

安全工程技术丛书

可靠性工程

◎ 金伟娅 张康达 编著



化学工业出版社
教材出版中心

安全工程技术丛书

可 靠 性 工 程

金伟娅 张康达 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

可靠性工程/金伟娅, 张康达编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 3

(安全工程技术丛书)

ISBN 7-5025-6758-5

I. 可… II. ①金…②张… III. 可靠性工程
IV. TB114. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018983 号

安全工程技术丛书

可 靠 性 工 程

金伟娅 张康达 编著

责任编辑: 程树珍

文字编辑: 张双进

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 378 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6758-5/X·602

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

可靠性是产品的一种动态质量指标,在现代化生产中已贯穿在产品的开发、设计、制造、试验、使用及维修保养等各个环节之中。这种质量指标,特别对过程装备来说,它又直接与生产的安全密切相关,只有高可靠性的装备才能确保生产过程安全。

随着科学技术的不断进步,石化、核电、钢铁生产等过程工业日益大型化,对装备的性能、精度和复杂程度的要求越来越高,工艺条件也更为苛刻,对过程装备的质量提出了更高的要求。同时近年来分析问题的手段与方法也更为先进,这就为可靠性的广泛应用提供了良好的条件。

可靠性学科就是量化地研究和分析产品动态质量并解决、提高动态质量的工程性学科,也是一门涉及数理统计、运筹学、系统工程、价值工程、人机工程、机械学、电子学、工程材料学、失效物理学、安全工程学的交叉边缘学科。现在欧美发达国家都十分重视可靠性学科知识的普及与应用,已将其列入考核工程技术人员的一项内容,直接推动了制造业产品质量的迅速提高。目前在中国,可靠性工程已逐步应用于国民经济各个领域,本书作为《安全工程技术丛书》的一个分册,旨在促进可靠性工程学在安全工程中的推广和应用。

本书针对过程装备中涉及可靠性工程的基本知识,详细介绍了有关的数理基础,机械可靠性设计和分析的理论和方法,可靠性试验的基本原理等,强调了以工程实用为目的,列举了许多工程应用的实际问题与案例。因此,本书可以作为过程装备及控制工程及其相近专业本科或研究生教学的教材,也可以作为从事机械制造,设备技术管理的工程技术人员的参考用书。

本书的编写是在浙江工业大学机电学院长期从事本课程教学的经验积累基础上完成的。其中也包含了历年来作者及其同事在进行这一领域科研和教学工作中的许多成果。本书共分8章,其中第2、第3和第6章由金伟娅执笔编写,并负责全书的统稿和整理工作。其余各章由张康达执笔编写。高增梁教授审阅了部分章节,陈勃、蔡钢师等同学参与了本书的文字录入与图表绘制、整理工作,在此一并表示感谢。

由于水平、经验及时间所限,书中难免存在不少疏漏之处,热忱欢迎读者批评、指正。

编者

2004年12月

内 容 提 要

本书根据尽量满足工程实际需要的原则，既系统地阐述了可靠性工程学的基本理论和方法，又结合工程实际提供了相关的资料和案例。内容包括有：可靠性主要指标与分布；系统可靠性；机械强度可靠性设计；典型机械零部件可靠性设计；概率有限元；故障模式影响分析与故障树分析；可靠性试验等。

本书是《安全工程技术丛书》中的一个分册，可作为过程装备与控制工程及其相近专业的本科和研究生教学的教材，也可作为从事过程装备等机械产品设计、制造、试验、使用及管理的工程技术人员参考书。

目 录

1 绪论	1
1.1 可靠性工程的发展	1
1.2 可靠性的重要意义	2
1.3 可靠性的研究内容和范围	3
1.3.1 可靠性数学	3
1.3.2 可靠性物理	3
1.3.3 可靠性工程	4
2 可靠性指标和概率分布	5
2.1 可靠性指标	5
2.1.1 故障概率密度函数和故障分布函数	5
2.1.2 可靠度	6
2.1.3 故障率	7
2.1.4 平均寿命	9
2.1.5 可靠寿命、中位寿命和特征寿命	11
2.1.6 寿命方差和寿命均方差	11
2.1.7 维修性的特征量	12
2.1.8 有效性特征量	13
2.1.9 工时	15
2.1.10 系统有效性	15
2.1.11 重要度	16
2.1.12 经济性指标	16
2.1.13 与人为差错有关的可靠性指标	16
2.2 可靠性中常用的概率分布	17
2.2.1 离散型随机变量的几种常见分布	17
2.2.2 连续型随机变量的几种常见分布	22
3 系统的可靠性分析	32
3.1 系统的组成和功能逻辑框图	32
3.1.1 系统的组成	32
3.1.2 系统可靠性框图	32
3.1.3 系统类型	33

3.2 不可修复系统的可靠性分析.....	33
3.2.1 串联系统.....	33
3.2.2 并联系统.....	35
3.2.3 混联系统.....	37
3.2.4 表决系统.....	39
3.2.5 旁联系统.....	41
3.2.6 桥联系统.....	43
3.3 可靠性分配.....	44
3.3.1 等分配法.....	45
3.3.2 再分配法.....	46
3.3.3 系统失效率预计值法.....	47
3.3.4 AGREE 分配法.....	48
3.3.5 成本最小分配法.....	50
3.4 可修复系统的可靠性分析.....	51
3.4.1 马尔柯夫过程.....	51
3.4.2 串联可修复系统.....	54
3.4.3 并联可修复系统.....	57
3.4.4 表决可修复系统.....	59
3.4.5 旁联可修复系统.....	60
3.4.6 系统预防维修间隔期的确定.....	63
4 机械可靠性设计原理	67
4.1 概述.....	67
4.1.1 机械可靠性设计的特点.....	67
4.1.2 机械可靠性设计的主要内容和方法.....	67
4.1.3 可靠性设计的统计基础.....	68
4.2 应力-强度模型计算可靠度的方法	69
4.2.1 应力-强度分布干涉理论	69
4.2.2 已知应力和强度均为正态分布时的可靠度计算.....	72
4.2.3 应力和强度均为对数正态分布时的可靠度计算.....	74
4.2.4 应力和强度均为指数分布时的可靠度计算.....	75
4.2.5 应力为指数(正态)分布而强度为正态(指数)分布时的可靠度计算.....	75
4.2.6 应力和强度都为威布尔分布时的可靠度计算.....	77
4.3 可靠度的近似计算.....	77
4.3.1 可靠安全系数算法.....	78
4.3.2 随机变量的均值和标准差的近似计算.....	79
4.4 可靠性设计所需的数据和资料.....	81
4.4.1 载荷的统计分析.....	81

4.4.2	几何尺寸的统计分析	83
4.4.3	材料力学性能的统计分析	84
4.5	机械静强度可靠性设计	90
4.5.1	受拉伸载荷零件的可靠性设计	90
4.5.2	转轴的静强度可靠性设计	94
4.5.3	压杆临界载荷的可靠度设计	95
4.6	机械疲劳强度的可靠性设计	96
4.6.1	疲劳强度的修正	97
4.6.2	$S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线	100
4.6.3	疲劳极限线图	102
5	典型机械零部件可靠性设计	109
5.1	螺栓联接的可靠性设计	110
5.1.1	受轴向静拉伸载荷螺栓联接的可靠性设计	110
5.1.2	受轴向变载荷紧螺栓联接的可靠性设计	119
5.1.3	静载荷受剪螺栓联接的可靠性设计	121
5.1.4	变载荷抗剪螺栓联接的可靠性设计	122
5.1.5	提高螺栓强度和可靠度的措施	122
5.2	圆柱螺旋弹簧的可靠性设计	124
5.3	机构运动的可靠性分析	130
5.3.1	概述	130
5.3.2	机构运动可靠性基本模型及计算方法	131
5.3.3	曲柄连杆机构运动的可靠性模型	136
5.4	机械磨损零件的可靠性设计	144
5.4.1	磨损寿命线图	144
5.4.2	给定工作寿命时零件耐磨性的可靠度计算	146
5.4.3	给定可靠度的零件耐磨寿命的计算	147
5.5	带缺陷结构断裂的可靠性分析	148
5.5.1	带缺陷结构断裂分析基本原理	149
5.5.2	断裂分析图的概率分析	150
5.5.3	安全系数法	151
6	有限元法在可靠性分析中的应用	154
6.1	概述	154
6.2	概率有限元的基本原理	155
6.2.1	基本方程的建立	155
6.2.2	以确定有限元程序为基础的概率有限元的求解流程	156
6.2.3	蒙特卡洛(Monte-Carlo)法	156

6.2.4	响应面法求解简介	158
6.3	采用 ANSYS 分析软件的可靠性分析方法	161
6.3.1	生成分析文件阶段	162
6.3.2	可靠性分析阶段	162
6.3.3	可靠性结果输出阶段	162
6.4	结构可靠性分析实例	163
6.4.1	受均布载荷的矩形截面梁的可靠性分析	163
6.4.2	带接管内压容器的可靠性分析	167
7	故障模式、影响分析(FMEA)和故障树分析(FTA)	177
7.1	故障模式与影响分析	177
7.1.1	FMEA 的基本原理	177
7.1.2	FMEA 的实施步骤	179
7.1.3	危害度分析	180
7.2	故障树分析	182
7.2.1	故障树基本术语及符号	182
7.2.2	建造故障树	183
7.2.3	故障树的结构函数	187
7.2.4	故障树的最小割集算法	189
7.2.5	用最小割集和最小路集表示的结构函数	192
7.2.6	失效概率的计算	194
7.3	FMECA 与 FTA 综合分析方法	196
8	可靠性试验	199
8.1	概述	199
8.1.1	可靠性试验的目的	199
8.1.2	可靠性试验的分类	200
8.1.3	可靠性试验中应注意的问题	201
8.1.4	环境应力筛选试验	202
8.1.5	可靠性增长试验	203
8.1.6	加速寿命试验	208
8.2	可靠性试验的参数估计	210
8.2.1	分布参数的估计值	210
8.2.2	分布参数的区间估计	218
8.3	可靠性抽样试验	224
8.3.1	抽样试验的种类和特点	224
8.3.2	抽样检验的一般原理	225
8.3.3	故障率(或平均寿命)抽样试验方法	230

8.3.4 一次抽样试验方案的决定	231
附录 1 二项分布表	239
附录 2 泊松分布表	240
附录 3 标准正态分布表	241
附录 4 Γ 分布表	244
附录 5 χ^2 分布表	245
附录 6 F 分布表	246
参考文献	248

1

绪 论

1.1 可靠性工程的发展

实际上,产品的质量可靠性问题很早以前就已为人们所关注,但作为一门学科,专门进行这一领域的研究还是近 50 年开展起来的。主要是因为用传统的产品质量分析方法常常不能圆满解释一个产品在使用中所出现的故障和失效情况。早在第二次世界大战期间,许多机械电子产品常常在战争的使用过程中出现故障,致使丧失了使用能力,如美国空军由于飞行故障而损失的飞机达 2 万多架,是在战争中被击落的飞机的 1.5 倍;而在许多舰艇和飞机上的电子仪器设备有将近一半均在运输与储存中出现了故障而失效。这种不经使用就遭到重大损失的情况促使美国投入了许多力量进行可靠性研究。德国在 V-1 火箭的研制过程中也开始应用可靠性数理统计方法,把小样本问题转化为大样本问题进行了研究。美国从 1943 年开始,由军工部门和学术研究机构联合开展了多种研究工作,到 1957 年,由美国国防部电子设备可靠性咨询小组得出了著名的 AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 研究报告,报告中提出了机械电子产品在研制及生产过程中对产品可靠性的指标,进行试验、检验和鉴定的方法,在生产、储存和运输等方面的要求等。从此,可靠性工程学逐渐发展成为一个独立的学科。

在 20 世纪 50 年代,前苏联为了保证人造地球卫星发射和飞行的安全,也开展了可靠性的研究工作,1961 年在发射第一艘载人宇宙飞船时,提出了可靠度达到 0.999 的定量要求。日本企业家为了保证产品的质量要求,以便在日益激烈的国际市场竞争中取胜也开展了可靠性的研究工作,日本科学技术联盟专门成立了“可靠性研究委员会”。美国国家航空航天局 (NASA) 更是对许多机械电子器件及系统和计算机硬件与软件全面地开展了可靠性研究,并使其成为商业化的质量指标。到 20 世纪 70 年代更是广泛用于机械电子、石油化工、核能工程和其他民用产品。对软件的可靠性问题也有了很大的发展。

随着中国的改革开放和经济的高速发展,在 20 世纪 70 年代后期从解决国家重点工程元器件的可靠性问题开始,在军工和民用产品方面的可靠性研究有了飞速的提高。当时明确提出了国防军工重点产品的可靠度在 10 年内要提高两个数量级。像电视机这类产品也明确提出了可靠性、安全性的定量指标。到 20 世纪 80 年代,可靠性研究就更为深入,开始形成了一批可靠性研究和管理的队伍,制订了 GJB 299—87 “电子设备可靠性设计手册”等一系列

标准，有力地推动了可靠性的规范化工作。软件的可靠性问题也逐步从研究阶段向工程化发展。到 20 世纪 90 年代初，提出了“以科技为先导，以质量为主线”，沿着“管起来，控制好，上水平”的发展模式开展可靠性的推广工作。使许多机械、电子产品，如电视机、影碟机、洗衣机等民用产品的质量以及许多军工产品的质量产生了质的飞跃。2000 年以来，许多民用的机电产品都制订了可靠性的指标与要求，在可靠性技术的推广应用方面达到了新的水平。

综上所述，可靠性工程从它诞生的时候开始，一直到近年来的迅速发展，都离不开社会的需求和科学技术的发展。虽然它起源于军事领域，但从它的推广应用和给国民经济及企业所带来的巨大效益的事实中，人们更加认识到提高产品可靠性的重要性。现在世界各国都投入了大量人力、物力进行研究，并在更广泛的范围推广应用。近年来中国在这一领域的研究和发展虽然十分迅速，但与先进的国际水平相比，差距还很大。为尽快改变这种局面，还应产品质量树立全面的现代化质量观，真正将可靠性指标作为现代质量管理的一项指标，进行严格的可靠性质量考核，同时加强对可靠性理论和应用的研究，从而使中国的可靠性工程研究和管理的水平进一步提高，更好地推动中国国民经济的迅速发展。

1.2 可靠性的重要意义

通常人们所说的“可靠性”指的是“可以信赖的”或是“可以信任的”。对于一个机械产品或电子仪器，当人们要求它运行和工作时，它就应该正常运行和工作，这种产品就被称为是可靠的，否则它就属于不可靠。因此，产品的可靠性特别是一些重要的产品，如国防军工装备、机械电子产品、石油化工装备、核动力工程装备等的可靠性与国民经济、生产和人身安全息息相关。因此，研究产品的可靠性显得十分重要和迫切。

一个产品或系统，如航天器的发射和飞行，核电站的运行，石油化工生产等都是一个相当庞大的系统，其中都有若干分系统，而各个分系统又有多台整机组成，而每台整机又由许多个零部件组成，各个零部件又有许多个元器件与管道、导线等相连，只要其中有一件失效，就可能造成整个机组和全系统发生故障，甚至酿成灾难性事故。如 1986 年美国“挑战者”号航天飞船的机毁人亡事故，就是因为燃料系统密封圈的失效所引起。它在起飞后 76s 时爆炸，造成 7 名宇航员丧生和 12 亿美元的直接经济损失。

随着科学技术的发展和生产规模的扩大，对产品质量的要求也日益提高。以前的产品质量主要指产品的性能，即产品出厂时的质量，而现在产品的质量已不仅仅局限于产品的性能这一指标。目前产品质量的含义首先是要满足使用要求所具有的所有特性，其中包括：性能、可靠性、经济性和安全性等。性能是产品的技术指标，是出厂时产品应具有的质量指标要求；而可靠性是产品在出厂后所表现的质量特性，是产品性能的延伸和扩展，是一种衡量产品全寿命的质量和动态质量指标；经济性是在确定的性能和可靠性水平下的总成本，包括购置成本和使用成本；安全性则是产品在流通和使用过程中保证安全的程度，它通过风险值或可接受的危险概率来定量描述。风险值则是事故发生的概率与该事故后果的乘积。

在上述产品质量的四个方面中，可靠性占主导地位。性能差，则产品实际上是废品；而性能好，可靠性不一定就高；但是可靠性高的产品在使用中不仅能保证其性能可以很好地实

现，而且故障也不易发生，维修费用也可以下降，因故障所造成的损失也减少，安全性也相应地得到提高。所以可靠性是产品质量的核心，是产品的制造方和使用方共同追求的一个目标。

对于过程装备及其控制系统而言，可靠性更有其特殊的意义。因为过程装备所处理的物料大多是易燃、易爆、有毒、有害的危险化学品。一旦发生事故，其后果都将十分严重。为了提高其安全性，降低风险值，因此，近年来对于过程装备及其控制系统都提出了严格的可靠性要求。如核电设备，故障率都应控制在 10^{-7} /台·年以下，石油化工设备也一样。而对过程工业中的控制系统，2003 年国际电子工程委员会（IEC）专门对过程工业中的安全连锁系统（Safety Instrumented Systems）制订了国际标准 IEC 61511，其中详细规定了软件和硬件的可靠性要求。

此外，还应指出，当今国际贸易中所实施产品责任法（Product Liability PL）也促使工业界提高产品的可靠性。在产品责任法中规定：只要产品缺陷、故障对用户造成损失，制造者必须承担法律和经济责任。据 1975 年美国质量学会（ASQC）的“质量进展”杂志估计，由于产品质量问题，制造者当年要赔偿的金额达 500 亿美元。同时，在 PL 中还规定：如果制造者能出示进行了可靠性设计和可靠性保证等资料的证明，可以排除其责任。从中可见，研究产品的可靠性是多么重要。特别是今天，中国已加入 WTO，中国经济要与国际接轨，中国的企业要参与到国际市场的竞争，要成为世界制造业的一个中心，只有不断提高产品的可靠性水平才能在国际市场站稳脚跟。美国人曾预言：今后只有那些具有高可靠性指标的产品和企业，才能在日益激烈的国际贸易竞争中生存下来。日本人则断言：今后产品竞争的焦点是可靠性。因此，深入研究可靠性，不断提高中国产品的可靠性是一个十分紧迫的任务。

1.3 可靠性的研究内容和范围

可靠性作为一门学科，它主要是用定量的方法来研究产品的动态质量，因此它有自己的体系、方法和理论。其内容主要包括相互联系的三个方面。

1.3.1 可靠性数学

可靠性数学主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法，也是应用数学中的一个分支。它涉及的面非常广，主要包括数理统计，随机过程，运筹学，模糊数学和概率论等。现在随着可靠性的发展，已不是简单地运用现有的一些数学方法和理论，而是已发展成了有自己特色的相对独立的一个分支。应用可靠性数学所提供的理论与方法，研究产品故障的统计规律，研究产品的可靠性设计、分析、预测、分配、评估和验收检验等技术中的数学问题。

1.3.2 可靠性物理

可靠性物理也就是通常所指的产品发生故障以后的失效分析。这是专门研究失效现象及其发生的机理和检测方法的一个学科。美国 Rame 航空发展中心（RADC）在 20 世纪 60 年代首先进行失效物理的研究，以后逐步发展了失效分析的技术与方法，并进一步研究其失效

的机理和失效模式，建立起不同元器件、零部件和材料的失效物理模型和数学分析办法。同时随着检测手段的发展，各种无损检测仪器和失效分析手段也逐步完善，更使可靠性物理的分析研究内容更为丰富，从而也推动了可靠性学科更具生命力。

1.3.3 可靠性工程

可靠性工程是对产品及其零部件的失效现象和发生的概率进行分析、预测、试验、评估和进行控制的工程学科。它与概率论及数理统计、运筹学、系统工程、价值工程、人机工程、计算机技术、机械学、电子学、工程材料学、失效物理等学科密切相关。还应指出，可靠性工程不仅仅包含了工程技术，而且还包含了管理。这种管理包括设计、制造和使用过程中的管理，因此是一个全寿命的工程管理。其中有制订可靠性计划、组织可靠性设计的评审、进行可靠性认证、制订可靠性标准、确定可靠性指标和进行可靠性检测与测定等。

为了提高产品的可靠性，必须在生产的各个环节上来努力实现。这其中尤以设计最为重要。如果设计不合理，想通过事后的维修来达到预期的可靠性指标，几乎是不可能的。因此从事机械产品的研制和设计的人员就必须全面了解并掌握可靠性工程的理论与方法，要使所研制的产品有良好的可靠性指标，做到在设计时可以预计、在试验中可以检测、在制造时可以保证、在使用中能够保持和在整个寿命周期可以控制。同时使设计、试验、制造和使用过程形成一个有机的可靠性保证的技术管理体系，通过管理指导技术的合理使用，最终实现可靠性的目标。

2

可靠性指标和概率分布

2.1 可靠性指标

为了评价产品的可靠性，制定一些评定产品可靠性的数值指标是十分有必要的。可靠性指标是衡量可靠性的定量化尺度，也是描绘产品可靠性特性的参数。由于受到设计、生产、使用过程中各种随机因素的影响，最后形成的产品可靠性指标具有随机的特性。可靠性指标的真值是理论上的数值，实际上是未知的。根据样本观测值，经一定的统计分析可得到可靠性指标的真值的估计值，可以是点估计，也可以是区间估计。

常用的可靠性指标有：可靠度、失效率、平均寿命、寿命方差和寿命标准差、可靠寿命与中位寿命、特征寿命、有效寿命与更换寿命等寿命尺度、维修度、平均修理时间、修复率、有效度和重要度等。

有了统一的可靠性指标，就可以在设计产品时用数学方法来计算和预测其可靠性，在产品制造出来后用试验等方法来考核和评定其可靠性。

2.1.1 故障概率密度函数和故障分布函数

随机变量是一种取值不定的变量，用来表示随机现象发生的结果。例如抽样检查产品时出现的不合格数、产品发生故障或失效的时间等。它具有取值的随机性和取值的统计规律性，即取哪个值事先不能确定，但取某个值或在某个区间内取值的概率是确定的。

描述随机变量取值规律的函数称为分布，可用概率密度函数 $f(t)$ 和分布函数 $F(t)$ 来表示。在可靠性中，称失效或故障概率密度函数和失效或故障分布函数。

(1) 故障概率密度函数 $f(t)$

在处理统计数据时，一般概率可以用频率来解释，将观察数据按取值的顺序间隔分组，做出对应每一间隔的取值的频率数，画出直方图，观察随机变量取值的规律性。当分组间隔越来越密时，直方图将稳定趋近于某条曲线 $f(t)$ ，即概率密度函数。如图 2-1 所示，图 (a) 为某产品的寿命直方图，横坐标是寿命，纵坐标表示故障发生的台数，图 (b) 即当间隔越来越密时的失效或故障概率密度函数。

失效或故障概率密度函数反映出产品在单位时间间隔内发生失效或故障的比例或频率。若用 N 表示开始投用的产品数， Δt 表示单位时间间隔， Δr 为单位时间间隔内发生的故障

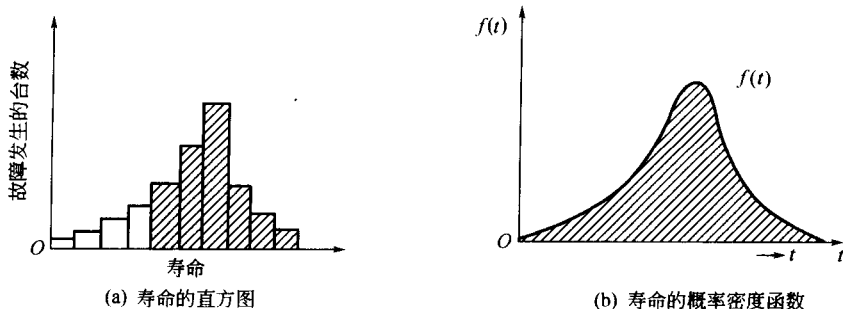


图 2-1 寿命的直方图和概率密度函数

数，则可用下式表示

$$f(t) = \frac{\Delta r / N}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{N \cdot \Delta t} \quad (2-1)$$

(2) 故障概率分布函数 $F(t)$

累积失效或故障概率分布函数是指产品在某个时间之前发生失效或故障的比例或频率。如图 2-2 (a) 所示，为某产品的累积故障台数直方图。失效或故障概率分布函数指随机变量小于等于某一规定数值 t 的函数，可用下式表示

$$F(t) = P(T \leq t) \quad 0 \leq t \leq \infty$$

它表示在规定条件下，产品的寿命（或无故障工作时间）不超过 t 的概率，也就是产品在 t 时刻之前发生故障或失效的概率，也称为不可靠度，以 $F(t)$ 表示。它相当于累积故障台数直方图间隔变细后的渐近线 [见图 2-2 (b)]，所以故障分布函数也称为累积故障概率密度函数，它和故障概率密度函数的关系为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2-2)$$

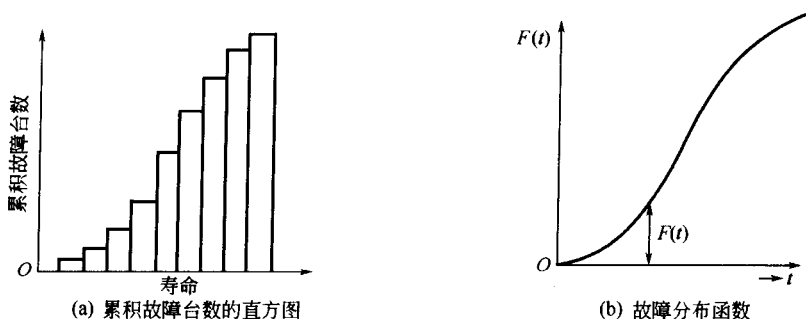


图 2-2 累积故障台数的直方图和故障分布函数

2.1.2 可靠度

可靠度 (Reliability) 的定义是产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率，常以 $R(t)$ 表示。就概率分布而言，它又叫可靠度分布函数，是累积分布函数，它表示在规定的使用条件下和规定的时间内，无故障地发挥规定功能而工作的产品占全部工作产品的百分率，可用下式表示

$$R(t) = P(T > t) \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (2-3)$$

用频率解释, 假如在 $t=0$ 时刻有 N 件产品投用, 到 t 时刻时, 有 $n(t)$ 件产品发生故障, $r(t)$ 件产品仍能继续工作, 则 t 时刻的可靠度函数值的估计值为

$$\hat{R}(t) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{r(t)}{N} \quad (2-4)$$

$R(t)$ 的取值范围为 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

显然, 可靠度 $R(t)$ 与故障概率分布函数即不可靠度 $F(t)$ 呈互补关系, 即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2-5)$$

值得一提的是, 可靠度与不可靠度均为时间的函数, 都是对一定时间而言的。若所指的时间不同, 则同一产品的可靠度也就不同。 $t=0$ 时, 产品都是正常的, 所以 $n(0) = 0$, $R(0) = 1$, $F(0) = 0$; 随着工作时间的不断增加, 产品的失效数不断增加, 可靠度则相应降低。当 t 趋于无穷时, 所有产品均发生故障, 所以 $n(\infty) = N$, $R(\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$ 。所以在 $[0, +\infty]$ 区间内, $R(t)$ 为递减函数, $F(t)$ 为递增函数, 如图 2-3 所示, $R(t)$ 、 $F(t)$ 的形状正好相反。

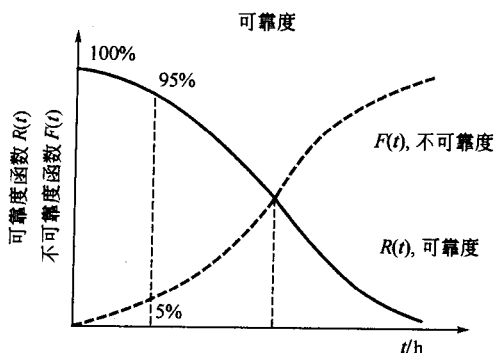


图 2-3 可靠度与不可靠度函数曲线

2.1.3 故障率

故障率 (Failure Rate) 又称为失效率, 其定义为工作到某时刻 t 时尚未发生故障 (失效) 的产品, 在该时刻 t 以后的下一个单位时间内发生故障 (失效) 的概率, 记为 $\lambda(t)$ 。失效率的观测值即为“在某时刻 t 以后的下一个单位时间内发生故障 (失效) 的产品数与工作到该时刻尚未发生故障 (失效) 的产品数之比”。用频率表示, 设在 $t=0$ 时有 N 件产品投用, 到时刻 t 有 $r(t)$ 件产品故障, 尚有 $N - r(t) = n(t)$ 产品继续工作, 然后在 t 之后的 Δt 时间内又有 Δr 个产品故障, 则 t 时刻的故障率估计公式为

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta r}{[N - r(t)] \cdot \Delta t} = \frac{\Delta r}{n(t) \cdot \Delta t} \quad (2-6)$$

故障率是产品可靠性常用的数量特征之一, 故障率愈高, 则可靠性愈低。故障率的单位多用每千小时百分之几, 即 $\%/10^3 h = 10^{-5}/h$ 表示。对于可靠度高、故障率低的产品, 则用 Fit (Failure Unit) $= 10^{-9}/h = 10^{-6}/10^3 h$ 为单位。有时不用时间的倒数而用与其相当的“动作次数”、“转数”、“距离”等的倒数更适宜些。

例 2-1 今有 100 个产品投入使用, 在 $t=100h$ 前有 2 个发生故障, 在 $100 \sim 105h$ 之间有 1 个发生故障, ①试计算这批产品工作满 $100h$ 时的失效率 $\lambda(100)$ 和概率密度函数 $f(100)$, ②若 $t=1000h$ 前有 51 个产品发生故障, 而在 $1000 \sim 1005h$ 内有 1 个故障, 试计算这批产品工作满 $1000h$ 时的失效率 $\lambda(1000)$ 和概率密度函数 $f(1000)$ 。

解 ①
$$\hat{\lambda}(100) = \frac{\Delta r}{[N - r(t)] \cdot \Delta t} = \frac{1}{(100 - 2) \times 5} = \frac{1}{490}$$