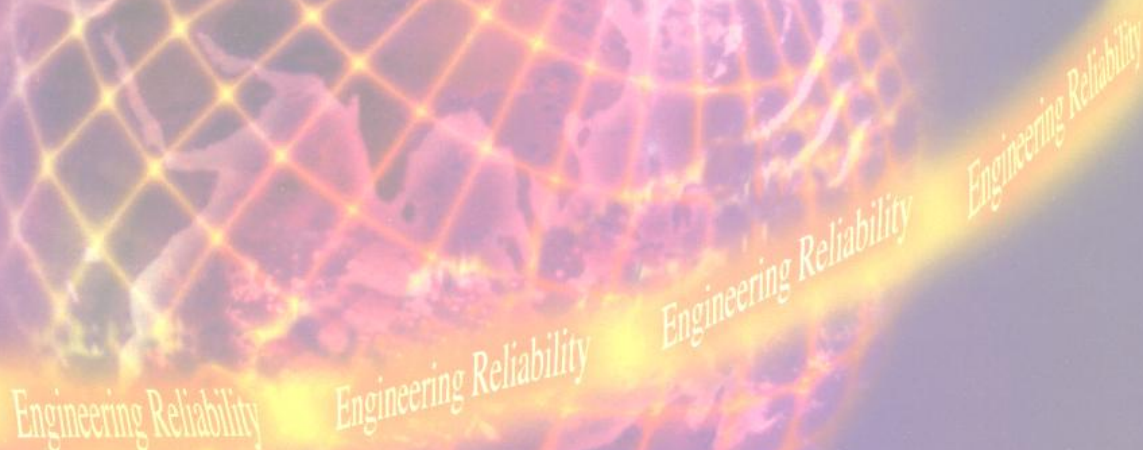


工程可靠性



Engineering Reliability

王少萍 编著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.cn.net>

工程可靠性

王少萍 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书重点讲述了可靠性在工程领域中有实际意义的可靠性设计、可靠性预计、可靠性分配、软件可靠性、可靠性试验、余度技术及容错技术等方法和应用,尤其融入了近几年来可靠性在工程研究的新成果,如动态故障树、软件 FMECA、FMECA 与 FTA 综合、加速寿命试验及系统重构等。

本书可作为高等院校本科生及研究生教学用书,也可作为从事可靠性工程技术人员的工具性参考书。

DW38/BS

图书在版编目(CIP)数据

工程可靠性/王少萍编著.北京:北京航空航天大学出版社,2000.4

ISBN 7-81012-967-8

I. 工... II. 王... III. 工程技术-可靠性理论

IV. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 12551 号

工 程 可 靠 性

王少萍 编著

责任编辑 林 红

责任校对 李保田

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号(100083)发行部电话:(010) 82317024

<http://www.buaapress.cn.net>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 22.5 字数: 573 千字

2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷 印数: 2000 册

ISBN 7-81012-967-8/TB·068 定价: 26.00 元

前 言

由于科学技术的迅猛发展，产品的功能越来越先进；结构越来越复杂；使用环境要求越来越严格，对产品的质量和可靠性要求也越来越高。无论是精密的军用系统还是信息密集型的民用系统均要求高或超高的可靠性。

本书注重工程实际应用，取材广泛，力求先进，同时又保留了基础理论的系统性和完整性，特别是将作者及其课题组成员近年来的部分科研成果编入到本书相关章节中。书中介绍的理论和方法都是工程可靠性领域中的基本方法，适合于从事各类可靠性工程研究人员参考。

工程可靠性是涉及范围极广的一门学科，它综合了高等数学、概率论与数理统计、布尔代数、计算机硬件和软件、测试与故障诊断、故障分类学、失效物理学、环境科学、系统工程学及自动控制原理等方面的内容。

本书的第 1 章和第 2 章分别讲述了可靠性的基本概念和典型系统的可靠性分析方法，是学习可靠性的基础知识。工程构成系统的基本单元是电子元器件和机械零件，所以元器件可靠性是系统可靠性的基础。本书第 3 章介绍了电子元器件和机械产品的可靠性设计准则和方法，从而采取综合措施以实现既定的可靠性指标。在产品的设计阶段，根据元器件的故障率数据和相关信息可以预计出系统的可靠性指标，所以在本书的第 4 章和第 5 章中，介绍了网络分析法、马尔可夫状态转移链法及故障树法等常用的可靠性预计方法，同时纳入了动态故障树、FMECA 和 FTA 综合等先进的理论和方法。随着软件在复杂计算机控制系统的地位日益重要，由此引发的“软件危机”得到广泛的重视，因此软件可靠性的研究迫在眉睫。本书第 6 章介绍了软件可靠性模型、可靠性预计、可靠性测试等方面的内容。一个系统的可靠性实际所达到的水平必须由实际使用或可靠性试验来验证，本书第 7 章对可靠性试验及参数评估方法作了详尽的阐述，并编入了变载荷谱寿命试验评估的新技术。随着飞机飞行控制系统、银行信息处理系统、核电站控制系统及空中交通管理系统等的广泛应用，系统高可靠性和超高可靠性的要求使冗余技术和容错技术越来越受到科技工作者的重视，本书第 8 章和第 9 章介绍了目前常用的冗余技术和容错技术及其应用，并融入了这方面的最新研究成果。

应当说明的是，可靠性理论的一些新的进展往往不够成熟，正处于蓬勃发展的阶段。由于可靠性研究是一个工程实践性很强的领域，本书始终贯穿工程应用，并结合了工程可靠性分析的新理论和新方法。

本书部分插图和资料整理由本人研究生何建军、孔德良、陶建峰和陈平等协助完成。

本书的主要对象是研究生和本科生，也可供科研人员、高等院校教师和工程技术人员参考。限于水平，书中难免有缺点错误，热诚希望广大读者批评指正。

编著者

2000 年 1 月

目 录

第1章 可靠性的基本概念

1.1 概 述	1
1.2 工程可靠性的发展	3
1.3 可靠性的主要度量指标	4
1.4 常用的统计分布	13

第2章 典型不可修系统可靠性模型

2.1 可靠性框图	20
2.2 串联系统可靠性模型	21
2.3 并联系统可靠性模型	23
2.4 串-并联可靠性模型和并-串联可靠性模型	24
2.5 表决系统可靠性模型	25
2.6 贮备系统可靠性模型	27
2.7 系统可靠性分配	33

第3章 可靠性设计

3.1 概 述	40
3.2 电子产品的容差分析	41
3.3 电磁兼容设计	43
3.4 热设计	45
3.5 机械设计中的干涉理论	48

第4章 复杂系统可靠性预计

4.1 网络系统的可靠性分析	75
4.2 可修系统和马尔可夫过程	88

第5章 故障树分析方法和故障模式影响分析方法

5.1 故障树分析法(FTA)	102
5.2 故障模式影响分析方法(FMEA)及故障模式影响与致命性分析法(FMECA)	132
5.3 FMECA 与 FIA 的综合分析方法	143

第6章 软件可靠性

6.1 软件可靠性的基本概念	148
6.2 软件可靠性技术及其应用	152
6.3 软件可靠性预计与评估	163

6.4 软件的验证与确认 (V&V).....	177
第 7 章 系统可靠性试验	
7.1 可靠性试验的基本概念.....	185
7.2 环境应力筛选试验.....	189
7.3 可靠性测定试验的参数估计.....	193
7.4 可靠性增长试验.....	223
7.5 可靠性验证试验.....	229
7.6 加速寿命试验.....	237
第 8 章 余度技术及其应用	
8.1 余度技术概述.....	249
8.2 余度系统的设计.....	254
8.3 监控技术.....	272
8.4 故障隔离与切换.....	286
第 9 章 容错技术及其应用	
9.1 容错技术概述.....	293
9.2 数字系统的容错技术.....	296
9.3 故障检测与诊断.....	304
9.4 决策过程.....	315
9.5 容错控制系统采用的新技术.....	321
9.6 容错控制系统实例.....	333
附表一 标准正态分布表.....	341
附表二 χ^2 分布的上侧分位数 $\chi^2_{\alpha}(k)$ 表.....	342
附表三 D_n 的极限分布表.....	343
附表四 检验的临界值 $D_{n,\alpha}$ 表.....	344
附表五 最佳线性无偏估计系数表.....	345
附表六 简单线性无偏估计表.....	347
参考文献.....	350

第 1 章 可靠性的基本概念

1.1 概 述

1.1.1 质量与可靠性

质量与可靠性，在许多场合中被当作同义词来使用，然而它们之间是有区别的。无论是部件、整机还是由若干设备组成的系统，其质量一般是指它们在出厂时能否满足规范上的各项性能要求；而其可靠性则是指在满足规范要求的性能下，能维持多长时间，两者的本质区别在于使用寿命的着眼点。从产品的设计一开始，设法使系统在规定的使用条件下，在规定的使用时间内，完成规定任务是产品可靠性设计的重要任务。

当人们的设计思想从单纯考虑传统意义上的性能转变为求得高效能的同时，关于质量的观念也在变革，由过去狭隘的质量观念转向现代的全面的质量观念。现代的质量观念认为：产品质量是产品满足使用要求的特性综合，即具有适用性。性能、可靠性、维修性、安全性、适应性、经济性及时间性都是产品质量的基本目标，如图 1.1 所示。性能、可靠性、维修性、安全性和适应性是产品的内在质量特性。经济性是指产品应具有合理的寿命周期费用；时间性是指应在一定时间内满足用户对产品交货期和数量的要求，这两个质量特性均反映了产品的竞争能力，称之为外延质量特性。产品的质量优劣取决于以上七个基本目标的综合评价结果，前两项尤为重要。由此可见，可靠性是产品基本质量的目标之一，是产品质量的重要组成部分。但是长期以来人们往往忽视了可靠性对保证产品全面质量的重要作用。例如，1978 年我国首次自行研制成功了黑白电视机，

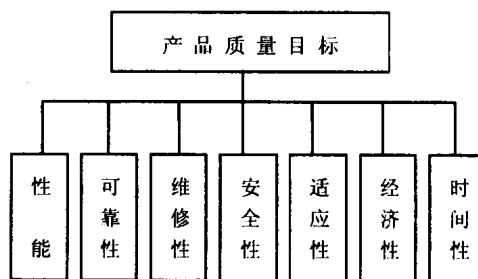


图 1.1 产品质量基本目标

但出厂不久就出现了打火、冒烟、无光、无声及其它故障现象。为什么会出现这样的现象呢？因为我国首次生产的黑白电视机的质量指标虽然包括黑白对比度、音量、音色等性能指标，却没有列入最主要的可靠性指标——环境适应性和平均寿命。为了弄清当时国产电视机的可靠性，进行了国产电视机的可靠性试验。试验结果表明：国产电视机平均寿命不到 500 h，出厂一年内的平均返修率达 86.92%，其中第一个月的早期故障返修率为 20.8%，甚至经受不了运输振动，从电视机厂运到商店后，开箱不合格率达 23.6%。有些产品即使有很好的性能，如果温度一高就不能正常工作，或工作几十个小时后，产品就出现这样或那样的故障，那么再好的性能又有什么用呢？由此可以看出产品的可靠性在产品质量中是至关重要的，为

了强调“适应性”，必须把“可靠性”从“质量”中分离出来加以强调。

1.1.2 可靠性的基本概念

产品的可靠性(Reliability)定义为：产品在规定的使用条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。

这里的产品是指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备和系统，可以表示为产品的总体或样品。由定义可以看出产品的可靠性与“规定条件”是分不开的，这里说的规定条件，包括使用时的环境条件（Environment Conditions）即所有内部与外部的条件（如温度、湿度、辐射、电场、冲击、振动等或其组合）。使用时的应力条件、维护方法；贮存时的贮存条件以及使用时对操作人员技术等级的要求，在不同的规定条件下产品的可靠性是不同的。

产品的可靠性与规定的时间密切相关，因为随着时间的增长，产品的可靠性是下降的。因此在不同的规定时间内，产品的可靠性是不同的。不同的产品对应的时间指标不同。例如，火箭发射装置可靠性对应的时间以秒计，海底通讯电缆则以年计，而且这里的时间应看作具有广义含义，即规定的时间可以用秒、分、年、次数及周期等来计算。

产品的可靠性还与规定的功能有密切关系。这里所指的规定功能就是产品应具备的技术指标。一般事先一定要明确规定的功能，只有对规定的功能有了清晰的概念，才能对产品是否发生故障有确切的判断。

上述传统的可靠性定义强调的是完成规定功能（完成任务）的能力。然而，在进行可靠性设计时需要综合权衡完成规定功能和减少用户费用两个方面。例如，为了达到产品高或超高可靠性要求，可靠性设计中常采用余度技术来提高整个系统完成任务的概率。但是，余度技术的采用将使系统复杂化，增加系统故障发生的概率，从而导致增加维修（包括人力和备件等）及后勤保障的需要（即增加了用户的费用），因而就提出了基本可靠性和任务可靠性。

基本可靠性即产品在规定的条件下无故障的持续时间或概率，它反映了产品对维修人力和后勤保障的要求。基本可靠性与规定的条件有关，即与产品所处的环境条件、应力条件、寿命周期有关，也就是与“寿命剖面”确定的条件有关。

任务可靠性是产品在规定的任务剖面 and 时间内，完成规定功能的能力。

产品的可靠性还可以有固有可靠性和使用可靠性之分。固有可靠性是指产品从设计到制造整个过程中所确定的内在可靠性，它是产品的固有属性。使用可靠性则与产品的使用、维修相关，使用维护方法和程序以及操作人员的技术熟练程度等都会对产品的寿命及功能的实现产生重大影响。

1.1.3 工程可靠性的基本概念

可靠性是一门边缘学科，它是由故障分类学、统计学、失效物理学、环境科学和系统工程等学科的综合而发展起来的新兴学科。从学科的性质来看，可靠性是系统工程的分支，是研究设备和系统在设计、研制、生产和使用各阶段进行可靠性定性和定量的分析、控制、

评估、增长的理论和方法，是实现设备和系统可靠性指标与经济平衡的技术。

可靠性是从工程实践中发展起来的。专家们在分析设备故障的基础上创造了可靠性理论，进而创立了可靠性学科。按照理论与工程相结合的辩证关系，要发挥可靠性理论和方法的作用，可靠性必须与工程相结合，正是由于可靠性理论与工程实际的结合才产生了可靠性技术。当然，可靠性本身又是一门独立的学科，有其自身发展的规律。

现代复杂系统是一个综合的系统工程，包括硬件、软件、操作的人和所处的环境等要素。构成系统的设备越复杂，系统规模越大，系统所处的环境越多样，发生系统故障的可能性也就越大，对操作维护人员的要求也就越高，设计制造的难度自然越大，可靠性的问题必然越多，对可靠性技术的要求也就越迫切。由此可见，可靠性与系统工程的关系是相辅相承的，离开了工程，可靠性就没有存在的必要；离开了可靠性，就无法实现系统工程。

工程可靠性（Engineering Reliability）的定义：从产品设计、研制、生产的实际需要出发，按照可靠性理论和方法开展工程管理、工程设计、阶段评审、试验鉴定和综合评价等可靠性活动，从而用最少的资源使产品达到合同指标的要求，实现降低产品成本、减少维修费用、提高产品竞争能力的目标。

工程可靠性的理论基础是系统科学和质量可靠性，其方法是工程化的可靠性技术，其作用时间是产品从论证开始到使用的整个寿命期，包括产品设计、研制、生产、使用等过程，其目标是综合平衡产品可靠性水平和投入的资源，以达到最佳的经济效益。

1.1.4 故障的基本概念

产品丧失规定的功能称为“故障”（Failure），对于不可修复的产品也称“失效”，但在习惯上，二者没有严格的区别。这里的规定功能是指产品应具备的技术性能。

一切可靠性活动都是围绕故障展开的，都是为了防止、消除和控制故障的发生。一切可靠性投资都是为了提高产品可靠性，降低可靠性风险。所以，对在设计、研制、试验和使用过程中出现的故障，一定要抓住不放，充分利用故障信息去分析、评价和改进产品的可靠性。

基本可靠性和任务可靠性均涉及到故障概念。在确定基本可靠性量值时，应统计产品所有会引起维修工作的故障。当产品发生这样的故障时，不一定会影响产品完成任务。然而，在度量任务可靠性时，仅考虑那些在任务期间影响完成任务的故障，这些故障称为“危及任务成功的”故障或称为致命故障。

研究可靠性必须首先确定故障定义。常有这样的情况：对于这个用户来说，产品已出故障；但对另一个用户来说产品未出故障。例如，某些电子产品作为军品来说是不合格的，但作为民品来说却是合格的。可见故障定量要求的不同，将造成可靠性定量要求的不同，因此，在建立可靠性定量要求之前必须先确定故障定义。

1.2 工程可靠性的发展

早在 20 世纪三四十年代，德国人在研制 V-2 火箭的过程中，就提到了“可靠性”这一名词。但是，由于战争的失败，可靠性没有在德国被深入研究，也没有被科学地定义。到了

50 年代, 美国侵朝战争爆发, 美国的武器装备从太平洋东岸运输到西岸, 交付部队作战使用时, 故障频繁发生, 使用率很低。为了维修这些装备耗费了巨大的资金, 特别是电子装备, 将近有一半不能使用。装备的故障随时困扰着随军工程师, 维修技师天天忙于排除装备故障。这些故障并非是在作战中受损所致, 而是在装备经过运输后开箱检测就发现了的。于是军方把这些故障归咎于产品承包制造商, 而制造商则以出厂检验合格, 有军方代表验收为理由推辞。为此, 军方和承制方发生了激烈的争吵。为了解决这个矛盾, 弄清问题之所在, 美国国防部组织了专门小组(美国国防部电子设备可靠性咨询小组 AGREE)研究武器装备的故障问题, 试图搞清故障发生的原因、机理以及故障与环境条件的相关性。研究工作进行了多年, 应用了故障分类技术、统计学、物理学、环境科学和失效分析技术, 终于获得了突破性进展, 取得了重要的成果。

首先, 电子元器件具有故障率, 故障率与制造元器件的材料、工艺有关, 也与其工作环境有关。其次, 武器装备的故障规律与元器件的故障率相似, 可以在装备的设计制造过程中探求。这就是后来电子设备寿命分布定量模型的起点和可靠性理论的基础。1957 年该小组 (AGREE)在研究报告中对可靠性下了定义, 于是可靠性学科诞生了。1957 年 AGREE 在报告中提出了世界上第一批可靠性定义, 但小组内部没有统一。例如, AGREE 1 组的定义是: 在整个规定的工作期间无故障的概率; AGREE 3 组的定义是: 在给定的条件下和规定的时间内无故障完成规定功能的概率; AGREE 8 组的定义是: 设备满足规定的使用要求和试验程序的概率, 或设备在储存检查或使用时刻完成其功能的概率。

1962 年美国颁布的世界上第一批可靠性标准之一 MIL-STD-721A 对故障的定义是: 装备没有能力完成其预定范围内要求的功能。可靠性的定义用可靠度来阐述: 装备在规定的期间内完成预定功能的概率。此外还对任务可靠度进行定义: 已知装备在任务开始时处于合适工作状态, 以一定的方式使用并有预定目的的装备在任务期间完成规定特性的概率。

1966 年可靠性学科在美国处于大力推广应用如日中天的时期, 国防部及时修改了可靠性标准。在 MIL-STD-721B 中对故障的定义是: 在规定的条件下, 产品丧失规定的功能。对可靠性的定义是: 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。标准定义的故障和可靠性是相互对应的。

1980 年, 美国国防部在 DODD5000.40 的指令中对故障的定义是: 故障是一事件, 即产品的任何部分不能按其特性规范要求进行工作。对可靠度的定义是: 在规定的条件下无故障的持续时间或概率。

1.3 可靠性的主要度量指标

1.3.1 可靠性量化的必要性

前面所说的可靠性定义只是一般的定性定义, 并没有任何定量的表示。事实上, 当给出可靠性的定量表示后, 就有可能对各种产品的可靠性提出明确而统一的要求。根据这种统一的可靠性要求, 我们就可以在设计 and 生产阶段, 利用各种方法计算、预计和分配它们的可

靠性；在产品生产出来以后，就可以按一定的试验方法鉴定它们的可靠性。显然，如果只能给可靠性定性的说明，要做到这些是根本不可能的。

可靠性的定量表示有其自己的特点。首先它很难只用一个量来代表，即在不同的场合和不同的情况下可以用不同的指标来表示产品的可靠性。如产品从开始使用到某时刻 t 这段时间，维持规定功能的能力就可用可靠度的指标来度量，该指标越大就表示在 t 段时间内完成规定功能的能力越大即产品越可靠。因此，可靠度作为表示产品可靠性的一个定量指标。但是并非任何场合使用这一指标都方便，对于元器件来说，往往用寿命这个指标更直观，即产品从开始使用到丧失规定功能这段时间的长短；而一个可修复的产品，则关心它两次故障间工作时间有多长。有时人们还需要了解产品在某个瞬间故障的概率是多少，当然还可以列举其它一些表示方法，所有这些都是产品可靠性的指标，都必须给予定量表示。

可靠性的定量表示的另一个特点是它的随机性。虽然对于一个特定的产品来说，在某个规定时刻只能处于故障或正常这两种状态，不存在任何其它的中间状态，但是具体产品到丧失功能的寿命却是随机的，因此，衡量产品在规定时间是否故障也具有随机性。由概率论可知，描述在一定条件下可能发生也可能不发生的事件称为随机事件。“一个产品在规定的时间内不故障”就是一个随机事件，随机事件的发生与否是带有随机性的，因此，在讨论可靠性的定量特征时，就必须用到概率论和数理统计的方法。

1.3.2 不可修系统中可靠性的基本函数

由于可靠性是对一定的时间而言的，可靠性中的许多指标实际上是时间的函数，所以为了表征产品的可靠性，需要引入一些可靠性的基本函数，如可靠度函数、累积故障分布函数、故障分布函数以及故障率函数等。

1. 可靠度函数 $R(t)$

可靠度函数的定义为：产品在规定的使用条件下，在规定的时间内，完成规定功能的概率。或定义为：产品工作到某一时刻之前不发生故障的概率，它是时间的函数，故用 $R(t)$ 表示。根据定义，可靠度函数可由下式表示：

$$R(t) = \begin{cases} P(T > t) & (t \geq 0) \\ 1 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 T 是产品的寿命，是一个随机变量，指产品从开始工作直到发生故障的时间； t 为规定的时间。当随机变量 T 的故障分布函数 $f(t)$ 已知时，由下式可计算出预先给定 t 值下的可靠度：

$$R(t) = \begin{cases} \int_t^{\infty} f(t) dt & (t \geq 0) \\ 1 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.2)$$

称 $f(t)$ 为“故障概率密度函数”或“故障分布函数”。

当 T 的概率分布未知时，在可靠性试验中如有 n 个样本被试，其中有 $r(t)$ 个在 t 时刻以前故障， $N(t) = n - r(t)$ 个样本在继续工作，则 t 时刻的可靠度为：

$$R(t) = \frac{N(t)}{n} = \frac{n - r(t)}{n} \quad (1.3)$$

式中 $N(t)$ 称为未故障（或残存）样本数，因此，可靠度有时又称为“残存概率”。

可靠度 $R(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图 1.2 所示。显然，任何产品的可靠度都是随着时间的增长而逐渐下降的。

2. 累积故障分布函数 $F(t)$

累积故障分布函数又称累积故障概率或不可靠度。定义为：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完不成规定功能的概率，用 $F(t)$ 表示：

$$F(t) = \begin{cases} P(0 < T \leq t) & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.4)$$

当产品寿命 T 的故障分布函数已知时， $F(t)$ 可由下式表示：

$$F(t) = \begin{cases} \int_0^t f(t) dt & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.5)$$

如果 $F(t)$ 是可微的，则

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (t \geq 0) \quad (1.6)$$

当产品寿命 T 的故障分布函数未知时，在可靠性试验中，如有 n 个样本被试，其中有 $r(t)$ 个在 t 时刻以前故障，则在 t 时刻的 $F(t)$ 为：

$$F(t) = \frac{r(t)}{n} \quad (1.7)$$

由(1.2)式和(1.5)式可推出：

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.8)$$

累积故障分布函数 $F(t)$ 与时间 t 的关系如图 1.3 所示。显然，任何产品的累积故障分布函数都是随着时间的增长而逐渐增大的。

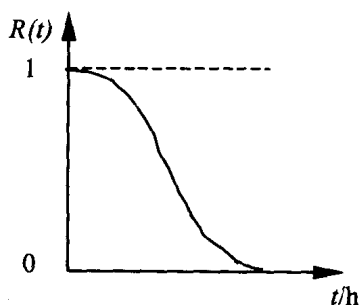


图 1.2 可靠度函数曲线

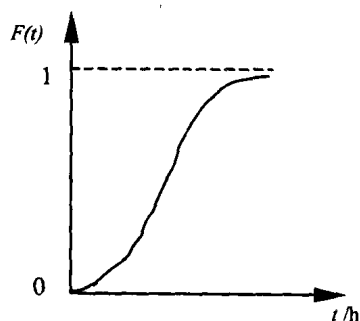


图 1.3 累积故障分布函数曲线

3. 故障概率密度函数 $f(t)$

$f(t)$ 的定义为：在某时刻的时间段 Δt 内，单位时间的故障概率称为故障概率密度函数，记为 $f(t)$ 。当产品寿命 T 的概率分布已知时，则

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (t \geq 0) \quad (1.9)$$

当产品寿命 T 的概率分布未知时，在可靠性试验中，在 $(t, t+\Delta t)$ 时间段内有 Δr 个样本故障，则此时的 $f(t)$ 为：

$$f(t) = \frac{\Delta r}{n\Delta t} \quad (1.10)$$

如果我们对 n 个试件做可靠性试验，取一定 Δt 间隔，由式(1.10)可以画出故障频数与时间关系的直方图，如图 1.4 所示。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，则故障频数的直方图趋近于连续分布曲线，这就是故障概率密度函数的分布曲线，如图 1.4 中的虚线表示。

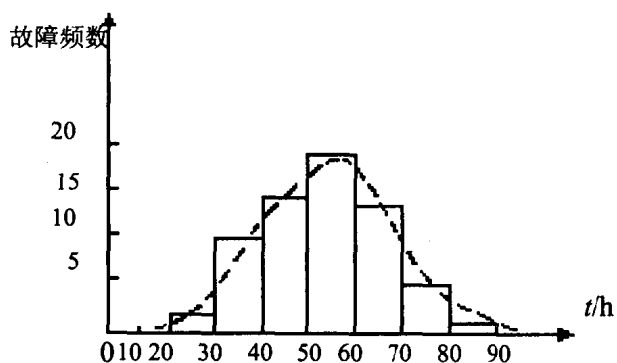


图 1.4 故障概率密度分布曲线

4. 故障率函数（或称失效率函数） $\lambda(t)$

$\lambda(t)$ 定义为：产品工作到 t 时刻正常的条件下，它在 $(t, t+\Delta t)$ 时间间隔内故障的概率。当产品寿命 T 的概率分布已知时，则

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t / T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\{F(t + \Delta t) - F(t)\} / \Delta t}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.11)$$

当产品寿命 T 的概率分布未知时，在可靠性试验中，在 t 时刻尚有 $n - r(t)$ 个样本完好，在 $(t, t+\Delta t)$ 时间间隔内有 Δr 个样本故障，则有

$$\lambda(t) = \frac{\Delta r}{(n - r)\Delta t} \quad (1.12)$$

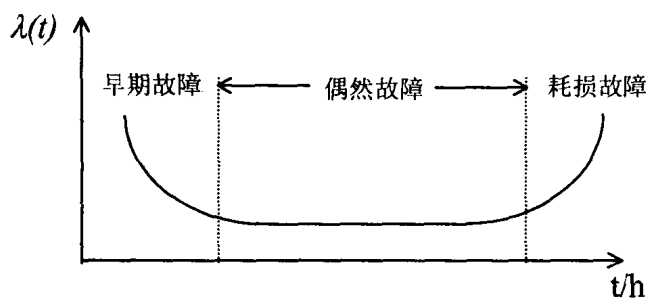


图 1.5 故障率的浴盆曲线

图 1.5 给出了不可修复产品典型的故障率曲线，俗称浴盆曲线。曲线的前段由于产品中含有不合格的元器件或产品中存在着不完善的地方，因而很容易发生故障，我们称之为早期故障期，在早期故障期内故障率呈下降趋势。曲线的第二段，产品趋向于稳定，故障率大致不变，产品故障往往是偶然发生的，称之为偶然故障期。曲线的第三段，产品进入耗损期，产品由于元器件老化而进入寿命的终了期，称为耗损故障期，故障率逐渐增高。

5. 平均寿命 θ

平均寿命是指一组试件无故障工作时间的算术平均值。对不可修复产品来说，是指平均无故障工作时间 $MTTF$ (Mean Time To Failure)；对可修复产品来说是指平均无故障间隔时间 $MTBF$ (Mean Time Between Failure)。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1.13)$$

式中， t_i 为母体中每个产品发生故障前的工作时间； n 为母体中总产品数。

对不可修复产品来说， $MTTF$ 是故障前工作时间的期望值：

$$MTTF = \int_0^{\infty} f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (1.14)$$

对可修复产品而言， $MTBF$ 由下式可得：

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1.15)$$

式中， t_i 为可修复产品故障间隔时间； n 为可修产品修复次数。

当故障率为恒定值，并满足故障后可修理或可更换，则 $MTBF$ 为：

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1.16)$$

以上分析了描述可靠性的几个主要特征量及其相互关系。要确定一个产品的可靠性，就是要得出产品的上述可靠性指标。图 1.6 给出了不可修系统可靠性特征量之间的相互关系。

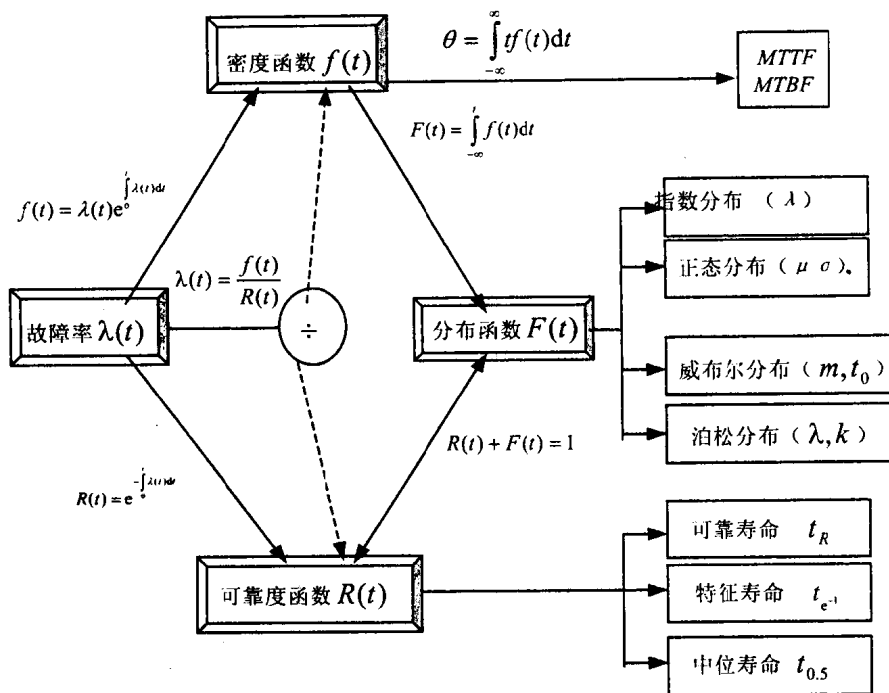


图 1.6 可靠性特征量的内在联系

例 1.1 已知某产品可靠性的表达式为 $R(t) = e^{-\lambda t}$ ，当 $\lambda = 5 \times 10^{-4} / \text{h}$ ，求 $t=100 \text{ h}$ 、 $t=1000 \text{ h}$ 、 $t=2000 \text{ h}$ 内的可靠度，并求产品的 $MTTF$ 。

解： 当 $t=100 \text{ h}$ ， $R(t=100) = e^{-\lambda t} = e^{-5 \times 10^{-4} \times 100 \text{ h}} = 0.95$

当 $t=1000 \text{ h}$ ， $R(t=1000) = e^{-\lambda t} = e^{-5 \times 10^{-4} \times 1000 \text{ h}} = 0.6$

当 $t=2000 \text{ h}$ ， $R(t=2000) = e^{-\lambda t} = e^{-5 \times 10^{-4} \times 2000 \text{ h}} = 0.368$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{5 \times 10^{-4} / \text{h}} = 2000 \text{ h}$$

1.3.3 可修系统的可靠性特征量

在工程实践中，为了使产品经常保持正常工作状态，需要进行维修保养，更换故障或磨损的部件，发生故障的产品经维修后可以恢复正常工作。可见维修系统总是正常与故障交替出现，它整个寿命周期包括修复-故障-修复的全过程，如图 1.7 所示。

根据可维修系统的特点，整个寿命周期包括两部分：第一部分是修复-故障过程，即从维修好一直工作到再发生故障为止的时间，记为 X ；第二部分是故障-维修过程，即从发生故障一直到维修好为止的时间，记为 Y 。

下面按照寿命周期的两个不同阶段分别讨论其可靠性特征量，然后再考虑整个寿命周期的可靠性特征量。

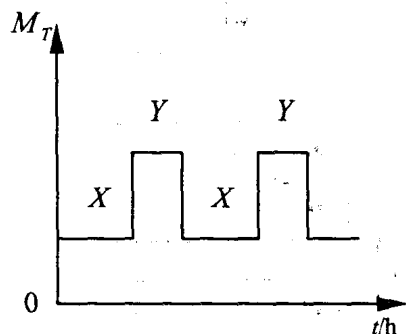


图 1.7 可修系统的寿命过程

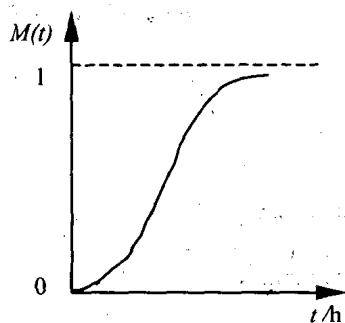


图 1.8 维修度函数曲线

一、修复-故障过程的可靠性特征量

这个过程的可靠性特征量和不可修系统的可靠性特征量完全一致，有 $R(t), F(t), f(t), \lambda(t)$ 以及这一过程的平均寿命 $MTBF$ （对于不可修系统为 $MTTF$ ）。前面已作了详细介绍，在此不再赘述。

二、故障-维修过程的可靠性特征量

1. 维修度 $M(t)$

通常在工程设计中，作为一种工作性的陈述，把维修性视为一种设计系统的固有特性，这种固有的系统特性决定了把系统维持或恢复到给定使用状态所需的维修工作量。更确切地讲，维修性就是产品在预定的维修级别上，由具有规定的技术水平的人员，利用规定的程序和资源进行维修时，保持或恢复到规定功能的能力。

从维修性的定义可以看出，维修性除了与系统的设计有关外，还受维修人员的技术水平、维修程序、维修设施以及维修时所处的环境等因素影响。

和可靠性一样，维修性的特征量也是概率参数，其量化的度量指标是维修度。维修度是表征可修系统维修难易的程度。它的定义为：可维修产品在规定的条件下，在规定的时间内保持或恢复到规定功能的概率。

维修度 $M(t)$ 是维修时间 Y 的分布函数：

$$M(t) = \begin{cases} P(0 < Y \leq t) & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.17)$$

当维修时间 Y 的维修密度函数 $m(t)$ 已知时， $M(t)$ 可由下式表示：

$$M(t) = \begin{cases} \int_0^t m(t) dt & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.18)$$

如果 $M(t)$ 是可微的, 则

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} \quad (t \geq 0) \quad (1.19)$$

所以, 维修密度函数 $m(t)$ 是在 Δt 时间内完成维修的概率。维修密度与维修概率的分布形式有关, 随着分布的不同而不同。

2. 维修率 $\mu(t)$

$\mu(t)$ 定义为: 产品在 t 时刻产品还没有修复的情况下, 它在 $(t, t+\Delta t)$ 时间间隔内完成维修的条件概率。其表达式如下:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < Y \leq t + \Delta t / Y > t)}{\Delta t} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (1.20)$$

3. 平均维修时间 $MTTR$

平均维修时间 $MTTR$ (Mean Time To Repair) 是维修时间 Y 的数学期望。其表达式为:

$$MTTR = E(Y) = \int_0^{\infty} t m(t) dt \quad (1.21)$$

三、修复-故障-修复过程的可靠性特征量

可修系统的全寿命周期是由修复到故障过程和故障到修复过程不断交替而形成的。假设 $t = 0$ 时产品是新的, 即处于正常状态。当某一时刻 $t > 0$ 时, 如果产品是好的, 对于可维修产品, 它可能已经产生过若干次故障, 又进行过若干次维修, 而后处于正常状态; 也可能产品从 $t = 0$ 开始到某一时刻 $t > 0$ 一直保持正常状态, 中间没有发生过任何故障。描述这种特性的可靠性指标称为可用性。可用性是系统可靠性和维修性的综合表征, 是反映系统当需要时处于正常状态的可能性的多少。

可用性的度量指标是“可用度”。可用度的定义为: 产品在规定条件下, 在任意时刻 t 能正常工作的概率, 用 $A(t)$ 表示, 这种可用度称为瞬时可用度。

值得注意的是, 在可修系统特征量中 t 的含义是不同的。在修复-故障过程的可靠性特征量中, t 是寿命时间; 对于故障-修复过程的特征量中, t 是指维修时间; 而在修复-故障-修复过程中, 这里 t 是指时刻, 与产品在 t 时刻以前的状态无关。

如果产品的可靠度和维修度均服从指数分布, 即 $R(t) = e^{-\lambda t}$, $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$, 则可用度 $A(t)$ 满足微分方程 (详细推导见第 4 章):

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda A(t) + \mu[1 - A(t)] \quad (1.22)$$

解得:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (1.23)$$

当 $\mu=0$ 时有: