

电子产品可靠性技术丛书

可靠性试验

中国电子产品可靠性与环境试验研究所

电子产品可靠性技术丛书

可靠性试验

何 国 瑞
陈 浩 华
江 登 恕

编著

供
大
家
使
用

存
图
书
馆

傅
佩
琛

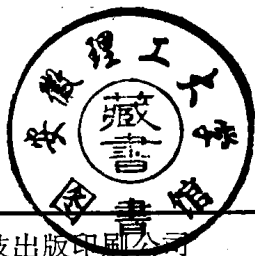
中国电子产品可靠性与环境试验研究所

87. 17/11

内 容 简 介

本书是电子产品可靠性技术丛书之一。全书共10章，第1～5章叙述了电子元器件的可靠性试验；第6～10章叙述了电子设备可靠性试验。本书除介绍可靠性试验的基本理论外，还着重介绍了可靠性试验的设计方法、实施方法和试验数据的分析处理方法。

本书适合于从事电子产品（包括元器件和整机）设计、生产、试验、使用的技术人员及科研、教学人员阅读。



出版发行：华飞科技出版印刷公司

（广州市1252信箱9分箱）

印 刷：华飞科技出版印刷公司印刷厂

出版日期：1987年8月

广东省内部刊物登记证第184号

前 言

本书是电子产品可靠性技术丛书之一分册。全册分“电子元器件部分”和“电子设备部分”两大部分。“电子元器件部分”共5章，第1、第3、第5章由何国瑞同志编写；第2、第4章由陈浩华同志编写；第6~10章由江登恕同志编写。

在这一分册中，编者通过对可靠性试验的基本理论，可靠性试验基础技术与方法，可靠性试验的设计与实施，可靠性试验的工程价值和可靠性试验数据的分析和处理等方面的介绍，使读者了解可靠性试验工作的全貌，并掌握开展可靠性试验工作的方法。因此，在编写过程中，着重介绍了可靠性试验技术在可靠性工程上的应用，其中包括具体试验方法、有关的试验标准、试验技术以及有效的分析方法，列举了具体的应用实例。

由于可靠性试验技术尚在发展中，加之编者水平有限，恐难满足读者的需要，也难免有谬误之处，祈广大读者批评指正。

编者 1987年4月

编委会名单（以姓氏笔划为序）

马怀祖	王启裕	刘瑞生	朱天月
江登恕	何国瑞	陈昭宪	吕钟瑜
陈浩华	杨晋泰	徐福祯	盛志森
曾纪科	蒋明元		

目 录

电子元器件部分

第 1 章 可靠性试验技术基础

- 1.1 电子产品的可靠性…………… (1)
- 1.2 常用的可靠性参数和寿命分布…………… (4)
- 1.3 可靠性试验的目的和分类…………… (13)
- 1.4 寿命试验技术的发展…………… (20)
- 1.5 寿命与应力的关系…………… (25)
- 1.6 劣化图在可靠性试验中的应用…………… (38)

第 2 章 寿命试验和加速寿命试验

- 2.1 指数分布寿命试验…………… (44)
- 2.2 加速寿命试验…………… (47)
- 2.3 可靠性试验中的一些技术问题…………… (57)
- 2.4 国外电子元器件可靠性试验设备和测试系统的发展
趋势…………… (62)

第 3 章 失效率鉴定试验

- 3.1 抽样检验的目的和意义…………… (66)
- 3.2 抽样原理及其特性曲线 (OC曲线)…………… (67)
- 3.3 抽样方案的制定…………… (69)
- 3.4 鉴定试验的抽样方案…………… (70)
- 3.5 鉴定试验的一般要求…………… (72)

3.6 鉴定试验的应用实例	(74)
---------------------	------

第4章 可靠性筛选试验

4.1 可靠性筛选试验的意义、特点和分类	(79)
4.2 常用的可靠性筛选方法	(82)
4.3 可靠性筛选项目、应力和时间的确定	(114)
4.4 可靠性筛选的物理方法	(133)
4.5 可靠性筛选方案的设计	(139)
4.6 可靠性筛选方案的评价	(142)

第5章 可靠性试验数据分析

5.1 可靠性试验数据分析方法	(145)
5.2 相关与回归	(146)
5.3 最小二乘法	(150)
5.4 利用概率纸进行可靠性试验数据分析	(154)
5.5 指数分布平均寿命的点估计和区间估计	(165)
5.6 随机劣化失效的数据分析	(169)
5.7 失效模式分离及其统计方法	(173)
5.8 强制劣化试验的奥米伽 (Omega) 数据 分析法	(178)
5.9 根据比例方式采用不完整的寿命试验数据法	(181)

电子设备部分

第6章 概 述

6.1 电子设备可靠性试验的特点	(185)
6.2 电子设备可靠性试验的分类	(185)

第7章 可靠性试验计划

- 7.1 可靠性试验在可靠性计划中的地位与作用……………(187)
- 7.2 制定可靠性试验计划应考虑的因素……………(190)
- 7.3 试验计划的主要内容及其有关问题……………(190)
- 7.4 试验评审……………(215)

第8章 试验条件

- 8.1 选择试验条件的原则……………(217)
- 8.2 应力……………(218)
- 8.3 工作条件及预防维护……………(220)
- 8.4 周期设计……………(222)
- 8.5 现场试验条件及要求……………(226)

第9章 试验的实施

- 9.1 试验流程图……………(228)
- 9.2 受试设备的检测……………(228)
- 9.3 失效的分析和分类……………(230)
- 9.4 失效的处理……………(235)
- 9.5 数据处理……………(237)
- 9.6 试验记录与报告要求……………(276)

第10章 可靠性增长试验

- 10.1 概述……………(279)
- 10.2 数学模型及其应用步骤……………(279)
- 10.3 时间与样品数量……………(289)
- 10.4 老练和MTBF保证试验……………(291)

参 考 资 料

第1章 可靠性试验技术基础

1.1 电子产品的可靠性

所谓产品的可靠性，是指该产品在规定的时间内和规定的使用条件下，完成规定功能的能力。完成规定功能，是指产品满足工作状态要求而无故障地工作。因此，要定量地了解产品的可靠性，就要明确规定时间条件、使用条件、环境条件及故障状态，并在实施可靠性试验时，充分考虑这些条件。

1.1.1 时间条件

时间条件对评价产品可靠性极为重要，随着工作时间的延长，产品的可靠性水平将会慢慢地下降，如图1-1所示。

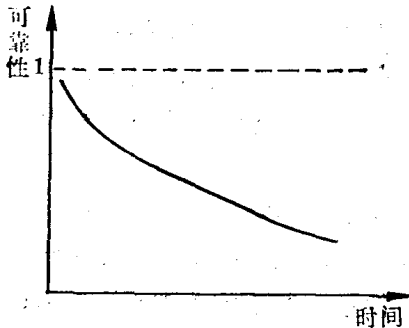


图1-1 可靠性与时间的关系

大家都知道，电视机具有正常收看能力是有一定时间界限的，随着时间的推移，其性能将会不断地发生变化；即使在非工作状态下，由于各种环境条件的影

也将出现所谓老化现象（包括物理性能和化学性能的变化），从而引起电视机性能的变化。因此，讲到电视机可靠性的时候，首先要明确这是工作（或贮存）了多长时间的可靠性。由此可见，可靠性问题是与时间密切相关的。因而有人形象地称可靠性为“产品的时间质量”。

时间条件指从产品制造完成直至其寿命终了的全部时间，包括储存时间、管理时间、连续工作时间、间歇工作时间以及故障维修时间等；有些产品的时间条件是以产品工作的动作次数（开关次数或断合次数）表示，如开关、继电器等产品。

1.1.2 使用条件与环境条件

产品的可靠性与产品的工作状态，使用、运输和保管的环境条件有很大的关系，因此，在研究产品的可靠性或对其实施可靠性试验时，有必要对环境条件作一些研究。

不同的环境条件，意味着产品将承受不同的应力，当这些应力超过产品（或材料）所能承受的强度极限时，产品（或材料）将丧失其原有的性能，即出现故障。环境条件按其对产品作用的方式，大致可分为使用环境条件和周围环境条件两大类。

使用环境条件是指那些将进入到产品（或材料）内部而起作用的应力条件，如电应力，化学应力和物理应力等。通常所说的使用环境条件包括如下的各种状态应力：

热状态：产品内部的温度分布及热对流状态；

化学状态：在产品中所引起的化学变化状态；

电磁状态：产品在恒定或交变的电磁场中工作时所产生的影响；

流变状态：流体和流动粘态对产品的影响；

构造状态：固体材料内部存在的内应力；

疲劳状态：因内应力而产生的变形；

电化学状态：与电腐蚀和接触腐蚀有关的化学过程。

周围环境条件是指那些只在产品外部周围起作用的应力条件。包括：温度、湿度、气压、振动、冲击、日照和重力场等。周围环境对产品的可靠性有很大的影响。高、低温，温度循环，热冲击等能使电子产品突然失效，因为温度能改变化学反应速度，加快电子产品性能的变化。不同的材料其温度特性不同，热胀冷缩的程度也不同，这将导致某些产品损坏，或增加产品可动部分的磨损。湿度对电子产品的影响也很大，高湿可导致产品的绝缘性能下降；吸湿可使材料腐蚀和漏电流增加，可使材料膨胀并使填料歪斜、增大；水份的沾附可使产品出现短路等等。湿度对MOS集成电路、印刷电路和其它半密封元器件的影响尤为显著。在低气压环境中，产品的耐压性能和冷却效果会降低；封装部分会漏气；并且内部气泡膨胀易产生机械损伤，这种环境应力的影响对航空用电子设备来说尤需注意。振动、冲击会使材料疲劳，降低其机械强度。日照会使涂层脱色，会使橡胶和塑料脆化，会使精密仪器的精度下降以及使得材料内部的气泡膨胀而产生机械损伤。

1.1.3 故障状态条件

所谓产品的故障状态（对于不可维修的产品，有时称之为失效状态），是指产品从某一时刻开始，失去其满意地工作的功能时所处的状态。显然，这种状态是产品到达用户手中，经历了一段时间之后发生的。故障原因，可能是产品内部的因素，也可能是外部的因素，或者是两种因素的综合。例如，材料本身的缺陷，或在产品加工过程中引入了一些不良因素，致

使产品本身存在着不可靠的内在因素。或者产品在使用过程中，由于环境应力的影响，工作状态的不合理等造成了产品性能的过早老化。当然，这里所指的满意地工作的功能，应该事先就给予规定，即规定一定的故障判别标准，否则将会产生因人而异的结果。这种判别标准，通常是以产品的技术性能指标来确定的。

根据划分标准的不同，产品的故障有各种不同的划分方法。如按故障发生的场合，可分为试验失效和现场（或运行）失效；按失效的程度，可分为完全失效和局部失效（或致命失效和轻度失效）；按失效前的功能或参数的性质，可分为突然失效和退化失效；若按失效的起因，又可分为设计上失效，工艺上失效和使用上失效；当然，如按失效的时间划分，还有早期失效、偶然失效和老化失效等。

因此，我们在研究、评价产品的可靠性时，或者在实施产品可靠性试验时，从一开始，就要对上述诸条件作出明确的规定，这样才能对其作出定量化的估计。

1.2 常用的可靠性参数和寿命分布

要对产品实施可靠性试验，首先要进行试验方案设计，而在试验结束之后，还要对试验结果进行分析和处理，以及评价试验的可靠性水平，要完成上述工作，就需要对产品的寿命分布和表征产品可靠性的特征量有个初步的了解，为此，下面将对这些问题作简单的讨论。

1.2.1 常用的可靠性参数

和其它学科一样，可靠性也有表征它自己性质的定量参数，利用这些参数便可以评价产品的可靠性水平。常用的可靠

性参数有如下几个：

(1) 可靠度 $R(t)$

这是描述产品可靠性程度很重要的定量参数，它的定义是：产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率。对寿命为 T 的产品，在规定的 t 时间内，如果 $T > t$ ，就说产品在 t 时间内完成了规定的功能。但是，由于产品的寿命是一个随机变量，那么 $(T > t)$ 也是一个随机变量，因此， $(T > t)$ 的概率，就是该产品在工作时间 t 时的可靠度：

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

$P(T > t)$ 表示 $(T > t)$ 这个随机变量的概率。因为 $R(t)$ 表示一种概率，所以， $0 \leq R(t) \leq 1$ ，如图1-2所示。

(2) 失效分布函数

$F(t)$

$F(t)$ 的定义是：产品在规定条件下和规定的时间内失效的概率。同样可将 $F(t)$ 的关系式表示为：

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (1.2)$$

我们应该注意到，若 $t_1 < t_2$ ，则当 $T \leq t_1$ ，必然也意味着 $T \leq t_2$ ，亦即 t_2 时的失效数也包括了 t_1 时的失效数，因此 $F(t)$ 是具有累积的意义的，它表示了产品在 t 时刻以前的失效情况。

从定义可知， $R(t)$ 与 $F(t)$ 有如下的关系：

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.3)$$

(3) 概率密度函数 $f(t)$

$f(t)$ 的定义是：产品在 t 时刻的单位时间内的失效概率。这是一簇描述产品失效规律的分布曲线。它与上述两参数的关

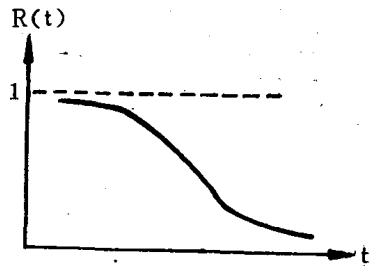


图1-2 可靠度与时间的关系

系为：

$$f(t) = F'(t) \quad (1.4)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1.5)$$

(4) 瞬时失效率函数 $\lambda(t)$

一般情况下，失效率函数是一个与时间有关的函数，是一个瞬时值，当 t 改变时，失效率的数值也将改变。瞬时失效率函数的定义是：产品在 t 时刻后的单位时间内，失效的产品数相对于 t 时刻还在工作的产品数的百分比值。可用下式来表示

$$\lambda(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{[N - r(t)] \cdot \Delta t} \quad (1.6)$$

其中， $r(t)$ 为 t 时的失效数； $r(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 时的失效数； N 为样品总数。

(5) 平均寿命

这是指产品寿命的平均值。对于可维修产品，其寿命平均值常用“平均无故障工作时间”（MTBF）表示，即产品或系统发生故障后，经检查修复后再投入工作，这时，在两次故障间的平均工作时间就称为该产品的平均无故障工作时间。对于不可维修的产品，则常用“失效前的平均时间”（MTTF）来表示，其意义是：在它们失效前的工作时间的平均值。

例如，有 N 个产品，在 $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_K$ 各时刻前的失效数分别为 $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_K$ ，那么，它们在失效前的平均

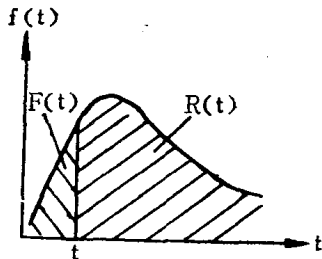


图1-3 $R(t)$ 、 $F(t)$ 与 $f(t)$ 的关系图

工作时间应该是：

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^K t_i r_i}{N} = \sum_{i=1}^K t_i \frac{r_i}{N} = \sum_{i=1}^K t_i f_i \quad (1.7)$$

其中， f_i 称为某一时刻的失效频率。

如果进行了无限次试验，那么，寿命 T 的数学期望就可表示为

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.8)$$

在某些特殊情况下，产品的寿命值还可以用其它形式来表示。例如，可靠寿命 ρ_r ，它表示当产品的可靠度为某一数值时的寿命，如 $\rho_{0.9} = 1000$ 小时表示当产品的可靠度为90%时的寿命是1000小时。中位寿命 $\rho_{0.5}$ 表示产品的可靠度为50%时的寿命，当产品工作时间等于中位寿命值时，正好有一半产品失效。特征寿命 $\rho_{e^{-1}}$ ，表示产品的可靠度为 e^{-1} %时的寿命。

(6) 维修度

这是可维修产品的一个很重要的指标，其定义是在规定的条件下和在规定的时间内完成维修任务的概率。

(7) 有效度A

它表示可维修产品在某一时刻维持其功能的概率。对于一个良好产品，不但要求故障少，就是出现了故障，也能尽快地修复，因此，有效度也是衡量可维修产品可靠性的一个重要参数，用下式定量表示：

$$A = \frac{\text{产品实际工作时间}}{\text{产品实际工作时间} + \text{维修时间}} \quad (1.9)$$

可靠性参数是表征产品质量水平的一个综合性的指标，这个指标与一般性能指标不同，它不能用仪表或其他手段来测

量。而是要通过现场调查，或是通过试验，积累大量的数据，然后用数理统计的数学方法进行处理，才能得出其量值。

1.2.2 几种常用的寿命分布

我们知道，产品出故障是一种随机事件，产品的寿命是一个随机变量，因而产品的故障或寿命，都可以用失效分布或寿命分布函数的形式来描述其规律性。在可靠性工程中，常用的分布有指数分布、正态分布、对数正态分布及威布尔分布等。

(1) 指数分布及其特点

许多元件，在工作时间内会由于“偶然”原因而失效，而不服从于某一种失效机理，因为这时对应于某一机理的所谓早期失效产品，已通过设计、工艺控制或试验而消除。因此，当元件足够多、时间足够长时，失效率便趋近于某一稳定值，其值的大小，只与工作条件和外部环境有关，而与产品的工作时间无关，产品的这种寿命分布规律，称为指数分布。寿命分布服从指数分布规律的产品，当其失效率不同时，其可靠度也不同，可靠度与时间的关系如图1-4所示。

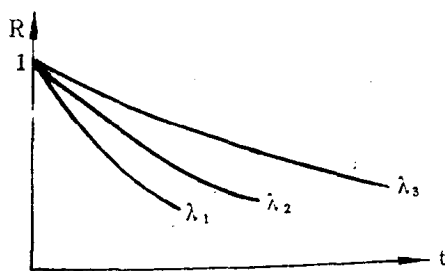


图1-4 不同失效率的可靠度与时间的关系 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)

指数分布具有如下的性质:

$$\text{概率密度函数 } f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.10)$$

$$\text{可靠度函数 } R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.11)$$

$$\text{累积失效概率 } F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.12)$$

$$\text{平均寿命 } \theta = \frac{1}{\lambda} \quad (1.13)$$

$$\text{可靠寿命 } \rho_r = -2.303 \log R / \lambda \quad (1.14)$$

$$\text{中位寿命 } \rho_{0.5} = 0.693 / \lambda \quad (1.15)$$

$$\text{特征寿命 } \rho_{0.1} = 1 / \lambda \quad (1.16)$$

由此可见, 指数分布的特点是:

①失效率是常数;

②平均寿命与特征寿命相同, 均为失效率的倒数;

③当产品工作至平均寿命时间完结时, 其可靠度下降到 36.8%。

(2) 正态分布及其特点

正态分布又称高斯分布, 应用十分广泛, 诸如工艺误差、测量误差、产品参数值的分布等, 均符合正态分布。

正态分布具有如下的性质:

$$\text{概率密度函数 } f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.17)$$

$$\text{可靠度函数 } R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (1.18)$$

$$\text{累积失效概率 } F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (1.19)$$

可见，正态分布的特点是：

①密度函数曲线的形状是中间高，两边低，左右对称，如图1-5所示；

②含有两个未知参数，即均值 μ 和方差 σ ；

③密度函数曲线包络的面积为 1。

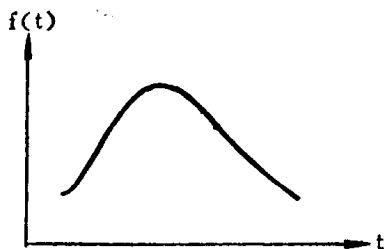


图1-5 正态分布的概率密度函数

(3) 对数正态分布

由某一随机现象而引起的误差为 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$ ，总的偏差为 ξ ，如果

$$\xi = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_i \quad (1.20)$$

显然 ξ 也是一个随机变量。将式 (1.20) 两边取对数，则有

$$\log \xi = \log \xi_1 + \log \xi_2 + \dots + \log \xi_i \quad (1.21)$$

从数理统计学得知，这时 $\log \xi$ 应服从正态分布。

与正态分布一样，对数正态分布具有如下性质：

$$\text{概率密度函数 } f(t) = \frac{1ge}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg t - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad (1.22)$$

$$\text{累积失效概率 } F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1ge}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg t - \mu}{\sigma} \right)^2} dt \quad (1.23)$$

对数正态分布的概率密度函数呈不对称的山包型，顶部附近失