高等学校试用教材

汽车可靠性设计

武汉工学院
吉林工业大学 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

汽车可靠性设计

武汉工学院
吉林工业大学 编

机械工业出版社

本书阐述了汽车可靠性设计的基本知识和理论。系统地介绍了系统可靠性、汽车零件的可靠性设计及可靠性试验等内容，并简要介绍了可靠性设计所用的数学基础知识。书中列举的一些例题使内容更容易得到理解。

本书取材新颖、深度适宜，是高等工科院校汽车拖拉机专业教材，也可供其他专业师生及从事机械可靠性设计工作的技术人员参考。

汽车可靠性设计

武汉工学院
吉林工业大学 编

*

责任编辑：赵爱宁　版式设计：吴静霞
责任印制：王国光　责任校对：熊天荣

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张11·字数 265 千字
1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷
印数 0,001—1,800 ·定价：2.25 元

*

ISBN 7-111-01987-3/U·50（课）

前　言

本书系根据1983年9月在长春召开的全国汽车专业教材编审委员会会议制定的汽车专业教学计划和1986年9月在武汉工学院讨论制订的“汽车可靠性设计”教材编写大纲而编写的。

本书是一本汽车拖拉机专业所用的教科书，它反映了可靠性设计在汽车工程上的应用。书中着重叙述可靠性设计、系统设计、寿命试验等重要内容，同时为便于学习，书中简要地归纳了本教材所用的概率论和数理统计等数学基础。

学习本书后，可对可靠性设计有进一步认识，使可靠性工程的技术与方法在汽车工业中发挥作用，使可靠性工程逐步被人们所重视。

本书由武汉工学院和吉林工业大学合编，参加编写工作的有：武汉工学院张子正（第一、二章），吉林工业大学林明芳（第三章、第五章§5-3、四，§5-5，§5-6、一、二、三），武汉工学院毛志坚（第四章），吉林工业大学吴锦秋（第五章§5-1，§5-2，§5-3、一、二、三，§5-4，§5-6四、五）。

本书由华南理工大学罗明廉负责审稿，吉林工业大学吴锦秋负责统稿。

本书为高等学校汽车拖拉机专业教材，也可供有关专业教师和工程技术人员参考。

由于汽车可靠性设计是一门新兴学科，加之编者水平有限，书中有不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

1988年11月

目　录

第一章 可靠性基本概念

§1-1 可 靠 性 概 述

对于各类产品，无论是技术装备或生活器具，人们都根据具体情况制订了一些相应的评价指标，如性能指标、经济指标、安全指标以及可靠性指标等。在这些指标中，可靠性是最重要的一项。任何一种产品，即使性能很好，若可靠性达不到要求，就得不到人们的信任。

可靠性作为产品的一项质量指标而定量地提出来，虽然才半个世纪左右，但可靠性一词却早为人们广泛地应用着，从感觉的、定性的角度来衡量某些物品的质量，根据使用的经验来评述产品的可靠程度。这种凭经验而作的定性分析，显然不能适应科学技术迅速发展的需要。可靠性作为一门专门的学科，大量而有组织地进行这方面的工作，还是第二次世界大战以后的事情。其基本原因之一是技术装备越来越复杂，彼此相关的任意一部分失效，都将导致一台设备或整个系统出现故障的可能性增大，尤其是对于军事装备和一些重要设施（如核装备），若整个系统发生故障，将会使国家安全和人民生活受到危害。而且随着机器设备向高精度、高性能方面发展，还存在着由于人为失误而引起重大事故发生的可能性，这就更引起人们对可靠性的高度重视。因此，世界各国都投入相当多的力量进行研究，从 50 年代至今，可靠性理论作为一门新兴的学科以惊人的速度发展着，同时也积累了丰富的经验和有价值的统计数据，而且也已从军事技术扩展到国民经济的许多领域。

图1-1 可靠性技术的基本循环过程

在现代生产中，可靠性技术更是贯穿于产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。在这些环节的循环往复过程中（见图 1-1），产品的可靠性得到不断地改善和提高，这样，就会有更多的产品于使用时，在规定的时间内处于正常状态。所以可靠性被定义为：产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

由此可知，要正确地对产品的可靠性进行分析和计算，必须明确四个要素：研究的对象、规定的条件、规定的时间以及规定的功能。

一、研究的对象

通常用“产品”一词来表示研究的对象。它是泛指的，可以是系统、整机、部件，也可以是零件、组件或元件。为了正确地运用可靠性理论对产品进行可靠性分析或计算，不仅要确

定某一具体的产品，而且还应明确所研究对象的内容和性质。如研究对象是系统，则不仅包括硬件，还要包括软件，同时还要考虑操作人员的人为因素；对可修复的系统来说，因为发生了故障，可以通过维修恢复规定的功能而继续使用，所以其可靠性的内涵与要求，以及分析、计算的内容、方法，就与不可维修的产品有所不同。此外，对于那些一旦发生故障会造成生命财产极大危害的产品，如宇航设备、核电站、高压容器等，不仅要保证其功能，要有很高的可靠性，还要能满足其安全性要求，即安全可靠度。而对一些低值易耗物品和手动机械等，不如采用较低可靠性，而在使用相当一段时间后更换新的，这样更符合经济性原则。可见，虽然我们研究可靠性技术的基本目的是使产品尽可能少发生或不发生故障，但对于不同的对象应区别对待，提出不同的要求，采取相应的对策。

二、规定的条件

它包括环境条件、维护条件以及使用条件等，如承受的载荷、工作的温度、振动特征、润滑状况、维修条件以及操作者的技术水平等。因为无论何种产品，如果超载运行、误用或操作不当等，都要引起损坏，故不仅要保证产品的可靠性，还应提出正确使用产品的技术资料。可见在评价产品的可靠性时，离开规定的条件就缺乏分析基础，也就无法进行鉴定和比较了。

三、规定的时间

它是表达可靠性的基本因素，也是可靠性的特征。一般情况下，提到可靠性离不开反映“寿命”的主要量值——“时间”这一要素。规定的使用时间越长，即要求的寿命越长，相应的可靠性就越低。若一批产品长期使用下去，最终必然全部失效，也就是说失效的概率是100%。

“时间”既可以是泛指广义的时间，也可以是因对象不同而采用的诸如次数、周期或距离等相当于寿命的量，例如车辆的“时间”往往用公里数来表示，滚动轴承用转数，齿轮用循环次数等等。

四、规定的功能

它是指产品应在规定的功能参数范围内运用，例如液体摩擦滑动轴承要保持规定的油膜厚度。必须强调的是，若产品工作时的功能参数已漂移到规定的界限之外，即使仍能运行，已不属正常工作而被视为“失效”了。

总之，评价产品的质量，除了好的功能外，还应有高的可靠性，即要求产品能在规定的条件下和规定的时间内，正常而可靠地工作。我们把产品运行时的可靠性称为工作可靠性，它包含了产品的制造和使用两方面的因素，分别用“固有可靠性”和“使用可靠性”来反映。

在生产中已经确立的可靠性称为固有可靠性，它是产品内在的可靠性，是生产厂在模拟实际工作条件的标准环境下，进行检测并给以保证的，它和产品的材料、设计与制造技术有关。“使用可靠性”则与产品的使用有关。工厂生产出来的产品要经过包装、运输和保管才能传给使用者。同时，使用过程中还要受到环境、操作状况与维修等因素的影响。而且，人的因素在使用过程中影响也很大。所以可靠性与使用条件密切有关。

值得注意的是，产品从制造、使用直至失效全过程中的所有数据，是进行可靠性预测的基本资料，也是改善产品质量、改进使用和维修方法、降低产品成本等方面的重要资料，称之为“可靠性数据”，它可为下一批产品的生产及产品的更新换代提供参考、借鉴和依据。必须十分重视这些数据的记录、保存和采集，这是可靠性管理的一项重要活动，一切可靠性工

作者要共同努力做好这项工作，为发展可靠性技术做出贡献。

§1-2 可靠性尺度

人们为了评价产品的可靠性，对可靠性制订了一些行之有效的指标，并加以数量化，作为衡量可靠性的尺度。通常为了反映可靠性的程度而对可靠性进行概率度量，即所谓的“可靠度”。有时也用与产品失效直接有关的“寿命”来度量可靠性。对于可修复的产品，人们不仅关心它们在两次故障之间工作时间的长短，而且还关心在规定的条件和规定的时间内产品可修复的可能性；有时则又主要关心产品在某个瞬间或在某段时间内产品失效比例的高低等。所有这些都属于产品可靠性的指标。因此，有必要给它们以定量的表示，这就是可靠性的尺度。在不同的场合和不同的情况下，用不同的指标来表示产品的可靠性，这是可靠性尺度的一个特点，即可靠性尺度具有多指标性。

可靠性尺度的另一个特点是它的随机性。因为产品在规定的条件下完成规定功能的寿命是随机的，在规定的时间内完成规定功能的可能性也是随机的，故可靠性指标广泛采用概率论和数理统计的方法来进行定量计算。

可靠性尺度的另一个特点是可靠性的定量表示大多数是时间的函数，这在前面有关可靠性的四要素中已作了较详细的阐述。

下面介绍常用的可靠性尺度。

一、可靠度$R(t)$与不可靠度$F(t)$

可靠度的定义是：产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率。简言之，可靠度是可靠性的一种概率度量，例如可靠度为95%，意味着在一大批产品中，有95%的产品可以按规定的寿命完成规定的功能，而有5%的产品则未达到规定寿命就失效了。

从概率论角度来说，若令E表示“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能”的事件，则出现该事件的概率$P(E)$即为产品的可靠度。由于产品的寿命是随机的，所以寿命不同，可靠性也不同，即可靠度是时间的函数。因此可靠度就是用来描述产品正常工作时间（寿命）这一随机变量（τ）的概率分布，即

$$R(t)=P(E)=P(\tau\geqslant t)\quad 0\leqslant t\leqslant\infty \tag{1-1}$$

若$\bar{E}$表示事件E的对立事件，则概率$P(\bar{E})$即表示产品在规定条件下和规定时间内不能完成规定功能的概率，称为失效概率，也就是不可靠度，显然它与可靠度有互补的关系，即

$$R(t)+F(t)=1 \tag{1-2}$$

$$F(t)=P(\bar{E})=P(\tau<t)=1-R(t) \tag{1-3}$$

产品刚开始工作时，即$t=0$，这时所有产品都是完好的，因此$F(t)=F(0)=0$，则$R(0)=1$；随着工作时间的增加，产品的失效数也在增长，可靠度就相应地降低。若一直使用下去，当t接近无穷大时，$R(\infty)=0$，则$F(\infty)=1$。因此，可靠度函数$R(t)$在时间区间（0，∞）内为非

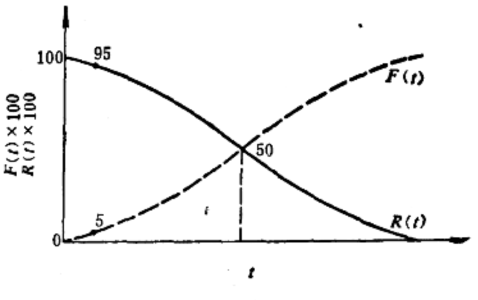

图1-2 可靠度函数与不可靠度函数的分布曲线

增函数，其取值为$0\leqslant R(t)\leqslant 1$。显然，与其互补的失效概率函数则是非减函数，它们的分布曲线见图1-2。

二、失效概率密度函数$f(t)$

为了获得图1-2所示的概率分布曲线，通常是通过对随机变量（例如时间t）的一组试验值进行分析，从频率分布着手，先绘出概率密度分布曲线，然后再绘制概率分布曲线这样一个过程。

表1-1是试样总数$N=100$的产品在15年内逐年失效的数据及相应的失效频率。

表1-1　$N=100$产品的失效数据统计与分析

年序	区间距 $\Delta t/a$	年失效数 ΔN_f	累积失效数 N_f	末失效数 N_s $N_s=N-N_f$	失效频率 $\Delta W\times100$ $\Delta W=\frac{\Delta N_f}{N}$	累积失效频率 $W\times100$ $W=\frac{N_f}{N}=\bar{F}$	存活频率 $\bar{R}\times100$ $\bar{R}=\frac{N_s}{N}$	平均失效率 $\bar{\lambda}/a$ $\bar{\lambda}=\frac{\Delta N_f/N_s}{\Delta t}$
1	0～1	1	1	99	1	1	99	1.00%
2	1～2	2	3	97	2	3	97	2.02%
3	2～3	3	6	94	3	6	94	3.10%
4	3～4	5	11	89	5	11	89	5.30%
5	4～5	7	18	82	7	18	82	7.90%
6	5～6	9	27	73	9	27	73	11.00%
7	6～7	12	39	61	12	39	61	16.40%
8	7～8	15	54	46	15	54	46	24.60%
9	8～9	13	67	33	13	67	33	28.30%
10	9～10	10	77	23	10	77	23	30.30%
11	10～11	8	85	15	8	85	15	34.80%
12	11～12	7	02	8	7	92	8	46.70%
13	12～13	4	96	4	4	96	4	50,00%
14	13～14	3	99	1	3	99	1	75.00%
15	14～15	1	100	0	1	100	0	100.00%

注：N_f、N_s、W和$\bar{R}$等值是指年末的统计值。

由表1-1可以看到，在不同的年序里，单位时间(年)的失效频率是不同的，它反映了一个失效的密度问题。如在第8年序（即7～8年间）中的失效数$\Delta N_{f8}=15$，该年序的失效频率$\Delta W_8=15/100=15\%$，可以认为该年序的失效频率密度最大。

若以时间t/年为横坐标，单位时间的失效频率（即失效频率密度）$\Delta W_i\times100/\Delta t\times$年$^{-1}$为纵坐标的分布曲线来反映不同年序的单位时间失效频率，即得失效频率分布图(直方图)，见图1-3。

图1-3中每一小方块的矩形面积即代表某个时间间距的失效频率：

$$(\Delta W_i/\Delta t)\times\Delta t=\Delta W_i$$

显然，所有矩形面积之和

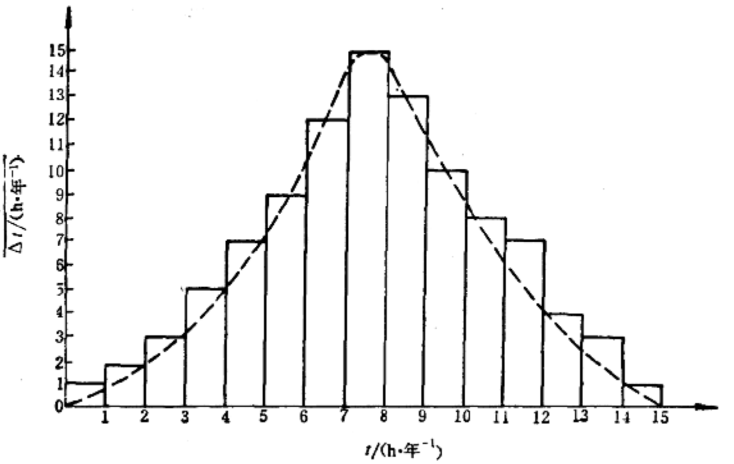

图1-3 失效频率分布图

$$\sum_{i=1}^{k} \Delta W_i = 1 \qquad i = 1, 2, \cdots, k$$

若把试样数量N逐渐增大，时间区间划分得更多更细，则频率就稳定在某一固定值，这就是概率。这种情况反映在直方图上则是随着观察次数（即试样数量）N的增加、区间间隔Δt的缩短，各矩形上沿的边长也随之缩短。当N接近无穷大、Δt接近于零时，直方图就趋近于一条曲线（见图1-3中的虚线），称之为"概率密度分布曲线"，失效频率密度函数就可近似地为失效概率密度函数$f(t)$所取代：

$$f(t) = \lim_{\substack{N \to \infty \\ \Delta t \to 0}} \frac{\Delta W_i}{\Delta t} \tag{1-4}$$

根据可靠性的定义，可靠性函数$R(t)$可表达为产品工作到时间t时的未失效数$N_s(t)$与试样数N的比值，则

$$N_s(t) = NR(t)$$

再经过Δt时间，工作到时间（$t+\Delta t$）时的未失效数为

$$N_s(t+\Delta t) = NR(t+\Delta t)$$

因此，在Δt时间内的失效数

$$\begin{aligned}\Delta N_f(\Delta t) &= N_s(t) - N_s(t+\Delta t) = NR(t) - NR(t+\Delta t)\\ &= N[R(t) - R(t+\Delta t)]\end{aligned}$$

因失效频率$\Delta W_i = \Delta N_f(\Delta t)/N$，故由式(1-4)可得概率密度函数的表达式：

$$f(t) = \lim_{\substack{N \to \infty \\ \Delta t \to 0}} \frac{\Delta W_i}{\Delta t} = \lim_{\substack{N \to \infty \\ \Delta t \to 0}} -\left[\frac{R(t+\Delta t) - R(t)}{\Delta t}\right] = -\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-5}$$

由式(1-3)可得另一表达形式：

$$f(t) = \mathrm{d}F(t)/\mathrm{d}t \tag{1-6}$$

由概率论可知，概率密度函数$f(t)$是单位时间的失效概率，其分布曲线与横坐标所包

围的面积为1（见图1-4）。有了概率密度函数曲线就可用积分去计算时间变量 t 的取值落在任何区间的概率，如

$$F(t)=P(0\leqslant t\leqslant T)=\int_0^T f(t)\mathrm{d}t \tag{1-7}$$

$$R(t)=P(T\leqslant t\leqslant\infty)=\int_T^\infty f(t)\mathrm{d}t=1-\int_0^T f(t)\mathrm{d}t \tag{1-8}$$

三、失效率 $\lambda(t)$

失效率是可靠性技术中一个重要的参数，是判别产品失效规律的基本参数。

如前所述，失效概率密度函数反映了失效概率随时间变化的平均变化率，但它不能反映任一瞬间的失效概率的变化趋势。

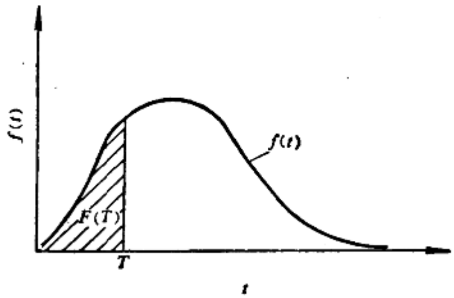

图1-4 概率密度函数曲线

以表1-1的数据来分析。若产品工作到第7年时，在第6年到第7年的区间失效了12件，又因为试样总数 $N=100$，则在这区间的失效概率（近似地以频率来取代）为 $12/100=0.12=12\%$，因此该时的失效概率密度函数 $f(t)=0.12/\text{a}=12\%/\text{a}$。

但是，当产品工作6年后，已经累积失效了27件，能正常工作的只有73件。在此基础上再工作一年（即第6年到第7年的区间）的失效数是12件，则失效概率是 $12/73=0.164=16.4\%$，其单位时间的失效概率

$$\bar{\lambda}(t)=0.164/\text{年}=16.4\%/\text{a}$$

我们把 $\bar{\lambda}(t)$ 称为平均失效率，其数学表达式为

$$\bar{\lambda}(t)=\frac{\Delta N_f(t)/N_s(t)}{\Delta t}=\frac{\Delta N_f(t)}{[N-N_f(t)]\Delta t}$$

$$=\frac{\Delta N_f(t)}{N\Delta t}\times\frac{1}{1-[N_f(t)/N]}=\bar{f}(t)\frac{1}{1-\bar{F}(t)}=\frac{\bar{f}(t)}{\bar{R}(t)} \tag{1-9}$$

式中 $\bar{f}(t)$——平均概率密度。

当式(1-9)的 $N\to\infty$，$\Delta t\to 0$ 时，得瞬时失效率（简称失效率）$\lambda(t)$：

$$\lambda(t)=\lim_{\substack{N\to\infty\\ \Delta t\to 0}}\bar{\lambda}(t)=\frac{f(t)}{1-F(t)}=\frac{f(t)}{R(t)} \tag{1-10}$$

由式(1-5)，$f(t)=-\mathrm{d}R(t)/\mathrm{d}t$，代入式(1-10)，得

$$\lambda(t)=\frac{-\mathrm{d}R(t)/\mathrm{d}t}{R(t)}=-\frac{\mathrm{d}\ln R(t)}{\mathrm{d}t}$$

两边积分并整理后，可得以 $\lambda(t)$ 表示的可靠度函数的表达式

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

同理可得失效概率函数及失效概率密度函数的表达式：

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

$$f(t)=\lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right] \tag{1-13}$$

由此可见，失效率$\lambda(t)$是反映一批产品工作到时间t的条件下，单位时间Δt内发生失效的概率，或者可解释为：产品在工作到t时刻后的单位时间Δt内的失效数与到时刻t时尚在工作的产品数（即未失效数）之比。因此，可定义为：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。因此，失效率的单位是：%/h、$\%/10^3$h、%/a 及Fit(10^{-9}h)。

把表1-1中不同时刻的失效率描绘在以时间〔单位为($h\cdot a^{-1}$)〕为横坐标、失效率（$\bar{\lambda}\times100$）为纵坐标的坐标中，并连成光滑曲线，即得失效率曲线，如图1-5所示。它描述了产品失效随时间变化的情况，可以反映产品的失效规律。

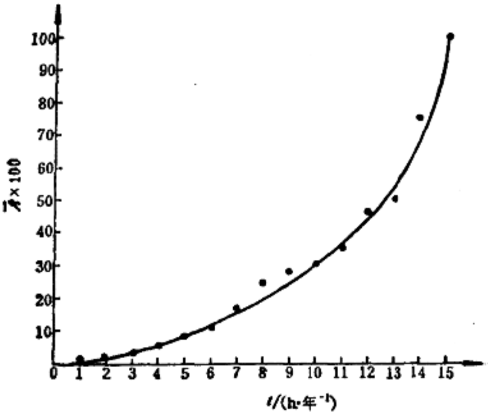

图1-5　失效率曲线

通常失效率曲线有三种类型（见图1-6a），它反映了产品工作过程的三个不同阶段或时期。将三个时期绘成连续曲线，就如图1-6b所示的典型失效率曲线。由于它的形状与浴盆的剖面相似，所以又称为浴盆曲线。这三个时期的特征为：

（一）早期失效期（失效率递减型）

图1-6b中的A区域是产品的早期失效期。其特征是开始工作时失效率较高，但随着时间的增长而逐渐减少。这是由于产品内在的设计错误、工艺缺陷等原因，引起工作初期出现的失效；也有可能是在产品中混进了次品所造成的。因此，应在使用之前进行筛选，剔除早期失效率高的部分，选出合格品。故应对产品进行严格地检验、认真的试运转和跑合，且对零部件进行调整或更换，以期能对产品的失效尽早发现，尽早解决，使工作趋于稳定。

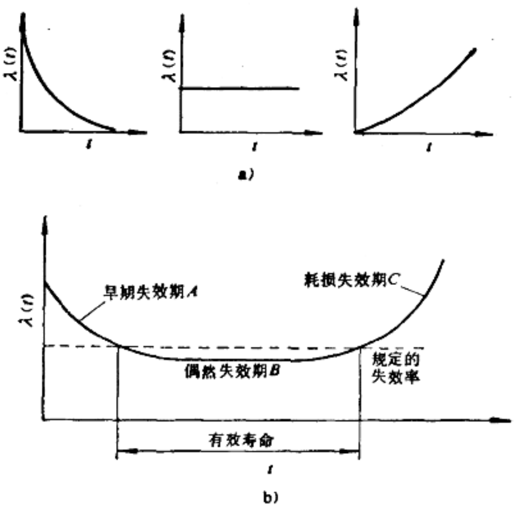

图1-6　产品工作过程的失效率曲线

a）失效率曲线的类型　b）浴盆曲线

（二）偶然失效期（失效率恒定型）

它是图1-6b中的B区域。该时期的特征是失效率较低，而且无论什么时候，$\lambda(t)$始终是个恒定值，即$\lambda(t)=\lambda=$常数。在这一情况下，产品的失效完全是随机的、偶然的，它是产品的正常工作时期，所以总希望失效率尽可能低于要求值，并希望其持续的时间（工作寿命）尽可能长一些。

（三）耗损失效期（失效率递增型）

如图1-6 b 中所示的C区域。其特征是失效率随时间逐渐上升，它多见于滚动轴承等机械零件的磨损。这种类型的失效是由产品的损耗与老化所引起的，所以在该时期开始前，应进行“事前维修”以防止发生失效，从而提高可靠性。

四、可靠性寿命的数量特征

产品的寿命是人们比较关心而又直观的一种可靠性质量指标。由于它是随机值，故具有一定的统计规律性和数量特征，因此可以根据需要采用不同的寿命指标来表达。

（一）平均寿命与寿命方差

1. 平均寿命$\bar{t}$

对于不可修复的产品，平均寿命$\bar{t}$是指一批产品从它们开始工作到发生失效时的平均工作时间，故亦称“失效前平均工作时间”(MTTF——Mean Time To Failure),即

$$\bar{t}=\mathrm{MTTF}=\frac{\text{所有产品的总工作时间}}{\text{产品总数}}=\sum_{i=1}^{N}\frac{t_i}{N} \tag{1-14}$$

式中 t_i——第i个产品的工作时间。

若产品总数N较大，数据较多，直接用式(1-14)计算比较繁琐，可将它们按一定时间间隔分组，取组的中值为计算值t_i，即可得平均寿命的一般表达式：

$$\bar{t}=\frac{t_1\Delta N_{f1}+t_2\Delta N_{f2}+\cdots+t_N\Delta N_{fN}}{N}=\sum_{i=1}^{N}\frac{t_i\Delta N_{fi}}{N}=\sum_{i=1}^{N}W_it_i \tag{1-15}$$

式中 t_i——第i组产品的组中值；

ΔN_{fi}——第i组产品的失效数；

W_i——第i组产品的失效频率。

例1-1 表1-2是100个同样零件的失效时间，求该零件的平均寿命。

解 将表1-2所列数据按每400 h 分组，共为 8 组，有关数据列于表1-3中。按式(1-15)可得

$$\bar{t}=\frac{1000+10200+23000+40600+25200+19800+5200+3000}{100}\ \mathrm{h}$$

$$=\frac{128000}{100}\ \mathrm{h}=1280\ \mathrm{h}$$

必须指出，虽然我们常常利用式(1-15)来计算平均寿命，但如果用它来代表整批产品的平均寿命还是有一定偏差的。因此，需要将式(1-15)中的频率转化为概率。

参考式(1-4)，可把式(1-15)表示为

$$\bar{t}=\sum_{i=1}^{N}W_it_i\approx\sum_{i=1}^{N}t_if(t_i)\Delta t_i \tag{1-16}$$

当$N\to\infty$，$\Delta t\to 0$时，

$$E(t)=\bar{t}=\lim_{\substack{N\to\infty\\ \Delta t_i\to 0}}\sum_{i=1}^{N}t_if(t_i)\Delta t_i=\int_{-\infty}^{\infty}tf(t)\,\mathrm{d}t \tag{1-17}$$

上式就是连续型随机变量求数学期望的基本公式，式中$f(t)$即为概率密度函数。

2. 寿命方差$D(t)$

表1-2 100个零件的失效时间表（单位：h）

110	190	250	310	360	410	430	440	470	500
530	560	580	590	620	630	660	690	730	750
770	790	810	830	860	880	900	910	940	960
970	990	1000	1010	1010	1020	1050	1060	1070	1090
1100	1130	1150	1170	1190	1210	1210	1230	1240	1250
1270	1280	1280	1300	1310	1330	1340	1360	1380	1390
1410	1420	1440	1440	1450	1470	1480	1500	1510	1530
1550	1570	1580	1600	1630	1660	1680	1690	1710	1740
1770	1820	1850	1880	1920	1950	1960	1990	2020	2050
2090	2130	2180	2240	2290	2340	2390	2480	2620	3100

表1-3 失效数据的分组

组号	区间范围/h	组中值t_i/h	频数ΔN_{fi}	频率$W_i\times100$	$t_i\Delta N_{fi}$/h
1	1～400	200	5	5	1000
2	401～800	600	17	17	10200
3	801～1200	1000	23	23	23000
4	1201～1600	1400	29	29	40600
5	1601～2000	1800	14	14	25200
6	2001～2400	2200	9	9	19800
7	2401～2800	2600	2	2	5200
8	2801～3200	3000	1	1	3000
总计		12800	100	100	128000

平均寿命$\bar{t}$或期望值$E(t)$反映了寿命分布的集中趋势，寿命方差可反映分布的分散程度。若两批同样的产品，即使它们的平均寿命相同，显然寿命方差小的那批产品质量是比较好的。

对于离散型的时间随机变量t_i，若其对应的概率为$P(t_i)$，$i=1,2,\cdots,N$，则其方差为

$$D(t)=\sigma^2=E[(t-\bar{t})^2]=\sum_{i=1}^{N}(t_i-\bar{t})^2P(t_i) \tag{1-18}$$

式中 σ——标准离差，简称标准差。

对于连续型的随机变量t，若概率密度函数为$f(t)$，则其方差为

$$D(t)=\sigma^2=E[(t-\bar{t})^2]=\int_{-\infty}^{+\infty}(t-\bar{t})^2f(t)\mathrm{d}t \tag{1-19}$$

上两式中所以用偏差的平方值$(t-\bar{t})^2$，是因为偏差$(t-\bar{t})$有正、负值，将其平方之后，就都成为正数了。

例1-2 试求例1-1数据的寿命方差。

解 上例算得$\bar{t}=1280$ h，由表1-3所列的各组组中值t_i及相应频率W_i，按式(1-18)计算，可得方差为：

$$D(t)=\sigma^2=(200-1280)^2\times0.05+(600-1280)^2\times0.17+(1000-1280)^2\times0.23+(1400-1280)^2\times0.29+(1800-1280)^2\times0.14+(2200-1280)^2\times0.09+(2600-1280)^2\times0.02+(3000-1280)^2\times0.01=337600$$

$$\sigma=\sqrt{D(t)}=\sqrt{337600}\ \mathrm{h}=581.03\ \mathrm{h}$$

（二）可靠寿命t_R

因为可靠度是工作寿命 t 的函数，是用可靠度函数$R(t)$表示的，故对于一批产品来说，当取定时间 t，即确定了相应的可靠度；反之，若确定了可靠度，就可求出相应的工作寿命。所谓“可靠寿命”是指可靠度为给定值R时的工作寿命，以t_R表示。例如普通滚动轴承的额定寿命为10^6 r（一百万转），就是指可靠度为90%时的可靠寿命，即$t_R=t_{0.9}=1\times10^6$ r。

例1-3 某产品的失效率为常数，$\lambda(t)=\lambda=0.2\times10^{-4}/\mathrm{h}$。若要求可靠度$R=99\%$，试求相应的可靠寿命。

解 由式（1-11），$R(t)=\exp\left[-\int_0^t\lambda(t)\mathrm{d}t\right]=e^{-\lambda t}$，则得

$$R(t_R)=\exp(-\lambda t_R)$$

两边取对数，整理之，则求得

$$t_R=t_{0.99}=-\frac{\ln R(t_R)}{\lambda}=-\frac{\ln R}{\lambda}=-\frac{\ln(0.99)}{0.2\times10^{-4}}\ \mathrm{h}=502.5\ \mathrm{h}$$

即该产品可靠度为99%的寿命为502.5 h。

在可靠寿命中，有两种特殊的情况：

1. 中位寿命

可靠度$R=50\%$的可靠寿命$t_{0.5}$称为中位寿命，其含意是工作寿命达到$t_{0.5}$时，一批产品中将有一半失效。

中位寿命与平均寿命是两种不同的概念。前者表示可靠度为50%时的寿命，而后者则是产品寿命观察值的算术平均值。两者在数值上有时是相同的，有时则是不相同的，视寿命的概率分布而异。

2. 特征寿命

可靠度$R=e^{-1}$的可靠寿命称为特征寿命，用T表示。

例1-4 求例1-3中产品的中位寿命和特征寿命。

解 由题意$\lambda(t)=\lambda=0.2\times10^{-4}/\mathrm{h}$，故

中位寿命 $$t_{0.5}=-\frac{\ln(0.5)}{0.2\times10^{-4}}\ \mathrm{h}=34657\ \mathrm{h}$$

特征寿命 $$T=-\frac{\ln(e^{-1})}{0.2\times10^{-4}}\ \mathrm{h}=50000\ \mathrm{h}$$

除了上面介绍的衡量产品的可靠性指标外，对于可维修系统还有相应的指标，如维修度、修复率、有效度等，这些将在第三章中逐一介绍。

§1-3 可靠性的意义和基本内容

从可靠性技术的发展可以看到，可靠性问题是从生产实际和使用实际中提出来的。随着科学技术的迅速发展、生产领域的日益扩大与生产过程自动化程度的不断提高，以及人们物质生活与社会要求的变化，产品可靠性的意义就愈来愈显得重要，人们对这个问题的认识也愈来愈深刻。例如，世界汽车业于1969年在有的国家曾发生过汽车“退货事件”。根据调查和分析，问题的中心是社会对汽车的要求发生了变化，而不是汽车的故障增多了，也就是说用户对汽车的可靠性要求高了。这是由于汽车的使用条件发生了变化，汽车保有量增加，行驶密度高了、行车速度也高了，产品技术日趋先进，结构复杂、零件数增加等等，使汽车发生故障的机会增加，出现故障后的危险性也增加。除此之外，市场条件的变化以及保险费用的增加等，凡此种种，可靠性就变得非常重要了。

在当前各类产品向着巨型化、复杂化、高速化以及自动化等方面发展的情况下，由于其中一个机构、一个零件或一个元件的失效而导致整个系统或设备出现故障所引起的后果往往是不堪设想的，例如军用越野车和战备中使用的汽车，由于工况条件恶劣，可能要行驶在高原山区、沼泽地带或荒漠秃岭之中，若汽车的可靠性得不到保证，则会影响军事任务的正常执行。可靠性在日常生活中也很重要，例如电视机中一个元件有缺陷，就会造成经济损失和使用上的不便。在航空和航天技术中，高可靠性的必要性更是不可忽视的。如飞机上的着落装置失效、宇航系统中开关失灵，都会造成极大的损失。

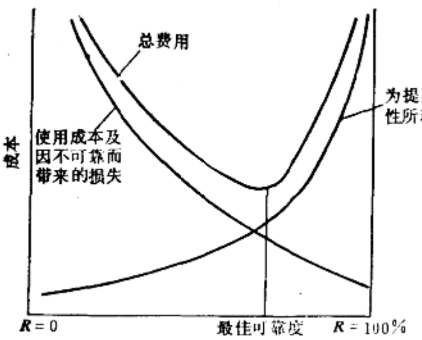

图1-7 可靠度与成本

从纯经济观点讲，为了减少总费用，高可靠性也是非常必要的。据统计，维持某些军事设施处于可工作状态每年开支的费用高达设备原价的10倍左右；机床、汽车与飞机等在整个使用过程中，维修费和技术服务费约为本身价格的5、6倍甚至上10倍。但是，若不考虑具体对象、具体情况而过分地强调安全性、可靠性，过分要求坚固、可靠，也是不切实际的。为了提高产品的可靠性，并且满足各方面的要求，使得利润高、成本低，就要找出最佳可靠度。如图1-7所示，并不是可靠性最高时总费用最低，而是有一个最佳可靠度才能使总费用最低。

由此可见，可靠性技术无论在科学实验、生产实践或人们日常生活等各方面都具有极为重要的意义。从40年代初期开始研究可靠性理论，迄今40余年来，有了较迅速的发展。在可靠性理论的成长过程中，开发了三个主要领域：

1）可靠性工程，包括零、部件和系统的可靠性分析、设计和有关任务；

2）可靠性物理，包括失效的物理原因及模型的研究；

3）可靠性数学，研究可靠性定量方面的数学方法。

这些领域正在发展成为一门独立的学科。尽管它们之间很难找出明确而具体的界限，但实际工作时，可靠性工作常常分成上述三个部分。

第二章　可靠性设计的数学基础知识

如前所述，可靠性尺度的一个特点是具有随机性。例如衡量汽车可靠性的主要指标——寿命就是随机的，同样的产品在同样的条件下，并不总是出现同样的数值。但通过大量的重复观察和试验之后，可以发现它也有一定的内在规律，是服从某种分布规律的。可靠性工作者的一项重要任务就在于揭示其内在规律，判定随机变量的分布类型及表征这些分布的相应参数值，为进行产品可靠性设计提供依据。本章将介绍在汽车可靠性设计中常用的几种理论分布及其参数估计。

§2-1　汽车可靠性设计中常用的理论分布

一、二项分布$B(N, p)$

如果在相同条件下进行N次相互独立的试验，每次试验只有“正”与“反”两个结果，这是一种N重伯努里试验。例如在一批产品中抽取N件进行检验，若抽到合格品这一事件“A”的概率为p，抽到不合格品这一事件“$\bar{A}$”的概率为q，$q=1-p$，则在N次抽样检查中，得到合格品的数量X是一个可取0、1、2、…、N等共（$N+1$）个值的随机变量，它的分布列是

X	0	1	2	…	N
P	P_0	P_1	P_2	…	P_N

即服从二项分布。在N个抽样中恰有N个合格品的概率P_K为

$$P_K=P(X=K)=C_N^K p^K q^{N-K} \qquad K=0, 1, \cdots, N \tag{2-1}$$

且
$$\sum_{K=0}^{N} P_K=\sum_{K=0}^{N} C_N^K p^K q^{N-K}=(p+q)^N=1$$

式中　$C_N^K=\dfrac{N!}{K!(N-K)!}$。

在二项分布中，决定其分布形状的两个主要参数是N与p。其数字特征为

数学期望
$$E(X)=Np \tag{2-2}$$

方差
$$D(X)=Npq=Np(1-p) \tag{2-3}$$

二、泊松分布$P(\mu)$

如果重复试验的次数N比较大（例如$N\geqslant100$），而出现事件A的概率又很小（例如$p\leqslant0.1$），则用二项分布来计算很不方便，这时可用事件A出现次数近似地服从参数为$\mu=Np$的泊松分布来计算：

$$P(X=K)=\frac{\mu^K}{K!}e^{-\mu}=\frac{(Np)^K}{K!}e^{-Np} \qquad K=0, 1, 2, \cdots, N \tag{2-4}$$

泊松分布的数字特征为：