

可靠性技术丛书—3

可靠性分布与统计

[日] 市田 嵩 铃木和幸 著

机械工业出版社

本书是日本科技连可靠性技术丛书之3。主要介绍概率论及数理统计在可靠性工程中的应用,较系统地阐述了如何利用实验室或现场的数据对产品的寿命分布和可靠性特征量作出合理的统计推断。内容精练,理论严谨,针对性强,并附有典型的例题,是学习可靠性理论比较理想的读物之一。

本书可作为工科大专院校高级学生的参考书,还可供从事可靠性技术工作的广大工程技术人员使用和参考。

日科技连信頼性工学シリーズ第3卷

信頼性の分布と統計

市田 嵩 鈴木和幸 著

日科技连出版社

1984年

* * *

可靠性技术丛书—3

可靠性分布与统计

〔日〕市田 嵩 鈴木和幸 著

郭建英 沙巨大 译

高金钟 校

*

责任编辑:秦起佑

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)

北京通县电子外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 10³/₈·字数 219千字

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数 0,001 3,650 ·定价:4.80元

*

ISBN 7-111-00637-2/TM·92

译者序

可靠性是衡量机电产品质量的一项重要指标。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、安全性研究和产品质量保证的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，使产品的可靠性有显著提高。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，对日本科技连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
一九八七年二月

《可靠性技术丛书》出版序言

1958年日本科技连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。

日本科技连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，日本科技连出版社决定出版《日本科技连可靠性技术丛书全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，为了使从事规划、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。读者可以分册阅读，

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。

《日本科技连可靠性技术丛书》

主编

市田 嵩

川崎义人

盐见 弘

前 言

根据实际测得的数据来评价产品的可靠性，尚需要进行各种不同的数据处理，这就是可靠性统计。在日本从探讨可靠性的初期（1950年）开始就对可靠性数据的统计解析进行了研究。经过整理曾出版了以下几本书。

嶋田正三：「信頼性と寿命試験」，日科技连出版社，1964。

真壁肇：「ワイブル確率紙の使い方」，日本規格協会，1966。

日科技连（编）：「信頼性テーマの解析」，日科技连出版社，1967。

可以认为，这些书直到现在仍被人们喜爱，帮助许多技术人员解决了数据解析问题。此后又介绍了利用奈尔森（Nelson）累积危险坐标纸的解析方法；在日本大量地利用威布尔概率纸，危险坐标纸；其结果对提高可靠性起了很大作用。详细的步骤也作了整理，并收集在本套丛书的第4卷内。另外在第5卷中还对数据的收集方法及分析的思路作了解释和说明。但是有关其它的可靠性统计方法在日本已作详细介绍的书籍还很少，正式发表的具体实例也不多。

可靠性数据分析的关键，可以认为有以下4点：（1）推断总体的寿命分布；（2）根据截尾样本数据进行估计和假设检验；（3）顺序统计量的处理；（4）非参数估计的统计理论的应用。

本书为了说明可靠性工程技术人员容易疏忽的统计方面的思想方法，而用了较多的篇幅，直到第五章前半部分仍是

围绕这一意图。因此，对于已具备统计素养的人员请从5·6节不假定寿命分布时的可靠度估计法开始阅读。而对于统计知识比较熟悉但缺少可靠性预备知识的读者应该从第三章开始阅读。

在本书中尽可能地多举例题，并留有练习，请读者进行验证。因为根据作者对企业的工程技术人员及学生的指导经验，确认这是掌握这门知识的极其必要的环节。在消化例题完成练习的同时，应对尚不明白的问题深入研究。

本书的作者分工情况如下：第一、二、四、七章及第六章的6.2.1的(4)和(5)、6.2.2和6.3节以及数学补充知识由市田编写；第三、五、六章及各章末的练习题由铃木编写。尽量使用统一的术语和符号也是本书贯穿始终的原则。

在完成本书之际，特向协助审阅原稿，并给予亲切指教并提出了宝贵意见的东京工业大学管理工程学科的宫川雅已先生致谢。并对允许摘引难得的数值表的Nancy Mann女士及Thoman, Bain和Antle先生表示感谢。

此外对援助完成威布尔分布BLUE系数表的金沢工业大学CAI室的酒井稔一研究员及协助完成例题的数值计算的东海大学情报数理学科的宫本武先生表示谢意。

最后向负责本书编辑工作的日本科技连出版社编辑部的各位先生表示衷心感谢。

市田 嵩

1984年8月2日

缩写词表

BLIE	最佳线性不变估计量
BLUE	最佳线性无偏估计量
CFR	恒定型故障模式
DFR	递减型故障模式
IFR	递增型故障模式
MLE	极大似然估计量
MSE	均方误差
MTBF	平均无故障工作时间
MTTF	平均寿命
UMVUE	一致最小方差无偏估计量

符号表

总体及其特征量

X	是表示故障出现（待观测事件发生）的时间，重复次数，行驶距离等的随机变量。
x, t	表示时间，重复次数的变量； X 的实现值。
$R(t)$	可靠度函数。
$F(t)$	不可靠度函数（累积分布函数）。
$f(t)$	概率密度函数。
$\lambda(t)$	故障率函数。
$H(t)$	累积危险故障函数。
$E(X), E[X]$	X 的数学期望（均值）。
$\text{Var}(X),$ $\text{Var}[X]$	X 的方差。
$\text{Cov}(X, Y),$ $\text{Cov}[X, Y]$	随机变量 X, Y 的协方差。
MTTF	平均寿命
MTBF	平均无故障工作时间。
B_{10}	B_{10} 寿命（寿命分布的10%分位点）。
x_{p}, t_p	寿命分布的100· p %分位点（ p 点）。

样品本和数据

n	样本容量（数据个数）。
r	样本中的故障数据个数。
x_i, t_i	样本的每个测得值（ $i = 1, \dots, n$ ）
$x_{(j)}, t_{(j)}$	顺序统计量（把 x_i 或 t_i 从小到大依次排列的量）。
T	观测数据的总和（包括截尾数据）。

\bar{x}, \bar{t} 样本均值。

S 偏差平方和 ($S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - T^2/n$)。

V 无偏方差 ($V = S / (n - 1)$)。

CV 样本的变差系数。

\bar{t} 几何平均 ($\bar{t} = \prod_{i=1}^n t_i^{1/n}$)。

δ_i 表示故障 ($\delta_i = 1$) 或截尾 ($\delta_i = 0$) 状态的变量。

N_i 第 i 个区间起点时刻的残存数。

d_i 第 i 个区间内的故障数。

w_i 第 i 个区间内的截尾数。

\hat{q}_i 在第 i 个区间起点尚未发生故障的产品而在 i 区间内发生故障的概率 q_i 的估计值。

分布类型和参数 (参阅表 3.4)

$\mathcal{E}(\lambda)$ 参数为 λ 的指数分布

λ 指数分布的参数, 表示故障率。

θ 指数分布的 $MTBF$ ($\theta = \frac{1}{\lambda}$)

$W(m, \eta)$ 形状参数为 m , 尺度参数为 η 的双参数威布尔分布。

m 威布尔分布的形状参数。

η 威布尔分布的尺度参数。

t_0 $t_0 = \eta^m$ (t_0 有时也表示任务时间)。

$WE(u, b)$ 位置参数为 u , 尺度参数为 b 的二重指数分布。

u } 将服从威布尔分布的变量 t 变换成 $x = \ln t$ 时, 得到

b } $u = \ln \eta, b = 1/m$ 。

$N(\mu, \sigma^2)$ 均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布。

$LN(u, \sigma^2)$	对数正态分布。
$G(k, \lambda)$	伽玛分布。
$B(N, p)$	二项分布。
$\mathcal{P}(\lambda T)$	普阿松分布。
$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_p)$	表示参数 $\theta_1, \dots, \theta_p$ 的向量。

估计和检验

$\hat{\theta}$	参数 θ 的估计量。
$\hat{R}(t_0)$	工作时间为 t_0 时刻的可靠度 $R(t_0)$ 的估计量。
θ_L, R_L	θ, R 的置信下限 (区间估计的下限)。
θ_U, R_U	θ, R 的置信上限 (区间估计的上限)。
α, ε	风险率 (显著性水平, 第 1 类错误的概率)。
$1 - \alpha, 1 - \varepsilon$	置信度 (置信水平)。
$1 - \beta$	检验功效 (β 表示第 2 类错误发生的概率)。
ϕ	自由度。
K_α	标准正态分布 $N(0, 1)$ 的上侧 $100 \cdot \alpha\%$ 分位点。
$t(\phi, \alpha)$	t 分布的双侧 $100 \cdot \alpha\%$ 分位点 (其上侧为 $100 \cdot \alpha/2\%$ 分位点)。
$\chi^2(\phi, \alpha)$	自由度为 ϕ 的 χ^2 平方分布的上侧 $100 \cdot \alpha\%$ 分位点。
$F(\phi_1, \phi_2; \alpha)$	自由度为 ϕ_1, ϕ_2 的 F 分布的上侧 $100 \cdot \alpha\%$ 分位点。
UMVUE	一致最小方差无偏估计量。
MLE	极大似然估计量。
BLUE	最佳线性无偏估计量。
BLIE	最佳线性不变估计量。
$B[\hat{\theta}]$	估计量 $\hat{\theta}$ 的偏倚。
MSE	均方误差 (二方差 + (偏倚) ²)。
$I[\theta], I$	费歇耳信息量 (矩阵)。
H_0	原假设。
H_1	备择假设。

L	似然函数。
λ	似然比统计量。

函数、常数

$\Gamma(x)$	伽玛函数。
$\psi(x)$	二伽玛函数。
$\psi'(x)$	三伽玛函数。
$B(p, q)$	贝塔函数。
$\binom{n}{r}, {}_n C_r$	n 中取 r 的组合数。
γ	欧拉常数 ($= 0.577215664\dots$)。
π	圆周率 ($= 3.141592653\dots$)。
e	自然对数的底 ($= 2.718281828\dots$)。

目 录

符号表	XV
第一章 绪论	1
第二章 概率基础	5
2.1 集合	5
2.2 阶乘、排列、组合	7
2.3 伽玛函数及其相关的函数	9
2.3.1 伽玛函数	9
2.3.2 贝塔函数	10
2.3.3 多伽玛函数	
2.3.4 不完全伽玛函数	12
2.4 概率	13
2.4.1 术语的定义	13
2.4.2 概率的公理和性质	14
2.4.3 相互独立事件	15
2.4.4 互不相容事件	16
2.4.5 利用余事件的计算	16
2.5 随机变量和分布函数	18
2.6 多维概率分布	20
2.6.1 二维分布函数及边缘分布	20
2.6.2 多维连续型分布	21
第二章的习题	23
第三章 故障、寿命的概率分布	25
3.1 直方图和累积频数图	25
3.2 可靠度函数	26

3.3 可靠性和维修性中常用的分布	39
3.3.1 指数分布	39
3.3.2 威布尔分布	43
3.3.3 伽玛分布	47
3.3.4 极值分布和二重指数分布	48
3.3.5 正态分布	49
3.3.6 对数正态分布	53
3.4 多变量的概率分布	54
3.5 故障次数的分布	56
3.5.1 二项分布	56
3.5.2 普阿松分布	57
第三章的习题	60
第四章 统计量的分布	61
4.1 总体、样本和数据	61
4.2 时间数据的分析方法	63
4.2.1 完全样本数据的例	63
4.2.2 计量截尾数据的例	65
4.2.3 计数截尾数据的例	67
4.3 样本和、均值及无偏方差的分布	70
4.3.1 \bar{x} 和 V 的计算	70
4.3.2 样本和及 \bar{x} 分布的均值与方差	71
4.3.3 样本偏差平方和 S 及无偏方差 V 的均值与方差	74
4.3.4 样本均值 \bar{x} 的分布	75
4.3.5 小结	75
4.4 模拟统计量的分布及其期望值的讨论	76
4.4.1 随机数	78
4.4.2 用反函数法产生样本数据	80

4.4.3	模拟举例	81
4.4.4	产生截尾样本	83
4.5	顺序统计量的分布及其期望值	83
4.5.1	$t_{(i)}$ 的分布	84
4.5.2	$t_{(i)}$ 的期望值	85
4.6	指数分布的统计量	86
4.6.	伽玛分布和 χ^2 分布	86
4.6.2	F 分布	89
4.6.3	来自指数分布总体的定数截尾样本	89
4.6.4	来自指数分布总体的定时截尾样本	91
4.6.5	小结	93
第四章的习题		95
第五章 可靠性特征量的估计和检验方法		96
5.1	问题的提出	96
5.2	寿命数据的分类	100
5.3	关于参数及其估计、检验的术语	104
5.4	估计量优劣的判别基准	109
5.4.1	无偏性	109
5.4.2	有效性	110
5.4.3	充分性	117
5.4.4	完备性	119
5.4.5	一致性	120
5.4.6	易算性	122
5.5	寿命特征量的估计法	122
5.5.1	极大似然估计法	122
5.5.2	矩法	126
5.5.3	线性估计法	127

5.6 不假定寿命分布时的可靠度估计法	128
5.6.1 根据按区间划分的数据进行估计	128
5.6.2 根据不按区间划分的数据进行估计	135
5.7 概率纸估计法	161
5.7.1 威布尔概率纸及其使用方法	161
5.7.2 随机截尾数据的概率纸和累积危险纸的使用方法	165
5.7.3 使用威布尔概率纸和累积危险纸的注意事项	169
第五章的习题	174
第六章 基于寿命分布类型的估计和检验	175
6.1 指数分布的估计和检验	175
6.1.1 完全样本数据, 定数截尾数据的估计和检验	175
6.1.2 定时截尾数据的估计和检验	183
6.2 威布尔分布的估计和检验	190
6.2.1 完全样本数据, 定数截尾数据的估计	190
6.2.2 完全样本数据, 定数截尾数据的点估计量的比较	226
6.2.3 基于完全样本数据、定数截尾数据的检验	233
6.2.4 基于定时截尾数据的估计和检验	236
6.3 正态分布, 对数正态分布的估计和检验	239
6.3.1 正态分布的估计和检验	239
6.3.2 对数正态分布的估计和检验	249
6.4 伽玛分布的估计和检验	256
6.5 基于随机截尾数据的估计和检验	261
6.5.1 基于广义定时截尾数据的估计和检验	262
6.5.2 竞争风险模型的随机截尾数据的解析	264
第六章的习题	272
第七章 可维修系统的参数估计	273
7.1 可靠度增长模型	275