

# 机电一体化系统可靠性设计

邹桂根 主编

上海交通大学出版社

82  
44

# 机电一体化系统可靠性设计

邹桂根 主编

上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了机电一体化系统中机、电两大学科领域内的可靠性设计的基本知识。理论和应用技术,具有工程实用性强的特点。全书共八章,首先按系统设计程序介绍了可靠性工程中的理论要点,对可靠性特征量、失效分布类型及其特性作了简要介绍;随后阐述系统可靠性设计要点;在此基础上,对常用的可靠性设计技术作了详尽的、全面的综述;继而阐述了寿命试验、抽样试验及其数据处理;最后进行故障分析。本书体系完整、由浅入深,是作者从事可靠性设计实践及多年教学经验的总结。

本书可作为机电一体化专业、仪器仪表专业、检测技术专业、微电子技术专业的研究生和本科生教材,亦可供从事机电一体化产品设计、制造的工程技术人员和从事可靠性工程的技术人员、管理干部作选修读本和参考书籍。

责任编辑 冯 颖

封面设计 刘 伟

### 机电一体化系统可靠性设计

邹桂根 主编

上海交通大学出版社·出版

(上海南京路 1954 号 邮政编码 200030)

新华书店上海发行所·发所

上虞科技外文印刷厂·印刷

开本: 787×1092 (毫米) 1/16 印张: 15 字数: 371000

版次: 1996年7月 第1版 印次: 1996年7月 第1次

印数: 1—2100

ISBN 7-313-01630-1/TM·099

定价: 12.00元

# 前 言

机电一体化是在本世纪50年代以来,在传统机械技术的基础上,随着电子技术、计算机技术,特别是微电子技术的发展而兴起的一门跨学科的边缘科学,它将在我国科学技术及国民经济建设中占据重要的地位。世界各主要工业国都从战略高度广泛应用机电一体化技术,同时积极开展可靠性研究工作,可靠性已成为一门专门的工程学科。

在我国,可靠性工程经历了约40年曲折发展的道路,在理论研究、工程设计以及实践方面都有一定的基础,并且已进入到可靠性定量控制阶段。具有复合功能、技术密集型的机电一体化系统,其可靠性问题显得特别突出,它既可能产生机械故障,又可能产生电子故障,容易受到电子噪声的干扰,因此,在设计机电一体化系统时不仅要充分考虑必要的可靠性措施,而且在产品设计初步完成之后,还要进行可靠性检验和分析,不断进行可靠性增长。因此,可靠性理论与技术已成为从事机电一体化系统设计、制造、管理、使用人员所必备的知识。

本书内容涉及可靠性基础知识,机电元器件的可靠性,系统可靠性设计,可靠性设计技术,寿命试验及数据处理,可靠性抽样检验和故障分析。全书编写中既考虑一定的理论深度,又力求使理论与实践的密切结合,列举了许多工程应用实例。

全书共分8章,上海交通大学邹桂根教授撰写第四、五、六、七章,陈鹏同志撰写第八章,中船总公司704研究所王雁同志撰写第一章,陈永培同志撰写第二章,钱兆俊同志撰写第三章。本书由邹桂根教授主编,704研究所商维绿高级工程师主审。

在教材编写过程中,曾广泛参阅国内各兄弟单位著编的各种书刊、资料,因具体名称较多,恕不一一列举,在此一并致谢。

由于我们水平有限,经验不足,书中肯定会有不少错误或不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

1995年11月

# 符 号 表

- $A$ ——有效度  
 $C$ ——合格判定数  
 $D_m$ ——鉴别比  
 $D_s$ ——差异度  
 $F(t)$ ——累积失效概率  
 $f(t)$ ——失效概率密度  
 $H_i$ ——元件危害度  
 $K_c$ ——复杂系数  
 $L(\lambda), L(\mu), L(\theta), L(p)$ ——接收概率  
MTBF——平均无故障工作时间  
MTTF——平均失效时间  
MTTR——平均维修时间  
 $m$ ——平均寿命;形状参数  
 $N$ ——批产品数  
 $n_R$ ——可靠度意义下的安全系数  
 $n$ ——抽样数;样本数;安全系数  
 $N(\mu, \sigma^2)$ ——均值为 $\mu$ 、方差为 $\sigma^2$ 的正态分布  
 $N(0, 1)$ ——标准正态分布  
 $P(H), P(J)$ ——分别为事件 $H$ 与 $J$ 发生的概率  
 $P(I/H), P(I/J)$ ——分别为在事件 $H$ 与 $J$ 发生的条件下事件 $I$ 发生的概率  
 $R_s$ ——系统可靠度  
 $R(t)$ ——可靠度  
 $r$ ——失效数;平均修复时间;强度  
 $S$ ——降额系数;工作应力  
 $S_{j_s}$ ——灵敏度  
 $S'_j$ ——归一化灵敏度  
 $T$ ——产品的寿命  
 $T_r$ ——可靠寿命  
 $T_{0.5}$ ——中位寿命  
 $t_0$ ——寿命试验截尾时间;尺度参数  
 $u$ ——联结系数  
 $W$ ——可靠性因子;重要度  
 $\alpha$ ——生产方风险;显著性水平  
 $\beta$ ——使用方风险

$\eta$ ——威布尔分布的真尺度参数;特征寿命  
 $\theta$ ——分布函数服从指数分布产品的平均寿命  
 $\lambda(t)$ ——瞬时失效率  
 $\lambda_b$ ——基本失效率  
 $\lambda_p$ ——工作失效率  
 $\lambda_G$ ——通用失效率  
 $\mu(t)$ ——修复率  
 $\mu$ ——平均寿命  
 $\nu$ ——威布尔分布的位置参数  
 $\sigma$ ——总体的标准差  
 $\tau$ ——寿命试验测试时间  
 $\Phi(Z)$ ——标准正态累积分布函数  
 $\varphi(Z)$ ——标准正态的概率密度函数  
 $\varphi(x)$ ——故障树结构函数  
 $\omega$ ——筛选效率

# 目 录

符号表	1
<b>第一章 可靠性概论</b>	<b>1</b>
§ 1-1 可靠性基本概念	1
§ 1-2 可靠性特征量	2
§ 1-3 产品可靠性工作的基本内容	11
<b>第二章 失效分布类型及其特性</b>	<b>13</b>
§ 2-1 指数分布	13
§ 2-2 威布尔分布	16
§ 2-3 正态分布	21
§ 2-4 对数正态分布	25
§ 2-5 截尾正态分布	29
<b>第三章 系统可靠性设计</b>	<b>32</b>
§ 3-1 常见系统可靠度的计算	32
§ 3-2 储备系统及网络系统可靠度的计算	37
§ 3-3 可维修系统的可靠性	42
§ 3-4 系统可靠性预测	45
§ 3-5 系统可靠性分配	51
<b>第四章 常用可靠性保障技术</b>	<b>58</b>
§ 4-1 元器件的合理选用	58
§ 4-2 元器件的可靠性筛选试验	64
§ 4-3 减额设计	67
§ 4-4 应力-强度型的结构可靠性设计	74
§ 4-5 漂移设计	81
§ 4-6 冗余设计	87
§ 4-7 热设计	90
<b>第五章 环境条件及耐环境设计技术</b>	<b>100</b>
§ 5-1 环境条件对电子设备的影响及环境试验	100
§ 5-2 电磁兼容性设计	102
§ 5-3 电子器件静电防护设计	116

§ 5-4 耐振设计 .....	122
§ 5-5 “三防”设计 .....	126
<b>第六章 寿命试验及其试验数据处理</b> .....	<b>130</b>
§ 6-1 寿命试验的分类及数据处理综述 .....	130
§ 6-2 失效分布类型的估计及其检验 .....	131
§ 6-3 失效分布参数及可靠性特征值的估计 .....	145
§ 6-4 加速寿命试验 .....	163
<b>第七章 可靠性抽样检验</b> .....	<b>169</b>
§ 7-1 抽样检验的基本知识 .....	169
§ 7-2 计数抽样检验 .....	177
§ 7-3 计量抽样检验 .....	191
§ 7-4 指数分布下失效率和平均寿命抽样检验 .....	196
<b>第八章 故障分析</b> .....	<b>206</b>
§ 8-1 失效模式、效应及后果分析 .....	206
§ 8-2 故障树定性分析法 .....	214
§ 8-3 故障树定量分析 .....	228
<b>参考文献</b> .....	<b>231</b>



# 第一章 可靠性概论

可靠性理论是从电子技术领域中发展起来的,半个世纪以来,可靠性工程对提高武器装备系统的可靠性发挥了重大作用,对宇航工业作了重大贡献。现在,可靠性工程技术已在各个工业领域中得到了发展和应用。唯有重视可靠性工程技术,才能使性能优异,结构复杂的机电一体化产品显示强大的竞争力,可靠性设计已发展为一门专门的工程学科。这门学科是以提高产品质量为核心,以概率论、数理统计为基础,综合应用电子学、可靠性物理学、机械工程学、系统工程学、人类因素学、运筹学等多方面知识的一门综合性学科。

可靠性是产品的一种基本属性,本章先对可靠性进行定性分析,然后阐述可靠性特征量,对可靠性进行定量分析。

## § 1-1 可靠性基本概念

### 一、可靠性的科学含义

可靠性是评价产品质量的一种标准,其科学含义是:产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定的功能的能力。

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(如工作电压、电流、应力)、工作方式(连续工作、间断工作、状态转换)、储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,机电一体化产品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,产品经过一个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,即时间愈长,可靠性愈差,故障(失效)愈多,所以一定的可靠性是对一定时期而言的。

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。如晶体管的放大倍数、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的综合而言。因此,在讨论具体产品的可靠性时,必须对产品的故障(失效)判据标准加以明确规定。

产品在实际工作中,往往由于各种偶然的因素而发生故障,所以对于一个具体产品来说,它在规定的条件下和规定的时间内,能否完成规定的功能是无法事先知道的。也就是说,这是一个随机事件。但是,大量的随机事件中包含着一定规律性,偶然事件中包含着必然性。我们虽然不能准确地知道发生故障的时刻,但是可以估计在某时间内,产品完成规定功能的能力的大小。为此,可以用产品完成规定功能的统计规律——“概率”这一尺度来定量地描述可靠性,

## 二、产品可靠性与质量的关系

根据我国习惯,产品的质量主要包含三个指标:产品的功能(即技术性能)指标;产品的可靠性指标;产品的有效性指标。由此可见,可靠性是表征产品质量的重要指标,是对产品保持其性能的能力的衡量。产品的有效性是对可修产品而言的,即要求可修产品在单位时间内出现故障的次数少,出了故障要求维修时间短,并且还要求大修间隔时间长,这样设备的有效工作时间就长。提高经济增长的效益,必须要有牢固的质量意识。

### § 1-2 可靠性特征量

#### 一、可靠度

##### 1. 可靠度定义

可靠度是指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。它是时间的函数,记作  $R(t)$ ,也称为可靠度函数。

可靠度有条件可靠度和非条件可靠度之分。通常所说的可靠度是指非条件可靠度。规定时间  $t$  是从产品投入使用时算起。非条件可靠度的概率表示式为

$$R(t) = P(T > t),$$

$T > t$  表示产品的寿命超过规定的时间  $t$ ,在  $t$  时间内能够完成规定的功能的概率。

根据可靠度的定义,可以得出

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

即开始使用时,所有产品都是好的;只要时间充分长,全部产品都会失效。

条件可靠度是指在规定的条件下,已工作了  $t'$  时间的产品再工作  $t$  时间的概率,一般地记作  $R(t', t)$ 。条件可靠度的概率表示式为

$$R(t', t) = P(T > t + t' | T > t') = P[(T > t + t') \cap (T > t')] / P(T > t'),$$

所以

$$R(t', t) = R(t + t') / R(t'),$$

即条件可靠度可以化为两个非条件可靠度之商,这是条件可靠度的主要计算公式。

##### 2. 可靠度观测值

(1) 对于不可修复的产品,可靠度观测值是指直到规定的时间区间  $(0, t]$  终了为止,能完成规定功能的产品数  $n_s(t)$  与在该时间区间开始投入工作的产品数  $n$  之比。

(2) 对于可修复的产品,可靠度观测值是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间  $t$  的次数  $n_s(t)$  与观测时间内无故障工作总次数  $n$  之比。

因此,不论对不可修复产品还是可修复产品,可靠度的观测值的公式相同,为

$$\hat{R}(t) = n_s(t) / n. \quad (1-1)$$

一般对不可修复产品,将直到规定时间区间  $(0, t]$  终了为止失效的产品数记为  $n_f(t)$ ;对可修复产品,将无故障工作时间  $T$  不超过规定时间  $t$  的次数记为  $n_f(t)$ ,所以  $n_s(t)$  也是  $(0, t]$  时间区间的故障次数。有关系式

$$n_s(t) = n - n_f(t). \quad (1-2)$$

按规定,在计算无故障工作时间总次数时,每个产品的最后一次无故障工作时间若不超过规定的时间则不予计入。

在图1-1中,(a)为不可修复产品的无替换试验( $n=12, n_f(t)=7$ ), (b)为三台可修复产品的试验( $n=12, n_f(t)=7$ )。

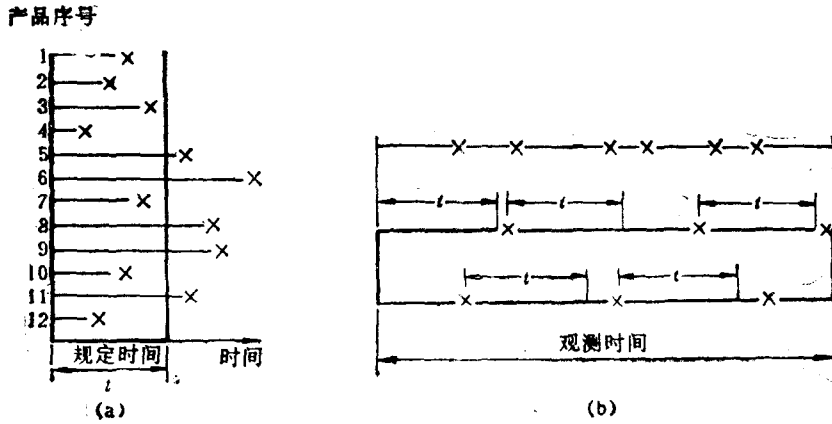


图1-1 可修复和不可修复产品试验  
(a) 不可修复产品试验; (b) 三台可修复产品试验

可靠度观测值为

$$\hat{R}(t) = \frac{n - n_f(t)}{n} = \frac{12 - 7}{12} = 0.42。$$

可靠度的时间曲线如图 1-2 所示。

显然,  $\hat{R}(t)$  是根据样本得出的可靠度估计值, 未必是最优的, 当  $n \rightarrow \infty$ , 则  $\hat{R}(t) \rightarrow R(t)$ 。  $R(t)$  是根据总体得出的可靠度真值, 也称理论值, 其置信度为 100%。

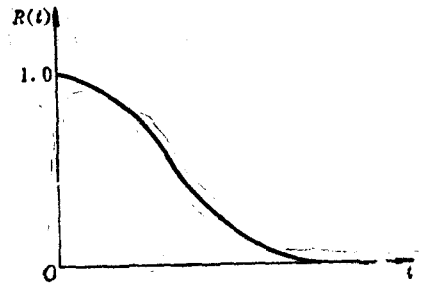


图1-2 可靠度与时间关系

## 二、失效特征量

### (一) 累积失效概率 $F(t)$

#### 1. 定义

累积失效概率是产品在规定条件和规定时间内失效的概率。也可以说是产品在规定条件和规定时间内完不成规定功能的概率, 故也称为不可靠度, 它同样是时间的函数, 记作  $F(t)$ 。有时称为累积失效分布函数, 累积失效概率的表示式为

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - R(t)。 \quad (1-3)$$

从上述定义可以得出

$$F(0) = 0, \quad F(\infty) = 1。$$

由此可见,  $R(t)$  和  $F(t)$  为相互对立事件。失效分布函数  $F(t)$  与时间关系曲线如图 1-3 所示。

#### 2. 累积失效概率的观测值

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) = n_f(t)/n。 \quad (1-4)$$

## (二) 失效概率密度 $f(t)$

### 1. 定义

失效概率密度是累积失效概率对时间的变化率，记作  $f(t)$ 。它表示产品寿命落在包含  $t$  的单位时间内的概率，即产品在单位时间内失效的概率。表达式为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t)。 \quad (1-5)$$

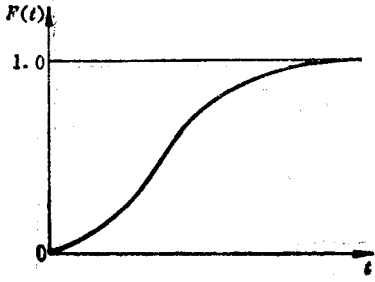


图1-3 累积失效分布函数

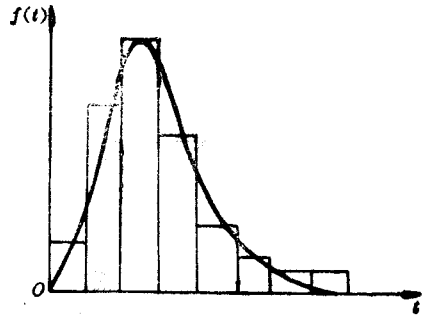


图1-4 失效频率直方图

### 2. 失效概率密度观测值

$$\hat{f}(t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \left[ \frac{n_i(t + \Delta t)}{n} - \frac{n_i(t)}{n} \right] / \Delta t = \frac{1}{n} \frac{n_i(\Delta t)}{\Delta t}， \quad (1-6)$$

式中  $n_i(\Delta t)$  表示  $(t, t + \Delta t)$  时间间隔内失效的产品数。

若以  $\hat{f}(t)$  为纵坐标，失效时间  $t$  为横坐标，则可作出如图1-4所示的失效频率直方图。若将组距  $\Delta t$  分得更细，组数更多，最后趋于一条光滑的曲线，便为失效密度曲线。失效密度曲线可直观地显示出失效时间的分布情况，是研究产品失效规律的重要工具。

### (三) $f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 之间的关系

$f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$  是对同一产品可靠性不同的数量指标，它们之间必然存在着内在的联系，也就是说，只要知道其中任何一个，就可以推出其余两个，即

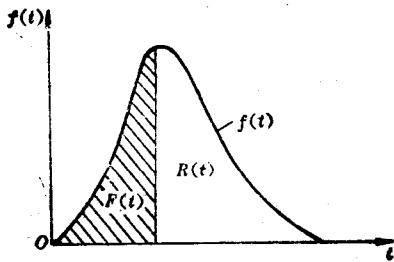


图1-5  $f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$  的关系

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt,$$

$$F(t) + R(t) = 1, \quad f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt。$$

$F(t)$ 、 $R(t)$ 、 $f(t)$  之间关系可以用图 1-5 表示。

### (四) 瞬时失效率 $\lambda(t)$ (简称失效率)

#### 1. 定义

瞬时失效率是工作到  $t$  时刻尚未失效的产品，在该时刻后的单位时间内发生失效的概率，常记作  $\lambda(t)$ 。失效率概率表达式为

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

瞬时失效率  $\lambda(t)$  为条件概率, 其条件是工作到  $t$  时刻尚未失效的产品, 在  $t$  时刻后单位时间内发生失效的概率。由条件概率得

$$\begin{aligned} P(t < T < t + \Delta t | T > t) &= P(t < T < t + \Delta t, T > t) / P(T > t) \\ &= P(t < T < t + \Delta t) / P(T > t), \end{aligned}$$

失效率概率式变为

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t) \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \Delta t} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = - \frac{R'(t)}{R(t)}. \end{aligned} \quad (1-7)$$

### 2. 失效率的观测值

(1) 对于不可修复产品, 是指在某时刻  $t$  后的单位时间内失效的产品数  $n_r(\Delta t) / \Delta t$  与工作到该时刻尚未失效的产品数  $n_s(t)$  之比。

(2) 对于可修复产品, 是指在某时刻  $t$  后的单位时间内故障次数  $n_r(\Delta t) / \Delta t$  与一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间  $t$  的次数  $n_s(t)$  之比。

不论产品是否可修复, 失效率的观测值的表达式均为

$$\hat{\lambda}(t) = n_r(\Delta t) / n_s(t) \Delta t. \quad (1-8)$$

**【例1-1】** 设 100 只三极管在 50h 内无失效, 在 50~51h 内失效一只, 51~52h 内失效 3 只, 求该三极管在 50h 及 51h 的失效率。

**【解】** 因为 50h 时,  $n_r(50) = 0$ , 51h 时,  $n_r(51) = 1$ ,

所以 
$$\hat{\lambda}(50) = \frac{1 - 0}{(100 - 0)(51 - 50)} = 0.01(\text{h}^{-1}),$$

$$\hat{\lambda}(51) = \frac{4 - 1}{(100 - 1)(52 - 51)} = 0.0303(\text{h}^{-1}).$$

### 3. 失效率曲线

根据统计规律, 由各种电子元器件组成的电子设备的  $\lambda(t)$  曲线, 随时间推移, 形成类似“浴盆”形状, 故称为“浴盆曲线”, 如图 1-6 所示。从曲线上可以看出, 产品的失效率随时间推移, 大体上可以分为三个阶段, 即早期失效期、偶然失效期和耗损失效期。

早期失效期: 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, 一般应在厂内调整期间充分暴露, 故又称调整期。新研制的产品早期失效率一般较老产品高, 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, 以获

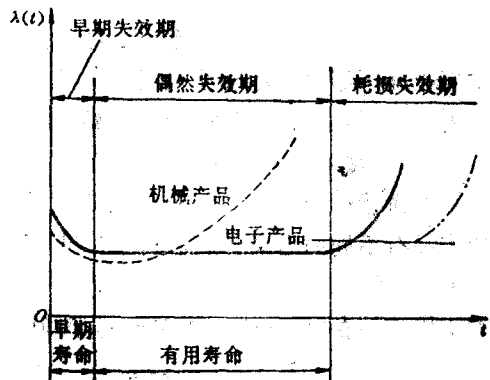


图1-6 产品典型失效率曲线

得产品的使用可靠性。

**偶然失效期:**失效率低而且稳定,近似为常数,这一阶段时间长。产品可靠性指标所描述的也就是这个时期。这一时期是设备运行的最佳时期。这个时期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。此时,构成设备的某些零件、部件已经老化耗损、寿命衰竭,因此失效率很快上升,故这时期又称为“衰老期”,若能事先估计出耗损开始时间,当某种硬 件失效率已达到不能允许值时,就进行更换或维修,这样便能延长使用寿命期,推迟耗损失效期的到来,如图中双点划线所示。

我们最关心的是偶然失效期,在此期间当 $\lambda(t)$ 为常数时,其寿命可以认为服从指数分布。失效率是标志产品可靠性的常用数量特征之一,失效率愈低,则可靠性越高。而大多数机械产品的寿命并不服从指数分布,其失效率是随时间的增加而增大。在这种情况下, $\lambda(t)$ 是时间的函数,难以用失效率来预测产品的可靠度。

#### 4. 失效率单位

失效率的常用单位有: $h^{-1}$ 、 $\frac{1}{10}$ 次、%/h、 $\frac{1}{10^6h}$ 、菲特(Fit)等。菲特是很小的单位,1Fit =  $10^{-9}h^{-1}$ 。也可以不用时间单位,而用与时间相当的动作次数或转数、距离等为单位。

#### 5. $\lambda(t)$ 、 $R(t)$ 、 $f(t)$ 之间的关系

由式(1-7)可知,当 $R(t)$ 或 $F(t)$ 已知时,可以求得 $\lambda(t)$ ,反之,如果知道 $\lambda(t)$ ,可按下式求得 $R(t)$ :

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t dR(t)/R(t) = \ln R(t) \Big|_0^t = \ln R(t),$$

所以

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right] \quad (1-9)$$

或

$$\lambda(t) = f(t)/R(t). \quad (1-10)$$

### 三、寿命特征量

可靠度 $R(t)$ 、失效分布函数 $F(t)$ 、失效概率密度 $f(t)$ 、失效率函数 $\lambda(t)$ 都是用概率来度量的,但也并不尽然。可靠性也可用时间或每小时次数来度量的,这就是人们常说的产品的寿命。寿命有平均寿命、寿命方差、可靠寿命以及中位寿命等等。

#### (一) 平均寿命 $\mu$

在寿命特征量中,最常用的是平均寿命。在概念上,平均寿命对不可修复的产品和对可修复的产品有不同的含义,分别记作MTTF和MTBF。

MTTF(mean time to failure)是不可修复产品的平均寿命,是指产品发生失效前的平均工作或储存时间(或工作次数)。其观测值为

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ii}, \quad (1-11)$$

式中,  $t_{ii}$  为第  $i$  个产品失效前的工作或贮存时间;  $n$  为测试产品的总数。

MTBF(mean time between failure)是可修复产品的平均寿命,是指两次相邻故障间

的平均工作时间,而不是指到每个产品报废(失效)的时间。其观测值为

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_{t_i}} t_{ij}}{\sum_{i=1}^n n_{t_i}} \quad (1-12)$$

式中,  $t_{ij}$  为第  $i$  个产品两次相邻故障间的工作时间( $h$ );  $n_{t_i}$  为第  $i$  个测试产品的故障数;  $n$  为测试产品的总数。

因此,不论产品是否可修复,平均寿命的观测值的表达式均为

$$\hat{\mu} = \frac{\text{所有产品的总工作时间}}{\text{总故障数}} = \frac{T}{n_t} \quad (1-13)$$

如果子样量比较大,即  $n$  比较大,计算总和不太方便,也可以按一定的时间间隔进行分组,测得

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^a t_i \Delta n_{t_i} \quad (1-14)$$

式中,  $a$  为组数;  $t_i$  为各组中值;  $\Delta n_{t_i}$  为各组频数;  $n_t$  为总故障数。

对一台整机的MTBF定义为,一台整机在试验时,总的试验时间为  $T$ ,其间出现  $n_t$  次故障,每次故障经修复后继续试验,修理的时间不包括在总试验时间  $T$  内。MTBF为

$$MTBF = \frac{T}{n_t} \text{ (h)}.$$

(二)  $R(t)$ 、 $f(t)$ 、MTBF三者之间的关系

由式(1-14)得

$$MTBF = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^a t_i \Delta n_{t_i} = \sum_{i=1}^a t_i f(t_i) \Delta t,$$

当  $t = 0 \sim \infty$  时,由概率统计知

$$\begin{aligned} MTBF &= \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left[ -\frac{dR(t)}{dt} \right] dt \\ &= \int_0^{\infty} -t dR(t) = -[tR(t)] \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt. \end{aligned} \quad (1-15)$$

当  $t = 0, R(0) = 1$  时,  $tR(0) = 0$ ; 当  $t = \infty, R(\infty) = 0$  时,  $tR(\infty) = 0$ 。所以式(1-15)变为

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (1-16)$$

(三) 寿命标准离差和寿命方差

平均寿命能够说明一批产品的寿命平均水平,但还不能说明该批产品寿命的全貌。还需要一个能够反映产品寿命离散程度的可靠性特征量,这就是寿命方差和标准离差。

寿命试验时,子样的寿命方差  $\hat{\sigma}^2$  和寿命标准离差  $\hat{\sigma}$  可根据产品样本测试所取得寿命数据按下式计算得到

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{\mu})^2, \quad (1-17)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{\mu})^2}, \quad (1-18)$$

式中,  $t_i$  为第  $i$  个测试产品的实际寿命 ( $h$ );  $\bar{\mu}$  为测试产品的平均寿命;  $n$  为测试产品的总

数。

在概率统计中，子样数增多，则产品总体的寿命方差  $\sigma^2$  可用失效概率密度  $f(t)$  直接求出：

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 f(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \mu^2, \quad (1-19)$$

总体的寿命标准离差  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \mu^2}. \quad (1-20)$$

#### (四) 可靠寿命、特征寿命和中位寿命

前面已经提到可靠度函数  $R(t)$  是产品工作时间  $t$  的函数，当可靠度等于给定值  $r$  时，产品的寿命是多少？可靠寿命  $T_r$ ，就是给定可靠度  $r$  时对应的时间，即

$$R(T_r) = r, \quad (1-21)$$

所以， $T_r = R^{-1}(r)$ ， $R^{-1}$  称为  $R$  的反函数。

图 1-7 所示为可靠寿命  $T_r$  与可靠水平  $r$  的关系。

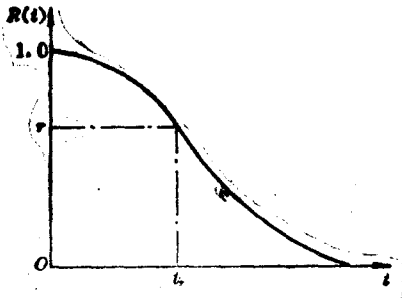


图 1-7 可靠寿命  $T_r$  与可靠水平  $r$  的关系

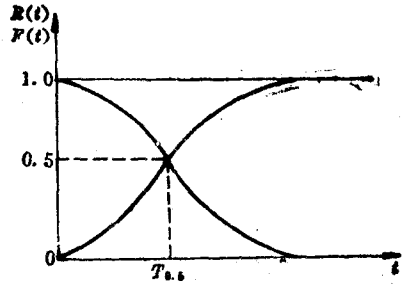


图 1-8 中位寿命

当  $R(T_r) = e^{-1} = 0.37$  时，可靠寿命称为特征寿命，对于失效规律服从指数分布的一批产品而言，特征寿命就是平均寿命，即是说，能够工作到平均寿命的产品仅占 37% 左右，换句话说，约有 63% 的产品将在达到平均寿命前失效。

当  $r = 0.5$  时，可靠寿命  $T_{0.5}$  称中位寿命。当产品工作到中位寿命时，可靠度  $R(t)$  和累积失效概率  $F(t)$  都等于 50%，此时产品一半失效，一半可靠，如图 1-8 所示。

#### 四、平均维修时间 MTTR 和有效度 $A$

除了上述几种基本的狭义可靠性特征量外，可靠性工程中还有维修性特征量和有效度特征量。

维修过程可看作与产品工作过程完全对应的一个“负”过程：投入工作与开始维修相对应，产生故障和修理结束相对应，无故障工作时间和维修时间相对应。

**维修度(与可靠度对应)** 它定义为在规定条件下使用的产品，在规定时间内按照规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到能完成规定功能状态的概率。

**修复率  $\mu(t)$ (与失效率对应)** 它定义为修理时间已达到某个时刻，但尚未修复的产品，在



该时刻后的单位时间内完成修理的概率。

**平均修复率(与平均失效率对应)** 它的观测值定义为在某观测期内完成修理的概率。

**平均维修时间(与平均寿命对应)** 它的定义为修复时间的平均值,即修复时间的数学期望,记作MTTR(mean time to repair)。平均维修时间的观测值为每次失效后,所需维修时间的平均值,其表达式

$$MTTR = \sum_{i=1}^n \Delta t_i / n, \quad (1-22)$$

式中,  $\Delta t_i$  为第  $i$  次故障的维修时间;  $n$  为修复次数。

故障维修时间由三部分组成: 1) 查找故障时间; 2) 排除故障时间; 3) 清理验证时间。

对于电子设备来讲,一般查找故障时间占整个维修时间的 80%。

对于可修复产品,除了考虑狭义可靠性,同时还考虑维修性。有的产品虽然不易出故障,但一旦发生故障要很长时间才能修复,有可能经常处于修理状态,利用率显然不高。所以,我们不仅要注意产品是否易坏,还应注意产品是否易修。有效度正是综合了可靠度和维修度的广义可靠性特征量,记作  $A$ 。

有效度有三种:瞬时有效度,平均有效度和极限有效度。极限有效度又称稳态有效度。它是当时间趋于无穷大时,瞬时有效度的极限。后两种有效度是常数,其表达式为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot \quad (1-23)$$

有效度的观测值定义为在某个观测时间内,产品能正常工作时间对能正常工作时间与不能工作时间之和的比。其表达式为

$$A = \frac{\text{正常工作时间}}{\text{正常工作时间} + \text{维修时间}} \cdot$$

可见  $A$  越大,表示整机有效工作程度越高。提高有效度的方法是使 MTBF 增长和使 MTTR 缩短。

## 五、可靠性特征量间的相互关系

上几节所述的可靠度  $R(t)$ 、累积失效概率  $F(t)$ 、失效概率密度  $f(t)$ 、失效率  $\lambda(t)$ 、平均寿命  $\mu$ 、寿命方差  $\sigma^2$  以及可靠寿命  $T_r$ 、中位寿命  $T_{0.5}$ 、特征寿命  $T_{0.1}$  等构成了可靠性的一些基本指标,这些基本的可靠性指标虽然是在实践中分别从不同的角度提出来的,但是它们之间却有着极为密切的内在联系,现在,把它们之间的相互关系及其计算方法归纳在图1-9中。产品失效分布函数将在第二章中详细分析。

由图1-9可知,只要知道  $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$  和  $\lambda(t)$  这四个函数中的任一个,就可以顺着箭头方向,按相应公式,求出所有的可靠性指标来。

**【例1-2】** 设有10台导航设备投入试验,经实测,它们的失效时间如图1-10所示。求工作40h时的  $R(t)$ 、 $F(t)$  及30至40h之间的  $f(t)$  和  $\lambda(t)$ 。

$$\text{【解】 } R(40) = \frac{n - n_r(t)}{n} = \frac{10 - 5}{10} = 50\%,$$