

《现代应用数学方法》丛书(3)

科学出版社

21

数学天元基金

# 加速寿命 试验

茆诗松 王玲玲 著

《现代应用数学方法》丛书(3)

# 加 速 寿 命 试 验

---

茆诗松 王玲玲 著

科 学 出 版 社

1 9 9 7

## 内 容 简 介

加速寿命试验是用加大试验应力来缩短试验周期的一种寿命试验方法。

本书主要介绍三大常用寿命分布(指数分布、威布尔分布、对数正态分布)下的加速寿命试验的统计分析方法。加速寿命试验的基础是寿命试验,所以在每章中先简单叙述寿命试验的统计分析方法,然后再讲加速寿命试验的统计分析方法。本书收集了很多实例,并详细地作了介绍,可供工程技术人员在实际操作中参考。

本书可供从事可靠性试验及管理的工程技术人员、研究人员、大专院校有关专业师生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

加速寿命试验/菲诗松,王玲玲著. -北京:科学出版社,1997

(《现代应用数学方法》丛书/方开泰主编)

ISBN 7-03-005516-0

I. 加… I. ①菲… ②王… III. 加速寿命试验 IV. TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 12724 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1997 年 3 月第一版 开本: 850×1168 1/32

1997 年 3 月第一次印刷 印张: 7 1/2

印数: 1—950 字数: 192 000

定价: 15.00 元

# 《现代应用数学方法》丛书

名誉主编 胡国定  
主 编 方开泰  
副主编 程 侃  
编 委 (以姓氏笔画为序)

井竹君	方开泰	冯士雍
毕 颖	沈世镒	应隆安
杨德庄	周子康	赵凤治
顾基发	程 侃	

## 总 序

应用数学的发展与自然科学和社会科学有着广泛的交叉和渗透。一方面,它为形形色色的物理、化学、生物、社会等现象提供描述和分析的数学工具。另一方面,这些实际问题的解决又为数学学科的发展提供了动力和永不枯竭的源泉。许多成功的应用数学方法,如解非线性方程的牛顿-高斯法、曲线拟合的最小二乘法、线性规划的单纯形法等,成了当今应用数学工作者手中不可缺少的工具。它们之所以有如此强大的生命力,原因在于方法本身有坚实的理论基础,同时又有鲜明的应用背景,能用于不同的领域。因此,成功的应用数学方法是理论联系实际桥梁和纽带。

我国的数学要达到世界先进水平,要对人类有所贡献,一个重要的方面是要有一批独创的应用数学方法。《现代应用数学方法》丛书的出版,希望能为鼓励和促进我国的数学工作者创造或介绍更多的现代应用数学方法增加一个舞台。

这套丛书的宗旨是介绍现代应用数学方法。这些方法应该是目前世界上最先进的,或者是我国独创的,或者是国外已经普遍使用但国内知之甚少的方法。丛书着重阐明所介绍方法的应用背景和思想,避开深奥的数学论证,力求深入浅出、图文并茂。有数值及应用性的例子,使读者易于理解和使用。丛书要求短小精练,突出新的方法,不求齐全,一般10万字左右。书末所附的文献将指出方法的理论背景以及最近的进展,以便读者进一步深入研究。

本丛书的出版得到国家“天元”项目的资助,得到科学出版社的大力支持,是全体编委努力的成果。我们要特别感谢许多作者在百忙中为丛书撰写文稿,付出了辛勤的劳动。我们希望这套丛书的

出版对我国应用数学的发展起到促进作用,衷心地希望丛书成为广大读者的良师益友.

胡国定(南开大学)

方开泰(中国科学院应用数学所)

## 前 言

加速寿命试验是用加大试验应力来缩短试验周期的一种寿命试验方法。若使用它,一般产品的可靠性能快速评定出来,失效原因可迅速查明,高可靠长寿命产品的可靠性评定成为可能。70年代,加速寿命试验进入我国,立即引起工程界和统计学家的兴趣,在电子、机械、仪表等行业中边使用边研究。20年来,在加速寿命试验中积累了很多的实际操作经验,制定了国家标准 GB2689,提出了一些新的加速寿命试验模型和数据处理方法。这些都大大丰富了加速寿命试验的理论与方法。我们很想作一个阶段总结,把国内外应用与研究成果中最为实用和较为成熟的各种加速寿命试验方法整理出来,向工程师们推荐,以期推动加速寿命试验在我国的应用与研究。

本书的读者主要是工程技术人员,在编写时强调方法和具体操作;而对一些理论指出出处,便于查找。书中收集了很多实例,对这些实例我们不惜笔墨尽量写得详尽,以期在实际操作上起样本作用。

全书分四章。第一章是基础,介绍加速寿命试验所涉及的一些概念和一些统计基础知识,后三章分别介绍三大常用寿命分布(指数分布、威布尔分布、对数正态分布)下的加速寿命试验的统计分析方法。由于加速寿命试验的基础是寿命试验,所以在每章中都先简单叙述寿命试验的统计分析方法,然后再讲一种加速寿命试验的统计分析方法。

限于水平,错误之处敬请指正,我们将衷心感谢。

菲诗松 王玲玲

1995年4月1日

# 目 录

总序

前言

第一章 加速寿命试验 .....	(1)
§ 1.1 从寿命试验到加速寿命试验 .....	(1)
§ 1.2 加速寿命试验的类型 .....	(6)
§ 1.3 寿命分布及其可靠性特征 .....	(9)
§ 1.4 加速模型 .....	(16)
§ 1.5 加速系数 .....	(22)
§ 1.6 加速寿命试验的组织与实验 .....	(26)
第二章 指数寿命数据的统计分析 .....	(31)
§ 2.1 寿命试验数据的统计分析 .....	(31)
§ 2.2 恒加试验数据的统计分析 .....	(39)
§ 2.3 步加试验数据的统计分析 .....	(53)
§ 2.4 双应力加速寿命数据的统计分析 .....	(69)
第三章 威布尔寿命数据的统计分析 .....	(85)
§ 3.1 恒加试验的基本假定及其假设检验 .....	(85)
§ 3.2 恒加试验数据的图估计法 .....	(95)
§ 3.3 恒加试验中定数截尾寿命数据的统计分析 .....	(102)
§ 3.4 恒加试验中定时截尾数据的统计分析 .....	(119)
§ 3.5 步进应力加速寿命试验数据的统计分析 .....	(131)
第四章 对数正态寿命数据的统计分析 .....	(138)
§ 4.1 恒加试验的基本假定及其统计检验 .....	(138)
§ 4.2 恒加试验数据的图估计法 .....	(147)
§ 4.3 恒加试验中定数截尾数据的统计分析 .....	(153)
§ 4.4 恒加试验中定时截尾数据的统计分析 .....	(158)
§ 4.5 步加试验数据的统计分析 .....	(172)
§ 4.6 双应力恒加试验数据的统计分析 .....	(180)
参考文献 .....	(191)
附表 .....	(193)



# 第一章 加速寿命试验

## § 1.1 从寿命试验到加速寿命试验

### 一、寿命试验

为了弄清产品的寿命分布、估计产品的各项可靠性指标、研究产品的失效机理都要进行寿命试验。这里的寿命试验是指：从一批产品中随机抽取  $n$  个产品组成一个样本，其中每个产品又称为样品，样品的个数  $n$  称为样本量。然后把此样本放在相同的正常应力水平下进行试验，观察每个样品的第一次失效（或故障）发生的时间（即寿命），最后用统计方法对这些失效时间进行处理，从而可获得这批产品（总体）的各项可靠性指标。

寿命试验的类型很多，若以试验场所划分，寿命试验可分为如下二类：

1. 现场寿命试验。它是把产品放在实际使用条件下来获得失效数据，如飞机的操纵杆，汽车的行驶里程等都是在现场寿命试验中进行的。如此得到的寿命数据是珍贵的，是最有说服力的，但此种试验的组织管理工作繁重、投资大、时间长，此外，由于现场环境变化多，不同现场差别也大，这对探索产品内在的失效规律常有干扰，有时此种干扰还是不小的，所以现场寿命试验只在不得已场合下才采用，如对大型机电设备（如发电设备）只能采用现场寿命试验，其它场合很少使用。

2. 模拟寿命试验，又称实验室寿命试验。它是将现场使用的主要工作条件在实验室内模拟，并受到人工控制，使得在实验室内参试样品都在相同工作条件下进行寿命试验，如电子元器件在恒温箱内作寿命试验，电缆在一定电压下作寿命试验等。此种试验管理简便、投资小、有重复性、便于产品间的比较。由于现场工作条件

复杂多样,不可能把现场工作条件全搬到实验室内,只能选择那些对产品寿命最有影响的一二项工作条件进行模拟,如对温度、湿度、电压、电流、功率、振动、负载等进行模拟. 这些工作条件通称为应力,其取值称为应力水平,如  $150^{\circ}\text{C}$  就是温度这个应力的一个水平. 如今几乎所有的电子元器件、机械零件和小型设备都采用模拟寿命试验. 本书内的寿命试验常指的是模拟寿命试验.

## 二、截尾寿命试验

进行可靠性研究不进行寿命试验是不可想象的,但若寿命试验的时间过长也是不可行的,这不仅会导致费用增加,有时还会使试验过期而失去作用. 所以缩短寿命试验时间是可靠性中很值得研究的问题.

把  $n$  个投试样品试验到全部失效(包括故障,以后不再一一说明)称为完全寿命试验. 所获得的  $n$  个失效数据称为完全样本. 在完全样本基础上进行统计分析获得的可靠性指标也较为可靠,但此种试验常需要较长时间. 譬如 100 只晶体管组成的寿命试验,若要获得完全样本,即需要很长时间,起码几年,甚至几十年,等它们全部失效,新的晶体管可能已设计出来了,所以这种试验不能适应产品更新换代的要求,常不被采用.

把  $n$  个投试样品试验到部分失效就停止的试验称为截尾寿命试验. 在截尾寿命试验中,依先后记录的失效数据  $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ , 称为截尾样本,其中  $r$  为失效数. 一般  $r \leq n$ , 特别,当  $r = n$  时,截尾寿命试验就成为完全寿命试验. 所以完全寿命试验是截尾寿命试验的一个极端情况. 一般说来,截尾样本所含的失效信息总比完全样本少一些. 假如我们能知道产品的寿命分布,譬如是指数分布,或是威布尔分布,或是对数正态分布,那末用截尾样本加上产品的寿命分布信息,进行统计分析,获得的产品可靠性指标的估计仍然是可靠的. 由于这一点,当今不少产品都采用截尾寿命试验,以图减少寿命试验时间. 常用的截尾寿命试验有如下二种.

1. 定时截尾寿命试验,又称 I 型截尾寿命试验. 它是指试验

到指定时间就立即停止试验,这时样本中的失效个数是随机的.譬如对 50 个样品进行寿命试验,事先指定 2000 小时是试验停止时间,那在 2000 小时内可能失效 20 个,也可能失效 10 个,为了不使失效个数过少或过多,恰当地规定试验停止时间是实施定时截尾寿命试验的关键.

2. 定数截尾寿命试验,又称 I 型截尾寿命试验.它是指试验到指定的失效个数停止.譬如事先规定试验到有 60% 的样品发生失效时停止,若有 50 个样品参加试验,那试验在有 30 个样品失效时就停止,这时试验停止时间是随机的.因此恰当地规定失效比例,不致于使试验时间过长是成功地进行定数截尾寿命试验的关键.

### 三、加速寿命试验

截尾寿命试验是常用的寿命试验.在指数分布、威布尔分布和对数正态分布诸场合下,对截尾样本已有不少统计分析方法可以获得各种可靠性特征的估计.但是,随着科学技术的发展,高可靠长寿命的产品愈来愈多,截尾寿命试验也不能适应这种需要.譬如,不少电子元器件的寿命是很长的,在正常工作温度  $40^{\circ}\text{C}$  下可达数百万小时以上,若取 1000 个这样的电子元器件,那要进行数万小时试验,可能只有一二个失效,甚至还会出现没有一个失效的情况.这些情况的出现对估计元器件的可靠性指标都是不利的,甚至很难给出估计.假如我们把工作温度由  $40^{\circ}\text{C}$  提高到  $60^{\circ}\text{C}$ ,甚至  $80^{\circ}\text{C}$ ,只要失效机理不变,由于工作环境变得恶劣一些,该电子元器件的失效个数会增多,这对估计高温下的可靠性指标是很有利的.此种在超过正常应力水平下的寿命试验称为加速寿命试验.

在加速寿命试验中,再采用截尾技术,就可使试验时间大为缩短,但随之也产生一个新问题,假如在高温下已获得各种可靠性特征量,那如何外推在工作温度下的可靠性指标呢?失效物理研究表明,温度(加速应力)与某些可靠性指标(如平均寿命、中位寿命等)间存在一些关系,妥善地利用这些关系再进行外推就不难了.为了

说明这一过程,我们来看下面的例子.

**例 1.1** 某厂制造一种新型绝缘材料,专家们预测其在正常工作温度  $150^{\circ}\text{C}$  下的平均寿命要达一万小时以上. 为了获得平均寿命的估计值,预计寿命试验要进行二万小时左右,这相当于要进行二年多时间,在一般工厂里是承受不了的. 从该绝缘材料的物理性能知,适当地提高试验温度,可以加速绝缘材料的老化,从而使击穿时间提前到来,达到缩短试验时间的目的. 通过摸底试验得知,在高温  $270^{\circ}\text{C}$  下,该绝缘材料的失效原因仍然是由于老化引起的,因此选取温度作为加速应力是妥当的,而加速应力水平应在  $150^{\circ}\text{C}$  到  $270^{\circ}\text{C}$  间选取. 经研究,决定选  $190^{\circ}\text{C}$ ,  $220^{\circ}\text{C}$ ,  $240^{\circ}\text{C}$  和  $260^{\circ}\text{C}$  等四个温度水平作为加速应力水平,在这四个温度水平下分别安排一个寿命试验,各获得一组失效数据. 然后再设法估计各温度水平下的平均寿命. 具体估计方法以后各章介绍,所得的平均寿命列于表 1.1 上.

**表 1.1 各温度下的平均寿命**

$i$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	平均寿命 $\theta_i(h)$
1	190	5046
2	220	2638
3	240	1572
4	260	1016

进一步工作可以从图上得到启发. 以温度  $T$  作纵轴,平均寿命  $\theta$  作横轴,把表 1.1 上的数据点在该坐标纸上,可以看出一个明显的趋势,随着试验温度  $T$  的下降,平均寿命  $\theta$  在增加. 假如把图 1.1 上的四个点用一条光滑曲线联结起来,并顺势延长,那就可以看到,当试验温度水平为  $150^{\circ}\text{C}$  时,其平均寿命大约为 17000 小时,这就是加速寿命试验全过程的简单缩影. 从这个缩影可以看出加速寿命试验的基本思想是:利用高应力水平下的平均寿命去外推正常应力水平下的平均寿命,实现这个基本思想的关键在于建立形如图 1.1 上的曲线. 这类曲线称为加速曲线,这类曲线对应的

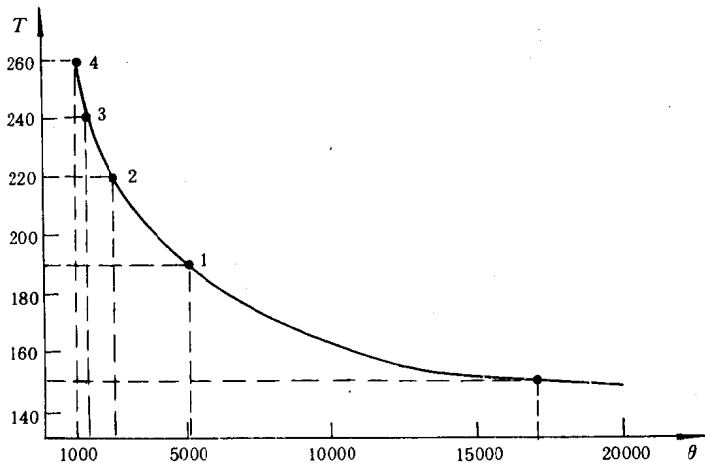


图 1.1 绝缘材料的加速曲线

函数表达式称为加速方程,或称加速模型,在物理和化学中已有一些经验的加速模型可供使用,详细请见 § 1.4. 这里先简述其中一个,热应力  $T$  (单位是绝对温度,用  $K$  表示,一般摄氏温度加上 273 就是绝对温度) 对电子元器件平均寿命的影响可用著名的阿伦尼斯模型

$$\theta = a'e^{b/T}$$

或

$$\ln\theta = a + b/T \quad (a = \ln a')$$

此加速模型表示,随着温度水平的下降,平均寿命按指数上升,这与图 1.1 上的加速曲线的趋势是吻合的.

在没有具体加速模型时,我们只能在图 1.1 上用作图的方法来进行外推,这是不够准确的,会因人而异. 如有加速模型,那就可以用统计方法建立加速模型,在例 1.1 中,可用最小二乘法对表 1.1 上的数据进行拟合,不难算得其加速方程为

$$\ln\theta = -3.6975 + 5675/T$$

用此方程进行外推要比图上作业可信得多. 譬如在例 1.1 中,正常

工作温度水平为  $150^{\circ}\text{C}$ ，相当于  $423\text{K}$ 。用  $T=423$  代入上式可算得  $\theta=16624$  小时，这个结果与图上作业得到的结果是接近的，但此结果不会因人而异。

## § 1.2 加速寿命试验的类型

加速寿命试验的类型很多，常用的是如下三类。

1. 恒定应力加速寿命试验，简称恒加试验。它是先选一组加速应力水平，譬如  $S_1, S_2, \dots, S_K$ ，它们都高于正常应力水平  $S_0$ ，一般还有  $S_0 < S_1 < S_2 < \dots < S_K$ 。然后将一定数量的样品分为  $K$  组，每组在一个加速应力水平下进行寿命试验，直到各组均有一定数量的样品发生失效为止。如图 1.2 所示，从图 1.2 可以看出，恒加试验是由若干个寿命试验组成。为了缩短寿命试验时间，其中每个寿命试验常采用截尾寿命试验，特别是低应力水平下的寿命试验常采用截尾寿命试验。这样才能更好地发挥加速寿命试验缩短试验时间的优点。

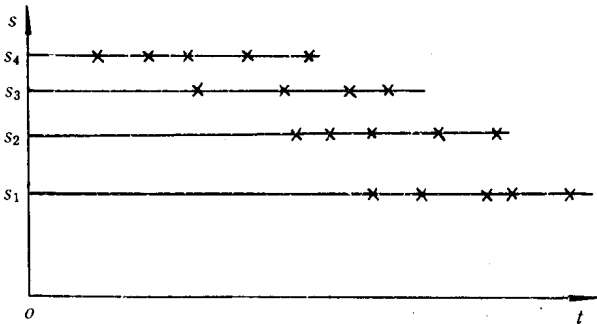


图 1.2 恒加试验示意图 (×表示失效)

2. 步进应力加速寿命试验，简称步加试验。它也是先选定一组加速应力水平  $S_1 < S_2 < \dots < S_K$ ，它们都高于正常应力水平  $S_0$ 。试验开始时是把一定数量的样品都置于应力水平  $S_1$  下进行寿命

试验. 经过一段时间, 如  $\tau_1$  小时后, 把应力提高到  $S_2$ , 将未失效的样品在  $S_2$  下继续进行寿命试验. 如此继续下去, 直到有一定数量的样品发生失效为止, 如图 1.3 所示.

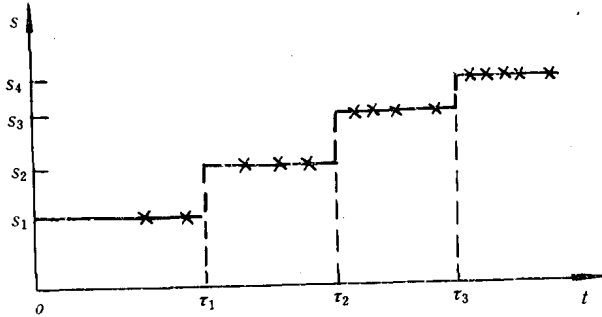


图 1.3 步加试验示意图 (X 表示失效)

从图 1.3 可见, 在步加试验中一个样品先在加速应力水平  $S_1$  下工作一段时间, 若发生失效, 则退出试验; 若没有失效, 将随着应力水平的提高又进入  $S_2$  下的寿命试验. 如此继续下去, 一个样品可能会遭遇若干个加速应力水平的考验. 而在恒加试验中, 一个样品自始至终都在同一应力水平下试验. 相比之下, 步加试验可使样品失效更快一些. 这是步加试验的优点之一, 步加试验还有一个优点就是可以减少参试样品个数. 步加试验与恒加试验的相比也有缺点, 那就是可靠性特征量的估计不如恒加试验下的估计精确. 为了克服这一缺点, 人们可以安排二组样品平行进行步加试验. 这两个步加试验的应力水平组  $S_1 < S_2 < \dots < S_k$  和  $S'_1 < S'_2 < \dots < S'_k$  可以相同, 也可以不同, 以此来增加失效个数, 提高估计精度.

3. 序进应力加速寿命试验, 简称序加试验. 它与步加试验基本相同, 不同之处仅在于它们施加的加速应力水平将随时间连续上升. 最简单的是直线上升. 图 1.4 显示了应力水平以两种不同速率直线上升的序加试验的示意图. 序加试验的特点是应力变化快, 失效也来得快. 故实施序加试验需要有专门控制应力水平变化的设备和跟踪产品失效的记录设备, 没有这样一些设备, 序加试验

难以实施。

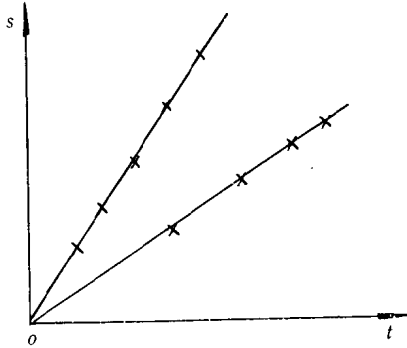


图 1.4 序加试验示意图(×表示失效)

上述三种加速寿命试验在我国都有应用,都有一批成功的实例,但以恒加试验的实例为多.这是因为恒加试验方法操作简单,数据处理方法也较为成熟.尽管它所需试验时间不是最短的,但仍比一般寿命试验成倍地缩短试验时间,故经常被实际采用.我国对恒加试验还制定了国家标准,其编号为GB2689.1~4-81.

除了上述三种加速寿命试验外,还有循环应力加速寿命试验和随机应力加速寿命试验.前者的应力是按一定的周期和幅度(如正弦曲线)进行变化(图 1.5).譬如对绝缘体所施的电压就是或低

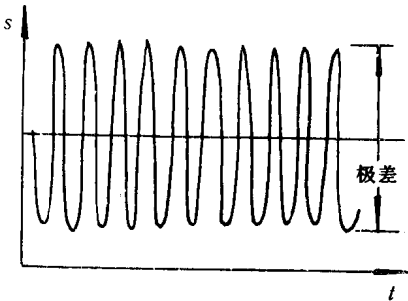


图 1.5 施加的循环应力

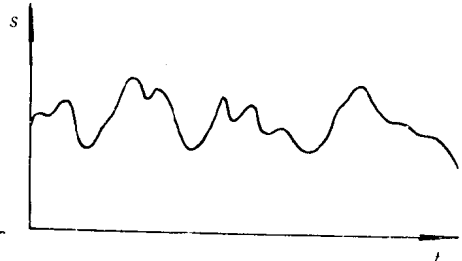


图 1.6 施加的随机应力



或高周期变化的。后者的应力是按一定的概率分布变化的(图 1.6),譬如飞机部件和桥梁部件都经受风力冲击,而这种风力是随机变化的。由于目前缺少这两种试验数据的处理方法,故常在一定限制下,暂把它们近似看作恒加试验处理。

### § 1.3 寿命分布及其可靠性特征

在加速寿命试验中最常用的寿命分布是指数分布、威布尔分布和对数正态分布。与这三个分布有关的还有正态分布与极值分布。本节主要介绍这些分布及其可靠性指标,为以后叙述方便,先介绍本书中常用的符号及其含义,然后再叙述各种分布。

#### 一、常用符号及其含义

1.  $T$ ——产品的寿命。它是指产品开始工作到首次失效前的一段时间,它是在 $(0, \infty)$ 上取值的随机变量。

2.  $F(t)$ ——寿命  $T$  的分布函数。它是指寿命不超过  $t$  的产品在总体中所占的比例(即概率),即

$$F(t) = P(T \leq t), \quad t \geq 0 \quad (1.1)$$

当  $t < 0$  时,总认为  $F(t) = 0$ 。

3.  $f(t)$ ——寿命  $T$  的密度函数。它是  $F(t)$  的导数,即  $f(t) = F'(t)$ 。常说“寿命分布”可以是分布函数,也可以是密度函数,以使用方便选取。

4.  $R(t)$ ——可靠度函数。它是指寿命超过时间  $t$  的产品在总体中所占的比例(即概率),即

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (1.2)$$

5.  $\lambda(t)$ ——失效率函数。它是指已工作到时刻  $t$  的产品,在时刻  $t$  后单位时间内发生失效的概率,其表达式为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.3)$$

6.  $E(T)$ ——产品的平均寿命。它是寿命  $T$  的数学期望,即