

工程设计中的 可靠性

[美] K.C.卡帕 L.R.兰伯森 著

机械工业出版社

工程设计中的可靠性

〔美〕K.C.卡帕 L.R.兰伯森 著

张智铁 译

孙训方 校



机械工业出版社

497657

本书较全面地介绍了可靠性工程的基本知识，重点为产品设计和检验中的定量可靠性问题：可靠性量度，静态可靠性模型，概率设计方法，随机变量的组合，干涉理论，与时间相关的应力-强度模型，动态可靠性模型，可靠性估计，序贯寿命检验，巴叶斯可靠度，可靠性最优化。

本书可作为大专院校有关工程专业特别是机械工程专业的可靠性教材，也可供从事设计和可靠性工作以及管理工作的工程技术人员参考。

**Reliability in
Engineering Design**

K. C. Kapur

L. R. Lamberson

John Wiley & Sons

1977

* * *

工程设计中的可靠性

〔美〕 K. C. 卡帕 L. R. 兰伯森 著

张智铁 译

孙训方 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168^{1/32}·印张 18^{1/4}·字数 473 千字

1984 年 2 月北京第一版·1984 年 2 月北京第一次印刷

印数 0,001—9,600·定价 2.70 元

*

统一书号：15033·5357

译 序

在科学技术现代化的今天，产品（包括元件、设备和系统等）日益大规模化和复杂化。于是近三十年来，产生并发展起来了一门包含许多工程技术的“可靠性工程”。这样，人们就能自觉地进行可靠性设计、分配、预测、检验和分析，并把可靠性活动贯穿于产品的计划、设计、制造、使用、维修的全过程。近年来的发展表明，可靠性工程已经成为系统工程的一个重要内容。

掌握可靠性的基本知识，无论对于工程技术人员还是管理人员，都是势在必行的了。为此，一本内容系统、详略适度、论述透彻、联系实际的书该是何等重要。《工程设计中的可靠性》是我见到的这方面的书中较好的一部。值得指出的是，本书既可分别按照可靠性设计和可靠性检验这两个重点独立来读，又可通过基础理论将这两个部分组成为一个有机的整体。至于各章的内容及其相互联系，在原书序中已有详细说明，就不赘述了。原书中有多处较明显的错误已加改正，此书中未一一加注。

教学之余，成此译稿，既感高兴，尤觉惶恐。译者既学识粗疏，又短于切磋，故错误疏漏，在所难免。除深深感谢编辑审校者外，凌树森同志参加部分审校工作，在此谨表谢意。敬希读者，惠予指正，亦望专家，不吝赐教。

译者 一九八〇年十二月二十九日于长沙左家塋

序

在本书的写作过程中，我们试图为设计工程师或可靠性工程师提供能使用的可靠性技术基本知识，重点是产品设计和检验中的可靠性定量问题。许多来自底特律工业界并听过我们的可靠性课程的学生，希望我们写这本书。因为他们大多数是有经验的工程师，所以在帮助我们阐述解决产品可靠性问题的方法上，作出了大量的贡献。我们深深地感谢这些学生。

象这样的一本书，它可以包括很多的课题并可按各种不同的次序来叙述。这里我们要解释一下为什么选择了本书的这种特殊的顺序。

第一章为可靠性导言。它研究了在可靠性定量中碰到的一些问题，并介绍了总的可靠性规划所需的一些要点。第二章讨论和定义了可靠性检验中使用的一些术语及其量度，同时介绍了定量的和非定量的术语。人们常常滥用或有点含糊地使用这些术语，因此我们力图提供确切而完整的定义，这将促进学生准确地使用可靠性术语。当把第三章——介绍简单的静态可靠性模型——与第二章组合起来时，学生将对可靠性术语有一个基本的理解。

一般公认第二章和第三章可以互换，并且在某些教学情况下先介绍第三章可能要方便些。我们选择第二章这个比较难的内容作为开始，然后再把第三章容易消化的内容教给学生。我们希望第三章提供的这个缓冲期将给学生一些时间以熟悉第二章的概念和定义。

因为可靠性从根本上来讲是一个设计参数，在设计阶段必须把它引入到系统中去，故在本书中我们较早地注意了与可靠性有关的设计过程，给学生一些估计和检验设计可靠性的方法。就日常实践而论，设计可靠性乃是一个比较新的领域，这个领域强调了在其他的设计方面改进可靠性技术的必要性。

在任何系统设计中，设计变量和参数实质上都是随机的，因此

显而易见,决定元件 \ominus 应力和强度的因素也是随机的。这意味着在评价设计的可靠性状况时,必须考虑到系统变量和参数的随机性质。第四章则讨论了设计的概率方法和可靠度。第五章和第六章详细阐述了从可靠性观点分析复杂系统所需的方法。特别是,第五章讨论了设计中随机变量的组合并介绍了一些在统计偏差中有用的概念,这一章向学生揭示了设计可靠性所需的进一步的统计工作。第六章介绍在建立设计变量和参数的概率模型之后确定设计可靠度的方法。在第七章中,我们用一些简单的例子来说明设计可靠性方法。第八章则研究较高深的与时间有关的应力-强度模型问题。

在第九章中把动态可靠性模型与维护度概念放在一起进行讨论。我们认为,至此学生已经具有足够成熟的统计知识,掌握这一章的内容是容易的。

在新产品的发展中,继设计结束而来的是试验。因此,第十章和第十一章考虑了检验数据的可靠性估计问题。特别是第十章用指数分布作为基础模型,介绍了各种情况下的可靠性估计方法。对于每一种情况,清晰地叙述了为其正确应用所需作的一些假定。为供比较优秀的学生研读,在附录中还介绍了一些推导。类似地,在第十一章中使用了威布尔分布作为产品寿命模型,在这一章中将阐明图解法和分析法二者的使用。

第十二章牵涉到按序贯检验所推导的可靠性检验,并考虑了在实际应用中使用的方法和一些问题。

第十三章研究了用于产品检验的 Bayesian 统计推断这个新范畴。应该看到,在许多情况下设计工程师拥有大量的关于系统性能的先验知识。如果检验程序是有意义的,则必须把这些知识收集起来并加以定量。实际上,设计和检验工程师总是不自觉地使用了他们的先验知识,所以他们不需要采用为进行统计有效性检验所需的大样本。这一章汇集着产品检验的一些概念,介绍了有关的执行程序问题,并对如何利用这类先验知识作了说明。

\ominus “Component”在本书中译为“元件”或“零件”,对于机械系统来说,元件和零件的含义是相同的——译者注。

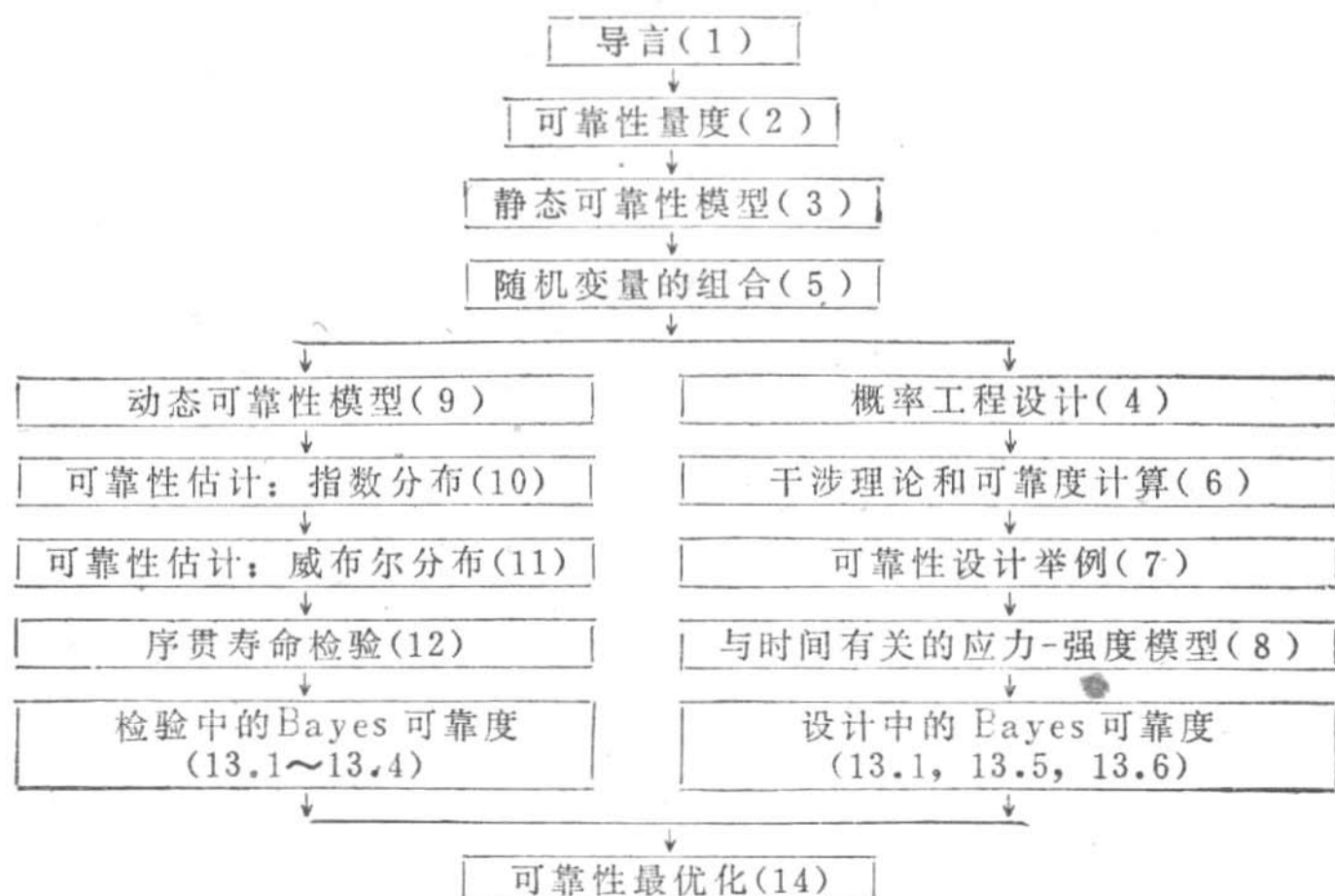
VI

解决工程设计和可靠性问题需要在许多方案之间进行综合权衡。设计特性取决于固定参数和可调参数。在第十四章中我们介绍了适用于可靠性和设计过程的最优化方法。这一章把许多权衡集中起来，无疑地，设计工程师必须把费用作为一个因素来考虑。由于理解问题的需要，我们把非线性最优化理论介绍给设计工程师。然而，为了完全了解这一章的内容，学生掌握好初步的最优化预备知识乃是有利的。

我们想推荐本书用作校内学分课程连续两学期的可靠性教材，或用作熟练工程师讨论班 80 学时非学分课程的教材。就一切情况而论，必须假定学生已经完成物理学科或工程科学的事先训练，并学习了至少一门、最好两门概率论与统计学的预备课程。

如果课程的重点为设计可靠性，则应完全包括第一到八、十三、十四诸章。而如果重点为可靠性检验，则可用第一到三、五、九到十四诸章来教授课程。这两个取决于重点的序列如表 A 所示。当然，对于一个学期或半个学年[⊖]的课程还有一些别的取材的可能性。所取的材料将最终取决于学生在统计学方面的基础知识、他们的教育要求和教授的兴趣。

表 A



[⊖] 这里讲的是每学年分为四个学期的“四学期制”——译者注。

我们已经发现，本教材适合于许多学科的学生。我们所授课的学生具有几乎每个工程学科以及数学和物理学的基础知识。

作者必须感谢曾经贡献出他们在可靠性方面的经验和知识的那些机构。我们在与通用汽车公司雪佛兰汽车分部、美国陆军装甲兵司令部和福特汽车公司的共同工作中得到了一些经验，这些经验在这本教科书的写作中是极有价值的。

我们要感谢工业工程和运筹学系研究生助教 V. Bawle 先生，他对我们的原稿和习题集提出了许多意见和批评。我们还必须衷心感谢大约五十位学生，他们通读了最后的原稿并发表了意见和批评。所有这些对我们帮助都很大。

K. C. 卡帕
L. R. 兰伯森

表1 主要国际单位制单位

量	单位名称	符号	表示式
加速度	米每二次方秒	...	m/s^2
平面角	弧度	rad	...
角加速度	弧度每二次方秒	...	rad/s^2
角速度	弧度每秒	...	rad/s
面积	平方米	...	m^2
密度	千克每立方米	...	kg/m^3
能	焦耳	J	$N \cdot m$
力	牛[顿]	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
长度	米	m	...
质量	公斤	kg	...
力矩	牛[顿]米	...	$N \cdot m$
功率	瓦[特]	W	J/s
压力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
时间	秒	s	...
速度	米每秒	...	m/s
体积, 固体	立方米	...	m^3
液体	升	l	$10^{-3}m^3$
功	焦耳	J	$N \cdot m$

表2 国际单位制词冠

系数	词	冠
	名称	符号
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^2	百	h
10	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ

表3 美国惯用单位及其国际单位制换算值

量	美国惯用单位	国际单位制换算值
加速度	ft/s ²	0.3048m/s ²
	in/s ²	0.0254m/s ²
面积	ft ²	0.0929m ² ①
	in ²	645.2mm ²
能 力	ft·lb	1.356 J
	kip	4.448kN
	lb	4.448N
	oz	0.2780N
长度	ft	0.3048 m
	in	25.40 mm
	mi	1.609km
质量	oz mass	28.35 g
	lb mass	0.4536kg
	slug	14.59kg
	ton	907.2kg
力矩	lb·ft	1.356N·m
	lb·in	0.1130N·m
惯矩, 面积	in ⁴	0.4162 × 10 ⁶ mm ⁴
质量	lb·ft·s ²	1.356kg·m ²
功率	ft·lb/s	1.356W
	hp	745.7W
压力或应力	lb/ft ²	47.88Pa
	lb/in ² (psi)	6.895kPa
速度	ft/s	0.3048 m/s
	in/s	0.0254 m/s
	mi/h(mph)	0.4470 m/s
	mi/h(mph)	1.609km/h
体积, 固体	ft ³	0.02832m ³
	in ³	16.3871cm ³ ②
液体	gal	3.7851
	qt	0.94641
功	ft·lb	1.356 J

① 原文误为0.929 m²——译者注。

② 原文误为1.609 km/h——译者注。

符号索引

第二章

- t ——故障前时间随机变量
- r. v. —— 随机变量
- p. d. f. —— 概率密度函数
- c. d. f. —— 累积分布函数
- $E(x)$ —— 随机变量 x 的期望值
- μ_x^* —— 随机变量 x 的期望值
- σ_x —— 随机变量 x 的标准偏差
- $F(t)$ —— 故障前时间分布函数
- $\bar{F}(t)$ —— 故障前时间分布函数的补函数, $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$
- $P(A)$ —— 事件 A 的概率
- $R(t)$ —— 可靠度函数, $R(t) = P[t \geq t]$
- $f(t)$ —— 随机变量 t 的概率密度函数
- $h(t)$ —— 风险函数
- z —— 标准正态随机变量
- $\phi(z)$ —— 标准正态随机变量的 p. d. f.
- $\Phi(z)$ —— 标准正态随机变量的 c. d. f.
- $\Gamma(n)$ —— 在 n 求值的伽马函数
- MTBF—— 平均故障间隔时间 (或平均故障间隔)
- MTTF—— 故障前平均时间 (或失效前平均时间)
- \approx —— 近似等于

第三章

- E_i —— 子系统 i 成功运转的事件
- R_i —— 子系统 i 的可靠度, $R_i = P(E_i)$
- R_s —— 系统可靠度
- Q_s —— 系统不可靠度, $Q_s = 1 - R_s$

第四章

- s —— 应力随机变量
- δ —— 强度随机变量
- R —— 元件可靠度
- \bar{R} —— 不可靠度, $\bar{R} = 1 - R$

- μ_s ——应力随机变量 s 的期望值
- \bar{s} ——应力随机变量 s 的期望值的估计值
- μ_δ ——强度随机变量 δ 的期望值
- $\bar{\delta}$ ——强度随机变量 δ 的期望值的估计值
- σ_s ——应力随机变量 s 的标准偏差
- σ_δ ——强度随机变量 δ 的标准偏差
- n ——安全系数, $n = \mu_\delta / \mu_s$
- V_δ —— δ 的变差系数, $V_\delta = \sigma_\delta / \mu_\delta$
- V_s —— s 的变差系数
- n_c ——中心安全系数, $n_c = \bar{\delta} / \bar{s}$
- n ——安全系数随机变量, $n = \delta / s$
- $V(x)$ ——随机变量 x 的方差

第五章

- $\text{cov}(x, y)$ —— x 和 y 的协方差
- ρ ——相关系数
- \sim ——左边的 $r. v.$ 服从右边的已知分布

第六章

- $f_s(\cdot)$ ——应力 $r. v. s$ 的 p. d. f.
- $f_\delta(\cdot)$ ——强度 $r. v. \delta$ 的 p. d. f.
- y ——干涉 $r. v.$, $y = \delta - s$
- \check{x} —— $r. v. x$ 的中位数值
- δ_0 ——强度 $r. v. \delta$ 的最小值
- $\beta(m, n)$ ——自变量为 m, n 的贝塔函数
- $\beta_x(m, n)$ ——自变量为 m 和 n 在 x 处截尾的不完全贝塔函数

第七章

- \bar{x} —— $r. v. x$ 期望值的估计
- τ ——剪切应力
- T ——力矩

第八章

- R_n —— n 次加载循环后的可靠度
- x_i ——第 i 次循环的应力 $r. v.$
- y_i ——第 i 次循环的强度 $r. v.$
- E_i ——第 i 次循环无故障发生的事件

VI

$g_i(y_i)$ ——强度 $r. v. y_i$ 的 P. d. f., $i = 0, 1, 2, \dots$

$f_i(x_i)$ ——应力 $r. v. x_i$ 的 P. d. f., $i = 0, 1, 2, \dots$

$\pi_i(t)$ ——在时间区间 $[0, t]$ 发生 i 次循环的概率

第九章

t_i ——第 i 个子系统故障前时间随机变量

$R_s(t)$ ——在时间 t 系统的可靠度

$Q_s(t)$ ——在时间 t 系统的不可靠度

O. R. ——运转准备状态

$A(t)$ ——有效度函数

$M(t)$ ——维护度函数

第十章

θ ——指数分布 $r. v.$ 的期望值, 通称 MTBF

λ ——故障率, $\lambda = 1/\theta$

B_r ——Bartlett 符合度检验的统计量, r 为故障数

$\chi^2_{\alpha, n}$ —— n 个自由度 χ^2 分布的 $100(1 - \alpha)$ 百分位数

$F_{\alpha, m, n}$ —— m 和 n 个自由度 F 分布 $r. v.$ 的 $100(1 - \alpha)$ 百分位数

T ——总的累积试验时间

r ——总的故障数

$\hat{\theta}$ —— θ 的估计值

δ ——最小寿命

第十一章

β ——威布尔形状参数或斜率

θ ——威布尔尺度参数或特征寿命

δ ——威布尔位置参数或最小寿命

μ'_k —— k 阶中心矩

$n p_j$ ——表示在大小为 n 的样本中, 在第 j 次顺序观察值之前总体故障部分的 $r. v.$

第十二章

H_0 ——零假设 (解消假设、原假设)

H_1 ——备择假设

$L_{k, n}$ —— θ_k 作为参数真实值的似然函数, $L_{k, n} = L(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta_k)$

O. C. ——工作特性曲线

第十三章

$P(A | B)$ ——已知 B 发生时事件 A 的条件概率

$f(x_1, x_2)$ ——随机变量 x_1 和 x_2 的联合 p. d. f.

$k(x_1 | x_2)$ ——已知 x_2 时 x_1 的条件 p. d. f.

$\hat{\theta}$ ——参数 θ 的估计值

T ——总的累积试验时间

第十四章

R_i ——元件或子系统的可靠度

n ——子系统数目

$c(\mu)$ ——与参数 μ 有关的费用函数

目 录

表 1 ~ 3

符号索引

第一章 导言	1
1.1 设计可靠性	1
1.2 可靠性管理	2
1.3 产品检验	3
1.4 可靠性和工效学	3
1.5 可靠性增长	4
1.6 设计审查、故障模式和缺陷树分析	4
1.7 可靠性简史	5
1.8 本书的范围	6
参考文献	6
第二章 可靠度量度	8
2.1 可靠度函数	9
2.2 期望寿命	10
2.3 故障率和风险函数	11
2.4 已知分布的可靠度和风险函数	15
2.5 风险模型和产品寿命	26
2.6 从实验数据估计风险函数、故障密度函数和可靠度函数	30
2.7 关于分布选择的一些说明	35
2.8 小结	46
练习	47
参考文献	52
第三章 静态可靠性模型	53
3.1 串联系统	54
3.2 并联系统	55
3.3 并联和串联组合	57
3.4 复杂系统分析	58
3.5 设计中的可靠性研究	60

XVI

3.6 小结	64
练习	65
参考文献	69
第四章 概率工程设计	70
4.1 概率设计方法	72
4.2 强度和应力分布	74
4.3 安全系数和可靠度	75
4.4 概率设计中的可靠度限界	84
4.5 小结	88
练习	88
参考文献	90
第五章 设计中随机变量的组合	92
5.1 随机变量的变换	93
5.2 随机变量的函数之期望与方差	95
5.3 正态随机变量的和与差	96
5.4 随机变量的函数的矩的计算	97
5.5 统计偏差	106
5.6 小结	109
练习	109
参考文献	115
第六章 干涉理论和可靠度计算	116
6.1 可靠度的一般表达式	116
6.2 应力和强度均为正态分布时的可靠度计算	119
6.3 应力和强度均为对数正态分布时的可靠度计算	123
6.4 应力和强度均为指数分布时的可靠度计算	129
6.5 强度为正态(指数)分布而应力为指数(正态)分布时的可靠度计算	129
6.6 强度和应力均为伽马分布时的可靠度计算	131
6.7 应力为正态分布而强度为威布尔分布时的可靠度计算	134
6.8 应力和强度均为威布尔分布时的可靠度计算	137
6.9 用于按经验决定的应力和强度的分布之图解法	138
6.10 极值分布下的可靠度计算	144
6.11 小结	149

练习	151
参考文献	154
第七章 可靠性设计举例	155
7.1 受拉零件设计	155
7.2 工字梁设计	157
7.3 承受扭矩的轴的设计	160
7.4 汽车发动机罩扭转门的设计	162
7.5 小结	173
练习	173
参考文献	175
第八章 与时间有关的应力-强度模型	176
8.1 应力-强度分类	179
8.2 在确定性的循环时间下对可靠度的计算	181
8.3 随机循环时间下的可靠度计算	188
8.4 在老化、循环损伤和累积损伤情况下的可靠度	193
8.5 小结	197
练习	197
参考文献	198
第九章 动态可靠性模型	199
9.1 串联系统及其模型	199
9.2 并联系统模型	203
9.3 备用冗余系统	204
9.4 均分载荷并联模型	209
9.5 系统有效性的量度	211
9.6 小结	215
练习	215
参考文献	218
第十章 可靠性估计: 指数分布	219
10.1 指数分布的统计特性	219
10.2 数据分析	223
10.3 平均寿命估计	236
10.4 假定一个零值最小寿命的故障前平均时间之置信区间	238
10.5 具有置信限的可靠度及百分位估计	243