

可靠性工程基础

〔日〕盐见 弘 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是可靠性工程的入门书。全书共分十四章，内容包括可靠性工程的基础知识、可靠性的计算方法及可靠性的设计、预测、实验与管理，并通过实例对这些内容作了进一步说明。书末附有计算用表和可靠性名词术语。

本书可作为管理干部、技术人员自学用书，也可供有关专业师生参考，对有一定可靠性工程基础知识的读者也可作为手册使用。

塩見 弘
信 頼 性 工 学 入 門
丸 善 株 式 会 社， 1979

可 靠 性 工 程 基 础

[日] 塩見 弘 著
彭乃学 赵 清 赵秀芹 译
责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版
北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年3月第一版 开本：850×1168 1/32
1982年3月第一次印刷 印张：12 3/8
印数：0001—8,160 字数：320,000

统一书号：15031·385

本社书号：2475·15—10

定 价： 2.30 元

译 者 的 话

随着现代科学技术的迅速发展，可靠性工程理论与应用技术日益受到广泛的重视，现代化企业的生产管理问题无一不与可靠性有关。我国从事可靠性研究的历史不长，但亦收到了可喜的成果。然而，就其普遍性来看是很不够的，可靠性工程的基础读物也不多。为此，我们翻译了盐见弘先生著《可靠性工程基础》（1972年第二版，1979年第五次印刷本）一书。作者多年从事可靠性研究，曾出版过很多专著，本书是其中一本较好的基础读物，内容全面、叙述严谨、实例较多，具有一定数理基础知识的人通过自学即可掌握书中的内容。

在翻译过程中，对原书中不符合我国习惯的写法及笔误均作了适当的改写与更正。但由于我们水平有限，译稿中错误之处一定不少，希望读者批评、指正。

本书翻译过程中得到辽宁省电子工业局及国营新乐电工厂的大力支持，四机部四所鲍仲平同志及中国科学院一〇九厂韩卓人同志对译稿进行了仔细审校，在此一并表示感谢。

译 者

1980年9月

再 版 前 言

《可靠性工程基础》出版迄今已五年有余。在此期间，美国成功地完成了“阿波罗”计划，作为系统工程之一的可靠性工程也取得了长足的进展，人们不仅对硬件，就是对软件的可靠性也给予了充分的重视。这一时期正是日本企业界广泛开展可靠性研究的时期，并且也开始注意到社会的可靠性及安全性。

由于本书主要讲述可靠性工程的基础知识，再版亦无彻底修正的必要。恰逢公布新 JIS (日本工业标准) 用语，借此之机删去冗长之处，作为再版本，对原来一些叙述不足之处作了些补充，并增加了一些新的文献与实例。

盐见 弘

1972 年 1 月

前 言

自从美国 1957 年提出 AGREE 报告、日本科技联盟于 1958 年以“东大”高木先生为首成立可靠性研究委员会迄今已有十多年了。在此期间，人们对可靠性问题有了进一步认识，可靠性的部分理论也已具体应用于实践。

有关可靠性的专著，美国出版的较多，日本仅有寥寥几种。虽则如此，由于这些著作各具特色，内容亦佳，对可靠性工程在日本的传播与普及起了重要作用。

本书的主要对象是从事可靠性设计、分析、试验、检查、维修服务的人员。书中归纳了可靠性的基本理论与具体实施方法，故也适合对可靠性工程感兴趣的读者阅读。虽然笔者力求简单扼要、重点突出以使读者有所收获，但因能力、时间有限，未必能达到预期效果，好在尚可参阅其它有关著作以补拙作之不足。

阅读本书时，初学者可越过较为难懂的公式、注解，重点阅读例题及实例，倘若工作需要，时间又允许，最好将较难之处连同参考文献一并阅读。书中对例题的解答仅为提示，阅读时希望读者根据自己对问题的理解来解答。

为使可靠性工作在企业中有组织地开展起来，从事可靠性工作的技术人员应灵活运用所掌握的基本知识，拟出理想的可靠性工作程序。为此，书中专门写了“可靠性计划与管理”一章，并希与第一章、第十章一并阅读。

本书的主要内容为

一一六章：可靠性及其数理基础，

七一九章：不可修复系统与可修复系统的可靠性及维修方法，

十、十一章：可靠性设计技术，

十二、十三章：可靠性实验与数据，

十四章：可靠性计划与管理，

“可靠性名词术语”、“参考文献”、“附表”。

最后，借此机会向对本书编写给予大力帮助的诸位表示感谢，并对本书所引用参考文献的著者致以谢意。向为本书出版作了大量工作的丸善株式会社出版部致谢。

盐见 弘

1967年4月

目 录

第一章 什么是可靠性.....	1
1.1 可靠性问题的提出	1
1.2 可靠性的定义	2
1.3 可靠性和费用有效性	6
1.4 固有可靠性和使用可靠性	8
第二章 概率及简单的可靠度计算.....	12
2.1 概率	12
2.1.1 排列与组合	12
2.1.2 加法定理	13
2.1.3 乘法定理	13
2.1.4 贝叶斯 (Bayes) 定理	14
2.2 简单可靠度的计算	14
2.2.1 串联系统和并联系统的可靠度	15
2.2.2 串联系统与并联系统的对偶性	18
2.2.3 非串、并联系统的可靠度	19
2.2.4 二项展开的应用	21
第三章 可靠度函数及失效率.....	25
3.1 失效时间的频数分布	25
3.2 由失效时间分布推算可靠度和失效率	27
3.3 可靠度函数	31
3.4 MTTF (平均寿命时间) MTBF (平均故障间隔).....	34
3.5 失效率图形	35
3.5.1 基本的失效率图形	35
3.5.2 人和不可修复系统产品的失效率	36
3.5.3 失效率和可靠度生长曲线	40
3.6 可靠度函数的求法	43
3.6.1 $F(t)$ 的点图法	43

3.6.2	可靠度及其方差的推算	44
第四章	可靠性的概率分布	48
4.1	平均和离散	48
4.2	二项分布	50
4.3	泊松 (Poisson) 分布	51
4.4	正态分布	54
4.4.1	分布形状	54
4.4.2	参数(μ, σ)的确定	55
4.4.3	均值的分布与正态近似	57
4.5	对数正态分布	58
4.6	指数分布	58
4.6.1	偶然失效和指数分布	58
4.6.2	指数分布的 MTBF (或 MTTF) 的特征	59
4.7	Γ 分布	60
4.8	威布尔分布	61
4.9	用威布尔概率纸确定参数	63
4.10	极值分布	70
4.11	分布函数的归纳	76
4.12	分布的适应性检验	79
4.13	和的分布	81
4.14	应力-强度模型	83
4.15	判别函数	87
第五章	MTBF 及可靠度的估计	91
5.1	区间估计	91
5.2	正态分布时的可靠度估计	93
5.2.1	母体均值 μ 的置信限	93
5.2.2	母体方差 σ^2 的置信限	94
5.2.3	中途截尾时参数的最优估计	95
5.3	指数分布的情况	97
5.3.1	MTBF (或 MTTF) 的点估计	97
5.3.2	MTBF (或 MTTF) 的置信限	99
5.4	非参量可靠度的区间估计	107
第六章	随机过程	116

6.1	马尔柯夫过程	117
6.1.1	转移概率	117
6.1.2	极限概率	119
6.1.3	过渡状态的概率	121
6.1.4	吸收状态时的平均转移次数(或时间)	123
6.2	变换的应用	124
6.2.1	Z变换	124
6.2.2	拉普拉斯变换	125
6.3	泊松过程	126
6.4	生灭过程	129
第七章	不可修复系统的可靠性	131
7.1	贮备	131
7.2	待机贮备方式	135
7.3	单元的可靠度及贮备效果	141
7.4	非单一的串、并联系统的可靠度	142
7.5	不同失效模式系统的可靠度	144
7.6	故障相关时的可靠度	146
第八章	可修复系统的可靠性	152
8.1	维修及不能工作时间	153
8.1.1	维修的三个基本要素	153
8.1.2	时间的分类	153
8.2	维修性	156
8.2.1	维修度(或修理度)	156
8.2.2	维修度(修理度)的测量及预测	158
8.3	有效度	163
8.3.1	各种有效度	163
8.3.2	设备有效度	166
8.3.3	任务有效度	168
8.3.4	设备有效度、任务有效度和可靠度的关系	168
8.4	系统的有效度及可靠度的计算	169
8.4.1	单一设备的情况	170
8.4.2	串联系统的情况	171
8.4.3	并联系统的情况	172

8.4.4	待机贮备的情况	173
8.4.5	一般系统的有效度计算	177
8.4.6	各种系统的稳态有效度与 MTTF 的比较	179
第九章	维修方式	182
9.1	事后维修及预防维修	183
9.1.1	事后维修的个别替换	183
9.1.2	预防维修	185
9.1.3	替换时的有关问题的决定	189
9.2	检修周期的确定	193
9.3	故障判断和检测	196
第十章	可靠性设计	201
10.1	可靠性设计的方法	201
10.2	系统设计和平衡	208
10.3	可靠性的分配	215
10.3.1	简单的可靠度分配例题	215
10.3.2	按重要性分配可靠度	217
第十一章	可靠性预测及统计设计法	227
11.1	可靠性预测的目的	227
11.2	可靠性预测的方法	228
11.3	故障率(MTBF)的预测	230
11.3.1	根据复杂性进行预测	230
11.3.2	根据故障率的和进行预测	232
11.3.3	预测精度	238
11.3.4	其他预测方法	242
11.4	耗损失效的预测	248
11.5	统计法的应用	256
11.6	故障效应的分析(FMECA)	259
11.7	维修性与有效性的预测	261
第十二章	可靠性试验	265
12.1	什么是可靠性试验	265
12.2	可靠性试验的目的及问题	265
12.2.1	对象	266

12.2.2	试验的种类与目的	266
12.2.3	试验的计划及实施	268
12.3	可靠性的抽样试验	276
12.3.1	抽样试验的种类	277
12.3.2	OC 曲线	278
12.3.3	根据指数分布确定抽样方案	280
12.3.4	威布尔分布抽样方案	293
12.4	加速寿命试验和失效物理	298
12.4.1	缩短试验时间	298
12.4.2	失效物理	299
12.4.3	加速条件	304
12.4.4	退化反应和加速系数	304
12.4.5	累积退化和一般化迈因纳法则	308
12.4.6	加速寿命试验的方法	310
第十三章	可靠性数据	325
13.1	数据的收集	325
13.2	数据的分析和归纳方法	330
第十四章	可靠性计划与管理	342
14.1	可靠性管理	342
14.2	可靠性计划的实施	344
14.3	可靠性活动的组织	348
14.4	民用可靠性计划	351
参考文献	358
附录	361
可靠性术语	361
附表	369

第一章 什么是可靠性

本章将简要说明：为什么要研究可靠性；可靠性的定义及意义；衡量可靠性的标准；提高可靠性应该考虑哪些问题；可靠性工作在企业活动中的范围和特点；它和以质量管理为主的其他工程技术有何关系等问题。

有关可靠性的名词术语和内容请参见第十章“可靠性设计”、第十四章“可靠性计划与管理”以及附录“可靠性术语”。

1.1 可靠性问题的提出

当可靠性的问题尚未明确提出来之前，人们虽然没有使用“可靠性”一词，但已经在很多场合使用耐久性、寿命、稳定性、安全性、维修性等概念来表示产品的质量了。然而，作为单独的一门可靠性工程学，大量地、有组织地进行这方面的工作还是第二次世界大战以后的事情，当时，美军运往远东的设备、装置在运输和保管过程中，有半数以上因不能使用而报废。这种不经使用就遭到重大损失的情况成了美国投入力量进行可靠性研究的开端。德国也曾在 V1 型火箭上开始运用可靠性数理，后因战争失败而中止。美国从 1943 年开始，由军队、学术界、生产厂联合组成小组进行了各种研究活动，直到 1957 年，当美国国防部电子元器件可靠性咨询小组 AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 提出报告以后，可靠性工程的研究方向才大体被确定下来。

可靠性问题之所以受到重视，是因为系统、设备（硬件、软件）所承担的工作在质的方面高级化了，它与人类生活密切相关；在量的方面复杂化了，因彼此相关的任意一部分失效而导致整个系统

发生故障的机会增加了；而整个系统的故障(或失败)将使国家安全受到威胁，使军队、社会、人民生活遭到危害。此外，由于人-机系统日益庞大、复杂化；新技术的研究、采用，新材料的应用等速度大大加快；尚未注意到、没有研究开发的领域还很广阔，所有这些都是产生不可靠、不安全的因素。除此之外，由于机器设备的高精度、高性能致使由人所担负的工作责任更加重大，因而就存在着由人为失误引起重大事故的可能性。例如，美国向火星发射的“水手”1号火箭，就是仅仅因为电子计算机的程序系统脱落了一个字符而告失败。这是属于软件方面的可靠性问题。解决这样的问题就不是现场所能应付得了的，需要进行有组织的工作。以上情况可以说是这门综合性的工程技术——可靠性工程学产生、发展的背景。

系统、产品的可靠性不是孤立存在的。可靠性的概念及技术以往在其他工程技术领域里发展起来的概念及技术有密切联系。换句话讲，离开了系统工程学、安全工程学、质量管理 QC (Quality Control)、生产组织技术 IE (Industrial Engineering)、运筹学 OR (Operations Research)、价值工程学 VE (Value Engineering)、工程心理学、环境工程学、电子计算机技术及其他一般的管理技术，离开了概率论、统计学、物理学、化学、机械学等科学技术来讨论可靠性问题是根本不可能的，而可靠性工程学则是包括上述科学技术的综合性工程技术。

1.2 可靠性的定义

可靠性(reliability)一词，可用在表示抽象的可靠性和用概率表示的可靠度两方面(参看附录名词术语)。通俗地讲，系统、产品可靠与否，是指系统、产品处于使用状态时，在所规定的时间内(指在费用允许的条件下，用户所要求或希望的时间)，是否处于“完满状态”。这种广义的可靠性，对于可修理的汽车、计算机类和不能修复的消耗品类(如灯泡)，其意义略有不同(见图 1.1)。

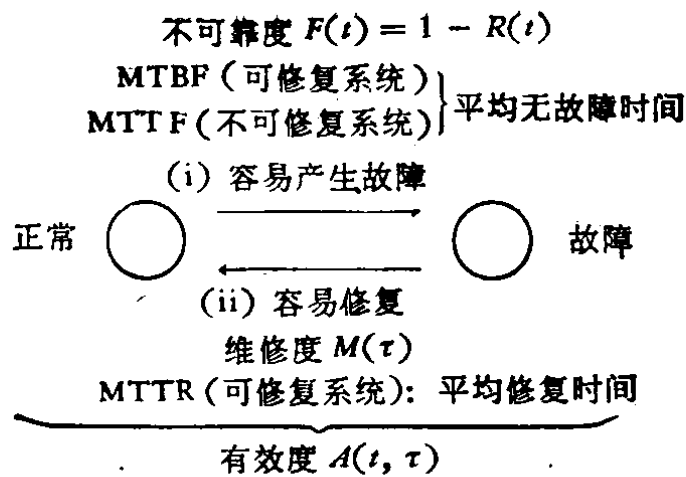


图 1.1 可靠度 $R(t)$ 、维修度 $M(\tau)$ 、有效度 $A(t, \tau)$ (MTBF、MTTF 是由正常到失效的平均时间, 即平均无故障时间。 MTTR 是由故障到修复的时间, 即平均故障时间。)

处于正常、失效状态间的可靠性, 可以从下述的 a. 可靠度和 b. 维修度两个方面来考虑。象灯泡那样的消耗品, 应该首先考虑如何提高可靠度, 而不用考虑维修度。但是对于可修复的系统、产品等则除了考虑提高可靠度外, 还要考虑如何提高维修度。

a. 使之不发生故障 在产品上加应力 (例如: 温度、冲击等) 时, 为使它安全起见, 要适当地对应力予以控制。或者提高产品本身的强度, 排除引起故障的缺陷。并且形成即使一部分损坏引起误动作也不会对全机产生影响的结构, 在故障出现前要进行事先预防。这种性质用可靠度表示。

b. 排除故障及克服不良情况 为使产品、系统经常保持正常状态, 可定期更换部件或早期发现问题, 进行维护保养。这里不仅维修技术是重要的, 而且从开始设计和制造时就考虑使其结构易于早期发现问题, 易于进行维修。这可用表示产品修复能力大小的维修度 (maintainability) 来衡量。

广义的可靠度包括上述 a 和 b 两个方面。后面讲到的有效度 (availability) 是包括这两个方面的尺度。通常情况是人们一边操作一边对使用的系统、设备 (例如: 计算机、车辆等) 进行维护保养, 这点是很重要的。但是, 从开始制造产品时就将维护保养功能 b

和 a 结合起来融贯在产品之中，使产品本身具有高可靠度和维修度尤为重要。但是，对于象人造卫星等不载人的以及无法进行修理的系统、产品的零、部件等，就不能依赖维修度 b 了。对此，除了从开始就努力提高 a 外，别无他法。下面首先介绍可靠度 a 的定义。

所谓可靠度，是指系统、产品和零部件等在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能（无故障）的概率。可靠度用图 1.1 中的 $R(t)$ 表示。在此定义中，应明确以下四个要点：

- (1) 对象是什么(指系统、产品等)；
- (2) 所规定的功能是什么，失效是什么；
- (3) 规定的使用环境；
- (4) 规定的时间。

可靠度的定义是利用概率明确地表示出产品的抽象可靠性，并使其数量化。这是在提高可靠性，进行可靠性管理以及交易中使用的共同标准。因此，若不首先弄清这点，就不能用概率来充分掌握可靠性。

对于(1)，应明确哪些是系统，哪些是具体的设备，在与人有关系的情况下是否考虑人的因素。有时虽然设备的某一部分出现故障，但整体并没有发生故障；也有时不是因为物而是由于人或软件的问题引起的故障。因此，必须明确规定失效或故障是由何引起的。

(2) 是指研究对象虽然失去了功能，但功能中有主要和次要的。因而不同的故障所引起的损害也不同。另外，在故障中，有易于排除和难以排除的；在由于物引起的故障中，有突然发生后就完全损坏的致命失效 (catastrophic failure)；有因功能逐渐减退而产生的耗损失效 (degradation failure)；还有偶然的、间歇不稳定失效、误动作等(参看附录“可靠性术语”部分)。耗损失效很难检测出来，也不易修理，所以恢复很困难。对于失效不仅要考虑其发生次数(概率)，也要考虑其本质。还应根据不同功能分别考虑其可靠度。在进行失效分析时，必须考虑：(1)对象是什么；(2)失效模式、失效

现象、症状是什么；(3) 为什么发生失效(原因、失效机理)；(4) 时间问题(失效时间、寿命分布、修理时间)；(5) 故障程度(发生比率、频率、轻重程度、对其他部分和整个系统功能的影响程度)等。

这里讲的失效模式指的是短路、开路、折损、污损、粘附、表面粗糙、电弧、泄漏、失真、松弛、堵塞、磨损、变形、噪声、不稳定、过电流、灼伤、破损、缺损、偏移、腐蚀、断裂等。有时也叫做失效原因。但严格地讲，这些不是原因(机理)，而且和单纯的失效现象不同，这里讲的失效模式分类与一般的失效物理方法中论述到的失效原因有密切的联系。

从系统、产品的功能上来说，对于不同的失效应该采取不同的对策。例如，在一条铁路干线上，我们把客车和货车分别停了 10 分钟、30 分钟以上的情况称为(致命)故障 A ，在这段时间内若能修复称作 B ，在保养维修中发现了问题称作 C 。在故障的定义中，必须注意到包括恢复时间为 10 分钟这样的维修度因素。

(3) 指的是使用状态。包括温度、振动、负载等环境应力，能否维修保养(是否有人)、维修环境条件、使用者的技术水平等广义的环境。不仅要注意使用条件，而且还要注意规定的地点。这些和(2)失效的定义有关。无论何种产品，如果加极限负载、误用或有意破坏的话都要损坏。因此，规定使用条件(范围)是判定产生故障的责任在用户还是在生产厂的关键。作为生产厂来说，不应该仅仅是只谈“保证产品可靠度”，而应该向用户提出如何正确使用产品的切实有效的资料。

(4) 指所规定的时间。这点也是可靠性的特征。作为时间，既有泛指的时间，也有因对象不同而出现的诸如次数、周期、距离等相当于时间的量。另外，还有连续使用、间歇使用、放置、长时间、短时间、瞬间等各种时间概念。所以这个规定也是重要的。

下面再简单介绍表示修复能力 b 的维修度(maintainability, maintain + ability)。维修度的定义是：“可修复系统、产品、零部件等在规定的条件下实施维修时，在规定的时间内，完成维修的概率”。简言之，维修度表示产品由不正常状态通过维修恢复到正常

状态的恢复能力。图 1.1 中的 $M(\tau)$ 表示的就是这个概率。规定的时间 τ 和可靠度所要求的时间相比是非常小的。

将 a 和 b 综合在一起表示可靠性尺度的是有效度。有效度的定义是：“在某种维修条件下，可修复的系统、产品、零部件等在规定的时间内，维持其功能处于正常状态的概率”。有关有效度的问题将在第八章里再详细研究。

可靠度、维修度、有效度统称为可靠性 (dependability)。某一时刻的有效度、从该时刻开始某一期间的可靠度及完成功能 (性能，如命中率，成功率) 的综合概率称为系统有效性 (system effectiveness) (参照 10.2 节)。

1.3 可靠性和费用有效性

在狭义的质量管理中，不可无视产品的时间因素 (寿命)。即在制造过程、生产开始、出厂时间等阶段上，应注意产品是否达到满意状态，其要求的特性是否合乎标准；是否维持在管理状态。而在可靠性方面，应保证产品的寿命、有效度，重视产品的特性值处于满意状态的持续时间。在系统、产品中作为时间质量指标的可靠性，在任何时候也不会作为第一等重要的技术指标。从质量这点上看，应该注意的是外形尺寸、物理性质、化学性质、软件优劣、操作难易、人的习惯等问题。作为生产厂应考虑的因素是生产的难易、加工的繁简、经济指标、供求情况 (需求量、交付日期) 等。不能因为追求提高作为时间质量指标的有效度、可靠性、维修性，而牺牲所要求的功能、性能。应将综合产品各种特性值的平衡值作为可靠性指标，尽可能地满足功能、可靠性与成本等各方面的要求。这就是研究可靠性问题的必要性。若过分地强调安全性、可靠性，火车只有不开才好；若过分要求坚固、可靠，飞机就会因过于笨重而飞不起来。在目前的技术水平上，费用过于昂贵，时间特性再好意义也不大。

关于可靠性及其保证时间。若使系统、产品在整个使用过程