
仅知失效数的定时截尾	$\frac{\tau}{\ln\left[1 + \frac{r+1}{n-r} F_{1-\alpha}(2r+2, 2n-2r)\right]} \leq \theta$

表1中符号:

n 试验样品数  $t_i$  第*i*个样品失效时间  
r 失效数  $\tau_i$  第*i*批停试时间  
 $\tau$  停试时间  $b_j$  第*j*批停试样品数  
共分*K*批停试。

表2中符号:

置信度  $1-\alpha$   
 $x_{\alpha}^2(f)$ —自由度为*f*的 $\chi^2$ 分布的 $\alpha$ 下侧分位数;  
 $F_{\alpha}(f_1, f_2)$ —自由度为*f*<sub>1</sub>、*f*<sub>2</sub>的*F*分布的 $\alpha$ 下侧分位数,