

第一章 可靠性概论



内 容 提 要

§ 1-1 可靠性基本概念

- 一、可靠性的定义
- 二、可靠性的三大指标
- 三、产品可靠性设计中还应注意的问题

§ 1-2 可靠性特征量

- 一、可靠度 $R(t)$
- 二、累积失效概率 $F(t)$
- 三、失效概率密度 $f(t)$
- 四、失效率 $\lambda(t)$
- 五、产品的寿命特征

第一章 可靠性概论

§ 1-1 可靠性基本概念

一、可靠性的定义：

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称之为产品的可靠性，也称可靠度。

此处需要说明以下几点：

1. **产品**——指零件、元器件、设备或系统等。
2. **规定的条件**——就是指使用条件和环境条件等。常在产品说明书中说明。

3. 规定的时间——

也称任务时间，规定时间有时不用时、分、秒计算，而用其他量纲表示，如继电器等用触点开关的次数表示，规定时间一般是通过合同来决定的。

4. 完成规定的功能——

是制造设备或系统的目的。当不能完成功能时就称为故障，有时也称为失效。

故障可能有以下几种情况：

- (1) 不能工 (2) 工作不稳定；
作(3) 功能退化等等。

如电灯丝断了，属于（1）；

收音机无声音，一敲又响了，属于（2）；

电视机的双影越来越重，影象越来越模糊，属于（3）。

研究可靠性，必须首先要明确故障的内容才能研究之，因为可靠性本身就是产品不出故障的概率，不能确定故障就不能计算概率。

二、可靠性的三大指标

应弄清的定义：狭义可靠性；广义可靠性；维修性；有效性；贮存寿命等含义（见书 p1）**※**狭义可靠性， **※**有效性，全面描述了产品的可靠性和维修性。还有 **※**贮存寿命为可靠性三大指标，见图1—1示。

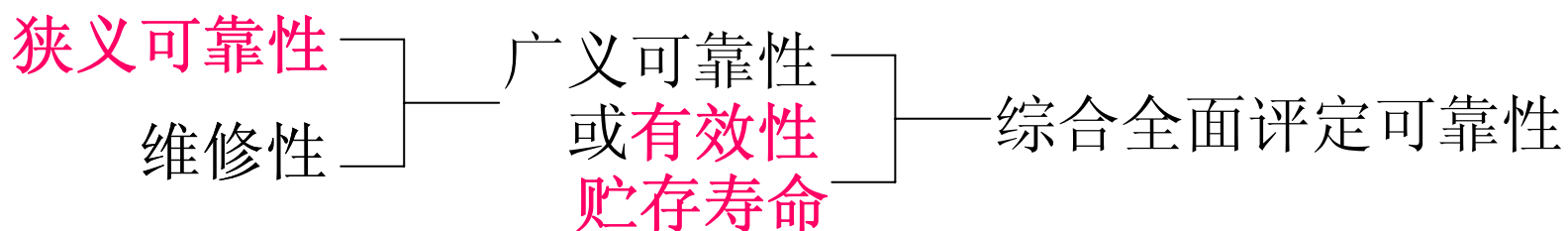


图1—1 可靠性的三大指标

本课程主要讲**狭义可靠性**，因为它是保证产品可靠性的基础。

三、产品可靠性设计中还应注意的问题

产品在工作中是**不能绝对杜绝故障**的，而且很多产品是允许进行维修再使用的。如我们日常使用的电视机、洗衣机、电冰箱、自行车等。因此在产品设计中必须考虑产品的**维修性和安全性**。考虑产品一旦坏了好修理，一旦坏了不出现恶性事故（如机器人杀人，电风扇电死人等）。

§ 1-2 可靠性特征量

可靠性的特征量主要是：可靠度、失效概率、失效率、失效概率密度和寿命等。

一、可靠度 $R(t)$

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 $R(t)$ 。

设 T 为产品寿命的随机变量，则可靠度函数为：

$$R(t) = P(T > t) \quad (1-1)$$

式 (1-1) $R(t) = P(T > t)$ 的含义:

表示产品的寿命 T 超过规定时间 t 的概率, 既产品在规定的的时间 t 内完成规定功能的概率。

根据可靠度的定义, 可以得出:

$$(1) \quad R(0) = 1;$$

$$(2) \quad R(\infty) = 0。$$

即开始使用时, 所有产品都是好的; 只要时间充分大, 全部产品都会失效。

可靠度与时间的关系曲线如图1-2所示。

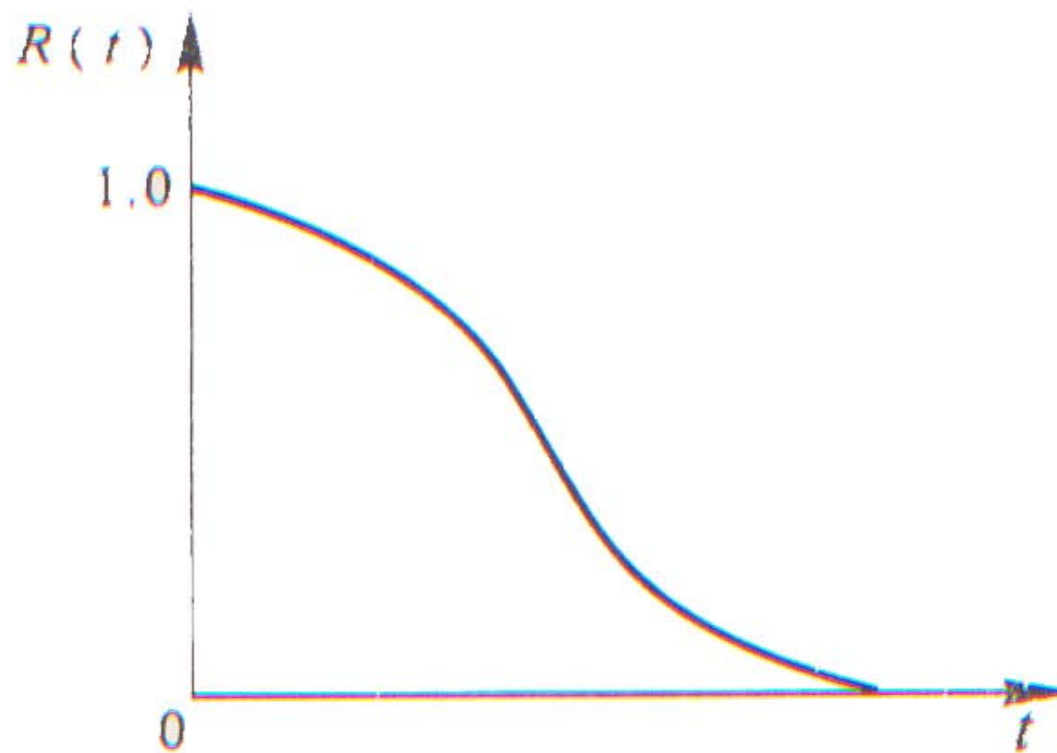


图 1—2 可靠度分布函数

2、可靠度估计值 $\hat{R}(t)$

(1) 对于不可修复的产品，可靠度估计值是指在规定的的时间区间 $(0, t)$ 内，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，可靠度估计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，不论对可修复产品还是不可修复产品，可靠度估计值的计算公式相同，即：

$$\hat{R}(t) = n_s(t) / n \quad (1-2)$$

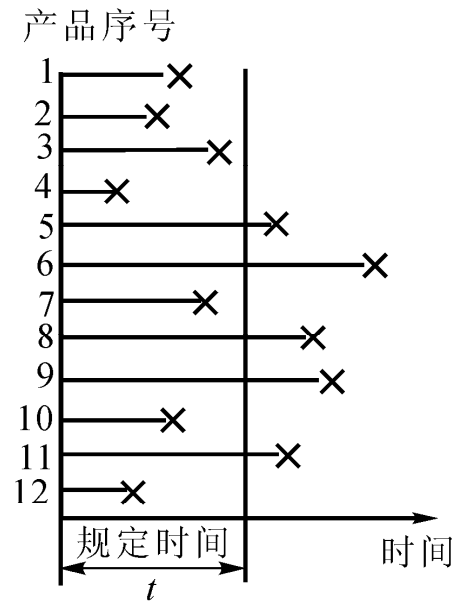
对不可修复产品，是将直到规定时间区间 $(0, t)$ 终了为止失效的产品数记为 $n_f(t)$ ；

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 $n_f(t)$ 也是 $(0, t)$ 时间区间的故障次数。故有关系式：

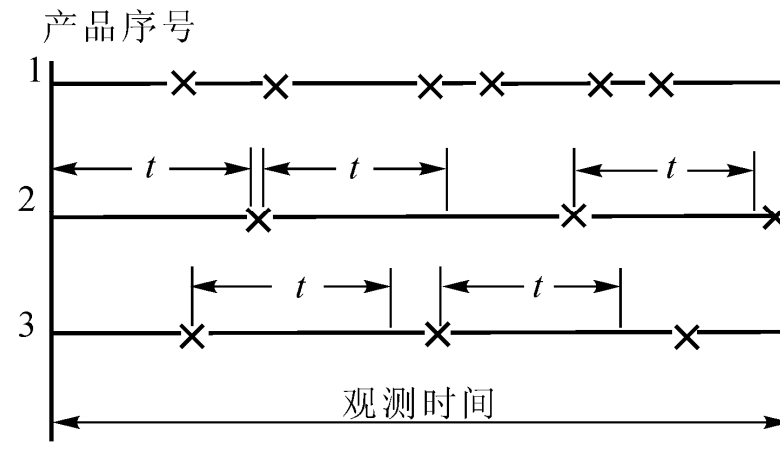
$$n_s(t) = n - n_f(t) \quad (1-3)$$

按规定，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时间则不予计入。

例 1-1 在规定条件下对**12个不可修复**产品进行无替换试验，。在某观测时间内对**3个可修复**产品进行试验，试验结果如图1-3所示。两图中“×”均为产品出现故障时的时间， t 为规定时间，求以上两种情况的产品可靠度估计值 $\hat{R}(t)$ 。



(a) 不可修复产品试验



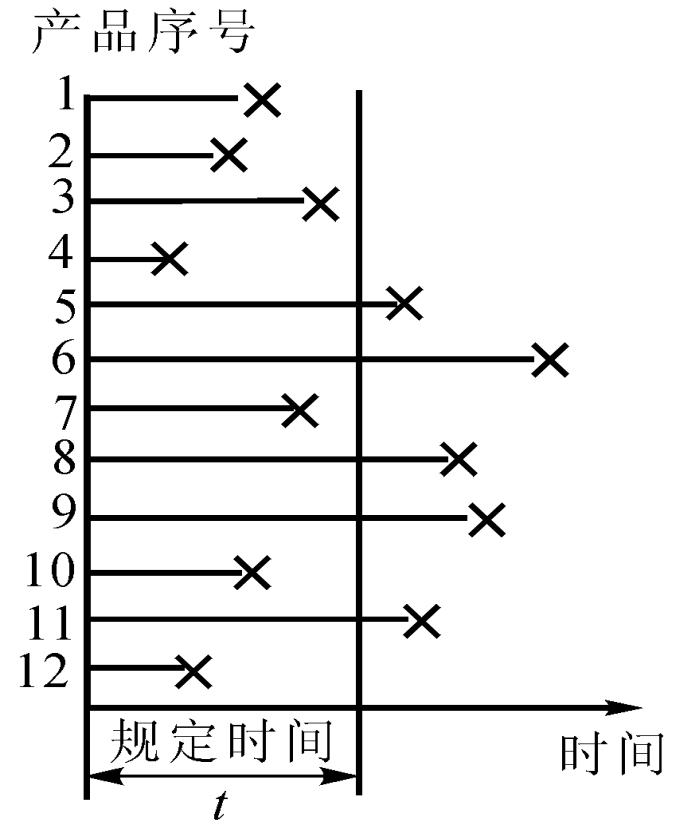
(b) 3台可修复产品试验

图1-3

解：（1）不可修复产品试验由图1-3（a）统计可得

$n_f(t) = 7$ ，因已知
 $n = 12$ ，由式（1-2）
 和（1-3）有：

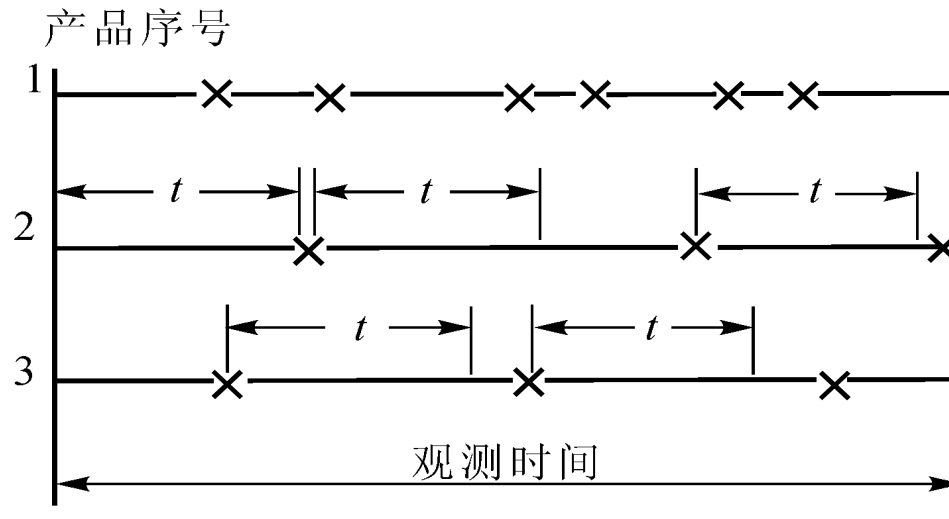
$$\begin{aligned}
 R(t) &= \frac{n_s(t)}{n} = \frac{n - n_f(t)}{n} \\
 &= \frac{12 - 7}{12} \\
 &= 0.4167
 \end{aligned}$$



(a) 不可修复产品试验

(2) 3台可修产品的试验由图1—3(b)统计可得

$n = 12$, $n_s(t) = 5$, 由式(1-3)得:



(b) 3台可修复产品试验

$$\begin{aligned}\hat{R}(t) &= n_s(t) / n \\ &= 5 / 12 = 0.4167\end{aligned}$$

二、累积失效概率 $F(t)$

1、累积失效概率的定义

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，其**值等于1减可靠度**。也可说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 **$F(t)$** 。有时也称为累积失效分布函数（简称失效分布函数）。其表示式为：

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - R(t) \quad (1-4)$$

从上述定义可以得出： $F(0) = 0$ ， $F(\infty) = 1$ 。

由此可见， $R(t)$ 和 $F(t)$ 互为对立事件。失效分布函数 $F(t)$ 与时间关系曲线如图 1-4 所示。

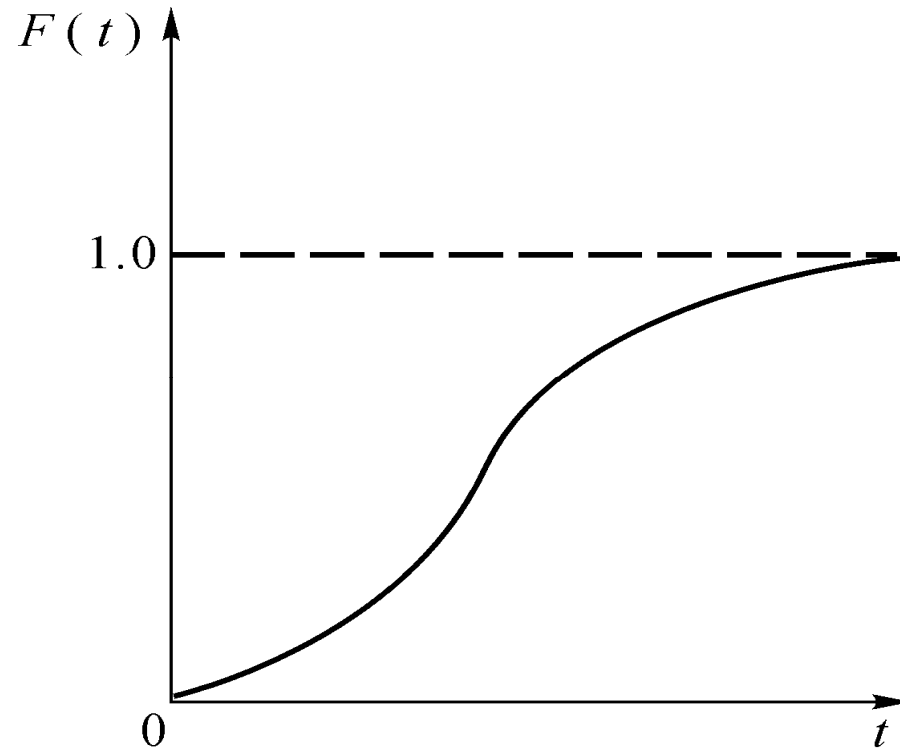


图1-4

2、累积失效概率的估计值 $\hat{F}(t)$

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) = n_f(t) / n \quad (1-5)$$

例1-2 有110只电子管，工作500h时有10只失效，工作到1000h时总共有53只电子管失效，求该产品分别在500h与1000h时的累积失效概率。

解： $\because n = 110, n_f(500) = 10, n_f(1000) = 53$

$$\therefore \hat{F}(500) = 10 / 110 = 9.09\%$$

$$\hat{F}(1000) = 53 / 110 = 48.18\%$$

三、失效概率密度 $f(t)$

1、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**。

其表示式为：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (1-6)$$

即

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (1-7)$$

2、失效概率密度的估计值 $\hat{f}(t)$

$$\hat{f}(t) = \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \left\{ \frac{n_f(t+\Delta t)}{n} - \frac{n_f(t)}{n} \right\} / \Delta t = \frac{1}{n} \bullet \frac{\Delta n_f(t)}{\Delta t} \quad (1-8)$$

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

当产品的失效概率密度 $f(t)$ 已确定时，由式 (1-4)、(1-7) 可知 $f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 之间的关系可用图 1-5 表示。

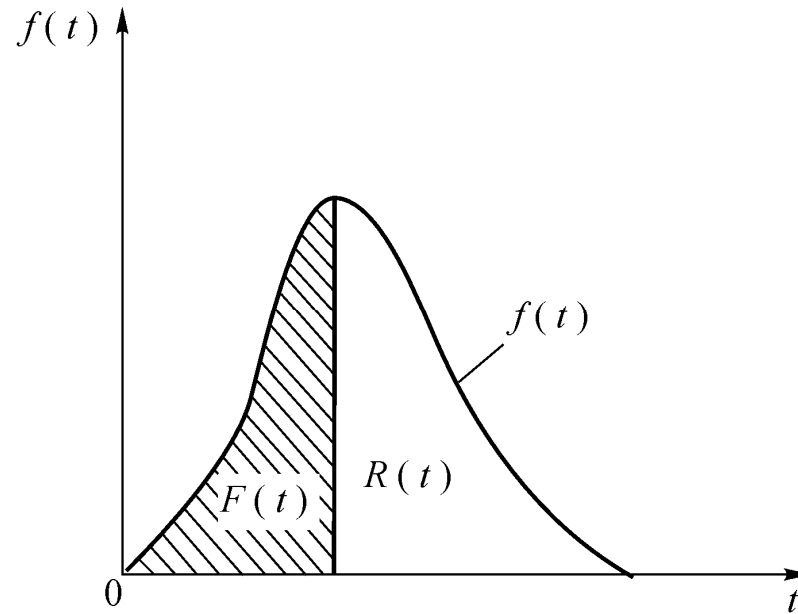


图1-5

四、失效率 $\lambda(t)$

1. 失效率的定义

失效率——是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。记作 $\lambda(t)$ ，称为**失效率函数**，有时也称为**故障率函数**。

按上述定义，失效率是在时刻 t 尚未失效的产品在 $t \sim t + \Delta t$ 的单位时间内发生失效的条件概率，即：

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t / T > t) \quad (1-9)$$

$\lambda(t)$ 反映 t 时刻失效的速率，故也称为瞬时失效率。

由条件概率

$$P(t < T < t + \Delta t / T > t) = \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)}$$

所以式 (1-9) 变为：

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t) \cdot \Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \cdot \Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \end{aligned}$$

(1—10)

工程实际中，失效率与时间关系曲线有各种不同的形状，但**典型的失效率曲线呈浴盆状**，该曲线有明显的三个失效期，见图1—6所示。

但对机械设备的失效率曲线如图(d)所示,它的早期、偶然和耗损三个失效期不明显。

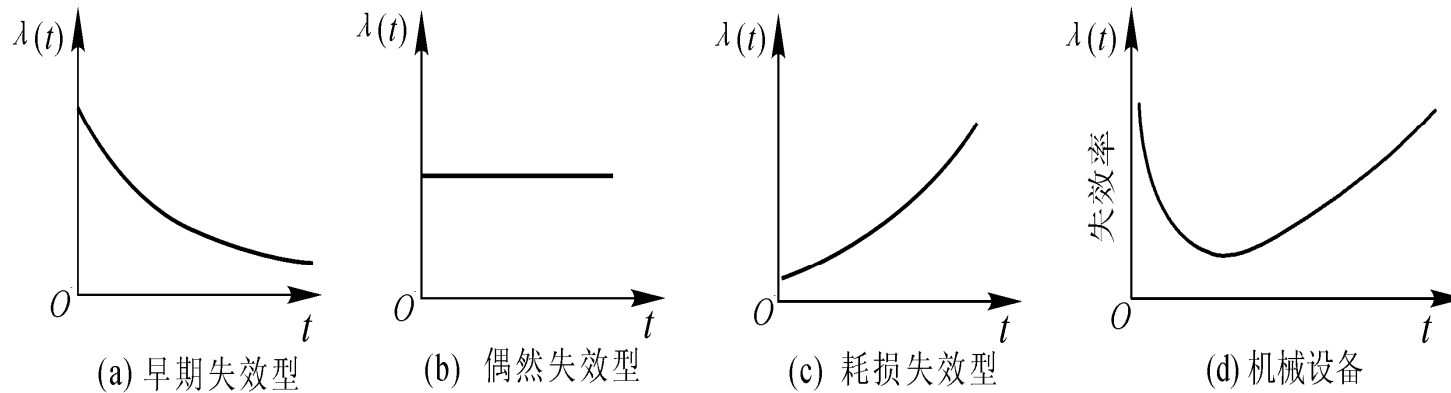


图1-6 失效率函数

2. 失效率的估计值 $\hat{\lambda}(t)$

不论产品是否可修复，产品失效率的估计值均可由下式求得：

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n_f(t + \Delta t) - n_f(t)}{n_s(t) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n_f(t)}{n_s(t) \Delta t} \quad (1-11)$$

例1-3 对100个某种产品进行寿命试验，在 $t=100\text{h}$ 以前没有失效，而在 $100\sim 105\text{h}$ 之间有1个失效，到 1000h 前共有51个失效， $1000\sim 1005\text{h}$ 失效1个，分别求出 $t=100$ 和 $t=1000\text{h}$ 时，产品的失效率和失效概率密度。

解：（1）求产品在100h时的失效率 $\hat{\lambda}(100)$ 和失效概率密度 $\hat{f}(100)$ 。

据题意有：

$$n = 100, n_s(100) = 100,$$

$$\Delta n_f(100) = 1, \Delta t = 105 - 100 = 5(\text{h})$$

由式（1—11）得：

$$\begin{aligned}\hat{\lambda}(100) &= \frac{\Delta n_f(100)}{n_s(100) \cdot \Delta t} \\ &= \frac{1}{100} \times \frac{1}{5} = 0.2\% / \text{h}\end{aligned}$$

由式（1—8）得：

$$\hat{f}(100) = \frac{1}{n} \frac{\Delta n_f(100)}{\Delta t} = \frac{1}{100} \times \frac{1}{5} = 0.2\% / \text{h}$$

（2）求产品在1000h时的失效率 $\hat{\lambda}(1000)$ 和失效概率密度 $\hat{f} = (1000)$ 。

据题意有

$$n = 100, n_s(1000) = 100 - 51 = 49,$$

$$\Delta n_f(1000) = 1, \Delta t = 1005 - 1000 = 5(\text{h})$$

由式（1—11）得：

$$\hat{\lambda}(1000) = \frac{\Delta n_f(1000)}{n_s(1000)\Delta t} = \frac{1}{49 \times 5} = 0.4\% / \text{h}$$

由式（1—8）得：

$$\begin{aligned}\hat{f}(1000) &= \frac{1}{n} \frac{\Delta n_f(1000)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{100} \times \frac{1}{5} = 0.2\% / \text{h}\end{aligned}$$

由上例计算结果可见，从失效概率观点看，在 $t = 100$ 和 $t = 1000\text{h}$ 处，单位时间内失效频率是相同（0.2%）的，而从失效率观点看，1000h处的失效率比100h处的失效率加大一倍（0.4%），后者更灵敏地反映出产品失效的变化速度。

3、平均失效率 $\overline{\lambda}$

在工程实践中，常常要用到平均失效率，其定义为：

(1) 对不可修复的产品是指在一个规定时间内总失效产品数 $n_f(t)$ 与全体产品的累积工作时间 T 之比。

(2) 对可修复的产品是指它们在使用寿命期内的某个观测期间，所有产品的故障发生总数 $n_f(t)$ 与总累积工作时间 T 之比。

所以不论产品是否可修复，平均失效率估计值的公式为：

$$\bar{\lambda} = \frac{n_f(t)}{T} = \frac{n_f(t)}{\sum_{i=1}^{n_f} t_{f_i} + n_s t} \quad (1-12)$$

式中 t_{f_i} ——第*i*个产品失效前的工作
 间；
 n_s ——整个试验期间未出现失效的
 n_f 产品数；
 ——整个试验期间出现失效的产
 品数。

4.失效率单位

失效率的常用单位有：**%/小时**，**%/千小时**，**菲特等**。其中，菲特是失效率的基本单

$$1\text{Fit} = 10^{-9} / \text{h}$$

，它表示1000个产品工作100万小时后，产品的寿命特征

在可靠性工程中，规定了一系列与寿命有关的指标：**平均寿命**、**可靠寿命**、**特征寿命**和**中位寿命**等等。这些指标总称为**可靠性寿命**特征，它们也都是衡量产品可靠性的尺度。

1. 平均寿命 θ

在寿命特征中最重要的是**平均寿命**。它定义为寿命的平均值，即寿命的数学期望，记作“ θ ”，数学公式为：

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1-13)$$

值得注意的是，可以证明，能用可靠度 **$R(t)$** 来表示平均寿命

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-14)$$

由于可维修产品与不可维修产品的寿命有不同的意义，故平均寿命也有不同的意义。

用**MTBF**表示可维修产品的平均寿命，称**平均无故障工作时间**；用**MTTF**表示不可维修产品的平均寿命，称为“**失效前的平均工作时间**”。

不论产品是否可修复，平均寿命的估计值可用下式表示：

$$\hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1-15)$$

式中 n ——对**不可修产品**，它代表试验的**产品数**；
对可修产品，它代表试验产品发生故障次数。
 t_i ——对**不可修产品**，它代表第*i*件**产品寿命**；对于可修产品，它代表每次故障修复后的**工作时间**。

2.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，在 $t=0$ 时， $R(0) = 1$ ，当工作时间增加， $R(t)$ 逐渐减小。**可靠度与工作时间有一一对应的关系**。有时需要知道可靠度等于给定值 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 T_r 寿命。即

$$R(T_r) = r \quad (1-16)$$

图1-7 所示为可靠寿命与可靠水平 r 的关系。

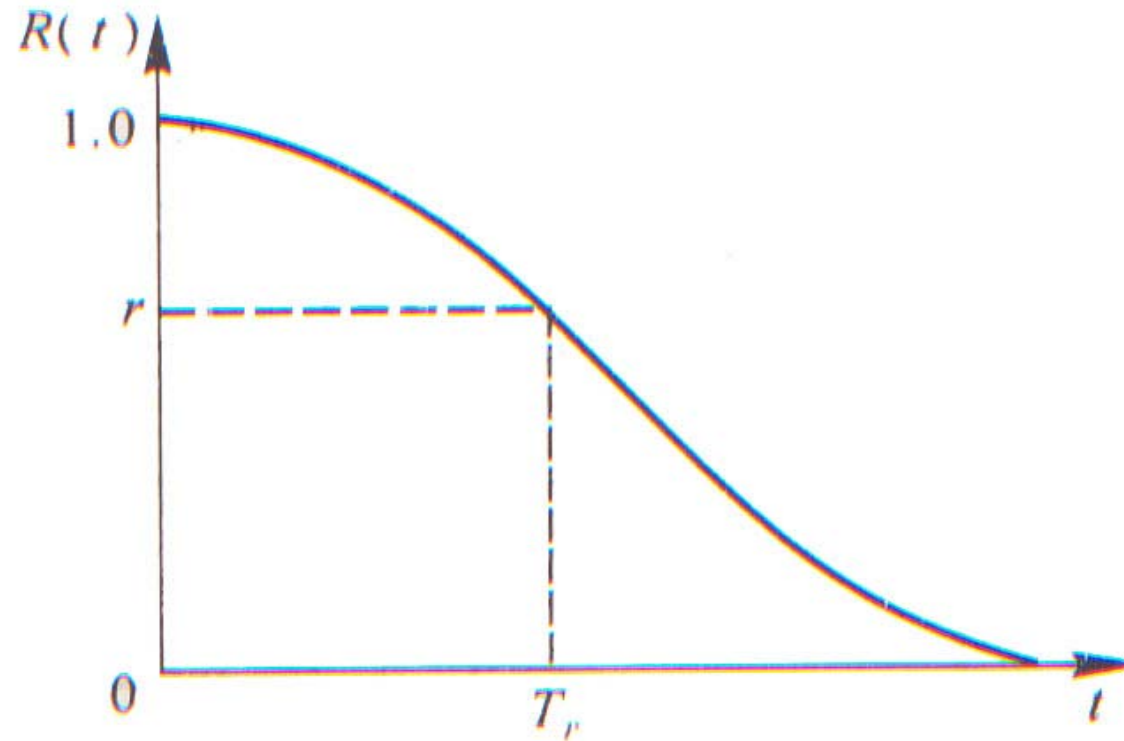


图 1—7 可靠寿命 T_r 与可靠水平 r 的关系

特征寿命：当 $R(t) = e^{-1} = 0.37$ 时对应的 $T_{e^{-1}}$ 寿命称**特征寿命**。

中位寿命：当 $R(t) = 0.5$ 时对应的 $T_{0.5}$ 寿命称**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%**，如图1-8所示。

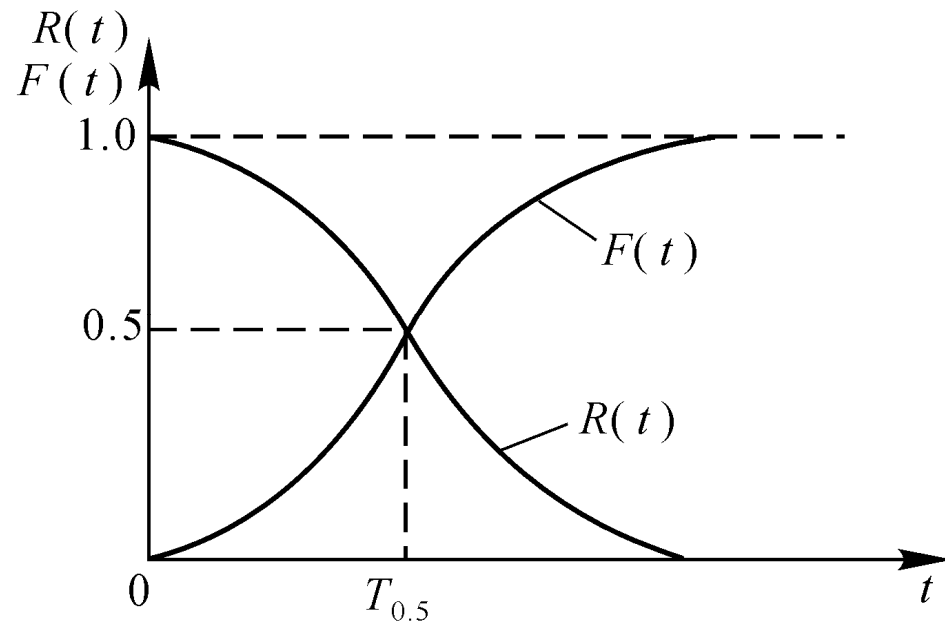


图1-8 中位寿命与 $R(t)$ 及 $F(t)$ 的关系

上述介绍了各种可靠性特征量，我们用图1-9形象地描述它们之间的关系（设 $t \geq 0$ ）。

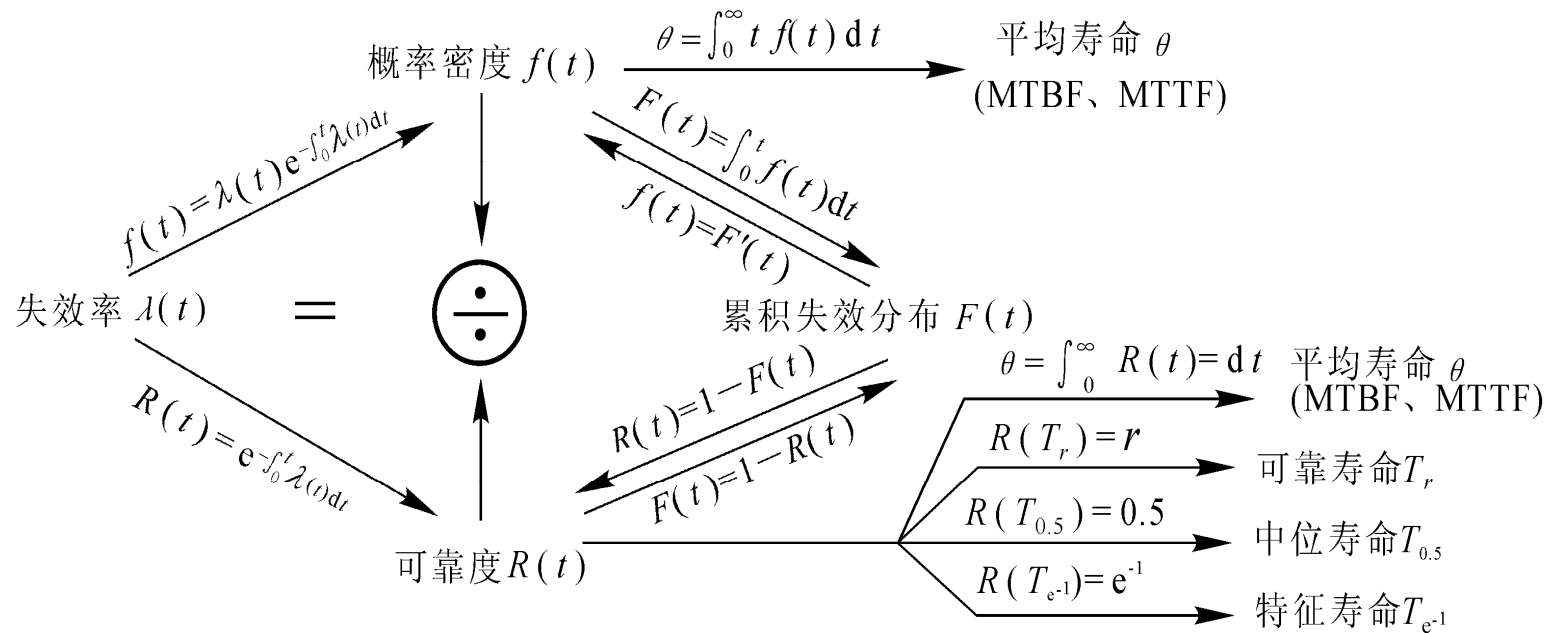


图1-9 可靠性特征量的关系图



中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdoodoo](#) 分享