

清华大学汽车工程系列教材

汽车可靠性工程基础

Fundamentals of Automotive Reliability Engineering

王霄锋 编著

Wang Xiaofeng

清华大学出版社

Fundamentals of Automotive
Reliability Engineering

ISBN 978-7-302-14707-7



9 787302 147077 >

定价：55.00元

清华大学汽车工程系列教材

汽车可靠性工程基础

Fundamentals of Automotive Reliability Engineering

王霄锋 编著

Wang Xiaofeng

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

不断改进汽车产品的可靠性是汽车工业的一个重要发展方向。本书旨在比较系统地介绍各种可靠性分析、设计、试验、制造和管理方法及其理论基础,重点放在它们在工程实际中的应用上。主要内容包括:可靠性的基本概念及其统计学基础;汽车可靠性试验与可靠性数据处理方法;机械零件的静强度和疲劳强度可靠性设计方法;机械零件的随机疲劳寿命预计及其在汽车可靠性试验中的应用;电子系统的可靠性设计;系统可靠性分析方法与应用;产品维修性及其分析方法;保证产品可靠性的设计分析方法;在制造中采用的可靠性保证方法;复杂可靠性问题的解决方法;可靠性管理等。

为使读者易于理解、掌握概念和实际应用方法,本书引用大量可靠性工程的应用实例。本书既可以作为高等院校机械类高年级本科生和研究生的教材,又可以供从事机械和汽车设计、研究、试验、制造、质量、销售服务、维修使用等方面的技术人员学习掌握可靠性方法之用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

汽车可靠性工程基础/王霄锋编著. —北京:清华大学出版社, 2007. 6

(清华大学汽车工程系列教材)

ISBN 978-7-302-14707-7

I. 汽… II. 王… III. 汽车—可靠性理论—高等学校—教材 IV. U461.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021864 号

责任编辑:张秋玲 洪 英

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印张:36.25 字数:748 千字

版 次:2007 年 6 月第 1 版 印次:2007 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:55.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:009483-01

前言

汽车可靠性是用户最关心的汽车性能之一,也是汽车生产厂家的关键竞争力要素之一。随着我国汽车工业强调进行自主开发,汽车产品的可靠性以及保证可靠性的技术日益受到重视。作者具有和汽车工业的企业一起从事汽车耐久性和可靠性研究工作的经历,同时也从事本科生、研究生的汽车可靠性教学工作,特别是到企业为工程硕士班讲授汽车可靠性课程。通过这些工作,作者对汽车企业在进行可靠性工作中对可靠性理论和方法的需求有了一定的了解。在本书的策划和撰写中考虑了这些需求,同时也加进了作者在这个领域中的一些研究结果。鉴于可靠性工程理论与方法在电子、航空、航天等领域应用得比较早,有很多好的方法可以为汽车工业借鉴,所以在本书中也作了相应的介绍。

本书旨在介绍汽车可靠性工程的基本理论和方法,着重对其理论基础进行简明的介绍,以帮助读者能够更好地学习、理解和掌握汽车可靠性工程的基本理论和方法,特别是提高在实际工作中正确、有效地应用它们的能力。全书共分 19 章,内容包括:汽车的耐久性和可靠性;汽车耐久性试验技术介绍;可靠性工程中常用的理论分布;威布尔概率纸及其应用;极端值概率纸、正态概率纸和对数正态概率纸;应力-强度干涉;金属疲劳寿命预计——局部应力-应变法;系统可靠性;可维修系统;系统可靠性的马尔可夫分析方法;可靠性设计;可靠性设计和制造过程改进的关键工具——实验设计;可靠性制造;可靠性试验;汽车耐久性试验、分析方法与当量道路行驶里程的估计;汽车电子/电气部件的可靠性;实际使用数据的收集与分析;汽车产品开发可靠性工作大纲;可靠性管理。本书中包含比较多的实例,对读者更好地学习、理解和应用可靠性理论和方法将会有所帮助。

II 汽车可靠性工程基础

本书的读者对象是工科专业的本科生、研究生以及各个行业(特别是汽车行业)的设计、试验、制造、可靠性和质量工程师。希望本书可以帮助他们更好地学习、理解和掌握汽车可靠性工程的基本理论和方法,特别是提高在实际工作中正确、有效地应用它们的能力。

作 者

2007 年 4 月于清华园

目录

第 1 章 汽车的耐久性和可靠性	1
1.1 可靠性工程的发展概况	1
1.2 可靠性的定义	3
1.3 产品可靠性的度量	5
1.4 维修性的度量	14
1.5 可用性与可用度	18
1.6 提高产品可靠性的意义	19
1.7 可靠性工作的基本内容	19
第 2 章 汽车耐久性试验技术介绍	22
2.1 早期的汽车耐久性试验技术	22
2.2 道路试验	24
2.3 试验场耐久性试验	25
2.4 试验室耐久性试验	29
2.5 汽车可靠性试验数据的处理	44
第 3 章 可靠性工程中常用的理论分布	46
3.1 指数分布 $e(\lambda)$	46
3.2 正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$	47
3.3 对数正态分布 $LN(\mu, \sigma^2)$	48
3.4 威布尔分布 $W(b, \theta, t_0)$ 和 $W(b, \theta)$	50
3.5 极端值分布	55

IV 汽车可靠性工程基础

3.6	贝努利试验与二项分布	57
3.7	泊松分布	59
3.8	总体、样本	60
第4章	威布尔概率纸及其应用	61
4.1	威布尔概率纸	61
4.2	应用威布尔概率纸对完全子样失效数据的处理	64
4.3	应用威布尔概率纸对不完全子样失效数据的处理	77
4.4	混合分布	81
4.5	三参数威布尔分布的数据处理	83
4.6	分组-首件失效试验法	87
第5章	极端值概率纸、正态概率纸和对数正态概率纸	93
5.1	极端值概率纸	93
5.2	正态概率纸	97
5.3	对数正态概率纸	100
第6章	应力-强度干涉	102
6.1	应力-强度干涉理论	102
6.2	机械零件的静强度应力-强度干涉分析	105
6.3	机械零件的疲劳强度应力-强度干涉分析	116
6.4	提高可靠性的根本途径	143
第7章	金属疲劳寿命预计——局部应力-应变法	144
7.1	概述	144
7.2	局部应力-应变法的基本假设	145
7.3	材料的循环应力-应变曲线和滞回环曲线	146
7.4	材料的记忆特性与雨流计数法	148
7.5	局部应力-应变分析	150
7.6	材料的疲劳强度	153
7.7	各个滞回环的疲劳损伤、损伤累积和疲劳寿命计算	154

第 8 章 系统可靠性	156
8.1 可靠性逻辑框图	156
8.2 主动和待机并联系统	158
8.3 对冗余效果的影响因素	160
8.4 多冗余系统	165
8.5 冗余方案的选择	170
8.6 高水平冗余和低水平冗余	171
8.7 失效-安全和失效-危险	173
8.8 表决系统	175
8.9 交叉联接的系统设计	177
8.10 系统可靠性分配	179
 第 9 章 可维修系统	 182
9.1 引言	182
9.2 预防性维修	182
9.3 纠正性维修(失效后维修)	190
9.4 在失效原因已经查明的情况下进行的修理	193
9.5 在失效未查明的情况下进行的检查和修理	196
9.6 利用单元的可用度数据估计系统可用度	200
 第 10 章 系统可靠性的马尔可夫分析方法	 206
10.1 马尔可夫分析	206
10.2 待机并联系统的可靠性	213
10.3 多单元系统	226
10.4 可用度	231
 第 11 章 可靠性设计	 240
11.1 失效预防	240
11.2 设计分析方法	242
11.3 潜在失效模式及后果分析	242
11.4 故障树分析	252
11.5 在实施 FMEA 和 FTA 中应该注意的事项	268
11.6 参数变差和公差设计	268

11.7	零件、材料和过程	270
11.8	非材料性的失效模式	270
11.9	人员的可靠性与不可靠性	271
11.10	关键项目清单	271
11.11	设计评审的管理	272
第 12 章	可靠性设计和制造过程改进的关键工具——实验设计	274
12.1	实验设计的基本步骤	275
12.2	问题的提出——用实验的方法改进质量	276
12.3	一种低效率的实验设计方法	277
12.4	析因实验设计	278
12.5	部分析因实验设计	291
第 13 章	可靠性制造	306
13.1	控制图	308
13.2	人员变差的控制	325
13.3	过程潜在失效模式及后果分析	326
13.4	接受抽样检验	334
13.5	失效报告和分析	366
13.6	变差的作用	368
第 14 章	可靠性试验	369
14.1	引言	369
14.2	制订可靠性试验计划	370
14.3	改进可靠性的步骤和方法	375
14.4	截尾试验	384
14.5	加速寿命试验	387
14.6	C-秩定理和成功-运行定理	398
14.7	样本容量与试验时间之间的关系	404
14.8	贯序试验	409
14.9	可靠性比较	418
14.10	可靠性要求及抽样数量的确定	425

第 15 章	汽车耐久性试验、分析方法与当量道路行驶里程的估计	431
15.1	一种汽车前轴的室内道路模拟耐久性试验	431
15.2	前轴的等幅疲劳试验法	438
15.3	轮胎耦合整车模拟试验	441
15.4	极端值分析法在汽车道路载荷信号测量中的应用	450
15.5	有限元分析在汽车零部件耐久性改进中的应用	458
第 16 章	汽车电子/电气部件的可靠性	469
16.1	引言	469
16.2	电子元件的可靠性	471
16.3	电子系统的可靠性预测	475
16.4	基于指数分布的寿命试验及其数据处理方法	477
16.5	汽车上电子产品所承受的载荷	486
16.6	电子系统可靠性设计	495
16.7	在电子产品生产中的质量控制	499
第 17 章	实际使用数据的收集与分析	504
17.1	保修期内的数据收集	504
17.2	保修期后的数据收集	507
第 18 章	汽车产品开发可靠性工作大纲	508
18.1	引言	508
18.2	整车规划与计划阶段的可靠性工作大纲	508
18.3	整车系统设计阶段的可靠性工作大纲	512
18.4	详细设计阶段的可靠性工作大纲	516
18.5	产品试制阶段的可靠性工作大纲	517
18.6	生产及使用阶段的可靠性工作大纲	522
18.7	设计审查工作大纲	526
18.8	零件管理工作大纲	531
第 19 章	可靠性管理	541
19.1	企业的可靠性政策	541
19.2	综合的可靠性计划	541

19.3	可靠性和寿命周期成本	542
19.4	获得可靠性的成本	542
19.5	不可靠性的代价	543
19.6	产品责任	545
19.7	可靠性标准	545
19.8	详细说明可靠性	545
19.9	签订可靠性改进合同	547
19.10	可靠性组织机构	547
19.11	选择和培训可靠性人员	550
19.12	利用外部的可靠性技术服务	551
19.13	可靠性手册	551
19.14	项目可靠性计划	551
19.15	对生产质量控制的管理	552
19.16	全面质量保证	554
19.17	结论	555
附录 A 汽车可靠性工程基本理论分析用表		556
附表 A1	标准正态分布函数表	556
附表 A2	Γ 函数表	558
附表 A3	t 分布表	559
附表 A4	中位秩表	560
附表 A5	95%秩表	562
附表 A6	5%秩表	564
附表 A7	χ^2 分布表	566
附录 B 威布尔形状参数 b 的百分数 F_b		568
附图 B1	威布尔形状参数 b 的百分数 F_b ——90%置信区间	568
附图 B2	威布尔形状参数 b 的百分数 F_b ——50%置信区间	568
参考文献		569

的可利用度。就是在这样的背景下,美国国防部和电子工业在 1952 年联合建立了“电子设备可靠性咨询小组(AGREE)”。在 1957 年,这个小组发表了著名的名为“军用电子设备的可靠性”的报告,提出了在研制、制造过程中对产品进行可靠性试验、验证、鉴定的方法,以及对包装、储存、运输过程的可靠性要求。这个报告被认为是电子产品可靠性工作的奠基性文件,它确定了可靠性工程的基本研究方向。从此以后,可靠性的理论和方法研究得到普遍重视,迅速开展起来。并举行了各种可靠性学术会议,交流研究成果。可靠性工程开始成为一门独立的工程学科。

美国国防部发表了一些重要的可靠性标准,例如美国军事标准(MIL-STD)781“可靠性鉴定和生产认可试验(reliability qualification and production approval tests)”,它实际上是 AGREE 报告的试验部分。这个标准要求产品在足够高的环境应力水平(包括高、低温,振动,开-关等)下对产品进行可靠性试验,以便在足够早的阶段发现设计中的主要薄弱区域,在生产正式开始以前对其进行纠正。在 1965 年,美国国防部发表了 MIL-STD-785“系统和设备可靠性大纲(reliability programs for systems and equipments)”。这个文件强制性地要求把可靠性工程方法与在设计、开发和生产中传统的工程方法整合在一起。那时已经认识到,只有这样做才能确保在尽可能早的开发阶段,也是成本最低的阶段,找出并且消除潜在的可靠性问题。采用可靠性工程方法的一个成功范例是阿波罗 11 号宇宙飞船在月球上的成功登陆和返回(1969 年)。美国国家航空与宇航局(NASA)在总结这个计划的经验时说,可靠性工程技术是其三大技术成就之一。

从 1960 年开始,可靠性工程开始从电子工业迅速向其他工业部门推广。威布尔概率纸开始得到广泛应用。在 1962 年,当时的美国总统肯尼迪提出了消费者保护政策,给予消费者四项权利——①要求安全;②产品要交底;③产品要有选择性;④要听取用户意见。由此引发了消费主义的高潮。在消费主义思想的影响下,人们提出了大量的产品责任诉讼,要求产品制造者对消费者因产品缺陷而蒙受的损失进行赔偿。每年请求的赔偿金额高达几百亿美元。这些产品缺陷一般导致产品在使用不长时间以后发生失效,是典型的可靠性问题。这促使企业高度重视产品责任预防,而采用可靠性技术是实现产品责任预防的最重要手段之一。人们已经认识到产品的可靠性是产品质量的一个关键内容,是使用时间 $t > 0$ 时的一个质量指标,它集中反映了产品的设计、制造质量。

进入 20 世纪 70 年代,可靠性工作已经成为企业质量保证工作的一个重要环节。在此期间,日本的可靠性工作取得了很大的成就,日本产品(例如汽车、家电产品、照相机等)因可靠性高开始在竞争中处于有利地位。

在 20 世纪 60 年代,我国在航天、雷达、通信机、电子计算机的技术领域也提出了可靠性问题,开始开展可靠性工作。

在 20 世纪 70 年代,我国重点工程的需要(元器件的可靠性问题)和消费者对解决国产电视机质量问题的强烈要求,对国内有关行业开展可靠性研究起到了巨大推动作用。

我国有关方面经过10年的努力,使军用元器件的可靠性提高了两个数量级,保证了运载火箭、通信卫星的连续发射成功和海底通信电缆的长期正常运行。国家有关部门对电视机等产品提出了明确的可靠性、安全性的要求和指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了以可靠性为重点的全面质量管理。在5年的时间里,使电视机的平均故障间隔时间提高了一个数量级,配套元器件使用可靠性提高了一至二个数量级。为占领国内市场和打入国际市场作出了重要贡献。

尽管我国在可靠性工程方面已经作出很大努力,取得了不小的成就,但是与发达国家相比还有很大的差距。例如,我国的电子控制系统的可靠性水平就普遍比较低。我国生产的数控机床多采用进口的控制系统。我国自行研制的汽车电子控制系统的实用化也都遇到了可靠性问题。为改变这种局面,需要做很多工作。其中之一是要改变观念,即应该把产品的可靠性与产品的性能同等看待,这对于有效推动可靠性工程是很关键的。同时应该推动可靠性理论研究,把理论研究成果和可靠性工程技术有效地应用于工程实践之中。由于产品的可靠性与产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节都有密切关系,所以,为了保证产品具有足够高的可靠性就需要在上述各个环节中有效地应用可靠性技术。

1.2 可靠性的定义

汽车工业市场调研的结果表明,汽车用户都希望自己的汽车具有良好的性能和高可靠性。用户眼里的高可靠性一般包括如下内容:汽车经久耐用,不容易出故障,随时可以使用,维修费用低等。在保修期内,虽然顾客在维修车辆中负担的费用少,但他们还是不愿意接受由于汽车容易出故障而造成的无法正常使用的情况。

以上是用户眼里的可靠性内容。

目前世界上公认的可靠性定义是:产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力。

上述可靠性定义中包含有4个要素:

(1) 产品——汽车、汽车部件、汽车零件、通信设备、电冰箱、洗衣机、电视机、空调机、计算机等都是产品,它们是可靠性研究的对象。

(2) 规定的条件——指产品工作的条件,例如承受的机械载荷、电压、电流、工作温度、湿度、腐蚀、维修、保养、操作者的特性等。产品的工作条件对其可靠性影响很大,只有规定了产品的工作条件,才能进行可靠性分析和比较。

(3) 规定的时间——在可靠性工程中,“时间”泛指广义的时间,包括次数(产品承受一定载荷的次数,开关的开-闭次数)、距离(汽车行驶的里程数)、时间(汽车发动机在规定条件下工作的时数)等反映产品寿命的量。规定使用时间的长短,对可靠性是有影响的。

对同一批产品,规定的使用时间(寿命)越长,到寿命后发生故障的产品比例就越高,即可靠性越低。

(4) 规定的功能——在产品(汽车或其零部件、计算机、电冰箱、洗衣机、通信设备等)设计任务书、使用说明书、订货合同以及国家标准中规定的各种功能与性能要求。

产品不能实现规定的功能被定义为失效。所以,失效的定义与规定功能的定义直接相关。例如,如果把发动机能够运转定义为规定的功能,则发动机停止运转就是失效;如果把发动机能够提供一定转矩作为规定功能,则当发动机不能提供这样的转矩时就是失效,即使发动机能够运转也是失效。

一个产品为什么会失效呢?对于承受机械载荷的零件,当它们承受的载荷超过其承受能力时便发生失效。例如,一个拉杆,当它承受的应力超过材料的强度极限时便会断裂。对于电子元器件,当通过它们的电负荷超过其承受能力时也会失效。例如,一个晶体管,当流过它的电流超过其承受能力时会因过热而失效。在可靠性工程中,把施加给产品的负荷(力、应力、加速度、压力、电压、电流、温度、湿度等)通称为应力,把产品能够承受这些应力的极限能力通称为强度。所以可以说,当一个产品所承受的应力超过其强度时便会失效。在可靠性工程中,研究应力与强度的相互关系占有重要地位。

如图 1-1 所示,如果一个产品具有恒定的强度 r ,受到一个恒定的应力 s ,而且应力小于强度,即 $s < r$,则产品不会失效。

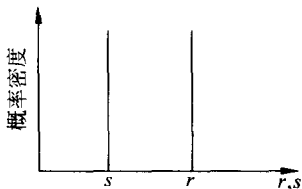


图 1-1 恒定应力和强度

如果考虑一批实际产品,它们中没有两件是完全一样的。所以,它们的强度 r 是个随机变量。例如,一种拉杆,其抗拉强度(承受拉力的极限能力)由其横截面积和材料强度所决定。由于在制造过程中不可避免地存在的变差(机器变差、人的变差、操作规程的差别、原材料的差别、环境的差别等),每个拉杆的横截面积和材料强度都与其他拉杆

不同,所以它们的强度也有差别。对一批产品的强度进行统计分析可以确定其分布规律,设其概率密度为 $f(r)$,强度的均值为 $\bar{r}$ 。在实际工作中,不同产品上承受的应力 s 也往往不同,是个随机变量,设其概率密度为 $g(s)$,应力的均值为 $\bar{s}$ 。把它们画在一起,得到图 1-2。在图 1-2(a)中,产品强度和应力的概率密度没有重叠,强度 r 总是大于应力 s ,所

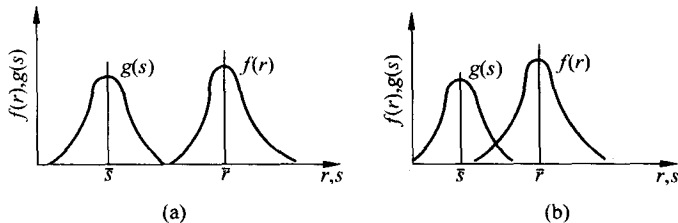


图 1-2 应力和强度的分布

以不会发生失效。在图 1-2(b)中,产品强度和应力的概率密度有重叠,虽然强度的均值 $\bar{r}$ 大于应力的均值 $\bar{s}$,但是有可能出现应力 s 大于强度 r 的情况,在这种情况下就会发生失效。这种现象称为应力-强度干涉。

应该指出,产品强度的分布规律并不总是不变的。例如,在产品承受疲劳载荷或腐蚀情况下,其强度的分布规律随着时间或载荷循环将发生变化。

由于产品特征(例如汽车零件的几何形状、尺寸、强度、……)、工作条件(载荷、温度、腐蚀、维修、保养、……)、时间(工作寿命、……)都是随机变量,所以可靠性分析是借助于统计学来进行的。可以说,可靠性工程属于统计技术范畴。

值得注意的是,可靠性分析、设计的基础是可靠性数据,也就是产品从开发、制造、使用直至失效全过程的有关产品特征(例如零件几何形状、尺寸、强度、……)、工作条件(载荷、温度、腐蚀、维修、保养、……)、时间(工作寿命、……)等的的数据,没有它们就无法进行可靠性分析和设计。所以,必须十分注意这些数据的搜集和保存。

由此可见,为保证产品具有足够高的可靠性,需要在产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节应用可靠性技术。

1.3 产品可靠性的度量

1.3.1 不可修产品与可修产品

在可靠性工程中,把产品分为可修产品和不可修产品两种类型。

不可修产品——在使用中发生失效,其寿命即告终结的产品。例如,汽车灯泡、皮带、板簧片、齿轮、油封、轴承,火箭发动机,人造卫星,电子微处理器等。它们或者没有修理价值或者修理以后也不能完全恢复功能。

可修产品——在使用中发生故障后,可以通过维修的方法恢复其功能的产品。一般较复杂、昂贵的产品设计为可维修的(飞机、飞机发动机、汽车、汽车发动机、计算机、电冰箱、洗衣机、电视机等),可以通过更换其中的个别零部件、重新调整等方法,恢复其原有功能。

有些产品在一些情况下是可修的,在另外一些情况下是不可修的。例如,导弹在储存过程中可以进行检测,发现故障可以修理,是可修的。而一旦发射,它就不可修了。

可修产品和不可修产品在可靠性评价上存在一定的差别。对于不可修产品,一般是通过对寿命数据的统计分析来评价其可靠性。这种方法原则上也适用于可修产品首次故障的评价。例如,汽车变速器一般是可修的,但在台架试验中,一般进行到发生首次故障即停止,对于其台架试验可以用不可修产品的评价方法进行可靠性评价。而对于可修产品,一般还用两次故障之间的间隔时间的随机变化情况,以及维修过程的统计量对其可

可靠性进行评价。

1.3.2 可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$

可靠度的定义：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。也就是说，可靠度是可靠性的一种概率量度。

例如，某种产品的可靠度为 95%，这意味着在一大批这种产品中，有 95% 的产品可以在规定的寿命（时间 t ）完成规定的功能，而有 5% 的产品则未达到规定的寿命就失效了。应该注意，可靠度是与规定的寿命 t 相关的，一般表为 $R(t)$ 。

从概率论的角度来说，若令 E 表示“产品在规定条件下和规定时间 t 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，即

$$R(t) = P(E) = P(\tau \geq t) \quad (0 \leq t < \infty) \quad (1-1)$$

所以，可靠度 $R(t)$ 也可理解为产品寿命 $\tau \geq t$ 的概率 $P(\tau \geq t)$ 。

若令 $\bar{E}$ 表示事件 E 的对立事件，则概率 $P(\bar{E})$ 表示“产品在规定条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率”，称为不可靠度、累积失效概率，或简称为失效概率，用 $F(t)$ 表示

$$F(t) = P(\bar{E}) = P(\tau < t) \quad (0 \leq t < \infty) \quad (1-2)$$

显然，可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$ 之间满足如下关系：

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

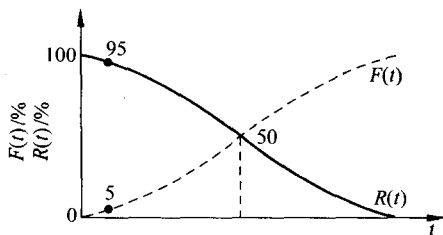


图 1-3 $R(t)$ 和 $F(t)$ 随工作时间 t 的变化情况

图 1-3 定性示出 $R(t)$ 和 $F(t)$ 随工作时间 t 的变化情况：在产品刚开始工作时 ($t=0$)，所有产品都是完好的， $R(0)=1$ ， $F(0)=0$ ；随着工作时间 t 的增加，产品的失效数也在增加，可靠度 $R(t)$ 相应降低，而不可靠度 $F(t)$ 相应增大；若产品一直使用下去，当 t 接近无穷大时， $R(\infty)=0$ ，而 $F(\infty)=1$ 。因此，在时间 t 的区间 $[0, \infty)$ 内 $R(t)$ 为非增函数，且 $0 \leq R(t) \leq 1$ ，

$0 \leq t < \infty$ ；而 $F(t)$ 为非减函数，且 $0 \leq F(t) \leq 1$ ， $0 \leq t < \infty$ 。

1.3.3 失效概率密度 $f(t)$

失效概率密度 $f(t)$ 就是产品寿命 t 这个随机变量的概率密度。在实际工作中，一般通过对一组可靠性数据进行分析来求出 $f(t)$ 以及 $R(t)$ 和 $F(t)$ 。

下面通过一个实例来说明分析过程。

表 1-1 示出总数 $N=100$ 个产品在 15 年内逐年失效的数据及相应的处理结果。