

可靠性工程

李守仁 编



哈尔滨船舶工程学院出版社

TB114.3

L34

459484

可 靠 性 工 程

李守仁 编



2



00459484

哈尔滨船舶工程学院出版社

内 容 简 介

可靠性工程的基本理论和基本技术,已成为从事可靠性工程技术工作的科技人员所必备的专业知识。

本书系统地阐述了可靠性的基本概念、理论和方法,层次清楚,并着重于实际应用。为便于掌握,附有大量实例。

本书共分十二章,第一章至第五章介绍了可靠性的基本概念、可靠性数学的基本理论和各种系统模型的可靠度计算方法;第六章至第九章介绍了系统可靠性设计,系统可靠性试验及其数据的统计分析方法,系统的失效树分析法等;第十章论述了干涉理论在机械设计中的应用;第十一章简单叙述可维修系统维修性的基本理论和方法;第十二章介绍可靠性管理方面的知识。

本书可作为工科院校本科生教科书、研究生的教材,又可作为从事可靠性技术工作的工程设计人员和工程管理人员的参考书。

可 靠 性 工 程

李守仁 编

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨船舶工程学院印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张10.125 字数257千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数: 1-1,000

ISBN 7-81007-129-7/TH·9

定价: 4.50元

前 言

随着现代科学技术的迅速发展，可靠性工程作为一门新兴的边缘学科脱颖而出。目前，它已广泛地应用于电子，机械制造，航天，航空，造船，轻工业等部门。

可靠性工程最重要的内容之一，就是考虑了时间因素的产品质量。所以为各发达国家所重视。美国、西欧和苏联等国，由于在工业生产中应用了可靠性技术，产品质量大幅度提高，受益匪浅。日本应用了可靠性技术，为它的汽车工业、电子工业、造船工业、机械制造业的发展和占领国际市场起到了推波助澜的作用，它的高质量产品为世界所青睐和瞩目。

在我国，已有越来越多的工程技术人员认识到了可靠性工程理论和技术的的重要性。许多工业部门为保证工业产品的质量，陆续制定和颁布了工业产品的可靠性管理规范 and 可靠性标准，这是可喜的现象。

可靠性工程研究的主要内容是产品的可靠性设计、试验和验证。可靠性试验是可靠性设计的基础。但是试验不能提高产品的可靠性，只有设计才能保证产品的固有可靠性。产品的可靠性是由设计决定的，而由制造和管理来保证。在产品的整个寿命期内，从设计、研制、制造、装配、调试、使用、维修直到报废，都必须进行可靠性管理，只有如此，才能保证产品具有满意的可靠性指标。

产品可靠性设计的应用和推广是比较困难的，其主要原因是：可靠性设计需要足够的呈分布状态的设计数据，而获得这些数据是长期的积累过程，不仅需要进行可靠性试验，更需要建立起一整套自上而下的可靠性管理制度和机构，需要建立必要的评

审制度、可靠性标准、可靠性数据收集和管理中心等等，而可靠性试验本身又是既费时又费钱的试验。这些都给产品可靠性设计的应用和推广带来困难。

尽管如此，由于科学技术的发展，产品的各种性能指标越来越先进，结构也越来越复杂，因而对产品进行可靠性和维修性设计已是势在必行。在工业领域里推广和贯彻可靠性技术，实在是当务之急。

笔者根据我国目前工业发展的需要，在几年来教学经验和科研实践的基础上，参照国内外有关著作和资料，编写了《可靠性工程》这本书。

本书的编写在整体上注意系统性，各章又有相对独立性。在理论推导上力求严密，并尽力做到深入浅出。为便于理解，本书各章节附有大量例举，因而实用性较强。本书既可作为大专院校本科生教科书，研究生教材，也可作为从事可靠性工程的技术人员的参考书。

对于本书，李玉琴同志编写了第十一章和第十二章，并担任本书的审核和校对工作。

在本书的编写过程中，赵树鹏同志给予大力支持和帮助，对此表示衷心地感谢。

本书的编写，参考了许多有关著作和文献，特向这些著作和文献的作者衷心感谢。

特别感谢哈尔滨船舶工程学院出版社的同志们对本书的关心、支持和帮助。

由于本人水平有限，错误难免，请批评指正。

李守仁

1991年2月

目 录

第一章 可靠性的基本概念

§1.1 可靠性概述	(1)
一、产品质量与可靠性	(1)
二、可靠性工程学科的发展状况	(1)
§1.2 可靠性的基本概念	(3)
一、可靠性的定义	(3)
二、可靠性的定量指标	(4)
三、累积失效分布函数	(6)
§1.3 失效率(故障率)	(11)
一、失效率(故障率)的基本概念	(11)
二、产品的失效期	(12)
§1.4 产品可靠性寿命特征	(14)
一、平均寿命	(14)
二、可靠寿命、中位寿命	(16)
§1.5 维修度	(18)
§1.6 有效度	(20)

第二章 可靠性的数学基础

§2.1 随机变量	(23)
一、随机变量	(23)
二、随机变量的数字特征	(23)

§2.2 可靠性工程常用的概率分布.....	(26)
一、二项分布.....	(26)
二、泊松分布.....	(28)
三、指数分布.....	(31)
四、正态分布.....	(33)
五、对数正态分布.....	(37)
六、威布尔分布.....	(41)

第三章 系统可靠性模型与可靠度计算

§3.1 系统和单元.....	(47)
§3.2 串联系统及其可靠度.....	(48)
§3.3 冗余系统的可靠度.....	(52)
一、并联系统.....	(52)
二、 n 中取 k 系统.....	(55)
三、复杂系统的可靠度计算.....	(59)

第四章 备用贮备系统及其可靠度

§4.1 冷贮备系统.....	(63)
§4.2 热贮备系统.....	(69)

第五章 网络系统的可靠性

§5.1 网络系统.....	(73)
§5.2 利用全概率公式简化无向网络.....	(75)
§5.3 有向弧的全概率分解.....	(78)
§5.4 求可靠度的最小路集法.....	(84)

第六章 失效树分析及其应用

§6.1 失效树分析法.....	(89)
------------------	--------

一、失效树分析法的特点	(90)
二、失效树的建造	(91)
§6.2 失效树 (FT) 的定量计算	(92)
一、事件与符号	(92)
二、失效树的计算方法	(96)
§6.3 失效树的简化	(103)
一、多个逻辑与门结构的FT的简化	(103)
二、多个逻辑或门结构的FT的简化	(104)
三、含有相同基本事件FT的简化	(105)
§6.4 失效树的最小割集	(106)
一、失效树的最小割集 Fussell-Vesely 算法	(106)
二、失效树的最小割集 Semanderes 算法	(109)
§6.5 失效模式、影响和危险性分析 (FMECA)	(110)
一、概述	(110)
二、失效模式	(110)
三、FMEA和FMECA的实施步骤	(111)
四、失效危险性分析	(112)
五、FMECA或FMEA表格	(114)
六、FMACE和FMEA的优缺点	(115)

第七章 系统可靠性分配和预测

§7.1 等分配法	(117)
§7.2 比例分配法	(118)
一、串联系统比例分析法	(118)
二、复合系统比例分析法	(121)
§7.3 加权分配法	(124)
§7.4 拉格朗日乘数法	(128)
§7.5 串联系统的冗余优化设计	(131)

一、串联系统加备件数最小的方法·····	(132)
二、成本最小可靠性最高的加备件方法·····	(134)
§7.6 系统可靠性预测·····	(141)
一、利用降级因子进行预测·····	(141)
二、上下限逼进法·····	(143)

第八章 可靠性数据的统计分析

§8.1 可靠性试验·····	(152)
一、可靠性试验的目的·····	(152)
二、可靠性试验的特点·····	(152)
三、可靠性试验应注意的事项·····	(153)
四、可靠性试验的分类·····	(153)
五、可靠性寿命试验·····	(153)
§8.2 完全寿命试验数据的统计分析·····	(161)
一、分布未知时的数据处理·····	(162)
二、分布已知时的数据处理·····	(163)
§8.3 截尾寿命试验数据的统计分析·····	(167)
一、($N, r, \text{无}$) 寿命试验·····	(167)
二、($N, t\sigma, \text{无}$) 寿命试验·····	(172)
三、($N, r, \text{有}$) 寿命试验·····	(175)
四、($N, t_0, \text{有}$) 寿命试验·····	(177)
§8.4 寿命试验的贝叶斯方法·····	(179)
一、可靠度模型参数的先验和后验估计·····	(180)
二、二项分布模型·····	(181)
三、均匀先验分布·····	(181)
四、截尾试验的均匀先验分布·····	(182)
五、 β 先验分布·····	(182)
§8.5 分布参数的图估法·····	(185)

一、正态概率纸·····	(185)
二、正态概率纸的特点和用途·····	(188)
§8.6 皮尔逊 χ^2 检验·····	(190)

第九章 可靠性抽样检验

§9.1 计数抽样检验·····	(194)
一、接收概率·····	(194)
二、抽检特性曲线 (OC 曲线) ·····	(199)
三、两种错误判断·····	(203)
§9.2 指数分布的寿命抽样方案·····	(206)
一、定数截尾寿命抽样方案·····	(207)
二、定时截尾抽样方案·····	(209)
三、失效率抽样检验的 LTFR 方案·····	(211)
§9.3 指数分布的计量一次抽样检验·····	(214)
一、定数截尾试验·····	(214)
二、定时截尾试验·····	(217)

第十章 机械可靠性设计

§10.1 机械可靠性分析 ·····	(221)
一、应力强度模型·····	(221)
二、可靠度的一般表达式·····	(222)
三、应力强度的几种主要模型·····	(226)
四、可靠度意义下的安全系数·····	(245)
§10.2 机械可靠性设计·····	(250)
一、用代数法综合分布函数·····	(250)
二、机械可靠性设计的一般方法·····	(259)

第十一章 可维修系统的可靠性设计

§11.1 可维修系统的马尔柯夫过程	(267)
一、马尔柯夫过程	(267)
二、转移概率矩阵	(269)
§11.2 可维修系统的可靠度计算	(277)
一、有两个系统工作贮备时可靠度的计算	(279)
二、非工作贮备系统	(286)
§11.3 系统的预防维修周期	(288)
一、有效度最大时系统预防维修周期	(289)
二、总费用最小时的系统预防维修周期	(292)

第十二章 可靠性管理

§12.1 概述	(294)
§12.2 我国可靠性管理的实例	(295)
§12.3 可靠性管理流程图	(296)
§12.4 质量信息在可靠性管理中的地位	(299)
附表 1 泊松分布表	(302)
附表 2 标准正态累积分布函数	(303)
附表 3 应力——正态分布, 强度——威布尔分布失效 概率数值表	(307)
附表 4 χ^2 分布下侧分位数 $\chi_p^2(\nu)$	(310)
附表 5 中位秩表	(312)
参考文献	(313)

第一章 可靠性的基本概念

§1.1 可靠性概述

一、产品质量与可靠性

产品质量是衡量一个国家工业技术水平的重要标志。所谓的产品质量是指产品满足使用要求所具备的固有属性，这种属性是由若干反映这种属性的指标所决定。产品质量主要包含三个指标：产品的功能（即性能）指标；产品的可靠性指标；产品的有效性指标。

产品的功能是指产品所具有的性能指标。如通讯机的频率范围、通讯距离等；雷达的频率、峰值功率、搜索速度等；电子计算机的周期、字长、容量、指令数、速度等。这些是产品的基本指标。如果没有或达不到这些指标，可靠性指标就无从谈起。但是只有功能指标，而没有可靠性指标，产品的性能是不完全的。一部设备，尽管它的各项性能指标都很先进，如果不可靠，那也没有使用价值。由此可见，产品的功能能否得到发挥，在很大程度上取决于产品的可靠性水平如何，水平高才能使产品功能得到充分发挥，否则就不能保证产品的规定功能。

二、可靠性工程学科的发展状况

可靠性工程作为一门边缘性的工程学科已有几十年的历史。

可靠性技术最早出现在二次世界大战末期，它应用在德国V—II火箭的诱导装置上。德国火箭研究机构的参加人之一R·Lusser首先提出了利用概率乘积法则，把一个系统的可靠度看成

该系统的子系统可靠度的乘积，算得V—II型火箭诱导装置的可靠度为0.75。这就开创了使可靠性建立在数学计算基础上的先例。另外，美国麻省理工学院一研究中心，对当时使用的电子产品主要元件——真空管的高可靠度问题作了深入的调查研究。50年代初，美国在朝鲜战争中，大量地应用了电子设备，而且其复杂程度不断增长。在使用过程中，许多元器件不能适应环境要求，而使设备失效，于是产品的可靠性问题被提了出来。为此，美国于1950年成立了“国防部电子设备可靠性专门工作组”。1952年该组提出了17项研究报告，并改名为“国防部电子设备可靠性顾问团”（AGREE）。1957年发表“军用电子设备可靠性”报告被公认为是可靠性的奠基文献。随后可靠性的研究从概率统计发展到故障物理的研究，开始分析产生故障的机理，并于1962年召开了第一届电子设备故障物理学术讨论会。

美国是最早有组织地研究可靠性的国家，随后世界各主要工业国也开始进行可靠性问题的研究。日本1958年成立了“可靠性研究委员会”，1960年进行了第一次学术讨论活动。法国1962年成立了“可靠性中心”，进行了情报数据和试验数据的收集与分析，1963年创办可靠性杂志。苏联、英国等也均在50年代末和60年代初成立了专门的可靠性研究机构，并都取得了可喜成果。

可靠性技术的应用能带来巨大的经济效益。例如日本从美国引进可靠性工程技术之后，在民用工业中应用和推广取得成功。日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、照相机等产品能够畅销全环，在于具有高可靠性，日本由此而获得巨额利润。美国人曾预言，今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业，才能在日益激烈的国际贸易竞争中生存下来。而日本人则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。

在我国已有越来越多的工业部门认识到了可靠性问题的重要意义，把产品的可靠性看得与产品的性能同样重要。目前，我国

对某些机电产品已制定了可靠性标准，对其他工业产品制定可靠性标准的工作已全面展开。许多部门已做出规定，没有可靠性指标、未进行可靠性设计的产品不得投产，这是可喜的现象。

三、可靠性的范畴

自从可靠性的科学概念、基本理论和应用技术得到确认以来，可靠性工程发展成三个相互有关的分支。

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，它属于应用数学的范畴，涉及的面比较广，主要内容是概率论和数理统计、随机过程、运筹学等。

2. 可靠性物理

可靠性物理是研究失效（或故障）现象及其机理和检测方法的学科。

3. 可靠性工程

可靠性工程是对产品的失效（或故障）现象及发生概率进行分析、预测、试验、评价和控制的边缘性学科。它的发展与概率论和数理统计、运筹学、系统工程、环境工程、价值工程、人机工程、人素工程、质量管理、计算机技术、失效物理学、机械学、电子学等有着密切的联系。

§1.2 可靠性的基本概念

一、可靠性的定义

可靠性的定义是：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。

产品的可靠性是与“规定的条件”分不开的，规定的条件不同，产品的可靠性是不同的。同一台设备在不同的环境条件下工

作（如寒带或热带，海上或空中），它的可靠性就不相同。同一产品在不同的环境条件下贮存，其可靠度也不相同。

产品的可靠性又与“规定的时间”密切相关。一般说来，产品的可靠性水平经过一个较长的稳定使用或贮存阶段后，便随着时间的延长而逐渐降低。时间越长，产品的失效（或故障）就越多。

产品在使用时必须完成“规定的功能”，即必须达到若干性能指标。产品的各项规定的性能指标都已达到，则称该产品完成了规定功能，否则称该产品丧失了规定功能。通常把产品丧失规定功能的状态叫做产品发生“故障”或“失效”，相应的各项性能指标就叫做“故障判据”或“失效判据”。

产品丧失规定功能时，对于可修产品一般称故障，对于不可修产品则称失效。而在讨论问题时，往往难以明确区分。因此，我们把“失效”和“故障”看成是同义词。

二、可靠性的定量指标

可靠性的定量指标用可靠度表示。可靠度的定义是：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的概率。

通常用字母 R 表示可靠度。由于可靠度是一个概率，所以

$$0 \leq R \leq 1$$

若将产品在规定的条件下，规定的时间内丧失规定功能的概率记为 F ，则称 F 为失效概率或不可靠度。由于失效与不失效这两个事件是对立的，所以

$$R + F = 1 \text{ 或 } R = 1 - F$$

由概率的定义知，某个事件的概率可用大量试验中该事件发生的频率来估计。因此，为了估计一种产品在一定时间内的可靠度或失效概率（不可靠度），可以通过这些产品的大量试验来确定。

设有 N 个产品在规定的条件下工作到某规定时间有 r 个产品

失效，则此时产品的失效概率（不可靠度）为：

$$F \approx \frac{r}{N}$$

当 N 足够大时

$$F = \frac{r}{N}$$

而可靠度

$$R = 1 - F = \frac{N - r}{N}$$

从可靠度的定义可知，可靠度是对一定时间而言的，规定的时间不同，产品的失效数 r 就不同，可靠度的数值也就不同。由此可知，可靠度是时间 t 的函数，记为 $R(t)$ ，称为可靠度函数。

设 N 个产品从时间 0 开始工作，到任意时刻 t 的失效个数为 $r(t)$ ，则

$$F(t) = \frac{r(t)}{N} \quad (1.1)$$

为时间 0 到 t 内的失效概率，称为累积失效概率，这时可靠度函数即可表示为：

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) \\ &= \frac{N - r(t)}{N} \end{aligned} \quad (1.2)$$

产品在开始使用时（即 $t = 0$ ），所有产品都是好的，失效数 $r(0) = 0$ ，则 $R(0) = 1$ 。随着时间的增加，总的失效数也不断增加，可靠度相应的减少，所有产品总是要失效的。因此， $r(\infty) = N$ ， $R(\infty) = 0$ 。从而可知可靠度函数 $R(t)$ 是在 $[0, \infty)$ 区间内的非增函数，取值范围为：

$$0 \leq R(t) \leq 1$$

例1.1 某一规格的轴承50个，让其在恒定载荷条件下运行，记录的数据如表1.1所示。试计算当轴承工作到100小时和400小

时时，这种轴承的可靠度 $R(100)$ 、 $R(400)$ 以及累积失效概率 $F(100)$ 、 $F(400)$ 各是多少？

表1.1

时间 (小时)	10	25	50	100	150	250	350	400	500	600	700	1000
失效数 (个)	4	2	3	7	5	3	2	2	0	0	0	0
累积失效数 (个)	4	6	9	16	21	24	26	28	28	28	28	28
仍在正常工作数 (个)	46	44	41	34	29	26	24	22	22	22	22	22

解： $r(100) = 16$ ， $r(400) = 28$ ， $N = 50$ 。

$$R(100) = \frac{N - r(100)}{N} = \frac{50 - 16}{50} = 0.68$$

$$R(400) = \frac{N - r(400)}{N} = \frac{50 - 28}{50} = 0.44$$

$$F(100) = 1 - R(100) = 0.32$$

$$F(400) = 1 - R(400) = 0.56$$

由计算可知，这批（50个）轴承，从开始工作到100小时时，其可靠度为0.68，即意味着这批轴承在规定的条件下使用到规定时间100小时时，尚有34个轴承在可靠地工作；而使用到400小时时，只有44%的轴承能完成规定的功能。

这就是可靠度最基本的概念和它最基本的计算方法。只要有试验统计数据，计算产品在某时间的可靠度是不困难的。

三、累积失效分布函数

对于一个特定的产品，在规定的时间内它可能失效，也可能不失效，失效时间是未知的。对大量产品的失效时间进行统计分析后，发现失效时间是遵循一定分布规律的。也就是说，失效时间 ξ 是一个随机变量，且服从一定的分布规律。为此，需要找出分布函数，并研究其与可靠度函数的关系，由此探求可靠度函数的规律。为了描述随机变量的分布规律常常用频率直方图。