

# 军用电子设备可靠性试验方法的确定及研究

## Determination and Research of the Method of the Reliability Test of the Military Electronic Equipment

祝军生 郝冠军 李明(中国航天八五——研究所,江苏 南京 210007)

Zhu Jun-sheng, Hao Guan-jun, Li Ming(China Aerospace 8500 Institute, Jiangsu Nanjing 210007)

**摘要** 可靠性试验是对产品的可靠性进行调查、分析和评价的一种手段。针对目前可靠性试验中的薄弱环节,文章对可靠性试验进行了研究,阐述了军用电子设备如何制定可靠性的试验方案及程序,介绍了可靠性试验的制定原则和试验方法。

**关键词** 电子设备;可靠性;试验研究;方法

中图分类号:TB114.3

文献标识码:A

文章编号:1003-0107(2010)06-0044-04

**Abstract:** The reliability test is a means of the investigation, analysis and evaluation of the reliability of the product. For the current weak links in the reliability test, the paper studies the reliability test, explains how to develop the program and procedures of the reliability test of the military electronic equipment and introduces the development principles and methods of the reliability test.

**Key words:** electronic equipment; reliability; test research; method

CLC number:TB114.3

Document code: A

Article ID:1003-0107(2010)06-0044-04

### 1 QFN 封装特点

随着电子技术的发展,对军用电子设备也提出了更高的要求。由于设备技术性能和结构要求等方面的提高,可靠性问题愈显突出。如果没有可靠性保证,高性能指标是没有任何意义的,从部件、元器件的角度来讲,电子元器件的可靠性水平决定了整机的可靠性程度。从整机来讲,可靠性贯穿于设计、生产和管理中。军用电子设备是否适应预定的环境和满足可靠性指标,必须通过可靠性试验进行鉴定或考核,有时还需通过试验来暴露产品在设计和工艺中存在的问题,通过故障分析确定主要的故障模式和发生的原因,进而采取改进措施。所以可靠性试验不仅是可靠性活动的重要环节,也是进一步提高产品可靠性的有效措施。

### 2 军用电子设备可靠性试验特点

军用电子设备的可靠性就是电子设备在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。采用可靠性试验的方法(如图1所示)评定设备的可靠性,其基本原理就是从可靠性定义中的“规定条件”、“规定时间”、“规定功能”出发,制定试验方案时,在确定试验条件下、试验方案和失效判决三个因素体现。

可靠性试验就是采用规定的工作条件 and 环境条件,将各种工作模式及环境应力按一定的时间和一定的循环次数,反复施加到受试设备上,经过失效的分析和处理,进行质量反

馈,并在设计、制造、材料或管理等方面进行改进,从而提高设备的固有可靠性。同时,通过试验评定设备的可靠性水平,作出接收或拒收的判决。

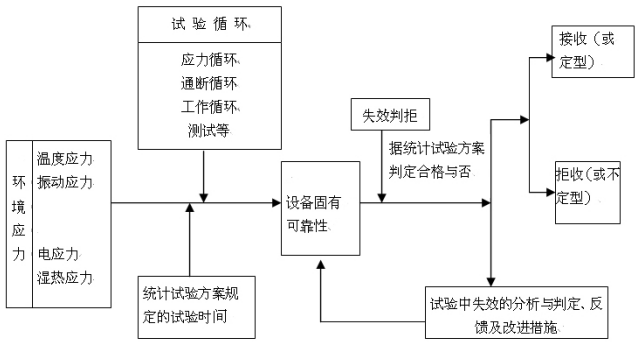


图1 可靠性试验框图

### 3 可靠性试验方法及选择

可靠性试验一般分为工程试验与统计试验两大类(如表1所示)。工程试验的目的在于暴露产品的可靠性缺陷并采取纠正措施加以排除(或使其出现概率低于容许水平)。工程试验包括环境应力筛选试验和可靠性增长试验。筛选试验是指暴露材料和制造工艺中的缺陷,剔除产品早期故障;增长试验是指激发产品故障隐患,进行设计改进,提高其固有可靠性。统计试验包括可靠性测定、验证、鉴定和验收试验。

表 1 工程试验和统计试验比较

试验项目	工程试验	统计试验
试验目的	保证和提高产品的可靠性	对产品可靠性水平给出定量的评价
试验条件	对暴露问题快速、有效	尽可能模拟实际使用环境
试验方法	多种多样不受限	需满足一定的统计规则
试验结果	产品可靠性得到提高	产品可靠性得到评估

一般来说,军用电子设备的可靠性试验可以分为研制阶段的试验、可靠性验收试验、可靠性增长试验、元器件老炼试验、过载能力试验等,这类试验的目的是了解设计是否满足了可靠性指标的要求,找出或排除设计与制造过程中的缺陷和不足,证明设计可靠性能否实现,因而可靠性试验可以根据设备研制过程中的不同阶段,不同要求进行各种不同的试验。对于不同的军用电子设备,可以选择不同的可靠性试验方法。

第一种方法是“试验——问题记录——再试验”模式。该方法就是把初步研制的产品,通过试验发现问题时,不是立即进行改进,而是把问题记录下来,待在一个试验阶段结束以及下一个阶段开始之前,根据各种失效模式的失效机理,集中地进行改进,然后再进行试验。这种方法比较适用于一批试验机中,出现几个问题,其中一种问题是占主要地位而其余问题是次要的情况。

第二种方法是“试验——改进——再试验”模式。该方法就是把初步研制的产品,通过试验,暴露产品的薄弱环节,分析产品的失效模式和失效机理,找出问题就立即改进,然后再试验证实所解决的问题,使产品的可靠性得到增长。这种方法在电子产品的研制阶段,通过系统试验,暴露出产品薄弱环节之后,根据具体情况,立即进行必要的改进是能够使产品的可靠性有大幅度的增长,这种方法比较适用于试验中只出现一种比较普遍和严重问题的情况,针对性较强。

第三种方法是“含延缓改进的试验——改进——再试验”模式。该方法是将方法一和方法二结合起来,通过试验发现了产品的问题,有些改进在试验中了产品的问题,有些改进在试验中立即着手进行,有些延缓到试验结束后再作改进。在试验中,对能及时改进的问题,立即采取措施改进产品,提高可靠性,在试验阶段结束后,把延缓的问题放至下次试验开始前进行改进,然后再进行试验,使产品的可靠性得到较大的增长。这种方法比较适合于试验中出现几种问题,并且一些问题能短期容易改进的,另一些问题却需要相当一段时间才能改进的综合情况。

4 军用电子设备的可靠性试验确定

军用电子设备的可靠性指标是一些综合性、统计性的指标,与质量性能指标完全不同,不可能用仪表、仪器或其他手

段得到结果,而是要通过试验,从试验的过程中取得必要的数  
据,然后通过数据分析、处理才能得到可靠性指标的统计量。  
可靠性指标的实现主要依靠现场试验或模拟现场条件试验,  
所以可靠性试验不同于一般设备的性能试验。

4.1 可靠性试验计划

军用电子设备可靠性试验计划应含有:(1)试验的目的和  
要求;(2)试验样机数量;(3)试验条件(环境、维修等);(4)试  
验类型的确定和统计试验方案的选择;(5)判断方法、失效判  
据、故障判据等等。这里需要指出的是样机数量,对于可靠性  
增长试验,试验样机多一些是有必要的,对鉴定和接收试验来  
说,样机多一些可以提高试验结果的置信度。一般鉴定试验不  
足三台则全数试验,接收试验不得少于3台,推荐样机数量为  
每批设备的10%。总之,可靠性试验方案要根据军用电子设  
备的实际使用条件和故障特征选择合适的试验方案。

4.2 可靠性试验方案的确定

(1)环境应力筛选方案

根据使用方向生产方提供的军用电子设备任务书或供需  
双方签订的合同,搞清电子设备在工作时所处的环境条件及  
给予它的应力。如果无特殊要求,应按电子设备总技术条件要  
求,在实验室模拟进行。筛选环境应力一般应优先采用温度循  
环和随机振动,如果经济条件或设备条件不许可,可采用强度  
较差的其他应力,如振动改为正弦扫频振动,温度循环改为温  
度冲击。

(2)增长试验方案

可靠性增长试验(如表2所示)耗费的资源和时间相当巨  
大,仅试验总时间通常为产品预期MTBF目标值的5~25倍,  
所以并不是任何一个产品都适合安排可靠性试验。新研制的  
复杂产品,适合安排可靠性增长试验。一般的新研制产品和改  
进型产品,可采用一般可靠性增长性措施,以提高它们的可靠  
性。通过试验,激发产品故障隐患,开展故障分析,重点找出系  
统性问题,采用优化产品设计、优选配套元器件和材料、改进  
生产工艺及试验验证等技术途径,不断减少系统性故障,提高  
产品的固有可靠性。

表 2 ESS 和 RGT 比较

试验项目	环境应力筛选(ESS)	可靠性增长(RGT)
目的	消除早期故障	消除系统性故障
时间	交付使用前	研制/使用期间
试样	全体产品	样品
方法	试验——激发故障	试验——改进——试验
故障处理	修复/更换	设计/工艺改进
处理对象	个别问题产品	全体产品

4.3 统计试验方案的参数确定

统计试验包括可靠性测定、验证、鉴定和验收试验(如表3

所示)。设备统计试验方案有:概率比序贯试验方案、定时(或定数)截尾试验方案、全数试验方案等。

表 3 统计试验分类

试验名称	统计分类	工程阶段	试验目的	试验方法	试验结果
测定试验	指标测定	研制开发	摸清产品当前达到的可靠性水平和问题	定时截尾, 定数截尾	点估计值, 区间估计值
鉴定试验	指标验证	设计定型 生产定型	验证其是否达到验证可靠性指标	标准型定时截尾, 可提前接收定时截尾, 序贯截尾	合格不合格
验收试验		批量生产	验证其是否保持鉴定时可靠性指标	标准型定时截尾, 可提前接收定时截尾, 序贯截尾全数	接收拒收

(1)  $\theta_0$  (可接收的 MTBF 值) 的确定。 $\theta_0$  应小于等于  $\theta'$  ( $\theta'$  是按照电子设备所处的环境条件和应力, 用可靠性预计方法确定的 MTBF 值)。 $\theta_0$  确定之后, 根据选择的鉴别比  $D_m$  ( $D_m = \theta_0 / \theta_1$ ), 就可以计算出  $\theta_1$  ( $\theta_1$  指最低可接受的 MTBF 值)。

(2) 生产方风险率  $\alpha$ 、使用方风险率  $\beta$  的选择。一般情况下, 供需双方签订的合同(包括协议书)已定的可按合同执行。如果合同无规定, 或是生产厂家自行验证, 一般情况下可选择 0.2~0.3, 高风险可选择 0.3~0.4。

(3) 试验时间  $t$  的选择。除与  $\alpha$ 、 $\beta$  有关外, 主要取决于电子设备属于何种类型, 该设备能否长时间进行可靠性试验, 试验费用的大小, 可在最佳样机数与最大样机数之间进行选择 ( $t = T/n$ ,  $T$  为截尾时间)。

#### 4.4 测试周期的确定

测试周期必须合理选择, 周期太密, 会增加工作量, 周期太疏又会失掉有用的信息。可按下列公式计算, 然后确定:

$$\begin{aligned}
 R(t) &= e^{-\lambda t} = e^{-t/\theta} \\
 F(t) &= 1 - e^{-t/\theta} \\
 -\frac{t}{\theta} &= L_n[1 - F(t)] \\
 t &= \theta L_n n \frac{1}{1 - F(t)} = \theta L_n \frac{1}{1 - \frac{r}{n}} = \theta L_n \frac{n}{n - r}
 \end{aligned}$$

其中  $t$ ——规定的试验时间  $r$ ——相关失效数  $n$ ——抽样数  $\theta$ ——MTBF。测试时间太长, 可确定 1 天测 1 次, 及时发现产品失效并做好记录。

#### 4.5 失效的分析与处理

对受试的失效设备可以采用测试、应用研究、解剖、射线

分析、显微镜分析、适当增加应力等级等方法进行失效机理的分析研究。在为寻找故障而开动设备的期间发现的失效, 若不是由独立失效引起的从属失效, 应给予分类和记录。若不能确定其为相关失效, 就应作为独立失效按相关失效处理。

试验中反复出现失效时, 应及时分析失效原因, 采取有效的纠正措施, 并将措施反映到全部受试设备上继续试验, 直至截尾不再出现此类失效。反复失效采取纠正后的验证试验时间, 不得少于反复失效出现第一个失效时的累计试验时间。

### 5 军用电子设备可靠性试验的数据分析与处理

#### 5.1 可靠性试验的数据分析

可靠性试验数据分析的基础就是产品寿命分布函数及参量之间的关系。例如, 故障与应力(电、热、振动、温度等)的对应关系, 故障与产品早期性能变化的规律等, 这些包含有两个变量的数据, 在分析时就可利用相关及回归分析方法, 或用最小二乘法, 从试验中取得的数据, 可以制成各种图, 如直方图、折线图等, 拟合成直线、曲线用以确定产品故障(寿命)的数学模型, 由模型就可写出其可靠性指标, 最后推算出该产品的可靠性参数值。

军用电子设备的故障模式(寿命分布)可以用指数分布的数学模型来描述  $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/\theta}$ ,  $MTBF = \frac{1}{\lambda}$  (小时), 通过试验, 只要取得 MTBF 的估计值(观测值), 就可算出失效率  $\lambda$  及可靠度  $R(t)$  来。然后与设计过程中的预计值相比较, 达到指标要求, 试验停止, 达不到则继续试验。

#### 5.2 可靠性试验数据的处理

可靠性试验的数据是一些实际的、多因素的信息集体, 对于军用电子设备来说, 试验的目的不同, 所需采集的数据种类就不同, 因此要用试验的观测值来估计设备的可靠性特征值, 这是电子设备可靠性试验数据处理的关键。MTBF 是衡量军用电子产品可靠性的一个重要指标, 检验下限应等于军用电子设备最低可接受的 MTBF。

实际工作中常采用观测值的点估计即  $\hat{\theta} = \frac{T}{r}$ 。

式中  $\hat{\theta}$  为 MTBF(电子设备)观测点估计值,  $T$  为电子设备试验时间总和,  $r$  为电子设备在试验中的故障次数。

还有一种故障强度点估计, 当  $r > 0$  (有故障发生时):  $\hat{\lambda} = \frac{r}{T}$ ,  $\hat{\theta} = \frac{T}{r}$ ;

当  $r = 0$  (试验过程中未发生故障):  $\hat{\lambda} = \frac{1}{3T}$ ,  $\hat{\theta} = 3T$ 。

式中,  $\hat{\lambda}$  为电子设备失效率点估计值;  $\hat{\theta}$  为电子设备 MTBF 的点估计值,  $T$  为电子设备试验时间总和,  $r$  为故障次数。

利用点估计的方法可以大致估算出军用电子设备 MTBF。这是一些经验公式, 可以为验证设计可靠性进行可靠性试验,



以实现快捷处理试验数据。

### 5.3 可靠性增长试验故障数据的处理

#### 1) 增长趋势有效性检验

目的:确认产品的可靠性是否已有明显增长。

方法一:  $\chi^2$  检验法。

设  $T_i$  为发生第  $i$  次故障时参试产品的总累积有效试验时间( $i=1,2,\dots,r$ );

$T$  为试验中止时受试产品的总累积有效试验时间。

$$\text{求出检验用统计量 } \chi = \sum_{i=1}^m \ln \frac{T}{T_i}$$

其中  $m = \begin{cases} r-1 & \text{当 } T=T_r \text{ 时} \\ r & \text{当 } T>T_r \text{ 时} \end{cases}$

选取检验显著性水平  $\alpha = 1 - C$ , 这里  $C$  为置信度, 常取 90% 和 95%, 如出现  $\chi > f(C, m)$ , 则可认为该产品具有显著的可靠性增长趋势, 否则不能确认其可靠性有明显的增长。

方法二:  $U$  检验法

$$\text{检验用统计量 } U = \frac{\sum_{i=1}^m T_i - \frac{mT}{2}}{T \sqrt{\frac{m}{12}}}$$

选取检验显著性水平  $\alpha$ , 如出现  $U < -U(\alpha, m)$ , 则认为产品可靠性有显著的增长趋势, 否则不予确认。

上接 38 页

从图 3 可以看到, 在  $t \approx 25h$  后, 系统即趋于稳定。若选系统的运行时间为  $t=600h$ , 在假设的失效率和修复率等参数下, 当系统稳定后, 系统的可靠度  $R(t)=0.8690$ , 当把初始参数  $\lambda_c$ 、 $\lambda_f$  和  $\mu$  输入网络, 在经过 22 次迭代之后, 可达到所需精度 0.01, 此时收敛点的可靠度计算为 0.869130。

此时, 可由神经网络的连接权值得出  $\lambda_c = 1.9 \times 10^{-4}h$ 、 $\lambda_f = 1.2 \times 10^{-5}h$ 、 $\mu = 0.336$ , 系统平均无故障工作时间为

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_c + \lambda_f} \approx 4950.5h \quad (13)$$

### 3.2 结果对比

文献[6]中直接采用 Markov 过程法计算得到系统的可靠度为 0.8690, 而由神经网络仿真时得到的可靠度为 0.869130, 两者的相对误差在  $10^{-4}$  数量级, 从而验证了模型的正确性。

另外, 用模糊神经网络建立可靠度模型仅需 22 次就可达到所需的精度, 比文献[7]中采用两层 BP 神经网络所需 106 次迭代才达到收敛要快得多。

### 4 结束语

文章提出一个基于模糊神经网络的 Markov 可靠性模型来对分布式传感器网络的可靠性进行评估, 设计时把系统的期望可靠度作为网络的输出, 当网络收敛时, 可从神经网络的权值中获得相应的设计参数。仿真结果表明, 在所选的神

#### 2) 增长模型的拟合优度检验

目的:确认所选用的可靠性增长模型是否合适和有效。

方法: Cramer-Von Mises 检验方法检验用统计量:

$$C(m) = \frac{1}{12m} + \sum_{i=1}^m \left[ \left( \frac{T_i}{T} \right)^b - \frac{2i-1}{m} \right]^2$$

其中  $b = \frac{m-1}{x}$ 。选定检验的显著性水平  $\alpha$  (通常取 0.1) 并

根据  $m$  查得临界值  $C(m, \alpha)$ 。若  $C(m) > C(m, \alpha)$ , 则拒绝 AM-SAAA 模型, 反之则认为 AMSAA 模型可作为本次可靠性增长的评价模型。

### 6 结束语

军用电子设备的可靠性十分重要, 是产品质量的主要指标。由于军用电子产品在设计研制阶段经历了反复多次的“试验——分析——改进——再试验”的可靠性增长试验过程。在这个过程中, 由于采取了改进设计及工艺措施等一系列措施来消除失效, 使失效的发生逐渐减少, 而可靠性得以增长。我国的一些军用电子产品的可靠性指标与国际先进标准相比还有差距, 因此必须对国内外相关标准进行充分研究, 真正从产品方案的论证、设计、生产、试验和使用全过程中对可靠性水平作出准确的评价, 从而大大提高我国军用电子产品的可靠性水平。

络模型下, 所建立的可靠度模型收敛极快, 且与直接用 Markov 模型计算所得可靠度相对误差在  $10^{-4}$  数量级, 从而验证了模型的正确性。

### 参考文献:

- [1] 贾惠芹. 构造基于 WEB 的远程测控网络模型[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 307-309.
- [2] 马宝甫, 等. 微机应用系统可靠性设计理论与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [3] 魏利胜, 费敏锐. 分布式网络控制系统研究进展[J]. 工业仪表与自动化装置, 2009, (2): 16-22.
- [4] 王丽, 王晓凯. 基于支持向量机的无线通信网可靠性预测[J]. 计算机应用研究, 2007.
- [5] Chun-Yi Su, Oya, M., Hong, H. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems preceded by unknown backlash-like hysteresis[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(1): 1-8.
- [6] 张国鹏, 王晓凯, 邓娜. 基于 Markov 过程的网络控制系统可靠性研究[J]. 软件导刊, 2010, 9(1): 116-118.
- [7] Mahmoud A, Manzoul M S. Neural network for the reliability analysis of simplex systems[J]. Microelectron Reliab, 1990, 30(4): 795-800.