



普通高校“十二五”规划教材

姜同敏 王晓红 编著
袁宏杰 李晓阳

可靠性试验技术



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书对可靠性试验技术基本理论及其30年来的发展历程、形成的科学理论体系,以及作为一门试验技术的实施方法及相关标准体系进行了系统的论述和整理。

本书共分9章。首先阐述质量与可靠性的基本概念及可靠性试验技术的理论基础,介绍可靠性试验的基本方法、要素及实施过程;在此基础上介绍环境应力筛选、可靠性增长摸底试验和可靠性强化试验、可靠性验证试验、可靠性增长试验,并对目前可靠性试验技术领域的新思想、新方法以及作者自身的一些研究成果进行了介绍,还介绍了先进的加速试验技术;最后简要介绍外场可靠性试验。

本书可作为本科生、研究生专业课教材,也可作为工程应用中可靠性试验方案设计的技术指南,并可为从事可靠性试验及相关研究工作的设计及工程人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性试验技术 / 姜同敏等编著. —北京:北京
航空航天大学出版社,2012.7

ISBN 978-7-5124-0798-5

I. 可… II. ①姜… III. ①可靠性试验 IV.
①TB302

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第078298号

版权所有,侵权必究。

可靠性试验技术

姜同敏 王晓红 编著
袁宏杰 李晓阳
责任编辑 张冀青

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:15 字数:336千字

2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-5124-0798-5 定价:35.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

可靠性试验技术是“质量与可靠性”、“系统工程”和“武器系统与运用工程”等学科的重要组成部分。该技术是一门多学科交叉而发展起来的新技术。本书旨在对可靠性试验技术基本理论及其30年来的发展历程、形成的科学理论体系,以及作为一门试验技术的实施方法及相关标准体系进行系统的论述。

本书主要对传统的可靠性试验方法进行了深入的剖析和阐述,是一本实用的可靠性试验工具书,可作为本科生、研究生专业课教材及培训教材,也可作为工程应用中可靠性试验方案设计的实用、便捷的技术指南。书中介绍的方法亦可为从事可靠性试验及相关研究工作的专业设计人员及可靠性工程人员提供有益的帮助。

作为教材,本书对目前可靠性试验技术领域的新思想、新方法以及作者自身的一些研究成果进行了介绍,还介绍了先进的加速试验技术。

主要内容包括可靠性试验的基本概念与理论基础、可靠性试验的基本方法与要素、可靠性试验的实施过程、环境应力筛选、可靠性研制试验、可靠性验证试验、可靠性增长试验、加速寿命试验与加速退化试验及外场可靠性试验等。

本书第1章由王晓红编写,主要介绍可靠性作为一种质量特性的重要性及其相关概念、可靠性设计分析的相关工作内容以及可靠性试验技术的理论基础,重点是可靠性试验的目的及分类;第2章由王晓红和袁宏杰编写,主要介绍可靠性试验的试验条件、试验剖面、故障判据,以及基于实测数据的可靠性试验剖面设计方法等;第3章由姜同敏和王晓红编写,主要介绍试验场所的选取原则、试验的组织实施,以及对试验件的要求、仪器设备的要求、检测要求、可靠性试验的流程、试验剖面设计的方法、先进的实测数据处理方法等,是本书的具体实践环节;第4章由王晓红和姜同敏编写,主要介绍环境应力筛选的概念、筛选方案的制定方法、环境应力筛选效果对比分析、常规筛选方法以及高加速应力筛选方法等;第5章由王晓红编写,主要介绍可靠性增长摸底试验和可靠性强化试验;第6章由姜同敏



编写,主要介绍可靠性验证试验的概念、统计试验方案设计方法以及相关的国家军用标准的使用等,重点介绍指数分布试验方案;第7章由王晓红编写,主要介绍可靠性增长及可靠性增长试验的概念、增长模型及可靠性增长试验方法、增长试验过程跟踪及试验结果评估等,重点介绍 Duane 模型和 AMSAA 模型及其相关的试验与统计评价理论体系;第8章由李晓阳编写,主要介绍加速试验的概念,并分别介绍 ALT 的加速模型、试验方法、指数分布加速寿命试验的统计分析和 ADT 性能退化模型、恒定应力加速退化试验统计分析等;第9章由王晓红编写,只对外场可靠性试验作简要介绍,不对理论方法展开深入论述。全书由王晓红进行统稿,最终由姜同敏定稿。

本书是编写组在总结多年教学实践、理论研究和工程应用的基础上编写而成的。由于编者水平有限,书中难免有不当之处,请读者批评指正。

编 者

2012年4月

第 1 章 可靠性试验的基本概念与理论基础	1
1.1 概 述	1
1.1.1 质量与可靠性	1
1.1.2 可靠性设计分析相关工作内容	2
1.1.3 可靠性试验技术的理论基础	3
1.2 可靠性试验的概念	8
1.3 可靠性试验贯穿产品全寿命周期	8
1.3.1 产品寿命周期划分	8
1.3.2 各阶段的可靠性试验	9
1.4 可靠性试验的目的.....	11
1.5 可靠性试验的分类.....	12
1.5.1 环境应力筛选(ESS)	12
1.5.2 可靠性增长试验(RGT)	12
1.5.3 可靠性鉴定试验(RQT)和可靠性验收试验	13
1.5.4 可靠性增长摸底试验.....	13
1.5.5 可靠性强化试验、加速寿命试验和加速退化试验	14
1.5.6 工程试验与统计试验.....	14
1.5.7 完全试验、截尾试验和序贯试验	14
1.5.8 内场试验和外场试验.....	15
1.6 可靠性试验考虑的主要方面.....	15
习 题	17
第 2 章 可靠性试验的基本方法与要素	18
2.1 可靠性试验的基本方法.....	18
2.2 可靠性试验的要素.....	18
2.2.1 试验条件.....	18
2.2.2 试验剖面.....	24
2.2.3 故障判据.....	38



2.2.4	性能检测点和检测周期	41
2.3	基于实测环境数据的试验剖面设计方法	41
2.3.1	测量规划	41
2.3.2	实测数据预处理	42
2.3.3	数据分离与检验	46
2.3.4	时域分析	49
2.3.5	频域分析	51
2.3.6	数据归纳	56
习 题		60
第3章	可靠性试验的实施过程	61
3.1	概 述	61
3.2	可靠性试验前应具备的条件	63
3.2.1	试验方案和试验大纲	63
3.2.2	试验程序	66
3.2.3	可靠性预计	67
3.2.4	故障模式、影响及危害性分析	68
3.2.5	环境试验	68
3.2.6	环境应力筛选	69
3.2.7	夹具设计、制造、安装及测定	70
3.2.8	温度测定	71
3.2.9	振动测定	71
3.2.10	故障报告、分析和纠正措施系统	71
3.2.11	试验质量控制和保证措施	73
3.2.12	试验前准备工作评审	73
3.3	可靠性试验的实施要求	74
3.3.1	对受试样品的要求	74
3.3.2	对试验设备和仪器仪表的要求	75
3.3.3	对受试样品检测的要求	75
3.3.4	受试产品的故障判定及故障处理	76
3.3.5	元器件失效分析	77
3.3.6	预防性维护	77
3.3.7	试验程序的实施要求	77
3.3.8	试验记录	78



3.3.9 试验的监督与检查·····	78
3.3.10 试验中期评审·····	78
3.4 可靠性试验后的工作内容·····	78
3.4.1 试验报告·····	78
3.4.2 纠正措施·····	79
3.4.3 受试产品的复原·····	79
3.4.4 试验结果评审·····	79
习 题·····	79
第4章 环境应力筛选 ·····	80
4.1 概 述·····	80
4.1.1 基本概念·····	80
4.1.2 环境应力筛选的发展·····	81
4.1.3 环境应力筛选的基本特性·····	82
4.1.4 环境应力筛选方案设计时应考虑的主要内容和要求·····	82
4.1.5 环境应力筛选与其他可靠性试验的关系·····	83
4.2 环境应力·····	83
4.2.1 典型环境应力筛选效果比较·····	83
4.2.2 典型环境应力筛选特性分析·····	85
4.3 环境应力筛选方法·····	89
4.3.1 常规筛选·····	89
4.3.2 定量筛选·····	90
4.4 环境应力筛选的实施·····	91
4.4.1 一般要求·····	91
4.4.2 常规筛选实施过程·····	93
4.4.3 GJB 1032—1990 的不足之处·····	94
4.5 高加速应力筛选(HASS)·····	95
4.5.1 高加速应力筛选的特点·····	96
4.5.2 高加速应力筛选适用对象·····	96
4.5.3 高加速应力筛选设备·····	96
4.5.4 高加速应力筛选的原理·····	97
4.5.5 高加速应力筛选剖面设计方法·····	100
习 题·····	110



第 5 章 可靠性研制试验	111
5.1 概 述	111
5.1.1 可靠性研制试验的概念	111
5.1.2 可靠性研制试验的特点	111
5.1.3 可靠性研制试验的发展	112
5.2 可靠性研制试验的产品要求及分类	114
5.3 可靠性增长摸底试验	114
5.3.1 试验对象及其应具备的状态	114
5.3.2 试验时机	115
5.3.3 试验时间的选取原则及依据	115
5.3.4 试验剖面	116
5.3.5 试验方案	116
5.3.6 实施要点	116
5.4 可靠性强化试验	116
5.4.1 应力极限	117
5.4.2 试验应力的选择	117
5.4.3 应力施加方式及试验剖面	118
5.4.4 受试产品	121
5.4.5 试验时间	122
5.4.6 试验实施过程	122
5.4.7 可靠性强化试验的实施实例	124
5.4.8 注意事项	128
习 题.....	128
第 6 章 可靠性验证试验	129
6.1 概 述	129
6.2 统计试验方案	129
6.2.1 统计试验方案中的有关概念和参数	130
6.2.2 抽样特性(OC)曲线及抽样风险	131
6.3 指数分布试验方案	131
6.3.1 定数截尾抽验方案	131
6.3.2 定时截尾抽验方案	132
6.3.3 序贯截尾抽验方案	140



6.4	统计试验方案的选择	151
6.5	可靠性验证试验的一般流程	151
6.5.1	可靠性鉴定与验收试验前准备阶段	152
6.5.2	可靠性鉴定与验收试验运行阶段	153
6.5.3	可靠性鉴定与验收试验后总结阶段	154
	习 题	155
第7章	可靠性增长试验	156
7.1	可靠性增长概述	156
7.1.1	可靠性增长的基本概念	156
7.1.2	可靠性增长的作用和意义	160
7.2	常用的可靠性增长模型	161
7.2.1	Duane 模型	162
7.2.2	AMSAA 模型	167
7.2.3	两种可靠性增长模型的对比与选用原则	176
7.3	可靠性增长试验	176
7.3.1	Duane 模型可靠性增长曲线	176
7.3.2	可靠性增长试验的一般流程	179
7.3.3	多台产品可靠性增长试验	184
	习 题	184
第8章	加速寿命试验与加速退化试验	185
8.1	加速试验概述	185
8.1.1	加速试验的定义	185
8.1.2	加速试验的分类	185
8.1.3	加速试验应力施加方式	186
8.2	加速模型	187
8.3	加速寿命试验(ALT)	194
8.3.1	加速寿命试验方法	194
8.3.2	指数分布加速寿命试验统计分析	196
8.4	加速退化试验(ADT)	205
8.4.1	性能退化模型	206
8.4.2	恒定应力加速退化试验统计分析	213
	习 题	217



第 9 章 外场可靠性试验	219
9.1 概 述	219
9.1.1 外场可靠性试验的适用对象	219
9.1.2 外场可靠性试验的目的	219
9.1.3 外场可靠性试验的特点	220
9.2 外场可靠性试验的时机	221
9.3 可靠性外场验证试验的基本条件	222
9.4 外场可靠性试验的方法	222
习 题.....	224
附 录	225
参考文献	228

第1章 可靠性试验的基本概念与理论基础

1.1 概述

1.1.1 质量与可靠性

关于质量,GB 6583.1—86《质量管理和质量保证术语 第一部分》的定义为:质量就是指产品、过程或服务满足规定或潜在要求(或需要)的特征或特性的总和。ISO 9001—2000 的定义为:质量是一组固有特性满足要求的程度。产品的质量,应是满足使用要求所具备的特征和特性的总和,或者产品满足使用要求的程度。这里包含两个方面的含义:一是产品本身所具有的“特征和特性”,是产品的客观属性;二是对产品在使用过程中满足用户需要程度的一种主观评价,即产品的适用性。产品质量体现了产品的使用价值。产品的质量应包括满足对产品功能、寿命、可靠性要求的适用性质量和制造质量。

任何产品都是为了满足一定用户的使用要求而生产的,因此必须具备一定的满足用户需求的特性。这些表示产品质量的特性称为质量特性。质量特性包括性能、使用寿命、可信性(包含可靠性、维修性和保障性)、安全性和经济性等多方面的内容。性能、使用寿命和可靠性是重要的质量特性。

性能一般指产品所具有的特性与功能,由产品的全部性能指标所保证。达不到规定的性能指标就不能很好地完成规定的功能。产品的性能指标一般会在研制总要求(或研制要求、研制合同、成品协议书)等文件中给出。

使用寿命,是指产品在规定的使用条件下,完成规定功能的工作总时间,可以用工作小时数、循环数及日历持续时间来表示。文献[1]将产品的使用寿命定义为“产品在规定的使用条件下,具有可接受的故障率的工作时间区”。这两个概念是一致的。

什么是可靠性?目前比较被大家所公认的定义是 GB/T 3187—1994《可靠性、可维修性术语》^[2]给出的,即“可靠性指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”。如果用数学的方法表示,那么这种能力是一种概率,而不是所期望的一个绝对值。在设计 and 生产阶段,可以用数学方法计算和预测产品的可靠性(可靠性设计和分析),可以用试验方法来验证和评价产品的可靠性(可靠性试验)。

产品的可靠性主要体现在其定义中的“三规定”,即产品可靠性的三大要素。

质量与可靠性的关系:产品的可靠性,是五个质量特性之一的可信性的重要内容,是产品质量在时间领域内的重要指标。产品的技术性能和可靠性都是通过设计赋予的,通过制造形



成的,通过全面质量管理保证的。它们相互依赖,没有性能,可靠性无从体现;如果产品的可靠性很差,故障频频,丧失完成规定功能的能力,那么再先进的技术性能也得不到发挥。产品的性能可以通过相应的测试设备加以检测,而可靠性却不能用仪器测量出来,只能通过试验分析,利用数学方法统计评估得到。

1.1.2 可靠性设计分析相关工作内容

可靠性设计和可靠性试验是可靠性工程的两大支柱。可靠性试验是建立在可靠性基本理论之上的,下面来回顾一下与可靠性试验相关的可靠性设计分析相关理论基础^[1]:

① 确定装备的可靠性技术指标和技术条件。一般用 MTBF(平均故障间隔时间),也可以是可靠度 $R(t)$ 、故障率 $\lambda(t)$ 等。

② 建立可靠性数学模型。例如,串联模型、并联模型、表决模型、旁联模型和桥联模型等。

③ 可靠性预计。在设计阶段对系统可靠性进行定量的估计,是根据类似产品的可靠性数据、系统构成和结构特点、工作环境等因素,估计组成系统的部件及系统的可靠性。这是一个自下而上,从局部到整体、由小到大的系统综合过程。单元可靠性预计是系统可靠性预计的基础,单元可靠性预计的方法有相似产品法、评分法、应力分析法和故障率预计法等。

④ 可靠性分配。将使用方提出的并在装备设计任务书(或合同)中规定的可靠性指标,自上而下,由大到小,从整体到局部进行分解,并分配到各系统、分系统及设备的过程。

⑤ 降额设计。电子产品的可靠性对电应力和温度应力比较敏感,电子产品的降额设计就是使元器件或设备所承受的实际工作应力适当低于其额定值,从而达到降低基本故障率、提高使用可靠性的目的。

⑥ 余度设计。余度设计是指系统或设备具有一套以上能完成给定功能的单元,只有当规定的几套单元都发生故障时系统或设备才会丧失功能,从而使系统或设备的任务可靠性得到提高。

⑦ 耐环境设计。耐环境设计包括环境条件的分析和调查,各类应力的分析和估算,三防设计、耐振动设计、热设计和耐湿度设计等。

⑧ 电磁兼容设计。电磁兼容设计指系统、分系统、设备在共同的电磁环境中能协调地完成各自功能的共存状态,即设备不会因为处于同一电磁环境中的其他设备的电磁干扰而导致性能降低或故障,也不会因为自身的电磁干扰使处于同一电磁环境中的其他设备产生超出要求的性能下降或故障。电磁兼容设计是对电磁干扰源进行分析,研究其传播途径,采取措施,消除或抑制电磁干扰源,减轻电磁干扰的影响。

⑨ 故障模式、影响及危害性分析(FMECA)。FMECA 指分析系统中每一个单元所有可能产生的故障模式及其对系统造成的所有可能影响,并按每一故障模式的严重程度及其发生的概率予以分类的一种归纳方法。



1.1.3 可靠性试验技术的理论基础

1. 可靠性相关函数及其之间的关系

产品在规定的条件下规定的时间内,能完成规定功能的概率,称为产品的可靠度,也称可靠度函数,描述产品功能随时间保持的概率。因此产品可靠度是时间的函数,一般用 $R(t)$ 表示,定义为

$$R(t) = P(T > t) \quad (0 \leq t < \infty) \quad (1-1)$$

式中: $R(t)$ ——可靠度函数;

T ——产品故障前的工作时间;

t ——规定的时间。

$$R(t)|_{t=0} = 1, \quad R(t)|_{t=\infty} = 0$$

类似地,产品在规定的条件下规定的时间内,不能完成规定功能的概率(即产品在规定的条件下,在时间 t 以前故障的概率),也是时间的函数,一般用 $F(t)$ 表示。 $F(t)$ 称为累积故障分布函数,也称为累积失效概率或不可靠度,即

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (0 \leq t < \infty) \quad (1-2)$$

关于产品所处的状态,为了研究方便,一般假定,要么处于正常工作状态,要么处于故障状态。产品发生故障和不发生故障是两个对立的事件,显然:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1-3)$$

累积故障分布函数和可靠度函数可以通过大量产品的试验进行估计。

$F(t)$ 是随机变量 t 的分布函数,其密度函数称为故障密度函数 $f(t)$,也称故障概率密度,是累积故障分布函数 $F(t)$ 的导数。它可以看成在 t 时刻后一个单位时间内产品故障的概率,记为 $f(t)$,即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1-4)$$

因此,累积故障分布函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 和故障密度函数 $f(t)$ 三者之间的关系如图 1-1 所示。

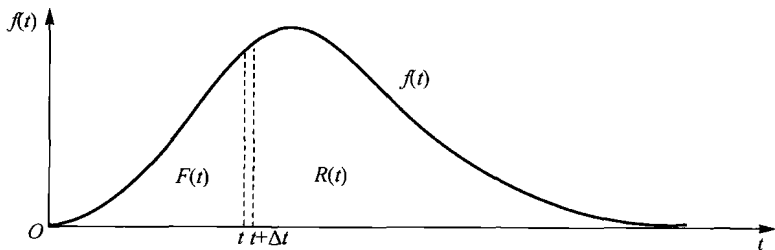


图 1-1 $F(t)$ 、 $R(t)$ 和 $f(t)$ 关系图



人们往往更加关心在某一时刻 t 未发生故障的产品,在下一时刻 $(t+\Delta t)$ 是否还能正常工作,也即, $t+\Delta t$ 时刻发生故障的概率是多少。因此,另外构造一个函数,用来描述工作到某时刻尚未发生故障(失效)的产品,在该时刻后单位时间内发生故障(失效)的概率,称为产品的故障(失效)率,也称瞬时故障(失效)率。故障率一般用 $\lambda(t)$ 表示,公式如下:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t)\Delta t}{\Delta t P(T > t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-5)$$

式中: $f(t)$ ——对产品发生故障的总速度的量度,非条件概率密度;

$\lambda(t)$ ——对故障的瞬时速度的量度,是条件概率密度。

那么,可靠性函数 $R(t)$ 与故障率函数 $\lambda(t)$ 的关系如下:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{R(t)} = -\frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = -\frac{d[\ln R(t)]}{dt}$$

$$\ln R(t) = -\int_0^t \lambda(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right] \quad (1-7)$$

$$f(t) = \lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right] \quad (1-8)$$

式中, $R(0) = 1, R(\infty) = 0, F(0) = 0, F(\infty) = 1$ 。

2. 典型故障率函数

在规定的条件下,产品从开始使用到规定报废时的总工作时间或日历持续时间称为产品的寿命(也称总寿命)。通过大量不同类型产品故障数据的研究表明, $\lambda(t)$ 随着寿命时间的增加,明显分为三个阶段。阶段 I 对应于早期故障,故障率从高值逐渐下降。阶段 II 对应于产品的有效寿命,也称偶然故障区,故障率接近常数。阶段 III 对应于耗损期,在这段时期,产品由于老化、磨损、疲劳等原因故障率呈快速上升趋势,因此,若能在这个时期到来之前发现并修复产品的故障,就可以将产品的故障率降下来,并延长产品的寿命。 $\lambda(t)$ 的典型图形如图 1-2 所示,形如浴盆,所以称为浴盆曲线(bath-tub curve)。

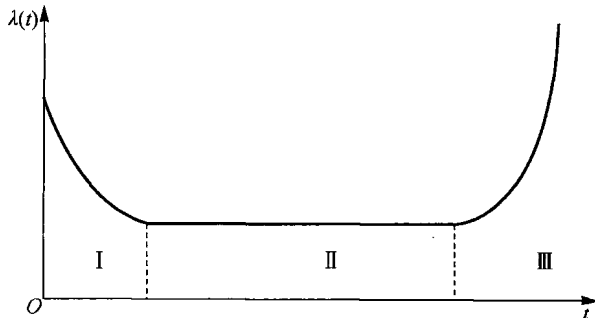


图 1-2 浴盆曲线



当故障分布服从这种规律时,可用威布尔分布来表示故障率曲线,即

$$\lambda(t) = \lambda t^{\beta-1} \quad (1-9)$$

当 $\beta > 1$ 时, $\lambda(t)$ 呈上升趋势,即区域 III; 当 $\beta < 1$ 时, $\lambda(t)$ 呈下降趋势,对应于区域 I; 当 $\beta = 1$ 时, $\lambda(t) = \lambda$, 为常数,对应于区域 II。此时

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

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1-11)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1-12)$$

显然,故障率为常数时,即在产品的有效寿命期间,寿命服从指数分布。对于寿命服从指数分布的产品,若元件在 S 时间内可靠工作,则在 $S+t$ 期间仍然正常工作的概率等于元件在时刻 t 正常工作的概率,公式如下:

$$P[T > S+t | T > S] = \frac{P[T > S+t]}{P[T > S]} = \frac{e^{-\lambda(S+t)}}{e^{-\lambda S}} = e^{-\lambda t} = P[T > t] \quad (1-13)$$

而与过去的工作时间 S 无关,这种特点称为无记忆性,只有指数分布具有这种特点。理论上可以证明:一个由若干组成部分构成的产品,不论组成部分故障是什么分布,只要出故障后给予维修,且修后如新,则较长时间后,产品的故障分布就渐近于指数分布。

产品寿命这一连续随机变量的期望值称为平均寿命,即平均故障前时间 MTTF (Mean Time To Failure),用 θ 表示。

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

对于指数分布,有

$$\theta = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1-15)$$

即为故障率的倒数。

对于可修产品,修复后又可以投入正常使用,此时,平均寿命就需要用平均无故障工作时间(也称平均故障间隔时间, Mean Time Between Fault, MTBF)表示。

3. 累积故障函数和平均故障函数

累积故障函数 $\Lambda(t)$ 为故障率函数 $\lambda(t)$ 在 $(0, t)$ 上的积分,即

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(\xi) d\xi = -\ln R(t) \quad (1-16)$$

在时间段 (t_1, t_2) 间的平均故障率(Average Failure Rate, AFR)定义为

$$\text{AFR}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\xi) d\xi = \frac{\Lambda(t_2) - \Lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (1-17)$$

AFR 可用来描述一个元件在有效寿命期间的故障率特性。对于寿命满足指数分布的产品,因为 $\lambda(t) = \lambda$, 因此有

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(\xi) d\xi = \lambda t \quad (1-18)$$



$$\text{AFR}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \lambda (t_2 - t_1) = \lambda \quad (1-19)$$

由此说明,对于寿命服从指数分布的产品,其累积故障率等于故障率乘以累积时间,而平均故障率为常数。

4. 可靠性常用的概率分布

1) 二项分布

二项分布满足以下基本假设:

- ① 试验次数 n 是一定的;
- ② 每次试验的结果只有两种,成功或失败,成功的概率为 p ,失败的概率为 q ,显然 $p+q=1$;
- ③ 对于每一次试验,成功和失败的概率是不变的,即 p 和 q 为常数;
- ④ 所有试验是相对独立的。

若随机变量 x 服从二项分布,那么数学期望值 $E(x)$ 和方差 $\text{var}(x)$ 分别为

$$E(x) = np \quad (1-20)$$

$$\text{var}(x) = \sigma^2 = npq \quad (1-21)$$

式中: σ —— 标准差。

二项分布是一种离散型分布,在靶场试验中,常用于弹药、引信的发火可靠性以及导弹飞行可靠性的概率计算。

2) 指数分布

前面已经讲过,对于指数分布有

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-22)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1-23)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1-24)$$

$$\lambda(t) = \lambda \quad (1-25)$$

指数分布具有无记忆性,即故障概率只与未来的时间有关,而与历史无关。换句话说,无论元器件运行多长时间,它们在下一段时间 t 发生故障的概率都相同,即元器件的质量不因使用时间的延长而下降。

对于指数分布,数学期望值 $E(x)$ 和方差 $\text{var}(x)$ 分别为

$$E(x) = 1/\lambda \quad (1-26)$$

$$\text{var}(x) = 1/\lambda^2 \quad (1-27)$$

3) 正态分布

正态分布又称高斯分布,其密度函数 $f(t)$ 和分布函数 $F(t)$ 分别为

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (-\infty < t < +\infty) \quad (1-28)$$



$$F(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\xi \quad (1-29)$$

典型的 $f(t)$ 及 $F(t)$ 曲线见图 1-3, σ 越大, $f(t)$ 曲线越平; 反之, $f(t)$ 曲线越陡。 μ 变化使曲线沿 x 轴移动。

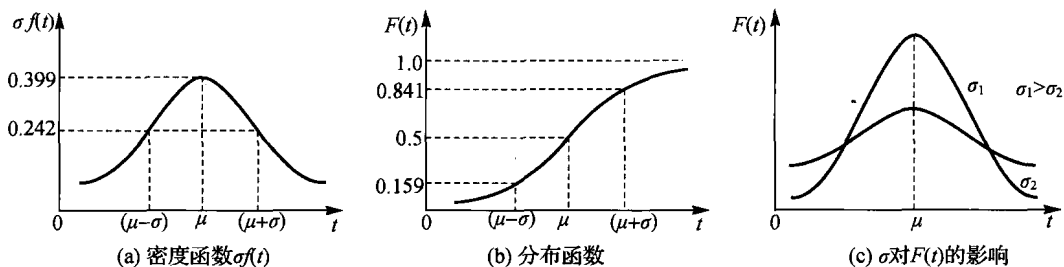


图 1-3 正态分布

如果随机变量 x 服从均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布, 那么根据密度函数的性质, 查标准正态分布曲线面积值^[3] 可得

$$P(\mu - \sigma \leq x \leq \mu + \sigma) = 0.6826$$

$$P(\mu - 2\sigma \leq x \leq \mu + 2\sigma) = 0.9544$$

$$P(\mu - 3\sigma \leq x \leq \mu + 3\sigma) = 0.9972$$

由此可见, 服从均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布的随机变量落在 $\pm 3\sigma$ 之间的概率很高, 因此 $\pm 3\sigma$ 以外就不必考虑了。

4) 威布尔分布

威布尔分布是双参数(尺度参数 α 和形状参数 β) 分布, 其故障率函数、故障密度函数、可靠度函数和累积故障分布函数分别为

$$\lambda(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad (1-30)$$

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1-31)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1-32)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1-33)$$

α 和 β 取不同的值, 可以得到不同的分布曲线。当 $\beta=1$ 时, 威布尔分布简化为指数分布, 此时:

$$\lambda(t) = \frac{1}{\alpha} \quad (1-34)$$