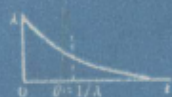


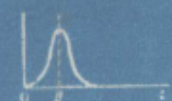
电子设备

可靠性设计技术

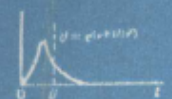
陈炳生 刘守勤 周德昌 编著



$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



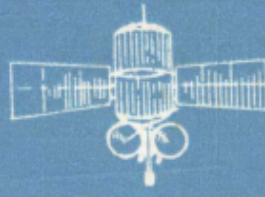
$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$



$$\frac{a}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{a-1} e^{-(t/b)^a}$$



$$\frac{1}{(a-1)!} \left(\frac{t}{b}\right)^{a-1} e^{-(t/b)^a}$$



电光系统编辑部

责任编辑 卢克成 王永芝

封面设计 王永芝

插图绘制 卢克成 王永芝

(内部发行)

工本费：~~2.85~~ 2.50 元

电子设备可靠性设计技术

陈炳生 刘守勤 周德昌 编著

电 光 系 统 编 辑 部

1984年4月

内 容 提 要

本书分为两篇共19章。第一篇共有6章，以系统总体的可靠性设计技术为主。介绍了我国的可靠性工程简史；可靠性工程的主要内容；常用的基础概率知识和总体的可靠性模型；可靠性指标的计算和分配方法；指标的抽样方法等。第二篇共有13章，以电路和分系统的可靠性设计技术为主，介绍了可靠性保障设计的十余种设计方法：方案简化；降额设计；容差设计；热设计；机械防振；“三防”设计；电磁兼容设计；过应力防护设计；失效模型及效应分析；贮备设计；互连设计；可维护性、可使用性、安全性设计等。书中还结合国情提供了一些有用的设计图表、数据。

本书可供电子设备的设计人员和大专院校科研教学参考使用。

电子设备可靠性设计技术

陈炳生 刘守勤 周德昌 编著

电光系统编辑部编辑出版

河南省驻马店市105信箱58分箱 河南省驻马店市印刷厂印装

开本787×1092 1/16印张 $19\frac{8}{4}$ 字数434(千字)

1984年4月第1版

1984年4月第1次印刷

工本费2.50元

序 言

我国的工业、农业、国防和科学技术的现代化迫切要求电子技术的现代化——它的标志之一，就是提高各种电子系统、设备和各种元器件的可靠性。可靠性工程的理论、研究、应用及发展，以及可靠性设计和实施等，已成为现代电子技术的重要领域，这是由于任何复杂的电子系统和一般的设备、甚至单个元、器件都有个工作可靠与否，从而能否发挥性能作用或工作成败的大问题。因而，可靠性问题日益受到广泛的重视。

从六十年代开始，我国的一些重要的大型电子系统工程陆续开始研究、试制和生产。由于这些系统比较庞大、复杂，技术新、要求高，有几万、几十万甚至上百万个元器件，可靠性问题特别突出，直接决定着系统工作的成败。随着这些系统的研制，提出并开展了可靠性工程的研究工作。自六十年代中期开始的一些大型系统工程，像电子外弹道测量系统工程最初只一般地提出可靠性要求，采取简单的可靠性措施，在现场需要研制人员做为“保姆”来精心维护。经过对所研制的第一代和第二代外测工程的总结，从第三代外测工程研制之始就十分明确：在工程的全过程都要狠抓可靠性设计并贯彻于研制的始终。设备的平均故障间隔时间有了显著的提高，十几年来，通过科研实践的总结和经验交流以及不断学习、研究和应用国内外可靠性工程中的新理论、新技术和新的管理方法，和几个兄弟单位一起最近研制成功的几个电子外测系统工程的可靠性都有了较大的提高，能保证可靠地执行跟踪测量任务。一九八〇年我国成功地向太平洋发射了运载火箭，各兄弟厂所提供数百台套电子系统和设备准确、无误地工作，保证了试验任务的完成，这标志着我国电子系统工程和设备的可靠性达到了一个新的水平。近五年来，民用电子设备如电视机、收录机等有了更快的发展。由于逐步采取了提高可靠性的措施，电视机的平均故障间隔时间由1978年的500小时提高到1983年的5000小时以上。不仅给电视机用户带来好处，而且提高了电视机生产厂的信誉，产品销路也打开了，使企业和国家都得到了更高的经济效益。所以，抓可靠性不仅可提高产品的质量还可提高经济效益。从根本上来说，设计决定了产品潜在的可靠性，制造是保证产品的可靠性，使用只能维持这一可靠性。因此，在军用和民用电子产品的研制、设计和生产中，重视可靠性设计也就成为必然的了。

为了提高电子产品的可靠性，一九八〇年十二月，第四机械工业部召开了电子设备可靠性设计和评定方法的技术交流会议，其后部、局多次召开各种形式的可靠性工作会议，极大地促进了可靠性工作，电子产品的可靠性也日益提高。但应看到与国家要求和国际水平相比还有一定的差距，尚需做大量的工作。尤其要加强可靠性技术的普及与提高，要抓好可靠性设计。

本书是在总结几代军事电子装备研制过程中可靠性工作经验的基础上，收集了国内外一些新的资料而编写的。从内容上来看，除必须的基础理论外，更多的着重于可靠性工程实践。既有系统、整机的可靠性设计，也有提高整部件可靠性的方法。特别指出了设计师应采

取何种设计技术和措施来提高整机和系统的可靠性。本书还给出大量的图表和曲线，对设计者与教学都是有用的。

本书的出版，对于推动可靠性工作的开展将会起到很好的作用，为电子设备的工程设计和教学提供了一本很有价值的参考书。

孙宝库

于电子工业部第二十七研究所 一九八四年元月

目 录

第一编 可靠性模型与系统设计

第一章 概 述	(1)
1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课	(1)
1.2 可靠性工程的历史	(2)
1.3 可靠性工程的内容	(3)
第二章 可靠性指标及常用概率分布	(3)
2.1 引言	(3)
2.2 常用定量指标的建立	(4)
2.3 常用的概率分布	(9)
第三章 系统可靠性模型	(16)
3.1 引言	(16)
3.2 可靠性结构模型	(16)
3.3 可修系统的可靠度计算	(26)
第四章 可靠度的预计与分配	(49)
4.1 可靠度预计	(49)
4.2 可靠度指标分配	(51)
第五章 维修度的预计和分配	(68)
5.1 引言	(68)
5.2 维修度预计	(72)
5.3 维修度分配	(73)
第六章 抽样试验原理与方法	(78)
6.1 抽样试验的经典估计方法	(78)
6.2 抽样试验的贝叶斯估计方法	(86)

第二篇 可靠性保障设计

引 言	(92)
第一章 方案简化	(93)
第二章 元器件的选用	(95)
2.1 引言	(95)
2.2 电阻器的选用	(95)
2.3 电容器的选用	(104)
2.4 半导体器件的选用	(114)
第三章 降额设计	(119)
3.1 降额设计原理	(119)
3.2 常用元器件的降额设计	(120)
第四章 容差设计	(125)
4.1 引言	(125)
4.2 增量网络法	(126)
4.3 伴随网络法	(130)
4.4 其它方法	(134)
第五章 热设计	(136)
5.1 引言	(136)
5.2 传导散热	(136)
5.3 辐射散热	(141)
5.4 自然对流散热	(147)
5.5 强制风冷散热	(155)
5.6 强制水冷散热	(166)
5.7 热容	(171)
5.8 热管	(173)
第六章 防振设计	(176)
6.1 机——电类比的理论基础	(176)
6.2 机——电等效电路的作法	(178)
6.3 机——电类比分析	(179)
6.4 防振设计	(185)
第七章 三防设计	(188)
7.1 潮湿环境的危害性及我国分布情况	(188)
7.2 盐雾的成因,成份及影响	(190)
7.3 霉菌的危害及防护	(191)

7.4 部分三防材料及工艺简介	(195)
第八章 电磁兼容设计	(202)
8.1 干扰的引入方式	(202)
8.2 屏蔽设计	(208)
8.3 接地设计	(211)
8.4 抑制干扰源的一些方法	(216)
第九章 过应力防护设计	(220)
第十章 故障模型效应及危害度分析	(223)
10.1 引言	(223)
10.2 故障模型及效应分析	(224)
10.3 失效树分析	(235)
第十一章 贮备设计	(237)
11.1 简单并联贮备	(237)
11.2 串——并, 并——串贮备	(238)
11.3 表决贮备	(240)
11.4 运转状态的非工作贮备	(241)
11.5 非运转状态的非工作贮备	(243)
第十二章 锡焊及其它互连设计	(245)
12.1 引言	(245)
12.2 锡焊原理	(245)
12.3 影响锡焊质量的各种因素	(246)
12.4 可焊性检查	(249)
12.5 焊接操作	(250)
12.6 其它互连设计	(252)
第十三章 可维修性, 可使用性, 安全性设计	(254)
13.1 引言	(254)
13.2 人——机匹配设计基础	(256)
13.3 故障检测设计	(264)
13.4 “三性”设计建议	(267)
附表一 国内元器件失效率表	(272)
附表二 负指数函数表 (e^{-x})	(299)
附表三 χ^2 分位点表	(301)
附表四 β 分布数值表	(304)
参考文献	(308)

第 一 篇

可靠性模型与系统设计

第一章 概 述

1.1 可靠性工程是现代工程师的必修课

可靠性就是指产品在规定的时间内,规定的条件下,完成规定功能的能力。产品的质量有各种定义,但至少质量是产品的技术性能和可靠性两个方面的综合。比如一部雷达,它的作用距离、精确度、分辨率等技术指标都很高。这样的雷达只有当它具有高的可靠性指标才能称为高质量的雷达。又如我国七十年代的电视机,声、光指标都不低,但能正常工作的时间太短。有的平均故障间隔时间仅几十小时。但到八十年代,狠抓了电视机的可靠性,当前,不少名牌电视机的平均无故障时间超过四千小时,有的接近一万小时。因此评定产品质量,至少要综合技术性能和可靠性指标两个方面。决不应片面强调技术性能而忽视可靠性。尽管工程师都希望自己设计的产品具有较高的质量,然而在实际工作中重性能指标忽视可靠性的情况经常出现。

战场上离电台几十米的爆炸,弹片没有击中电台,强烈的振动却使电台停止工作——缺乏冲击振动防护设计。一场山洪暴发,上游通讯线路中断,下游无法得到告警情报——缺乏有效的冗余设计。舰载制导雷达中的脉冲变压器经常击穿损坏——缺乏“三防”设计。正在航行的客机,因乘客开放收录机,突然导航雷达误指偏航 10° ——缺乏电磁兼容设计……

产品中出现的这些故障给战争、政治、人民生命财产带来严重危害的事件不胜枚举。当然,对生产和经济效益也有巨大影响。随着电子产品性能要求日益提高,其构成也日趋复杂。可靠性问题就尖锐地摆在设计师的面前。在经济竞争中产品的可靠性甚至关系到企业、事业的存亡。所以有人提出“质量是企业的生命,技术是企业的血液”是很有道理的。上述事例中的不可靠因素似乎都是些“偶然原因”。若要认真分析,每一次故障都包含着必然因素。可靠性工程就是要研究影响产品可靠性的各种必然因素,达到控制产品可靠性的目的。

可靠性工程是一门涉及面十分宽广的综合性新学科。因为它涉及的技术领域十分广泛,没有哪一位专家教授能全面掌握,也不能只靠少数人做好这项工作。抓可靠性必须广泛地、全面地、全员地、全过程地开展可靠性工作。即应对所有参与产品研制、设计、生产、使用和维护人员进行可靠性理论教育,开展技术交流。因此作为一个现代工程师,可靠性工程是一门必需学习的基础课。

1.2 可靠性工程的历史

可靠性问题的提出,起源于军用电子设备。美国最早把它作为一门新学科加以研究。1952年8月,美国国防部成立了专门研究电子设备可靠性的机构“电子设备可靠性常设顾问团”即著名的“AGREE”。

我国电子设备的可靠性研究,在五十年代就有零星的较高理论水平的文章发表。作为有组织的工程性的研究,是从60年代初随着尖端军事科学的发展要求开始的。国防科委所属的研究院有的成立了专门的研究所或机构。可惜的是,有关工作刚刚展开就遇上了“史无前例”的时代。在“反对‘管’‘卡’‘压’”的极左思潮冲击下,这些机构基本上中断工作或改行。拉大了与国际水平的差距。从1966年到1973年一直处于中断状态。1973年由于地缆、海缆通讯工程的需要,迫使可靠性工作开始“复苏”。以抓元器件可靠性为主的摸底试验逐步展开。1974年(7412会议)对重要元、器件的生产提出“七专”要求(专人、专机、专料、专批、专检、专筛、专卡)。元、器件生产厂、所的可靠性研究工作开始活跃起来。由于电视机开始普及,对电视机不可靠的批评十分强烈,1978年济南会议提出奋斗一年争取平均故障间隔时间大于1000小时的要求。在文革后期,周总理针对“四人帮”的破坏指出“质量问题也是个路线问题”,军用电子设备的可靠性工作得到了支持。1980年,我国向太平洋成功地发射了运载火箭,看到了军用大型电子设备的可靠性成果。1980年12月,电子工业部在京召开了第一次整机可靠性工作经验交流会,逐步形成了整机和大型电子设备的可靠性工作的骨干单位和群众队伍。成立了质量管理协会。1979年4月,成立了中国电子学会电子产品可靠性与质量管理学会。1981年10月,在广州召开第一届学术年会。1983年10月在昆明召开第二届学术年会。可靠性理论和可靠性工程都取得了长足的进步。我国电子设备的可靠性工作已进入定量控制的阶段,近年来可靠性理论与工程在迅速地向前发展。随着四个现代化的实现,我国的可靠性工程与研究工作也必将达到世界先进水平。

第二次世界大战时,军用雷达长期处于停机待修状态。这时,可靠性问题就被提出来。国外近三十年来,可靠性受到了充分的重视和发展。大体上经历了以下四个阶段:

第一阶段:大体上是在1950~1957年。这个阶段的重点是深入地调查摸底阶段,确定可靠性总体工作的内容。

第二阶段:大体上是在1957~1962年。这个阶段的重点是统计试验阶段。定量地摸清电子元件的可靠性水平和各种使用环境条件下的失效率。初步制定出一套环境试验方法和试验标准,提出了部分可靠性规范。

第三阶段:大体上是在1960~1967年。在前两个阶段的基础上,对已掌握的大量的失效模式、失效数据、失效原因进一步从物理本质上分析元器件的失效机理,提出整机设计中的“失效模式、影响及危害性分析”(FMECA)。因而对影响可靠性的关键因素和真实原因的认识更加深刻、全面,并据此提出了各种加速试验方法。

第四阶段:大体上是在1968年~现在。重点是要加强可靠性管理和可靠性保证,引用其它学科的成果,向更高的目标前进。成立各种数据交换网;制定了可靠性技术标准;研究可靠性试验的新技术、环境防护新技术、失效分析的新方法和新技术。

这四个阶段说明可靠性的发展史也就是从定性要求到定量描述,经过一系列工程方法实

现定量控制，逐步发展成为一个专门的学术及工程技术分支的过程。

由此可见，可靠性工程的历史是不断总结经验教训并不断发展和前进的历史。它是从惨重的教训起步在多学科的综合研究中发展的。尽管现在仍有不少新课题尚待进一步研究，但可靠性工程现已建立了一套可供实用的理论和方法。并有不少国防尖端、民用产品都取得了巨大的成果和显著的效益。

1·3 可靠性工程的内容

可靠性工程涉及面十分广泛，很难详细列举全部内容。若要对设备可靠性进行定量控制，至少应抓可靠性指标的定量要求；可靠性指标的保障设计与实施；可靠性指标的定量检查；可靠性管理这几个环节。它们所涉及的内容大体概括如下。

与指标的定量要求有关的内容主要有：基础概率。若干种常用的概率分布，如：指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布等。可靠性指标的预计与分配，涉及各种结构模型的可靠度、维修度、有效度的计算。在这些计算中有的还要用到马尔科夫过程、拉氏变换、图论等基础知识。

与可靠性的保障设计与实施有关的内容主要有：方案简化设计；元、器件合理使用（近来发展成“元件工程”）；降额设计；容差设计；环境保护设计；故障诊断设计；维修性设计；可使用性设计；标准化设计等。有关的基础理论有电路基础、故障物理学、结构基础理论、人机工程、工艺基础理论及计算机辅助设计等。

与指标定量检查有关的主要内容有：各种环境试验的模拟方法、影响及效果分析；加速试验及环境应力的研究；各种试验标准的制定与实施等。主要的数学基础是统计推断理论。用到二项分布、泊松分布、 χ^2 分布、t分布、F分布以及统计数据的回归分析等。

与可靠性管理有关的主要内容有：组织全员培训；制定可靠性监控计划；监督可靠性措施的实施；组织可靠性情报反馈；实施可靠性增长计划等等。作好可靠性管理需要有较宽的知识面，要了解生产或科研的全过程，有一定的组织能力。善于了解工作人员的思想、心理，具备一定的“行为科学”知识。善于归纳整理反馈数据、设计报表等。

第二章 可靠性指标及常用概率分布

2·1 引言

可靠性是指在规定的时间内、规定的条件下完成规定功能的能力。这是个定性的要求。如果改成：在规定的时间内、规定的条件下完成规定功能的成功概率，就是可靠度的定义。成功概率就是个定量指标，它是个统计量。“概率”是对某一事件在相同条件下多次重复时，平均说来可以期望会有什么结果的一种度量。

在可靠度的定义中，“完成规定功能”的不同含义就产生不同的可靠性指标。如果“完成规定功能”是指系统的技术性能，则可靠度的指标可用系统平均故障间隔时间（MTBF）来表示。它依赖于系统中各元器件正常工作的概率和系统的组成。通常所指的可靠度就是这个含义。我们也沿用这种定义。

如果“完成规定功能”是指系统的维修性能,则可靠度就可用系统的平均维修时间(MTTR)表示。这种条件下的“成功概率”通常称“维修度”。

如果“完成规定功能”是指技术性能和维修性能的综合,就可用有效度A来表示:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

如果“完成规定功能”除上述内容外,还要考虑管理方式、维修制度、维修服务质量等因素,可用开工率来表示:

$$\text{开工率} = \frac{E\langle T_0 \rangle}{E\langle T_0 \rangle + E\langle T_1 \rangle + E\langle T_2 \rangle}$$

式中: $E\langle T_0 \rangle = MTBF$
 $E\langle T_1 \rangle = MTTR$
 $E\langle T_2 \rangle = \text{平均正常闲置时间}$

也可用闲置率来表示:

$$\text{闲置率} = \frac{E\langle T_2 \rangle}{E\langle T_0 \rangle + E\langle T_1 \rangle + E\langle T_2 \rangle}$$

究竟用几个随机变量来全面描述“完成规定功能”的“成功概率”?学术界仍在讨论。企图用一个单项指标来全面地综合影响电子系统可靠性诸因素还很困难。作为工程应用的指标,目前主要是MTBF, MTTR和A。

提出这些指标是为了便于对产品定量地提出要求,进行计算、评定和比较。

2.2 常用定量指标的建立

1. 概率与可靠度

如果进行许多次试验,每次试验结果不是出现事件A就是出现事件B。即 $A = \bar{B}$ 。在这些试验中出现事件A的次数为x,出现事件B的次数为y。则总的试验次数为(x+y),于是事件A和B的概率估计值分别为:

$$\begin{aligned} \hat{P}(A) &= \frac{x}{x+y} \\ \hat{P}(B) &= \frac{y}{x+y} \end{aligned} \quad (2.1)$$

对于有限次试验,我们只能得到概率的估计值。概率的真值只能从无穷多次的试验中得到。

若受试验的样品数是 N_0 个。到t时刻未失效的有 $N_s(t)$ 个,失效的有 $N_f(t)$ 个。则未失效的概率估计值(即可靠度的估计值)为:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\text{未失效}} &= R(t) \\ &= \frac{N_s(t)}{N_s(t) + N_f(t)} = \frac{N_s(t)}{N_0} \end{aligned} \quad (2.2)$$

同样失效概率（即不可靠度）的估计值为：

$$\begin{aligned}\hat{P}_{\text{失效}} &= F(t) \\ &= \frac{N_f(t)}{N_s(t) + N_f(t)} = \frac{N_f(t)}{N_0}\end{aligned}\quad (2.3)$$

对于试验结果是成功或失败这样互斥的二元事件，满足 $R(t) + F(t) = 1$ 。故 (2.2) 式可写成：

$$R(t) = 1 - \frac{N_f(t)}{N_0}\quad (2.4)$$

对 (2.4) 式微分可得：

$$dR(t)/dt = -\frac{1}{N_0} \frac{dN_f(t)}{dt}\quad (2.5)$$

当 dt 趋近于 0 时得到瞬时概率，即失效概率密度函数 $f(t)$ 。

$$dR(t)/dt = -f(t)\quad (2.6)$$

因为 $f(t)$ 是失效密度函数，所以它与可靠度的微分相差一个负号。它表示每个样品随时间的失效分布，即表示 t 时刻的失效概率。

2 · 瞬时失效率

由 (2.5) 式所得单位时间的失效数即失效速率为：

$$dN_f(t)/dt = -N_0 dR(t)/dt\quad (2.7)$$

(2.7) 式表示母体在 t 时刻的失效速率。对 (2.7) 式两边除 t 时刻正常工作的样品数 $N_s(t)$ 得瞬时失效率：

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \frac{1}{N_s(t)} \frac{dN_f(t)}{dt} \\ &= -\frac{N_0}{N_s(t)} dR(t)/dt\end{aligned}\quad (2.8)$$

(2.8) 式中由 (2.7) 除 $N_s(t)$ 而不除 N_0 是因为我们关心的是 t 时刻的瞬时失效率，在 t 时刻受试的样品数只有 $N_s(t)$ 个而不是 N_0 个。

将 (2.2) 式代入 (2.8) 式得到瞬时失效率的一般表达式为：

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}\quad (2.9)$$

将 (2.9) 与 (2.6) 组合，还可得 $\lambda(t)$ 的另一种表达式：

$$\lambda(t) = f(t)/R(t)\quad (2.10)$$

瞬时失效率 $\lambda(t)$ 通常简称失效率。对于可维修系统也可称故障率。

3 · 可靠度函数的一般表达式

$$(2.9) \text{ 式可写成: } \lambda(t)dt = -dR(t)/R(t)\quad (2.11)$$

对 (2.11) 式从 0 到 t 积分得:

$$\begin{aligned} \int_0^t \lambda(t) dt &= -\ln R(t) \Big|_1 \\ R(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \\ &= \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

这就是可靠度分布的一般表达式, 它与失效分布的类型无关。若瞬时失率 $\lambda(t)$ 为一常数 λ 。即瞬时失效率与时间无关, 系统的失效无记忆特性, 则:

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp \left[-\int_0^t \lambda dt \right] \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (2.13)$$

这是电子设备最常用的情况。有人已经从理论上证明, 对于大量电子元件构成的电子设备, 不论元件是何种失效分布, 经过一段老炼后 $\lambda(t)$ 就是一常数。实际经验也证明一般电子设备的可靠度函数符合常指数分布。因此在工程应用中常指数可靠度是最有用的。

4. 可靠度的图形表示

对 (2.6) 式两边积分得:

$$\begin{aligned} \int_0^t f(t) dt &= -\int_1^{R(t)} dR(t) \\ &= 1 - R(t) \end{aligned}$$

因为 $\int_0^t f(t) dt + \int_t^\infty f(t) dt = 1$, 即当时间 t 趋于 ∞ 时全部样品都将失效。

$$\begin{aligned} \therefore \int_0^t f(t) dt &= 1 - \int_t^\infty f(t) dt \\ &= 1 - R(t) \end{aligned}$$

即可靠度与失效密度函数的关系为:

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt \quad (2.14)$$

失效密度函数的积分等于累积故障密度函数, 等于 t 时刻的故障概率也就是不可靠度。

图 (2.1) 示出失效密度函数与可靠度、不可靠度的关系。失效密度函数 $f(t)$ 可有不同的分布 (参看图 2.4), 不可靠度 $F(t)$ 、可靠度 $R(t)$ 与 $f(t)$ 都具有图 (2.1) 所示的关系, 当 $t=0$ 时 $F(t)=0$, $R(t)=1$, 随 t 增大, $F(t)$ 增加, $R(t)$ 下降。

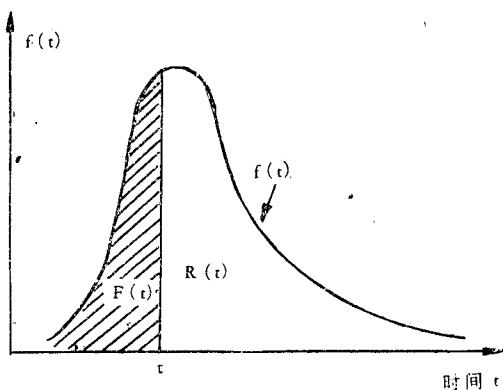


图 2.1 $f(t)$ 与 $R(t)$ 、 $F(t)$ 的关系

5 · 失效率曲线

典型的失效率曲线如图（2·2）所示。大体可将曲线分成三段：

（1）初始失效期。这期间的失效规律是故障随时间增加而明显减少。故障原因是由于设计或制造缺陷所致。这类故障一般应在设备调整期间予以暴露。有时也将这一时期称为老练期、调整期、试运转期和试用期等。

（2）偶然失效期。这期间的故障率降低而且稳定，近似为一常数。对于合理设计、制造的设备，这一期间的时间很长。通常产品可靠性指标所要求的就是指这一时期。有时也将这一阶段称为最佳应用期。

（3）耗损失效期。这一期间的故障率随时间增加而显著增加。元器件大量损坏。所以又称这一时期为衰老期、老化期等。

典型的失效率曲线图形如浴盆，通常也叫“浴盆曲线”。许多工程实践的统计数据表明：设备的故障率都具有图（2·2）所示的三个阶段，随设备的设计、制造、使用及维护水平的不同， $\lambda(t)$ 在这三个阶段的数值、斜率不同，各阶段时间的长短也不一样。

失效率的单位是（1/小时），国外也有用“菲特”（Fit）= 10^{-9} /小时及（%/小时）。

我国用拉丁拼音表示失效率等级如表2·1。

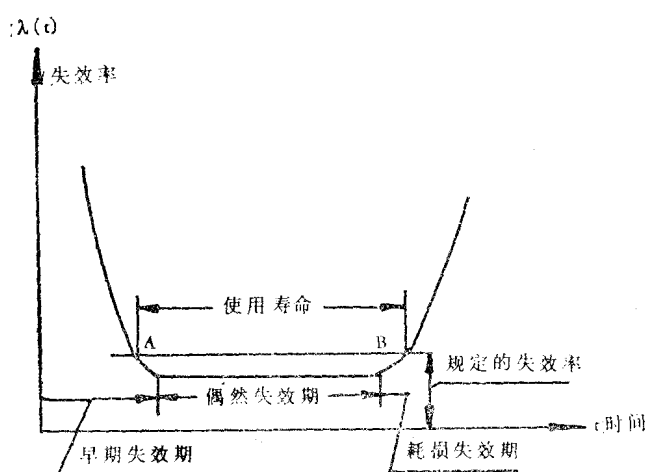


图 2·2 失效率曲线

表 2·1 失效率等级

名 称	符 号	最大失效率（1/小时）
亚五级	Y	3×10^{-6}
五 级	W	1×10^{-6}
六 级	R	1×10^{-6}
七 级	Q	1×10^{-7}
八 级	B	1×10^{-8}
九 级	J	1×10^{-9}
十 级	S	1×10^{-10}

6 · 平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure)

对于可修复产品,其寿命的平均值为平均故障间隔时间,又称平均无故障工作时间,记作MTBF。对于不可修复的产品其寿命的平均值记作MTTF (Mean Time To Failure)。在一般情况常常不区分二者,统称为MTBF。产品的平均寿命按(2·15)式算得。通过试验得到N个产品的全部寿命数据 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (2 \cdot 15)$$

注意, (2·15) 式中的 $\sum t_i$ 是指全部寿命数据, 不是部分或几次试验的寿命数据。如果是“部分”或“几次”的数据, 则用(2·15)所算得的MTBF仅是真实MTBF的点估计值, 其置信度很低。如何用有限次寿命试验来推断MTBF的真值将在第六章中讨论。

例1 有10台相同的电台在规定的服役期间内共出现故障341次。累计总工作时间 $\sum t_i = 178,684$ 小时。

$$\begin{aligned} MTBF &= \sum t_i / N \\ &= 178684 / 341 \\ &= 524 \text{ (小时)} \end{aligned}$$

例2 有一台某型雷达, 在正常服役期间出现故障114次。累计工作时间28842小时。

$$\begin{aligned} MTBF &= 28842 / 114 \\ &= 253 \text{ (小时)} \end{aligned}$$

如果已知失效分布密度函数 $f(t)$, 则可按下式计算MTBF:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (2 \cdot 16)$$

因为 $f(t)$ 表示在 t 时刻有百分之几的样品失效, 即有百分之几的样品寿命长达时间 t , 所以积分式(2·16)表示的是全部样品的平均寿命。由前述 $f(t)$ 与 $R(t)$ 的关系(2·16)式还可写成:

$$\begin{aligned} MTBF &= - \int_0^{\infty} t dR(t) \\ &= \int_0^{\infty} R(t) dt \end{aligned} \quad (2 \cdot 17)$$

7 · 平均维修时间(Mean Time To Repair)

其定义与MTBF相似。

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i \quad (2 \cdot 18)$$

式中: N ——全部维修次数;

$\sum_{i=1}^N \Delta t_i$ ——所有维修时间之和。