仪表可靠性基础

王化祥　史道济　编著

天津大学出版社

仪表可靠性基础
王化祥　史道济　编著

仪表可靠性基础

王化祥
史道济　编著

天津大学出版社

内 容 提 要

本书为仪器仪表可靠性基础教材，书中尽可能地介绍了涉及仪器仪表可靠性的有关内容。

全书共分八章，较系统地阐述了可靠性基本概念与特征量以及常用的失效分布类型；不可修复系统及可修复系统的可靠性数学模型；仪器仪表及电子元器件的可靠性预计与分配；可靠性试验；在此基础上较全面地介绍了仪器仪表可靠性设计内容及方法。最后，对仪器仪表的失效分析及可靠性抽样也作了简要叙述。每章内容后面均附有一定习题，以加深巩固所学内容。

本书可作为仪器仪表专业、检测技术专业、电类专业的教材。也可作为从事上述学科领域的工程技术人员的参考资料。

仪表可靠性基础

王化祥
史道济
编著

*

天津大学出版社出版

（天津大学内）

邮编：300072

天津宝坻第二印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092 毫米 1/16　印张：11$\frac{3}{4}$　字数：292 千

1994 年 6 月第一版　1994 年 6 月第一次印刷

印数：1—1400

ISBN 7-5618-0697-3

TH·33　定价：12.00 元

前　言

可靠性是一门新兴学科。它包括可靠性数学、可靠性物理(失效物理)及可靠性工程。仪器仪表可靠性是可靠性工程中的一个重要领域。

随着现代化生产和科学技术的迅猛发展,广泛应用于各领域中仪器仪表的可靠性引起了世界各国的普遍关注,许多国家已公布和推行了有关可靠性的国家标准和准则。在我国,可靠性工程经历了30多年的发展道路,不仅在理论研究、工程设计以及应用实践方面均具有了一定基础,而且已进入到可靠性定量控制阶段。许多工厂、研究部门不仅重视产品的可靠性设计,而且把可靠性工作纳入了计划管理与技术管理之中。因此,可靠性技术已成为从事仪器仪表设计、制造、管理、使用人员所不可缺少的知识。

为适应这种形势发展的需要,近年来,我国部分高等院校为高年级本科生相继开设了可靠性基础知识的选修课。本教材是根据几年来的教学实践,在原讲义基础上进行修改补充编写成的。

全书共分八章。第一章,可靠性基本概念及其特征量;第二章,不可修复系统可靠性;第三章,可修复系统可靠性;第四章,仪表可靠性预计和分配;第五章,可靠性试验;第六章,仪表可靠性设计;第七章,仪表的失效分析;第八章,可靠性抽样检验。全书考虑到自动化仪表专业本科生所具有的概率论及数理统计基础知识以及教学课时数(暂定为48学时)需要,力求根据循序渐进、深入浅出、巩固基础、结合实际应用的原则进行编写,并附有相应的例题与习题,以便读者通过习题练习更好地掌握可靠性基础知识以及实际应用的基本技能。

本书在编写过程中参阅了一些国内外公开发表的专著与论文,并得到我校有关专家及同行的支持与帮助,在此谨致谢意。

由于作者水平所限,加之实践经验不多,因此缺点错误在所难免,敬请读者批评赐教。

作者

1993.10于津大园

绪　论

一、产品可靠性的概念

衡量产品(包括仪器仪表)的质量，通常包括两类性质的指标：一是产品的性能是否达到满足功能要求的各项技术指标；二是在工作中能否继续满足功能要求，即技术指标保持的程度和产品损坏情况。前者是产品的性能问题，后者就是产品的可靠性问题。

产品的技术性能与可靠性的关系是极为密切的，无数事例说明，如果产品不可靠，它的技术指标再好，也难以发挥作用，譬如一台仪表，尽管其测量准确度、灵敏度等指标都很高，但却常出故障(即产品容易丧失规定的功能)，那么其测量值也就不可信了，甚至不能被实际使用。因此，可以说产品的可靠性是产品质量的基础。没有可靠性这个基础，理论上再先进、技术指标再高的产品也是没有多少使用价值的。

二、研究仪表可靠性的重要性

自从可靠性问题提出以来，可靠性研究工作取得了重大的进展，形成了一门独立的新兴学科。从 60 年代开始，在工程设计，产品质量控制和企业管理等方面的可靠性研究也取得了可喜的成果。可靠性问题越来越受到各行各业普遍的关切和重视。

仪表是人们进行科学实验和实现生产过程参数自动检测和自动控制的重要技术工具，因此对它的可靠性要求愈益显得重要。

1. 过程系统趋向大型化、复杂化

随着生产过程自动化水平的提高，过程控制系统的规模越来越大，越来越复杂。例如年产 30 万吨乙烯的大型装置，检测点多达 2500 个，调节回路有 460 多个，其中除常规的 PID 调节外，尚有均匀，分程、串级、选择等复杂调节，整个系统使用仪表数以千计。它们对生产过程起着监测、指挥和控制作用，以确保生产安全和高产优质。对于如此庞大的系统，假如每台仪表平均每年出现一次故障(即平均故障率约为 1%/千小时)，那么，该系统每天将会出现数次故障；如果平均故障率为 10%/千小时，则每天将出现数十次的故障，这无疑将影响生产的正常进行，甚至造成严重事故。系统越复杂，出现故障的机会就越大，使系统的可靠性降低。

因此，随着系统复杂程度的增加，对它的可靠性提出了更高的要求。

2. 仪表使用环境条件日益严酷

生产的发展和科学技术的进步，促使自动检测和自动控制的领域和对象逐渐扩大，仪表的应用范围越来越广，从实验室到工厂、从室内到野外，从热带到寒带、从山谷到高原，从地面到天空和海洋，各种仪表的使用环境条件日益严酷。例如在高温、腐蚀性气氛、振动、辐射等恶劣环境下，仪表的故障率将会增加。

为了使仪表能适应各种环境条件，也必须提高其可靠性。

3. 采用新材料、新工艺越来越多

产品越先进，采用的新材料、新工艺也越来越普遍，而尚未注意到的、没有研究开发的领域也增多。所有这些都是产生不可靠、不安全的因素。因此更需要加强可靠性的研究。

4. 为了提高经济效益

产品设计既要保证质量、提高可靠性，同时又要降低成本，获得较大的经济效益。仪表当然也不例外。而且由于现代化仪表具有先进的技术和性能、结构复杂、价格较高，以及它在生产和科学实验中所处的特殊地位，一旦出了故障，造成的影响和经济损失有时是相当严重的。以每秒轧制 30 多米钢材的高速轧钢机为例，假若其中某一台关键的仪表出现故障，轻则控制偏差增大，造成次品，重则发生生产事故，停机停产，甚至酿成设备损坏，人员伤亡等严重后果，经济损失已远远超出一台仪表原有的价值。

由此可见，仪表结构功能越复杂，仪表使用环境越恶劣，要求仪表使用寿命越长，可靠性问题就越尖锐突出。为了解决这些问题，在仪表行业也必须进行可靠性研究工作。

三、产品的可靠性和经济性

从经济效果来说，虽然为提高产品的可靠性需要在材料、元器件、工艺、设计、使用、维修等各方面采取相应措施，导致产品的生产费用和成本增加，但使用和维修费用却随着可靠性的提高而降低。

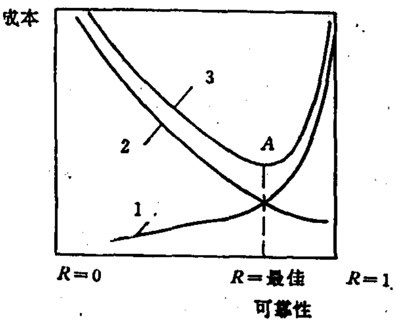


图 0—1　可靠性和成本

一般来说，为提高可靠性与所花费用之间存在如图 0—1 所示的关系。图中横坐标表示可靠度，纵坐标表示成本。曲线 1 表示为提高产品可靠性所花费用，要求可靠性越高，付出的费用就越大。曲线 2 表示维修费用，产品可靠性越高，出故障的机会就越少，所需的费用也就越低。因此，为了提高产品的可靠性，满足各方面的要求，在进行设计时要权衡开展可靠性工作的费用和由于产品不可靠造成的损失以及支付的维修费用，从而找出最佳可靠度。曲线 3 表示产品的成本和可靠性的关系，其中 A 点为产品成本的最佳点。

提高产品可靠性不仅能提高产品的信誉，而且还可以获得直接的经济效益。例如美国西屋电气公司为提高某种产品的可靠性，曾作了一次彻底的设计审查，所得的经济效果即产品成本下降是为提高可靠性所花费用的 100 倍以上，设计审查花费的每一美元所得的利润为 23 美元。

四、可靠性学科研究的内容

可靠性学科所涉及的内容相当广泛，大致可分为三个方面：可靠性理论基础、可靠性工程、可靠性管理。

可靠性理论基础包括可靠性数学及可靠性物理（又称失效物理）。

可靠性工程包括系统和零部件的可靠性设计、制造的可靠性、可靠性试验、使用及维修的可靠性等方面。

可靠性管理包括可靠性计划，组织可靠性设计评审，进行可靠性认证，制订可靠性标准、可靠性增长、确定可靠性指标等等。

根据仪表专业的学习内容和学时要求，对上述内容不可能一一介绍。本教材着重讲述有关可靠性基础及其在仪表可靠性设计、分析、试验过程中的应用。通过此课程的学习能够在今后的仪表设计、制造以及生产管理中自觉地运用可靠性知识去解决一些实际问题。

目　录

第一章　可靠性特征量

§1—1　可靠性的概念

可靠性是评价产品质量的一项重要标准，按国标 GB 3187—82，可靠性是产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

产品的可靠性首先受“规定的条件”的制约。显然，环境条件(温度、湿度、气压、振动、噪声等)、负载条件(工作电压、电流、应力)、工作方式(连续工作、间断工作、状态转换)，贮存条件和维护条件都直接影响产品的可靠性。对有人参与工作的产品，人的技术操作，即“人机关系”也影响着产品的可靠性，人的技能越差，情绪波动越大，可靠性就越低。

产品的可靠性是与“规定的时间”相关的。一般说来，仪器仪表中的电器元件经过老化筛选，机械零部件经过跑合，整机经过调试老炼，产品经过一段较长时间的稳定使用后，其可靠性水平便随时间的增长而降低。时间越长，可靠性越差，故障(失效)越多，所以一定的可靠性是对一定时间而言的。有些产品的可靠性虽然不是与时间相关，但也可以用某种类似时间的单位，如开关、继电器的动作次数，材料承受交变应力的循环次数等，作为广义时间来理解。

产品的可靠性是与“规定的功能”紧密相联的。“规定的功能”就是产品的性能指标，如仪器仪表的精度、灵敏度、线性度、重复性等静态指标和幅频特性、相频特性等动态指标。又如电阻器的阻值、功率、温度系数、精度；电容器的容量、损耗角正切、绝缘电阻、耐压、精度；晶体管的放大倍数、反向漏电流；电子计算机的运算速度、字长、容量、指令数；雷达的距离分辨力，测角和测速精度、脉冲峰值功率、跟踪速度；通信机的频率范围、输出功率、通信距离、调制度、信道、失真度、保密性、兼容性、机动性等。产品的可靠性可以针对产品完成某种功能而言，也可以针对其多种功能综合而言。如果产品不能完成规定的功能，则称产品发生故障或失效，相应的各项性能指标称为故障判据或失效判据。因此，在讨论具体产品的可靠性时，必须对产品的故障判据标准加以明确规定。

§1—2　可靠性特征量

在可靠性中所研究的产品是各种各样的，需要用不同的数量指标，这同定量地研究仪器仪表工作性能时，需要用量程、分辨率、线性度等数量指标一样。用于度量产品可靠性高低的数量指标称为可靠性特征量。常用的可靠性特征量有可靠度、失效分布函数、失效密度、失效率以及平均寿命、寿命标准差等。

有了可靠性特征量，对各种产品的可靠性就有了明确的要求。在设计和制造产品时，可以利用各种数学方法计算和预计它们的可靠性。在产品制造出来后，可以按一定的试验方法，通过一些特征量定量地评定产品的可靠性，可以准确地对产品的可靠性进行定量比较。

可靠性特征量的理论值称为真值，它完全由失效的数学模型所决定，它是客观存在的，

却是未知的。我们只能通过有限个观测数据，经一定的计算得到其估计值，称此为可靠性特征量的观测值。

一、可靠度

可靠度是产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。对不可修复产品，把它从开始工作到首次失效前的工作时间 T 称为寿命；对可修复产品，它的寿命是指两次相邻故障之间的工作时间，也称无故障工作时间。由于产品发生失效是一随机事件，所以寿命 T 是一个随机变量。设规定的时间为 t，显然以下三个随机事件是等价的："产品在时间 t 内完成规定的功能"，"产品在时间 t 内无故障"，"产品的寿命 T 大于 t"，于是产品的可靠度可以表示为

$$R(t)=P(T>t) \tag{1-1}$$

它是时间 t 的函数，也称为可靠度函数。

产品的可靠性特征量一般都是未知的，为了解一批产品的可靠性特征量，需要进行寿命试验，但可靠性寿命试验常常是破坏性的，所以只能从这批产品中随机抽取部分产品进行试验。如果随机抽取了 N 个产品，测得其寿命分别为 $T_1,\cdots,T_N$，称这 N 个数据是大小为 N 的一个随机样本，由于样本的抽取是随机的，因此每个 T_i 都可以看成随机变量，对某次抽样观测得到 $T_1,\cdots T_N$ 的一组确定值 $t_1,\cdots t_N$，称为样本观测值。记作

$$\bar{T}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}T_i$$

$$S^2=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(T_i-\bar{T})^2$$

$\bar{T}$，S^2 分别称为样本均值和样本方差。相应地

$$\bar{t}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}t_i$$

$$s^2=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(t_i-\bar{t})^2$$

是样本均值 $\bar{T}$和样本方差 S^2 的观测值。

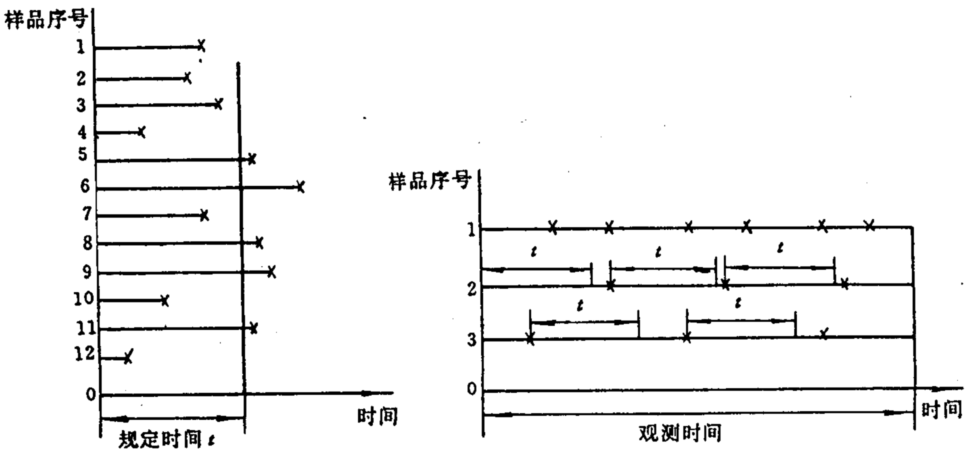
为了估计某批产品的可靠度函数，可以从中随机抽取 N 件样品，设在 $t=0$ 时刻开始工作，到规定的时刻 t，共有 $n(t)$个样品失效，仍有 $n_s(t)=N-n(t)$个样品继续工作，则频率

$$\hat{R}(t)=\frac{n_s(t)}{N} \tag{1-2}$$

可以作为时刻 t 的可靠度 $R(t)$的估计值，以后我们将称估计值为观测值。

对于不可修复产品，可靠度观测值 $\hat{R}(t)$是在规定的时间区间$(0,t)$内，能够完成规定功能的样品数 $n_s(t)$与初始时刻$(t=0)$工作的样品数 N 之比。对可修复产品，(1－2)中的 $n_s(t)$是指一个或多个样品的无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数，N 表示观测时间内无故障工作总次数。在计算 N 时，每个样品的最后一次无故障工作时间，若不超过规定时间 t，则不予计入。

图 1－1 是可修复产品与不可修复产品的寿命试验示意图，它们的可靠度观测值是相同的，均为 $\hat{R}(t)=\frac{n_s(t)}{N}=\frac{5}{12}\approx0.42$。



(a)不可修复产品

$N=12,\quad n_s(t)=5$

(b)三台可修复产品

$N=12,\quad n_s(t)=5$

图 1—1 可修复与不可修复产品试验示意图

例 1—1 从某批同类零件中抽取 $N=50$ 个进行试验，记录的数据如下：

时间 t(小时)	10	25	50	100	150	250	350	400	500	600	700	1000	1200	1500	2000	3000
失效数	4	2	3	7	5	3	2	2	0	0	0	0	1	1	0	1
累积失效数 $n(t)$	4	6	9	16	21	24	26	28	28	28	28	28	29	30	30	31
$n_s(t)$	46	44	41	34	29	26	24	22	22	22	22	22	21	20	20	19

我们可以算出：$t=100$ 小时的可靠度

$$\hat{R}(100)=\frac{n_s(100)}{N}=\frac{34}{50}=0.68$$

$t=400$ 小时的可靠度

$$\hat{R}(400)=\frac{n_s(400)}{N}=\frac{22}{50}=0.44$$

等等。如果把不同时刻的可靠度都计算出来，并将计算结果点在坐标纸上，用一条光滑曲线把这些点联起来，称这条曲线为产品的可靠度曲线(见图 1—2)，它是此种产品可靠度函数 $R(t)$的观测值。

由可靠度定义(1—1)及图 1—2 不难看出

$$R(0)=1 \qquad R(\infty)=0$$

即开始使用时，所有产品都是好的，完成规定功能的概率是 1；但在充分长的规定时间内，全部产品都会失效，因此完成规定功能的概率为 0。随着工作时间的增加，$R(t)$逐渐下降。

不同产品对可靠度有不同要求，这主要由产品发生故障所造成的后果来决定。例如航天航空技术中重要产品的可靠度应达到 $R(t)=0.9999$，甚至更高，而有些产品故障带来的损失不很严重，对此可以要求较低的可靠度。这里再次强调，选取 $R(t)$时，必须指明工作时间 t。

如果知道了可靠度函数 $R(t)$，则对于给定的可靠度 r，可求得产品可靠度降到 r 的工作时间 t_r，称 t_r 为可靠寿命，r 为可靠水平

$$R(t_r)=r \tag{1—3}$$

特别，当可靠水平 $r=0.5$ 时，可靠寿命 $r_{0.5}$也称为中位寿命，$r=e^{-1}$的可靠寿命 $t_{e^{-1}}$称为特征

寿命，它们分别表示产品工作到 $t_{0.5}$ 或 $t_{e^{-1}}$ 时，大约有一半或 63.2% 失效。

对于可靠度有一定要求的产品，工作到了可靠寿命 t_r 时就应替换，否则将不能保证其可靠度。

二、失效分布

与可靠度概念相对的是不可靠度，它表示产品在规定的条件下和规定的时间内失效的概率，记作 $F(t)$，一般称 $F(t)$ 为失效分布函数。显然，对一个寿命为 T 的产品，在规定的时间 t 内，其失效分布函数为

$$F(t)=P(T\leqslant t)=1-P(T>t)=1-R(t) \tag{1-4}$$

失效分布函数也是时间 t 的函数，类似于(1-2)，我们也常用频率

$$\hat{F}(t)=\frac{n(t)}{N} \tag{1-5}$$

作为时刻 t 的失效分布函数观测值。由例 1-1 中的数据可以算出 $t=100$ 小时及 $t=400$ 小时的失效分布函数的观测值：

$$\hat{F}(100)=\frac{n(100)}{N}=\frac{16}{50}=0.32$$

$$\hat{F}(400)=\frac{n(400)}{N}=\frac{28}{50}=0.56$$

如果寿命 T 是一个连续型随机变量，则称

$$f(t)=F'(t) \tag{1-6}$$

为失效概率密度函数，简称失效密度，它表示产品在时刻 t 的单位时间内的失效概率。设在时刻 $t=0$ 有 N 件产品开始工作，在 t 到 $t+\Delta t$ 时间间隔内有 $\Delta n(t)$ 件产品失效，则当 Δt 充分小时，

$$\hat{f}(t)=\frac{\hat{F}(t+\Delta t)-\hat{F}(t)}{\Delta t}=\left[\frac{n(t+\Delta t)}{N}-\frac{n(t)}{N}\right]\Big/\Delta t=\frac{1}{N}\frac{\Delta n(t)}{\Delta t} \tag{1-7}$$

可作为失效密度 $f(t)$ 的观测值。

由概率论知识不难得出可靠度函数 $R(t)$，失效分布函数 $F(t)$ 以及失效密度 $f(t)$ 之间的如下关系：

$$F(t)=\int_0^t f(t)\mathrm{d}t, \qquad R(t)=\int_t^{\infty} f(t)\mathrm{d}t, \tag{1-8}$$

$$F(t)+R(t)=1, \qquad f(t)=-R'(t)$$

$F(t)$，$R(t)$ 与 $f(t)$ 之间的关系如图 1-3 所示。

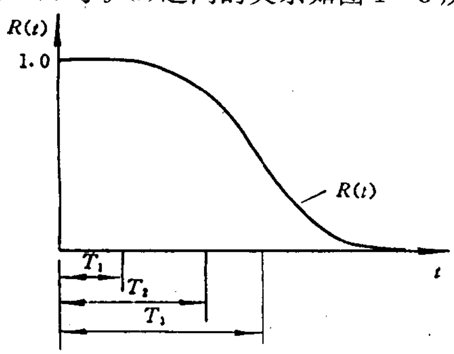


图 1-2　产品的可靠度曲线

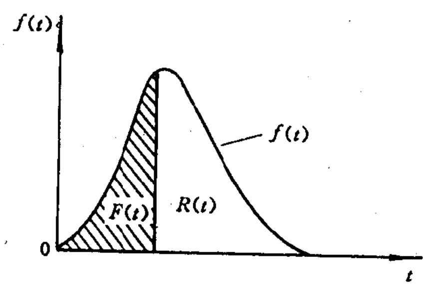


图 1-3　$f(t)$、$F(t)$、$R(t)$ 的关系

三、失效率

产品的失效率是可靠性理论中的重要概念，也是产品可靠性的重要指标，国标GB3187—82规定，失效率是指“工作到某时刻尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内发生失效的概率”，记为 $\lambda(t)$。

下面给出失效率的数学表达式。设产品在规定的条件下寿命为 T，其失效分布函数为 $F(t)$，失效密度为 $f(t)$。显然，按失效率的定义，“工作到时刻 t 尚未失效的产品”可表示为“$T>t$”，“产品在 $(t,t+\Delta t)$ 内失效”可表示为“$t<T\leqslant t+\Delta t$”，于是产品工作到时刻 t 后，在 $(t,t+\Delta t)$ 内失效的概率即是条件概率 $P(t<T\leqslant t+\Delta t|T>t)$，这个条件概率除以时间间隔 Δt 就是 Δt 时间内的平均失效率，当 $\Delta t\to 0$ 时，即为时刻 t 的失效率

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t<T\leqslant t+\Delta t|T>t)}{\Delta t}$$

但是

$$P(t<T\leqslant t+\Delta t|T>t)=\frac{P(t<T\leqslant t+\Delta t,T>t)}{P(T>t)}$$

$$=\frac{P(t<T\leqslant t+\Delta t)}{P(T>t)}=\frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{1-F(t)}$$

故

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{\Delta t}\cdot\frac{1}{1-F(t)}=\frac{F'(t)}{1-F(t)} \tag{1-9}$$

进一步还可推得

$$\lambda(t)=\frac{F'(t)}{R(t)}=\frac{f(t)}{R(t)}=-\frac{R'(t)}{R(t)} \tag{1-10}$$

由(1—9)及(1—10)可见，只要知道 $F(t)$，$f(t)$ 或 $R(t)$ 其中之一，均可求出失效率 $\lambda(t)$。

反之，如果已知失效率 $\lambda(t)$，也可推出产品的失效分布。(1—10)说明可靠度函数 $R(t)$ 满足下列微分方程

$$\frac{R'(t)}{R(t)}=-\lambda(t),$$

解此微分方程得

$$R(t)=\exp\left(-\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t\right), \tag{1-11}$$

于是

$$F(t)=1-R(t)=1-\exp\left(-\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t\right) \tag{1-12}$$

$$f(t)=F'(t)=\lambda(t)\exp\left(-\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t\right) \tag{1-13}$$

(1—13)说明了失效密度 $f(t)$ 与失效率 $\lambda(t)$ 之间的关系，公式(1—9)——(1—13)说明 $\lambda(t)$，$F(t)$，$f(t)$ 及 $R(t)$ 都是全面描述产品寿命 T 的，只是各个概念说明了 T 的不同侧面，在实际使用中各有所长。

设有 N 个受试样品，$n(t)$，$n(t+\Delta t)$ 分别表示工作到 t，$t+\Delta t$ 时刻的失效样品数，$\Delta n(t)=n(t+\Delta t)-n(t)$ 为 $(t,t+\Delta t)$ 内的失效数，则当 Δt 充分小时，由(1—9)

$$\hat{\lambda}(t)=\left(\frac{n(t+\Delta t)}{N}-\frac{n(t)}{N}\right)\frac{1}{\Delta t}\Big/\left(\frac{N-n(t)}{N}\right)=\frac{\Delta n(t)}{\Delta t}\cdot\frac{1}{N-n(t)} \tag{1-14}$$

为 $\lambda(t)$ 的观测值。可见，失效率可以看成产品工作到时刻 t 后，单位时间内失效的产品数 $\frac{\Delta n(t)}{\Delta t}$ 与还在工作的产品数 $N-n(t)$ 之比。

例 1—2　有 5000 只晶体管，工作到 1000 小时累积失效 50 只，工作到 1200 小时累积失效为 61 只，试求这种晶体管在 $t=1000$ 小时的失效率。

解：由于 $n(1200)=61$，$n(1000)=50$，由(1—14)得到

$$\hat{\lambda}(1000)=\frac{61-50}{(1200-1000)(5000-50)}=1.11\times10^{-5}/\text{小时}.$$

例 1—3　工作了 50 小时，100 个产品仍在工作，但到 51 小时失效了 1 个，在第 52 小时内失效了 3 个，求该产品在 $t=50$ 小时及 $t=51$ 小时的失效率.

解：这里 $N=100$，$n(50)=0$，在(50,51)内有 $\Delta n(t)=1$ 个产品失效，因此

$$\hat{\lambda}(50)=\frac{1}{100}/\text{小时}=1\%/\text{小时},$$

类似地，由于 $n(51)=1$，在(51,52)内有 $\Delta n(t)=3$ 个产品失效，故

$$\hat{\lambda}(51)=\frac{3}{99}/\text{小时}=3.03\%/\text{小时}.$$

比较(1—7)与(1—14)可以看出，失效密度反映了产品在 $(t,t+\Delta t)$ 的单位时间失效数 $\frac{\Delta n(t)}{\Delta t}$ 与起始时刻 $(t=0)$ 的工作产品数 N 之比，而失效率则是 $\frac{\Delta n(t)}{\Delta t}$ 与现时刻 t 的工作产品数 $N-n(t)$ 之比，因此从反映瞬时失效情况看，失效率比失效密度更灵敏。

由(1—14)可以得到失效率 $\lambda(t)$ 的量纲应该是单位时间的百分数，常用的单位有每小时的百分比(如 10^{-5}/小时)或每千小时的百分比(如 $10^{-3}/10^{3}$ 小时)。例 1—3 中 $\lambda(50)=1\%$/小时，它表示产品在工作 1 小时后，每 100 个中大约有 1 个失效。显然，产品的失效率越小，可靠性越高，失效率越大，可靠性越低。

对于具有高可靠性要求的产品来说，有必要采用更小的失效率单位——菲特(Fit，*Failure Unit*)

$$1\text{ 菲特}=1\times10^{-9}/\text{小时}=1\times10^{-6}/\text{千小时},$$

它表示 10^{9} 元件小时只有 1 个失效，或 1 千小时内元件失效百分数为 10^{-6}。例如，某种机器的失效率为常数：每年 1%，那么 $\lambda=1\%/8760$ 小时 $=1141\times10^{-9}$/小时 $=1141$ 菲特.

为了区别各种产品的失效率水平，当产品的失效率为常数时，常将它们分为若干等级。按标准化规定，可以将电子元器件的失效率分成 7 个等级：

亚五级(Y)$1\times10^{-5}/\text{小时}\leqslant\lambda<3\times10^{-5}/\text{小时}$；

五　级(W)$0.1\times10^{-5}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-5}/\text{小时}$；

六　级(L)$0.1\times10^{-6}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-6}/\text{小时}$；

七　级(Q)$0.1\times10^{-7}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-7}/\text{小时}$；

八　级(B)$0.1\times10^{-8}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-8}/\text{小时}$；

九　级(J)$0.1\times10^{-9}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-9}/\text{小时}$；

十　级(S)$0.1\times10^{-10}/\text{小时}\leqslant\lambda<1\times10^{-10}/\text{小时}$.

由各种电子元器件组成的仪器仪表的失效率曲线形成类似“浴盆”形状，称为“浴盆曲线”，如图 1—4 所示。从曲线形状可以看出，产品的失效率随时间推移，大体可分为三个阶

段：早期失效期，偶然失效期及耗损失效期。

在早期失效期，产品失效率高，失效率随时间增加迅速下降。当剔除早期废次品之后，失效率很快趋于稳定。早期失效率主要由元器件、材料缺陷和生产工艺不良引起，也可能由于生产设备故障，操作人员粗心大意，质量检验不严格等原因。新研制产品的早期失效率一般比老产品高，设计者的主要任务是找出失效原因，消除大部分早期失效因素，提高产品的可靠性。

在偶然失效期，产品的失效率低而且稳定，近似为常数，持续时间较长。产品的偶然失效期就是产品可靠工作的时期，这个时期的失效是偶然因素引起的，通常是产品设计裕度不够，造成产品的随机失效。研究这一时期的失效因素，对提高产品的可靠性具有重要意义。

耗损失效期出现在产品使用的后期，由于老化，疲劳，损耗等引起产品的耗损失效，失效率随时间的增加而上升，故这时期又称为“衰老期”。若能事先估计耗损失效开始时间，当某种元器件失效率已超过允许值时，就进行更换或维修，推迟耗损失效期的到来，如图 1－4 中虚线所示。

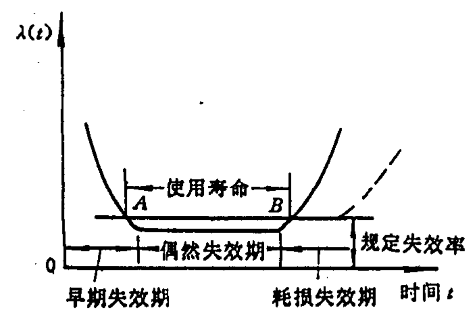


图 1－4　产品典型失效率曲线

四、平均寿命

另一类常用的可靠性特征量与失效时间有关，通称为寿命特征量，其中最常用的是平均寿命。

设产品寿命 T 的失效密度为 $f(t)$，它的数学期望

$$E(T)=\int_0^{\infty} tf(t)\mathrm{d}t \tag{1-15}$$

称为产品的平均寿命，记为 μ。对不可修复产品，平均寿命是指产品从开始工作到发生失效前的平均工作时间，记为 MTTF(*Mean Time To Failure*)。对可修复产品的平均寿命，即是相邻故障之间的平均工作时间，记为 MTBF(*Mean Time Between Failure*)。

为估计某批产品的平均寿命，从中随机地抽取 N 件样品进行寿命试验。对不可修复产品，如果所有试验样品都观测到寿命终了时，那末这 N 个样品的平均寿命可以作为整批产品的平均寿命的观测值，即

$$\hat{\mu}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}t_i=\bar{t} \tag{1-16}$$

否则，当仍有一部分样品能继续工作时即停止试验，则以样品的累积试验时间 T 与失效数 r 之比

$$\hat{\mu}=\frac{T}{r} \tag{1-17}$$

作为平均寿命的测观值。

对可修复产品，以一个或多个产品在它的使用寿命期内的某个观测期间累积工作时间 T 与故障次数 r 之比，如(1－17)，作为平均寿命的观测值。

例 1－4　从某种电子设备中抽取 18 台做寿命试验，从开始使用到发生初次失效时间(单位为小时)如下：16，29，50，68，100，130，140，190，210，270，280，340，410，450，520，620，

800,1100,估计这种电子设备的平均寿命.

解:$N=18,\sum_{i=1}^{N}t_i=16+29+\cdots+1100=5723$ 小时。

$$\hat{\mu}=\frac{5723}{18}=318\text{ 小时。}$$

如果样本大小 N 比较大,计算总和不方便,可按一定的时间间隔分组计算。设 N 个观测值共分为 a 组,以每组的组中值 t_i 作为组中每个观测值的近似,总工作时间可以用各组中值 t_i 与频数 n_i 的乘积的总和近似表示。如此平均寿命近似地为

$$\hat{\mu}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{a}n_i t_i=\sum_{i=1}^{a}t_i\frac{n_i}{N}=\sum_{i=1}^{a}t_i f_i^* \tag{1-18}$$

其中f_i^*为第 i 组的频率。

由(1-8)第 4 式,利用分部积分法,不难得出

$$\mu=\int_0^{\infty}tf(t)\mathrm{d}t=\int_0^{\infty}R(t)\mathrm{d}t \tag{1-19}$$

这说明:对可靠度函数从 0 到∞的时间区域上积分就是平均寿命。

平均寿命 μ 反映了产品寿命 T 的一个重要特征。为进一步了解随机变量 T 的取值情况,还须再引入一个能反映产品寿命 T 对于平均寿命 μ 的离散程度的量,即寿命方差及寿命标准差。设产品寿命 T 的失效密度为 $f(t)$,则称它的方差

$$D(T)=\int_0^{\infty}(t-\mu)^2f(t)\mathrm{d}t \tag{1-20}$$

为产品的寿命方差,记为 σ^2,式(1-20)中的 μ 为产品的平均寿命,称 σ 为产品的寿命标准差。

产品的寿命方差及寿命标准差一般也是未知的,为求出它们的观测值,可由大小为 N 的随机样本 $t_1,\cdots,t_N$ 的样本方差

$$\hat{\sigma}^2=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(t_i-\bar{t})^2 \tag{1-21}$$

及样本标准差

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(t_i-\bar{t})^2} \tag{1-22}$$

而得,其中 $\bar{t}$ 是由式(1-16)决定的样本平均值.

例 1-5　求例 1-4 中电子设备的初次失效时间的寿命标准差.

解:可以把式(1-21)改写为

$$\hat{\sigma}^2=\frac{1}{N-1}\Big[\sum_{i=1}^{N}t_i^2-\frac{1}{N}\big(\sum_{i=1}^{N}t_i\big)^2\Big],$$

这里 $\sum_{i=1}^{18}t_i=5723,\sum_{i=1}^{18}t_i^2=3277221$,因此

$$\hat{\sigma}^2=\frac{1}{18-1}\Big[3277221-\frac{1}{18}(5723)^2\Big]=85743,$$

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\hat{\sigma}^2}=\sqrt{85743}=293\text{ 小时}$$

即这种电子设备的寿命标准差为 293 小时。

§1—3 常用失效分布类型及其特征

了解产品的失效规律，分析产品的失效原因，是可靠性研究的重要内容之一，但是由于各种产品的失效机理（导致产品发生失效的物理、化学或机械过程）、失效模式（失效的表现形式）的不同，反映失效规律的数学模型也会有种种差别。本节主要讨论如何根据产品的失效机理和失效率函数形式导出相应的失效分布，这些失效分布是可靠性中最常用的。

一、指数分布

考虑某种电子元器件，在 $t=0$ 时开始工作，工作中可能受到外界的各种随机冲击，假若这种电子元器件受到外界冲击将导致失效，显然，它的寿命就是第一次冲击来到的时间 T。如果在时间 $(0,t)$ 内发生冲击的次数 X 服从泊松分布

$$P(X=k)=\frac{(\lambda t)^k}{k!}e^{-\lambda t},k=0,1,2,\cdots$$

那么在 $(0,t)$ 时间内没有出现冲击的概率为 $P(X=0)=e^{-\lambda t}$。所以，这种电子元器件的可靠度函数为

$$R(t)=P(T>t)=P(\text{在}(0,t)\text{内无冲击})=P(X=0)=e^{-\lambda t} \tag{1—23}$$

由（1—4）可以求出它的失效分布函数为

$$F(t)=1-R(t)=1-e^{-\lambda t},t\geqslant 0 \tag{1—24}$$

相应的失效密度为

$$f(t)=F'(t)=\lambda e^{-\lambda t},t\geqslant 0 \tag{1—25}$$

这就是参数为 $\lambda>0$ 的指数分布。

可见，如果某种产品受到外界的第一次冲击即为失效，而这种外界冲击服从泊松分布，那么产品的寿命服从指数分布。

另外，如果考虑产品失效的一般规律，当产品处于偶然失效期时，失效率比较稳定，可以看作是一个常量，即 $\lambda(t)=\lambda,t>0$。那么由（1—13）可知此时的失效密度为

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t},t\geqslant 0$$

可见，当产品的失效率为常数时，其失效分布是指数分布。

指数分布的密度函数和分布函数的图形如图 1—5 所示。

（1—23），（1—24）及（1—25）已经分别给出了产品寿命 T 服从指数分布时的可靠度函数，失效分布函数及失效密度函数，其余的主要可靠性特征量如下：

失效率函数 $\lambda(t)$：将（1—23），（1—25）代入（1—10）可得

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}}=\lambda \tag{1—26}$$

指数分布的失效率函数 $\lambda(t)$ 为常数 λ，这是指数分布的特征。

平均寿命 θ（指数分布的平均寿命常用 θ 表示）：由（1—19）可得

$$\theta=\int_0^{\infty}R(t)dt=\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda} \tag{1—27}$$

因此，当产品寿命服从指数分布时，其平均寿命 θ 与失效率 λ 互为倒数。（1—24），（1—25）可改写为