

第一章 可靠性基础知识

- 可靠性的概念。
- 可靠性参数体系、常用可靠性参数及可靠性常用分布。

当你准备购买一件电子产品时，你关注的是它的哪些方面？其中最关注的是什么？

我们除关注产品的功能和性能外，在谈论某品牌的产品“好”的时候，所隐含的意思就是该品牌产品的质量与可靠性高。质量与可靠性是我们最为关注的产品质量特性。

随着新材料、新技术的发展与应用使得产品性能得到迅速提高，但随着产品性能的提高，其复杂程度也增加，故障频繁。出厂检验合格的产品，在使用寿命期内保持其产品质量指标的数值而不致失效，这就是可靠性问题。

本章将在介绍可靠性的基本概念、可靠性术语、可靠性参数体系及常用可靠性参数、可靠性常用分布等知识的基础上，讲解造成产品故障的主要原因，以及可靠性的重要意义。

第一节 可靠性基本概念

1. 可靠性的概念

可靠性的概念，可以说，自从人类开始使用工具起就已经存在。然而可靠性理论作为一门独立的学科出现却是近几十年的事情。可靠性归根结底研究的还是产品的可靠性，而通常所说的“可靠性”指的是“可信赖的”或“可信任的”。一台仪器设备，当人们要求它工作时，它就能工作，则说它是可靠的；而当人们要求它工作时，它有时工作，有时不工作，则称它是不可靠的。

最早的可靠性定义由美国 AGREE 在 1957 年的报告中提出，1966 年美国又较正规地给出了传统的或经典的可靠性定义：“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力”。它为世界各国的标准所引用，我国的可靠性定义也与此相同。这里的产品是泛指，它可以是一个复杂的系统，也可以是一个零件。

出厂检验合格的产品，在使用寿命期内保持其产品质量指标的数值而不致失效，这就是可靠性问题。因此，可靠性也是产品的一个质量指标，而且是与时间有关的参量。只有在引进了可靠性指标后，才能和其他质量指标一起，对产品质量做全面的评定。所谓产品是指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、设备或系统，可以是零件也可以是由它们装配而成的机器，或由许多机器组成的机组和成套设备，甚至还把人的作用也包括在内。在具体使用“产品”一词时，其确切含义应加以说明。例如，汽车板簧、汽车发动机、汽车整车等。

从定义可以看出，产品的可靠性是与“规定的条件”分不开的。这里所讲的规定条件包括产品使用时的应力条件（温度、压力、振动、冲击等载荷条件）、环境条件（地域、气候、介质等）和储存条件等。规定的条件不同，产品的可靠性是不同的。

产品的可靠性又与“规定的时间”密切相关。一般说来，经过零件筛选、整机调试和

磨合后，产品的可靠性水平会有一个较长的稳定使用或储存阶段，以后随着时间的增长其可靠性水平逐渐降低。

产品的可靠性还和“规定的功能”有密切的联系。一个产品往往具有若干项技术指标。定义中所说的“规定功能”是指产品若干功能的全体，而不是其中的一部分。

在实际工作中，产品往往由于各种偶然因素而发生故障，如零件的突然失效、应力突然改变、维护或使用不当等。由于这些原因都具有偶然性，所以对于一个具体产品来说，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一定的规律性，偶然事件中包含必然性。我们虽然不能知道发生故障的确切时刻，但是可以估计在某时间段内，产品完成规定功能的能力大小。因此，应用概率论与数理统计方法对产品的可靠性进行定量计算是可靠性理论的基础，包括下列四要素。

① 规定条件：一般指的是使用条件、环境条件。包括应力、温度、湿度、尘砂、腐蚀等，也包括操作技术、维修方法等条件。对于汽车来说，主要是公路条件、气候条件和行驶速度；对于显示器来说，主要指环境条件、供电条件和工作条件。例如，开机时间、待机时间、关机时间等。

② 规定时间：是可靠性区别于产品其他质量属性的重要特征，一般也可认为可靠性是产品功能在时间上的稳定程度。因此，以数学形式表示的可靠性各特征量都是时间的函数。这里的时间概念不限于一般的年、月、日、时、分、秒，也可以是与时间成比例的次数、距离。例如，应力循环次数、汽车行驶里程等。

③ 规定功能：要明确具体产品的功能是什么，怎样才算是完成规定功能。产品丧失规定功能称为失效，对可修复产品通常也称为故障。怎样才算是失效或故障，有时很容易判定，但更多情况则很难判定。当产品指的是某个螺栓时，显然螺栓断裂就是失效。当产品指的是某个设备时，对某个零件损坏而该设备仍能完成规定功能就不能算失效或故障。有时虽然某些零件损坏或松脱，但在规定的短时间内可容易地修复也可不算是失效或故障。若产品指的是某个具有性能指标要求的机器，当性能下降到规定的指标后，虽然仍能继续运转，但也应算是失效或故障。究竟怎样算是失效或故障，有时要涉及厂商与用户不同看法的协商，有时要涉及当时的技术水平和经济政策等而做出合理的规定。

④ 能力：只是定性地理解能力是比较抽象的，为了衡量与检验，后面将加以定量描述。产品的失效或故障均具有偶然性，一个产品在某段时间内的工作情况并不能很好地反映该产品可靠性的高低，而应该观察大量该类产品的运行情况并进行合理的处理后才能正确地反映该产品的可靠性，因此对能力的定量描述需使用概率和数理统计的方法。

2. 可靠性其他常用概念

可靠性：产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的能力。

维修性：在规定条件下使用的产品，在规定的时间内，按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的能力。

失效（故障）：产品丧失规定的功能，对可修复产品通常也称故障。

失效模式：失效的表现形式。

失效机理：引起失效的物理、化学变化等内在原因。

早期失效：产品由于设计制造上的缺陷等原因而发生的失效。

偶然失效：产品由于偶然因素发生的失效。

耗损失效：产品由于老化、磨损、损耗、疲劳等原因引起的失效。

寿命试验：为评价与分析产品的寿命特征量而进行的试验。

可靠性验证试验：为确定产品的可靠性特征量是否达到所要求的水平而进行的试验。

可靠性测定试验：为确定产品的可靠性特征量的数值而进行的试验。

筛选试验：为选择具有一定特性的产品或剔除早期失效而进行的试验。

恒定应力试验：应力保持不变的试验。

步进应力试验：随时间分阶段逐步增大应力的试验。

序进应力试验：随时间等速增大应力的试验。

加速试验：为缩短试验时间，在不改变失效机理的条件下，用加大应力的方法进行的试验。

失效模式、影响与危害度分析 (FMECA)：在系统设计过程中，通过对系统各组成单元潜在的各种失效模式及其对系统功能的影响、产生后果的严重程度进行分析，提出可能采取的预防改进措施，以提高产品可靠性的一种设计分析方法。

失效树分析 (FTA)：在系统设计过程中，通过对可能造成系统失效的各种因素（包括硬件、软件、环境、人为因素）进行分析，画出逻辑框图（即失效树），从而确定系统失效原因的各种可能组合方式及其发生概率，以计算系统失效概率，采取相应的纠正措施，以提高系统可靠性的一种设计分析方法。

可靠度：可靠度就是在规定的时间内和规定的条件下系统完成规定功能的成功概率，一般记为 R 。它是时间的函数，故也记为 $R(t)$ ，称为可靠性函数。

失效率（故障率）：通俗地讲，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。失效率为产品运行到 t 时刻后单位时间内发生故障的产品数与时刻 t 时完好产品数之比。失效率有时也称为瞬时失效率或简单地称为故障率。一般记为 λ ，它也是时间 t 的函数，故也记为 $\lambda(t)$ ，称为失效率函数，有时也称为故障率函数或风险函数。

平均寿命：平均寿命是寿命的平均值，对不可修复产品常用失效前平均时间表示，也叫平均首次故障时间，一般记为 MTTF (Mean Time To Failure)；对可修复产品则常用平均无故障工作时间表示，也叫平均故障间隔时间，一般记为 MTBF (Mean Time Between Failure)。平均无故障工作时间 MTBF，是指相邻两次故障之间的平均工作时间，它仅适用于可维修产品。同时也规定产品在总的使用阶段累计工作时间与故障次数的比值为 MTBF，即

$$\text{MTBF} = \text{总的工作时间} / \text{故障数}$$

MTTF 和 MTBF 都表示无故障工作时间 T 的期望 $E(T)$ (或简记为 t)。对可修复产品，MTTF 和 MTBF 这两个参数的计算没有区别。下文只介绍 MTBF。MTBF 越大，说明产品的可靠性越高。对不可修复的产品，失效时间就是产品的寿命，故 MTTF 即为平均寿命。

一个可修复产品在使用过程中发生了 N_0 次故障，每次故障修复后又重新投入使用，测得其每次工作持续时间为 t_1, t_2, \dots, t_{N_0} 。其平均故障间隔时间 (MTBF) 为

$$\text{MTBF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i = \frac{T}{N_0} \quad (1-1)$$

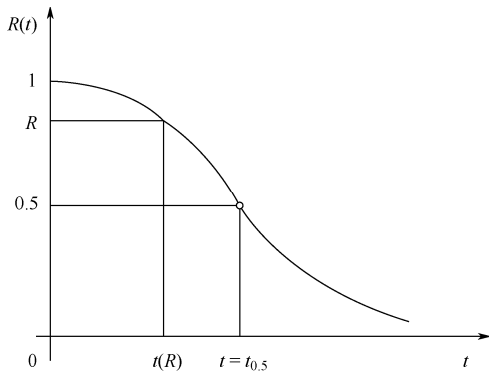


图 1-1 可靠度随着工作时间的变化曲线

其中, T 为产品总的工作时间。

可靠寿命: 可靠寿命是给定的可靠度所对应的时间, 一般记为 $t(R)$ 。如图 1-1 所示, 一般可靠度 R 随着工作时间 t 的增大而下降, 对给定的不同可靠度 R , 则有不同的 $t(R)$, 即

$$t(R) = R^{-1}(t)$$

式中, R^{-1} —— R 的反函数, 即由 $R(t) = R$ 反求 t 。

【例】 设有 5 个不可修复产品进行寿命试验, 它们发生失效的时间分别是 1000h、1500h、2000h、2200h、2300h。求产品的 MTTF 的观测值。

解: $MTTF = (1000 + 1500 + 2000 + 2200 + 2300) / 5 = 1800h$ 。

第二节 可靠性参数体系及可靠性常用分布

1. 可靠性参数体系

在实际应用中人们逐步感到了传统的可靠性定义的限制性, 因为它只反映了任务成功的能力。在进行可靠性设计时需要综合权衡完成规定功能和减少用户费用两个方面的需求, 将可靠性分为基本可靠性和任务可靠性。可靠性参数用于定量地描述产品的可靠性水平和故障强度, 可靠性参数体系完整地表达了产品的可靠性特征。可靠性工程中使用的可靠性参数多达数十个, 参数的使用随着工程对象或者装备类型的不同而变化, 在同一种装备中还可能随着产品层次的不同而不同。系统级的可靠性参数一般以可靠度为主, 设备级的可靠性参数一般以 MTBF 为主。

一般来说, 合同可靠性参数采用固有可靠性值。固有可靠性是指产品从设计到制造整个过程中所确定的内在可靠性。一般使用的可靠性指标都是指使用可靠性值。使用可靠性在固有可靠性的基础上还考虑了使用、维护对产品可靠性的影响, 包括使用维护方法和程序, 以及操作人员的技术熟练程度等。

可靠性参数体系要完整全面, 例如, 洗衣机产品的可靠性参数体系要包括 MTBF (小时) 和 MTBF (次)。可靠性指标是规定要达到的可靠性参数值, 例如, 要求洗衣机达到 MTBF 为 5000h, 则 5000h 为该洗衣机的 MTBF 指标。可靠性指标分为目标值和最低可接受值两类。

2. 可靠性常用分布

(1) 可靠性常用分布函数

可靠性问题的提出, 来自对产品寿命的关注。任何产品从开始使用到第一次发生故障, 时间究竟有多长, 不可能确切知道。显然, 产品的正常使用寿命不是一个确定的时间, 而是一个随机变量。同样, 如果产品是可修复的, 则其故障修复后再次使用, 到下一次故障的时间仍然是一个随机变量。因此, 可以用概率分布来模拟可靠性相关的问题。由此可见, 对产品“寿命”的概率模拟也就可以用“失效时间”来表征。对不可修复产品, 就是指失

效前时间；对可修复产品，最关心的是其相邻两次故障之间的持续可用时间，可称为“无故障可用时间”。下面，先介绍一般可靠度函数，然后简述二项分布、泊松分布、正态分布，以及指数分布的应用。

可靠度是指在规定的条件下和规定的时间区间 (t_1, t_2) 内无故障持续完成规定功能的概率，常用 $R(t)$ 表示。工程计算中常常将不能完成规定功能的概率 $Q(t)$ 称为不可靠度，并有：

$$R(t) + Q(t) = 1 \quad \text{或} \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

(2) 可靠度函数的形状

典型电子元件的故障率特性曲线如图 1-2 所示，由于它的形状而常常称其为浴盆曲线。通常将其分为三个区间，区间 I 常称初期损坏期或调试阶段。它可能由于大批量产品中的次品，或设备制造过程中的偶然缺陷或设备在初期运行时的不稳定等因素造成，这时故障率是一个随时间下降的曲线。

区间 II 常称正常使用期或有效寿命期，故障率为常数，这时故障的发生纯属偶然，是唯一适用指数分布的区域。区间 III 则代表耗损或元件疲劳屈服的阶段，这时故障率随时间急剧上升。对于故障密度函数，也可区别出相应的三个区间，如图 1-3 所示，区域 II 非常近似于负指数曲线；区域 I 则有比指数曲线高得多的数值；区域 III 可用正态分布、 γ 分布或威布尔分布等来描述。

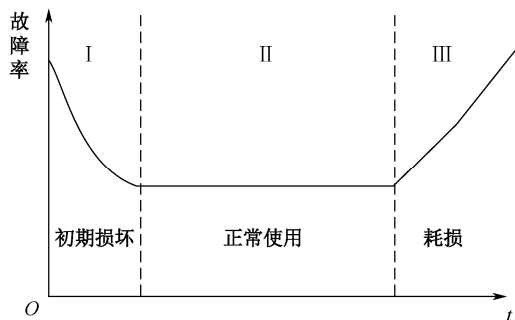


图 1-2 典型电子元件的故障率特性曲线

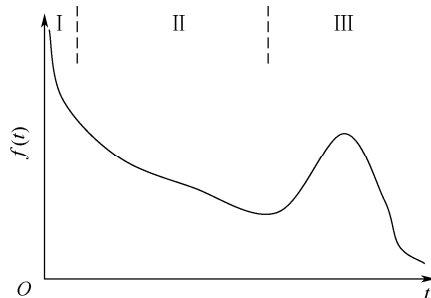


图 1-3 故障密度函数

(3) 二项分布

如果某个试验只有成功和失败两种结果，且假设成功的概率是 p ，失败的概率是 q ，则对于 n 次试验有

$$(p + q)^n = \sum_{r=0}^n C_n^r p^{n-r} q^r = 1 \quad (1-2)$$

称其为二项分布，并须满足以下条件：

- ① 有限的试验次数。
- ② 每次试验只能出现两种结果之一。
- ③ 所有试验结果必须有相同的概率。
- ④ 每次试验必须是独立的。

(4) 泊松分布

泊松分布描述给定时间或空间内发生率为常数时一定次数单个事件发生的频率，也就是说事件的发生必须是随机的。它与二项分布的主要区别是只考虑事件的发生而不考虑事件的不发生。

如果利用泊松分布来模拟失效过程，这时常将其参数 λ 称为故障率，因此：

$$\lambda = \text{单位时间的平均故障数}$$

泊松分布描述为：

$$P_x(t) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \quad (1-3)$$

式中， x 代表的是变量的值，这个表达式涉及了故障数，但并未涉及元件故障后需要修复或更换的时间。

(5) 正态分布

正态概率分布，简称正态分布（有时称为高斯分布），是使用得最广泛的一种分布之一，它的概率密度函数对均值完全对称，其形状和位置由均值 μ 和标准差 σ 唯一确定。

正态分布密度函数可表达为：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-4)$$

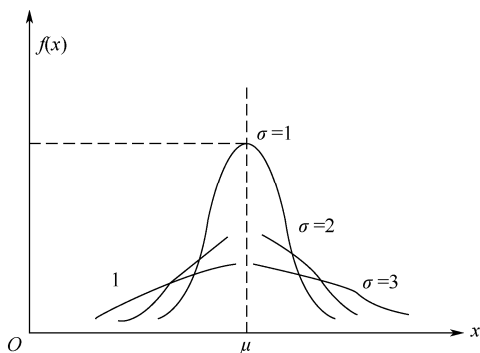


图 1-4 正态分布概率函数

图 1-4 所示为正态分布概率函数。它的主要特点是当随机变量为 μ 时，概率为 0.5，因它是正态分布的均值，而且由于 μ 确定了曲线的横坐标位置，常称它为位置参数； σ 确定了离散度的大小，常称其为尺度参数，它也就是正态分布的标准差。

正态分布密度函数不能用简单的积分方法求解，通常是由计算机解算，并编制了不同积分限时曲线下面积的标准表，从而可查表进行计算。标准表的依据是用标准正态变量 z 进行式 (1-4) 的代换。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1-5)$$

而得出下面的标准形式：

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] \quad (1-6)$$

如果手边没有标准正态分布表，正态函数曲线下的面积可以用近似多项式求解。例如，求图 1-5 所示面积 $Q(z)$ ，则

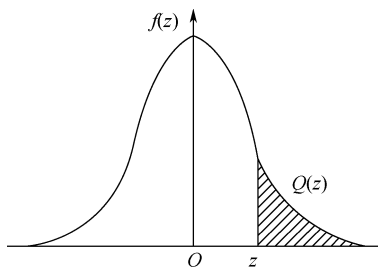


图 1-5 正态函数曲线

$$Q(z) = y(b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5) \quad (1-7)$$

式中,

$$y = f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (1-8)$$

$$t = \frac{1}{1 + rz} \quad (1-9)$$

$$b_1=0.31938153, b_2=-0.3563782$$

$$b_3=1.781477937, b_4=-1.821255978$$

$$b_5=1.330274429, r=0.2316419$$

经验公式的计算误差 $|\varepsilon| < 7.5 \times 10^{-8}$, 因此其结果足够精确。

(6) 指数分布

一般所说的指数分布, 严格说来应该是负指数分布, 也可以把它看成泊松分布的特殊情况, 即只考虑第一次故障概率的情况。指数分布是系统可靠性问题中用得最广泛的一种分布, 目前工程实用中常常不加证明地使用故障率为常数或者说与时间无关的假设。这一点通常使用以下三种理由来解释: 第一, 如果不做这样的简化, 则对大系统, 问题的复杂程度将使解析方法难以应用。第二, 评估所用的数据常常很有限, 不足以检验所用分布的正确性。因此, 使用更复杂的方法缺乏足够可信数据的支撑。第三, 如果只研究系统的稳态概率值, 已经有资料验证, 只要元件在统计上是独立的, 则分布类型对结果的影响甚小。不过应当强调的是, 如果是研究与时间相关的概率, 不同的分布会得到明显不同的结果。

如前文所述, 当故障率为常数时, 可靠度为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-10)$$

实践练习一

1-1 设 $t=0$ 时, 投入工作的 10000 只灯泡, 以天作为度量时间的单位, 当 $t=365$ 天时, 发现有 300 只灯泡坏了, 则灯泡工作一年时的可靠度为 ()。

- A. 0.87 B. 0.77 C. 0.97 D. 0.67

1-2 在 1-1 题中, 若一年后的第一天又有 1 只灯泡坏了, 此时故障率是 ()。

- A. 0.000103/天 B. 0.00103/天 C. 0.103/天 D. 0.0103/天

1-3 对 5 个不可修复产品进行寿命试验, 它们发生失效的时间分别是 1000h、1500h、2000h、2200h、2300h, 该产品的 MTTF 观测值是 ()。

- A. 1800h B. 2100h C. 1900h D. 2000h

1-4 有一批电子产品累计工作 10 万小时, 发生故障 50 次, 该产品的 MTBF 观测值是 ()。

- A. 2000h B. 2100h C. 1900h D. 1800h

1-5 在浴盆曲线中, 产品的故障率较低且基本处于平稳状态的阶段是 ()。

- A. 初期损坏阶段 B. 正常使用阶段
C. 偶然故障阶段 D. 耗损阶段

- 1-6 不是因为耗损性因素引起的是 ()。
- A. 老化 B. 疲劳 C. 磨损 D. 加工缺陷
- 1-7 在产品投入使用的初期, 产品的故障率较高, 且具有随时间 () 的特征。
- A. 逐渐下降 B. 保持不变
C. 先降低后提高 D. 迅速下降
- 1-8 产品典型的故障率曲线中不包括 () 阶段。
- A. 初期损坏阶段 B. 报废故障处理阶段
C. 偶然故障阶段 D. 耗损阶段
- 1-9 产品可靠性随着工作时间的增加而 ()。
- A. 逐渐增加 B. 保持不变
C. 逐渐降低 D. 先降低后提高
- 1-10 常用的维修性度量参数是 ()。
- A. MTTF B. MTBF C. λ D. MTTR
- 1-11 产品固有可靠性与 () 无关。
- A. 设计 B. 制造 C. 管理 D. 使用
- 1-12 产品可靠性与 () 无关。
- A. 规定时间 B. 规定条件 C. 规定功能 D. 规定维修
- 1-13 () 是由于产品的规定功能随时间增加而逐渐衰退引起的。
- A. 早期故障 B. 偶然故障 C. 独立故障 D. 耗损故障
- 1-14 为了验证开发的产品的可靠性是否与规定的可靠性要求一致, 用具有代表性的产品在规定条件下所做的试验叫 () 试验。
- A. 环境应力筛选 B. 可靠性增长
C. 可靠性鉴定 D. 可靠性测定
- 1-15 工作到某时刻尚未发生故障 (失效) 的产品, 在该时刻后一个单位时间内发生故障 (失效) 的概率, 称为产品的 ()。
- A. 故障 (失效) 率
B. 瞬时故障 (失效) 率
C. 故障 (失效) 率或瞬时故障 (失效) 率
D. 以上均不对
- 1-16 环境条件越严酷, 产品 () 越低。
- A. 可靠性 B. 可用性 C. 可信性 D. 维修性
- 1-17 汽车属于 () 产品, 日光灯管属于 () 产品。
- A. 不可修复 可修复
B. 可修复 可修复
C. 不可修复 不可修复
D. 可修复 不可修复