

可靠性技术丛书—2

可靠性、维修性的 数理基础

〔日〕三根 久・河合 一 著



机械工业出版社

TB114
S17

307373

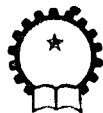
可靠性技术丛书—2

可靠性、维修性的数理基础

〔日〕三根 久・河合 一 著

王树田 周世杰 译

郭建英 校



机械工业出版社

本书是日本科技連可靠性技术丛书第2册的中译本。书中应用概率论和统计学概述了可靠性技术的理论基础。简单地介绍了可靠性工程及实际应用中经常遇到的典型故障时间的分布函数、可靠度函数及其特征值的确定；几个基本系统及其实施与不实施维修时的分析方法；系统最基本的维修策略和根据费用确定最佳维修计划的方法。

本书可作为高等工科院校大学生、研究生的教学参考书，也可供从事可靠性技术教学、研究、应用和管理的广大工程技术人员参考。

日科技連信頼性工学シリーズ 第2巻

信頼性・保全性の基礎数理

三根 久・河合 一 著

日科技連出版社

1984年2月

* * *

可靠性技术丛书一2

可靠性、维修性的数理基础

三根 久・河合 一 著

王树田 周世杰 译

郭建英 校

责任编辑：夏曼苹

封面设计：方 芬

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $57/8$ · 字数 119千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 0.001—5,650 · 定价：2.20元

*

ISBN 7—111—00399—3/TH·67

译者序

可靠性是衡量机电产品质量的一项重要标准。随着工业技术的发展,产品性能参数日益提高,结构日趋复杂,产品的使用场所更加广泛,环境更为严酷,因而,产品的可靠性问题越来越突出。从50年代起,国外就兴起了可靠性技术的研究。可靠性技术的观点和方法,目前已经成为产品质量保证、安全性研究和产品责任预防措施不可缺少的依据和手段。

日本开展可靠性技术的研究和应用已有近30年的历史。其可靠性技术着重应用在民用工业产品上,尤其是和TQC(全面质量管理)结合,形成实用化的特点,使产品的可靠性显著提高。日本专家认为高可靠的优质产品的实现,是长期积累的可靠性技术和严格的生产管理制度相结合的结晶,必须强调从设计、制造、管理到使用、维修的全过程的管理。

这套丛书总结了日本推广可靠性技术的经验,通俗易懂,实用性强。它是为指导日本的技术人员和管理人员应用可靠性技术而编写的一套工具书。全书共分15册,包括可靠性、维修性总论、数理基础、设计、试验、数据采集和处理、故障诊断、维修和管理等诸方面内容。

为了配合国内普及和推广可靠性技术,我们决定翻译出版这套丛书,供从事产品设计、试验、管理、维修以及产品开发研究的各种专业人员和各级管理干部借鉴和应用。这套丛书同时也可作为国内高等院校可靠性课程的教材,并且对

从事可靠性研究的高等院校教师、科研人员和研究生也有参考价值。丛书由国家机械工业委员会机械科学研究院组织翻译、校审。全套丛书将陆续与读者见面，希望能对各单位开展可靠性活动有所裨益。

由于我们水平有限，难免有不足和谬误之处，欢迎批评指正。

在此，对日本科技連的慷慨赠书表示感谢。

国家机械工业委员会 科 技 司
机械科学研究院

1987年2月

《可靠性技术丛书》出版序言

1958年日本科技連内设立了可靠性研究会，至今已经历了近四分之一世纪的岁月。在这个期间，通过各种研究班和专题讨论会等普及活动，以及由于有关协会、学会及企业的努力，已经发表了大量有关可靠性的应用报告和研究成果。可靠性的观点和方法已经成为质量保证、安全性保证、产品责任预防等不可缺少的依据和手段，因此受到各方面的广泛关注。

日本科技連过去所进行的卓有成效的可靠性教育和普及活动，不仅有研究班和专题讨论会，还有关于可靠性的出版活动等。但遗憾的是，有些活动不完全是有组织地进行的。在最近的可靠性活动的高潮中，使人不免稍有动手已晚之感。为了扩大活动的领域，日本科技連出版社决定出版《日本科技連可靠性技术丛书 全15卷》。

与所谓的可靠性技术专著相比，这套丛书的特点是具有更广泛的基础知识，尽可能简明易懂，讲述比较详尽，以适应从初学者到干部、技术人员，乃至管理干部等各类人员使用的要求。此外，为了使从事计划、设计、生产、质量管理、维修等各项业务，以及电子、电机、机械、精密仪器等各主要行业的人员喜欢阅读本书，执笔者邀请了各方面经验丰富的专家参与筹划。

这套丛书的另一个特点是，为了便于用作现场常备的参考书，并且携带方便，故采用32开本。读者可以分期阅读，容易安排时间，并掌握其最基础的知识。

希望这套丛书能成为与可靠性有关的工作人员的案头书，在今后发展可靠性活动中起到引路的作用。

《日本科技連可靠性技术丛书》

主编

市田 嵩

川崎義人

塩見 弘

前 言

关于可靠性理论，初期出版的最优秀的著作恐怕是由雷米航空发展中心 (Rame Air Deve Lopment Center) 编的《RADC Reliability Notebook, RADC—TR—58—111, Oct., 10, 1959》一书。笔者对可靠性感兴趣源于1956年发表的下面三篇论文：

Moore, E.F. and Shannon. C.E.: Reliable circuits using less reliable relays, J. of the Franoklin Institute, Vol. 262, Pt. I, pp.191—208, Pt. II, pp. 281—297, 1956.

Von Neumann, J.: Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components, Auto mata Studies, Princeton Univ. Press, pp. 43-98, 1956.

Moskowitz, F. and Mclean, J.B.: Some reliability aspects of system design, IRE Transactions on Reliability and Quality Control, PGRQC-8, pp. 7-35, 1956.

当时，日本电气通信学会技术委员会的几个专门研究委员会，获知可靠性技术在IRE出现，而在日本尚未形成专业领域后，迅速开始研究，并于翌年（1957年）秋的电气通信学会全国大会上，以“关于可靠性 (Reliability) 的考察”为题，发表了关于冗余系统最佳分配法的报告。在以后的电气四学会联合大会、电气通信学会全国大会上，总要发表有关可靠性的文章。

可是, 根据协议, 直到1959年6月16~18日 IRE情报理论专门委员会与电路理论专门委员会才在洛杉矶召开了“电路与情报理论国际专题讨论会”(International on Circuit and Information Theory)。笔者由于大阪大学基础工部部长藤泽俊男先生的推荐应邀参加了这次讨论会, 并在图形与矩阵理论讨论会上发表了题为“Reliability of physical system (物理系统的可靠性)”的论文。这篇论文刊登在《IRE Transactions on Information Theory, Special Supplement, Vol. IT-5 (同 Vol. CT-6), pp.138-151, 1959》上。其内容是, 如果单元(元素)的内部状态由二元可变向量表示, 则系统的状态由二元逻辑函数(结构函数)定义, 可靠度用最小项(或最大项)展开式计算。此论文给出了用布尔表示法描述串-并联结构时可靠度的计算方法, 另外指出: 为了提高冗余系统的可靠度, 结构函数为单调函数是十分必要的。在这种情况下, 可靠度由极小可靠状态向量(或极小不可靠状态向量)决定(上述论文见本书4.4, 4.5节)。同时进一步阐明了, 非串、并联结构的可靠度由与接续矩阵正交的闭路矩阵决定, 闭路(最小路集)对应于极小可靠状态向量。另一方面, 对上面所列举的莫斯科维茨和麦克林(Moskowitz & Mclean)的最佳冗余分配法作了改进。

如上所述, 这篇论文的内容相当于三篇论文。有关单调结构的部分, 由Z.W.伯恩鲍姆(Birnbaum), J.D.埃萨里(Esary)和S.C.桑德斯(Saunders)推荐, 在“Multi-component systems and structures and their reliability, Technometrics, Vol.3, No.1, pp.55-77, 1961”上发表以来, 此结构就被称为相关结构。

以后，我回京都大学指导川井洋一、尾崎俊治、朝仓立行、桥本忠夫等几个学生，于1964年再度进一步研究可靠性，并与古贺义亮（现防卫大学教授）联名发表了“Basic properties and a construction method for fail safe logical system, IEEE Trans. on Electronic Computers, Vol. 16, No.3, pp.282-289, 1967”，因而有幸被公认为安全运行理论的开拓者。

在此之前，在我的研究室从事可靠性研究的学生有井上康宽、上田徹、大塚宏一、大谷夏夫、加藤直树、田村哲也、小川研之、桥本谨嗣、黑川秀文、大八木纯正、冈田恭一、长谷川就一、福島康之、大嶋真司、正木秀尚、大西匡光、竹岛宽之、德田喜久雄、中岛秀和、稻村荣一、冈部公治、关光穗、池田善彦、糸永慎一、大西一正、瀬川良之等。此外，尾崎俊治、中川覃夫、河合一、畠山一实等几位在我的研究室完成了如下几篇博士论文：

尾崎俊治：Studies on System Analysis and Synthesis by Markov Renewal Processes(1970)。

中川覃夫：Studies on Optimum Maintenance Policies for Reliable System(1977)。

河合一：Studies on Optimal Maintenance Policies for Improvements of System Reliability (1978)。

畠山一实：Studies on Reliability Analysis for Fault-tolerant Systems (1981)。

这些研究的大致区别如下。以尾崎俊治为首，确切地导入并应用了半马尔可夫过程，率先完成多单元并列、待机冗余系统的可靠性及维修性分析，这种方法广泛应用于几乎所

有系统的分析中。中川草夫陆续提出新的最佳维修问题，并应用微分-差分最优化方法给出解决方法。他被誉为该领域的开拓者。河合 一是多元状态恶化系统研究的创始人之一，他把二元状态模型进一步扩展为实际模型，并吸收了马尔可夫决策过程理论，确立了研究最佳维修原则的方法。大西匡光继续该项研究。最近两人根据内部状态不可能直接观察到这一事实为假定条件，开拓了在信息不完全情况下的维修问题的研究领域。另一方面，畠山一实继承古贺义亮及高冈忠雄的失效安全的研究，推进了故障容限系统的可靠性分析。以大野胜久助教授为中心，提出了应用排队行列式方法的计算机网络分析方法，此方法看作是关于广义可靠性评价的研究。我的研究室被誉为具有世界水平的可靠性研究中心之一。之所以如此，无不仰仗以上年轻研究人员的卓越工作。

这些研究成果过于专业化，所以本书对其中大部分不得不割爱了。相反，却在我们研究室的成果之外，摄取了国际上取得的许多主要研究成果。在此，对本书列举的，获得可靠性理论的优秀业绩的诸位深表敬意。另外，本书写成后，承蒙京都大学的助手大西匡光精心校正，他指出本书的多处笔误与欠妥之处；又劳日本科技连出版社诸位编辑辛勤工作，在此一并深表谢意。

三根 久

1984年1月22日

可靠性技术缩写词表

CR	事后替换
DFR	故障率减小
DFRA	平均故障率减小
IFR	故障率增大
IFRA	平均故障率增大
MTBF	平均无故障工作时间
MTTF	平均故障时间
MTTFF	首次故障的平均时间
NBU	新设备比半新设备可靠度高
NWU	新设备比半新设备可靠度低
PR	预防替换

符 号 表

第一章

$R(t)$	可靠度函数
$F(t)$	故障时间的分布函数, $F(t) + R(t) = 1, \bar{F}(t) = 1 - F(t)$
$\lambda(t)$	故障率函数
$e^x, \exp(x)$	x 的指数函数
λ	故障时间为指数分布的故障率
$G(t)$	维修度函数

第二章

T, X	表示故障时间的随机变量
$f(t)$	故障时间的概率密度函数
$\Lambda(t)$	累积故障函数
$\ln x$	x 的自然对数
$E(X)$	随机变量 x 的均值 (期望值)
$V(X)$	随机变量 X 的方差
$E(X^k)$	随机变量 X 的 k 阶矩
$k!$	自然数 k 的阶乘, $k \times (k-1) \times \dots \times 2 \times 1$
$\Gamma(\alpha)$	参数 α 的伽玛函数
$N(\mu, \sigma^2)$	均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布
$F(x/t)$	役龄为 t 的设备的故障时间的分布函数
χ^2	χ^2 (卡方) 分布
$F^n(t)$	分布函数 $F(t)$ 的 n 次卷积
$M(t)$	更新函数

$m(t)$	更新密度
$\bar{A}(s)$	函数 $A(t)$ 的拉普拉斯变换
δ_t	表示在时刻 t 的役龄的随机变量
γ_t	表示在时刻 t 的残剩寿命的随机变量

第三章

θ	指数分布时故障时间的均值 ($\theta = 1/\lambda$)，平均故障时间
t_k	第 k 次故障的时间
$L(t_1, \dots, t_n)$	$t_1, t_2, \dots, t_n$ 的似然函数
$\hat{\theta}, \hat{\lambda}$	θ, λ 的估计量
$\chi^2(2r; \epsilon)$	自由度为 $2r$ 的 χ^2 分布的上侧 100ϵ 百分位点
$F_{m_2}^{m_1}(p)$	自由度为 m_1, m_2 的 F 分布的上侧 100ϵ 百分位点
R_U, R_L	关于可靠度的置信区间的上、下限
$L(\theta)$	θ 的 OC 曲线
$V(t)$	总工作时间

第四章

$\binom{n}{k}$	$n! / k!(n-k)!$
$\phi(x)$	系统的结构函数
$\alpha(x)$	最小路集的结构函数
$\beta(x)$	最小割集的结构函数
$x \vee y$	$\max\{x, y\}$
$x \wedge y$	$\min\{x, y\}$
$\prod_{i=1}^n x_i$	$\min\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$$\prod_{i=1}^n x_i \quad \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$h(p)$ 关联系统的可靠度

第五章

$o(h)$	h 的高阶无穷小
$g(t)$	维修时间的概率密度函数
μ	维修时间为指数分布的维修率 (修理率)
$1/\lambda$	平均故障时间
$1/\mu$	平均维修时间
$A(t)$	系统的瞬时利用率
A	系统的稳定利用率
ρ	λ/μ

第六章

$C(x)$	役龄 x 为 PR 时平均单位时间的预期替换费用
x^*	当 $C(x)$ 为最小时 x 的值
p_{ij}	劣化系统的 1 阶状态转移概率 (离散时间)
L_i	在状态 i 劣化系统的平均单位时间的运转费用
C_i	在状态 i 劣化系统的替换费用
λ_{ij}	劣化系统的状态转移率 (连续时间)

目 录

符号表

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 可靠性与可靠度	1
1.3 可靠度与故障率	4
1.4 可靠性与维修性	8
1.5 可靠性理论及其应用	10
第二章 故障发生的统计规律	14
2.1 引言	14
2.2 典型故障时间的分布函数	19
2.2.1 指数分布	19
2.2.2 伽玛分布	20
2.2.3 威布尔分布	22
2.2.4 正态分布	24
2.2.5 对数正态分布	26
2.2.6 二重指数分布	27
2.3 故障时间的分布函数的分类	29
2.4 故障发生与随机过程	33
2.4.1 指数分布时	33
2.4.2 一般分布时	38
第三章 可靠性数据分析	46
3.1 引言	46
3.2 故障率与平均故障时间的估计 (指数分布时)	48
3.2.1 点估计法	48
3.2.2 定数截尾方式的点估计法	49
3.2.3 区间估计法	51

3.3 威布尔分布的参数估计	54
3.3.1 定数截尾时威布尔参数的点估计	55
3.3.2 定时截尾时威布尔参数的点估计	56
3.3.3 威布尔参数的区间估计	56
3.4 可靠度的估计 (非参数估计)	57
3.4.1 可靠度的点估计	58
3.4.2 不可靠度的区间估计	58
3.4.3 可靠度的区间估计	60
3.5 统计抽样检验法 (定数截尾时)	61
3.5.1 定数截尾检验法	61
3.5.2 定时截尾检验法	64
3.5.3 基于二项分布的检验法	67
3.6 序贯概率比抽样检验法	69
第四章 系统可靠性分析	77
4.1 引言	77
4.2 串联、并联系统的可靠性	78
4.2.1 串联系统	78
4.2.2 并联系统	80
4.2.3 n 中取 k 的表决系统	82
4.2.4 串联、并联混合系统	83
4.3 待机冗余系统的可靠性	85
4.3.1 2 单元系统	86
4.3.2 n 单元系统	88
4.4 一般系统的结构分析	90
4.4.1 结构函数	90
4.4.2 关联系统	92
4.4.3 结构函数的导出	93
4.5 关联系统的可靠度	100
4.5.1 结构函数与可靠度	100
4.5.2 可靠度的计算	101