

# Fundamentals of Reliability Engineering

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 机车车辆类

## 可靠性工程基础

主编 王文静



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

013025266

TB114.3  
40

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车

# 可靠性工程基础

王文静 主编



北京交通大学出版社

·北京·



北航

C1632038

TB114.3

40

013032568

## 内 容 简 介

为了适应 21 世纪高等院校教学体制改革的要求, 满足成人(网络)教育的需要, 编者在长期积累的教学经验的基础上, 组织编写了本书。

全书分为 6 章, 内容包括: 可靠性工程领域的概论, 介绍了主要特征量及常用分布等可靠性工程的基本概念; 布尔代数的基本概念和运算方法, 串联系统、并联系统、混联系统等可靠性模型; 故障模式、影响及危害度分析(FMECA); 建立故障树的基本方法及数学描述; 材料力学性能可靠性分析的基本方法、材料常规力学性能的可靠性分析、疲劳试验数据的统计处理方法及  $S-N$  曲线与  $P-S-N$  曲线的拟合方法; 概率可靠性设计的基本方法和步骤, 并举例说明了螺栓、轴类零件、圆柱螺旋弹簧、齿轮传动等一些常用机械结构的可靠性设计方法。本书内容丰富, 注重理论与实践相结合。为了让学习者掌握和巩固可靠性工程基础知识的重点与难点, 还精选了一些结合工程实际应用的例题, 且每节都附有复习参考题。

本书适用于工程类相关学科各专业, 也可作为选修课教材或工程技术人员参考书。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/王文静主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2012. 12

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1315-2

I. ①可… II. ①王… III. ①可靠性工程-高等学校-教材 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 303121 号

责任编辑: 吴嫦娥 特邀编辑: 李晓敏

出版发行: 北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 9 字数: 225 千字

版 次: 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-1315-2/TB·32

印 数: 1~3 000 册 定价: 25.00 元

---

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

# 高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

## 编委会

顾问：施仲衡

主任：司银涛

副主任：李建勇 陈庚

委员：(按姓氏笔画排序)

王文静 史红梅 刘伟

刘志明 齐红元 宋永增

宋雷鸣 张励忠 张欣欣

周明连

## 编委会办公室

主任：赵晓波

副主任：孙秀翠

成员：(按姓氏笔画排序)

吴嫦娥 郝建英 徐琤

# 总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及其以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会  
2012年12月

# 出版说明

为促进高等轨道交通专业机车车辆类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学机械与电子控制学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·机车车辆类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《设计与制造公差控制》、《可靠性工程基础》、《液压与气动技术》、《测试技术》、《单片机接口技术》、《计算机辅助机械设计》、《控制理论基础》、《机械振动基础》、《动车组网络控制》、《动车组运行控制》、《机车车辆设计与装备》、《列车传动与控制》、《机车车辆运用与维修》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通机车车辆专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会  
2012年12月

# 前 言

可靠性理论及应用是以产品寿命特征为主要研究对象的一门新兴的边缘性学科，它涉及基础科学、技术科学和管理科学等许多领域，其推广和应用已给企业和社会带来了巨大的经济效益。

“可靠性”作为产品质量和技术措施的一个最重要的指标早已受到世界各工业国家的高度重视，因为任何产品和技术，尤其是高科技产品、大型设备及超大型设备的制造、尖端技术的发展，都要以可靠性技术为基础。在现代生产中，可靠性技术已贯穿到产品的开发、研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。

本书针对机械产品可靠性工程的基础，详细介绍了其有关数理基础；讨论了失效模式、后果及严重度分析方法（FEMCA）及故障树分析方法；举例说明了材料力学性能可靠性分析方法和常用机械结构的可靠性设计。

本书是作者在长期从事课程教学的经验积累上完成的，编写注意由浅入深，通俗易懂，以便于理工科专业本科生和在职工程技术人员学习使用，并参考了近年来出版的一些技术论著及相关教材。

全书分6章，第1章、第2章由北京交通大学李萍博士编写，第3章、第4章由北京交通大学杨广雪博士后编写，第5章、第6章由北京交通大学王文静副教授编写。全书由王文静负责统稿与定稿，李凯硕士协助完成了文字录入工作。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，遗漏、谬误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2012年12月



# 目 录

第 1 章 可靠性概论 .....	1	第 4 章 故障树分析 .....	44
1.1 结构可靠性基本概念 .....	1	4.1 建立故障树 .....	44
1.2 可靠性特征量 .....	2	4.2 故障树的数学描述 .....	50
1.3 常用失效分布 .....	7	复习参考题 .....	53
1.4 失效分布参数计算与检验 .....	9	第 5 章 材料力学性能的可靠性分析 .....	54
复习参考题 .....	10	5.1 目的与基本方法 .....	54
第 2 章 系统可靠性模型 .....	11	5.2 材料常规力学性能(强度)的 可靠性分析 .....	61
2.1 产品定义和系统可靠性 框图 .....	11	5.3 疲劳性能的可靠性分析 .....	62
2.2 布尔代数、容斥原理和不交型 算法简介 .....	13	5.4 疲劳试验数据及其统计 处理 .....	63
2.3 串联系统的可靠性模型 .....	17	5.5 $S-N$ 曲线与 $P-S-N$ 曲线的 拟合 .....	65
2.4 并联系统的可靠性模型 .....	19	复习参考题 .....	66
2.5 混联系统的可靠性模型 .....	21	第 6 章 概率可靠性设计 .....	67
复习参考题 .....	23	6.1 可靠性设计概述 .....	67
第 3 章 故障模式、影响及危害 度分析(FMECA) .....	24	6.2 应力—强度分布干涉模型法 原理 .....	71
3.1 概述 .....	24	6.3 几种常用分布的可靠度 计算 .....	73
3.2 FMECA 的目的和任务 .....	25	6.4 安全系数与可靠度 .....	80
3.3 原始数据及资料准备 .....	25	6.5 螺栓联结的可靠性设计 .....	85
3.4 FMECA 方法 .....	26	6.6 轴类零件的可靠性设计 .....	91
3.5 FMECA 分析过程与步骤 .....	29	6.7 圆柱螺旋弹簧的可靠性 设计 .....	97
3.6 机车车辆转向架 FMECA 应用 示例 .....	40		
复习参考题 .....	43		

6.8 齿轮传动的可靠性设计.....	102	附录 B 典型函数数值表 .....	118
复习参考题 .....	114	附录 C 可靠性、维修性、保障性	
附录 A 模拟试题 .....	116	国家军用标准目录 .....	132
A1 模拟试题一 .....	116	参考文献 .....	134
A2 模拟试题二 .....	116		

# 第1章

## 可靠性概论

### 【本章内容概要】

介绍了可靠性工程领域的基本概念，可靠性主要特征量，指数分布、威布尔分布、正态分布、对数正态分布等可靠性常用分布，并讲述了失效分布参数计算的基本情况。

### 【本章学习重点与难点】

学习重点：可靠性特征量、常用失效分布。

学习难点：累积失效概率、失效概率密度、失效率等可靠性特征量。

### 1.1 结构可靠性基本概念

产品的质量指标有很多种。例如，动车组的指标就有构造运行速度、垂向和横向平稳性、脱轨系数和倾覆系数、车内噪声及结构静、动强度等。这类质量指标通常称为性能指标，即产品完成规定功能所需要的指标。除此之外，产品还有另一类指标，即可靠性指标，它反映产品保持其性能指标的能力。如车辆投入运营前的各项性能指标经试验测试都符合标准，但运行几十万公里后是否仍能保持其出厂时各项性能指标，这是运营部门十分关心的问题。车辆制造厂为了说明自己产品保持其性能指标的能力，就要通过试验提出产品的可靠性指标，即可靠性特征量——平均寿命、可靠寿命、失效率等。

按照《可靠性维修性保障性术语》(GJB 451A—2005)，可靠性定义为“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”，这种能力以概率(可能性)表示，故可靠性也称为可靠度。上述可靠性定义包含以下5个要素。

(1) 产品：是指研究对象，可以是任何元件、器件、设备和系统。例如，动车组上的一个元器件(如晶体管、开关或灯泡)、一个零部件(如电磁阀、转向架)、一个系统(如冷却系统、牵引传动系统)或一个组件(如变流器、电机)，也可以是整台动力车或车辆等。

在可靠性工程中，还可以把产品分为不可修复产品和可修复产品两种类型。产品在使用中发生失效，其寿命即告终结的，称为不可修复产品，实际中多指没有修理价值或修理后不能完全恢复其功能的产品，如动车组中的灯泡、皮带、弹簧、齿轮、油封、轴承及有关的电子元器件等。产品发生故障后，可以通过维修恢复其规定功能的，称为可修复产品，一般复杂、昂贵的产品设计成可维修的，即可通过更换其中的零部件，重新调整、加工处理等措施恢复其原来的功能。

(2) 规定条件：是指产品在使用中所处的环境条件(温度、压力、湿度、风沙和辐射

等)、工作条件(功能模式、负荷条件、冲击振动情况等)、维护条件和操作方式等。所规定的条件对可靠性有着直接的影响。例如,动车组在高原、大风沙地区和工作在高温、湿度大地区的可靠性是不一样的。另外动车组可靠性还和各个地域的线路情况、坡道高低、定员多少、运行速度的快慢及司机的熟练程度等有关。

(3) 规定时间:是指产品完成规定任务或功能所需要的时间。可以用运行时间、走行公里或循环次数等来表示。例如,目前我国干线机车一般用走行公里来表示,动车组一般用时间(年、月、日)来表示。通常,产品可靠性是时间的递减函数,时间越长,可靠性越差。

(4) 规定功能:通常是指产品在技术文件中所规定的性能。对动车组而言,规定功能是指设计任务书、技术条件、使用说明书、国家标准及相关技术文件中所规定的各种功能与性能要求。

(5) 能力:常用概率来度量这一“能力”,称为可靠度。由于产品的故障是随机事件,产品寿命是随机变量,因此产品在规定寿命周期内完成规定功能的能力也是随机性的,要用概率才能定量地表示产品可靠性程度。

## 1.2 可靠性特征量

研究可靠性特征量,必须首先明确“寿命”的含义。在日常生活中,产品的寿命往往是指产品总的可使用时间。每一个产品都有自己固定的寿命,但只有在试验后(包括使用后)才能确定。故产品的寿命是一个随机变量,一般用 $T$ 表示。在可靠性工程中,不可修复产品的寿命是指发生失效前的实际工作时间;可修复产品的寿命是指相邻两次故障间的工作时间,此时也称为无故障工作时间。从数学上讲,研究产品的可靠性主要是研究产品寿命的概率分布;而可靠性特征量则是随机变量寿命的一些描述量。寿命的单位多数为时间,如小时、天、年等,也可以是动作次数、运动距离等。

### 1.2.1 可靠度

#### 1. 可靠度的定义

可靠度是时间 $t$ 的函数,记作 $R(t)$ 。设 $T$ 为产品寿命的随机变量,则:

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

式(1-1)表示产品的寿命 $T$ 超过规定时间 $t$ 的概率,即产品在规定时间 $t$ 内完成规定功能的概率。根据可靠度的定义,可以得出: $R(0) = 1, R(\infty) = 0$ 。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1-1所示。

#### 2. 可靠度估计值

可靠性特征量理论上的值称为真值,它完全由产品失效的数学模型所决定。它虽然是客观存在的,但实际上是未知的,它主要应用在理论研究方面。在实际工作中,我们只能获得有限个样本的观测数据,经过一定的统计计算得到真值的估计值,称为可靠性特征量的估计值,记为 $\hat{R}(t)$ 。它具有以下两个特性。

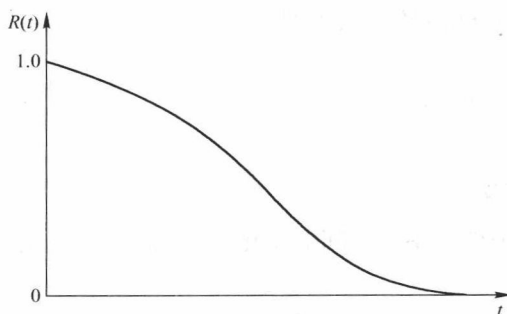


图 1-1 可靠度与时间的关系曲线

(1) 对于不可修复的产品, 可靠度估计值是指在规定的区间  $(0, t)$  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, 可靠度估计值的公式相同, 即:

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

## 1.2.2 累积失效概率

### 1. 累积失效概率的定义

累积失效概率是指产品在规定条件下和规定时间内失效的概率, 其值等于  $1 - R(t)$ 。也可以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:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - R(t) \quad (1-3)$$

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。累积失效分布函数  $F(t)$  与时间  $t$  关系曲线如图 1-2 所示。

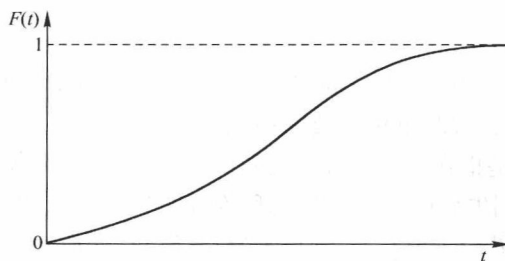


图 1-2 累积失效分布函数与时间关系曲线

### 2. 累积失效概率的估计值

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) = n_f(t)/n \quad (1-4)$$

式中,  $n_f(t)$  为时间区间  $(0, t)$  内的失效产品数 (不可修复产品) 或故障次数 (可修复产品),  $n_f(t) = n - n_s(t)$ 。

### 1.2.3 失效概率密度

#### 1. 失效概率密度的定义

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:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (1-5)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-6)$$

#### 2. 失效概率密度的估计值

$$\hat{f}(t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \left[ \frac{n_f(t + \Delta t)}{n} - \frac{n_f(t)}{n} \right] / \Delta t = \frac{1}{n} \frac{\Delta n_f(t)}{\Delta t} \quad (1-7)$$

式中  $\Delta n_f(t)$  为在时间间隔  $(t, t + \Delta t)$  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 (1-3)、式 (1-6) 可知,  $f(t)$ 、 $F(t)$  和  $R(t)$  之间的关系如图 1-3 所示。

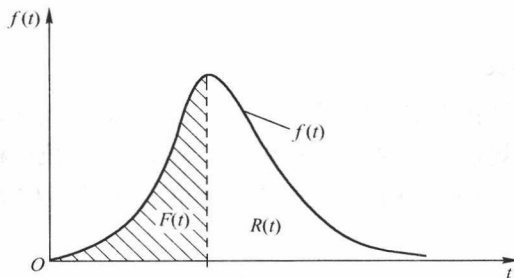


图 1-3  $f(t)$ 、 $F(t)$  和  $R(t)$  的关系

### 1.2.4 失效率

#### 1. 失效率的定义

失效率是指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, 失效率是指在时刻  $t$  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, 它反映  $t$  时刻失效的速率, 故也称为瞬时失效率。即:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t) \cdot \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \cdot \Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1-8)$$

工程实际中, 失效率与时间的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, 如图 1-4 所示。从图中可以看出, 产品的失效可明显划分为以下 3 个阶段。

##### 1) 早期失效期

早期失效期是指这阶段的失效主要由产品的各种质量缺陷造成的。解决办法是对原材料

和工艺进行严格的控制, 同时进行质量检验, 剔除早期失效件, 使其尽可能不投入使用。

### 2) 偶然失效期

当失效率相对地呈现为一个常数时, 这个时期称为偶然失效期。这阶段失效将随机地发生, 多数为工作应力引起的失效。这一段曲线的纵坐标高度(失效率)为 MTBF 的倒数(MTBF 为平均无故障工作时间); 沿横坐标方向的长度则为耗损(老化)寿命或使用寿命。

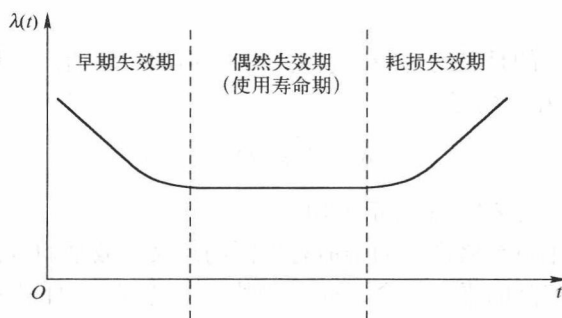


图 1-4 典型的失效率曲线

### 3) 耗损失效期

耗损失效期的失效是由于不同类型的耗损机理造成的性能退化或老化变质。即当产品使用到一定时间, 意味使用寿命期结束, 耗损失效期开始。这时产品失效是迅速上升的。

由产品的制造质量、可靠性和耗损引起的失效, 从理论上说都可以贯穿其整个寿命期, 只是每一时期有一种特定性质的失效占支配地位, 即在早期失效期内以质量问题为主; 在偶然失效期内以可靠性问题为主(产品失效率高, 表明可靠性低); 而在耗损失效期内以耗损问题为主(任何产品工作到一定时间后都要失效或性能下降)。

## 2. 失效率的估计值

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:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n_f(t + \Delta t) - n_f(t)}{n_s(t) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n_f(t)}{n_s(t) \cdot \Delta t} \quad (1-9)$$

## 3. 平均失效率

在工程实践中, 常常用到平均失效率, 其定义如下。

(1) 对不可修复的产品, 是指在一个规定的时间内总失效产品数  $n_f(t)$  与该批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, 该批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:

$$\bar{\lambda} = \frac{n_f(t)}{T} = \frac{n_f(t)}{\sum_{i=1}^{n_f} t_{fi} + n_s t} \quad (1-10)$$

式中,  $t_{fi}$ ——第  $i$  个产品失效前的工作时间;

$n_s$ ——规定(或观察)期间未出现失效的产品数;

$n_f$ ——规定（或观察）期间出现失效的产品数。

### 1.2.5 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。这些指标总称为可靠性寿命特征，它们也是衡量产品可靠性的尺度。

#### 1. 平均寿命

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。平均寿命的数学意义就是寿命的数学期望，记作  $\theta$ ，数学公式为：

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1-11)$$

可以证明，能用可靠度  $R(t)$  来表示平均寿命。

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。一般用 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，平均寿命的估计值的表达式均为：

$$\hat{\theta} = \frac{\text{该批产品的总累积工作时间}}{\text{总失效数}} = \frac{T}{n_f} \quad (1-12)$$

#### 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  $r$  时对应的寿命，即：

$$R(T_r) = r \quad (1-13)$$

可靠寿命  $T_r$  与可靠水平  $r$  的关系如图 1-5 所示。

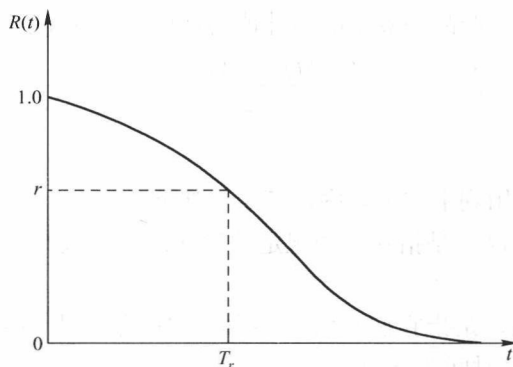
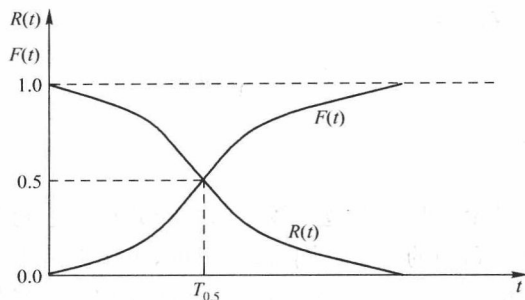


图 1-5 可靠寿命  $T_r$  与可靠水平  $r$  的关系

当  $R(T_r) = e^{-1} = 0.37$  时，可靠寿命  $T_r$  称为特征寿命，对于失效规律服从指数分布的产品而言，特征寿命就是平均寿命。

当  $R(T_r) = 0.5$  时，可靠寿命  $T_{0.5}$  称为中位寿命。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%，中位寿命与  $R(t)$  及  $F(t)$  的关系如图 1-6 所示。



图 1-6 中位寿命与  $R(t)$  及  $F(t)$  的关系

工程中,经常用到的是平均寿命和可靠寿命这两个寿命特征量。

## 1.3 常用失效分布

产品的失效分布是指其失效概率密度函数或累积失效概率函数与可靠性特征量的关系。如已知产品的失效分布函数,则可求出可靠度函数、失效率函数和寿命特征量。即使不知道具体的分布函数,但如果已知失效分布的类型,也可以通过对分布的参数估计求得某些可靠性特征量的估计值。因此,在可靠性理论中,研究产品的失效分布类型是十分重要的问题。下面介绍常见的 4 种失效分布。

### 1.3.1 指数分布

在可靠性理论中,指数分布是最基本、最常用的分布,适合于失效率  $\lambda(t)$  为常数的情况。

#### 1. 失效概率密度函数

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0) \quad (1-14)$$

式中  $\lambda$ ——指数分布的失效率,为一常数。

#### 2. 累积失效概率函数

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0) \quad (1-15)$$

#### 3. 可靠度函数

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0) \quad (1-16)$$

#### 4. 平均寿命

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} \cdot dt \quad (1-17)$$

因此,当产品寿命服从指数分布时,其平均寿命  $\theta$  与失效率  $\lambda$  互为倒数。

#### 5. 可靠寿命

给定可靠度  $r$  时,根据式 (1-13) 和式 (1-16),得:

$$R(T_r) = e^{-\lambda T_r} = r$$